

# Заштита 35 kV далековода од атмосферских пренапона примјеном линијских одводника пренапона, земљоводних и затезних ужади

Младен Бањанин

Електротехнички факултет

Универзитет у Источном Сарајеву

Источно Сарајево, Босна и Херцеговина

mladen.banjanin@etf.ues.rs.ba

*Сажетак*—У овом раду су анализирани различити системи заштите 35 kV далековода од атмосферских пренапона. Поред линијских одводника пренапона, који су данас постали основни заштитни елемент, анализирана су и два нестандартна система заштите који су на нашем говорном подручју мање непознати. Ови специјални системи заштите се базирају на примјени земљоводних ужади (*underbuilt wires*) и затезних ужади (*guy wires*). Ефикасност различитих система заштите је прорачуната на примјеру 35 kV далековода и примјеном програмског пакета ЕМТР-АТР.

*Кључне ријечи*—*линијски одводници пренапона; затезана ужад; земљоводна ужад, атмосферски пренапони, далековод;*

## I. УВОД

Основни задатак сваког електроенергетског система (ЕЕС) јесте снабдијевање потрошача квалитетном и јефтином електричном енергијом [1]. У циљу испуњавања овог задатка неопходно је да се ријешу велики број проблема који се јављају у раду ЕЕС-а. Један од њих јесте заштита опреме од атмосферских пренапона. У многим државама свијета, поготово оним које се налазе ближе екватору и у близини морске обале, атмосферска пражњења и њима узроковани пренапони представљају најчешћи узрок испада далековода из погона. Ти испади са собом повлаче смањење квалитета електричне енергије која се испоручује купцима. Поред тога, испади далековода из погона изазивају повећане економске губитке у експлоатацији ЕЕС-а, узрокују појаву пренапона, могу довести до кварова на опреми, а могу да угрозе и стабилност ЕЕС-а. Испади далековода са мреже стварају проблеме и у туристичким и индустријским мјестима, узрокују проблеме са радом телекомуникационе опреме, преносом података и слично.

Угроженост далековода од атмосферских пренапона директно је условљена са три фактора:

1. Метеоролошки фактори, тј. интензитет грмљавинске активности у некој области. Описује се преко густине атмосферских пражњења по јединици површине тла.

2. Карактеристика тла, које се представљају преко специфичне електричне отпорности тла, а директно утичу на отпорност уземљења стубова.
3. Карактеристика далековода, од којих су најбитније присуство заштитног ужета и подносиви напон изолације.

## II. СИСТЕМИ ЗАШТИТЕ ДАЛЕКОВОДА ОД АТМОСФЕРСКИХ ПРЕНАПОНА

Више детаља о стандардним и специјалним системима заштите далековода од атмосферских пренапона се може наћи у [1]. У овом поглављу су наведене основне карактеристике три система заштите који се у раду обрађују.

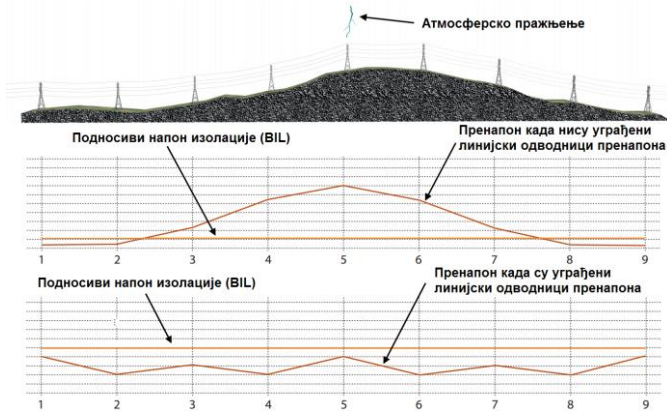
### A. Линијски одводници пренапона

Линијски одводници пренапона су уређаји који се постављају паралелно линијским изолаторима с циљем да ограниче амплитуду атмосферског или склопног пренапона испод подносивог напона изолаторских ланаца. На тај начин они спречавају појаву испада далековода из погона. Масовнија примјена линијских одводника пренапона је почела 90-тих година 20. вијека, када је процес израде ZnO нелинеарних блокова довољно усавршен и када су конструисана квалитетна кућишта од полимерних материјала. Данас су линијски одводници пренапона постали основни заштитни елементи далековода од атмосферских пренапона. Најчешће се користе једна од следеће двије врсте линијских одводника пренапона [2]:

1. Линијски одводници пренапона без спољашњег искришта, чији су нелинеарни отпорници трајно изложени дјеловању радног напона.
2. Линијски одводници пренапона са спољашњим искриштем, чији нелинеарни отпорници нису трајно изложени дјеловању радног напона.

На слици 1 је приказан утицај уградње линијских одводника пренапона дуж далековода на висину

атмосферских пренапона који се јављају приликом појаве директног атмосферског пражњења у далековод [1],[3].



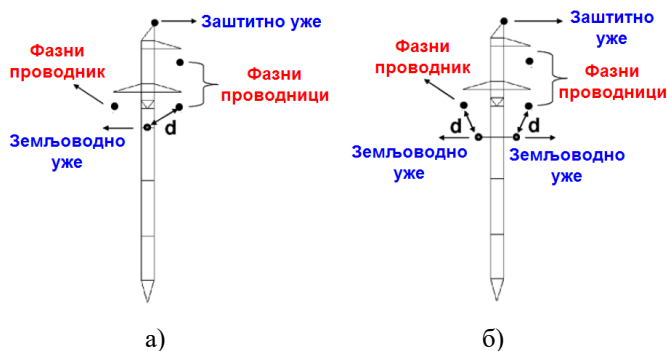
Слика 1. Утицај линијских одводника пренапона на висину атмосферских пренапона на далеководу [1],[3]

### V. Земљоводна ужад (underbuilt wires)

Земљоводна ужад (underbuilt wires) представљају проводну ужад која се поставља испод фазних проводника далековода. Овај систем заштите је релативно нов и користи се у специјалним случајевима [1],[4]. Најчешће се предлаже употреба једног или два ужета. Своју заштитну функцију земљоводна ужад реализују на два начина:

1. Одвођењем дијела струје атмосферског пражњења. На тај начин се смањује струја која се одводи са уземљивача па се самим тим смањују и максимални пренапони на стубу и изолаторима.
2. Услед електромагнетне спреге између фазних проводника и земљоводног ужета смањује се амплитуда напона који дјелује на изолаторске ланце далековода.

На слици 2 је приказан начин примјене земљоводних ужата на стубовима са вертикалним распоредом фазних проводника [1],[4].

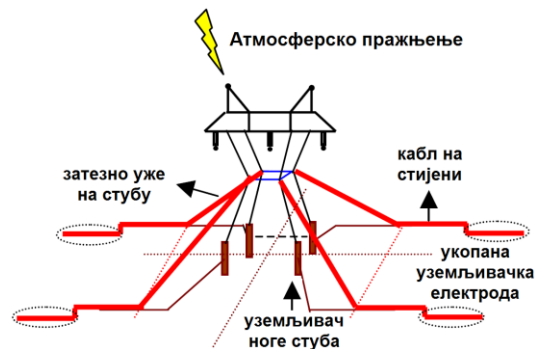


Слика 2. Начин примјене а) једног, б) два земљоводна ужета на стубовима са вертикалним распоредом фазних проводника [1],[4]

### C. Затезна ужад (guy wires)

У [4] је представљена заштита 220 kV далековода од атмосферских пренапона која се базира на комбинованој примјени земљоводних ужата (underbuilt wires) и затезних ужата (guy wires). Линијски одводници пренапона нису примијењени за заштиту овог далековода због великих потешкоћа везаних за њихово одржавање у неприступачним предјелима Амазона.

Начин примјене затезних ужата на стубовима далековода је приказана на слици 3 [1],[4]. Кориштена су четири затезна ужета постављена под углом од  $90^\circ$ . Затезна ужад се користе с циљем да одведу дио струје атмосферског пражњења у тло и тако смање струју која се одводи кроз стуб далековода и кроз његов уземљивач. На тај начин се смањује висина максималних пренапона на стубу, што директно доводи до смањења вјероватноће појаве испада далековода из погона.



Слика 3. Начин примјене затезних ужата на стубовима далековода [1],[4]

### III. МОДЕЛИ И ПАРАМЕТРИ ЕЛЕМЕНАТА ДАЛЕКОВОДА КОЈИ СУ КОРИШТЕНИ У ПРОРАЧУНИМА

Приликом креирања еквивалентне шеме система у програмском пакету ЕМТР-АТР кориштени су модели елемената који се препоручују у [2],[5]-[13]. Еквивалентна шема система која је кориштена у прорачунима се може пронаћи у [1],[14]. Корак прорачуна се може усвојити што је могуће краћи (најчешће  $2\div 5$  ns), с тим што програм не може да ради са исувише кратким кораком нумеричког прорачуна. Трајање симулације се треба усвојити тако да се сви процеси на зачељу таласа који би могли узроковати појаву повратног прескока заврше (најчешће  $40\div 70$   $\mu$ s). Детаљнија анализа кориштених модела елемената се може пронаћи у [1],[14],[15], а у наставку је дат списак и кратак опис примијењених модела:

1. Вриједност карактеристичне импедансе канала атмосферског пражњења је усвојена да износи  $1000 \Omega$  [14].
2. Таласни облик струје атмосферског пражњења је моделован примјеном троугаоног таласа са параметрима  $5,6/77 \mu$ s/ $\mu$ s [12]. Овај талас се данас веома често користи у детерминистичким прорачунима [14]. Параметри таласног облика струје грома могу да утичу на резултате

прорачуна, али тај утицај није израженији од утицаја осталих елемената и није такав да може значајно утицати на коначне резултате.

3. Стуб далековода је моделован у складу са IEEE препоруком [5], израз (1):

$$Z_{r,v} = 30 \cdot \ln \left( \frac{2(h^2 + r^2)}{r^2} \right) \quad (1)$$

гдје су:  $h$  - висина стуба [m],  $r$  – полупречник ноге стуба [m].

4. Уземљивач стуба је моделован уважавајући појаву јонизације тла у складу са CIGRE препоруком [8], израз (2):

$$R = \begin{cases} R_0, & I \leq I_g \\ \frac{R_0}{\sqrt{1 + \frac{I}{I_g}}}, & I > I_g \end{cases} \quad (2)$$

гдје су:  $R_0$  - отпорност уземљења стуба мјерена при ниској фреквенцији и малој вриједности струје која се одводи са уземљивача [ $\Omega$ ],  $I$  - струја која се одводи са уземљивача [kA],  $I_g$  - гранична вриједност струје при којој се јавља јонизација тла око уземљивача [kA], рачуна се из израза (3)

$$[8] I_g = \frac{E_0 \cdot \rho}{2 \cdot \pi \cdot R_0^2} \quad (3)$$

$$I_g = \frac{E_0 \cdot \rho}{2 \cdot \pi \cdot R_0^2} \quad (3)$$

гдје су:  $E_0$  – критична јачина електричног поља при којој се јавља јонизација тла, може се усвојити вриједност од 400 kV/m [14],  $\rho$  - специфична електрична отпорност тла [ $\Omega\text{m}$ ].

5. Прескок на линијском изолатору је моделован примјеном методе прогресивног лидера [11]. Брзина развоја лидера је рачуната примјеном израза (4) [11],[14]:

$$v = 170 \cdot d \cdot \left[ \frac{u(t)}{x} - E_0 \right] \cdot e^{(0.0015 \cdot \frac{e(t)}{d})} \quad (4)$$

гдје су:  $d$  - растојање између искришта [m],  $u(t)$  - тренутна вриједност напона [kV],  $x$  - дужина непремоштеног међуелектродног растојања [m],  $E_0$  - критична јачина електричног поља при којој почиње развој лидера, може се усвојити вриједност од 545 [kV/m] [14].

6. Заштитно и земљоводно уже, као и фазни проводници, су моделовани преко фреквенцијски зависног модела вода (JMarti) [13]. Усвајано је да се атмосферско пражњење одвија у врх стуба, а поред погођеног стуба моделована су по два сусједна са обје стране. Након њих су постављене завршне импедансе. Фреквенцијски зависан модел вода (JMarti) уважава електромагнетну спрегу која постоји између фазних и заштитних ужади тако да

се препоручује његова употреба у прорачунима [2],[9],[10].

7. Затезно уже је моделовано као вод карактеристичне импедансе 450  $\Omega$  и са брзином простирања од 300 m/ $\mu\text{s}$ . Отпорност уземљења затезног ужета је усвојена да је 40 пута већа од отпорности уземљења стуба [14].
8. Радни напон је моделован примјеном идеалног напонског извора, а у сваком прорачуну је усвајана најкритичнија вриједност напона [1],[14].
9. Линијски одводници пренапона су моделовани преко  $U-I$  нелинеарне карактеристике [14] коју обезбјеђује произвођач и која је приказана у табели I.

Параметри који су кориштени за прорачун су дати у табели II.

ТАБЕЛА I  $U-I$  карактеристика одводника пренапона називног напона 52,5 kV добијена ударним струјним таласом облика 8/20  $\mu\text{s}/\mu\text{s}$

Струја одвођења	Преостали напон
1 kA	109,7 kV
2,5 kA	116,1 kV
5 kA	121,8 kV
10 kA	129,0 kV
20 kA	147,1 kV

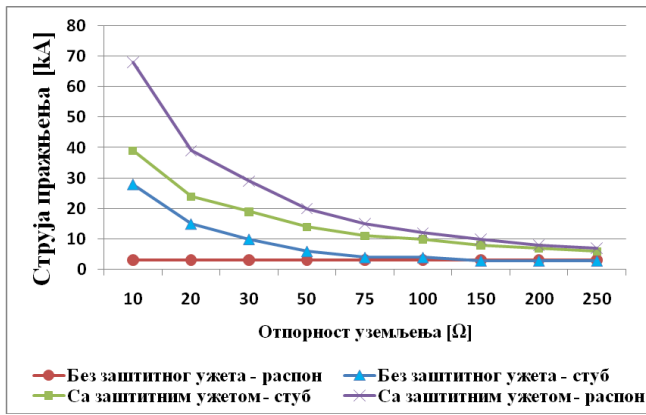
ТАБЕЛА II Основни улазни подаци за прорачуне

Параметар	Вриједност
Висина стуба [m]	16
Висина проводника од тла [m]	14-12,5-10,5
Међуелектродно растојање изолаторског ланца [m]	0,44
Дужина конзола [m]	1-1,2-1,5
Дужина распона [m]	180
Карактеристична импеданса стуба [ $\Omega$ ]	195
Дужина затезних ужади [m]	10
Дужина завршних водова	6 km

#### IV. РЕЗУЛТАТИ ПРОРАЧУНА

Ефикасност различитих система заштите је поређена кроз резултате нумеричких прорачуна у којима су одређиване минималне амплитуде струја атмосферских пражњења које узрокују испад 35 kV вода из погона. Вриједности отпорности уземљења стубова су варирале у широком опсегу, и то од 10  $\Omega$  до 250  $\Omega$ .

На слици слици 4 [1] су приказани резултати који показују колико је на 35 kV далеководу ефикасно користити заштитно уже. Прорачун је рађен за случај када се атмосферско пражњење одвија у врх стуба и у фазни проводник вода без заштитног ужета, као и у врх стуба и у заштитно уже у случају вода са заштитним ужетом. На далеководу без заштитног ужета практично свако атмосферско пражњење изазива испад из погона. Изузетак је случај пражњења у стуб далековода који има ниску отпорност уземљења (нпр. 10  $\Omega$ ). Уградњом заштитног ужета на далековод знатно се побољшава ефикасност заштите, поготово у случају када стубови имају малу отпорност уземљења. Са порастом отпорности уземљења стубова ефикасност заштитног ужета на 35 kV далеководу значајно опада.

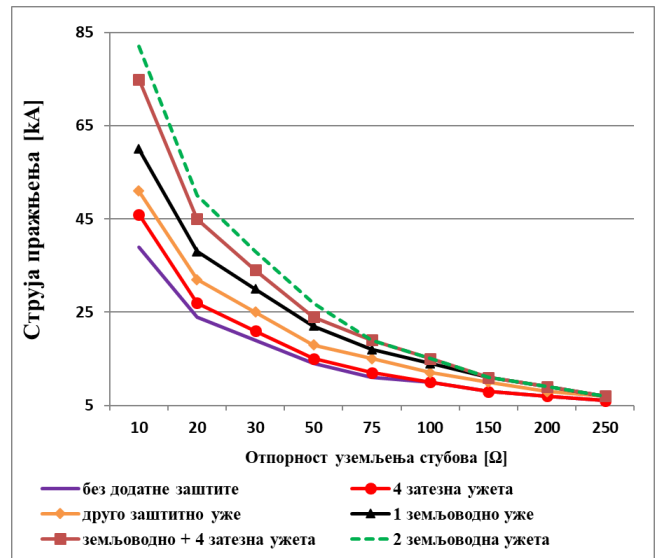


Слика 4. Утицај уградње заштитног ужета на минималну амплитуду струје која узрокује испад 35 kV далековода из погона [1]

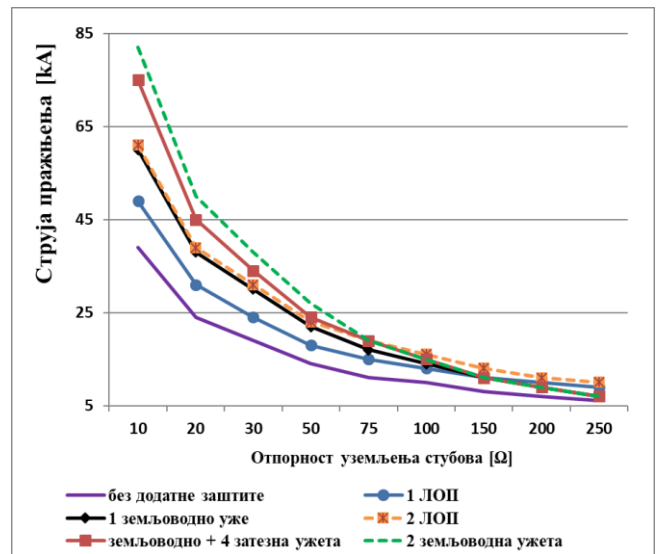
Да би се побољшао квалитет заштите 35 kV далековода анализирана је примјена специјалних система заштите као што су уградња додатног заштитног или земљоводног ужета, или уградња затезних ужади. Усвојено је да се земљоводна ужад постављају 3,5 m испод доње конзоле тј. на висини од 6,4 m изнад тла. У случају примјене једног земљоводног ужета оно се фиксира директно за стуб. У случају примјене два заштитна или два земљоводна ужета она се постављају на конзолама дужине 1,2 m, тј. на растојању од 2,4 m. Приликом уградње земљоводних или затезних ужади потребно је водити рачуна да се не наруше потребна изолациона растојања на глави стуба, а првенствено према фазним проводницима.

На слици 5 су приказани добијени резултати. Примјеном специјалних система заштите минимална амплитуда струје прањњења која узрокује испад далековода из погона се повећава, поготово у случају мале отпорности уземљења стубова. Уочава се да додатно уже има већу ефикасност ако се угради као земљоводно, тј. испод фазних проводника, него ако се угради као друго заштитно уже. Ипак, ефикасност свих система заштите изразито опада са повећањем отпорности уземљења стубова. Разлог томе је релативно низак подносиви напон изолације 35 kV далековода. При веома високим вриједностима отпорности уземљења стубова на изолаторским ланцима далековода се појављују превисоки напони које изолација не може да поднесе и долази до појаве испада далековода из погона.

Поређење ефикасности нестандардних система заштите са заштитном базираној на примјени линијских одводника пренапона је приказано на слици 6. Као и нестандардни системи заштите и линијски одводници пренапона имају добру ефикасност у случају када је отпорност уземљења стубова релативно мала. Са порастом вриједности отпорности уземљења стубова ефикасност линијских одводника пренапона значајно опада.



Слика 5. Утицај заштитних, земљоводних и затезних ужади на минималну струју прањњења која узрокује испад 35 kV далековода из погона

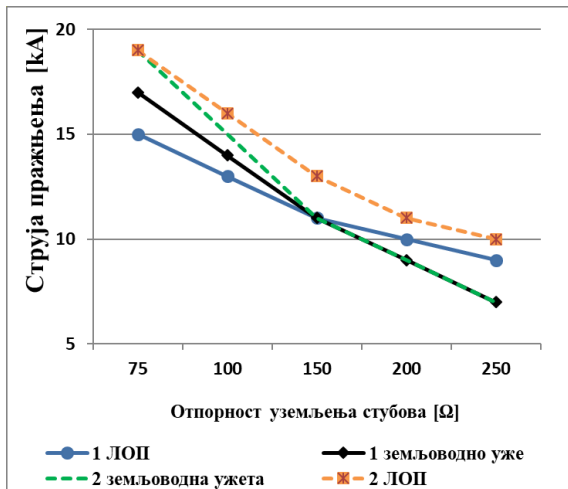


Слика 6. Ефикасност линијских одводника пренапона, земљоводних и затезних ужади на минималну амплитуду струје прањњења која узрокује испад 35 kV далековода из погона

Поређење ефикасности заштите које су базиране на примјени линијских одводника пренапона и земљоводних ужади при великим отпорностима уземљења стубова је приказано на слици 7. Уочава се да на анализираном 35 kV далеководу земљоводна ужад имају бољу ефикасност од линијских одводника пренапона у случају када је отпорност уземљења стубова велика. У случају мале вриједности отпорности уземљења стубова линијски одводници пренапона постају ефикаснији.

Из претходно приказаних резултата је очигледно да анализирани системи заштите не могу обезбједити

ефикасну заштиту од атмосферских пренапона 35 kV далековада који има веома велику отпорност уземљења стубова.



Слика 7. Ефикасност линијских одводника пренапона и земљоводних ужади на 35 kV далеководу који има велику отпорност уземљења стубова

## V. ЗАКЉУЧАК

На бази приказаних резултата нумеричких прорачуна, а који се односе на ефикасност различитих система заштите 35 kV далековада од атмосферских пренапона, могуће је презентовати сљедеће закључке:

1. Далековод без заштитног ужета је веома угрожен од атмосферских пренапона, поготово ако се пражњење одвија у фазни проводник. Степен угрожености је нешто нижи у случају пражњења у стуб далековада, поготово ако исти има малу отпорност уземљења.
2. Уградњом заштитног ужета изражено се побољшава квалитет заштите далековада од атмосферских пренапона, поготово у случају када стубови далековада имају ниску отпорност уземљења.
3. Примјеном специјалних система заштите могуће је значајно побољшати квалитет заштите далековада који имају ниску или умјерену отпорност уземљења стубова.
4. Са порастом отпорности уземљења стубова ефикасност свих система заштите изражено опада.
5. Са аспекта заштите далековада од атмосферских пренапона који су последица пражњења у заштитно уже, додатно уже је ефикасније уградити као земљоводно (испод фазних проводника) него као друго заштитно уже.
6. У случају када отпорност уземљења стубова није екстремно висока (нпр. испод 150 Ω) систем заштите базиран на примјени једног земљоводног

ужета је ефикаснији од система заштите базираног на примјени једног линијског одводника пренапона по стубу далековада.

7. У случају када отпорност уземљења стубова није екстремно висока (нпр. испод 150 Ω) систем заштите базиран на примјени једног земљоводног ужета је приближно једнако ефикасан као систем заштите који се базира на примјени два линијска одводника пренапона по стубу.
8. Линијски одводници пренапона онемогућавају појаву прескока на штићеним изолаторима и смањују вјероватноћу појаве прескока на нештићеним изолаторима далековада, док земљоводно уже само смањује вјероватноћу појаве прескока на свим изолаторима.
9. Најефикаснији начин заштите далековада од атмосферских пренапона је уградња линијских одводника пренапона у све фазе и на сваком стубу штићеног дијела трасе далековада. Ипак, овакав начин заштите није економски исплатив тако да се настоји избјећи [16].

## LITERATURA

- [1] М. Бањанин, "Заштита надземних водова од атмосферских пренапона у екстремним условима," докторска дисертација, Универзитет у Београду, Електротехнички факултет, септембар 2017.
- [2] CIGRE Working Group C4.301: Use of Surge Arresters for Lightning Protection of Transmission Lines, CIGRE Technical Brochure No. 440, 2010.
- [3] High Voltage Surge Arresters, ABB Buyer's Guide, Edition 14, May, 2018 ([https://library.e.abb.com/public/13d897322c924f20ad0e9bcac16235b0/1\\_HSM\\_9543\\_12-00\\_Surge\\_Arresters\\_Buyer\\_s\\_Guide\\_June2018.pdf](https://library.e.abb.com/public/13d897322c924f20ad0e9bcac16235b0/1_HSM_9543_12-00_Surge_Arresters_Buyer_s_Guide_June2018.pdf))
- [4] S. Visacro, F. H. Silveira, A. De Conti, "The Use of Underbuilt Wires to Improve the Lightning Performance of Transmission Lines," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 27, No. 1, pp. 205-213, January 2012.
- [5] 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, pp 919-927, April 1985.
- [6] CIGRE Working Group 33.07: Guidelines for the evaluation of the dielectric strength of external insulation, No. 72, Paris 1992.
- [7] Insulation co-ordination - Part 4: Computational guide to insulation co-ordination and modeling of electrical networks, International Standard IEC 60071-4, First edition 2004-06.
- [8] CIGRE Working Group 33.07: Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines, CIGRE Technical Brochure No. 63, 1991.
- [9] IEEE Task Force on Fast Front Transients. Modeling guidelines for fast front transients, IEEE Transaction On Power Delivery, Vol. 11, No. 1, pp. 493-506, January 1996.
- [10] CIGRE Working Group C4.501: Guideline for Numerical Electromagnetic Analysis Method and its Application to Surge Phenomena, CIGRE Technical Brochure No. 543, Jun 2013.
- [11] 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 of predetermination methods, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 2, April 1989.
- [12] CIGRE Working Group C4.407: Lightning parameters for engineering applications, CIGRE Technical Brochure No. 549, 2013.

- [13] J. R. Marti, "Accurate Modelling of Frequency-Dependent Transmission Lines in Electromagnetic Transient Simulations," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No.1, January 1987, pp. 147-157.
- [14] M. Banjanin, "Application possibilities of special lightning protection systems of overhead distribution and transmission lines," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 100, September 2018.
- [15] M. Banjanin, M. Savić, "Some aspects of overhead transmission lines lightning performance estimation in engineering practice," International Transactions on Electrical Energy Systems, Vol. 26, Issue 1, pp. 79-93, January 2016.
- [16] R. Shariatinasab, J. G. Safar, H. Falaghi, "Optimisation of arrester location in risk assessment in distribution network," IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 8, No. 1, pp. 151-159, January 2014.

ABSTRACT

In this paper different lightning protection systems of 35 kV overhead lines are analyzed. First one is line arresters, which are nowadays basic lightning protection device of overhead lines. Also, two less known special lightning protection systems are analyzed. These systems are based on application of underbuilt wires and guy wires. Efficiencies of these lightning protection systems at the 35 kV overhead line are estimated through the numerical calculations performed by using EMTP-ATP software.

**LIGHTNING PROTECTION OF 35 KV OVERHEAD LINES BY USING LINE ARRESTERS, UNDERBUILT WIRES AND GUY WIRES**

Mladen Banjanin