

Примјена линијских одводника пренапона за заштиту 110 kV постројења од атмосферских пренапона

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

Сажетак—У овом раду се анализира могућност примјене линијских одводника пренапона без екстерног искришта (ЛОП) за заштиту 110 kV постројења од атмосферских пренапона. Прорачуни су рађени у програмском пакету ЕМТР-АТР, а у складу са стандардом IEC 62305. Анализирано је гасом изоловано постројење (GIS) у коме постоје дуге кабловске везе између далеководног поља и GIS, као и између GIS и енергетског трансформатора. Закључено је да ниво заштите 110 kV постројења може бити знатно побољшан уградњом ЛОП на само једном или два далеководна стуба испред постројења. Позитивни ефекти на ниво заштите постројења су постигнути и у случају повратног прескока на прилазном воду, али и у случају директног атмосферског пражњења у фазни проводник.

Кључне ријечи-линијски одводници пренапона; атмосферски пренапони; постројење; GIS.

I. Увод

Заштита постројења од атмосферских пренапона који наилазе са прикључних далековада представља главни дио процеса пројектовања пренапонске заштите постројења називним напона закључно са 400 kV. У постројењима са називним напонам 500 kV и вишим склопни пренапони постају критични за димензионисање заштите и изолације опреме [1]. Склопни пренапони могу бити критични и у GIS постројењима нижих називних напона.

Приликом пројектовања заштите постројења од атмосферских пренапона неколико критичних аспеката мора да се узме у обзир и то:

1. Заштита постројења од директних удара грома [2].
2. Заштита постројења од атмосферских пренапона који наилазе са прикључних далековада [3].
3. Заштита енергетског трансформатора и генератора од атмосферских пренапона који се преносе кроз трансформатор [4],[5].

Постоје два сценарија према којима се може догоди оштећење опреме у постројењу услед удара грома у прилазни надземни вод, а то су:

1. Атмосферски пренапони настали као последица појаве повратног прескока.

2. Атмосферски пренапони настали као последица директног удара грома у фазни проводник.

У овом раду су анализирана оба сценарија. Заштита постројења од ових пренапона се ради на следећи начин:

1. Заштита прилазних надземних водова са циљем да се смањи број повратних прескока и да се смањи висина пренапона који се појављују на воду. Приликом реализације овог начина заштите користе се следеће методе: примјена заштитних ужади, смањење импедансе уземљења стубова, повећање изолационог напона вода, избор оптималне геометрије главе стуба...
2. Заштита опреме у постројењу са циљем да се смање максимални пренапони који се на опреми појављују, или да се повећа подносиви напон опреме. Користе се следеће методе заштите: примјена одводника пренапона, повећање подносивог напона опреме, смањење импедансе уземљења постројења...

Координација изолације високонапонских постројења се може базирати на резултатима који се добијају кориштењем двије врсте прорачуна [6]-[8]:

1. Детерминистички (класични) прорачун у складу са IEC 62305-1 [9]. У овом случају раде се појединачни прорачуни са критичним параметрима струје грома и за случај удара грома у најкритичнију тачку у систему. Ако прорачунати пренапони на неком уређају превазиђе његов подносиви напон заштита се сматра неадекватном.
2. Статистички прорачун у коме се врши више симултаних прорачуна у којима се варирају параметри струје атмосферског пражњења, као и мјесто удара грома. Постоји више статистичких врста прорачуна координације изолације, а најчешће се користе Monte Carlo прорачун, IEC полустатистички метод [10] и метода опасних параметара [3].

До сада је публикован велики број радова који се баве проблематиком заштите постројења од атмосферских пренапона а са циљем да се одреди утицај појединачних параметара на квалитет заштите [3],[6]-[8]. У овом раду се анализира један нови приступ заштити постројења од

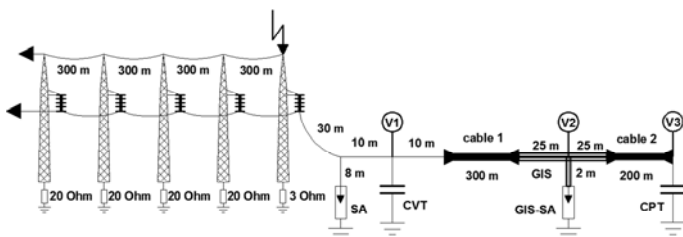
атмосферских пренапона који укључује примјену ЛОП на прилазним водовима. ЛОП су до сада кориштени за смањење броја испада надземних водова усљед удара грома [11]. На бази урађених прорачуна закључено је да квалитет пренапонске заштите постројења може бити осјетно побољшан уградњом ЛОП на улазним стубовима надземног вода у постројење. Позитивни ефекти су уочени и у случају атмосферских пренапона који су посљедица повратних прескока, али и атмосферских пренапона који су посљедица директног удара грома у фазни проводник.

II. ЕКВИВАЛЕНТНА ШЕМА АНАЛИЗИРАНОГ 110 kV ПОСТРОЈЕЊА

Основни заштитни уређај опреме у постројењима од атмосферских пренапона је одводник пренапона. Заштита постројења најчешће се реализује примјеном два сета одводника пренапона и то:

1. Први сет одводника пренапона поставља се у далеководном пољу на улазу фазних проводника у постројење. Овај сет одводника пренапона се користи да смањи атмосферске пренапоне који са вода улазе у постројење, као и да заштити опрему (мјерни трансформатори итд) у дијелу постројења на отвореном.
2. Други сет одводника пренапона се поставља што је ближе могуће енергетском трансформатору са циљем заштите његове изолације од пренапона.

Примјеном наведеног распореда одводника пренапона може се постићи квалитетна заштита већине постројења од атмосферских пренапона. Проблем се јавља код заштите постројења нестандартне конфигурације као што су постројења са другим кабловима, као и директним уводима каблова и гасом изолованих сабирница (GIL) у енергетске трансформаторе. Један примјер постројења са нестандартном конфигурацијом је анализиран и у овом раду. Еквивалентна шема постројења је приказан на Сл. 1. Додатни параметри система су дати у табели I.



Слика 1. Шематски приказ еквивалентне шеме анализираног система

Еквивалентна шема система се састоји од једносистемског надземног вода, мјерних трансформатора у далеководном пољу, кабловске везе између дијела постројења на отвореном и GIS и кабловске везе између GIS и енергетског трансформатора. Усвојено је да се атмосферско пражњење одвија у најкритичнију тачку система, а то је портални стуб на улазу у постројење, Сл. 1. Овај стуб има малу вриједност импедансе уземљења јер се његов уземљивач веже са уземљивачем постројења. Упркос ниској вриједности импедансе уземљења

атмосферска пражњења у овај стуб узрокују појаву повратног прескока због релативно ниског изолационог нивоа 110 kV вода.

ТАБЕЛА I. УСВОЈЕНЕ ВРИЈЕДНОСТИ ПАРАМЕТАРА СИСТЕМА

Елемент	Вриједност
Карактеристична импеданса фазног проводника	477 Ω
Карактеристична импеданса заштитног ужета	557 Ω
Карактеристична импеданса стуба	165 Ω
Специфична електрична отпорност тла	200 Ωm
Карактеристична импеданса XLPE кабла	60 Ω
Брзина простирања таласа по каблу/брзина свјетлости	0.44
Улазни капацитет напонског трансформатора	6 nF
Улазни капацитет енергетског трансформатора	6 nF
Карактеристична импеданса SF6 сабирница	80 Ω
Изолациони напон система	550 kV
Прескочно растојање изолаторског ланца	0.96 m

Атмосферски пренапони се региструју у три тачке и то:

- V1 – капацитивни напонски мјерни трансформатор,
- V2 – GIS,
- V3 – енергетски трансформатор.

Полимерни метал-оксидни одводници пренапона су примјењени у далеководном пољу испред напонског мјерног трансформатора (CVT) и кабловске главе, означено са SA на Сл. 1. Металом оклопљено гасом SF6 изоловано постројење се штити помоћу оклопљеног одводника пренапона интегрисаног у GIS, означен са GIS-SA на Сл. 1. У табели II је приказана нелинеарна U-I крива преосталог напона одводника пренапона која је добијена стандардним ударним струјним таласом облика 8/20 $\mu\text{s}/\mu\text{s}$. Кориштен је одводник пренапона називног напона 96 kV, а усвојена је идентична U-I крива за све три врсте одводника пренапона (полимерни, металом оклопљени одводници за GIS и линијски одводници пренапона). Овај приступ је оправдан јер су разлике релативно мале, а утицај на добијене резултате је много мањи од утицаја неких других параметара.

ТАБЕЛА II. НЕЛИНЕАРНА U-I КАРАКТЕРИСТИКА ОДВОДНИКА ПРЕНАПОНА ДОБИЈЕНА УДАРНИМ СТРУЈНИМ ТАЛАСОМ ОБЛИКА 8/20 $\mu\text{s}/\mu\text{s}$

Називни напон одводника 96 kV	
I [kA]	U [kV]
3	199
5	212
10	226
15	244
20	256
40	290

III. МОДЕЛИ ЕЛЕМЕНАТА КОЈИ СУ КОРИШТЕНИ У НУМЕРИЧКИМ ПРОРАЧУНИМА

Модел елемената који су кориштени у нумеричким прорачунима у програмском пакету EMTP-ATP су преузети из међународних стандарда [9],[10],[12],[13] и у сагласности су са закључцима представљеним у [14].

Атмосферско електрично пражњење је моделовано као реални струјни извор кога чине идеални струјни извор у паралели са импедансом канала грома за коју је усвојено да износи 1000 Ω [14]. Таласни облик струје грома је моделован Хајдлеровом (Heidler) функцијом [15] која је

предложена и у IEC 62305-1 [9]. Таласни облик струје грома је усвојен да буде 10/350 $\mu\text{s}/\mu\text{s}$ и са амплитудом струје од 200 kA [9]. Математички израз Хајдлеровог таласног облика струје грома у програму ЕМТР-АТР је (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 [kA], n - емпиријска константа (усвојена вриједност је 10 [9]), τ_1 - временска константа чела [μs], 19 μs за таласни облик 10/350 $\mu\text{s}/\mu\text{s}$ [9], τ_2 - временска константа зачеља [μs], 485 μs за таласни облик 10/350 $\mu\text{s}/\mu\text{s}$ [9], t - вријеме [μs].

Импеданса уземљења стуба је моделована преко израза (2) уважавајући појаву јонизације тла која се јавља приликом одвођења струја великих амплитуда [10],[13]:

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

гдје су: R_0 - отпорност уземљења стуба при ниским фреквенцијама [Ω], I - амплитуда струје грома која се одводи са уземљивача [kA], I_g - минимална вриједност струје грома [kA] која може изазвати јонизацију тла око уземљивача, а рачуна се преко израза (3) [13]:

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

гдје су: E_0 - критична јачина електричног поља у тлу при којој се јавља јонизација, усвојена вриједност је 400 [kV/m] [13], ρ - специфични електрични отпор тла [Ωm].

Прескоци на ваздушној изолацији надземног вода су моделовани примјеном методе прогресивног лидера [16]. Постоје различите формуле по којима се може рачунати брзина развоја лидера, али према [10],[13],[16] може се користити формула (4):

$$v = 170 \times d \times \left[\frac{u(t)}{d-l} - E_{0A} \right] \times e^{(0.0015 \times \frac{u(t)}{d})} \quad (4)$$

гдје су: d - растојање између електрода [m], l - дужина лидера [m], $u(t)$ - тренутна вриједност пренапона [kV], E_{0A} - критично поље при коме долази до развоја лидера [kV/m], усвојена је вриједност од 545 [kV/m] [16].

Усваја се да се прескок догодио када је задовољен услов да је $l \geq d$, при чему се дужина лидера (l) рачуна као $l = v \times t$.

Стуб надземног вода се може моделовати преко IEEE модела [12] као вод карактеристичне импедансе која се рачуна преко израза (5) и са брзином простирања од $0.85 \times$ брзина свјетлости.

$$Z_t = 30 \times \ln \left(\frac{2(h^2 + r^2)}{r^2} \right) \quad (5)$$

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

Одводници пренапона у далеководном пољу (SA), у GIS (GIS-SA) и ЛОП на надземном воду су моделовати преко нелинеарне U-I криве (табела II) како је и предложено у [10]. Спојни проводници одводника пренапона су моделовати као кратки фазни проводници. Напонски мјерни трансформатори и енергетски трансформатори су моделовани преко паразитних капацитета [1] чије вриједности су дате у табели I.

IV. РЕЗУЛТАТИ ПРОРАЧУНА

A. *Стандардна конфигурација одводника пренапона - сет одводника пренапона у далеководном пољу и сет одводника пренапона у GIS*

Прорачуни су урађени за еквивалентну шему постројења приказану на Сл. 1 и са параметрима система из табела I и II. У појединим случајевима неки параметри су варирани и то је наглашено у тексту.

Да би се приказала заштитна функција одводника пренапона анализирана су следећа три случаја и добијени резултати су приказани у табели III:

1. Постројење није заштићено одводницима пренапона (Без ОП).
2. Постројење је заштићено једним сетом одводника пренапона постављених у далеководном пољу (SA).
3. Постројење је заштићено са два сета одводника пренапона постављених у далеководном пољу и у GIS (SA+GIS-SA).

ТАБЕЛА III. УТИЦАЈ РАСПОРЕДА ОДВОДНИКА ПРЕНАПОНА (ОП) НА НИВО ЗАШТИТЕ ОПРЕМЕ У ПОСТРОЈЕЊУ

Чвор	Конфигурација одводника			
	Без ОП	SA	SA+GIS-SA	
	Дужина кабла 2			
				1600 m
V1	2701 kV	624 kV	263 kV	271 kV
V2	2859 kV	660 kV	373 kV	374 kV
V3	3007 kV	701 kV	446 kV	510 kV

Из табеле III се може уочити веома јак утицај конфигурације одводника пренапона на квалитет заштите опреме у постројењу. Постројење које није заштићено одводницима пренапона је веома угрожено од атмосферских пренапона. Ниво заштите се знатно поправља у случају када се у далеководном пољу постави један сет одводника пренапона, али и у овом случају задовољавајући ниво заштите није постигнут. Уградњом додатног сета одводника пренапона у GIS могуће је постићи потребан ниво заштите опреме и у случају када је дужина кабла 2 једнака 200 m, али чак и у случају када је дужина овог кабла веома велика и износи 1600 m.

Проблем са уградњом одводника у GIS се јавља у случају старих GIS постројења у којима није остављена

могућност накнадне уградње оклопљених одводника. Проблем је израженији због чињенице да многи произвођачи високонапонске опреме која је уграђена у систему данас не постоје. У том случају се морају користити додатне методе заштите како би се осигурала квалитетна заштита.

Често примјењена мјера за побољшање нивоа заштите високонапонских постројења од атмосферских пренапона је смањење импедансе уземљења стубова прилазног вода. Да би се показао утицај импедансе уземљења стубова на висину пренапона у постројењу урађен је прорачун и добијени резултати су приказани у табели IV. Прорачун је рађен за случај када су одводници пренапона постављени само у далеководном пољу (SA).

ТАБЕЛА IV. УТИЦАЈ ИМПЕДАНСЕ УЗЕМЉЕЊА СТУБОВА НА НИВО ЗАШТИТЕ ОПРЕМЕ У ПОСТРОЈЕЊУ

Чвор	Мјесто удара грома					
	Пражњење у први стуб испред постројења			Пражњење у други стуб испред постројења		
	Импеданса уземљења стубова					
	3 Ω	2 Ω	1 Ω	20 Ω	15 Ω	10 Ω
V1	624 kV	559 kV	450 kV	538 kV	536 kV	502 kV
V2	660 kV	579 kV	462 kV	591 kV	570 kV	552 kV
V3	701 kV	617 kV	475 kV	618 kV	605 kV	574 kV

Смањење импедансе уземљења другог и сљедећих стубова нема утицаја на резултате прорачуна у случају када се пражњење догоди у врх првог стуба, а вриједи и обратно. Да би се у овом случају осигурале одговарајућа заштита постројења отпорност првог стуба мора да се смањи на вриједност од 1 Ω. У случају удара грома у други стуб испред постројења смањењем импедансе уземљења стубова није могуће постићи одговарајући ниво заштите опреме.

Смањење импедансе уземљења стубова повећава квалитет заштите опреме у постројењу, али у многим случајевима се не могу остварити потребни резултати. Битно је нагласити да у случају када су стубови постављени на стијени или неком другом непогодном тлу смањивање импедансе уземљења стубова није могуће остварити, а чак и ако се остваре одређена побољшања (нпр. примјеном бентонита) остварени ефекти су најчешће краткотрајни.

Повећање квалитета пренапонске заштите опреме се може постићи и на друге начине, нпр. повећањем изолационог нивоа опреме. Проблем је што повећање изолационог нивоа опреме често знатно повећава цијену опреме, поготово енергетског трансформатора, и због тога је често неприхватљиво.

Б. Примјена ЛОП за заштиту постројења од атмосферских пренапона изазваних повратним прескоцима на прилазном воду

У претходном поглављу је показано да процес координације изолације 110 kV постројења са нестандартном конфигурацијом може бити сложен у случају када није могуће уградити одводнике пренапона у

GIS. У овом поглављу се анализира могућност примјене ЛОП за заштиту таквих постројења.

Како би се показао утицај ЛОП на висину атмосферских пренапона у постројењу претпостављено је да су све три фазе на првих пет стубова испред постројења заштићене помоћу ЛОП. Анализиран је случај када само један ЛОП на стубу проводи струју пражњења. Са овом претпоставком могуће је и даље користити једнофазни модел надземног вода и поредити резултате који се добијају у случају када је вод заштићен и када није заштићен помоћу ЛОП. Тиме се избјегавају трофазни модели надземног вода чије кориштење у програму ЕМТР-АТР или сличним програмима може бити компликовано. Потребно је нагласити да се у овом случају добијају височини пренапони у постројењу.

У табели V су приказани резултати прорачуна из којих се може закључити да се примјеном ЛОП може побољшати ниво заштите постројења од атмосферских пренапона. Заштитна улога ЛОП се може објаснити на сљедећи начин: Након појаве повратног прескока на воду који није заштићен са ЛОП конзола стуба и фазни проводник постају спојени електричним луком мале отпорности. Због овога се велики дио струје пражњења преноси са конзоле на фазни проводник и даље у постројење узрокујући високе пренапоне. На воду који је заштићен са ЛОП нелинеарна отпорност одводника пренапона ограничава струју која са конзоле протиче на фазни проводник смањујући максималне пренапоне у постројењу. Такође, ЛОП својим преосталим напоном ограничава максимални пренапон који се појављује на фазном проводнику.

ТАБЕЛА V. УТИЦАЈ ЛОП И ОТПОРНОСТИ УЗЕМЉЕЊА СТУБОВА НА НИВО ЗАШТИТЕ ОПРЕМЕ У ПОСТРОЈЕЊУ

Чвор	Конфигурација одводника					
	SA	SA+GIS-SA	SA+TLA			
	Дужина кабла 2 200 m					
	Отпорност уземљења стубова					
	3,20 [Ω]	3,20 [Ω]	3,15 [Ω]	2,20 [Ω]	1,20 [Ω]	
V1	624 kV	263 kV	403 kV	403 kV	358 kV	297 kV
V2	660 kV	373 kV	554 kV	553 kV	502 kV	448 kV
V3	701 kV	446 kV	602 kV	601 kV	565 kV	528 kV
Чвор	Дужина кабла 2 1600 m					
	Отпорност уземљења стубова					
	3,20 [Ω]	3,20 [Ω]	3,15 [Ω]	2,20 [Ω]	1,20 [Ω]	
V1	633 kV	271 kV	382 kV	381 kV	351 kV	277 kV
V2	652 kV	374 kV	531 kV	529 kV	428 kV	319 kV
V3	670 kV	510 kV	601 kV	600 kV	565 kV	528 kV

Уградњом ЛОП на прилазним стубовима испред постројења остварују се и сљедећи позитивни ефекти:

1. Смањује се могућност испада прилазних водова и потенцијално комплетног постројења.
2. Елиминиши се блиски кратки спојеви који могу изазвати оштећење опреме у постројењу због јаких струја које се у том случају појављују.

Битно је примјетити да се са смањењем импедансе уземљења стубова далековода у присуству ЛОП смањују максимални пренапони у систему што значи да се ова мјера заштите може комбиновати са стандардним

методама заштите. Смањенjem импедансе уземљења стубова повећава се дио струје атмосферског пражњења који се одводи у тло, а самим тим се смањује дио струје који се преко фазних проводника одводи у постројење и који изазива високе пренапоне.

У анализираном случају са повећањем дужине кабла са 200 m на 1600 m пренапони у појединим тачкама постројења су се смањили, иако је било за очекивати да дође до њиховог повећања. Разлог томе је што се са промјеном дужине кабла 2 мијења и мометан када се у постројењу појављују рефлектовани и преломљени таласи са различитих елемената система, а то много утиче на таласни облик пренапона и на његову амплитуду. У највећем броју случајева већа дужина кабла значи и више пренапоне, али у неким случајевима то и не мора бити испуњено.

У претходним прорачунима разматран је случај када су ЛОП постављени на свих пет стубова испред постројења. У табели VI су приказани резултати прорачуна за случај парцијалне уградње ЛОП на прилазним стубовима вода, при чему је мјесто атмосферског пражњења врх првог стуба испред постројења.

ТАБЕЛА VI. УТИЦАЈ ПАРЦИЈАЛНЕ УГРАДЊЕ ЛОП НА НИВО ЗАШТИТЕ ОПРЕМЕ У ПОСТРОЈЕЊУ

Чвор	Конфигурација одводника			
	SA	SA+ ЛОП на 1. стубу	SA+ ЛОП на 1. и 2. стубу	SA+ ЛОП на свим стубовима
V1	624 kV	405 kV	404 kV	403 kV
V2	660 kV	558 kV	558 kV	554 kV
V3	701 kV	607 kV	602 kV	602 kV

Уградњом ЛОП на само једном (првом) стубу испред постројења може се постићи побољшана заштита опреме од атмосферских пренапона. Уградња ЛОП на више сљедећих стубова не доноси осјетна побољшања нивоа заштите у случају 110 kV постројења.

Уградњом ЛОП на прилазним стубовима надземног вода не постиже се само смањење амплитуде атмосферских пренапона у постројењу, него и смањење њихове стрмине. Стрми (сјечени) пренапони, који се јављају приликом појаве повратних прескока, су веома опасни за изолацију енергетских трансформатора тако да је ово друга битна корист од примјене ЛОП.

Приликом уградње ЛОП потребно је адекватно одабрати његову апсорбциону моћ како би се спријечила термичка уништења приликом одвођења струје атмосферског пражњења. Поред уништења одводника, у том случају би се десио и испад вода праћен јаким струјама кратког споја што би могло створити озбиљне проблеме у постројењу. Како би се спријечила појава овог сценарија у раду је рачуната апсорбована енергија ЛОП у случају атмосферског пражњења у штићени стуб. Прорачуни енергетског напрезања одводника су урађени за шему са Сл. 1 и за случај када је само стуб у који се одвија пражњење (први стуб) штићен помоћу одводника пренапона. У овом случају одводник апсорбује

максималну енергију. Добијено је да је ЛОП апсорбовао енергију од 268 kJ, односно 2.8 kJ/kVr. Да би се елиминисала могућност термичког уништења ЛОП у конкретном случају је потребно да он има енергетску апсорбциону моћ од минимум 3 kJ/kVr. У другим случајевима могуће је да ЛОП апсорбује знатно већу енергију тако да је у складу са конкретним случајем неопходно извршити прорачуне и направити одговарајући избор. Апсорбовану енергију ЛОП умањују сљедеће двије чињенице:

1. Штићени стуб има малу вриједност импедансе уземљења (3Ω) па се знатан дио струје пражњења одводи у тло и не протиче кроз ЛОП.
2. Други крај ЛОП је везан за фазни проводник чија импеданса знатно ограничава струју кроз ЛОП па самим тим и његово енергетско напрезање.

Ц. Примјена ЛОП за заштиту постројења од пренапона насталих усљед директних удара грома у фазни проводник прилазног вода

Саставни дио процеса координације изолације је и прорачун пренапона у постројењу који се јављају као посљедица директног удара грома у фазни проводник вода. У [17] је наглашено да је максимална регистрована струја директног пражњења у фазни проводник на воду називног напона 500 kV једнака 36 kA. У [18] су максималне вриједности струја математички рачунате. Добијене вриједности зависе од висине стубова, геометрије главе стуба и слично. Кориштењем метода предложеног у IEEE Std 1243:1997 [19] прорачуната је максимална вриједност струје од 31.5 kA за вод називног напона 275 kV [18].

Заштита надземног вода од директних удара у фазни проводник се проводи избором одговарајуће геометрије главе стуба. Упркос томе проблем се може јавити због чињенице да први удар може имати малу амплитуду струје, а да узастопни удари имају веће амплитуде и изазову оштећење опреме. Овај сценарио је описао у IEEE Std 1243:1997 [19].

У табели VII су приказани резултати утицаја ЛОП на висину максималних пренапона у постројењу у случају када је амплитуда струје једнака 30 kA и када се удар дешава у први распон вода испред постројења. Усвојен је таласни облик струје грома 5.63/77.5 $\mu\text{s}/\mu\text{s}$ [13],[20]. Атмосферско пражњење је моделовано као реални струјни извор сачињен од паралелне везе идеалног струјног извора са троугаоним таласним обликом струје [10] у паралели са импедансом канала грома која је усвојено да износи 1000 Ω [14].

Највиши ниво заштите се постиже ако се постројење штити са одводником у далеководном пољу и у GIS. Ако уградња одводника у GIS из неког разлога није могућа постројење се може штитити и помоћу ЛОП постављеног на првом стубу испред постројења. У случају директног удара грома у фазни проводник ЛОП проводи струју пражњења преко стуба и његовог уземљивача у тло значајно смањујући пренапоне у постројењу. Ако се ЛОП постави на другом стубу испред постројења добијају се критичнији

резултати јер други стуб има већу импедансу уземљења која знатно отежава одвођење струје у тло. У овом случају енергија коју одводник апсорбује је веома мала због мале амплитуде струје пражњења.

ТАБЕЛА VII. УТИЦАЈ ЛОП НА НИВО ЗАШТИТЕ ОПРЕМЕ У ПОСТРОЈЕЊУ У СЛУЧАЈУ ДИРЕКТНОГ ПРАЖЊЕЊА У ФАЗНИ ПРОВОДНИК

Чвор	Конфигурација одводника				
	SA	SA+ GIS-SA	SA+ ЛОП на 1. стубу	SA+ ЛОП на 2. стубу	SA+ ЛОП на 1 и 2. стубу
V1	418 kV	225 kV	346 kV	429 kV	355 kV
V2	511 kV	281 kV	447 kV	514 kV	453 kV
V3	531 kV	405 kV	450 kV	525 kV	459 kV

V. ЗАКЉУЧАК

На основу приказаних резултата може се закључити да ЛОП могу бити примјењени за заштиту постројења од атмосферских пренапона. Овај закључак се базира на детерминистичком прорачуну координације изолације који је проведен у складу са IEC 62305. Позитивни ефекти од уградње ЛОП се могу уочити и у случају заштите постројења од атмосферских пренапона насталих као посљедица повратних прескока и у случају директног пражњења у фазни проводник. Оптималан конфигурација ЛОП у случају анализираних 110 kV постројења је уградња ЛОП на првом стубу испред постројења. Уградња ЛОП на сљедећим стубовима ће побољшати ниво заштите постројења и смањити енергетско напрезање одводника пошто долази до прерасподјеле апсорбоване енергије пражњења. Са друге стране већи број ЛОП повећа инвестиционе трошкове заштите тако да се оптималан број штићених стубова мора одредити на бази техничко-економске анализе. Неопходно је нагласити да оптимална конфигурација ЛОП зависи од конкретних параметара анализираних система тако да се у случају постројења другачијег називног напона или конфигурације морају урадити нови прорачуни.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] A. R. Hileman. Insulation Coordination for Power Systems. CRC Press Taylor & Francis Group, 1999.
- [2] IEEE Std 998-1996, IEEE Guide for Direct Lightning Stroke Shielding of Substations, 19. April. 1996.
- [3] M. S. Savić, A. M. Savić, "Substation Lightning Performance Estimation due to Strikes into Connected Overhead Lines", IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. PP, DOI:10.1109/TPWRD.2015.2404771, February 2015.
- [4] J. Mikulović, M. Savić, "Calculation of Transients in Transformer Winding and Determination of Winding Parameters". Electrical Engineering (Archiv fur Elektrotechnik), Springer, Vol. 89, No. 4, pp 293-300, March 2007.
- [5] T. Hasman, "Reflection and transmission of traveling waves on power transformers". IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 12, pp. 1684-1689, October 1997.
- [6] M. Banjanin, M. Savić, "Specialized software for estimating transmission line and substation lightning performance", International Journal of Electrical Engineering Education, Vol. 52, No. 4, pp. 340-355, October 2015.
- [7] M. S. Savić, Z. Stojković, "High Voltage Substation Equivalent Circuits in the Lightning Performance Estimation", IEE Proceedings C,

Generation, Transmission and Distribution, Vol. 141, No. 2, pp. 99-105, March 1994.

- [8] Z. Stojkovic, "An Improved Method for HV Substation Lightning Performance Estimation". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 3, pp. 917-922, July 1999.
- [9] Protection against lightning – Part 1: General principles, International Standard IEC 62305-1, First edition, 2006-01.
- [10] 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.
- [11] S. Sadovic, R. Joulie, S. Tartier, E. Brocard, "Use of Line Surge Arresters for the Improvement of the Lightning Performance of 63 kV and 90 kV Shielded and Unshielded Transmission Lines", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 12, No. 3, pp. 1232 - 1240, July 1997.
- [12] 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, July 1985.
- [13] CIGRE Technical Brochure No. 63. Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines. 1991.
- [14] M. S. Banjanin, M. S. Savić, "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.
- [15] Heidler F, "Analytische Blitzstromfunktion zur LEMP- Berechnung". (in German). 18th International Conference on Lightning Protection (ICLP), pp. 63-66, Munich, Germany, September, 1985.
- [16] Pignini A, Rizzi G, Nati E, Porrino A, Baldo G, Pesavento G, "Performance of large air gaps under lightning overvoltages: experimental study and analysis of accuracy predetermination methods". IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 4 (Issue 2), pp. 1379-1392, April 1989.
- [17] Hengxin HE, Junjia HE, ShiJun XIE, Shuai YAO, Dandan Zhang, Manling Dong, "Assessment of Lightning Shielding Performance of Double-Circuit UHV Overhead Transmission Lines", IEEE Power and Energy Society General Meeting, pp. 1-8, Minneapolis, 25-29 July 2010.
- [18] P. N. Mikropoulos, T. E. Tsovilis, "Lightning attachment models and maximum shielding failure current of overhead transmission lines: implications in insulation coordination of substations", IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 4 (Issue 12), pp. 1299-1313, December 2010.
- [19] IEEE Std 1243-1997, IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines, 26 June 1997.
- [20] CIGRE Working Group C4.407, Lightning parameters for engineering applications, CIGRE Technical Brochure No. 549, 2013.

ABSTRACT

In this paper application of non-gapped transmission line arrester (TLA) in 110 kV substation lightning protection is analyzed. Deterministic calculations in accordance with IEC 62305 are performed using EMTP-ATP software. Substations with non-standard configuration equipped with Gas Insulated Substation (GIS), long cables and direct cable connection between GIS and power transformer are considered. It is concluded that 110 kV substation lightning performance can be significantly improved by using TLAs at only one or two overhead transmission line towers. Positive effects of TLA application are noticed both in the case of back-flashovers as well as in the case of shielding failures.

GAPLESS LINE ARRESTERS APPLICATION IN LIGHTNING PROTECTION OF 110 kV HIGH VOLTAGE SUBSTATION

Mladen Banjanin