

Uticaj trofaznih visokonaponskih nadzemnih vodova na provodne cevi u neposrednoj blizini

Nikola Mučalica
 „Energotehnika-Južna Bačka”
 Novi Sad, Srbija
nikola.mucalica@entjuba.rs

Miroslav Prša¹, Karolina Kasaš-Lažetić²
 Univerzitet u Novom Sadu
 Fakultet Tehničkih Nauka
 Novi Sad, Srbija
prsa@uns.ac.rs kkasas@uns.ac.rs

Sadržaj— Provodne cevi za prenos tečnosti ili gasova se često ukopavaju u zemlju i mogu da se nađu u blizini visokonaponskih trofaznih sistema. Vremenski promenljivo magnetsko polje trofaznog sistema prouzrokuje indukovanu struju u zidovima cevi i na taj način se u cevima pojavljuju gubici i zagrevanje cevi, koje je posebno važno u slučajevima kada se kroz cevi transportuju zapaljive materije.

U ovom radu je prikazano istraživanje ove pojave na realnom problemu. Prvo je proučeno na kom naponskom nivou je taj efekat najizrazitiji, a zatim je proračunavan sistem pocinkovane čelične cevi, postavljene u blizini trofaznog visokonaponskog sistema za prenos električne energije. Za nazivne struje u električnom sistemu, izračunato je spoljašnje magnetsko polje, struje indukovane u zidu cevi, kao i snaga pretvorena u toplotu.

Svi proračuni su izvršeni numerički, primenom COMSOL Multiphysics 3.5a računarskog programa, za najnepovoljniji položaj i minimalne visine visokonaponskih provodnika od zemlje, za osam različitih frekvencija, do 450 Hz. Rezultati proračuna, raspodela magnetskog polja, raspodela indukovanih struja, kao i frekvencijske zavisnosti indukovanih struja i snage Džulovih gubitaka, dati su grafički.

Svi rezultati proračuna pokazuju da su, za posmatrani sistem, struje indukovane u zidu cevi zanemarljivo male, osim u slučaju kada je cev postavljena izuzetno blizu sistema za prenos električne energije, što ne može da se desi u praksi.

Ključne riječi-vremenski promenljivo magnetsko polje; struje indukovane u zidovima cevi; gubici usled indukovanih struja

I. UVOD

Metalne, provodne cevi za transport tečnih ili gasovitih materija se postavljaju po unapred određenim trasama, na površini zemlje, na određenoj visini iznad zemlje ili se ukopaju u zemlju, na određenoj dubini, propisanoj odgovarajućim standardima. U svim takvim situacijama može da se desi da se cevni transportni sistem približi ili ukrsti sa sistemom za prenos ili distribuciju električne energije, koji može da bude kablovski ili nadzemni. U takvim situacijama, vremenski promenljivo magnetsko polje, nastalo vremenski promenljivim strujama u provodnicima sistema za prenos električne energije, dovodi do pojave elektromagnetske indukcije i u zidovima provodnih cevi prouzrokuje indukovane struje. Te struje su praćene Džulovim

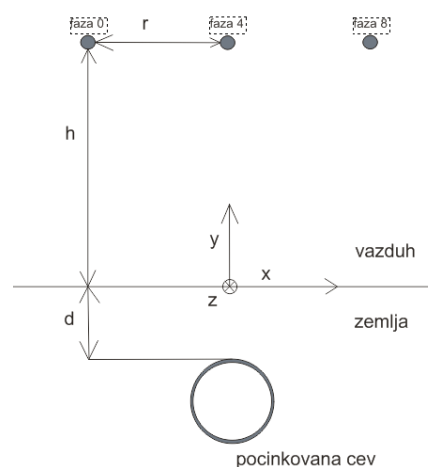
efektom, pretvaranjem dela električne energije u toplotu, što može da dovede i do nesreće, ako se cevima prenose zapaljive materije.

Zbog toga je izuzetno važno poznavanje uticaja bilo kog električnog sistema na bliske sisteme, koji sadrže provodne elemente.

Proračuni strujne raspodele i raspodele elektromagnetskog polja za neke od sistema za prenos i distribuciju električne energije su već izučavani i prikazani u [1] i [2], a njihov uticaj na provodne cevi u neposrednoj blizini je prikazan u [3].

Pre pristupa samom proračunu, bilo je nepohodno ustanoviti na kom naponskom nivou prenosa i distribucije električne energije je pojava indukovanih struja najizrazitija. Na osnovu instalisanih nazivnih snaga transformatora na krajevima sistema za prenos i distribuciju električne energije, koje definišu i nazivne jačine struja u provodnicima sistema, kao i na osnovu standardizovanih visina provodnika iznad zemlje za pojedine naponske nivoe, konstatovano je da najkritičniji slučaj može da nastupi kod dalekovoda naponskog nivoa 400kV.

Da bi se odredio i prikazao uticaj visokonaponskog nadzemnog trofaznog sistema na provodne cevi postavljene u neposrednoj blizini sistema, razmatran je realan problem, sa cevima ukopanim u zemlju, prikazan na Sl. 1.



Slika 1. Prikaz geometrije istraživog problema.

U tom slučaju je, naime, magnetsko polje na površini zemlje najvećeg intenziteta, što znači da će i indukovane elektromotorne sile i struje indukovane u zidovima cevi, biti najveće moguće.

Svi proračuni su rađeni za najnepovoljniji položaj cevi u odnosu na sistem, a to je situacija kada je cev ukopana na jedan metar dubine, paralelno sa provodnicima električnog sistema, postavljena ispod srednjeg provodnika sistema. Za posmatrani sistem i za fazni stav 0-4-8, dobijeni su rezultati koji imaju najveću vrednost intenziteta vektora magnetske indukcije na površini zemlje, ispod srednjeg provodnika, pa je i taj fazni stav korišćen u proračunima.

II. TEORIJSKA OSNOVA RADA

Ako se pretpostavi da su sve jačine struja u provodnicima prostoperiodične, određene učestanosti i da je ceo sistem linearan, moguće je problem rešavati u kompleksnom domenu. Čelična cev, istina, nije od magnetski linearnog materijala, ali se pokazalo da može da se linearizuje, uzimajući da je njena relativna permeabilnost dosta veća od 1, ali nezavisna od intenziteta vektora magnetske indukcije.

Da bi se odredile sve potrebne veličine, najjednostavnije je prvo definisati kompleksni magnetski vektor potencijal, koji je rešenje diferencijalne jednačine, [5], [6],

$$\Delta \vec{A} - j\omega\mu\sigma \vec{A} = -\mu \vec{J} . \quad (1)$$

U izabranom Dekartovom koordinatnom sistemu, vektor gustine struje ima samo z-komponetu, tako da i magnetski vektor potencijal ima samo z-komponentu, pa gornja jednačina može da se napiše kao,

$$\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} - j\omega\mu\sigma A_z = -\mu J_z . \quad (2)$$

Z-komponenta kompleksnog magnetskog vektor potencijala definiše z-komponentu vektora jačine indukovanog električnog polja,

$$\underline{E}_{indz}(x, y) = -j\omega \underline{A}_z(x, y) \quad (3)$$

i z-komponentu vektora gustine indukovane struje,

$$\underline{J}_{indz}(x, y) = \sigma \underline{E}_{indz}(x, y) . \quad (4)$$

Podužna snaga Džulovih gubitaka u zidu cevi se računa na 1 kilometar dužine cevi, integraljenjem zapreminske gustine snage koja se pretvori u toplotu, po poprečnom preseku zida cevi, S_{pzc} ,

$$P'_j = \int_{S_{pzc}} \frac{|J_z(x, y)|^2}{\sigma} dS . \quad (5)$$

III. REZULTATI PRORAČUNA

Kao što je već rečeno u uvodu, indukovane struje najvećih intenziteta će se javiti u cevima zakopanim u blizini dalekovoda naponskog nivoa 400kV. Zbog toga je, u ovom radu, u blizini realnog dalekovoda, 400kV, sa karakteristikama sistema prikazanim u [4], postavljena provodna, čelična

pocinkovana cev, prečnika, Φ 1020mm (40") i debljine zida 8,2mm, kao što je prikazano na Sl. 1.

Svi proračuni su urađeni za minimalnu visinu provodnika sistema od zemlje, koju dozvoljavaju srpski standardi; 7,5m (+40°C ili -5°C plus težina leda na provodnicima).

Treba napomenuti da, po Srpskom standardu SRPS N.C0.105:1987, pocinkovana cev ne sme da se postavi tako blizu posmatranog električnog sistema, pogotovo ne tačno ispod srednjeg provodnika, paralelno sa provodnicima. Ipak, u ovom radu je razmatran slučaj kada je cev, po propisima zakopana na dubinu $d = 1$ m, mnogo bliže dalekovodu od dozvoljenog, kako bi se dobio kompletan uvid u još nepovoljnijem slučaju nego što može da nastupi u praksi.

U svim proračunima simetričnog visokonaponskog trofaznog prenosnog sistema 400kV, uzeto je da je efektivna vrednost intenziteta struje po fazi, $I=430$ A, što odgovara nominalnoj snazi transformatora 400/110 kV/kV od 300MVA.

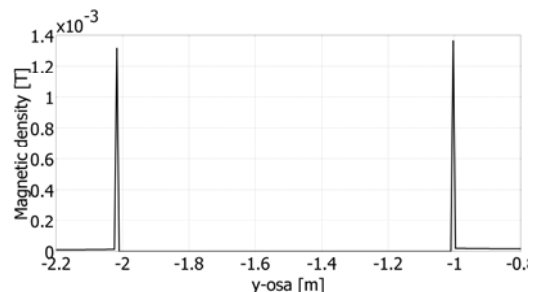
Razmatrano je nekoliko različitih položaja cevi u odnosu na dalekovod, a u ovom radu su prikazani rezultati samo za najnepovoljniji mogući slučaj, kada se cev nalazi tačno ispod posmatranog nadzemnog sistema.

Ograničenja u standardima onemogućavaju relativno male udaljenosti svih mogućih provodnih cevi od nadzemnog elektroenergetskog prenosnog sistema. Uprkos tome, kako bi se odredio najgori mogući slučaj (fazni stav 0-4-8 sistema) i najgori mogući položaj (cev ukopana ispod srednjeg provodnika nadzemnog trofaznog sistema), u proračunu je uzeto da je rastojanje srednjeg provodnika od cevi (spoljna ivica cevi od površine provodnika) $d=8,5$ m. Uzeto je da je specifična otpornost tla, $\rho=50\Omega\text{m}$, a relativna permeabilnost čelične cevi je, $\mu_r=4000$.

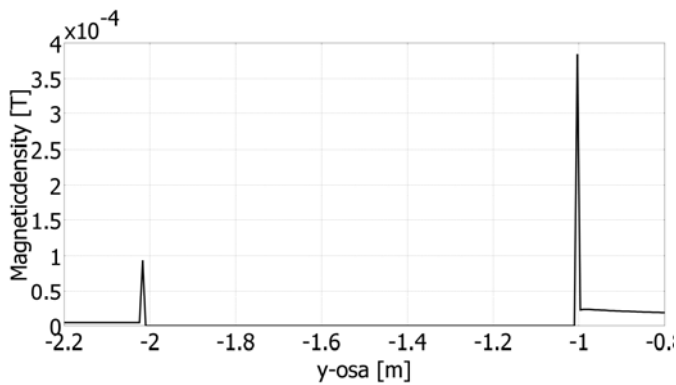
Svi proračuni su rađeni za osam odabranih frekvencija, kako bi se prikazao i uticaj viših harmonika i to za frekvencije 0,01Hz, 16,667Hz, 50Hz, 100Hz, 150Hz, 250Hz, 350Hz i 450Hz.

Svi proračuni su rađeni pomoću programa COMSOL Multiphysics 3.5a [7], zasnovanog na metodi konačnih elemenata.

Raspodela intenziteta vektora magnetske indukcije duž y-ose, po poprečnom preseku cevi ukopane u zemlju, postavljene ispod srednjeg provodnika posmatranog nadzemnog sistema, pri frekvenciji od 50Hz, predstavljena je na Sl. 2, a ista ta raspodela pri frekvenciji 450Hz je prikazana na Sl. 3.



Slika 2. Raspodela intenziteta vektora magnetske indukcije po poprečnom preseku cevi, po y-osi, na 50Hz.

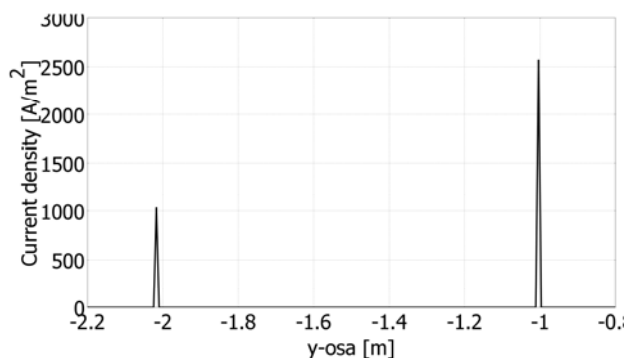


Slika 3. Raspodela intenziteta vektora magnetske indukcije po poprečnom preseku cevi, po y-osi, na 450Hz.

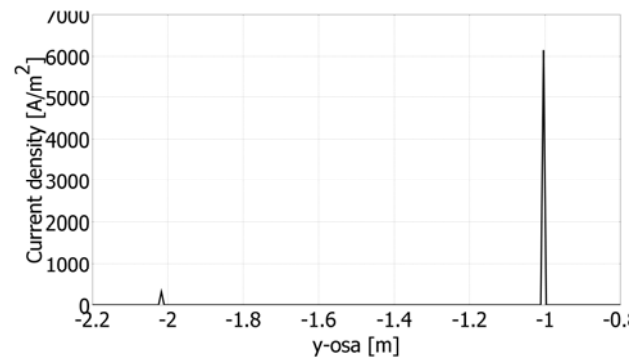
Raspodela intenziteta vektora magnetske indukcije, prikazana na Sl. 2, ima očekivan oblik. Zbog niske frekvencije i manjeg uticaja indukovanih struja na raspodelu magnetskog polja, intenzitet vektora magnetske indukcije je približno isti u svim delovima poprečnog preseka cevi. Sa Sl. 2 se vidi da je taj intenzitet nešto veći u delu zida cevi bližem površini zemlje (na dubini, $y = -1\text{m}$) u odnosu na intenzitet vektora magnetske indukcije u delu cevi najudaljenijem od površi zemlje, na dubini, $y = -2\text{m}$. Unutar cevi je intenzitet vektora magnetske indukcije zanemarljiv, što je bilo i očekivano, obzirom da feromagnetska cev deluje kao magnetski oklop.

Dobijeni oblik raspodele intenziteta vektora magnetske indukcije se razlikuje od predhodnog slučaja, prikazanog na Sl. 2. U ovom slučaju je intenzitet vektora magnetske indukcije znatno veći u bližem zidu u odnosu na prethodni slučaj zbog više frekvencije, 450Hz, većih intenziteta indukovanih struja i većeg uticaja tih struja na resultantno magnetsko polje. Struje indukovane u delu zida bližem površini zemlje, svojim magnetskim poljem, smanjuju magnetsko polje u udaljenijem delu zida cevi.

Vremenski promenljivo magnetsko polje, prouzrokovano električnim strujama u provodnicima dalekovoda, u zidovima cevi indukuje elektromotorne sile i struje. Intenzitet vektora gustine indukovane struje, duž y-ose, po poprečnom preseku cevi ukopane u zemlju, postavljene ispod srednjeg provodnika posmatranog nadzemnog sistema za frekvenciju 50Hz, prikazan je na Sl. 4, dok je isti dijagram za 450Hz dat na Sl. 5.



Slika 4. Raspodela intenziteta vektora gustine indukovane struje po poprečnom preseku cevi, po y-osi, na 50Hz.

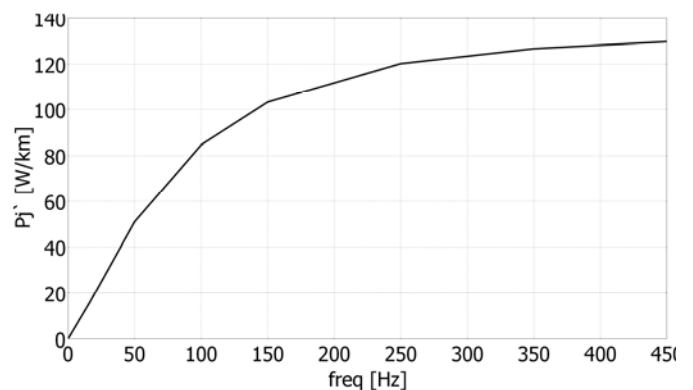


Slika 5. Raspodela intenziteta vektora gustine indukovane struje po poprečnom preseku cevi, po y-osi, na 450Hz.

Kao i u slučaju raspodele magnetskog polja, zbog visoke frekvencije i time izrazitijeg uticaja indukovanih struja, vidi se da je intenzitet vektora gustine indukovane struje znatno veći nego u predhodnom slučaju. Struje indukovane u delu zida cevi bližem površi zemlje ($y = -1\text{m}$) svojim poljem značajno smanjuju polje u dubinu zemlje, tako da je magnetsko polje u udaljenijem delu zida cevi ($y = -2\text{m}$) mnogo manjeg intenziteta od intenziteta vektora magnetske indukcije u bližem delu zida cevi (vidi Sl. 3). Taj isti efekat se vidi i na Sl. 5, gde može da se uoči da u delu zida provodne cevi udaljenijem od površi zemlje ($y = -2\text{m}$), zbog značajno smanjenog magnetskog polja, praktično ne postoje indukovane struje.

Kao što je rečeno u uvodu, deo energije električnog prenosnog sistema će se, preko indukovanog električnog polja i struja indukovanih u zidu cevi, pretvoriti u toplotu. Obzirom na ukupnu energiju koja se prenosi dalekovodom, ne očekuje se procentualno značajan gubitak snage, odnosno, energije. Međutim, zbog tih Džulovih gubitaka u zidu cevi, dolazi do povećanja temperature cevi, što može da bude značajno, posebno u situacijama kada se cevima transportuje neka zapaljiva materija, kao što su sistemi za prenos nafte i gasa. U tom slučaju bi povećanje temperature usled Džulovih gubitaka mogao da prouzrokuje požar i eksploziju.

Zbog toga je poznavanje snage Džulovih gubitaka, definisane izrazom (5), veoma značajno. Ti gubici u zidu provodne cevi se računaju po kilometru dužine, a zavisnost podužne snage Džulovih gubitaka od frekvencije je prikazana na Sl. 6.



Slika 6. Snaga Džulovih gubitaka u zidu pocinkovane cevi, po kilometru dužine, u zavisnosti od frekvencije.

Ovaj rad je deo projekta TR32055 Ministarstva za Nauku i Tehnološki Razvoj Republike Srbije.

LITERATURA

- [1] Prša, M., Mučalica, N., Kasaš-Lažetić, K., "Determination of electromagnetic field in a three-phase system with three single core power electric cables 110kV", Proc. of the IEEE region 8 EUROCON 2009 Conference, Saint-Petersburg, Russia.
- [2] Prša, M., Kasaš-Lažetić, K., Mučalica, N., "Skin effect and proximity effect in a real, high voltage double three-phase system", Proc. of the IEEE region 8 EUROCON 2011 Conference, Lisbon, Portugal.
- [3] Mučalica N., Prša M., Kasaš-Lažetić K., Herceg D.: "Impact of HV Cable System on Neighboring Conductive Pipes", 16th International Symposium on Power Electronics – Ee 2011, Novi Sad, Serbia, October 26th – 28th, 2011. Paper No T6-1.3 pp 1-4, ISBN 978-86-7892-355-5.
- [4] Gerić Lj., Đapić P.: *Razvodna postrojenja*, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad, Novi Sad, 2006. (in Serbian).
- [5] Popović, B. D., *Elektromagnetika*, Gradjevinska knjiga, Beograd, 2000. (in Serbian).
- [6] Ivanović, D., *Vektorska analiza*, 2st ed. Belgrade: Naučna knjiga, 1960, pp. 211-218 (in Serbian).
- [7] COMSOL MULTIPHYSICS, CLS 3.5a documentation 2008.

ABSTRACT

Conductive pipes for liquids and gas transportation are frequently buried in the ground, in vicinity of a high voltage three-phase power delivery system. Time varying magnetic field, produced by three-phase system, induces currents in the pipes' walls, producing losses and heating inside the pipe's wall. This heating is of crucial importance especially when the pipe system is transporting some inflammable materials.

In this paper investigation of this effect is performed at a real problem. First of all it was determined which voltage level produces the most emphasized effect. After that a system of real zinc coated steel pipe was positioned in vicinity of three-phase, high voltage, overhead electric energy transmission system. For nominal currents in electric power delivery system, external magnetic field and induced currents were calculated, together with power of heating losses inside the pipe's wall.

All calculations were performed numerically, applying COMSOL Multiphysics 3.5a computer program, for the worst position and minimum height of power delivery conductors from the ground, at eight different frequencies, up to 450 Hz. The calculation results, magnetic field distribution, induced current distribution and frequency dependent induced currents and heating losses power, are given graphically.

All calculated results show that, for investigated type of power delivery system, currents induced in the pipe's walls are negligible, except in case when the pipe is extremely closed to the power delivery system, which cannot happen in practice.

IMPACT OF THREE-PHASE OVERHEAD HIGH VOLTAGE TRANSMISSION SYSTEM ON NEIGHBORING CONDUCTIVE PIPES

Nikola Mučalica, Miroslav Prša, Karolina Kasaš-Lažetić

Kao što može da se vidi sa Sl. 6, snaga Džulovih gubitaka po kilometru dužine u zidu čelične, pocinkovane cevi raste sa porastom frekvencije. Zbog sve izrazitijeg površinskog efekta i porasta podužne otpornosti cevi, koja raste, grubo, sa \sqrt{f} , i podužna snaga gubitaka ima sličan tok porasta sa porastom frekvencije.

Pri industrijskoj frekvenciji, 50Hz, podužna snaga Džulovih gubitaka u cevi iznosi,

$$P'_{J50Hz} = 51W / km ,$$

dok je, na najvišoj ispitivanoj frekvenciji, 450Hz, podužna snaga Džulovih gubitaka,

$$P'_{J450Hz} = 131W / km .$$

Prema gore navedenim podacima, jasno je da je, čak i u najnepovoljnijem slučaju koji ne može da nastupi u praksi, podužna snaga Džulovih gubitaka nedovoljna da bi prouzrokovala značajno zagrevanje fluida unutar cevi.

IV. ZAKLJUČAK

Pre nego što se pristupilo proračunu uticaja trofaznih visokonaponskih nadzemnih elektroenergetskih prenosnih sistema na provodne sisteme u neposrednoj blizini, procenjeno je na kom naponskom nivou bi taj uticaj bio najizrazitiji. Posmatrajući magnetsko polje na površini zemlje, pri nominalnim jačinama struja prenosnih sistema, zaključeno je da je najkritičniji prenos na naponskom nivou 400kV.

Posle toga se pristupilo proračunu magnetskog polja u široj okolini realnog nadzemnog prenosnog sistema i struja koje takvo magnetsko polje indukuje u bliskoj provodnoj čeličnoj, pocinkovanoj cevi. Ceo proračun je bio ponovljen za nekoliko različitih položaja cevi u odnosu na nadzemni sistem, a u ovom radu je prikazan samo najnepovoljniji položaj; cev zakopana tačno ispod srednjeg provodnika, paralelno sa njim. Osim toga, proračun je sproveden za 8 različitih frekvencija, do 450Hz.

Rezultati proračuna su bili očekivani i pokazuju da čak i u najnepovoljnijem slučaju, koji, na osnovu važećih standarda, nije moguć u praksi, izračunata snaga Džulovih gubitaka nije dovoljna da izazove značajno zagrevanje cevi i fluida koji se njome transportuje. Ovaj zaključak važi čak i u slučaju znatnog prisustva viših harmonika osnovne učestanosti.

I pored toga, za svaki slučaj, u gore pomenutom standardu, SRPS N.C0.105:1987, preporučuje se da, ako postoji potreba za ukrštanjem visokonaponskog sistema sa feromagnetskim cevima, to treba izvesti tako da se cevi postave normalno na provodnike sistema. U tom slučaju su struje indukovane u zidu feromagnetske cevi minimalne i mogućnost zagrevanja fluida u cevi je minimalna.

Ceo problem je uspešno rešen pomoću COMSOL MULTIPHYSICS 3.5a računarskog paketa programa. Za sve proračune korišćen je AC/DC Modul, zajedno sa podacima iz baze programa o materijalima.