

Pregled problema vezanih za kvar metalnog otpornika u neutralnoj tački energetskog transformatora

Vojin Kostić¹

¹Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Koste Glavinića 8a,
11000 Beograd, Srbija
vojin@jeent.org

Kratak sadržaj: U slučaju prekida strujnog kola metalnog otpornika za ograničenje struje zemljospoja u neutralnoj tački energetskog transformatora, srednjenaponska mreža predviđena za pogon sa uzemljenjem preko niskoomske impedanse, prelazi u rad sa izolovanom neutralnom tačkom za nedefinisan vremenski period. Navedeno za posledicu može imati pojavu vrlo visokih intermitentnih prenapona i njima uzrokovanih višestrukih kvarova u mreži. Takođe, u kompletno kablovskim mrežama, može doći do samogašenja struja zemljospoja kod kvarova na kablovima. Na taj način, u mreži se stvaraju mesta sa oslabljenom izolacijom koja mogu da budu uzrok nastanka višestrukih kvarova. U skladu sa navedenim, u radu se ukazuje na neophodnost i afirmaciju aktuelnih rešenja kontinualnog nadzora metalnog otpornika. Takođe, predloženo je i pouzdano tehničko rešenje u slučaju kvara, odnosno radova na sanaciji niskoomske impedanse u neutralnoj tački energetskog transformatora.

Ključne reči: srednjenaponska mreža, metalni otpornik, uzemljenje, nadzor kontinuiteta, zaštita od zemljospoja

1. Uvod

Niskoomsko uzemljenje neutralne tačke srednjenaponske mreže može biti izvedeno preko otpornika, metalnog ili elektrolitskog, ili preko reaktanse. Osnovne prednosti srednjenaponskih mreža uzemljenih preko niskoomske impedanse, koje se reflektuju u smanjenju verovatnoće nastanka dvostrukog zemljospoja (intermitentni prenaponi nisu mogući), jednostavnoj i pouzdanoj zaštiti (lakša detekcija kvara naročito u gradskoj kablovskoj mreži), jednostavnom pogonu i održavanju, gube se prilikom prekida strujnog kola

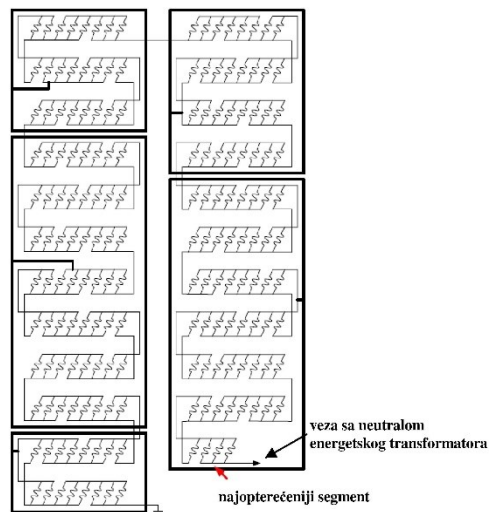
metalnog otpornika. Naime, u tom slučaju srednjenaponska mreža predviđena i projektovana za rad u pogonu sa uzemljenjem preko niskoomske impedanse prelazi u pogon sa izolovanom neutralnom tačkom.

Kao i svaki element u elektroenergetskom objektu tako i metalni otpornik ima svoj eksploatacioni vek trajanja. Postoje različiti uzroci mehaničkog oštećenja, tačnije kvara metalnog otpornika [1] – [2] od kojih su neki izazvani atmosferskim pražnjenjem, olujnim vetrom, zemljotresom, preopterećenjem ili dužinom eksploatacije. Drugi uzroci opet mogu biti: ekstremne promene temperature, vibracije, aerozagađenje koje korozivno deluje na segmentne jedinice otpornika, korozija određenog intenziteta koja uvek postoji, defekti nastali u procesu proizvodnje odnosno prilikom montaže. Sa druge strane, ukoliko je metalni otpornik predviđen za spoljnu montažu, elementi istog (uvodni izolatori, spojnice, provodnici strujnog kola) izloženi su i ekstremnim vrstama sezonskih uticaja (kiša nošena vetrom, sneg i grad) [3].

Cilj ovoga rada je da, teorijskim razmatranjem problema, ukaže na probleme koji mogu nastati kao posledica kvara metalnog otpornika, te da predstavi aktuelna rešenja kojima se na kontrolisan način neželjeni efekti mogu predupređiti, bez težih posledica po normalno funkcionisanje sistema.

2. Prekid strujnog kola metalnog otpornika – potencijalni problemi

Na slici 1 prikazan je dijagram povezivanja segmenata metalnog otpornika [4].



Slika 1 [4] - Dijagram povezivanja segmenata metalnog otpornika

Kao što se može videti sa slike 1 sam metalni otpornik sastoji se iz velikog broja segmenata koji su međusobno povezani tačkastim ili trakastim (podužnim) varom. Generalno, varovi predstavljaju oslabljena mesta prema koroziji. Prekid jednog od segmenata rezultuje prekidom strujnog kola metalnog otpornika, odnosno dovodi do kvara istog. Prekid strujnog kola, odnosno kvar metalnog otpornika, ima za posledicu da sistem iz režima rada sa uzemljenjem preko niskoomske impedanse, pređe u režim rada sa izolovanom neutralnom tačkom. Podešavanje relejnih zaštita, razlikuje za različite načine uzemljavanja neutralne tačke. Ukoliko u transformatorskoj stanici ne postoje merni naponski transformatori sa drugim jezgrom, predviđeni za merenje napona na otvorenom trouglu, sistem može biti u pogonu sa jednofaznim zemljospojem nedopustivo dug vremenski period kako sa aspekta bezbednosti tako i sa aspekta naprezanja izolacije. Kako relejna zaštita nije registrovala zemljospoj u mreži, isti može prerasti u dvofazni odnosno trofazni kvar. Važno je istaći da su, merni naponski transformatori sa drugim jezgrom vezanim u otvoreni trougao, ugrađeni u transformatorskim stanicama koje su prvobitno radile u mreži sa izolovanom neutralnom tačkom, ali su zbog prekoračenja propisanih graničnih vrednosti kapacitivne struje kvara, saglasno [5], prešle u pogon sa uzemljenjem preko niskoomske impedanse. Kod transformatorskih stanica, koje su u skladu sa odgovarajućom projektnom dokumentacijom predviđene za rad u mreži uzemljenoj preko niskoomske impedanse, postoji opravdana bojazan da ugradnja mernih naponskih transformatora sa dva jezgra nije ni predviđena. Navedeno se posebno odnosi na novoizgrađene transformatorske stanice, kao i transformatorske stanice 110/35 kV koje su tokom poslednjih nekoliko godina preuzete od stane JP EPS od kompanije EMS a.d.

U skladu sa gore navedenim bitno je istaći i sledeće. Poslednjih decenija, zbog ekonomske cene bakra na crnom tržištu, svedoci smo sve učestalijih krađa zemljovoda izrađenih od bakarnih užadi u transformatorskim stanicama iz sastava elektroenergetskog sistema Srbije. Stoga, i pored činjenice da je sa metalnim otpornikom sve u redu, prekid strujnog kola metalnog otpornika može biti posledica ne samo krađe (fizičkog uklanjanja), već i mehaničkog oštećenja (prekida žica bakarnog užeta) zemljovoda strujnog kola metalnog otpornika. Kako se periodična provera sistema uzemljenja vrši u intervalima od oko 5 godina, može se desiti da detekcija navedenog defekta u tom intervalu ne bude izvršena.

Za razliku od prekida strujnog kola metalnog otpornika, postoje i slučajevi prespajanja strujnog kola u procesu proizvodnje ili pri redovnom održavanju metalnog otpornika. Sa aspekta reagovanja relejnih zaštita, navedni incident, neće dovesti do nemogućnosti reagovanja istih, pošto strujno kolo nije u prekidu, ali postoji bojazan da naponi dodira i naponi koraka, uzrokovani proticanjem velike struje kvara, mogu biti iznad propisanih vrednosti.

I jedna i druga situacija, sa aspekta normalnog funkcionisanja sistema su neželjene, a posledice se mogu odraziti kako na funkcionalni, tako i na sigurnosni aspekt.

Pogonska iskustva u jednoj kompaniji za distribuciju električne energije [6] ukazala su na dva glavna uzroka prekida strujnog kola metalnog otpornika. Prvi uzrok je prekid tačkastog vara koji je posledica naglih promena temperature, odnosno termičkog naprezanja prilikom proticanja struje zemljospoja. Drugi uzrok je prekid trakastog vara izazvanog mehaničkim stresom i velikim temperaturnim oscilacijama koje u kombinaciji sa vlagom ubrzavaju proces korozije. S tim u vezi, jedan od problema ogleda se i u različitim debljinama vara koji se kreće u opsegu od 6.4 mm do 1.6 mm.

U slučaju prekida strujnog kola metalnog otpornika, javlja se potencijalna opasnost da mreža može raditi kao izolovana do narednog planiranog remonta, kada se istovremeno ispituje vrednost električne otpornosti samog otpornika (opciono, vremenski period od oko 2 godine). Konkretnije, zemljospoj koji potencijalno može da traje danima, degradira izolaciju tako da svaki sledeći ozbiljniji događaj može dovesti do teže havarije, često ne utvrdivši njen prethodni uzrok. Izolacija je pre svega ugrožena na potencijalno slabim mestima kao što su kablovske spojnice, kablovske završnice i sl. Rezimirajući prethodno navedeno, mogući problemi pri zemljospojevima u mreži, koja je zbog prekida strujnog kola metalnog otpornika prešla u rad sa izolovanom neutralnom tačkom ogledaju se u sledećem [7]:

- ugrađeni naponski transformatori za uzemljenu mrežu nazivnog napona napr. 35 kV su faktora napona 1.2 za trajan rad odnosno 1.5 za trajanje zemljospoja 30 s. U slučaju pogona sa izolovanom neutralnom tačkom, faktor napona treba da je 1.9 za trajanje zemljospoja do 8 h;
- da bi se izbeglo trajanje ferorezonantnih pojava u pogonu sa izolovanom neutralnom tačkom, merni naponski transformatori treba da imaju jedan opterećen sekundarni namotaj spregnut u trougao što se ne može postići kod svih ugrađenih mernih naponskih transformatora (pojedini ugrađeni naponski transformatori nemaju drugi namotaj);
- sa druge strane, nazivni napon ugrađenih odvodnika prenapona u fazama mreže pogonskog napona napr. 35 kV, je $U_n=37$ kV. Prilikom zemljospoja u izolovanoj mreži fazni napon dostiže vrednost složenog napona, te postoji opravdana bojazan da odvodnici prenapona, ovako definisanih karakteristika, prilikom prorade neće biti u stanju da prekinu prateću struju odvođenja, čime se stvara potencijalna opasnost da dođe do razaranja istih, odnosno, nastanka dvostrukog zemljospoja. Za rad mreže sa izolovanom neutralnom tačkom, nazivni naponi odvodnika prenapona trebalo bi da budu istih karakteristika kao i odvodnika između faza.

Navedeno ukazuje da je metalni otpornik u neutralnoj tački energetskog transformatora potrebno kontinualno nadzirati, odnosno primentiti neka druga tehnička rešenja, kojima bi se zemljospoj uspešno isključio i pored prekida strujnog kola metalnog otpornika.

3. Kontinualni nadzor metalnog otpornika – implementacija

Posledice, koje donosi rad u mreži sa izolovanom neutralnom tačkom, mogu se izbeći ugradnjom sistema za kontinualni nadzor metalnog otpornika. Složeni zahtevi koji se postavljaju pred sistem za nadzor opisani su u [8].

Jedno od rešenja [9] zasniva se na sekvencijalnom algoritmu koji je implementiran u multifunkcionalni zaštitni rele tipa FPC525 proizvodnje Iskra Sistemi d.d. Naime, algoritam bazira na činjenici da u normalnom operativnom stanju, kao posledica nesimetričnih struja opterećenja, struja niskog nivoa protiče kroz metalni otpornik u neutralnoj tački. Sa druge strane, budući da proticanje struje kvara rezultuje pojavom napona i struje kroz metalni otpornik, algoritam preračunava vrednost električnog otpora i poredi je sa nazivnom vrednošću. Takođe, u slučaju kada je električna otpornost metalnog otpornika značajno redukovana (prespajanje strujnog kola), što izaziva protok velike struje kvara, algoritam registruje kvar metalnog otpornika pre reagovanja odgovarajuće zemljospojne zaštite.

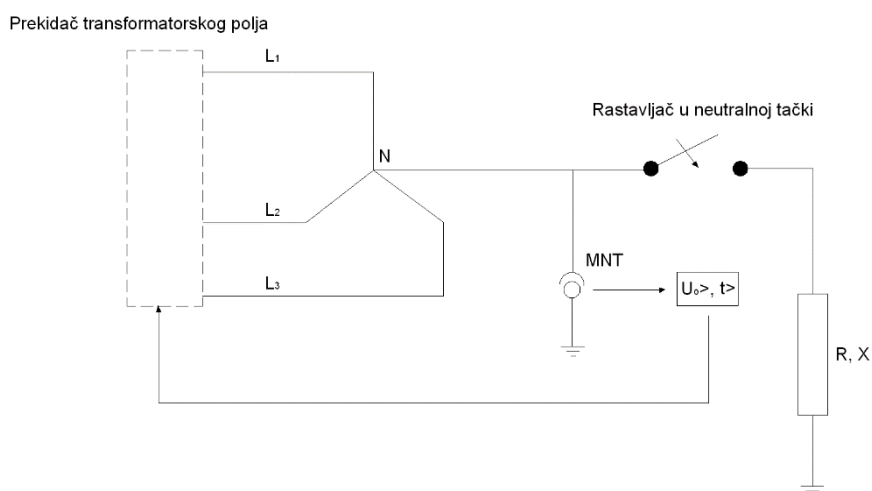
Budući da zbog stepena iskoristivosti, energetske transformatori rade na ivici zasićenja, struja magnećenja nije sinusoidnog oblika i sadrži harmonike, od kojih je treći harmonik dominantno izražen i kao nulta komponenta teče kroz metalni otpornik. Kako se struja magnećenja preslikava na pad napona na metalnom otporniku, jasno je i da pad napona na metalnom otporniku nema sinusoidan oblik. Upravo na ovoj činjenici zasniva se rešenje [6], koje bazira na merenjima trećeg harmonika struje i napona na metalnom otporniku. Odnos izmerenih vrednosti napona i struje pruža informaciju o električnoj otpornosti metalnog otpornika. Izmereni signali se uvode u elektronsko kolo za dalju obradu signala, koje ima dva izlaza. Prvi izlaz daje nalog za isključenje prekidača u transformatorskom polju, dok drugi izlaz daje informaciju o vrednosti električne otpornosti metalnog otpornika. Potencijalni nedostatak navedenog rešenja ogleda se u potrebi za ugradnjom mernih strujnih transformatora visoke klase tačnosti korišćenih za merenje struje trećeg harmonika (struja reda 100 mA), kao i ceni propusnih filtra trećeg harmonika.

Potencijalni problemi šeme koja se bazira na merenju struje trećeg harmonika, vezani za filtriranje i nisku rezoluciju mernih strujnih transformatora, mogu biti prevaziđeni paralelnim povezivanjem pomoćne baterije, preko odgovarajućih otpornika u strujno kolo metalnog otpornika. Naime, pražnjenje pomoćne baterije služi za injektiranje jednosmerne struje kroz metalni otpornik [6]. Uprkos činjenici da se jednosmerni napon lakše filtrira i da je navedena blok šema ekonomičnija od šeme bazirane na procesiranju trećeg harmonika struje i napona, potencijalno operativni problem može biti vezan za geomagnetski indukovane (kvazi - DC) struje [10]. Naime, geomagnetski indukovane struje se uvek superponiraju sa prisutnom jednosmernom strujom, što može dovesti do pogrešnog naloga za isključenje, ili eventualno zakasnelog reagovanja na prekid strujnog kola metalnog otpornika.

4. Pouzdano tehničko rešenje za uspešno isključenje zemljospoja prilikom kvara niskoomske impedanse u neutralnoj tački energetskog transformatora

Iako je rad fokusiran na kvar metalnog otpornika, potencijalno tehničko rešenje [11] je pouzdano i može se primeniti i u slučaju uzemljenja neutralne tačke preko vodenog otpornika ili preko reaktanse. Preciznije, navedeno tehničko rešenje može se implementirati u slučaju kvara ili radova na sanaciji nekog od navedenih elemenata.

U transformatorskim stanicama u kojima ne postoje, odnosno nije predviđena ugradnja mernih naponskih transformatora sa dva jezgra (drugo jezgro sa namotajem za vezivanje u otvoreni trougao), eliminacija zemljospoja, prilikom kvara niskoomske impedanse u neutralnoj tački, odnosno radova na sanaciji iste, može se uspešno sprovesti instalacijom dodatnog mernog naponskog transformatora u neutralnoj tački energetskog transformatora (slika 2).



Slika 2 - Šema povezivanja dodatnog mernog naponskog transformatora u neutralnoj tački energetskog transformatora

Primarni kraj mernog naponskog transformatora (MNT) se povezuje sa neutralnom tačkom, dok se sa sekundara signali uvode u kompleksan zaštitni uređaj. Kompleksni algoritam delovanja zaštitnog uređaja na prekidač transformatorskog polja podešen je na 40 – 50 V sa vremenskim zatezanjem podešenim na 0.5–1 s. Na krajeve sekundara MNT vezuje se otpornik, da bi se izbegli eventualni ferorezonantni prenaponi kod manipulacija kada mreža radi bez otpornika.

5. Zaključna razmatranja

U slučaju prekida strujnog kola metalnog otpornika za ograničenje struje zemljospoja, mreža prelazi u pogon sa izolovanom neutralnom tačkom nedefinisan vremenski period. Relativno najbolje rešenje predstavlja sistem za kontinualni nadzor metalnog otpornika. Obzirom da za kontinualni nadzor metalnog otpornika, koliko je autoru rada poznato, ne postoji univerzalno tehničko rešenje čija je implementacija naišla na širu primenu, do razvoja sopstvenog sistema potrebno je pribegavati alternativnim rešenjima detekcije i prevencije kvara.

Prilikom kvara niskoomske impedanse u neutralnoj tački energetskog transformatora, iz bezbednosnih razloga, srednjenaponska mreža treba da radi kao izolovana, ali sa signalizacijom zemljospoja kako bi se registrovani kvar blagovremeno isključio. Ako se u postrojenju ne registruje nulta komponenta napona, što je slučaj kada ne postoje merni naponski transformatori sa dva sekundara, najjednostavnije je instalirati merni naponski transformator vezan paralelno sa otpornikom sa čijeg bi se sekundara dobio potrebni signal. Alternativno, može se izvršiti i direktno uzemljavanje neutralne tačke uz prepodešavanje zaštitnih uređaja, ali navedeno rešenje treba izbegavati zbog mogućih opasnih napona dodira i napona koraka kod zemljospojeva u tako uzemljenoj mreži.

Zahvalnica

Posebnu zahvalnost autor duguje JP "Elektroprivreda Srbije", jer je na osnovu ugovora sa Elektrotehničkim institutom „Nikola Tesla” finansirala izradu studije pod nazivom „Metodologija za uzemljavanje neutralne tačke srednjenaponske mreže”. Rad na pomenutoj studiji i rešavanje odgovarajućih problema bio je i motiv za ovaj rad.

Aktivnosti u okviru rada povezane su sa naučno-istraživačkim projektom TR33020 Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

Naposletku, ali ne i na kraju, autor rada veliku zahvalnost duguje prof. dr Jovanu Nahmanu, mr Jovanu Joviću i dr Žarku Jandi na konstruktivnim savetima i sugestijama.

Literatura

- [1] D. Selkirk, M. Savostianik and K. Crawford, "The Dangers of Grounding Resistor Failure," in *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 16, no. 5, pp. 53-58, Sept.-Oct. 2010. doi: 10.1109/MIAS.2010.937437.
- [2] D. Selkirk, M. Savostianik and K. Crawford, "Why neutral-grounding resistors need continuous monitoring," *2008 55th IEEE Petroleum and Chemical Industry Technical Conference*, Cincinnati, OH, 2008, pp. 1-7. doi: 10.1109/PCICON.2008.4663977.
- [3] N. Simić, J. Mrvić, "Kvar metalnog otpornika za uzemljenje neutralne tačke mreže 35 kV", *Zbornik radova Elektrotehničkog instituta "Nikola Tesla"*, Beograd, Knjiga 21, str. 241-246, 2015, ISSN: 0350-8528.
- [4] W. Labos, A. Mannarino, G. Drobnjak, S. Ihara and J. Skliutas, "A possible mechanism for neutral grounding resistor failures," *IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005*, 2005, pp. 1149-1154 Vol. 2. doi: 10.1109/PES.2005.1489670.
- [5] Tehnička preporuka br. 6 ED Srbije: „Uzemljenje neutralnih tačaka u elektodistributivnim mrežama 110 kV, 35 kV, 20 kV, 10 kV i 0.4 kV”, IV izdanje, decembar 1998.
- [6] M. T. Al-Hajri, "Neutral ground resistor monitoring schemes," *Conference Record of the 2004 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, 2004, pp. 388-393. doi: 10.1109/ELINSL.2004.1380608.
- [7] Tehničko uputstvo o tretmanu neutralne tačke 35 kV u TS 110/35 kV "Elektroistok"-a za vreme radova na impedansi za uzemljenje, TU-EX-02, EPS-Beograd, JP "Elektroistok", Februar 1993.
- [8] G. E. Paulson, "Monitoring neutral-grounding resistors," *Conference Record of 1999 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference (Cat. No.99CH36338)*, Seattle, WA, USA, 1999, pp. 238-241. doi: 10.1109/PAPCON.1999.779372.
- [9] Z. Toroš, T. Kastelic, S. Maljavac and P. Kastelic, "Neutral grounding resistor failure detection verification," *22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013)*, Stockholm, 2013, pp. 1-3. doi: 10.1049/cp.2013.1109.
- [10] V. I. Kostić, „Pregled problema vezanih za uticaj geomagnetski indukovane struje”, *Tehnika* 66 (2017) 2, str. 243-247. doi: 10.5937/tehnika1702243K.
- [11] Studija: „Metodologija za uzemljavanje neutralne tačke srednjenaponske mreže”, naručilac JP „Elektroprivreda Srbije”, obrađivač Elektrotehnički institut „Nikola Tesla” Beograd, decembar 2015. godine.

Abstract: In case of a neutral-grounding resistor failure, the low impedance grounded network become ungrounded. This can lead to a very high level of transient overvoltages due to intermittent arcing faults. Also, in the dominant cable networks, there is a possibility of earth fault current extinction. In this way, places with weakened insulation, which may be the cause of multiple failures, are created in the network. Accordingly, the paper points out the necessity and affirmation of existing solutions for continuous monitoring of neutral grounding resistors, also proposing a universal technical solution.

Keywords: medium voltage network, metal resistor, grounding, integrity monitoring, ground fault protection.

Review of the Problems Related to Failure of Metal Resistor in Power Transformer Neutral

Vojin Kostić

Rad primljen u uredništvo: 17.10.2017. godine.

Rad prihvaćen: 15.11.2017. godine.

