

Mr.sc. Domagoj Milun, dipl.ing.
HEP ODS d.o.o. Elektrodalmacija Split
domagoj.milun@hep.hr

OPASNOSTI I MJERE ZAŠTITE PRI RADU NA DV 20(10) kV U NEPOSREDNOJ BLIZINI DV 220 kV

SAŽETAK

Pored osnovnih opasnosti od samog distribucijskog voda na kojem se radi, na paralelnim vodovima prisutne su i posebne opasnosti, koje proizlaze iz blizine i paralelnog položaja dalekovoda i to prvenstveno: opasnost od izravnog dodira aktivnih dijelova visokonaponskog dalekovoda i opasnost od električne indukcije.

U ovom radu su dane osnovne smjernice za procjenu opasnosti od izravnog dodira aktivnih dijelova visokonaponskog voda, opisana djelovanja električnog i magnetskog polja voda visokog napon na induciranje napona na isključenom vodu srednjeg napona u njegovoj blizini te navedeni izrazi za procjenu i proračun navedenih utjecaja. Prethodna teorijska razmatranja su primijenjena na jednom primjeru DV 20(10) kV u neposrednoj blizini DV 2x220 kV. Uz procjenu opasnosti, navedene su i dodatne mjere sigurnosti i zaštite pri radu radi sprječavanja opasnosti i negativnog utjecaja bliskog paralelnog voda.

Ključne riječi: paralelni vod, opasnost, sigurnost, izravni dodir, inducirani napon, uzemljivanje

HAZARDS AND PROTECTIVE MEASURES AT WORK ON DV 20(10) kV IN CLOSE VICINITY TO DV 220 kV

SUMMARY

In addition to the primary work hazards of the distribution line where works are performed, on the parallel lines are also present special hazards arising from the proximity and parallelism, primarily: the risk of direct contact with live parts of high voltage transmission line and the risk of electrical induction.

In this paper are given basic guidelines for assessing the risk of direct contact with live parts of high voltage line, described the effects of electric and magnetic field of high voltage transmission line on the induced voltage on the medium voltage line in its vicinity and given terms of evaluation and calculation aforementioned influences. Previous theoretical considerations are applied to one example DV 20(10) kV in the vicinity of DV 2x220 kV. In addition to the assessment of risk, additional safety and security measures at work are given to prevent the risk and the negative impact of a close parallel line.

Key words: parallel line, work hazard, safety, direct contact, induced voltage, grounding

1. UVOD

Jedan od najvećih problema razvoja srednjenaponske nadzemne mreže je osiguravanje koridora i rješavanje imovinsko-pravnih odnosa na trasama novih vodova, a taj problem je osobito izražen na područjima kojima već prolaze visokonaponski vodovi prijenosne mreže. U takvoj situaciji nameće se kao rješenje izgradnja distribucijskog voda u koridoru već postojećeg prijenosnog voda, ili neposredno uz njega, prema tehničkim mogućnostima, uz suglasnost i u skladu s posebnim uvjetima operatora prijenosnog sustava.

Značaj prijenosnog voda u elektroenergetskom sustavu je takav da njegovo isključivanje može imati bitan utjecaj na tokove snaga, stabilnost i pouzdanost sustava, pa paralelne vodove treba graditi na način da se radovi na njihovoj izgradnji i održavanju mogu obaviti dok je prijenosni vod u pogonu, uz primjenu uobičajenih i dodatnih mjera sigurnosti i zaštite pri radu. To znači da udaljenosti paralelnih vodova, osim kriterija sigurnosnih udaljenosti vodiča iz Pravilnika o tehničkim normativima za izgradnju nadzemnih elektroenergetskih vodova nazivnog napona od 1 kV do 400 kV [1], moraju zadovoljiti i kriterije iz Pravilnika o sigurnosti i zdravlju pri radu s električnom energijom [2] koji se odnose na opasnosti i zaštitu od izravnog dodira.

Pojam *paralelni vod* nije jednoznačan i različito se tumači, odnosno definira. Zajedničko tim različitim tumačenjima je to da, osim što su im na određenoj duljini i udaljenosti trase paralelne, takvi vodovi imaju određeni međusobni utjecaj zbog induktivne i kapacitivne sprege. Veličina tog utjecaja je osnovni kriterij pri određivanju da li se vodovi smatraju *paralelnima*. U Pravilniku o sigurnosti i zdravlju pri radu s električnom energijom [2] *paralelni vodovi* se definiraju kao oni vodovi kod kojih je mjerenjem na terenu utvrđeno da međusobno djelovanje takvih vodova uzrokuje inducirane napone više od 50 V. Tako se vodovi kojima su trase paralelne na velikoj duljini, ali su toliko udaljeni da praktično nemaju međusobnog utjecaja, ne smatraju *paralelnim vodovima*. S druge strane, već i na vrlo kratkim vodovima postavljenim paralelno i u neposrednoj blizini vodova visokog napona, utjecaj električnog i magnetskog polja voda visokog napona može biti toliki da otežava ili onemogućava siguran rad bez primjene posebnih mjera. Osim toga, pri radu na visini, već i puno niži naponi od 50 V mogu biti opasni jer, zbog utjecaja na mišiće radnika, mogu izazvati pad. Stoga je, pri radu na nadzemnim vodovima distribucijske mreže, koji se nalaze u zoni utjecaja drugih vodova, a poglavito visokonaponskih vodova prijenosnog sustava, osim uobičajenih pravila i mjera sigurnosti pri radu na elektrodistribucijskim postrojenjima [3], potrebno primijeniti i posebna pravila, koja proizlaze iz opasnosti uslijed blizine i utjecaja visokonaponskog voda.

Uz teorijsko razmatranje i opis utjecaja vodova visokog napona na bliske, paralelne vodove srednjenaponske distribucijske mreže, u ovom radu se analiziraju opasnosti i mjere zaštite pri radu na jednom primjeru DV 20(10) kV, koji je paralelan DV 2x220 kV u duljini 1,1 km i nalazi se u njegovom koridoru, u neposrednoj blizini.

2. OPASNOSTI PRI RADU NA DISTRIBUCIJSKIM NADZEMNIM VODOVIMA U BLIZINI NADZEMNIH VODOVA VISOKOG NAPONA

2.1. Opasnost od izravnog dodira aktivnih dijelova dalekovoda visokog napona

Izravni dodir je dodir osoba ili životinja s aktivnim dijelovima pod naponom [2]. Kada je riječ o aktivnim dijelovima na srednjem i visokom naponu, dodirom se može smatrati i takvo približavanje dijelova tijela ili alata dijelovima pod naponom pri kojem dolazi do preskoka.

Kod radova u beznaponskom stanju, primjenjuje se pet pravila sigurnosti [3] za osiguranje mjesta rada. Dok prva četiri pravila (1. Isključiti i odvojiti od napona, 2. spriječiti ponovni uklop, 3. utvrditi beznaponsko stanje, 4. uzemljiti i kratko spojiti) imaju za cilj otkloniti sve električne opasnosti koje proizlaze od voda ili postrojenja na kojem se radi, svrha 5. pravila (ogradi mjesto rada od dijelova pod naponom) je spriječiti slučajni dodir ili opasno približavanje dijelovima susjednog postrojenja ili voda pod naponom, na kojem se ne izvode radovi. Za razliku od postrojenja gdje se to može postići izolacijskim pregradama, preprekama, pokrivačima i sl., kod rada u blizini dalekovoda to je praktično nemoguće, pa preostaje jedino zaštita održavanjem sigurnosnog razmaka.

Prema Pravilniku [2], prostor oko aktivnih dijelova postrojenja ili voda podijeljen je u tri zone prema stupnju opasnosti od dodira ili približavanja dijelovima pod naponom i to:

- zona rada pod naponom (III zona),
- zona približavanja (II zona),
- zona slobodnog kretanja (III zona).

Zona rada pod naponom (III zona) je prostor oko dijelova pod naponom, u kojem izolacijska razina ne osigurava zaštitu od električne opasnosti, bez posebnih zaštitnih mjera. Omeđena je graničnom udaljenošću DL od vodiča pod naponom.

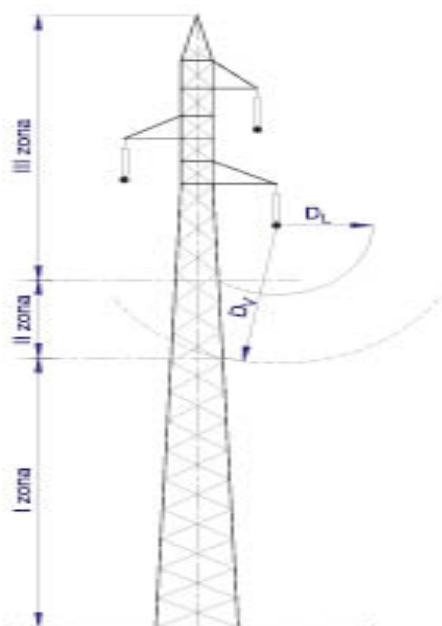
Zona približavanja (II zona) je prostor oko zone rada pod naponom, u kojem se prigodom radova moraju primijeniti određene mjere zaštite za sprječavanje prodora tijela radnika ili njegovog alata u zonu rada pod naponom. Omeđena je graničnom udaljenošću D_v , koja se dobije tako da se graničnoj udaljenosti zone rada pod naponom pridoda određena vrijednost (tablica I).

Zona slobodnog kretanja (I zona) je prostor izvan zone približavanja i u kojem više nisu potrebna posebna pravila za obavljanje rada ili kretanje s ciljem zaštite od dodira dijelova pod naponom.

U tablici I su navedene granične udaljenosti zone rada pod naponom i zone približavanja, a na slici 1. je prikazana podjela stupa nadzemnog voda na zone.

Tablica I: Granične udaljenosti zone rada pod naponom i zone približavanja

Nazivni napon mreže (kV)	Granična udaljenost zone rada pod naponom DL (mm)	Granična udaljenost zone približavanja DV (mm)
≤ 1	bez dodira	300
3	60	1 120
6	90	1 120
10	120	1 150
15	160	1 160
20	220	1 220
30	320	1 320
36	380	1 380
110	1 000	2 000
220	1 600	3 000
400	2 500	4 000



Slika 1. Podjela stupa nadzemnog voda na zone

Paralelni dalekovodi moraju biti udaljeni najmanje toliko da se rad na jednom vodu može obaviti u beznaponskom stanju, bez opasnosti od dodira ili približavanja dijelovima drugog dalekovoda koji su pod naponom. Obzirom da se u ovom slučaju ne mogu postaviti pregrade između zone približavanja i zone rada pod naponom, radnik može doći u opasnost već i ako se nađe u zoni približavanja, jer nema pouzdane zaštite kojom se može osigurati da dijelom tijela ili neizoliranim alatom ne dođe u zonu rada pod naponom.

Posebno mogu biti opasni radovi pri kojima se koriste građevinski strojevi, dizalice, hidraulične platforme ili montažne igle čiji je radni doseg toliki da uslijed nesmotrenog rukovanja postoji mogućnost zadiranja u zonu rada pod naponom. Posebno je opasan postupak montaže ili ugradnje stupova u blizini dalekovoda pod naponom, jer se prilikom montaže ili ugradnje stupa u pripremljeni temelj, stupovi ili dijelovi stupa podižu na visinu veću od konačne visine montiranog ili ugrađenog stupa. Ta razlika u visini kod dalekovoda 20 kV na betonskim ili drvenim stupovima iznosi preko 2 m (dubina temeljne jame+visina podizanja pri ugradnji).

2.2. Opasnosti od induciranog napona

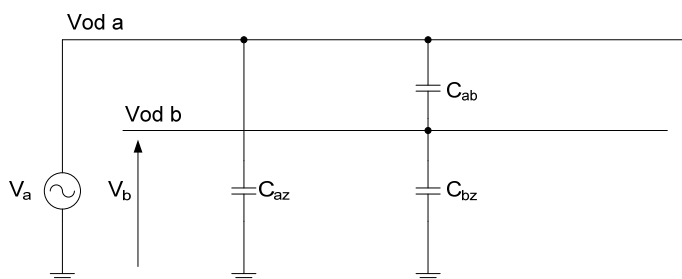
Djelovanjem električnog i promjenljivog magnetskog polja u blizini nadzemnih vodova pod naponom, mogu se na isključenim vodovima u njihovoj blizini inducirati naponi i struje koji mogu otežavati ili onemogućiti rad ili biti opasni po zdravlje ili život čovjeka. Upravo je veličina induciranog napona uzeta kao kriterij kojim se u Pravilniku o sigurnosti i zdravlju pri radu s električnom energijom [2] definira pojam *paralelnog voda*, i to na način da se *paralelnim vodom* smatra onaj vod kod kojeg je mjerenjem na terenu utvrđeno da međusobno djelovanje vodova izaziva inducirane napone više od 50 V.

2.2.1. Inducirani napon uslijed električnog polja (elektrostatski napon)

Oko svakog voda pod naponom, neovisno protječe li njime struja ili je u praznom hodu, postoji električno polje. Na neuzemljenom vodiču koji se nalazi u električnom polju voda pod naponom influencira se električni naboj te uslijed toga nastaje razlika potencijala neuzemljenog vodiča prema zemlji, kao i prema aktivnom vodiču koji je izvor električnog polja. Kolika će razlika potencijala nastati između vodiča, kao i između vodiča i zemlje, ovisi o kapacitetima između pojedinih vodiča te kapacitetu između vodiča i tla. Dakle, vodiči promatranog voda su kapacitivno spregnuti s vodičima voda pod naponom te s neutralnom zemljom. Kod višefaznih i višesustavnih vodova, električno polje je rezultanta električnih polja svih vodiča, pa će tako i inducirani napon na isključenom vodu biti rezultanta induciranih napona uslijed polja što ih stvaraju pojedini fazni vodiči.

Na slici 2. shematski je prikazana sprega između jednog vodiča isključenog voda s jednim vodičem dalekovoda pod naponom i neutralnom zemljom. Kapacitet između dva vodiča C_{ab} i kapacitet između vodiča isključenog dalekovoda i zemlje C_{bz} tvore kapacitivno djelilo, pa je napon između isključenog vodiča b i neutralne zemlje jednak:

$$V_b = \frac{C_{ab}}{C_{ab} + C_{bz}} V_a \quad (1)$$



Slika 2. Kapacitivna sprega između vodiča dva dalekovoda međusobno i s tlom

Kapacitet između dva paralelna, dugačka vodiča je funkcija njihove međusobne udaljenosti i duljine:

$$C_{ab} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{d_{ab}}{r_0}} l \quad (2)$$

gdje je:

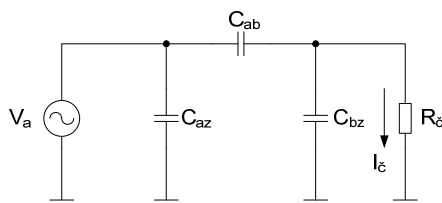
- ϵ_0 - dielektrična konstanta vakuuma
- d_{ab} - udaljenost između vodiča a i b,
- r_0 - polumjer vodiča,
- l - duljina paralelnog vodiča

Izraz za kapacitet između pasivnog vodiča i zemlje (dozemni kapacitet) proizlazi iz oblika električnog polja između vodiča i vodljivog tla, koje ima jednaki oblik kao polje između dva vodiča na udaljenosti $2h_b$, gdje je h_b visina isključenog, neuzemljenog vodiča iznad tla, pa on glasi:

$$C_{bz} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln(2h_b/r_0)} l \quad (3)$$

Obzirom da su oba kapaciteta proporcionalna duljini voda, znači da inducirani napon ne ovisi o duljini vodova, nego je funkcija njihove međusobne udaljenosti i udaljenosti od tla, odnosno položaja vodiča u električnom polju što ga stvara vod visokog napona. Naravno, ta tvrdnja vrijedi za vrlo dugačke, paralelne vodove, bez gubitaka, gdje se mogu zanemariti rubne pojave. No, bez obzira na to, ostaje činjenica da je inducirani napon uslijed kapacitivne sprege funkcija položaja nekog vodiča u električnom polju vodiča visokog napona te da svaki takav vodič, neovisno o duljini, kao i bilo koji drugi objekt (radnik, metalna konzola na drvenom stupu, podignuta hidraulična platforma i sl.) može doći na visoki potencijal prema zemlji, ako se približi vodičima visokog napona.

Iako se u većini dokumenata, kao kriterij opasnosti uzimaju visina dodirnog napona i njegovo trajanje, glavni uzrok opasnosti po zdravlje i život čovjeka je struja koja prolazi kroz njegovo tijelo. U ovom slučaju, budući da nema vodljive veze između vodiča, ako čovjek dotakne neuzemljeni vodič poteći će kapacitivna struja. Na slici 3. prikazana nadomjesna shema dva paralelna vodiča, od kojih je vodič a pod naponom, a vodič b je isključen i neuzemljen. Čovjek je pojednostavljeno nadomješten otporom R_ϵ .



Slika 3. Nadomjesna shema kapacitivno spregnutih vodiča

U većini slučajeva vodljivost čovjeka je veća od kapacitivne dozemne admitancije, pa se dozemna admitancija u paralelnom spoju s čovjekom može zanemariti, jer nema značajnijeg utjecaja na struju I_ϵ pri dodiru. U tom slučaju će kroz čovjeka teći struja:

$$I_\epsilon = \frac{V_a}{\sqrt{R_\epsilon^2 + \left(\frac{1}{\omega C_{ab}}\right)^2}} \quad (4)$$

Gornji izraz se može dodatno pojednostavniti, uvažavajući činjenicu da je u praksi otpor čovjeka znatno manji od kapacitivnog otpora, odn. $R_\epsilon \ll 1/\omega C_{ab}$, pa veličina struje koja poteče pri dodiru praktično ne ovisi o otporu čovjeka, nego o kapacitetu između dva voda:

$$I_\epsilon \approx \omega C_{ab} V_a \quad (5)$$

gdje je ω kružna frekvencija.

Dakle, iako inducirani napon prema (1) ne ovisi o duljini paralelnog voda, struja koja se zatvara pri dodiru neuzemljenog vodiča prema (2) i (5) je razmjerna duljini i u slučaju duljih paralelnih vodova može dosegnuti po život opasnu vrijednost.

Općenito je prihvaćeno da već pri strujama većim od 50 mA i trajanja > 1 s može doći do fibrilacije srca. Struje od nekoliko mA otežavaju ili onemogućavaju rad zbog grčenja mišića, dok se vrijednost struje od 10 mA uzima kao *prag otpuštanja*, odnosno jakost struje pri kojoj dolazi do grčenja prstiju i otežano je otpuštanje rukom prihvaćenog vodiča. Kod rada na visini, već i takve struje su opasne jer mogu izazvati pad.

Ako se vodiči isključenog SN voda uzemlje na bilo kojem dijelu, napon vodiča će pasti na neznatnu vrijednost, a kroz uzemljivač će poteći kapacitivna struja:

$$I_x = \omega C_{ab} V_a \quad (6)$$

Obzirom da su te struje, u pravilu, niske vrijednosti, čak i u slučaju relativno velikog otpora uzemljivača, to ne može bitno utjecati na potencijal uzemljivača, odnosno potencijal uzemljenog vodiča. To znači da je za zaštitu dovoljno uzemljiti SN vod pomoću priručnih naprava za uzemljenje. Pri tome treba imati na umu da sama radnja uzemljenja može biti opasna, ako se ne poštuje ispravan redoslijed radnji u postupku te se radnik nađe u dijelu strujnog kruga između vodiča koji se uzemljuje i zemlje.

Kod rada na sredjenaponskim vodovima na drvenim stupovima, prilike se dijelom razlikuju od onih na metalnim stupovima koji su uzemljeni. Pod djelovanjem električnog polja, osim na vodičima, napon prema zemlji se pojavljuje i na svim neuzemljenim metalnim dijelovima na stupu, npr. konzolama ili nosačima izolatora. I sam se radnik, pri radu na drvenom stupu, nalazi na određenom potencijalu. Kada se vodiči uzemlje i kratko spoje, mogu se pojaviti razlike potencijala između radnika, konzola i vodiča, uslijed kojih, pri dodiru, mogu poteći male kapacitivne struje, koje pri radu mogu biti neugodne. Međusobnim povezivanjem vodljivih dijelova, potencijali se izjednačuju i takve pojave nestaju.

2.2.2. Inducirani napon uslijed magnetskog polja

Kada vodičem protječe struja, u prostoru oko vodiča stvara se magnetsko polje. Drugi vodiči koji se nalaze u tom polju magnetski su spregnuti s vodičem kojim protječe struja. Uslijed promjenljivog magnetskog toka, u magnetski spregnutom strujnom krugu će se inducirati napon. Kod višefaznih i višesustavnih vodova magnetsko polje koje djeluje na spregnuti vodič je rezultanta magnetskih polja svih vodiča kojima protječe struja, pa je tako i inducirani napon superpozicija napona koji bi se u spregnutom strujnom krugu inducirali pod djelovanjem magnetskih polja svakog od vodiča.

Iz izraza za magnetsku indukciju oko dugačkog ravnog vodiča, koji glasi:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (7)$$

gdje je:

- I - struja koja protječe vodičem,
- r - udaljenost od vodiča,
- μ_0 - permeabilnost vakuumu

vidljivo je da je magnetska indukcija proporcionalna struji i da opada s udaljenošću od vodiča. Kada se izraz (7) integrira radi izračuna ulančenog toka na udaljenosti r od vodiča, dobije se izraz za ulančeni tok:

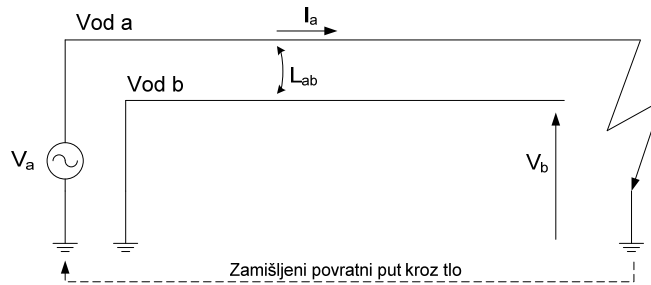
$$\Psi = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \ln \frac{r}{r_0} \quad (8)$$

gdje je r_0 polumjer vodiča.

$$\sum I = 0$$

Obzirom da u normalnom pogonu dalekovoda vrijedi te uzevši u obzir logaritamsku promjenu ulančenog toka s promjenom udaljenosti, dolazi se do zaključka da će se na udaljenosti od višefaznog voda, nekoliko puta većoj od međusobne udaljenosti vodiča tog voda, ulančeni tokovi praktično međusobno poništiti, pa će utjecaj biti neznatan. Međutim, u slučaju jednopolnog kratkog spoja u mreži visokog napona, kada kroz jedan od vodiča protječe struja reda kA i više, s povratnim putem kroz tlo, nastat će oko vodiča jako magnetsko polje, uslijed kojega se na paralelnom SN vodu u blizini može

inducirati opasan napon. Takav slučaj je prikazan na slici 4. gdje je magnetski utjecaj VN voda na isključeni vod iskazan međuinuktivitetom dva vodiča L_{ab} .



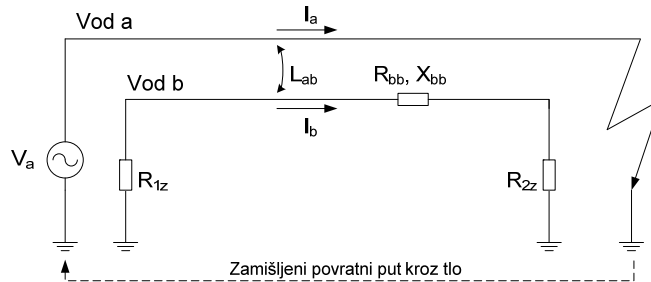
Slika 4. Inducirani napon pri jednopolnom kratkom spoju

U ovom slučaju, struja kvara se zatvara kroz tlo, te vodič s povratnim putem struje kroz tlo tvori zamku u kojoj se inducira napon. Kada je jedan kraj isključenog voda uzemljen, uzduž voda će se inducirati napon, koji će na udaljenosti l imati vrijednost:

$$\vec{V}_b = I_a \cdot \vec{Z}_{ab} \cdot l \quad (9)$$

gdje je $\vec{Z}_{ab} = R_{ab} + j\omega L_{ab}$ međusobna jedinična impedancija između vodova $[\Omega/m]$.

Ako se vodič isključenog paralelnog voda uzemli na oba kraja, njime će protjecati struja, koja se zatvara kroz tlo. Na iznos struje, osim induciranog napona, utječu sve impedancije u tako zatvorenom strujnom krugu, tj. otpor vodiča i povratnog puta kroz tlo, otpori uzemljivača i reaktancija zbog samoinduktiviteta zamke što je čini vodič s povratnim putem kroz tlo.



Slika 5. Elektromagnetski inducirana struja u vodiču uzemljenom na oba kraja

Parametri voda na slici 5. se računaju primjenom Carsonovih izraza, koje se temelje na pretpostavci da povratna struja kroz tlo protječe zamišljenim vodičem, paralelnim vodičima nadzemnog voda, koji je od njih udaljen za udaljenost D_e [8], [9]:

$$L_{bb} = 2 \cdot 10^{-7} \ln \frac{D_e}{r_0} + L_u \quad \left[\frac{H}{m} \right] \quad (10)$$

$$R_{bb} = R_1 + R_e = R_1 + \pi^2 f \cdot 10^{-7} \quad \left[\frac{\Omega}{m} \right] \quad (11)$$

$$L_{ab} = 2 \cdot 10^{-7} \ln \frac{D_e}{d_{ab}} \quad \left[\frac{H}{m} \right] \quad (12)$$

$$R_{ab} = \pi^2 f \cdot 10^{-7} \quad \left[\frac{\Omega}{m} \right] \quad (13)$$

gdje su:

$$D_e = 658 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad [m]$$

- ρ - specifični otpor tla [Ωm]
 f - frekvencija [Hz]
 r_0 - polumjer vodiča [m]
 L_u - unutrašnji induktivitet vodiča [H/m]
 d_{ab} - međusobna udaljenost dva vodiča [m]

Struja kroz vodič duljine l uzemljen na oba kraja, kako je prikazano na slici 5. iznosi:

$$I_b = -\frac{Z_{ab} \cdot l}{R_{1x} + R_{2x} + Z_{bb} \cdot l} \cdot I_a \quad (14)$$

gdje su:

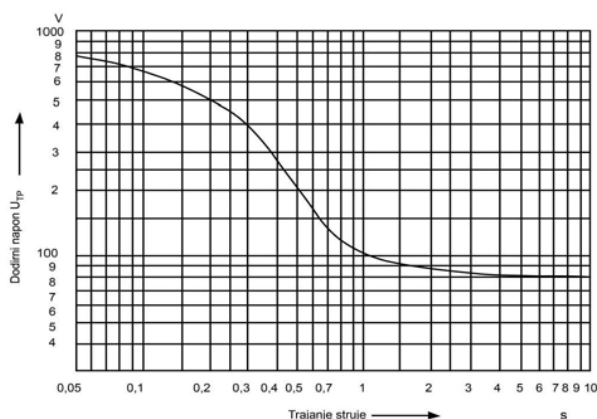
- R_{1x}, R_{2x} - otpori uzemljenja,
 Z_{ab} - međusobna jedinična imedancija između vodova [Ω/m],
 $Z_{bb} = R_{bb} + j\omega L_{bb}$ - vlastita jedinična impedancija [Ω/m].

Ako su otpori uzemljenja mali u usporedbi s impedancijom voda tj. $R_{1x}, R_{2x} \ll Z_{bb} \cdot l$, što je slučaj kod dugačkih paralelnih vodova, izraz za struju (14) prelazi u:

$$I_b \approx -\frac{Z_{ab}}{Z_{bb}} \cdot I_a \quad (15)$$

U takvom slučaju veličina struje se ne mijenja s duljinom paralelnih vodova.

Međutim, kad se razmatraju utjecaji na paralelne dalekovode nazivnog napona 10 i 20 kV, koji su znatno kraći od vodova visokog napona, a uzemljivači imaju relativno velik otpor, gornji se izraz ne može primijeniti i otpor uzemljenja ima značajan utjecaj na struju. Ako se u takvom strujnom krugu nađe čovjek, njegov otpor se dodaje otporima uzemljenja u nazivniku izraza (14). Obzirom da je otpor čovjeka u pravilu za jedan do dva reda veličine veći od otpora uzemljenja i impedancije voda, on će imati dominantan utjecaj na veličinu struje. No i tom slučaju struja još uvijek može biti opasna, ovisno o veličini induciranog napona na mjestu dodira i trajanju struje jednopolnog kratkog spoja u mreži visokog napona. Na slici 6. prikazana je krivulja dopuštenog dodirnog napona u ovisnosti o trajanju struje iz Pravilnika o sigurnosti i zdravlju pri radu s električnom energijom [2]. Inače je trajno dopušteni dodirni napon 50 V, a pri radu na nadzemnim vodovima s metalnom konstrukcijom stupova trajno dopušteni napon iznosi 25 V. Iako su trajanja struje kvara u mreži visokog napona kratka i prema krivulji na slici 6. dopušteni dodirni naponi mogu imati vrijednost i preko 100 V, treba imati na umu da su te vrijednosti dopuštenog dodirnog napona određene prvenstveno temeljem utjecaja na rad srca. Kao što je već prije rečeno, kod rada na visini, već i puno niže vrijednosti dodirnog napona mogu izazvati pad.

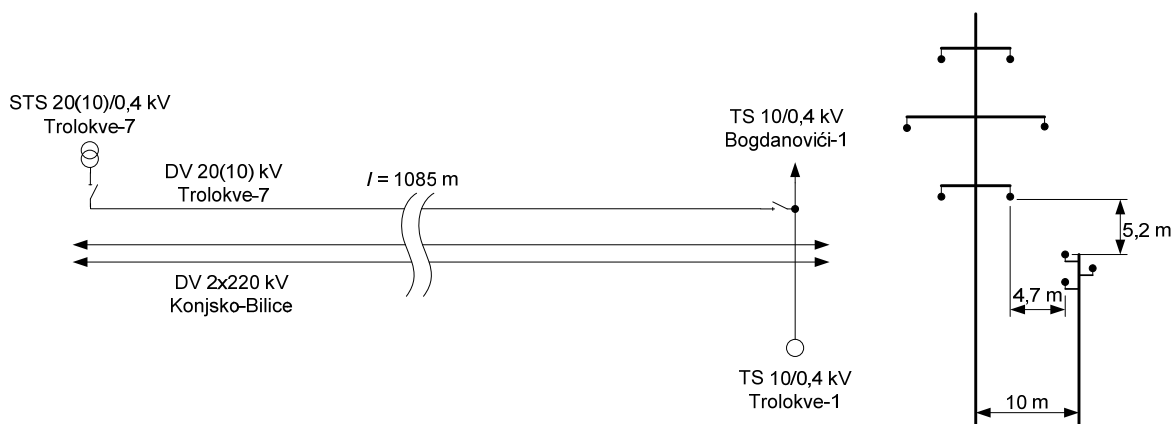


Slika 6. Krivulja dopuštenog dodirnog napona u ovisnosti o trajanju struje

3. OPASNOSTI I MJERE ZAŠTITE PRI RADU NA DV 20(10) kV ZA PRIKLJUČAK STS 20(10)/0,4 kV TROLOKVE – 7 U BLIZINI DV 2x220 kV KONJSKO-BILICE

3.1. Opasnost i mjere zaštite od izravnog dodira

Za priključak stupne trafostanice TS 20(10)/0,4 kV Trolokve-7 izgrađen je DV 20(10) kV, kao odcjep s DV 10 kV TS 10/0,4 kV Trolokve-1 – TS 10/0,4 kV Bogdanovići-1. Početna točka priključnog DV je armirano-betonski stup, postavljen u trasi postojećeg DV-a, na kojem je ugrađen odcjepni rastavljač. Krajnja točka dalekovoda je STS 20(10)/0,4 kV Trolokve-7, koja je priključena sa armirano-betonskog stupa s rastavljačem. Ukupna duljina priključnog dalekovoda iznosi 1.116 m. Dalekovod je, uz dva navedena armirano-betonska stupa s čeličnim konzolama, izveden na drvenim stupovima. Glave nosnih stupova izvedene su sa savijenim nosačima NSV 28 E i potpornim keramičkim izolatorima VHD 20.



Slika 7. Položaj DV 20(10) kV u odnosu na DV 220 kV

Projektirani horizontalni razmak između osi dalekovoda iznosi 10 m, a duljina paralelne trase iznosi 1085 m. Geodetskim mjerenjem nakon izgradnje voda, utvrđeno je da najmanja horizontalna udaljenost najbližih vodiča dvaju vodova iznosi 4,7 m, u neotklonjenom stanju, a najmanja vertikalna udaljenost iznosi 5,2 m. Iz tih podataka izračunata najmanja udaljenost između najbližih vodiča dva voda iznosi $d = 7$ m (slika 7).

Prema Tablici I, granična udaljenost zone rada pod naponom iznosi $DL = 1.600$ mm, a granična udaljenost zone rada pod naponom $Dv = 3.000$ mm. Obzirom da izmjerena najmanja udaljenost između vodiča dalekovoda 220 kV i DV 20(10) kV iznosi $d = 7$ m, zaključak je da se radovi na stupovima DV 20(10) kV obavljaju u zoni slobodnog kretanja DV 2x220 kV i da pri radu nisu potrebne dodatne mjere zaštite sve dok radnik pri radu ne koristi alat niti opremu dulju od 3 m, pri čemu je uzeta u obzir i duljina ruke radnika.

Izuzetak su radovi pri kojima se koriste visoke ljestve, hidraulične platforme, dizalice i građevinski strojevi te kada se obavlja ugradnja ili zamjena stupova i sječa raslinja. Takvi radovi se smiju obavljati ako su razmaci između radnika ili primijenjenih sredstava za rad i aktivnih dijelova DV 220 kV veći od sigurnosne udaljenosti DS, koja za vodove nazivnog napona većeg ili jednakog 220 kV iznosi 5.500 mm [2].

Da bi se osigurao gore navedeni sigurnosni razmak od 5,5 m, pri korištenju dugačkih ljestvi, hidrauličnih platformi, dizalica, građevinskih strojeva i drugih sredstava rada, čiji je doseg veći od 10 m, primjena navedenih sredstava rada je dopuštena samo uz uvjet da se ta sredstva prilikom rada nalaze na strani suprotnoj od DV 2x220 kV (sjeverna strana DV 20(10) kV). Kada se ugrađuju ili mijenjaju stupovi, rad treba obaviti na način da se stup ne podiže u visinu veću od njegove duljine. Stupove treba prinositi temeljnoj jami i podizati sa strane suprotne DV 2x220 kV. Kada se za podizanje stupa koristi dizalica, preporuča se da se dno stupa ne podiže od tla pri privlačenju do temeljne jame.

3.1. Opasnost i mjere zaštite od induciranog napona

Nakon izgradnje, a prije puštanja pod napon priključnog DV 20(10) kV izmjereni su inducirani naponi pod utjecajem DV 2x220 kV. Obavljena su dva mjerenja:

- mjerenje napona na krajevima isključenog i neuzemljenog DV 20(10) kV,
- mjerenje napona na jednom kraju DV dok je drugi kraj uzemljen.

Najveći napon izmjeren između neuzemljenih vodiča i zemlje iznosio je 820 V. Sukladno razmatranjima iz poglavlja 2.2.1. to je napon induciran na vodičima DV 20(10) kV uslijed kapacitivne

sprege vodiča s vodičima DV 2x220 kV pod naponom. Naponi izmjereni između vodiča međusobno su bili znatno manji i iznosili su od 10 V do 50 V.

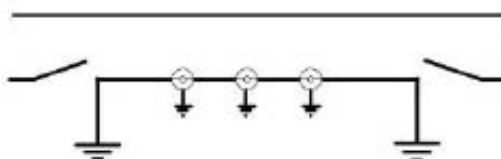
Mjerenjem napona prema zemlji na jednom kraju dalekovoda, dok je drugi kraj uzemljen, izmjereno je napon iznosa 1,1 V. Prema 2.2.2. to je napon induciran na paralelnim vodičima DV 20(10) kV, uslijed međuinduktivne veze s vodičima DV 2x220 kV, kojima protječe struja. Međutim, naknadno je utvrđeno da je u vrijeme mjerenja struja jedne trojke DV 2x220 kV iznosila samo 11,5 A, dok je druga trojka bila isključena na jednom kraju zbog neplaniranih radova. Navedena struja VN voda u vrijeme mjerenja induciranih napona je znatno manja od nazivne struje tog voda, koja iznosi 800 A, pa linearno preračunavanje izmjenjenog inducirano napona na nazivnu struju VN voda ne bi dalo pouzdan rezultat, zbog mjerne nesigurnosti i ostalih mogućih utjecaja. Stoga se ovi rezultati ne mogu smatrati mjerodavnima za mjerenje napona uslijed elektromagnetske indukcije.

Umjesto ponavljanja mjerenja, primijenjeni su rezultati proračuna induciranih napona i struja na isključenoj trojci DV 2x220 kV Konjsko-Bilice, dok je druga trojka pod naponom i to za normalni pogon, kao i u slučaju jednopolnog kratkog spoja. Proračuni su napravljeni u okviru studije „Izrada pravila i mjera sigurnosti za osiguranje mjesta rada na elektroenergetskim vodovima“, FESB Split, 2013. god [10]. Zbog položaja vodiča DV 20(10) kV u odnosu na vodiče DV 220 kV, napon induciran po metru duljine na vodu 20(10) kV može biti samo manji od onog dobivenog proračunom na neuzemljenoj trojci DV 220 kV.

Analiziran je primjer kad je jedna trojka u normalnom pogonu, a pasivna trojka uzemljena na jednom kraju. Najveća izračunata vrijednost napona u tom slučaju iznosi 1629 V, a jedinični napon po km duljine voda iznosi 30,7 V/km. Primijeni li se taj podatak na paralelni dalekovod duljine 1085 m, dolazi se do zaključka da inducirani napon uslijed elektromagnetske indukcije u normalnom pogonu neće prelaziti vrijednost $V_{ind} < 30,7 \cdot 1,085 = 33,3 \text{ V}$. Međutim, ako se uzme u obzir i da druga trojka može biti nazivno opterećena, inducirani napon na DV 20(10) kV uslijed elektromagnetske indukcije može prijeći ili se približiti graničnoj vrijednosti od 50 V, pri kojoj se, prema Pravilniku [2] vodovi smatraju paralelnima.

Prema Pravilniku [2], kod radova na nadzemnim vodovima, čija je trasa paralelna s drugim nadzemnim vodom koji se nalazi pod naponom, treba primijeniti mjere zaštite kao kod rada na dvosustavnim vodovima:

- nadzemni vod na kojem se radi mora biti uzemljen na mjestima odvajanja od napona, iza rastavljača,
- vod na kojem se radi mora biti uzemljen i kratko spojen na stupu na kojem se radi te dva susjedna stupa (slika 8.),
- istodobni rad na više stupova, u ovom je slučaju dopušten jer dodirni napon uslijed magnetskog utjecaja na susjednim stupovima nije veći od 50 V,
- ako se prilikom radova prekidaju ili spajaju vodiči, potrebno je oba kraja vodiča uzemljiti ili ih međusobno povezati vodičima za kratko spajanje uz obvezno uzemljenje na jednom kraju,
- kod rada na armirano-betonskim stupovima vodič za uzemljenje treba spojiti s uzemljenjem stupa te na taj način osigurati izjednačenje potencijala na stupu,
- prilikom ručnog povlačenja vodiča, istog treba uzemljiti na više mjesta duž trase, a radnici obvezno moraju koristiti ispravne i suhe zaštitne kožne rukavice, obuću i ostala osobna zaštitna sredstva,
- pri dodavanju alata i drugih predmeta s tla na visinu, obvezna je primjena užeta od nevodljivog materijala,
- radi dodatne zaštite od pada, pri radu na stupu treba koristiti opasač s naramenicama, uz obvezno privezivanje za elemente glave stupa.



Slika 8. Uzemljenje pri radu na jednom stupu paralelnog voda

Primjenom gore navedenih mjera uzemljenja i izjednačenja potencijala na mjestu rada, ujedno se provodi i mjera osiguranja od induciranog napona uslijed jednopolnog kratkog spoja u prijenosnoj mreži, kao i zaštita od previsokog napona dodira u slučaju kvara na dijelu DV 2x220 kV u blizini DV 20(10) kV.

Najviše dvojbe u primjeni mjera zaštite na paralelnim, odnosno dvosustavnim vodovima prema odredbama Pravilnika o sigurnosti i zdravlju pri radu s električnom energijom, NN 88/12 [2], vezano je uz obvezu uzemljenja i kratkog spajanja na stupovima susjednim onom na kojem se radi i na kojem je također provedeno uzemljenje. To u primjeru promatranog dalekovoda 20(10) kV zahtijeva postavljanje pet naprava za uzemljenje i kratko spajanje radi rada na jednom stupu. U primjerima proračuna iz studije [10] pokazano je da se potencijal vodiča na mjestu rada tek neznatno mijenja ako se uzemljenje i kratko spajanje provede na krajevima voda i samo stupu na kojem se radi u usporedbi s potencijalom vodiča na mjestu rada kada se vodiči uzemlje na krajevima voda, mjestu rada i na dva susjedna stupa.

Najveći rizik pri radu na ovom DV 20(10) kV pojavljuje se prilikom uzemljenja isključenog voda na njegovim krajevima. Pri uzemljenju na prvom stupu, na vodičima isključenog dalekovoda je napon induciran uslijed električnog polja i koji prema mjerenju može iznositi preko 800 V. Prilikom uzemljenja na drugom krajnjem stupu voda, dok je prvi kraj voda uzemljen, na vodičima je napon induciran uslijed elektromagnetske indukcije, koji je manjeg iznosa, ali još uvijek može biti opasan. Stoga se ovi postupci uzemljenja moraju izvesti uz krajnji oprez i strogo poštivanje redoslijeda operacija i primjenu ispravnih izoliranih motki za uzemljenje. Dodatna je nepovoljna okolnost u ovom slučaju, izvedba odcjepnog rastavljača bez prigradenih noževa za uzemljenje, pa uzemljenje treba obaviti primjenom prijenosnih naprava, minimalnog presjeka bakrenog vodiča od 25 mm², uz upotrebu hidraulične platforme.

4. ZAKLJUČAK

U radu su analizirane opasnosti koje se mogu pojaviti pri radu na sredjenaponskom nadzemnom vodu paralelnom vodu visokog napona i u njegovoj neposrednoj blizini. U drugom poglavlju su dana općenita i teoretska razmatranja pojava i utjecaja, koja se mogu primijeniti pri kvalitativnoj procjeni opasnosti, te osnovni izrazi za proračune utjecaja (induciranih napona i struja). Ta općenita razmatranja primijenjena su na primjeru priključnog DV 20(10) kV za STS 20(10)/0,4 kV Trolokve-7, koji je paralelan i postavljen u koridoru DV 2x220 kV Konjsko-Bilice.

Analizirane su opasnosti od izravnog dodira vodiča DV 2x220 kV pod naponom i induciranog napona na DV 20(10) kV pod utjecajem DV 2x220 kV. Zaključak je da se rad u beznaponskom stanju na DV 20(10) kV može nesmetano obaviti izvan zone približavanja DV 2x220 kV, uz primjenu sigurnosnog razmaka i posebne uvjete koji su navedeni i odnose se na način rada pri korištenju dugačkih ljestava, hidrauličnih platformi, dizalica i sl. Temeljem mjerenja i analize rezultata proračuna induciranih napona na DV 2x220 kV, zaključak je da se, uslijed električnog i magnetskog polja DV 2x220 kV, na DV 20(10) kV pojavljuju dovoljno visoki inducirani naponi koji, bez primjene posebnih mjera zaštite, predstavljaju poteškoću i opasnost pri izvođenju radova. Stoga je u ovom slučaju obavezna primjena posebnih mjera zaštite koje propisuje Pravilnik [2], a koje, među ostalim, uključuju uzemljenje voda na oba kraja, na stupu na kojem se radi te dva susjedna stupa.

Obzirom da je postupak uzemljenja, kako ga nalaže Pravilnik [2], zahtjevan, jer je za rad na jednom stupu SN DV potrebno postaviti 5 naprava za uzemljenje, predlaže se napraviti proračun i mjerenja induciranih napona na vodičima te napona dodira za slučaj uzemljenja samo na stupu na kojem se radi i na krajevima voda i te rezultate usporediti s rezultatima za postupak kako ga nalaže Pravilnik [2]. Ako se mjerenjem i proračunom utvrdi da je inducirani napon manji od 50 V, primjena mjera zaštite pri radu na paralelnim vodovima iz članka 83. Pravilnika [2] u tom slučaju ne bi bila obvezujuća te se može napraviti dodatna analiza opravdanosti postavljanja uzemljenja na susjednim stupovima, odnosno predložiti izmjena i dopuna Pravilnika [2] u tom dijelu. Pored toga, iz razloga navedenih na kraju poglavlja 3., predlaže se ugradnja zemljospojnika na odcjepnom rastavljaču.

5. LITERATURA

- [1] Pravilnik o tehničkim normativima za izgradnju nadzemnih elektroenergetskih vodova nazivnog napona od 1 kV do 400 kV, Službeni list br. 65/88
- [2] Pravilnik o sigurnosti i zdravlju pri radu s električnom energijom, NN 88/12
- [3] Pravila i mjere sigurnosti pri radu na elektrodistribucijskim postrojenjima, HEP Vjesnik, Bilten br.260

- [4] Randy Horton, Keith Wallace, „Induced Voltage and Current in Parallel Transmission Lines: Causes and Concerns“, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23, No. 4, October 2008
- [5] S. Woothipatanapan, S. Prakobkit, „A Model for Analysis the Induced Voltage of 115 kV On-Line Acting on Neighboring 22 kV Off-Line“, International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering, Vol:8, No:8, 2014.
- [6] Flavius Dan Surianu, „Determination of the Induced Voltages by 220 kV Electric Overhead Power Lines Working in Parallel and Narrow Routes. Measurements on the Ground and Mathematical Model“, WSEAS Transactions on Power Systems, Issue 8, Vol. 4, August 2009.
- [7] Marian Costea, Ileana Baran, Tudor Leonida, „Capacitive Induced Voltages in Parallel Transmission Lines“, U.P.B. Sci. Bull., Series C, Vol. 76, Iss. 4, 2014.
- [8] Marija Ožegović, Karlo Ožegović, „Električne energetske mreže I“, FESB Split, Opal computing, 1996.
- [9] John R. Carson, „Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return“, Bell System Technical Journal, Vol. 5, Oct. 1928.
- [10] S. Vujević, R. Lucić, I. Jurić-Grgić, D. Lovrić, T. Modrić, Z. Balaš, „Izrada pravila i mjera sigurnosti za osiguranje mjesta rada na elektroenergetskim vodovima“, FESB Split, veljača 2013.
- [11] HEP ODS d.o.o., Elektrodalmacija Split, „Upute za siguran rad na DV 20(10) kV za STS 20(10)/0,4 kV Trolokve-7 u blizini DV 2x220 kV Konjsko-Bilice“, Split, veljača 2015.