

УТИЦАЈ АМПЛИТУДЕ СТРУЈЕ АТМОСФЕРСКОГ ПРАЖЊЕЊА И УГИБА УЖЕТА НА ВЕЛИЧИНУ АТРАКТИВНЕ ЗОНЕ НАДЗЕМНОГ ВОДА INFLUENCE OF LIGHTNING STRIKE CURRENT AMPLITUDE AND SAG OF WIRE TO THE OVERHEAD LINE ATTRACTIVE AREA

Младен Бањанин,
Милан С. Савић, Електротехнички факултет у Београду

Садржај – У раду се анализира утицај амплитуде струје атмосферског пражњења и угиба ужета на величину атрактивне зоне вода. Представљен је специјализовани програмски пакет за прорачун угрожености водова и постројења од атмосферских пражњења. Упоредени су резултати прорачуна у случају када се у обзир узима утицај амплитуде струје атмосферског пражњења на величину атрактивне зоне надземног вода у односу на случај када се тај утицај занемарује. При прорачуну се у обзир узима утицај угиба ужета.

Abstract – In this paper, influence of lightning strike current amplitude and sag of wire to the overhead transmission line attractive area is analyzed. Software for lightning performance estimation is presented. Results of calculation when attractive area is calculated as current dependent and current independent are compared. Sag of the wire is consider in calculation.

1. УВОД

У задњих 50 година развијено је више метода за процјену ризика квара изолације опреме у постројењима и годишњег броја прескока на водовима услед атмосферских пражњења. Данас се углавном користе два приступа координацији изолације, а то су класични и статички метод. Класични метод координације изолације се састоји од тога да се прорачунава максимални пренапон и упоређује са подносивим напонам изолације. Код статистичког приступа координацији изолације амплитуда и стрмина струје атмосферског пражњења се узимају као случајне величине, задате одговарајућим густинама вјероватноће појављивања. Специјализовани програмски пакет који ће бити описан у раду има могућност приступа проблему координације изолације и на класичан и на статистички начин.

2. ЕЛЕМЕНТИ СПЕЦИЈАЛИЗОВАНОГ ПРОГРАМСКОГ ПАКЕТА

Основни циљ код креирања експертних система је да се људско знање и искуство пренесе у рачунарски програм, који може много брже и ефикасније да извршава неопходне прорачуне од човјека.

Специјализовани програмски пакет [1-4] је креиран тако да се приликом формирања шеме параметри прорачуна аутоматски подешавају на оптималну вриједност. На тај начин програм води корисника кроз процедуру креирања шеме, подешавања параметара прорачуна до приказивања добијених резултата. Прије почетка формирања еквивалентне шеме уносе се параметри елемената који ће касније бити нуђени као „препоручени“. Корисник може да прихвати понуђене вриједности параметара или да их промијени. Приликом прорачуна угрожености система од атмосферских

пражњења могу се дефинисати три врсте параметара које имају најизраженији утицај на добијене резултате:

- параметри пражњења,
- еквивалентна шема вода и постројења,
- параметри прорачуна.

За све три групе параметара експертни систем аутоматски нуди вриједности које су према аутору најпогодније у том случају. Дате вриједности се могу промијенити у складу са новим сазнањима или у складу са специфичношћу датог проблема.

Већина постојећих специјализованих програмских пакета не нуди аутоматски вриједности параметара и из тог разлога је рад корисницима без искуства отежан. Програмски пакет описан у раду те проблеме превазилази на следећи начин:

1. када се додаје нови елемент у шеми он се аутоматски везује на претходно додати елемент,
2. приликом избора називног напона система аутоматски се одређују V-t криве пресечног напона за изолацију водова, као и подносиви ударни напон изолације елемената,
3. параметри елемената у шеми имају аутоматски понуђене вриједности које одговарају називном напону система (димензије стубова, параметри ужади и каблова...),
4. вријеме трајања прорачуна, корак прорачуна, број симулација у статистичком приступу се аутоматски одређују,
5. приликом избора одводника пренапона аутоматски се нуде одводници који су предвиђени за дати напонски ниво.

Постоји више институција које се баве систематским сакупљањем и обрадом параметара атмосферских пражњења. У програму се могу изабрати параметри према приједлогу неке од тих институција (IEEE, CIGRE). Параметре пражњења је могуће модификовати ако се жели истраживати осјетљивост резултата на њихове вриједности. Програм има могућност прорачуна броја испада вода због појаве индукованих пренапона.

3. УТИЦАЈ АМПЛИТУДЕ СТРУЈЕ АТМОСФЕРСКОГ ПРАЖЊЕЊА НА ВЕЛИЧИНУ АТРАКТИВНЕ ЗОНЕ ВОДА

Атрактивна зона надземног вода представља појас на хоризонталној површини земље у коју би се догађала пражњења када вода не би било. Широко је примјењен начин прорачуна величине атрактивне зоне вода која зависи само од висине стубова и угиба ужета. Опште прихваћена формула за прорачун годишњег број удара у вод дужине 100 km има облик (1):

$$n_{1god,100km} = N_g \cdot A_e = 0.1(2R_{ud} + b)N_g \quad (1)$$

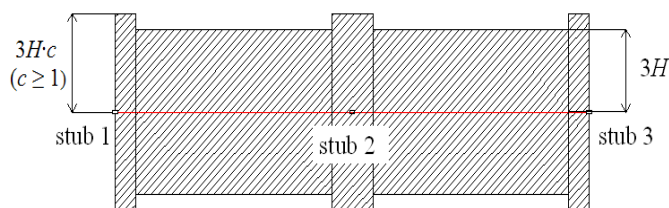
N_g – годишња густина пражњења по km^2 површине,

A_e – атрактивна површина вода [km^2],

R_{ud} – величина ударног растојања [m],

b – хоризонтално растојање између заштитних ужади или фазних проводника (ако је вод без заштитних ужади) [m].

Ударно растојање се дефинише као растојање од главе скоковитог лидера у процесу развоја атмосферског пражњења и објекта у који се то пражњење догађа (дужина последњег скока скоковитог лидера). При прорачуну броја удара у вод усваја се просјечно ударно растојање као цјелобројни умножак ефективне висине стуба (висина стуба умањена за двије трећине угиба). За стубове се узима повећање атрактивне зоне до 30 % због њихове геометрије. Атрактивна површина вода посматрана на овакав начин има изглед приказан на слици 1.



Слика 1. Класичан начин посматрања атрактивне површине вода

Иако је овакав начин посматрања атрактивне површине вода широко примјењиван у пракси, он није у сагласности са електрогеометријским моделом према коме ударно растојање зависи од амплитуде струје атмосферског пражњења. Према [6], за објекте чија је висина између 10 и 60 m, може се користити израз (2) за прорачун величине ударног растојања у метрима које зависи од струје пражњења:

$$R_{ud} = 0.67 I^{0.74} H^{0.6} \quad (2)$$

H – ефективна висина вода [m],

I – амплитуда струје атмосферског пражњења [kA].

Општи облик израза (2) дат је са (3):

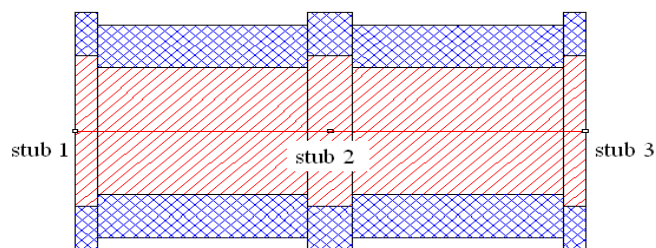
$$R_{ud} = a I^c H^b + D \quad (3)$$

при чему константе a , b , c и D према различитим ауторима имају вриједности дате у табели I.

Табела I – Вриједности коефицијената a , b , c и D из израза (3)

Аутор	a	b	c	D
Eriksson [6]	0.84	0.6	0.74	0
Rizk [8]	1.57	0.45	0.69	0
Tarchini [9]	0.03	1	1	$3h^{0.7}$
Ait – Amar & Berger [10]	3	0.2	2/3	0

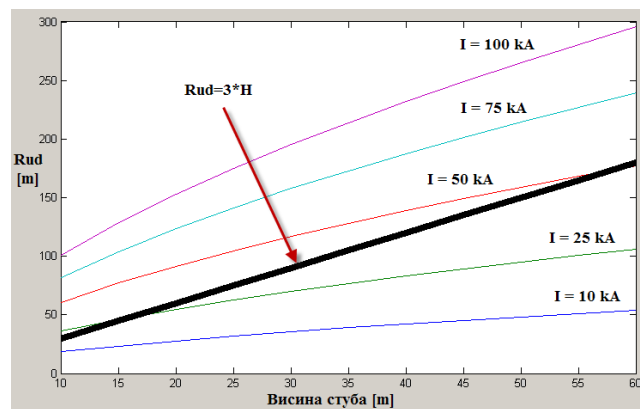
Изразом (2), односно изразом (3), се приликом прорачуна величине атрактивне зоне вода у обзир узима амплитуда струје пражњења. Атрактивна зона вода се са амплитудом струје пражњења мијења као на слици 2.



Слика 2. Повећање атрактивне површине вода са повећањем струје атмосферског пражњења

Црвеном бојом на слици 2. осјенчена је атрактивна површина вода у случају пражњења амплитуде I_{g1} , а плавом бојом повећање атрактивне површине у случају пражњења амплитуде I_{g2} , при чему је $I_{g2} > I_{g1}$.

На слици 3. је дато поређење вриједности ударног растојања у зависности од висине стуба, при различитим амплитудама струје атмосферског пражњења, у случају када се ударно растојање рачуна преко израза (2) и као цјелобројни умножак висине стуба.



Слика 3. Зависност ударног растојања од висине стуба за различите вриједности амплитуде струје атмосферског пражњења

4. УТИЦАЈ УГИБА УЖЕТА НА ВЕЛИЧИНУ АТРАКТИВНЕ ЗОНЕ ВОДА

У изразу (2) са H је означена ефективна висина вода која се добија када се од висине стуба одузму двије трећине угиба ужета. На тај начин се вод посматра као да заштитна ужад у распону немају угиб, али је угиб узет у обзир преко смањења висине вода. Ради повећања тачности прорачуна годишњег броја испада водова услед атмосферских пражњења у обзир је потребно узети утицај угиба заштитног ужета на величину атрактивне зоне вода.

Познато је да се једначина ланчанице може записати у облику (4):

$$y = A_0 \operatorname{ch}\left(\frac{x - C_1}{A_0}\right) + C_2 \quad (4)$$

гдје су A_0 , C_1 и C_2 константе чија вриједност се израчунава на основу унесених вриједности максималног угиба и висине вјешања ужета на стубовима. Са y је означен угиб ужета на растојању x од првог стуба у посматраном распону. Вриједност константе A_0 се рачуна преко израза (5):

$$A_0 = \frac{d^2}{8f} \quad (5)$$

d – дужина распона [m],

f – максималан угиб заштитног ужета у посматраном распону [m].

Константе C_1 и C_2 редом се одређују преко израза (6) и (7):

$$C_1 = \frac{d - 2A_0 \log(B + \sqrt{B^2 + 1})}{2} \quad (6)$$

$$C_2 = H_1 - A_0 \operatorname{ch}(B) \quad (7)$$

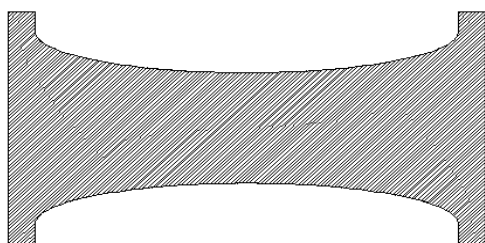
гдје је:

$$B = \frac{H_1 - H_2}{2A_0 \operatorname{sh}\left(-\frac{d}{2A_0}\right)} \quad (8)$$

H_1 – висина тачке вјешања ужета на почетку распона [m],

H_2 – висина тачке вјешања ужета на крају распона [m].

На слици 4. приказан је изглед атрактивне површине вода када се у обзир узме угиб ужета.



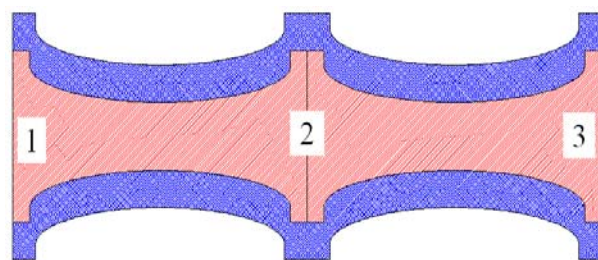
Слика 4. Атрактивна површина вода када се у обзир узме угиб ужета

5. АТРАКТИВНА ПОВРШИНА ВОДА

На основу претходно реченог могуће је приказати изглед идеалне атрактивне површине вода која се добија када се у обзир узме утицај угиба ужета и утицај амплитуде струје атмосферског пражњења на величину

атрактивне површине вода. На слици 5. приказана је идеална атрактивна површина вода у случају када се у обзир узме и угиб ужета и амплитуда струје пражњења.

Проблем у оваквом приступу прорачуну атрактивне зоне вода је што је угиб ужета преко аналитичког израза (4) дефинисан у бесконачно много тачака. Због тога се у програмском пакету мора одабрати коначан број тачака у којима ће се рачунати угиб. Тај број тачака се бира тако да даје довољно тачне резултате, а да се вријеме прорачуна много не повећа.

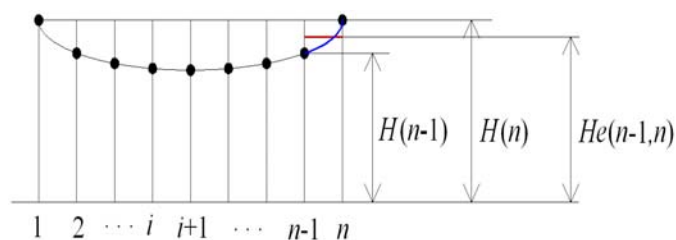


Слика 5. Атрактивна површина вода када се у обзир узме утицај амплитуде струје атмосферског пражњења и угиба ужета

Нека се распон између два сусједна стуба помоћу n тачака подијели на $n-1$ сегменат. Претпоставка која се уводи је да све тачке унутар било ког i – тог сегмента посматраног распона имају једнаку висину од тла. На слици 5. је илустрован начин прорачуна угиба тачака унутар произвољног $n-1$ сегмента. Висина почетне и крајње тачке у $n-1$ сегменту је одређена на основу израза (4). Нека су те висине редом једнаке $H(n-1)$ и $H(n)$. Еквивалентна висина тачака унутар $n-1$ сегмента једнака је аритметичкој средини висина прве и посљедње тачке унутар сегмента и одређена је изразом (9):

$$H_{e(n-1)} = \frac{H(n-1) + H(n)}{2} \quad (9)$$

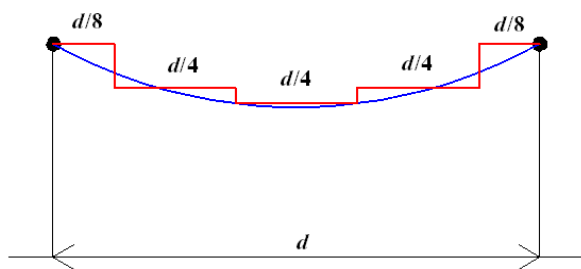
Сматра се да све тачке које се налазе унутар $n-1$ сегмента имају једнаку висину, тј. једнак угиб, и та висина одређена је преко израза (9).



Слика 6. – Начин прорачуна еквивалентне висине свих тачака унутар произвољног i – тог сегмента

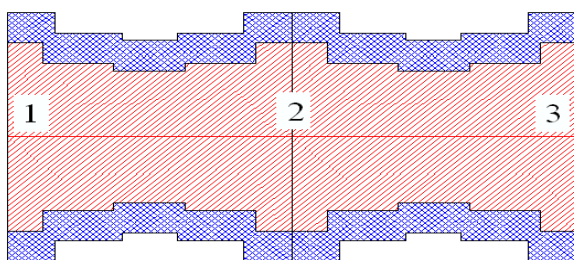
На слици 7. плавом линијом је одређен стварни положај тачака ланчанице, док је црвеном линијом означена апроксимација положаја тачака која се користи у програмском пакету.

Положај ланчанице прорачунава се у пет тачака како је и приказано на слици 7. и то на врху првог и посљедњег стуба у распону, и редом на растојањима $d/8$, $3d/8$, $5d/8$ и $7d/8$ од првог стуба у распону.



Слика 7. – Стварни изглед ланчанице (означен плавом бојом) и облик ланчанице који анализира програмски пакет (означен црвеном бојом)

Имајући у виду израз (9) и претходно описани начин прорачуна атрактивне површине вода изглед атрактивне површине вода је приказан на слици 8.



Слика 8. – Атрактивна површина вода коју анализира програмски пакет

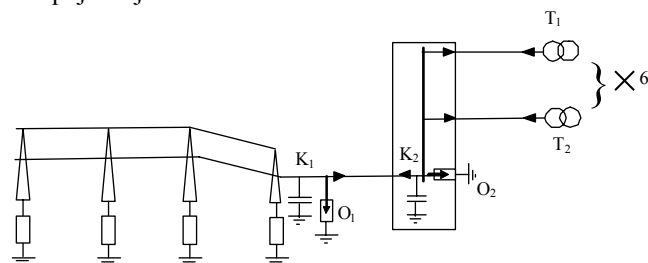
Као и у претходним случајевима плавом бојом је означено повећање атрактивне површине вода са повећањем амплитуде струје атмосферског пражњења. Као што се може примјетити са слике 7, висина тачака ланчанице у првом и последњем сегменту се не рачуна примјеном израза (9), него се узима да су висине тачака у првом и последњем сегменту једнаке висинама стубова. У [7] је показано да се сегменти ујади у околини стубова налазе унутар атрактивне зоне стуба тако да се практично сва пражњења која би се десила у први и последњи сегмент распона одвијају у врхове стубова.

6. УТИЦАЈ НАЧИНА РАЧУНАЊА АТРАКТИВНЕ ПОВРШИНЕ ВОДА НА РЕЗУЛТАТЕ ПРОРАЧУНА

Утицај начина прорачуна атрактивне површине вода на резултате прорачуна биће испитан на конкретном примјеру координације изолације хидроелектране са дугачким кабловским уводом у SF6 постројење са стране вода. Извршиће се прорачун средњег броја година без кvara изолације трансформатора (MTBF - Mean time between failures) и годишњег броја испада вода у случају струјно зависне и струјно независне атрактивне површине вода.

Одвођење енергије од електране се врши једним двосистемским 400 kV водом. Стубови вода су типа буре и имају два заштитна ужета. На слици 9. је дата замјенска шема анализираног система. Крајњи стуб са десне стране је портални стуб, иза кога се налазе одводник пренапона O_1 , капацитивности мјерних трансформатора и кабловске завршнице, евивалентирани једним кондензатором K_1 . 400 kV XLPE кабл који повезује вод и постројење је дуг 1340 m. Он се директном кабловском уводницом уводи у гасом изоловано постројење (GIS – Gas Insulated

Substation) које се штити одводником пренапона O_2 који је интегрисан у постројење. Од SF6 постројења до трансформатора води се 6 XLPE 400 kV каблова који се уводе у трансформаторе помоћу директних кабловских уводница, дужине од 50 до 75 m. У еквивалентној шеми каблови и трансформатори су груписани у двије групе са по 3 елемента. У шеми се трансформатори замјењују капацитетима својих намотаја. Висина стубова испред постројења је 60 m.



Слика 9. – Шематски приказ анализираног система

Ознаке на слици 9. имају сљедеће значење :

K_1 – Кабловска завршница 400 kV код улазног портала,

K_2 – Кабловска уводница у GIS са стране вода,

T_1, T_2 – Улаз у намотај вишег напона трансформатора.

Статистички прорачун координације изолације, који се у анализи користи, ради се на тај начин што се варира стрмина чела струје атмосферског пражњења које је усвојено да буде линеарно. За сваку стрмину струје пражњења се врши прорачун напона у појединим тачкама док подносиви напон изолације не буде превазиђен. Превазилажење вриједности напона дате $V - t$ карактеристиком изолације водова, односно подносивог напона изолације апарата декларисаног од стране произвођача сматра се кваром изолације. У тренутку када напон у чвору M постане већи од подносивог напона изолације, за стрмину чела струје атмосферског таласа S_i , при амплитуди струје у каналу грома I_{im} , формира се једна тачка криве опасних параметара за изолацију у чвору M .

$$I_{im} = S_i \cdot t_{im} \quad (10)$$

гдје је t_{im} вријеме од тренутка наилаaska напона у посматрану тачку до пробоја изолације у посматраној тачки.

Повећавање амплитуде струје се врши све док се за стрмину струје атмосферског пражњења S_i не одреде струје у каналу грома које изазивају пробој у свим чворовима у којима се анализира ризик пробоја. Тада се прекида прорачун за стрмину струје S_i и наставља се са наредном стрмином струје S_{i+1} .

Када су одређени парови тачака стрмина струје атмосферског пражњења S_i и амплитуда струје у каналу грома довољни да изазову пробој изолације у одређеној тачки, цртају се криве опасних параметара повезивањем парова стрмина струје – амплитуда. На тај начин се добија укупан број кривих опасних параметара који је једнак броју чворова у којима се одређује ризик кvara.

Ризик кvara изолације се одређује интегралењем густине расподеле амплитуда и стрмина струја

атмосферских пражњења за сваку од кривих опасних параметара посебно (11):

$$P_{Dm} = \int_{Dm} \omega(I_m, S) dIm dS \quad (11)$$

гдје су : $\omega(I_m, S)$ густина расподеле амплитуде и стрмине струје пражњења који изазивају пробој у тачки L_m, D_m област изнад m -те криве опасних параметара.

За систем на слици 9. је урађена анализа ризика квара опреме у систему у случају када се атрактивна зона вода рачуна као струјно зависна и струјно независна величина. Резултати су дати у табели II.

Табела II – Разлике MTBF опреме у систему када се атрактивна зона вода рачуна као струјно зависна и струјно независна величина

Висина стуба	60 m	
Атрактивна зона	Струјно зависна	Струјно независна
Ћвор	MTBF [година]	MTBF [година]
K1	1105.9	763.89
K2	1478.7	1021
T1	898320	591000

Примјећује се да је MTBF опреме у систему већи када се у обзир узима струјно зависна атрактивна површина вода. То значи да прорачун са струјно независном атрактивном површином вода даје критичније резултате у односу на прорачун са струјно зависном атрактивном површином. Резултати годишњег броја повратних прескока услед атмосферских пражњења на 100 km вода са слике 9. приказани су у табели III.

Табела III – Годишњи број прескока на 100 km вода у зависности од начина прорачуна атрактивне површине

Атрактивна зона	Струјно зависна	Струјно независна
Отпорност уземљења	Годишњи број повратних прескока на воду дужине 100 km	
15 Ω	0.96163	1.1892
20 Ω	1.2615	1.6944
30 Ω	2.1696	3.2102

Очигледно је да прорачун са струјно зависном атрактивном зоном вода даје мањи број испада услед атмосферских пражњења у односу на прорачун са струјно независном атрактивном површином вода. Те разлике су веће што је већа отпорност уземљења стубова, јер је тада потребна мања струја пражњења да изазове прескок на воду. Закључује се да за мале вриједности струје пражњења струјно независна зона вода даје критичније резултате, док у случају пражњења са струјом велике амплитуде прорачуни дају приближно идентичне резултате. Разлог томе је што код струјно независног прорачуна величине атрактивне површине вода мале струје пражњења имају нереално велико ударно растојање и већи број пражњења се одвија у вод. Самим тим се добија и већи број испада вода. С обзиром да је

висина стубова у шеми једнака 60 m и узимајући у обзир слику 3. закључује се да би тек при средњој вриједности амплитуде струје атмосферских пражњења од око 50 kA добијени резултати прорачуна били идентични. Пошто је средња вриједност струје негативних пражњења 30 kA [5], слиједи да ће струјно независан начин прорачуна атрактивне површине вода за висине стубова од 60 m давати знатно критичније резултате у поређењу са струјно зависним прорачуном атрактивне површине вода.

7. ЗАКЉУЧАК

На основу испитивања осјетљивости резултата на начин моделовања атрактивне зоне вода могу се извести следећи закључци:

А. Када се анализира ризик квара изолације опреме унутар 400 kV постројења, у случају када је ризик квара веома мали, критичнији резултати се добијају када се користи струјно независан модел,

Б. Када се рачуна годишњи број испада 400 kV надземних водова већи број кварова се добија струјно независним моделом.

То значи да онда када су струје пражњења које изазивају квар изолације мале, критичнији резултати се добијају струјно независним моделом. У случају када су струје пражњења које изазивају квар изолације велике, резултати прорачуна су приближно идентични.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] N. A. Katic, M. S. Savic, Technical and economical optimization of overhead power distribution line lightning protection, Proc. Inst. Elect. Eng.—Gen., Transm. Dist., vol. 145, no. 3, May 1998,
- [2] M. S. Savic, Engineering method for high-voltage substations lightning performance estimation, Proc. Inst. Elect. Eng., pt. C, vol. 136, no. 4, pp. 222–229, July 1989,
- [3] M. S. Savic, Z. Stojkovic, An expert system for high-voltage substation lightning performance estimation, IEEE Trans. Power Delivery, vol. 7, pp. 1223–1231, July 1992,
- [4] M. S. Savic and Z. Stojkovic, High voltage substation equivalent circuits in the lightning performance estimation, IEE Proc., Part C, Gener. Transm. Distrib., Vol. 141, No. 2, March 1994., pp.99-105,
- [5] K. Berger, R. Anderson, H. Kröninger: Parameters of Lightning Flashes; *Electra*, No 41, July 1975, pp. 23-33,
- [6] A. J. Erikson: The Incidence of Lightning Strikes to Power Lines; *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. PWRD-2, No.3, July 1987, pp 859-867,
- [7] Abdul M. Mousa, K. D. Srivastava: Modelling of Power Lines in Lightning Incidence Calculations; *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 5, No. 1, January 1990,
- [8] F. A. M. Rizk: Modeling of transmission line exposure to direct lightning strokes, IEEE Trans. Power Del, Vol. 5, No. 4, pp. 1983–1997, Oct. 1990,
- [9] J. Tarchini: The use of leader progression model to predict lightning incidence in power lines, presented at the 27th Int. Conf. Lightning Protection, Avignon, France, 2004, paper 4.a.5,
- [10] S. Ait-Amar, G. Berger: A modified version of the rolling sphere method, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul, Vol. 16, Vol. 3, pp. 718–725, Jun. 2009.