

**АНАЛИЗА БЕЗБЕДНОСТИ РАДНИКА ПРИЛИКОМ ОБАВЉАЊА РАДОВА НА
ДВОСИСТЕМСКОМ НАДЗЕМНОМ ВОДУ НАПОНСКОГ НИВОА 35 kV**

**ANALYSIS OF THE SAFETY OF WORKERS DURING WORKS ON 35 kV DOUBLE-CIRCUIT
OVERHEAD POWER LINES**

Маја ГРБИЋ*, Електротехнички институт „Никола Тесла”, Република Србија
Александар ПАВЛОВИЋ, Електротехнички институт „Никола Тесла”, Република Србија
Ранко ЈАСИКА, Електротехнички институт „Никола Тесла”, Република Србија
Стефан ОБРАДОВИЋ, Електротехнички институт „Никола Тесла”, Република Србија
Катарина МАКСИЋ, Електротехнички институт „Никола Тесла”, Република Србија
Часлав ПЕТРОВИЋ, Електродистрибуција Србије д.о.о. Београд, Република Србија
Ненад РИСТОВИЋ, Електродистрибуција Србије д.о.о. Београд, Република Србија

КРАТАК САДРЖАЈ

Тема рада је анализа безбедности радника приликом обављања радова на двосистемском надземном воду напонског нивоа 35 kV. Анализа је спроведена на реалном примеру два дистрибутивна вода напонског нивоа 35 kV који се једним делом трасе налазе на заједничким стубовима. Анализиран је случај када се радови обављају на једносистемској деоници једног од водова, док је други вод у нормалном погону и када на другом воду долази до појаве једнофазног земљоспоја. Анализа је заснована на резултатима прорачуна и обухвата ризик од напона додира и корака у околини стуба на коме се изводе радови, као и ризик да радник додирне фазни проводник вода на коме се обављају радови пре његовог уземљавања на стуб.

Кључне речи: безбедност радника, индукована електромоторна сила, једнофазни земљоспој, надземни вод

ABSTRACT

The topic of the paper is the analysis of the safety of workers during works on 35 kV double-circuit overhead power line. The analysis was carried out on a real example of two 35 kV distribution power lines, which are installed on the same towers along one part of their routes. The case when works are performed on a single-circuit section of one of the lines, while the other line is in operation as well as when a single-phase ground fault occurs on the other line was analyzed. The analysis is based on the results of calculations and includes the risk of touch and step voltages in the vicinity of the tower on which work is being performed, as well as the risk in the event that the worker touches the phase conductor of the line on which work is being performed before it is grounded to the tower.

Keywords: induced electromotive force, overhead line, safety of workers, single-phase ground fault

maja.grbic@icent.org

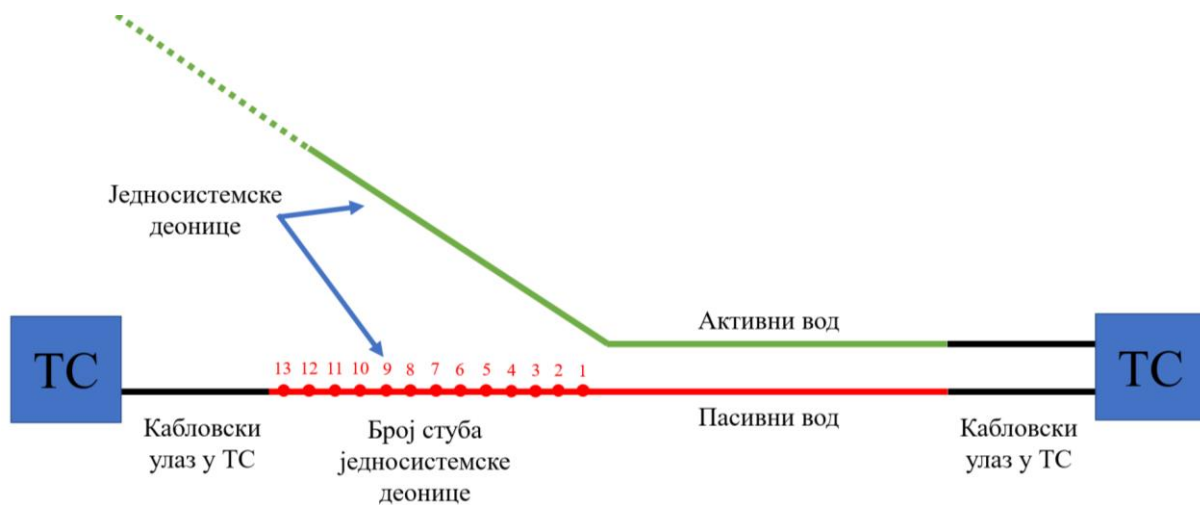
1. УВОД

Приликом одржавања дистрибутивних водова присутни су ризици по безбедност радника које је неопходно детаљно анализирати. У литератури [1]–[3] анализирани су ризици по безбедност радника услед индуктивног утицаја високонапонских водова вођених паралелно са дистрибутивним водом на коме се изводе радови. Рад [4] бави се проблематиком индукованих напона на двосистемским водовима када је један систем у погону а радови се обављају на другом систему који је ван погона. Тема овог рада је анализа безбедности радника приликом обављања радова на двосистемском надземном воду напонског

нивоа 35 kV. Анализа је спроведена на реалном примеру два дистрибутивна вода напонског нивоа 35 kV који се једним делом трасе налазе на заједничким стубовима. Анализиран је случај када се радови обављају на једносистемској деоници једног од водова, у тренутку када на другом воду долази до појаве једнофазног земљоспоја као и док је други вод у нормалном погону. Вод на коме се обављају радови (пасивни вод) се искључује на оба краја и ставља у безнапонско стање. За време обављања радова на пасивном воду, други (активни) вод, који се једним делом трасе налази на заједничким стубовима са пасивним водом, остаје у погону. Као последица електромагнетне индукције, услед протицања струје кроз активни вод, који је једним делом трасе вођен на заједничким стубовима са пасивним водом, индукује се електромоторна сила. Предмет рада је анализа безбедности радника у случају када се радови обављају на једносистемској деоници пасивног вода. Анализирана су два случаја у којима радник може бити изложен ризицима: 1) директни додир фазног проводника, пре његовог уземљавања на месту рада, у случају када је активни вод у нормалном режиму рада без квара и 2) изложеност напонима додира и корака у околини стуба на коме се обављају радови у случају када на активном воду дође до једнофазног кратког споја. Размотрена су оба случаја, при чему је анализиран утицај начина уземљавања вода на коме се врше радови. Разматрана су четири начина уземљавања пасивног вода: када је вод уземљен у обе крајње трансформаторске станице, када је уземљен само у једној од крајњих трансформаторских станица и када је неуземљен у обе крајње трансформаторске станице. У свим наведеним случајевима пасивни вод је био уземљен на месту рада.

2. МОДЕЛОВАЊЕ

На слици 1 приказане су трасе оба вода, при чему се могу видети двосистемска и једносистемске деонице активног и пасивног вода. Укупна дужина пасивног вода износи 2815 m, од чега је дужина двосистемске деонице 865 m а дужина једносистемске 1950 m. На завршетку двосистемске деонице оба вода су кабловски уведена у трансформаторску станицу, а дужина кабловских деоница износи по 700 m. Пасивни вод је кабловски уведен и у другу трансформаторску станицу при чему дужина кабловске деонице износи 800 m.



Слика 1 – Приказ трасе активног и пасивног вода

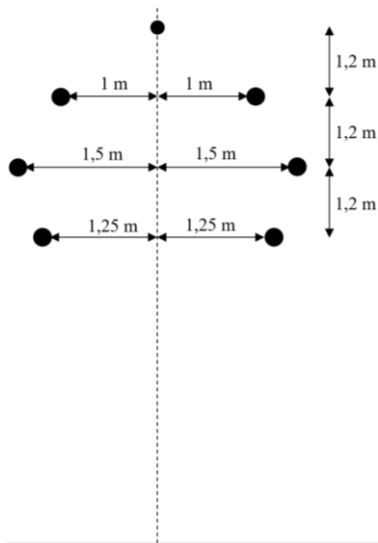
За израчунавање расподеле потенцијала, напона додира и напона корака у околини стуба где се изводе радови, неопходно је одредити вредност струје која се одводи са уземљивача стуба. Такође, потребно је одредити и вредност напона фазних проводника дуж једносистемске деонице предметног далековода. За израчунавање ових вредности коришћен је модел водова формиран у софтверском алату [5]–[8], док је прорачун отпора уземљивача, као и напона додира и корака урађен у софтверском алату [9]–[10]. Надземни водови напонског нивоа 35 kV представљени су PI моделом вода. Електрични параметри надземног вода за примену PI модела одређени су на основу геометријског распореда проводника вода и карактеристика самих проводника. Подаци коришћени приликом моделовања водова дати су у табелама 1 и 2, док су скице глава стубова са димензијама дате на сликама 2 и 3. Коришћена су два модела уземљивача стубова, са једном и са две контуре. Моделу су приказани на сликама 4 и 5. На овим сликама је са Р означен правац дуж кога се врши прорачун. Подаци о уземљивачима су дати у табели 3. За специфичну електричну отпорност тла усвојена је вредност од $\rho = 50 \Omega\text{m}$. Сви уземљивачи стубова, осим последњег на крају једносистемске деонице, типа су приказаног на слици 4, са једном контуром.

Табела 1 – Подаци о проводницима надземних деоница активног и пасивног вода

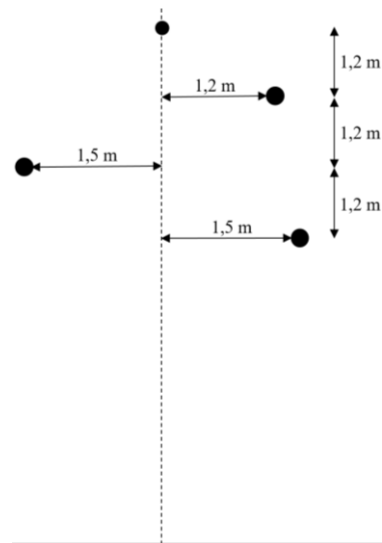
Фазни проводник				Заштитно уже			
Тип	Унутрашњи пречник [mm]	Спољашњи пречник [mm]	Подужни отпор [Ω /km]	Тип	Унутрашњи пречник [mm]	Спољашњи пречник [mm]	Подужни отпор [Ω /km]
Al/Č 70/12	2,15	5,85	0,4132	Fe 35	0	3,75	4,16

Табела 2 – Подаци о кабловским деоницама активног и пасивног вода

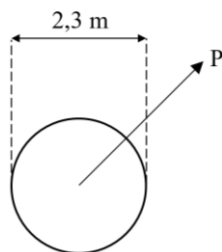
Тип кабловског вода	Проводник				Плашт			
	Тип	Унутрашњи пречник [mm]	Спољашњи пречник [mm]	Подужни отпор [Ω /km]	Тип	Унутрашњи пречник [mm]	Спољашњи пречник [mm]	Подужни отпор [Ω /km]
3 x (ХНЕ 49А 185/25 mm ²)	Al 185 mm ²	0	8,05	0,164	Cu 25 mm ²	16,05	16,3	0,0991



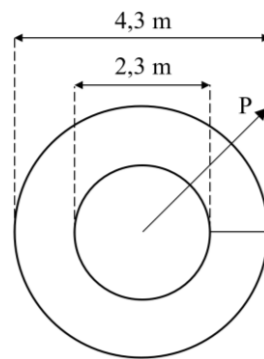
Слика 2 – Глава стуба на двосистемској деоници



Слика 3 – Глава стуба на једносистемској деоници



Слика 4 – Скица уземљивача са једном контуром



Слика 5 – Скица уземљивача са две контуре

Табела 3 – Подаци о уземљивачима стубова

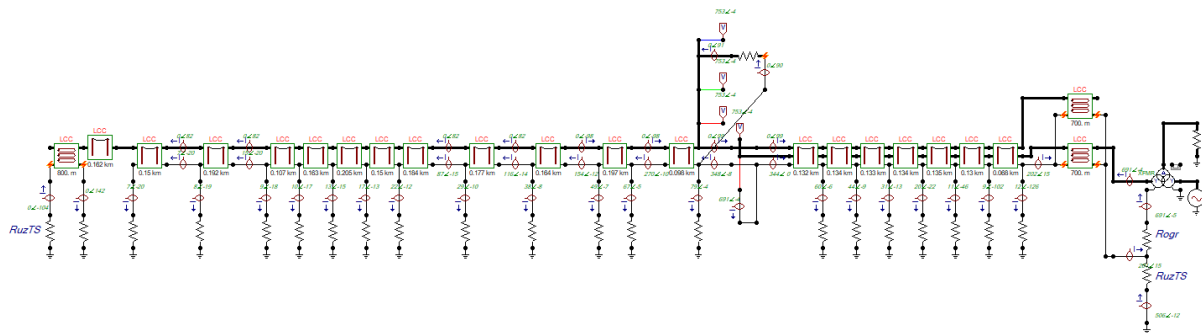
Уземљивач са једном контуром			Уземљивач са две контуре			
Тип	Дубина контуре [m]	Отпор [Ω]	Тип	Дубина мање контуре [m]	Дубина веће контуре [m]	Отпор [Ω]
FeZn трака пресека 25 x 4 mm ²	0,7	9,54	Челик пречника 10 mm	0,5	1	5,3

Активни и пасивни вод се напајају из трансформаторске станице 110/35 kV. Ради што прецизнијег одређивања струје квара која може протећи кроз активни вод при једнофазном кратком споју моделован је трансформатор поменуте трансформаторске станице. Подаци коришћени за моделовање су приказани у табели 4.

Табела 4 – Подаци о трансформаторској станици и трансформатору 110/35/10,5 kV

Спрега	Снага примара [MVA]	Снага секундара [MVA]	Снага терцијера [MVA]	Отпорност уземљења ТС [Ω]	Отпорник за ограничење струје квара [Ω]	Максимална струја квара [A]
YYd5	63	63	21	0,1	28,7	700

На слици 6 приказан је модел предметних водова у софтверском алату [5].



Слика 6 – Модел предметних водова у софтверском алату [5]

3. РЕЗУЛТАТИ ПРОРАЧУНА

3.1 Анализа утицаја начина уземљавања пасивног вода у крајњим трансформаторским станицама на напоне фазних проводника пре њиховог уземљавања

Анализиран је случај нормалног режима рада без квара. Како би се проверио најкритичнији случај, прорачун је урађен под претпоставком да кроз активни вод протиче трајно дозвољена струја која за тип фазног проводника Al/C 70/12 износи 269 A. Размотрена су четири начина уземљавања пасивног вода а резултати су приказани у табели 5. Највећи напони фазних проводника пасивног вода, у сва четири случаја, јављају се на стубу који је на слици 1 означен бројем 1 (први стуб на једносистемској деоници) и они су приказани у табели 5.

Табела 5 – Ефективне вредности напона [V]

Начин уземљавања пасивног вода	фаза А – доња	фаза В – средња	фаза С – горња
Уземљен на оба краја	3	1	4
Уземљен крај једносистемске деонице	0	0	0
Уземљен крај двосистемске деонице	4	2	6
Неуземљен на оба краја	25	5	29

Потребно је да напони буду мањи од максималних дозвољених вредности напона којима човек сме бити изложен. Трајно дозвољена вредност напона, према стандарду [11], износи $U_{doz} (V) = 80 V$.

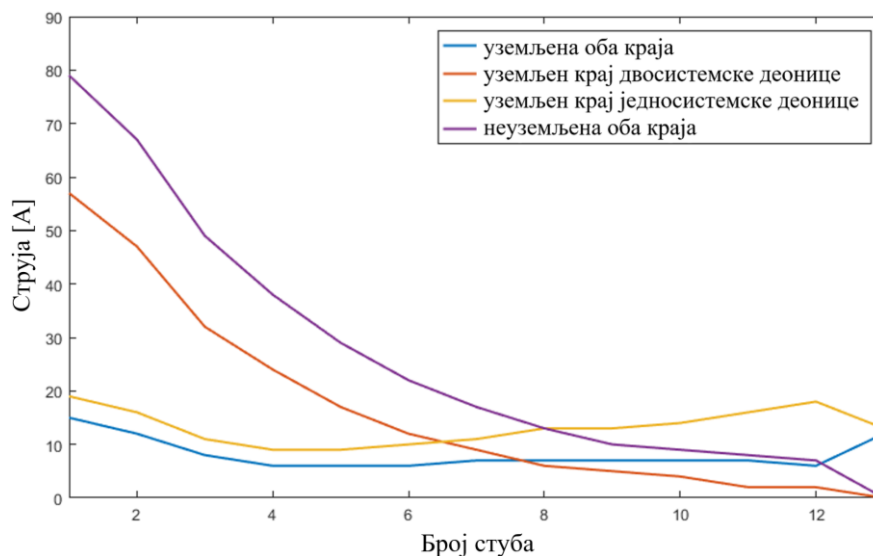
3.2 Анализа утицаја начина уземљавања пасивног вода у крајњим трансформаторским станицама на струју квара кроз уземљивач стуба на месту рада

Анализиран је случај када дође до једнофазног кратког споја на активном воду, на заједничкој деоници. Квар је симулиран на крају заједничке деонице, гледано од трансформаторске станице, како би петља квара била најдужа што индукује и највећу вредност електромоторне силе на пасивном воду. Посматрана је струја која протиче кроз уземљивач стуба на једносистемској деоници пасивног вода, при чему се подразумева да су радови већ у току и да су фазни проводници пасивног вода уземљени на стуб на месту рада. Прорачун је спроведен за различите локације места рада дуж једносистемске деонице пасивног

вода, тј. за стубове који су на слици 1 означени бројевима 1–13. Такође су размотрена четири начина уземљавања пасивног вода. У табели 6 издвојене су највеће ефективне вредности струје кроз уземљивач стуба за сваки од четири начина уземљавања пасивног вода, као и редни број стуба на коме се јавља највећа струја. На слици 7 приказане су ефективне вредности струја кроз сваки од уземљивача стубова, за сва четири начина уземљавања пасивног вода. Редни бројеви стубова су додељени тако да је први стуб најближи месту квара, док је последњи на крају једносистемске деонице далековода.

Табела 6 – Највећа ефективна вредност струје кроз уземљивач стуба

Струја кроз уземљивач стуба	Редни број стуба	Струја [А]
Уземљена оба краја	1	15
Уземљен крај једносистемске деонице	1	57
Уземљен крај двосистемске деонице	1	19
Неуземљена оба краја	1	79



Слика 7 – Струја кроз уземљиваче стубова

3.3 Израчунавање напона додира и корака у околини стуба

Анализа приказана у претходном поглављу је показала да вредности струје која отиче кроз уземљивач стуба, а самим тим и напони додира и корака варирају у зависности од начина на који је пасивни вод уземљен. Највећа струја се јавља на првом стубу, чији се уземљивач састоји од једне контуре и приказан је на слици 4. На основу модела уземљивача стуба и струје која се одводи са уземљивача могуће је одредити расподелу потенцијала на површини тла око стуба. На основу расподеле потенцијала дуж правца Р (слике 4 и 5), одређују се вредности потенцијалних разлика додира и корака, а на основу њих и вредности напона додира и корака. Напон додира (U_d) се израчунава применом следећег израза:

$$U_d = \frac{E_d}{1 + 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_{pov}} \quad (1)$$

где је E_d потенцијална разлика додира, која се одређује из расподеле потенцијала око стуба, а ρ_{pov} специфична електрична отпорност површинског слоја тла. Приликом израчунавања вредности напона додира претпостављено је да се радник налази на растојању од 1 m од стуба. Такође, анализирана је могућност да радник носи металне мердевине којима може да додирне стуб и са већег растојања. Напон корака (U_k) се израчунава применом следећег израза:

$$U_k = \frac{E_k}{1 + 6 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_{pov}} \quad (2)$$

где је E_k потенцијална разлика која се на тлу око стуба може премостити кораком дужине 1 m. Како је уземљивач у виду кружне контуре, напони додира и корака се израчунавају дуж једног правца који је на сликама 4 и 5 означен са Р.

У табели 7 издвојене су вредности напона додира само за случај додира са растојања 1 m од стуба. У истој табели дате су и највеће вредности напона корака дуж правца Р, као и вредности потенцијала уземљивача израчунате применом формуле:

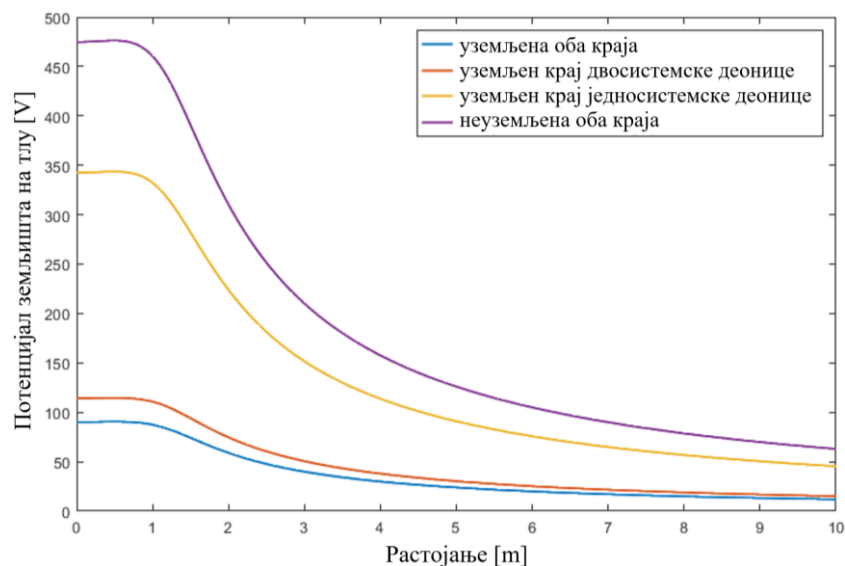
$$V_{uz} = I_{uz} \cdot R_{uz} \quad (3)$$

где је I_{uz} струја кроз уземљивач, а R_{uz} отпор уземљивача.

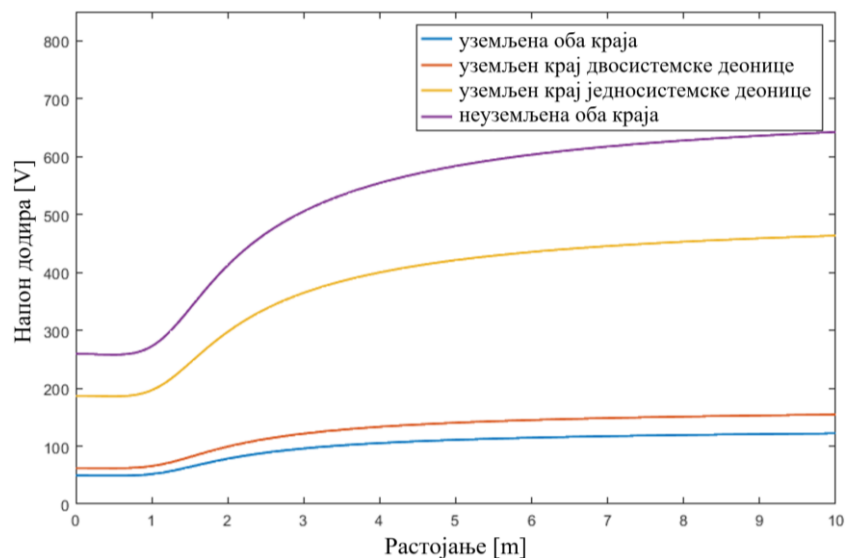
Табела 7 – Вредности напона додира, напона корака и потенцијала уземљивача

Начин уземљавања пасивног вода	U_d [V]	U_k [V]	V_{uz} [V]
Уземљена оба краја	54,48	22,50	143,06
Уземљен крај једносистемске деонице	207,01	85,04	543,62
Уземљен крај двосистемске деонице	69,00	28,61	181,21
Неуземљена оба краја	286,91	118,97	753,43

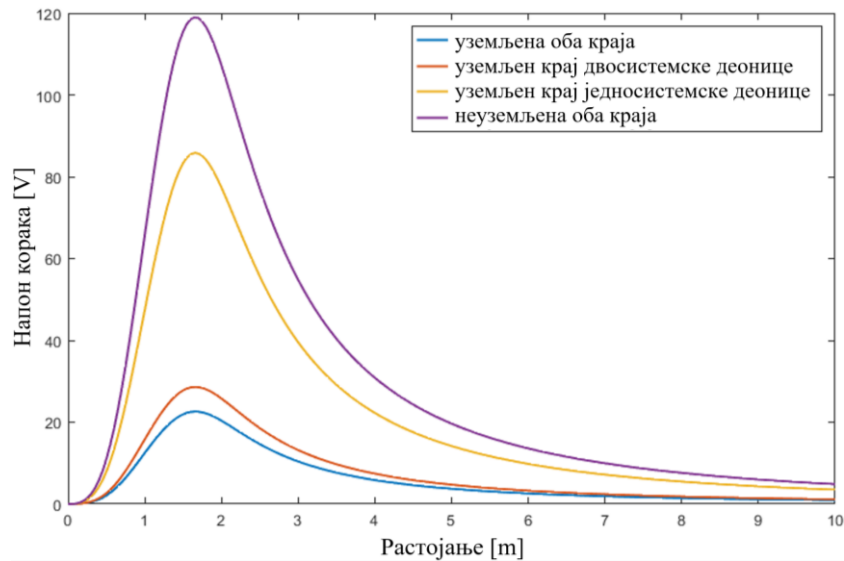
На сликама 8, 9 и 10 приказани су потенцијал земљишта на тлу, напони додира као и напон корака у зависности од растојања од стуба за сва четири начина уземљавања пасивног вода.



Слика 8 – Потенцијал земљишта на тлу за све начине уземљавања



Слика 9 – Напон додира за све начине уземљавања



Слика 10 – Напон корака за све начине уземљавања

Потребно је да прорачунате вредности напона додира и корака буду мање од прописаних граничних вредности којима човек сме бити изложен. На основу [12], максимално време искључења квара за 35 kV мрежу износи $t_k = 1$ s. За усвојено време $t_k = 1$ s, гранична вредност напона додира и корака према стандарду [8], износи U_{doz} (V) = 120 V. На основу резултата датих у табели 7 закључује се да само два начина уземљавања вода на коме се врше радови обезбеђују напоне додира ниже од дозвољених 120 V.

4. ЗАКЉУЧАК

У раду су анализирани безбедносни ризици током извођења радова на једносистемској деоници дистрибутивног вода напонског нивоа 35 kV, који се једним делом трасе налази на заједничким стубовима са другим дистрибутивним водом истог напонског нивоа. Анализа је обухватила четири начина уземљавања вода на коме се обављају радови. Разматран је ризик да радник додирне фазни проводник пасивног вода пре његовог уземљавања, док је активни вод у нормалном погону. Закључује се да се највеће вредности напона додира јављају у случају када пасивни вод није уземљен у крајњим трансформаторским станицама и уземљен је само на стубу на коме се обављају радови. Међутим, у свим разматраним случајевима различитих начина уземљавања пасивног вода, напон додира коме је изложен радник био је мањи од дозвољених 80 V. Такође је анализиран ризик од напона додира и корака у околини стуба на коме се обављају радови, у случају једнофазног земљоспоја на активном воду. Показало се да је рад на првом једносистемском стубу након раздвајања двосистемског вода најкритичнији. Највеће вредности напона додира и напона корака добијене су у случају када пасивни вод није уземљен у крајњим трансформаторским станицама. Вредности напона корака нису прекорачиле границу без обзира на начин уземљавања пасивног вода. Вредности напона додира којима би био изложен радник када би додирнуо стуб са растојања од 1 m прекорачују граничну вредност у случају када вод није уземљен на крајевима и у случају када је уземљен крај једносистемске деонице. Уземљавање пасивног вода на оба краја повољно утиче на безбедност радника који изводе радове.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Maja Grbić, Dragutin Salamon, Aleksandar Pavlović: "Analysis of Induced Electromotive Force in Phase Conductors of 35 kV Line Caused by Phase-to-Ground Fault in 400 kV Overhead Power Line", The 46th CIGRE Session, International Council on Large Electric Systems – CIGRE, Paris, France, August 21–26, 2016, Proceedings, Paper No. C3-205.
- [2] R. Horton, M. Halpin, K. Wallace: "Induced Voltage in Parallel Transmission Lines Caused by Electric Field Induction", ESMO 2006 – 2006 IEEE 11th International Conference on Transmission & Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance, Albuquerque, NM, USA, 2006, doi: 10.1109/TDCCLM.2006.340720.
- [3] Александар Павловић, Маја Грбић, Ранко Јасика, Стефан Обрадовић: „Анализа ризика по безбедност радника који раде на одржавању дистрибутивног надземног вода услед појаве индукване електромоторне силе”, XIII саветовање о електродистрибутивним мрежама Србије са

- регионалним учешћем, Национални комитет CIREC Србија, Копаноник, Република Србија, 12–16. 9. 2022. године, Зборник радова, Р-1.17, СТК 1 – Компоненте мрежа.
- [4] Маја Грбић, Александар Павловић, Јован Мрвић, Ранко Јасика, Стефан Обрадовић, Бранко Ђорђевић, Жељко Торлак, Милош Спаић, Мирко Боровић: „Начин уземљавања пасивног система као мера за смањење ризика при раду у близини напона на двосистемским преносним надземним водовима”, 34. саветовање CIGRE Србија, Српски национални комитет Међународног савета за велике електричне мреже, Врњачка Бања, Република Србија, 2–6. 6. 2019. године, Зборник радова, Р Б2 09, СТК Б2 – Надземни водови, ISBN: 978-86-82317-85-2.
- [5] ATP – EMTP: Bonneville Power Administration (BPA) Electro Magnetic Transient Program (EMTP) and ATPDraw – Alternative Transient Program (ATP) graphical pre-processor Copyright. (www.eeug.org)
- [6] H. W. Dommel, Electromagnetic Transients Program, Reference Manual (EMTP Theory Book), Bonneville Power Administration, Portland, 1986.
- [7] W. Scott Meyer, T. H. Liu, Alternative Transients Program (ATP) Rule Book, Canadian/American EMTP User Group, 1997.
- [8] H. K. Hoidalén, L. Prikler, F. Penaloza (2019) ATPDRAW Version 7.0 for Windows Users' Manual.
- [9] XGSLab User's Guide, Release 9.4.1 – 03/20, SINT Ingegneria Srl, March 2020.
- [10] XGSLab Tutorial XGSA_FD, Release 9.4.1 – 03/20, SINT Ingegneria Srl, March 2020.
- [11] SRPS EN 50522:2017 „Уземљење енергетских постројења наизменичног напона преко 1 kV”.
- [12] Правила о раду дистрибутивног система, ЕПС Дистрибуција д.о.о. Београд, Београд, 2017. година.