Broj rada: I3-12
DOI:10.46793/CIRED2026.I3-12_174

ANALIZA UPOTREBE ZAJEDNIČKOG OTPORNIKA ZA UZEMLJENJE NEUTRALNE TAČKE ZA ENERGETSKE TRANSFORMATORE KOJI NAPAJAJU ODVOJENE DISTRIBUTIVNE MREŽE

ANALYSIS OF THE USE OF A SHARED NEUTRAL GROUNDING RESISTOR FOR POWER TRANSFORMERS SUPPLYING SEPARATE DISTRIBUTION NETWORKS

Uroš OGNJENOVIĆ, Crnogorski elektrodistributivni sistem, Crna Gora*
Andrija VUJOVIĆ, Crnogorski elektrodistributivni sistem, Crna Gora
Ivan MUMIN, Crnogorski elektrodistributivni sistem, Crna Gora
Mihailo NIKOLIĆ, Crnogorski elektrodistributivni sistem, Crna Gora

KRATAK SADRŽAJ

U ranim fazama razvoja distributivne mreže, trafostanica može biti opremljena sa dva energetska transformatora, a samo jednim otpornikom za uzemljenje neutralne tačke. U takvim konfiguracijama, jedan transformator napaja kablovsku mrežu, dok drugi napaja nadzemnu mrežu. Kako se mreža razvija, porast struje zemljospoja u nadzemnoj mreži nameće pitanje da li je potrebno ugraditi dodatni otpornik za uzemljenje neutralne tačke ili oba transformatora mogu bezbjedno nastaviti rad sa zajedničkim otpornikom za uzemljenje neutralne tačke. U radu se analizira opravdanost upotrebe zajedničkog otpornika za uzemljenje neutralne tačke za dva transformatora koji napajaju odvojene distributivne mreže. Analiza je sprovedena sa aspekta koordinacije relejne zaštite, bezbjednosti i ekonomskih efekata.

Ključne reči: transformatori, uzemljenje, otpornik

ABSTRACT

In the early stages of distribution network development, a substation may be equipped with two power transformers while only one neutral grounding resistor is installed. In such configurations, one transformer supplies a cable network and the other supplies an overhead network. As the network expands, the increase of earth fault current in the overhead network raises the question of whether another neutral grounding resistor must be installed, or whether both transformers can continue to operate safely with a shared neutral grounding resistor. This paper analyzes the feasibility of a shared neutral grounding resistor between two transformers supplying separate distribution networks. The analysis is performed from the perspectives of relay protection coordination, safety, and economic impact.

Keywords: transformers, grounding, resistor

* Uroš Ognjenović uros.ognjenovic@cedis.me; Andrija Vujović andrija.vujovic@cedis.me; Ivan Mumin ivan.mumin@cedis.me; Mihailo Nikolić mihailo.nikolic@cedis.me

UVOD

Transformatorske stanice su često opremljenje sa dva energetska transformatora radi povećanja pouzdanosti sistema. U distributivnom sistemu Crne Gore standardna praksa je da mreže sa većinski nadzemnim vodovima rade sa izolovanom neutralnom tačkom, zbog relativno malih kapacitivnih struja zemljospoja. Sa povećanjem udjela kablovskih vodova rastu kapacitivne struje zemljospoja, pa se u takvim mrežama uglavnom primjenjuje uzemljenje neutralne tačke preko otpornika, radi njihovog ograničenja i obezbjeđenja pouzdanog rada relejne zaštite.

Razmatrani primjer u ovom radu zasnovan je na stvarnoj konfiguraciji distributivne mreže Mojkovca, u kojoj jedan transformator napaja nadzemnu, a drugi kablovsku mrežu. U srednjenaponskim distributivnim sistemima potreba za uzemljenjem neutralne tačke preko otpornika javlja se kada kapacitivna struja zemljospojma dostigne vrijednosti koje mogu ugroziti pouzdan rad mreže, otežati gašenje električnog luka ili narušiti selektivnost relejne zaštite. Ove vrijednost nijesu isključivo određene naponskim nivoom, već zavise od konfiguracije mreže, ukupne kapacitivnosti i udjela kablovskih vodova. U distributivnom sistemu Crne Gore, razvojem mreže, izgradnjom novih vodova (nadzemnih i kablovskih), može se javiti potreba za uzemljenjem neutralne tačke i drugog transformatora i to kada struja zemljospoja premaši vrijednost od 10 A za 35 kV mrežu i 20 A za 10 kV mrežu [1]. Tada se neutralna tačka uzemljava preko niskoomskog otpornika, čime se struja zemljospoja ograničava na 150 A, 300 A ili 1000 A [2]. Posljednja varijanta se koristi u čisto kablovskim mrežama sa ciljem lakšeg pronalaska mjesta kvara [3]. Postavlja se pitanje da li je potrebno nabaviti i ugraditi još jedan otpornik za uzemljenje neutralne tačke, zajedno sa svom pripadajućom opremom, ili je zvjezdište oba transformatora moguće povezati na jedan zajednički, postojeći otpornik. Ova dva režima rada je potrebno analizirati sa aspekta ponašanja struja zemljospoja i koordinacije relejne zaštite, cirkulacionih struja, bezbjednosnog i finansijskog aspekta.

Cilj rada je analiza mogućnosti primjene zajedničkog otpronika za uzemljenje neutralnih tački energetskih transformatora koji napajaju odvojene distributivne mreže, uz sagledavanje tehničkih organičenja, pogonskih karakteristika, bezbjednosti i uticaja na koordinaciju relejne zaštite. Poseban akcenat je stavljen na bezbjedonosni aspekt, odnosno na identifikaciju režima rada u kojima ovako rješenje može biti bezbjedno primijenjeno bez narušavanja pouzdanosti napajanja i selektivnosti zaštite. Analiza je sprovedena na osnovu realnog scenarija, odnosno iz konkretnog primjera u distributivnoj mreži Crne Gore. Koordinacija relejne zaštite je u radu posmatrana kroz očuvanje selektivnosti zaštite, ograničenje struje zemljospoja na projektovane vrijednosti i obezbjeđenje pouzdanog djelovanja zaštitnih uređaja u svim analiziranim pogonskim režimima. Rad je organizovan na način da je u prvom poglavlju odrađen proračun zemljospoja na konkretnom primjeru, nakon čega su u sljedećim poglavljima posmatrani uslovi paralelnog rada, tehnički aspekti primjene zajedničkog otpornika u različitim pogonskim režimima, kao i bezbjedonosni i ekonomski aspekt. Na kraju rada dati su zaključci i preporuke za praktičnu primjenu analiziranog rješenja.

1 PRORAČUN ZEMLJOSPOJA NA SABIRNICAMA U ODVOJENOM I PARALELNOM RADU TRANSFORMATORA ZA TS 220/110/35 KV MOJKOVAC

Za proračun zemljospoja na sabirnicama u odvojenom i paralelnom radu transformatora odabrana je transformatorska stanica (TS) 220/110/35 kV Mojkovac, koja predstavlja tačku razgraničenja Operatora prenosnog sistema (TSO) i Operatora distributivnog sistema (DSO) u

Crnoj Gori[1]. Ona je opremljena sa dva tronamotajna transformatora čije su osnovne karakteristike prikazane u Tabeli Tabela I.

Tabela I – Tehničke karakteristike transformatora

Oznaka	**T3**	**T1**
Snaga	20 MVA	20 MVA
Sprega	YNyn0d5	YNyn0d5
Prenosni odnos	110/36.5/10.5 kV	110/36.5/10.5 kV
Relativni napon kratkog spoja	10.82%	10.4%

U radu su prikazane samo tehničke karakteristike transformatora od značaja za sprovedenu analizu. Detaljni parametri transformatora, kao što su naponi kratkog spoja između svih parova namotaja, nijesu prikazani jer nijesu korišćeni u analizama u ovom radu.

Na 35 kV strani u pogonu je dvostruki sistem sabirnica sa spojnim poljem opremljenim prekidačom snage. U normalnom pogonu transformator T3 je priključen na sistem sabirnica 1 (SS1), a transformator T1 na sistem sabirnica 2 (SS2), dok je spoljno polje isključeno. Trenutno u transformatorskoj stanici postoji samo jedan otpornik za uzemljenje neutralne tačke čija je otpornost 70 oma i na njega je povezan T3, koji napaja nadzemnu mrežu ukupne dužine 69.08 km i kablovsku mrežu ukupne dužine 5.77 km. Crnogorski elektrodistributivni sistem (CEDIS) kao DSO je otkupio infrastrukturu na srednjenaponskoj strani transformatorske stanice, što uključuje i otpornik za uzemljenje neutralne tačke i pripadajuću opremu tako da sve buduće investicije koje se odnose na uzemljenje neutralne tačke padaju na njegov teret.

Kako detaljni podaci o impedansama transformatora nijesu bili dostupni, u analizi su korišćene aproksimativne vrijednosti impedansi prikazane u Tabeli Tabela II, koje su dovoljne za razmatranje uticaja zajedničkog otpornika na analizirane pogonske režime.

Tabela II – Vrijednosti impedansi preaznog hoda i kratkog spoja

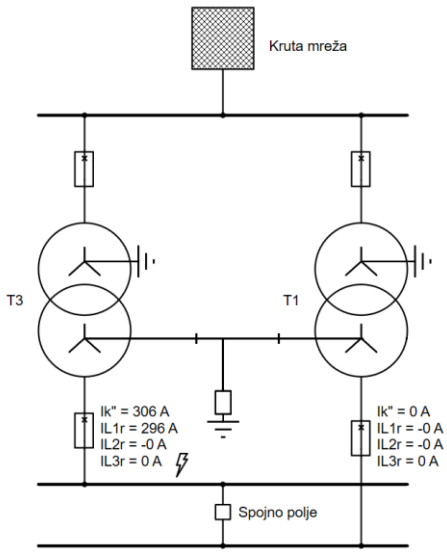
Parametar	**Objašnjenje**	**Vrijednost [Ohm]**
Zabnl	Impedansa praznog hoda mjerena sa strane primara	150
Zbanl	Impedansa praznog hoda mjerena sa strane sekundara	45
Zabsc	Impedansa kratkog spoja mjerena sa strane primara	120

[1] Tačka razgraničenja su ustvari namotaji transformatora tako da „sve od visokonaponskog namotaja naviše" pripada TSO-u, a sve „od srednjenaponskog namotaja naniže" pripada DSO-u. Sami transformator je u vlasništvu TSO-a.

Radi jednostavnijeg proračuna, oba transformatora su modelovana kao dvonamotajni transformatori sprege YNyn0.

1.1 Odvojeni rad transformatora

Uklopno stanje u kojem su oba transformatora povezana na jedan zajednički otpornik za uzemljenje neutralne tačke i rezultati proračuna jednopolnog kratkog spoja na SS1 prikazani su na Slici Slika 1. Pritom je spojno polje isključeno, odnosno transformatori nijesu u paralelnom radu.



Slika 1 – Zemljospoj pri odvojenom radu transformatora

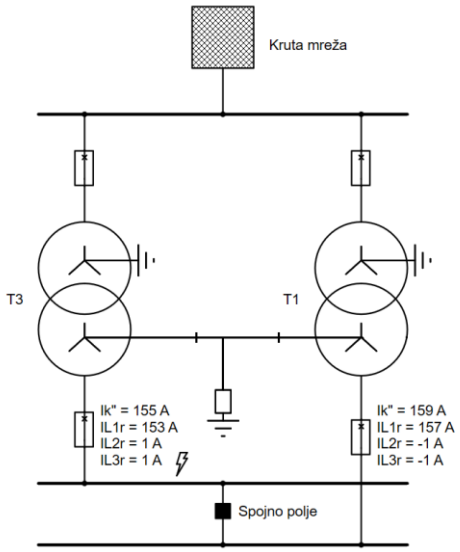
Veličine prikazane na Slici Slika 1 su:

- Ik" – efektivna vrijednosti naizmjenične komponente ukupne struje kratkog spoja u subtranzijentnom periodu [A],
- IL1r – realna komponenta struje kratkog spoja faze R [A],
- IL2r – realna komponenta struje kratkog spoja faze S [A] i
- IL3r – realna komponenta struje kratkog spoja faze T [A].

Samo T3 napaja mjesto kvara preko zajedničkog otpornika sa strujom kvara od 306 A, što je očekivano obzirom da otpornik za uzemljenje neutralne tačke otpornosti 70 oma ograničava struju zemljospoja na 300 A.

1.2 Paralelni rad transformatora

Uklopno stanje u kojem su oba transformatora povezana na jedan zajednički otpornik za uzemljenje neutralne tačke i rezultati proračuna jednopolnog kratkog spoja na SS1 prikazani su na Slici Slika 2. Pritom je spojno polje uključeno, odnosno transformatori su u paralelnom radu.



Slika 2 – Zemljospoj pri paralelnom radu transformatora

Oba transformatora napajaju mjesto kvara, s tim što T1 više doprinosi struji kvara usljed manjeg relativnog napona kratkog spoja. Pored toga, u fazama S i T javljaju se cirkulacione struje u iznosu od 1 A. Ove struje se povećavaju sa povećanjem razlike između relativnog napona kratkog spoja dva transformatora (različiti proizvođači, snage transformatore, itd. rezultiraju u većim cirkulacionim strujama).

Da bi paralelan rad transformatora bio moguć, potrebno je da budu ispunjeni osnovni tehnički uslovi [4], [5]:

- isti prenosni odnos,
- ista vektorska grupa i fazni pomak,
- isti redosljed faza,
- približno jednake vrijednosti napona kratkog spoja i
- odnos nazivnih snaga ne smije biti veći od 3:1.

U analiziranom slučaju navedeni uslovi su ispunjeni, pri čemu se relativni napon kratkog spoja transformatora međusobno ne razlikuju više od 10% od aritmetičke sredine napona kratkog spoja svih transformatora.

2 ANALIZA CIRKULACIONIH STRUJA U REŽIMU PARALELNOG RADA TRANSFORMATORA

Kružna ili cirkulaciona struja predstavlja struju koja teče između paralelno povezanih transformatora, a ne prema potrošačima. Ona ne učestvuje u prenosu korisne snage, već cirkuliše kroz namotaje transformatora i njihove impedanse, stvarajući dodatne gubitke i zagrijavanje. U idealnom slučaju, kada su transformatori potpuno identični i rade na istom regulacionom položaju, cirkulaciona struja ne postoji ili je zanemarljivo mala.

Posebna karakteristika cirkulacione struje je da je ona uglavnom reaktivna, jer je impedansa energetskog transformatora dominantno induktivna. Zbog toga kružna struja zaostaje približno 90° za naponom koji ju je izazvao. Njena vrijednost ne zavisi direktno od opterećenja potrošača, već prvenstveno od razlike napona koje proizvode paralelno povezani transformatori i od ukupne impedanse petlje kroz koju struja cirkuliše.

Prisustvo cirkulacionih struja dovodi do povećanja gubitaka u bakru u namotajima, dodatnog zagrijavanja transformatora i neravnomjerne raspodjele opterećenja. Jedan transformator može biti preopterećen dok drugi istovremeno radi sa manjim opterećenjem. To ubrzava starenje izolacije, povećava termička naprezanja i smanjuje ukupnu efikasnost postrojenja. U ekstremnim slučajevima velike cirkulacione struje mogu izazvati djelovanje zaštita ili čak oštećenje transformatora i regulacionih sklopki.

3 ANALIZA BEZBJEDONOSNOG ASPEKTA PRIMJENE ZAJEDNIČKOG OTPORNIKA

Osnovni bezbjedonosni zahtjev pri primjeni zajedničkog otpornika je da njegova upotreba ne naruši pouzdan i selektivan rad relejne zaštite, bez obzira na pogonski režim transformatora. Posebno je značajno da vrijednost struje zemljospoja ostane u granicama predviđenim za pravilno djelovanje zaštitnih uređaja, kao i da ne dođe do neželjenog djelovanja zaštite usljed promjene raspodjele struja između transformatora i pripadajuće mreže. Zbog toga je prilikom razmatranja mogućnosti primjene zajedničkog otpornika potrebno i analizirati da li u predviđenim pogonskim režimima ostaju ispunjeni uslovi za pouzdano otkrivanje i isključivanje zemljospoja.

Poseban problem kod primjene zajedničkog otpornika za uzemljenje neutralne tačke predstavlja bezbjednost osoblja tokom rada na transformatoru koji je van pogona. Opasnost se može javiti u situaciji kada je jedan transformator u pogonu, dok je drugi isključen radi održavanja, ali njegova neutralna tačka i dalje ostaje povezana na zajednički otpornik za uzemljenje.

U slučaju pojave zemljospoja na 35 kV strani transformatora koji je u pogonu, struja zemljospoja može se zatvoriti preko njega i zajedničkog otpornika za uzemljenje neutralne tačke, čime pojedini djelovi transformatora koji je u pogonu: njegovi namotaji i priključci, mogu dobiti određeni potencijal u odnosu na zemlju iako je transformator formalno isključen. Takva pojava predstavlja ozbiljan bezbjednosni rizik.

Namotaji isključenog transformatora mogu doći pod napon i usljed nesimetrije u mreži, čime struja nultog redosljeda teče kroz zajednički otpornik za uzemljenje neutralne tačke.

U oba slučaja, i usljed zemljospoja u mreži i nesimetrije, potrebno je neutralnu tačku isključenog transformatora odvojiti od djelova koji mogu doći pod napon (otvaranjem običnog rastavljača ili rastavljača snage u zvjezdištu transformatora).

4 EKONOMSKI ASPEKT

Prilikom izbora načina uzemljenja neutralne tačke 35 kV mreže preko niskoomskog otpornika nazivne otpornosti 70 oma i struje zemljospoja 300 A, pored tehničkih karakteristika potrebno je analizirati i ekonomske aspekte različitih rješenja. U razmatranom slučaju analizirane su dvije varijante: zajednički otpornik za oba transformatora 110/35 kV i pojedinačni otpornik za svaki transformator.

4.1 Zajednički otpornik za oba transformatora

Kod ove varijante, jedan otpornik za uzemljenje neutralne tačke koristi se za oba transformatora 110/35 kV. Prebacivanje otpornika između transformatora vrši se pomoću dva rastavljača.

Osnovna prednost ovog rješenja ogleda se u nižim investicionim troškovima. Uzimajući u obzir tržišnu cijenu otpornika od približno 18.200 EUR, nabavkom samo jednog uređaja ostvaruje se direktna ušteda od oko 18.200 EUR u odnosu na rješenje sa dva otpornika. Dodatni trošak predstavljaju dva rastavljača i pripadajuća oprema za upravljanje i signalizaciju, ali je taj iznos značajno manji.

Pored manjih početnih ulaganja, smanjuju se i troškovi održavanja jer postoji samo jedan otpornik koji je potrebno periodično pregledati i ispitati.

Međutim, ovakvo rješenje ima određene nedostatke. U slučaju kvara otpornika ili potrebe za njegovim održavanjem, oba transformatora ostaju bez mogućnosti rada sa otpornikom u neutralnoj tački. Takođe, promjena konfiguracije zahtijeva manipulaciju rastavljačima, što povećava operativnu složenost i mogućnost ljudske greške. Stoga je ostvarena investiona ušteda djelimično kompenzovana smanjenjem raspoloživosti sistema. U Tabeli prikazana je uporedna analiza ekonomskog aspekta primjene zajedničkog otpornika.

Tabela III Uporedna analiza ekonomskog aspekta primjene zajedničkog otpornika

Aspekt	**Zajednički otpornik za oba transformatora**	**Poseban otpornik za svaki transformator**
Investicioni trošak opreme (otpornici)	18.200 EUR	36.400 EUR
Troškovi održavanja	Niži - potrebno održavati samo jedan otpornik	Viši - potrebno održavati dva otpornika
Raspoloživost sistema u slučaju kvara/održavanja	Oba transformatora ostaju bez otpornika u neutralnoj tački	Kvar/održavanje jednog otpornika ne utiče na drugi transformator
Operativna složenost	Veća - potrebna manipulacija rastavljačima (rizik od ljudske greške)	Manja - nezavisan rad svakog transformatora sa svojim otpornikom
Pogonska sigurnost/redundansa	Niža	Znatno veća
Preporučena primjena	Rješenje sa nižim ulaganjem, prihvatljivo gdje su troškovi prioritet	Postrojenja od većeg značaja, gdje je kontinuitet napajanja važniji od uštede

4.2 Poseban otpornik za svaki transformator

Kod druge varijante svaki transformator posjeduje sopstveni otpornik za uzemljenje neutralne tačke.

Glavni nedostatak ovog rješenja su veći investicioni troškovi. Nabavka dva otpornika iznosti oko 36.400 EUR. U poređenju sa prvom varijantom potrebno je obezbijediti dodatnih 18.200 EUR za drugi otpornik, uz troškove temelja, montaže i priključne opreme.

Sa druge strane, ovakva konfiguracija pruža znatno veću pogonsku sigurnost. Svaki transformator može nezavisno raditi sa svojim otpornikom. Takođe, održavanje jednog otpornika ne utiče na raspoloživost drugog transformatora.

Zbog veće redundanse i jednostavnijeg pogona, ovo rješenje je posebno pogodno za postrojenja od većeg značaja u kojima je kontinuitet napajanja važniji od minimalnih investicionih troškova.

4.3 Primjena rastavljača snage

Rastavljač otpornika za uzemljenje neutralne tačke može biti obični ili rastavljač snage. Sa ekonomskog aspekta, osnovna razlika između ova dva rješenja je cijena opreme. Cijena običnog rastavljača iznosi oko 1.500 EUR, dok cijena rastavljača snage iznosi oko 4.500 EUR, što je razlika od tri puta po uređaju.

Prednost rastavljača snage ogleda se u mogućnosti sigurnog uključenja i isključenja strujnog kola pod opterećenjem, čime se povećava operativna fleksibilnost i pojednostavljuju manipulacije u pogonu. Na taj način se smanjuje potreba za dodatnim preklopnim operacijama i povećava sigurnost rada postrojenja. Sa ovog aspekta, upotreba rastavljača snage na duže staze daje uštedu u smanjenju neisporučene energije potrošačima, kao i produženju životnog vijeka rasklopne opreme samog transformatora.

5 ZAKLJUČAK

Primjena zajedničkog otpornika za uzemljenje neutralne tačke kod transformatora u paraleli predstavlja kompromis između ekonomičnosti i tehničke složenosti sistema. Ovakvo rješenje omogućava smanjenje investicionih troškova, manji broj elemenata u postrojenju i jednostavniju realizaciju sistema uzemljenja. Međutim, istovremeno uvodi određene tehničke i pogonske probleme koji se prvenstveno odnose na bezbjednost i pojavu cirkulacionih struja usljed zemljospoja u mreži.

Pošto transformatori u praksi nikada nijesu potpuno identični, razlike u njihovim impedansama, naponima kratkog spoja i ostalim karakteristikama dovode do neravnomjerne raspodjele struja zemljospoja. Kao posljedica toga dolazi do pojave cirkulacionih struja između transformatora preko zajedničkog neutralnog kola. Ove struje mogu negativno uticati na rad zaštitnih uređaja, izazvati dodatno termičko naprezanje opreme i smanjiti ukupnu pouzdanost rada postrojenja.

Posebno značajan aspekt predstavlja bezbjednost osoblja tokom rada na transformatoru koji je van pogona. Ukoliko neutralna tačka isključenog transformatora ostane povezana na zajednički otpornik, pri pojavi zemljospoja u mreži ili usljed nesimetrije može doći do prenosa potencijala i pojave opasnih napona dodira na djelovima transformatora za koje se očekuje da su na nultom potencijalu.

Iz navedenih razloga neophodna je primjena dodatnih mjera zaštite, kao što su rastavljači u zvjezdištu transformatora (obični ili učinski), mehaničke i električne blokade, odgovarajuće pogonske procedure i pažljivo podešavanje zaštitnih uređaja.

Osnovni nedostatak primjene zasebnih otpornika odnosi se na veće investicione troškove, potreban dodatni prostor u postrojenju, kao i nešto složeniju izvedbu sistema uzemljenja u odnosu na rješenje sa jednim zajedničkim otpornikom.

Dalje unaprijeđenje ovog rada može se postići kroz: modelovanje tronamotajnih transformatora, analizu naponskih prilika u suptranzijentnom i tranzijentom režimu, problematiku podešavanja relejnih uređaja usljed pojave cirkulacionih struja tokom zemljospoja i prikupljanje tačnih, odnosno mjerenih podataka impedansi praznog hoda i kratkog spoja. Dodatnu pažnju treba posvetiti modelovanju krute mreže i njenom uticaju na strujne i naponske prilike tokom zemljospoja, kao i njenim impedansama nultog redosljeda.

LITERATURA

[1] Pravilnik o tehničkim normativima za pogon i održavanje elektroenergetskih postrojenja i vodova, Službeni list SRJ, br. 41/93, čl. 37, str. 9-10
[2] A. Jusić, Z. Bajramović, I. Turković, M. M. Dedović, „Overvoltage Analysis during Earth Fault for Different Treatment of Neutral Point in Distribution Network”, *B&H Electrical Engineering*, 14 (1), 2020, str. 53-60
[3] S. Ravlić, „Prepoznavanje visokoomskih kvarova u mrežama srednjeg napona uzemljenima preko transformatora za uzemljenje zvjezdišta”, doktorska disertacija, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, Hrvatska, 2016
[4] IEC 60076-1:2011, Power Transformers – Part 1: General, International Electrotehnical Commission (IEC), Geneva, 2011.
[5] Kulkarni, S.V., Khaparde, S.A., Transfomer Engineering; Design and Pratice, 2nd Edition, CRC Press, 2013.