Pregled problema vezanih za uticaj geomagnetski indukovane struje

VOJIN I. KOSTIĆ, Univerzitet u Beogradu,
Elektrotehnički institut "Nikola Tesla" a.d, Beograd

Pregledni rad
UDC: 621.311:621.317.31
DOI: 10.5937/tehnika1702243K

Geomagnetski indukovane struje (GIC) mogu uzrokovati niz neželjenih posledica vezano za normalno funkcionisanje elektroenergetskog sistema kao što su: zasićenje energetske transformatora, neobičajeni tokovi aktivne i reaktivne snage, naponske fluktuacije, pojava trećeg harmonika, pomak mrežne frekvencije i pogrešno delovanje relejne zaštite. U najgorem slučaju, navedeni poremećaji imaju za posledicu termičko razaranje energetske transformatora i teško oštećenje dela ili čak čitavog nacionalnog elektroenergetskog sistema. Efekat istih posebno je izražen u visokonaponskim postrojenjima, čije su neutralne tačke direktno galvanski povezane sa sistemom uzemljenja, kakav je i slučaj sa transformatorskim stanicama nazivnog napona 110 kV (u vlasništvu JP EPS), odnosno 220 kV i 400 kV (u vlasništvu EMS a.d.). Cilj ovoga rada je da na pregledan način ukaže na probleme koji su vezani za prisustvo GIC-a. Takođe, akcenat je na mogućim preventivnim radnjama usmerenim na suzbijanje potencijalnih neželjenih posledica prisustva GIC.

Ključne reči: geomagnetski indukovane struje, elektroenergetski sistem

1. UVOD

Uprkos činjenici da su negativne posledice prisustva geomagnetski indukovanih struja (GIC - Geomagnetic Induced Current) na telegrafске sisteme registrovane, sada već davne 1847. godine [1], u elektroenergetici pomenutoj pojavi nije se pridavao poseban značaj sve do najveće geomagnetske oluje koja je pogodila Zemlju u 20. veku. Naime, 13. marta 1889. godine područje kanadske provincije Kvebek, sa gotovo 6 miliona stanovnika bilo je izloženo devetočasovnom nestanku električne energije. Kao posledica domino efekta, elektroenergetski sistem gotovo celog severoistočnog dela SAD, od Nove Engleske do Vašington D.C, bio je izložen različitim vrstama otkaza elektroenergetske opreme [2].

Nakon navedenog događaja radna grupa IEEE komiteta za prenos i distribuciju (IEEE Transmission and Distribution Committee) sačinila je izveštaj u kome su detaljno opisane posledice negativnog dejstva GIC na sistem i iznesene smernice za preventivno upravljanje mrežom [3]. Koliko je problem ozbiljno razmatran govori i izveštaj američke Nacionalne aka-

demije nauka [4], u kome se iznosi procena da bi, u slučaju pojave geomagnetske oluje intenziteta sličnog onoj iz 1921. godine, 350 visokonaponskih energetske transformatora pretrpelo trajno oštećenje, što bi zahtevalo period oporavka od četiri do deset godina. U finansijskom smislu, to bi mogla biti najveća elementarna nepogoda sa kojom su se SAD ikada suočile, i čija se vrednost može proceniti na 1 do 2 triliona USD.

Što se evropskog kontinenta tiče, negativni uticaj geomagnetskih oluja, posebno je došao do izražaja 30. oktobra 2003. godine, kada je 50.000 hiljada stanovnika švedskog grada Malmea i okoline bilo izloženo 20-50 minutnom isključenju električne energije. Do tada, bilo je sporadičnih događaja uzrokovanih GIC-om čiji su negativni efekti imali posledice po telekomunikacione sisteme, odnosno zasićenje pojedinih visokonaponskih energetske transformatora. Složena interkonekcija i intenzivan transport energije između evropskih zemalja čini da je evropska visokonaponska (VN) mreža generalno sklona problemima vezanim za GIC. Da bi se predupredile neželjene posledice GIC-a na evropski elektroenergetski sistem u celini, u mesecu martu 2011. godine pokrenut je EU-projekat, European Risk from Geomagnetically Induced Currents (EURISGIC). Cilj projekta je da generiše verodostojne aktuelne prognoze (mape) statističke pojave GIC-a za područje cele Evrope. Na toj osnovi, nacionalne elektroenergetske kompanije mogle bi da naprave blagovremenu procenu rizika od GIC. Na osnovu modela [5],

Adresa autora: Vojin Kostić, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla”, Beograd, Koste Glavinića 8a, e-mail: voj@ieent.org

Rad primljen: 20.01.2017.

Rad prihvaćen: 13.02.2017.

za period 1996.-2008. godina, najveći nivo GIC-a za pojedinačnu transformatorsku stanicu na području Evrope je: 400 A za nordijsko područje, oko 100 A za područje Velike Britanije, oko 80 A za baltičke zemlje i manje od 50 A za zemlje centralne i južne Evrope. Dakle, relativno najveći problemi zbog moguće pojave GIC očekuju se u oblasti severne Evrope. Međutim, moguće prisustvo GIC-a nije zanemarljivo ni u oblasti centralne Evrope. Stoga, pokrenuta su i odgovarajuća istraživanja u Austriji [6, 7].

Koliko je autoru ovog rada poznato, mogući uticaj GIC na havarijske događaje koji su u proteklom periodu pogodili elektroenergetski sistem Srbije nije bio predmet posebne analize. Cilj ovoga rada je da upozna širu stručnu i naučnu javnost sa negativnim posledicama mogućeg delovanja GIC na funkcionalnost i pouzdanost elektroenergetskog sistema u celini. U svetlu novih činjenica, iznesenih u ovom radu, mogu se izvršiti preispitivanja većih havarijskih događaja u elektroenergetskom sistemu Srbije i ustanoviti da li su isti bili potencijalno uzrokovani GIC-om.

2. OPŠTE

Sunčeve oluje manifestuju se kao erupcija plazme. Čestice plazme su naelektrisane, pa u interakciji sa magnetskim poljem Zemlje indukuju geoelektrično polje na površini Zemlje, a u tlu odgovarajuću geomagnetski indukovanu struju, tj. GIC, čija magnituda zavisi od lokalne provodnosti tla.

Reč je o kvazi-DC (frekvencija 0.0001-0.01 Hz) struji [8]. Važno je istaći da GIC uvek bira put sa najmanjim električnim otporom. Problemi vezani za prisustvo GIC-a dominantno su izraženi u područjima sa višom geografskom širinom (55° - 70°), gde su geomagnetske oluje intenzivne i učestale. Bez obzira na geografsku širinu, GIC može biti potencijalno prisutan i na lokacijama sa malom vrednošću specifične električne otpornosti tla.

Sunčeve aktivnosti (oluje) imaju 11-godišnji ciklus. U februaru 2013. godine bio je poslednji maksimum u 24. ciklusu sunčeve aktivnosti. 24. ciklus počeo je u januaru 2008. godine, a završava 2019-2020. godine [2]. Tokom ciklusa, brzina promene intenziteta geomagnetskog polja menja se – najmanji je na početku i kraju ciklusa (do oko 500 nT/min), a najveći sredinom ciklusa (više od 5000 nT/min) i korespondira sa skalom intenziteta koja ima nivoe označene sa 1 do 9. U proseku, tokom ciklusa dogodi se oko 2600 oluja sa nivoom 5, a 4 ili 5 oluja sa nivoom 9. Tipična vremenska karakteristika GIC –a odnosi se na niski nivo tokom intervala od oko desetak minuta, ili reda sata, koji su prekidani sa impulsima vrlo velike magnitude, a traju 1 do 3 minuta. Na slici 1 prikazana je tipična vremenska karakteristika GIC.

Slika 1 - Vremenska karakteristika GIC, [9]

3. NEGATIVNI EFEKTI GIC-A NA ELEKTROENERGETSKI SISTEM

U opštem slučaju, tlo je loš provodnik. Da bi se omogućila disipacija velike struje kvara neophodna je niskoomska sprega sa tlom ispod čitave površine koju zauzima visokonaponsko (VN) postrojenje. U tu svrhu ukopava se složena struktura međusobno povezanih uzemljivačkih elektroda koje zajedno čine sistem uzemljenja. Stoga, jasno je da sistem uzemljenja enormno povećava lokalnu prividnu provodnost tla i to utoliko više što je veći naponski nivo VN postrojenja (jer je struja kvara koja se odvodi u sistem uzemljenja uglavnom proporcionalna sa naponskim nivoom postrojenja).

Naime, zbog sigurnosnih razloga, u VN postrojenjima na visokim naponskim nivoima projektovana vrednost otpornosti uzemljenja manja je od 0.5 Ω .

Slika 2 - Način ulaska GIC u elektroenergetski sistem

Dakle, sistem uzemljenja VN postrojenja je najpovoljnije mesto (u smislu najmanjeg otpora u odnosu na tlo u kome GIC cirkulišu) za ulazak GIC u elektroenergetski sistem. GIC preko neutrala transformatora (videti sliku 2) ulazi u energetske transformator i širi se po mreži izazivajući neuobičajene tokove aktivne i reaktivne snage, naponske fluktuacije, pojavu trećeg harmonika, pomak mrežne frekvencije i pogrešno delovanje relejne zaštite. U najgorem slučaju, navedeni poremećaji imaju za posledicu termičko razaranje transformatora i teško oštećenje dela ili čak čitavog nacionalnog elektroenergetskog sistema. Jedan događaj, u trajanju od samo nekoliko minuta, ima potencijal da nanese ozbiljnu štetu delu elektroenergetskog sistema, za čiju su sanaciju potrebni dani, odnosno nedelje.

Slika 3 vrlo jasno ilustruje šta se događa u VN transformatoru u prisustvu DC struje. Naime, u tom slučaju, AC talasni oblik je pomeren u odnosu na apscisnu osu (na gore, ako je DC struja pozitivna ili na dole, ako je DC struja negativna). U jezgru transformatora postoji DC fluks koji zavisi od magnitude DC struje. DC fluks sabira se sa AC fluksom u toku jedne poluperiode, a oduzima se u toku druge poluperiode. To ima za posledicu da u toku jedne poluperiode vršni fluks ulazi u zasićenje, izobličava se AC talasni oblik, tj. raste magnituda 3-ćeg harmonika. Sledstveno tome, relejna zaštita pogrešno funkcioniše što dovodi do nestabilnosti i potpunog pada sistema. Istovremeno transformator se greje i u krajnjem slučaju, ako je DC struja velika, termički se razara. Orijentacije radi, treba reći da struja do oko 20 A, što odgovara niskom nivou geomagnetske struje, izaziva porast temperature transformatora za samo 1°C [10]. Sa druge strane, tipični impuls GIC iznosi 400 A i traje nekoliko minuta.

Slika 3 - Uz objašnjenje uticaja DC struje na talasni oblik AC struje, [10]

Posledice uticaja GIC-a zavise i od tipa energetskog transformatora. Za određeni transformator maksimalna dozvoljena DC struja kroz neutral zavisi od više faktora, napr. temperaturnih ograničenja transformatora, temperature ambijenta, vibracionih ograničenja, namotaja, itd.

Ako se za potrebe određenog merenja u sistem uzemljenja VN postrojenja ubrizgava DC struja, napr. pri ispitivanjima kontinuiteta sistema uzemljenja [11], odnosno merenju električne otpornosti permanentnih nadzemnih spojeva [12], to je praktično isto kao da postoji odgovarajuća GIC. Preciznije, uvek se DC test struja superponira sa GIC. Imajući u vidu kakve posledice izaziva GIC izuzetan oprez treba da postoji u pogledu prethodne provere trenutnog stanja GIC, a posebno u pogledu njenog trajanja u sistemu uzemljenja VN postrojenja. S obzirom na opisane fizičke procese koji prate prisustvo DC struje u sistemu uzemljenja, njeno trajanje u test svrhe mora biti strogo ograničeno na desetak sekundi. Inače, neuobičajena

buka iz transformatora je prvo jasno upozorenje da odmah treba isključiti DC izvor.

4. TEHNIKE ZA UBLAŽAVANJE UTICAJA GIC

U literaturi je opisano i analizirano više havarija uzrokovanih GIC-om širom sveta, napr., u Kanadi, SAD, Švedskoj, Finskoj i Južnoj Africi. Za sada, nema sistematskog i generalnog rešenja za ovaj problem.

Jedno od mogućih rešenja predviđa ugradnju kondenzatora u neutralnu tačku energetskog transformatora [13]. Kondenzator blokira kvazi-DC struju (GIC), istovremeno obezbeđujući niskoomsku spregu neutralne tačke sa sistemom uzemljenja. Iako ugradnja kondenzatora u neutral energetskog transformatora predstavlja najbolje rešenje sa aspekta blokade kvazi-DC struje, isto može ugroziti normalno funkcionisanje AC sistema.

U vezi sa navedenim postoje dva odvojena problema: (1) rad energetskog transformatora sa ugrađenim kondenzatorom u neutralu može dovesti do pojave ferorezonanse ili tranzijentnih prenapona. Navedeno se posledično reflektuje na koordinaciju izolacije postojeće visokonaponske opreme; i (2) kondenzatori u neutralu energetskog transformatora mogu izmeniti karakteristike ukupne struje kvara, kao i struje koja prilikom kvara protiče kroz neutralnu tačku energetskog transformatora, što može ometati ispravan rad relejne zaštite, koji se ogleda u detekciji i isključenju kvara. Stoga, jasno je da pomenuto rešenje iziskuje ugradnju ultra brzog bypass uređaja, koji u slučaju poremećaja u radu sistema, vrši premošćavanje kondenzatora i direktno povezivanje neutralne tačke sa sistemom uzemljenja. Navedeno dodatno komplikuje primenjeno rešenje.

S tim u vezi, treba imati u vidu i činjenicu da je za tipičan elektorenegetski sistem neophodna ugradnja na stotine ovakvih uređaja. U slučaju da ceo sistem nije pokriven sa navedenim uređajima, dolazi do preumeravanja GIC sa jednog dela sistema na drugi. Sa druge strane, pokrivanje celog sistema iziskuje i značajna materijalna ulaganja. Analizirajući elektorenegetski sistem Srbije, jasno je da između JP EPS u čijem se vlasništvu nalaze transformatorske stanice 110/X kV, kao i blok transformatori u proizvodnim kapacitetima električne energije (termoelektrane, hidroelektrane), odnosno EMS a.d. u čijem su vlasništvu transformatorske stanice 220/X kV i 400/X kV, mora postojati jasna koordinacija i jedinstveno opredeljenje u vezi GIC.

Ipak, najbolja odbrana od neželjenih posledica prisustva GIC bazira na geomagnetskim prognozama i shodno tome na preventivnom upravljanju mrežom. U društvu savremenih tehnologija internet konekcija dostupna je svuda i na svakom mestu. Naime, postoji više

privatnih kompanija koje na globalnom nivou, prateći putem satelita promene na suncu i unoseći precizne geografske koordinate, daju trodnevnu prognozu geomagnetskih oluja sa naznačenim nivoima. Uvidom u geomagnetsku prognozu, elektroenergetske kompanije imaju 72 h da se pripreme za preventivno upravljanje mrežom u slučaju previđanja ozbiljnijih magnetskih oluja.

5. DISKUSIJA

Istraživanja u vezi sa GIC, sprovedena u Austriji i Kini [6, 8], tj. u područjima sa manjom geografskom širinom, zabeležila su vrednosti GIC reda desetak ampera, pa zbog slične geografske širine, instruktivni su za operatore distributivnog i interkonektivnog sistema u Srbiji na ozbiljnost problema i na potrebu razvoja sistema za otkrivanje i kontinualno praćenje nivoa GIC. Odgovarajuću opremu trebalo bi instalirati u transformatorskim stanicama lociranim u karakterističnim regionima Srbije - u odnosu na geomagnetsku aktivnost i u pogledu velike provodnosti tla. Na taj način došlo bi se do relevantnih informacija o prisustvu i intenzitetu GIC-a. To bi bila osnova za preduzimanje odgovarajućih preventivnih mera radi zaštite od GIC-a. U svetlu elaboriranih činjenica u ovom radu, korisno bi bilo pristupiti preispitivanju nalaza o havarijskim događajima iz prošlosti u elektroenergetskom sistemu Srbije. Naravno, sve ovo u cilju boljeg razumevanja problema koje donosi GIC na teritoriji Republike Srbije.

LITERATURA

- [1] L. Clark, C. F. Varley, W. E. Ayrton and Warren, "Discussion on the papers "On earth currents, and on their bearing upon the measurement of resistance of telegraph wires in which they exist" and "Earth currents", in *Telegraph Engineers, Journal of the Society of*, vol. 2, no. 4, pp. 111-123, 1873. doi: 10.1049/jste-1.1873.0033.
- [2] R. Thorberg, *Risk analysis of geomagnetically induced currents in power systems*, Division of Industrial Electrical Engineering and Automation Faculty of Engineering, LTH, Lund University, 2012.
- [3] "Geomagnetic disturbance effects on power systems," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, no. 3, pp. 1206-1216, July 1993. doi: 10.1109/61.252646.
- [4] National Academy of Sciences, "Severe space weather events-understanding societal and economic impacts," National Research Council, Washington, D.C., Rep. 12507, 2008.
- [5] A. Viljanen, R. Pirjola, E. Pracser, J. Katkalov, and M. Wik, "Geomagnetically induced currents in Europe". *Journal of Space Weather and Space Climate*, 2014, 4, A09.
- [6] T. Halbedl, H. Renner, R. L. Bailey, R. Leonhardt and G. Achleitner, "Analysis of the impact of geomagnetic disturbances on the Austrian transmission grid," *2016 Power Systems Computation Conference (PSCC)*, Genoa, 2016, pp. 1-5. doi: 10.1109/PSCC.2016.7540833.
- [7] T. Halbedl, H. Renner, M. Sakulin and G. Achleitner, "Measurement and analysis of neutral point currents in a 400-kV-network," *2014 Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ)*, Rakvere, 2014, pp. 65-68. doi: 10.1109/PQ.2014.6866785..
- [8] C. M. Liu, L. G. Liu and R. Pirjola, "Geomagnetically Induced Currents in the High-Voltage Power Grid in China," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, no. 4, pp. 2368-2374, October 2009. doi: 10.1109/TPWRD.2009.2028490.
- [9] T. S. Molinski, "Why utilities respect geomagnetically incued currents", *Jornal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Phisycs*, vol. 64, no. 16, pp. 1765-1778, November 2002. doi:10.1016/S1364-6826(02)00126-8.
- [10] R. Gigis, K. Vedante, and K. Gramm, "Effects of geomagnetically induced currents on power transformers and power systems", *CIGRE 2012*, A2-304, pp. 1-8.
- [11] V. I. Kostić, N. B. Raičević, "A study on high-voltage substation ground grid integrity measurement", *Electric Power Systems Research Journal*, vol. 131, pp. 31-40, ISSN: 0378-7796, February 2016. doi:10.1016/j.epsr.2015.10.006.
- [12] V. Kostić, N. Raičević, J. Mrvić, D. Kovačević, "Testing of above ground permanent connections in high-voltage power facility grounding systems", *Full Papers Proceeding of International Conference "Power Plants 2016"*, pp. 239-246, November 2016, Zlatibor Serbia, ISBN: 978-86-7877-024-1.
- [13] J. G. Kappenman, S. R. Norr, G. A. Sweezy, D. L. Carlson, V. D. Albertson, J. E. Harder, B. L. Damsky, "GIC mitigation: a neutral blocking/bypass device to prevent the flow of GIC in power systems," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 6, no. 3, pp. 1271-1281, July 1991. doi: 10.1109/61.85876.

SUMMARY

OVERVIEW OF THE PROBLEMS RELATED TO THE IMPACT OF GEOMAGNETIC INDUCED CURRENT

Geomagnetically induced currents (GICs) can cause a range of adverse consequences related to the normal functioning of a power system, e.g. the saturation of power transformers, unusual flows of active and reactive power, voltage fluctuations, the appearance of the third harmonic, a shift of power frequency and erroneous operation of the protection relay. In the worst case, the above mentioned malfunctions may result in thermal destruction of the power transformers and heavy damage of parts or even the entire national power system. The same effect is particularly pronounced in high-voltage power facilities, whose neutral is effectively grounded, as is the case with substations rated voltage of 110 kV (owned by PE EPS), or 220 kV and 400 kV (owned by Joint Stock Company EMS) . This paper gives a short overview of the problems related to the presence of GIC and possible preventive actions aimed at countering the potential adverse consequences caused by GIC.

Key words: *geomagnetically induced currents, power system*