

Атмосферски пренапони на надземним водовима – утицај модела елемената на резултате прорачуна

Младен Бањанин
Електротехнички факултет
Универзитет у Источном Сарајеву
Источно Сарајево, Босна и Херцеговина
banjanin@ymail.com

Сажетак—У овом раду је анализиран утицај модела елемената надземног вода на резултате симулација атмосферских пренапона у програмском пакету ЕМТР-АТР. Прорачуни су урађени у складу са међународним стандардима који се баве овом облашћу. Уочено је да модели појединих елемената имају веома изражен утицај на добијене резултате. Поред тога, у раду су предложене и вриједности константи за методу површине, као и оптималан број распона вода за прорачуне атмосферских пренапона.

Кључне ријечи-модели елемената; атмосферски пренапони; ЕМТР-АТР.

I. УВОД

Приликом израде нумеричких симулација атмосферских пренапона на надземним водовима често се поставља питање које моделе елемената користити и какву еквивалентну шему система примјенити? Најједноставнији одговор би био да се модели елемената и еквивалентне шеме преузму из научних радова публикованих у реномираним међународним часописима. Овакав приступ је добар у научној анализи проблема, али у инжењерској пракси показује више недостатака. Први и основни недостатак је тај што је потребно изузетно много времена да се уради преглед литературе, поготово у областима које се изучавају више деценија. Други проблем је што је реализација модела елемената веома често компликована и захтјева експертска знања из различитих области електроенергетике, као и напредан ниво знања кориштења различитих софтвера. Са циљем да се избјегну наведени проблеми могу да се користе међународни стандарди у којима су предложени модели елемената који су адекватни за инжењерске прорачуне, нпр. [1]-[5]. И у овом случају се појављују одређене компликације, прије свега због чињенице да се за један елемент предлаже више различитих модела. Циљ овог рада јесте да се покажу разлике у резултатима прорачуна које су последица примјене различитих модела елемената. Опширнија анализа овог проблема се може наћи у [6], а нешто другачији приступ анализи истог проблема у [7].

Сви резултати симулација који су приказани у раду су урађени у програмском пакету ЕМТР-АТР. Модели појединих елемената су развијени употребом програмског језика MODELS [8].

II. УЛАЗНИ ПОДАЦИ ЗА ПРОРАЧУН

У прорачунима атмосферских пренапона на надземним водовима постоје елементи које је битно моделовати, али и елементи који нису битни или су мање битни за прорачун. Модели појединих елемената су давно дефинисани и од тада па до данас се користе у непромјењеном облику. У овом раду је испитиван утицај сљедећих модела на резултате прорачуна: модел атмосферског пражњења, модел стуба надземног вода, модел уземљивача и модел прескока на ваздушној изолацији. У табели I су дефинисани основни модели и параметри елемената који су кориштени у прорачунима. Анализа осјетљивости резултата прорачуна на примјењене моделе елемената је рађена тако што је модел једног елемента вариран, а остали су били константни. На овај начин су поређени различити модели и испитиван је њихов утицај на резултате прорачуна.

ТАБЕЛА I. ОСНОВНИ МОДЕЛИ И ПАРАМЕТРИ ЕЛЕМЕНАТА КОЈИ СУ КОРИШТЕНИ У ПРОРАЧУНИМА

Модел елемената	
Елемент	Модел
Таласни облик струје грома	Троугаони
Импеданса канала грома	400 Ω
Модел стуба далековода	IEEE модел (2)
Модел уземљивача стуба	Константна отпорност
Модел прескока на ваздушној изолацији	Метод прогресивног лидера
Параметри елемената	
Елемент	Вриједност
Висина стуба	38 m
Висина вјешања фазног проводника	31 m
Карактеристична импеданса фазног проводника и заштитног ужета	482 Ω и 573 Ω
Дужина распона	200 m
Карактеристична импеданса стуба	135 Ω
Импеданса уземљења стуба	15 Ω

Таласни облик атмосферског пражњења у свим прорачунима је усвојен да буде 10/350 μs/μs [1]. Атмосферско пражњење је моделовано као реални струјни извор кога чине идеални струјни извор троугаоног таласног облика струје и карактеристична импеданса канала грома која је дефинисана у табели I.

III. УТИЦАЈ МОДЕЛА ЕЛЕМЕНАТА НА ВИСИНУ И ТАЛАСНИ ОБЛИК ПРЕНАПОНА НА НАДЗЕМНОМ ВОДУ

Сви прорачуни у овом поглављу (осим оних у секцији Д) су рађени тако што је претпостављено да надземни вод има довољно висок изолациони ниво да може да поднесе атмосферске пренапоне који се на њему појављују (није моделована појава повратног прекока на воду). На овај начин је могуће сагледати пуни таласни облик пренапона и амплитуду пренапона на воду без да они буду измјењени појавом повратног прескока.

A. Таласни облик струје грома

У раду су анализирана три модела таласног облика струје грома:

1. Троугаони талас [2],
2. Хајдлеров извор [9],
3. Сигре извор [3].

Троугаони таласни облик је најједноставнији за примјену у техничким прорачунима, али најслабије одговара реалном таласном облику струје грома.

Хајдлеров модел струје у каналу грома је у програму ЕМТР-АТР представљен преко израза (1):

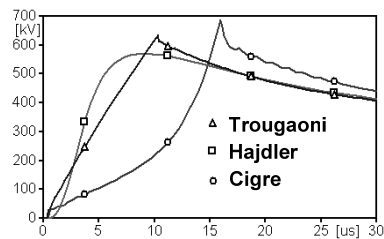
$$I(t) = I_M \times \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n} \times e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (1)$$

гдје су: I_M - амплитуда струје грома [кА], n - емпиријска константа (усвојена вриједност је 10), τ_1 - временска константа чела [μs], 19 μs за талас 10/350 $\mu\text{s}/\mu\text{s}$, τ_2 - временска константа зачеља [μs], 485 μs за талас 10/350 $\mu\text{s}/\mu\text{s}$, t - вријеме [μs].

Хајдлеров извор је погодан када се на једноставан начин жели моделовати конкавно чело струјног таласа.

Аналитички израз Сигре струјног извора је компликован јер су чело и зачеље таласа дефинисани преко два различита израза. Са друге стране овај модел најбоље одговара реалном таласном облику струје грома. Детаљан опис и математички модел овог типа струјног извора се може наћи у [3]. Анализа осјетљивости показује значајан утицај максималне стрмине струје чела таласа на прорачунате резултате. У овом раду је претпостављено да је максимална стрмина чела овог типа струјног таласа двоструко већа од стрмине таласа линеарно растућег чела.

Типични облици пренапонског таласа на конзоли стуба у случају удара грома у распон далековода за различите моделе струјног таласа су приказани на Сл. 1. Различити модели таласног облика струје грома дају различите таласне облике пренапона и различите максималне вриједности пренапона.



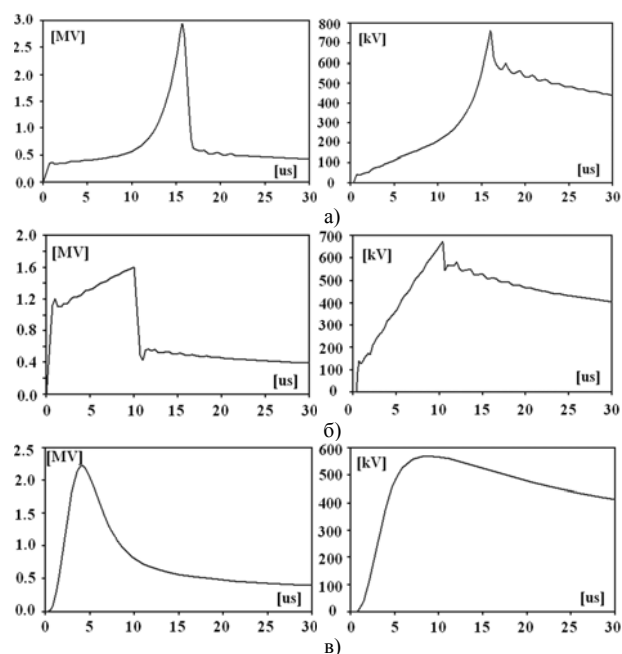
Слика 1. Таласни облици пренапона на конзоли стуба у зависности од примјењеног модела струјног извора

У табели II су приказане амплитуде атмосферских пренапона и тренуци њиховог појављивања у функцији модела струје грома. Амплитуда струје пражњења је 100 кА. Услед различитог таласног облика пренапона разликују се и тренуци када се максималне вриједности појављују.

ТАБЕЛА II. УТИЦАЈ ТАЛАСНОГ ОБЛИКА СТРУЈЕ АТМОСФЕРСКОГ ПРАЖЊЕЊА НА АМПЛИТУДУ ПРЕНАПОНА НА НАДЗЕМНОМ ВОДУ

Мјесто пражњења	Таласни облик струје грома	Амплитуда пренапона [kV]	Тренутак максимума [μs]
Распон	Cigre	762	16
	Троугаони	673	10.38
	Heidler	570	9
Врх стуба	Cigre	1260	15.7
	Троугаони	1100	10
	Heidler	958	7.3

Таласни облици пренапона за случај када се атмосферско пражњење одвија у средину распона заштитног ужета су приказани на Сл. 2. Очигледан је велики утицај модела таласног облика струје грома на добијене резултате.



Слика 2. Таласни облици пренапона у тачки удара грома (лијево) и на конзоли стуба (десно) за таласни облик атмосферског пражњења типа а) Cigre б) троугаоног в) Heidler

Б. Карактеристична импеданса канала грома

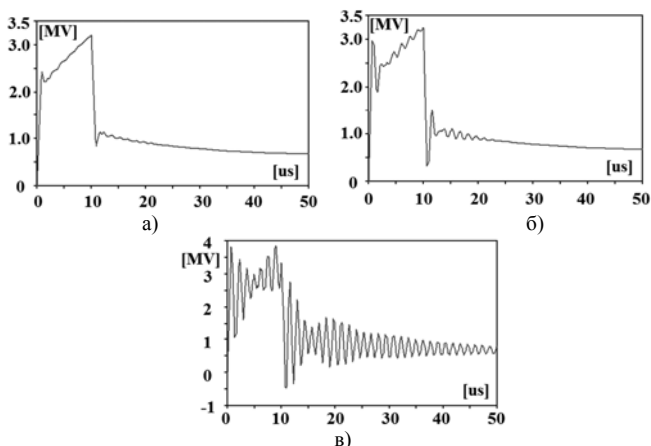
У [2] је предложена бесконачна вриједности карактеристичне импедансе канала грома. Резултати мјерења [10] показују да карактеристична импеданса канала грома има коначну вриједност. У [11] је предложено да се усвоји вриједност између 600 Ω и 2500 Ω, при чему се типично усваја вриједност од 1000 Ω. Ниже вриједности карактеристичне импедансе канала грома одговарају ударима грома са већом амплитудом струје. У [12] је за карактеристичну импедансу канала грома усвојена вриједност од 400 Ω.

Утицај вриједности карактеристичне импедансе канала грома на висину пренапона на конзоли су приказани у табели III. Прорачуни су рађени за случај када се пражњење са амплитудом струје од 100 kA одвија у средину распона. Тренутак када се максимални пренапон појављује је исти за све вриједности карактеристичне импедансе стуба.

ТАБЕЛА III. УТИЦАЈ ВРИЈЕДНОСТИ КАРАКТЕРИСТИЧНЕ ИМПЕДАНСЕ КАНАЛА ГРОМА НА АМПЛИТУДУ ПРЕНАПОНА НА НАДЗЕМНОМ ВОДУ

Амплитуда струје пражњења	Карактеристична импеданса канала грома [Ω]	Амплитуда пренапона [kV]
100 kA	400	673
	1000	688
	бесконачна	721
200 kA	400	1340
	1000	1370
	бесконачна	1450

Таласни облици пренапона у тачки атмосферског пражњења у средини распона за различите вриједности карактеристичне импедансе канала грома су приказане на Сл. 3. Смањење вриједности карактеристичне импедансе канала грома смањује максималне пренапоне у систему и смањује осцилације у прорачунима. Утицај овог параметра на резултате прорачуна је много мање изражен него утицај таласног облика струје пражњења.



Слика 3. Таласни облик пренапона у тачки удара грома за сљедеће вриједности карактеристичне импедансе канала грома а) 400 Ω б) 1000 Ω и в) бесконачна

В. Стуб далековода

Стуб далековода се према IEEE препоруци [4] моделује карактеристичном импедансом која се рачуна према изразу (2), при чему је брзина простирања таласа кроз стуб једнака 0.85 пута брзина простирања свјетлости:

$$Z_t = 30 \cdot \ln \left(\frac{2(h^2 + r^2)}{r^2} \right) \quad (2)$$

У [2] су предложене различите формуле за прорачун карактеристичне импедансе канала грома као што су изрази (3) и (4):

$$Z_t = 60 \cdot \ln \left(\frac{\sqrt{2}h}{r} \right) \quad (3)$$

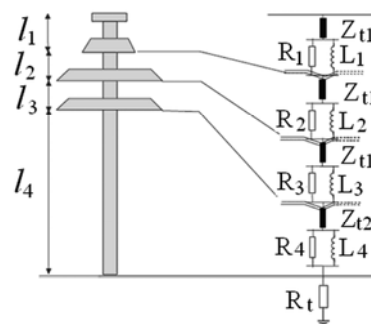
$$Z_t = 60 \cdot \ln \left(\operatorname{ctg} \left[0.5 \cdot \arctan \left(\frac{r_{avg}}{h} \right) \right] \right) \quad (4)$$

гдје су: h - висина стуба [m], r - еквивалентни полупречник ноге стуба [m], r_{avg} - средњи еквивалентни полупречник ноге стуба [m] дефинисан преко израза (5):

$$r_{avg} = \frac{r_1 h_2 + r_2 (h_1 + h_2) + r_3 h_1}{h} \quad (5)$$

гдје су: r_1 - еквивалентни полупречник ноге стуба [m], r_2 - еквивалентни полупречник средњег дијела стуба [m], r_3 - еквивалентни полупречник темеља стуба [m], h_1 - висина од основе до средњег дијела стуба [m], h_2 - висина од средњег дијела до врха стуба [m].

Нешто компликованији модел стуба далековода (тзв. „multy-story“) је дат у [12] и усвојен у [2], а приказан је на Сл. 4. Параметри модела се рачунају користећи релације дате у [12]. Потребно је нагласити да изрази који су дати у [2] садрже грешке и због тога не могу да се користе!



Слика 4. „Multy-story“ модел стуба надземног вода

У табели IV су приказане прорачунате вриједности параметара различитих модела стуба далековода. Са Z_c и v су редом означене карактеристична импеданса стуба и брзина простирања таласа по стубу. Максимални пренапони на конзоли стуба су приказани у табели V и рачунати су са параметрима модела стуба из табеле IV.

ТАБЕЛА IV. ПРОРАЧУНАТЕ ВРИЈЕДНОСТИ ПАРАМЕТАРА РАЗЛИЧИТИХ МОДЕЛА СТУБА НАДЗЕМНОГ ВОДА

Модел стуба	Zc [Ω]	v [m/μs]	Остали параметри
(2)	132	255	-
(3)	132	300	-
(4)	147	300	-
Multy-story модел	220, 150	300	R ₁ =40; R ₂ =4.6; R ₃ =4.6; R ₄ =33.5; [Ω] L ₁ =10.1; L ₂ =1.2; L ₃ =1.2; L ₄ =8.5; [μH]

Примјеном најсложенијег модела стуба, „multy-story” модела, добијају се највиши пренапони на конзоли стуба, али су разлике мале. Највећи проблем овог модела јесте компликована замјенска шема. Други озбиљан проблем јесте што поједини параметри модела имају фиксне вриједности што са физикалног аспекта није коректно. Такође, овај модел стуба је извођен за стубове са вертикалним распоредом проводника што значи да није погодан за „Y” и порталне стубове. Тренутак када се максимални пренапон појављује је исти за све моделе стуба.

ТАБЕЛА V. МАКСИМАЛНИ ПРЕНАПОНИ НА КОНЗОЛИ СТУБА У ФУНКЦИЈИ ПРИМЈЕЊЕНОГ МОДЕЛА СТУБА НАДЗЕМНОГ ВОДА

Мјесто пражњења	Модел стуба	Амплитуда пренапона [kV]
Распон	(2)	985
	(3)	966
	(4)	977
	Multy-story модел	1039
Врх стуба	(2)	1680
	(3)	1663
	(4)	1675
	Multy-story модел	1723

Г. Импеданса уземљења стуба далековода

Модел импедансе уземљења стуба далековода је веома важан за прорачуне атмосферских пренапона у ЕЕС-у и има велики утицај на резултате прорачуна. Најједноставнији начин моделовања импедансе уземљења стуба далековода је преко отпорности уземљења мјерене при ниској фреквенцији и малој амплитуди струје [2].

Када струја велике амплитуде протиче кроз уземљивач стуба потребно је моделовати ефекат јонизације тла што се може учинити преко израза (6) [3]:

$$R = \begin{cases} R_0, & I \leq I_g \\ \frac{R_0}{\sqrt{1 + \frac{I}{I_g}}}, & I > I_g \end{cases} \quad (6)$$

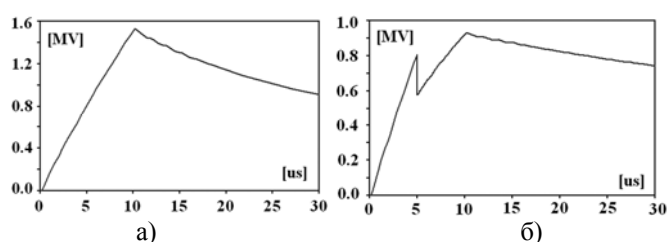
гдје су: R_0 - отпорност уземљења стуба при ниским фреквенцијама и малим вриједностима струја које се одводе са уземљивача [Ω], I - струја која протиче кроз уземљивач [kA], I_g - гранична вриједност струје при којој се јавља јонизација тла око уземљивача [kA] и која се рачуна преко израза (7):

$$I_g = \frac{E_0 \cdot \rho}{2\pi \cdot R_0^2} \quad (7)$$

гдје су: E_0 - јачина електричног поља при којој се јавља јонизација тла, препоручена вриједност је 400 kV/m [3], ρ - специфична електрична отпорност тла [Ωm],

У овом раду нису анализирани многобројни сложени импулсни модели уземљивача. Да би се користили такви модели потребно је знати димензије и облик уземљивача и потребно је развити специјализовани софтвер у ком ће се вршити прорачуни. Због сложености овај приступ није погодан за инжењерску праксу, а у случају потребно порачуне најчешће раде специјализовани консултанци.

Типични таласни облици пренапона на уземљивачу стуба добијени примјеном модела константе отпорности и модела који уважава појаву јонизације тла су приказани на Сл. 5.



Слика 5. Максимални пренапони на уземљивачу стуба далековода у случају када се он моделује а) као константна отпорност б) уважавањем појаве јонизације тла око уземљивача

Максималне вриједности пренапона на уземљивачу стуба у случају када је струја пражњења једнака 200 kA су приказане у табели VI. Појава јонизације тла око уземљивача знатно смањује максималне пренапоне на уземљивачу стуба, а самим тим и на конзоли стуба. Због тога је веома важно да се она моделује, поготово у случају када се прорачун ради са великим вриједностима специфичне електричне отпорности тла и великим вриједностима импедансе уземљења стуба.

ТАБЕЛА VI. УТИЦАЈ РАЗЛИЧИТИХ МОДЕЛА УЗЕМЉИВАЧА СТУБА НА МАКСИМАЛНЕ ПРЕНАПОНЕ КОЈИ СЕ НА ЊЕМУ ПОЈАВЉУЈУ

Мјесто пражњења	Таласни облик струје грома	Амплитуда пренапона [kV]	Тренутак максимума [μs]
Распон	Константна отпорност	868	0.99
	Модел који уважава појаву јонизације тла	637	0.775
Врх стуба	Константна отпорност	1490	1.68
	Модел који уважава појаву јонизације тла	857	1.11

Д. Прескочна карактеристика ваздушне изолације

Прескочна карактеристика ваздушне изолације се може моделовати преко три методе:

1. Волт – секундна карактеристика изолације (V-t),
2. Метод површине (EA),
3. Модел прогресивног лидера (LPM)

Примјена ове три методе описана је у [2],[3],[5],[6]. V-t крива се предлаже за стандардне облике пренапона, док се метод површине и модел прогресивног лидера предлажу и за стандардне и за нестандартне облике пренапона.

Волт – секундна карактеристика изолације (V-t)

Аналитички израз за V-t криву као модел прескока на ваздушној изолацији (8) је предложен у [13] и то за моделовање прескока приликом дјеловања стандардних ударних напонских таласа облика 1.2/50 $\mu\text{s}/\mu\text{s}$:

$$U(t) = K_1 + \frac{K_2}{t^{0.75}} = d \cdot \left(400 + \frac{710}{t^{0.75}} \right) \quad (8)$$

гдје су: K_1 и K_2 - емпиријске константе, d - дужина међуелектродног растојања [m], t - вријеме до прескока [μs].

Израз (8) је валидан за времена до прескока од 0.5 μs до 16 μs . Овај модел је прихваћен у скоро свим међународним стандардима [2]-[5].

Метод површине (EA)

Метод деструктивног ефекта је предложен у [2] преко израза (9) и то за изолационе размаке мање до 1.2 m:

$$DE = \int_{t_0}^{t_b} (u(t) - V_0)^k dt \quad (9)$$

У [14] се за константу k предлаже вриједност 1. У том случају, модел прескочне карактеристике ваздушне изолације се назива метод површине и има облик (10):

$$DE = \int_{t_0}^{t_b} (u(t) - V_0) dt \quad (10)$$

гдје су: $u(t)$ - тренутна вриједност напона [kV], V_0 - амплитуда напона испод које није могуће да се деси прескок [kV], t_0 - тренутак када примијењени пренапонски талас први пут превазиђе напон V_0 , t_b - тренутак прескока на изолацији, када је испуњен услов $DE \geq A_k$, гдје је A_k критична површина која узрокује прескок на изолацији.

Након поређења аналитичког модела са експерименталним резултатима предлажу се сљедеће оптималне вриједности константи V_0 и A_k :

$$V_0 = 0.934 \cdot U_{50\%} = 0.934 \cdot 530 \cdot d = 495 \cdot d \quad (11)$$

$$A_k = 520 \cdot d \quad (12)$$

гдје су: $U_{50\%}$ - 50% прескочни напон [kV], d - дужина ваздушног размака [m].

Прескок у ваздушном размаку се јавља када је испуњен услов $DE \geq A_k$.

Метод прогресивног лидера (LPM)

Метод прогресивног лидера је заснован на моделовању стварних физикалних процеса електричних прескока у

ваздуху између двије електроде [15]. Постоје различити изрази за рачунање брзине лидера, али према [2],[3],[15] може се користити израз (12):

$$v = 170 \cdot d \cdot \left[\frac{u(t)}{d-l} - E_0 \right] \cdot e^{(0.0015 \cdot \frac{u(t)}{d})} \quad (13)$$

гдје су: d - дужина међуелектродног растојања [m], l - дужина лидера [m], $u(t)$ - тренутна вриједност напона [kV], E_0 - критична јачина електричног поља [kV/m], препоручена вриједност је 545 kV/m.

Према овом моделу, прескок се дешава када је задовољен услов $l \geq d$, гдје се дужина лидера (l) рачуна као $l = v \cdot t$.

Утицај модела прескока на ваздушној изолацији на резултате прорачуна

У табели VII су приказани резултати прорачуна утицаја модела прескочне карактеристике ваздушне изолације надземног вода на струју у каналу грома која проузрокује појаву повратног прескока. За разлику од свих претходних прорачуна у овом случају је моделован прескок на ваздушној изолацији и одређивана је струја у каналу грома која узрокује квар, а нису рачунати максимални пренапони. У истој табели је приказан и утицај броја распона надземног вода у околини тачке удара грома на добијене резултате.

ТАБЕЛА VII. УТИЦАЈ МОДЕЛА ПРЕСКОЧНЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ ВАЗДУШНЕ ИЗОЛАЦИЈЕ И БРОЈА РАСПОНА У ЕКВИВАЛЕНТНОЈ ШЕМИ НАДЗЕМНОГ ВОДА НА СТРУЈУ У КАНАЛУ ГРОМА КОЈА УЗРОКУЈЕ ПОЈАВУ ПОВРАТНОГ ПРЕСКОКА

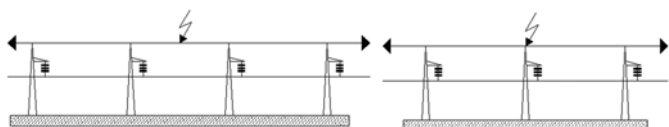
Напонски ниво и растојање између икришта изолаторског ланца	Мјесто пражњења	Број распона (стубова)	Модел прескока и струја у каналу грома која узрокује повратни прескок [kA]		
			V-t	EA	LPM
110 kV и 0.96 m	Распон	1	64	74	70
		3	76	94	96
		5	76	94	96
		9	76	94	96
	Врх стуба	(1)	34	38	38
		(3)	46	60	60
		(5)	48	60	60
		(9)	48	60	60
220 kV и 1.61 m	Распон	1	106	121	118
		3	126	156	160
		5	127	158	161
		9	127	158	161
	Врх стуба	(1)	56	62	64
		(3)	78	100	98
		(5)	78	102	100
		(9)	78	102	100

У складу са резултатима из табеле VIII могуће је одредити оптималан број распона далековода у еквивалентној шеми. У случају пражњења у средину распона потребно је моделовати два сусједна распона у односу на мјесто удара грома (укупно 3 распона у еквивалентној шеми), док је у случају удара грома у врх стуба потребно моделовати два сусједна стуба далековода

у односу на мјесто пражњења (укупно 3 стуба у еквивалентној шеми). Битно је нагласити да овај аспект моделовања није дефинисан у међународним стандардима (у [5] је наведено да се треба моделовати неколико распона у околини мјеста пражњења).

Струје у каналу грома које узрокују појаву повратног прескока су много мање у случају удара грома у врх стуба него у распон. То је логично и очекивано јер се у случају пражњења у врх стуба највећи дио струје затвара преко стуба и његовог уземљивача у тло подижући напон конзоле. Такође се закључује да модел $V-t$ криве даје ниже вриједности струје квара у односу на EA методу или LPM модел. Моделовање прескока примјеном $V-t$ криве треба избјегавати јер је она изведена за стандардне ударне напонске таласе облика $1.2/50 \mu s/\mu s$ и није погодна за нумеричке прорачуне гдје се јављају пренапони неправилног облика.

Оптималне еквивалентне шеме надземног вода за прорачуне атмосферских пренапона са аспекта броја стубова и распона су приказане на Сл. 6. На лијевој и десној страни су приказане завршне импедансе чија је улога да моделују заштитну ужад и тако спријече појаву рефлектованих таласа који у стварности не постоје.



Слика 6. Оптималне замјенске шеме далековода за случај удара грома у средину распона (лијево) или у врх стуба (десно)

IV. ЗАКЉУЧАК

У раду је извршена анализа утицаја различитих модела елемената на резултате симулација урађених у програмском пакету EMTP-ATP. Поређени су различити модели елемената који су предложени у међународним техничким документима. Показано је примјењени модели елемената могу имати велики утицај на резултате симулација. Основни закључак рада је да модел $V-t$ криве изолације треба избјегавати у прорачунима због одступања добијених резултата у односу на резултате добијене у случају примјене других модела прескока. $V-t$ крива је изведена за стандардне ударне напонске таласе облика $1.2/50 \mu s/\mu s$ тако да није погодна за нумеричке прорачуне у којима се појављују пренапонски таласи неправилног облика. Због тога њена примјена није оправдана ни са физикалног становишта. Предложен је и оптималан број стубова, односно распона, надземног вода за прорачуне атмосферских пренапона. Анализа осјетљивости показује да нема потребе да се користи већи број стубова, чак ни у случају далековода са већом

импедансом уземљења, јер то нема утицаја на резултате прорачуна, а трајање симулација се продужава.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Protection against lightning – Part 1: General principles, International Standard IEC 62305-1, First edition, 2006-01.
- [2] International Standard IEC 60071-4: Insulation co-ordination - Part 4: Computational guide to insulation co-ordination and modeling of electrical networks, First edition 2004-06.
- [3] Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines, CIGRE Technical Brochure No. 63, 1991.
- [4] Working group IEEE Report, "A Simplified Method for Estimating Lightning Performance of Transmission Lines". IEEE Trans. Power App. Syst. Vol. PAS-104, pp 918-932, 1985.
- [5] CIGRE Technical Brochure No. 440. Use of surge arresters for lightning protection of transmission lines, December 2010.
- [6] M. S. Banjanin, M. S. Savic, "Some aspects of overhead transmission lines lightning performance estimation in engineering practice", Int. Trans. Electr. Energ. Syst., Vol. 26, Issue 1, pp. 79-93, January 2016.
- [7] M. S. Banjanin, M. S. Savic, J. Tuševljak, "Modelovanje atmosferskih prenapona na nadzemnim vodovima", ЕТРАН 2014, стр. ЕЕ1.5. 1-6, Врњачка Бања, јун 2014. године.
- [8] MODELS in ATP, language manual, L. Dubé, February 1996.
- [9] F. Heidler, "Analytische blitzstrom funktion zur LEMP-berechnung", 18th Int. Conf. Lightn. Protec. (ICLP), Germany, pp. 63-66, 1985.
- [10] Vladimir A. Rakov, "Transient response of a tall object to lightning", IEEE Trans. Electromagn. Compat. Vol. 43, No.4, pp. 654-661, 2001.
- [11] B. N. Gorin, A. V. Shkilev, "Measurements of lightning currents at the Ostankino tower". Elektrich. No. 8, pp. 64-65. in Russian, 1984.
- [12] Masaru Ishii, Eiichi Ohsaki, Tatsuo Kawamura, Kaneyoshi Murotani, Teruya Kouno, Takemitsu Higuchi, "Multistory transmission tower model for lightning surge analysis", IEEE Trans. Power Del. Vol. 6 No. 3, pp. 1327-1335, 1993.
- [13] M. Darveniza, F. Popolansky, E. R. Whitehead, "Lightning Protection of UHV Transmission Lines", Electra, No. 41, pp. 39-69, 1975.
- [14] R.O. Caldwell, M. Darveniza, "Experimental and Analytical Studies of the Effects of Non-Standard Waveshapes on the Impulse Strength of External Insulation". IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS - 92, pp.1420-1428, 1973.
- [15] 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 accuracy predetermination methods". IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 4, No.2, pp. 1379-1392, 1989.

ABSTRACT

In this paper influence of the elements models to calculated lightning surges at overhead power lines is presented. Elements models are used from international technical documents. Calculations are performed in EMTP-ATP software. It is concluded that some element models have strong influence to the estimated results. Consants for equal area method are suggested and optimum numbers of spans in equivalent circuits are presented.

LIGHTNING SURGES AT OVERHEAD POWER LINES – INFLUENCE OF THE ELEMENTS MODELS TO THE ESTIMATED RESULTS

Mladen Banjanin