

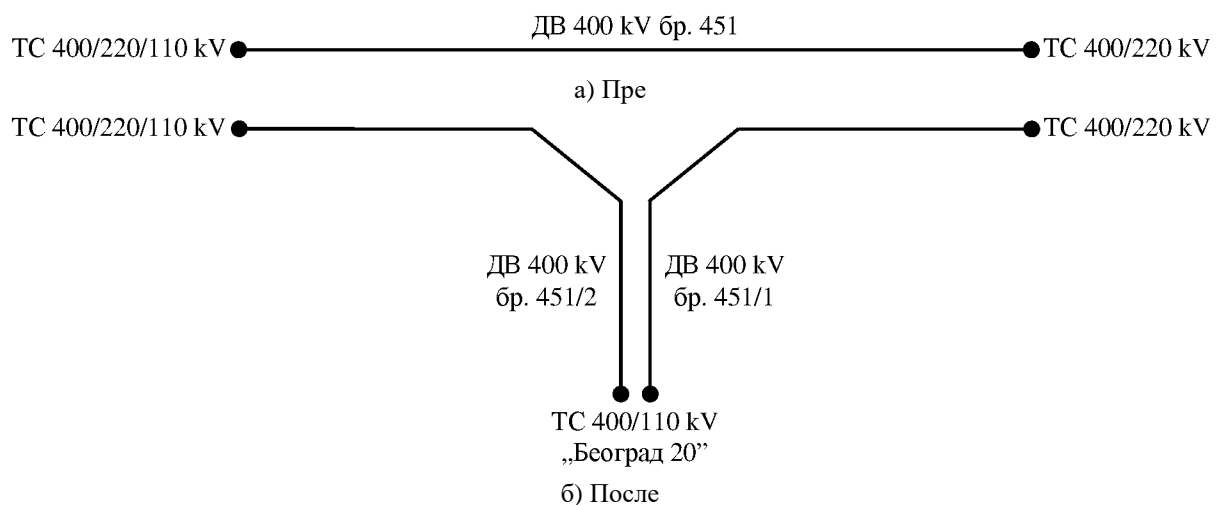
АНАЛИЗА ИНДУКОВАНЕ ЕЛЕКТРОМОТОРНЕ СИЛЕ У ФАЗНИМ ПРОВОДНИЦИМА ДИСТРИБУТИВНОГ НАДЗЕМНОГ ВОДА УСЛЕД ПОЈАВЕ ЈЕДНОФАЗНОГ ЗЕМЉОСПОЈА НА ВИСОКОНАПОНСКОМ ПРЕНОСНОМ ВОДУ

М. ГРБИЋ, Електротехнички институт „Никола Тесла”¹, Београд, Република Србија
А. ПАВЛОВИЋ, Електротехнички институт „Никола Тесла”, Београд, Република Србија
Д. САЛАМОН, Електротехнички факултет, Универзитет у Београду, Београд, Република Србија

1 УВОД

У раду су представљени резултати прорачуна електромоторне силе која се индукује у фазним проводницима дистрибутивног надземног вода напонског нивоа 35 kV током радова на његовом одржавању. Разлог ових прорачуна је изградња два нова надземна вода напонског нивоа 400 kV у близини поменутог дистрибутивног вода. Због тога је неопходно проверити безбедност радника који ће радити на одржавању дистрибутивног вода након изградње нових преносних водова.

У циљу прикључења нове трансформаторске станице 400 kV/110 kV „Београд 20” на преносну мрежу изграђена су два нова надземна вода од постојеће мреже до локације трансформаторске станице [1]. Постојећи надземни вод бр. 451 је пресечен и подељен (слика 1), чиме су добијена два нова вода (бр. 451/1 и 451/2), која су уведена у ТС „Београд 20”.



Слика 1 – Део мреже напонског нивоа 400 kV пре и након изградње нових водова

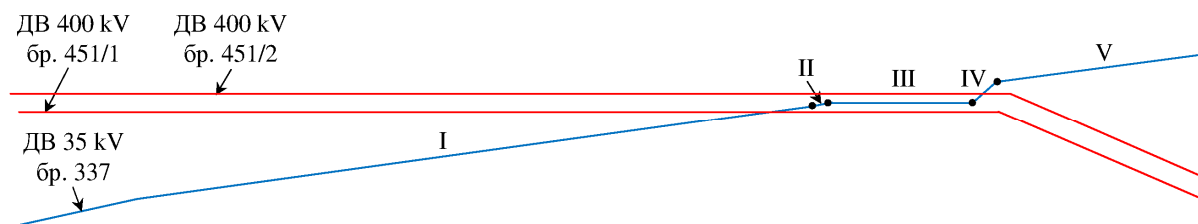
¹ Косте Главинића 8а, 011/3952-016, 064/8259-755, maja.grbic@ieent.org

Нови надземни водови бр. 451/1 и 451/2 се на једном делу своје трасе укрштају са постојећим дистрибутивним водом бр. 337 напонског нивоа 35 kV. Пошто се високонапонски водови укрштају са дистрибутивним водом и простиру паралелно са њим једним делом своје трасе, долази до појаве индуковане електромоторне силе у проводницима дистрибутивног вода, због чега је потребно проверити безбедност радника ангажованих на одржавању овог вода. Како би добијени резултати били на страни сигурности, анализиран је случај када на једном од високонапонских водова долази до појаве једнофазног земљоспоја. У циљу одређивања најкритичнијег случаја анализирани су обе ситуације, тј. појава једнофазног земљоспоја на воду бр. 451/1 док је вод бр. 451/2 ван погона и обрнуто.

2 ПРОРАЧУН ИНДУКОВАНЕ ЕЛЕКТРОМОТОРНЕ СИЛЕ

У циљу одређивања највеће могуће електромоторне силе која се индукује у уземљеним фазним проводницима дистрибутивног вода анализирана је ситуација појаве једнофазног земљоспоја на једном од преносних водова. Претпостављено је да је приликом једнофазног земљоспоја на једном преносном воду други преносни вод ван погона. Прорачуни индуковане електромоторне силе спроведени су за фазни проводник који се налази у оси дистрибутивног вода, према методи описаној у [2,3]. Претпостављено је да су проводници свих анализираних водова правни и паралелни са површином земље, тј. занемарен је угиб проводника. Прорачун је спроведен под претпоставком да нема разлике у висини између проводника активног (400 kV) и пасивног вода (35 kV). Овакав приступ је на страни сигурности и поједностављује прорачун, али у конкретном случају не уноси значајна одступања.

Приликом израчунавања индуковане електромоторне силе први корак представља одређивање подужне међусобне импедансе између активног и пасивног вода. Због тога је неопходно поделити пасивни вод на праволинијске сегменте и, ако је потребно, на још мање подсегменте. Анализирана деоница дистрибутивног вода је подељена на пет праволинијских сегмената (I–V), што је приказано на слици 2. Сегмент који је паралелан са трасом високонапонског вода разматран је као целина, док су остали сегменти, који се налазе под одређеним углом у односу на високонапонски вод додатно подељени на подсегменте, према критеријуму описаном у [2,3]. Анализирана је деоница пасивног вода на којој је његово растојање од осе високонапонског вода мање или једнако 250 m.



Слика 2 – Деоница укрштања и паралелног вођења високонапонских водова и дистрибутивног вода

На сваки сегмент или подсегмент може се применити апроксимација Карсонове формуле за израчунавање подужне међусобне импедансе [3]:

$$z_m = r_m + jx_m = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \left[\ln \left(\frac{D_1}{D_0} \right) - \frac{1}{12} \cdot \left(\frac{2}{\gamma \cdot D_1} \right)^4 \right]. \quad (1)$$

Ознаке у изразу (1) имају следећа значења:

z_m – подужна међусобна импеданса,

r_m – подужна међусобна отпорност,

x_m – подужна међусобна реактанса,

ω – кружна учестаност струје активног вода ($2\pi f$),

f – учестаност струје активног вода,

μ_0 – пермеабилност вакуума ($4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m).

У претходном изразу D_0 и D_1 се израчунавају на следећи начин:

$$D_0 = \sqrt{S^2 + (h_1 - h_2)^2} \quad (2)$$

$$D_1 = \sqrt{S^2 + \left(h_1 + h_2 + \frac{2}{\gamma} \right)^2} \quad (3)$$

где су:

S – хоризонтално растојање између оса активног и пасивног вода,

h_1 – висина проводника активног вода,

h_2 – висина проводника пасивног вода.

У циљу поједностављења прорачуна претпостављено је да нема разлике у висини између проводника активног (400 kV) и пасивног (35 kV) вода, тј. да је $h_1 = h_2 = h$. У анализираном случају ово поједностављење не уноси значајна одступања.

Хоризонтално растојање S_{ij} између активног вода и сегмента $i-j$ пасивног вода израчунава се на следећи начин:

$$S_{i-j} = \sqrt{S_i \cdot S_j} \quad (4)$$

где су:

S_i – хоризонтално растојање између активног вода и почетне тачке (i) сегмента $i-j$ пасивног вода,

S_j – хоризонтално растојање између активног вода и крајње тачке (j) сегмента $i-j$ пасивног вода.

У изразу (3) $\underline{\gamma}$ се израчунава као:

$$\underline{\gamma} = \sqrt{\frac{j\omega\mu_0}{\rho}} \quad (5)$$

где ρ означава специфичну отпорност тла. У прорачунима је усвојено да средња вредност специфичне отпорности тла дуж трасе вода износи 50 Ωm .

Поједностављена Карсонова формула даје резултате чија су одступања мања од 5% у односу на резултате добијене оригиналном Карсоновом формулом за следеће вредности D_0 :

$$D_0 < \frac{0,5}{|\underline{\gamma}|} \text{ m и } D_0 > \frac{5}{|\underline{\gamma}|} \text{ m.} \quad (6)$$

За остале вредности D_0 , одступања резултата могу да износе до 20%.

Међусобна импеданса \underline{Z}_m се за сваки сегмент, односно подсегмент, израчунава као производ подужне међусобне импедансе (\underline{z}_m) и дужине пројекције датог сегмента пасивног вода на активни вод (L):

$$\underline{Z}_m [\Omega] = \underline{z}_m \cdot L = (r_m + jx_m) \cdot L. \quad (7)$$

Електромоторна сила индукована у сегменту, односно подсегменту пасивног вода је:

$$\underline{E} = \underline{Z}_m \cdot r \cdot \underline{I} \quad (8)$$

где I означава струју која протиче кроз активни проводник, а r редуccionи фактор. У анализираном случају I је струја која протиче кроз фазу преносног вода погођену кваром. Пошто преносни вод има заштитну ужад, неопходно је израчунати редуccionи фактор.

2.1 Једнофазни земљоспој на воду 451/1

Анализиран је случај једнофазног земљоспоја на воду 451/1 док је вод 451/2 ван погона. Анализа је показала да је најкритичнији случај једнофазног земљоспоја на првом стубу поред ТС „Београд 20”.

Израчуната вредност струје земљоспоја у овом случају износи 9,96 kA [4].

Надземни вод 451/1 има два заштитна ужета, од којих је једно *OPGW* тип А, а друго *Alumoweld*. Подужна отпорност *OPGW* ужета је 0,310 Ω/km , а *Alumoweld* ужета 0,6821 Ω/km . Еквивалентна вредност редуccionоног фактора израчуната за оба заштитна ужета је 0,587.

Резултати прорачуна индуковане електромоторне силе у једном фазном проводнику дистрибутивног вода у случају једнофазног земљоспоја на воду 451/1 приказани су у табели 1.

Табела 1 – Резултати прорачуна индуковане електромоторне силе у уземљеном фазном проводнику дистрибутивног вода у случају једнофазног земљоспоја на воду 451/1

Сегмент	Број подсегмената	Дужина сегмента [m]	\underline{E} [V]	E [V]
I	8	2352,76	$596,92 + j1542,3$	1653,78
II	1	56,45	$14,77 + j71,66$	73,17
III	1	453,36	$121,83 + j544,36$	557,83
IV	2	90,64	$17,84 + j62,11$	64,62
V	3	544,89	$107,88 + j194,29$	222,23
Укупна индукована електромоторна сила:			$859,24 + j2414,72$	2563,04

2.2 Једнофазни земљоспој на воду 451/2

У циљу одређивања најкритичнијег случаја анализирана је и друга ситуација, тј. случај једнофазног земљоспоја на воду 451/2 док је вод 451/1 ван погона. И у овом случају анализа је показала да је најкритичнији случај једнофазног земљоспоја на првом стубу поред ТС „Београд 20”. Израчуната вредност струје земљоспоја у овом случају износи 6,52 kA [4].

Надземни вод 451/2 такође има два заштитна ужета, и то оба *Alumoweld*. Подужна отпорност заштитне ужета износи 0,6821 Ω /km. Еквивалентна вредност редуционог фактора израчуната за оба заштитна ужета је 0,717.

Резултати прорачуна индуковане електромоторне силе у једном фазном проводнику дистрибутивног вода у случају једнофазног земљоспоја на воду 451/2 приказани су у табели 2.

Табела 2 – Резултати прорачуна индуковане електромоторне силе у уземљеном фазном проводнику дистрибутивног вода у случају једнофазног земљоспоја на воду 451/2

Сегмент	Број подсегмената	Дужина сегмента [m]	\underline{E} [V]	E [V]
I	3	2156,57	$432,73 + j924,39$	1020,66
II	1	56,45	$11,77 + j49,01$	50,40
III	1	453,36	$97,16 + j433,01$	443,78
IV	6	75,86	$11,97 + j61,49$	62,64
V	4	596,60	$101,75 + j233,49$	254,70
Укупна индукована електромоторна сила:			$655,38 + j1701,39$	1823,25

На основу резултата приказаних у табелама 1 и 2 може се закључити да је критичнији случај једнофазног земљоспоја на воду 451/1.

3 ОПАСНОСТИ УСЛЕД ЕЛЕКТРОМАГНЕТСКЕ ИНДУКЦИЈЕ

У проводницима који се налазе у близини електроенергетских водова кроз које протиче струја, у нормалном режиму рада или у режиму квара, као последица електромагнетске спреге индукује се електромоторна сила.

Ако су пасивни проводници у којима се индукују електромоторне силе уземљени на барем два места (у трансформаторској станици и на стубу), кроз тако формирану петљу протиче струја која је ограничена импедансом петље коју чине импеданса вода, отпори уземљења на крајевима петље и импеданса повратног пута струје кроз земљу [5,6].

Како су импедансе повратног пута кроз земљу и уземљења постројења мале, струја која протиче кроз тако формирану петљу доминантно зависи од импедансе вода и отпора уземљења стуба. Показује се да се вредност ове струје мало мења са променом дужине деонице паралелног вођења водова пошто се са променом дужине мењају и индукована електромоторна сила и импеданса вода [5,7]. Пошто су отпори уземљења стубова водова напонског нивоа 35 kV релативно велики, највећи део падова напона у петљи појављује се на уземљењу стуба. Описана ситуација се односи на уземљење фазних проводника вода. У случају заштитног ужета ситуација је нешто другачија, али овај утицај није разматран пошто анализирани вод нема заштитно уже.

За анализу услова безбедности радника при радовима на воду критичан је случај када је дистрибутивни вод искључен и уземљен на својим крајевима, а радови се обављају на неком од стубова вода. При томе је критичнији случај радова на неком стубу изван деонице укрштања и паралелног вођења пошто је тада цела индукована електромоторна сила обухваћена струјном петљом. Уземљавање на крајевима вода се обично врши на линијском растављачу са ножевима за уземљење тако да су сва три фазна проводника вода везана на уземљивач постројења.

Приликом радова вод се обавезно уземљује и на месту извођења радова, и то двоструко – лево и десно од места на коме се изводе радови. На водовима са челично-решеткастим стубовима, што је случај са водом бр. 337, уземљавање се врши трофазним краткоспојницима, а као уземљивач служи метална конструкција стуба и његов уземљивач.

У процесу рада постоје два критична момента – тренутак првог контакта радника са стубом и првог контакта земљоспојника са фазним проводником. Пошто стуб нема заштитно уже, при првом контакту радника са стубом нема никакве опасности зато што у том тренутку кроз стуб још није успостављена струја и нема опасности од напона додира и корака у околини стуба. Исто тако, пошто се краткоспојници везују за фазне проводнике помоћу изолационе мотке, елиминисана је опасност од успостављања директног контакта радника са неуземљеним фазним проводником. Опасност по раднике настаје након уземљавања фазних проводника због могуће појаве опасних напона додира и корака у околини стуба услед протицања струје кроз уземљење стуба, која се јавља као последица индукованих електромоторних сила у фазним проводницима пасивног вода [8,9].

У конкретном случају, анализирани дистрибутивни вод нема заштитно уже, а стубови су челично-решеткасти са бетонским темељима. Пошто информација о томе да ли стубови имају додатне прстенасте уземљиваче или за уземљење служе само бетонски темељи са металном арматуром није била доступна, као критичнији анализиран је случај када нема додатног прстенастог уземљивача. Бетонски темељ стуба као уземљивач се може у првој апроксимацији посматрати као уземљивач у облику кружне плоче, положене на површину земље, која обухвата све темеље стуба. Усвојена средња вредност специфичне отпорности тла дуж трасе вода износи $50 \Omega\text{m}$. Узимајући у обзир поменућу вредност специфичне отпорности тла и пречник кружне плоче $D = 2 \text{ m}$, отпорност уземљења стуба може се израчунати на следећи начин:

$$R_s = \frac{\rho}{2 \cdot D} = 12,5 \Omega . \quad (9)$$

Типична вредност подужне нулте отпорности вода чији је проводник $Al/\check{C}e$ 95 mm^2 износи $r_0 = 0,32 \Omega/\text{km}$, док је вредност подужне нулте реактансе $x_0 = 1,5 \Omega/\text{km}$. Отпорност повратног пута кроз земљу износи $r_z = 0,05 \Omega/\text{km}$. Усвојена вредност отпора уземљења трансформаторске станице на крају вода износи $R_t = 0,5 \Omega$. За растојање од $L_{st} = 10 \text{ km}$ између стуба и трансформаторске станице и израчунату вредност индуковане електромоторне силе од 2563 V , процењена вредност струје кроз уземљење стуба је:

$$\underline{I} = \frac{\underline{E}}{R_s + R_t + \left(r_z + \frac{r_0 + jx_0}{3} \right) \cdot L_{st}} = 166,42 \cdot e^{j18,91^\circ} \text{ A} . \quad (10)$$

Напон на који долази уземљивач стуба је:

$$U_s = R_s \cdot I = 2080,25 \text{ V} . \quad (11)$$

Потенцијал тачке на тлу удаљене 1 m од стуба је:

$$V_{1m} = \frac{\rho I}{\pi D} \cdot \arcsin \frac{D}{2l} = 693,42 \text{ V} \quad (12)$$

где l означава растојање између вертикалне осе стуба и тачке на тлу за коју се израчунава потенцијал.

Напон додира се израчунава на следећи начин:

$$U = \frac{U_s - V_{1m}}{1 + 1,5 \cdot \rho \cdot 10^{-3}} = 1290,1 \text{ V} . \quad (13)$$

Из спроведених анализа је очигледно да се у околини стуба на коме се обављају радови могу појавити високе вредности напона додира, знатно веће од максимално дозвољених вредности. Због тога је потребно у току радова обезбедити максималне мере безбедности, како за раднике, тако и за остала лица која се могу наћи у околини места на коме се обављају радови.

4 ПОТРЕБНЕ МЕРЕ ЗАШТИТЕ

Спроведене анализе су показале да се у проводницима дистрибутивног вода за време земљоспоја на преносним водовима услед електромагнетске спреге могу индуковати високе вредности електромоторне силе које могу представљати опасност за раднике на практично целој дужини посматраног дистрибутивног вода. Електромоторне силе могу бити опасне при директном контакту човека са фазним проводницима вода, а додатна опасност се јавља као последица обавезног уземљавања вода на месту радова због појаве превисоких напона додира у околини стуба на коме је изведено уземљавање вода. Због тога је при оваквим радовима потребно предузети одређене мере заштите особља које обавља радове:

- Неопходно је применити све прописане заштитне мере за рад под напоном, без обзира на чињеницу да је вод на коме се ради искључен и уземљен (заштитне рукавице, заштитна обућа итд.).
- При радовима је потребно користити возила са гуменим точковима и изолационом корпом кад год је то могуће.
- На месту радова неопходно је извршити двоструко уземљавање вода, са обе стране места на коме се изводе радови.
- Као заштитно уземљење првенствено треба користити уземљивач стуба далековода. Само у изузетним случајевима може се користити помоћни уземљивач који је изведен побијањем сонди.
- Место радова треба да буде обележено опоменским таблицама и заштићено од приступа људи који нису ангажовани на радовима. Улазак неовлашћених лица у зону радова треба спречити, пошто може имати фаталне последице.
- Ако се вод оставља без надзора током периода када је ван погона, неопходно је уклонити све помоћне краткоспојнике за уземљење на месту рада.
- Ако се на месту рада користе кранови који су у директном контакту са тлом преко металних точкава, у циљу заштите од напона корака и додира, кранове треба додатно уземљити и предузети све потребне мере за изједначење потенцијала у њиховој околини.
- Када се ради на воду, заштитно уземљење треба увек применити што је могуће ближе месту рада. Све три фазе међусобно треба повезати кратким проводницима и уземљити једним заједничким проводником.
- Сви проводни објекти на локацији на којој се одвијају радови треба да буду поуздано међусобно галвански повезани да би се створила еквипотенцијална област, тако да се спречи појава опасних напона додира и корака.
- Потребно је непрестано водити рачуна о степену обучености радника за рад у условима када постоји опасност услед индуктивног утицаја.

5 ЗАКЉУЧАК

У раду је представљен реалан случај у коме су два нова надземна вода напонског нивоа 400 kV изграђена у близини постојећег дистрибутивног вода напонског нивоа 35 kV. У случају када су фазни проводници дистрибутивног вода уземљени због радова на одржавању вода, у њима се, услед електромагнетске индукције, јавља електромоторна сила, како у нормалном радном режиму преносних водова, тако и у случају земљоспоја на овим водовима. Из тог разлога је неопходно проверити безбедност радника ангажованих на одржавању дистрибутивног вода. У циљу одређивања најкритичнијег случаја са аспекта безбедности радника анализирана је ситуација појаве једнофазног земљоспоја на једном од преносних водова. При томе је претпостављено да је до земљоспоја дошло на једном преносном воду, док је други преносни вод ван погона и обрнуто. Као најкритичнији, анализиран је случај када је дистрибутивни вод уземљен на два места због радова на одржавању. Спроведени прорачуни су показали да се у околини стуба дистрибутивног вода могу појавити опасни напони додира. Из тог разлога су у раду препоручена и детаљно описана правила којих се треба придржавати у циљу заштите радника ангажованих на одржавању вода, као и људи који се могу наћи на месту радова.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Елаборат Електротехничког института „Никола Тесла” бр. 315005: „Стручна оцена утицаја ДВ 400 kV бр. 451/1 и 451/2 на изложеност нејонизујућем зрачењу радника који раде на одржавању дистрибутивног вода 35 kV бр. 337 и оцена услова безбедности у погледу електромагнетске интерференције”, Београд, 2015. година.
- [2] SRPS N.C0.101:1989, Заштита телекомуникационих постројења од утицаја електроенергетских постројења – Заштита од опасности.

- [3] IEEE Std. 367 – 2012, “IEEE Recommended Practice for Determining the Electric Power Station Ground Potential Rise and Induced Voltage From a Power Fault”.
- [4] IEC 60909 – 3, “Short circuit currents in three phase a.c. systems, Part 3: Currents during two separate simultaneous line-to-earth short circuits and partial short-currents flowing through earth”.
- [5] “Electromagnetic Effects of Overhead Transmission Lines: Practical Problems, Safeguards, and Methods of Calculation”, Report prepared by the Working Group on Electromagnetic and Electrostatic Effects of Transmission Lines, General System Subcommittee, IEEE PES Summer Meeting and EHV/UHV Conference, Vancouver, B.C. Canada, July 15-20, 1973.
- [6] IEEE Std. 1246 – 2002, “IEEE Guide for Temporary Protective Grounding Systems in Substations”.
- [7] SRPS EN 50522:2013, „Уземљење енергетских постројења наизменичног напона изнад 1 kV”, 2013.
- [8] IEEE Std. 1048 – 2003, “IEEE Guide for Protective Grounding of Power Lines”.
- [9] J. He, R. Zeng, B. Zhang, “Technology for Power System Grounding”, IEEE&Wiley, Singapore 2013.