

Marijan Lukač, dipl. ing.
HEP-ODS d.o.o. ELEKTRA ZAGREB
Marijan.lukac@hep.hr

OTKRIVANJE VODA SA ZEMLJOSPOJEM TRANZIJENTNOM METODOM

SAŽETAK

Tranzijentna metoda je prokušana metoda otkrivanja zemljospoja u izoliranoj ili Petersenovom prigušnicom kompenziranoj elektroenergetskoj mreži. U ovom članku obradit će se primjena tranzijentne metode implementirane u zaštitni relej radi otkrivanja voda u zemljospoju u rezonantno uzemljenoj mreži.

U članku će se prikazati fizikalni opis metode koja pomoću tranzijenata napona i struje u prvoj periodi otkriva smjer zemljospoja. Također će biti prikazano nekoliko primjera djelovanja metode na slučajevima zemljospoja u rezonantno uzemljenim distribucijskim mrežama s analizom pomoću oscilograma kvara i zapisa događaja. Biti će iskazana iskustva njene primjene i sagledana uspješnost metode kod visokoomskih zemljospojeva.

Članak će obraditi i nedostatke metode u određenim slučajevima zemljospoja te prikazati mogućnost kombiniranja s ostalim metodama za otkrivanje zemljospoja. Na kraju će se obraditi novi oblik tranzijentne metode koja proširuje opseg njenog djelovanja, ali izlazi iz okvira njene primjene u klasičnom zaštitnom releju.

Ključne riječi: tranzijentna metoda, zemljospoj, Petersenova prigušnica, rezonantno uzemljenje, zaštitni relej

DETERMINATION OF THE EARTH FAULTED LINE WITH TRANSIENT METHOD

SUMMARY

Transient method is proven method for determination of the ground fault direction in isolated or Petersen-coil compensated power systems. In this article application of transient method for determination earth faulted line with protection relay for determination of fault in resonant grounded power system is elaborated.

This article provides physical background of the method, which detects ground fault direction in the first few cycles of voltage and current time signals. The article also shows some example of transient method operation in the case of earth faults in resonant grounded distribution network with analysis of disturbance records and event list. Experience in application and efficiency of this method in the case of the high-ohmic earth faults will be also considered.

The article describes disadvantages of the method in some special cases of earth fault and shows possibilities of use with other methods for detection of the ground fault. Finally, more efficient new transient method will be described, but its application is not possible in classical protection relay.

Key words: transient method, earth fault, Petersen-coil, resonant grounding, protection relay

1. UVOD

Rezonantno uzemljenje omogućava niz prednosti u elektroenergetskim mrežama jer smanjujući struju zemljospoja omogućava napajanje potrošača za vrijeme prolaznih i trajnih zemljospojeva. Obzirom da je zemljospoj najčešća kvarna pojava u mreži znatno se povećava raspoloživost napajanja potrošača. Osim toga zbog malih struja zemljospoja lakše se rješavaju problemi s mogućom pojavom previsokih potencijala uzemljivača. U mnogim zemljama Europe rezonantno uzemljenje se koristi već duže vrijeme.

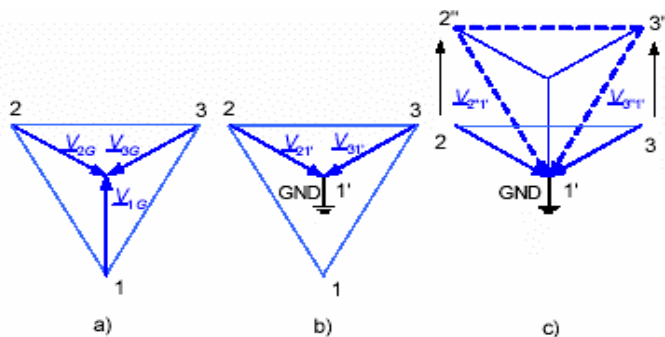
U Elektri Zagreb rezonantno uzemljenje primjenjuje se od 2004. godine kada je izvršena ugradnja kompenzacijske prigušnice s kontinuiranom regulacijom induktiviteta i automatskim pronalaženjem rezonantne točke u 4TS 110/20 kV Botinec. Između 2004. god. i danas još su ugrađene prigušnice za rezonantno uzemljenje u transformatorskim stanicama 4TS 110/20 kV Zaprešić, 4TS 110/10(20) kV V. Gorica i 4TS 110/10(20) kV Samobor. Prošle godine pušteno je u pogon rezonantno uzemljenje 20 kV mreže u Zaprešiću, dok su prigušnice u Samoboru i V. Gorici u proceduri puštanja u pogon. Počela je istovremeno ugradnja prigušnica u ostalim distribucijskim područjima.

U rezonantno uzemljenim mrežama induktivitet kompenzacijske zavojnice se podešava tako da s ukupnim dozemnim kapacitetom mreže tvori rezonantni krug kompenzirajući tako kapacitivnu komponentu struje zemljospoja. Kroz mjesto kvara teče samo mala preostala struja zemljospoja. Upravo ta mala struja koja iznosi otprilike 2%-3% ukupne kapacitivne struje mreže i radnog je karaktera može biti nedovoljna za otkrivanje voda u zemljospoju. Čak i u slučaju nepotpune kompenzacije preostala kapacitivna struja ne pomaže selektivnom otkrivanju zemljospoja jer je u istom smjeru u svim vodovima.

Uvjet za primjenu rezonantnog uzemljenja jest otkrivanje voda u zemljospoju, a za to nam treba prikladna zemljospojna relejna zaštita. Najčešće se primjenjuje vatmetrička i osjetljiva zemljospojna zaštita sa graničnim kutovima. Ukoliko nam postojeća relejna zaštita ne zadovoljava potrebe, ona se mora mijenjati ili nadograditi relejom koji ima neku od metoda za otkrivanje zemljospoja. Najjednostavnija je dogradnja odvojenog releja sa klasičnom tranzijentnom ili vatmetričkom metodom. Tranzijentna metoda također može biti jedna od zaštitnih funkcija klasičnog numeričkog releja, ali on mora sadržavati dodatni tranzijentni modul.

2. OPIS TRANZIJENTNE METODE

Iako je stacionarna struja na mjestu kvara kod rezonantno uzemljenih mreža vrlo mala, u početnom momentu zemljospoja nastaju u nultoj struji tranzijenti niskih i visokih frekvencija. Ti tranzijentni nastaju u procesu izbijanja naboja dozemnog kapaciteta faze u kvaru i nabijanja zdravih faza. Također su prisutne tranzijentne struje putnih valova i prigušnice za uzemljenje. Amplitude tih struja su velike i mogu se koristiti za otkrivanje voda u zemljospoju, pa čak se koriste za otkrivanje lokacije kvara. Tranzijentni se pojavljuju u svim tipovima uzemljenja i ovise o parametrima mreže. Problemi otkrivanja smjera zemljospoja u rezonantno uzemljenim mrežama doveli su do korištenja tranzijentne metode u relejnoj zaštiti.



Slika 1. Vektorski dijagram napona kod metalnog zemljospoja

Tranzijentna metoda koristi tranzijentne struje i napona koji nastaju u procesu izbijanja i nabijanja u momentu nastanka zemljospoja.

Proces nabijanja izaziva poremećaj napona zdravih faza. Zbog pada napona kvarne faze na potencijal zemlje diže se napon nultočke napojnog transformatora, što djeluje na povišenje faznih napona zdravih faza. Na slici 1 vidi se poremećaj napona faza kod metalnog zemljospoja. Zavisno o otporu kvara, dozemni kapaciteti zdravih faza svih vodova u mreži nabijaju se preko induktiviteta transformatora na

napone čije su efektivne vrijednosti između faznog i linijskog napona mreže. Proces nabijanja izaziva tranzijente koji su vidljivi u nultim strujama svih vodova u mreži, ali se tranzijenti svih zdravih faza zatvaraju preko zemlje kroz mjesto kvara i u suprotnom smjeru prolaze kroz kvarni vod. Tranzijenti nabijanja su niskofrekventni, a u distribucijskim mrežama dostižu frekvencije u iznosu 100 – 800 Hz. Amplitude struja tranzijenata u procesu nabijanja mogu biti 10 do 20 puta veće od osnovnog harmonika ukupne nekompenzirane struje kvara. Lako ih je izdvojiti od struje osnovnog harmonika. Tranzijenti nabijanja uvijek su prisutni u nultoj struji, ali su ovisni o rasipnom induktivitetu napojnog transformatora i parametrima vodova, a znatno se smanjuju za veće otpore na mjestu kvara.

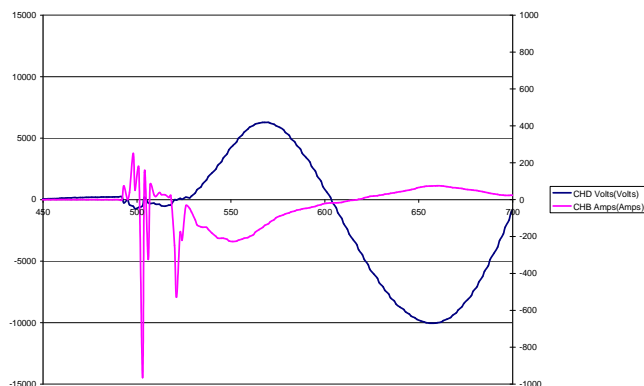
Spoj vodiča sa zemljom izaziva proces izbijanja naboja spremljenog u dozemnom kapacitetu. Količina naboja koja će se izbiti ovisi o momentu nastanka zemljospoja tako da se može dogoditi da je napon kvarne faze jednak nuli, pa neće nastati proces izbijanja naboja. Proces izbijanja se događa na frekvenciji određenoj brzinom putnog vala na vodu i udaljenosti kvara. Amplituda tranzijenata izbijanja je uobičajeno 5 do 10 % od amplitude tranzijenata nabijanja. Tranzijenti izbijanja su visokofrekventni, a uobičajena frekvencija za distribucijske mreže iznosi 500 do 2500 Hz.

Da bi relej koji koristi tranzijentnu metodu mogao otkriti vod u zemljospoju, mora imati specijalni filter koji izdvaja više harmoničke komponente iz mjernih veličina nulte struje i nultog napona. Amplitude harmoničkih komponenti nulte struje i nultog napona te osnovni harmonik nultog napona stalno su praćeni podešenim okidačima. Releji nadgleda pojavu očekivanih tranzijenata struje prema frekvenciji i podešenoj amplitudi. Kada dođe do okidanja komparator prati da li je prvi maksimum u pozitivnom ili negativnom poluvalu. Kada se pojavi signal I_{poz} ili I_{neg} otvara se vremenski prozor od nekoliko milisekundi za praćenje naponskog tranzijenta i prvi zabilježen maksimum U_{poz} ili U_{neg} se sprema. Ukoliko se tranzijent napona ne pojavi u predviđenom vremenu čeka se resetiranje logike i pojava novih tranzijenata. Zabilježene vrijednosti se digitaliziraju kao pozitivne ili negativne. Da bi se osiguralo praćenje tranzijenata vezanih uz zemljospoj, uzimaju se u obzir signali prisutni više od otprilike 100 μ s. Ako su zabilježene digitalizirane vrijednosti tranzijenata struje i napona istog predznaka, kvar nije u smjeru voda, a ako su predznaci različiti zemljospoj je u smjeru voda.

Istovremeno se niskopojasnim filtrom izdvaja osnovni harmonik nultog napona. Da bi se izbjegla kriva prorada metode za vrijeme sklopnih operacija, potrebno je da se nulti napon zadrži nekoliko perioda iznad podešene vrijednosti nakon čega dolazi do signalizacije tranzijentnog zemljospoja. Signal tranzijentnog zemljospoja pretvoriti će se u signal trajnog zemljospoja ako se osnovni harmonik nultog napona zadrži iznad podešene vrijednosti u trajanju podešenog vremena odgode (najčešće 2-5 sekundi). Padom vrijednosti nultog napona ispod podešene vrijednosti resetiraju se svi signali i relej je spreman za daljnje prorade.

3. PRIMJERI ZEMLJOSPOJA, ANALIZA I NEDOSTACI KLASIČNE METODE

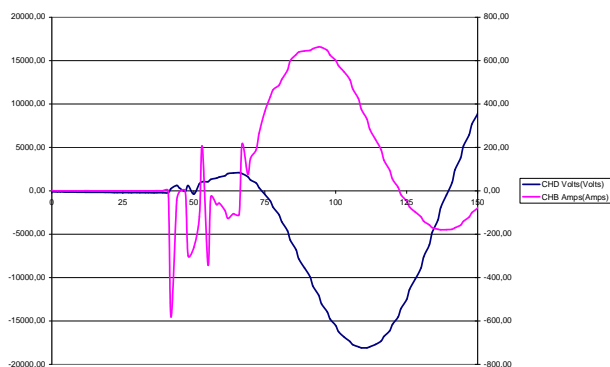
Iz slike 2 koja je snimljena mjernim uređajem s uzorkovanjem od 384 točaka po periodu vidi se da su tranzijenti snimljeni u nultoj struji voda u zemljospoju vrlo veliki ($I_{max} \approx 1\text{kA}$). Također se vidi da su prvi i drugi tranzijent nulte struje suprotnog predznaka od nultog napona.



Slika 2. Primjer tranzijenata u nastanku metalnog zemljospoja

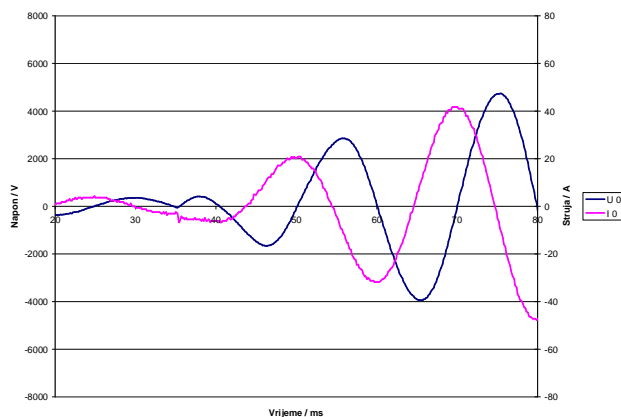
Snimka je napravljena za vrijeme mjerenja niskoomskog zemljospoja (preko sonde za uzemljenje) u 4TS Zaprešić na kombiniranom 20 kV kabelsko-zračnom vodu na udaljenosti oko 4 km od transformatorske stanice prilikom puštanja u pogon rezonantnog uzemljenja. Tranzijentna metoda bi za metalne i niskoomske kvarove trebala biti vrlo pouzdana.

Na slici 3 vidljivi su tranzijenti kod visokoomskog zemljospoja (oko $1k\Omega$), koji je nastao bacanjem vodiča na suhu zemlju na istom mjestu. Tranzijenti struje su manji, ali još uvijek dosta izraženi.



Slika 3. Primjer tranzijenata prilikom pada vodiča na zemlju

Obzirom da je rađeno dosta mjerenja na transformatorskim stanicama postoji mnogo snimljenih zemljospojeva, ali za sada u Elektri Zagreb nemamo niti jedan relej sa tranzijentnom metodom u pogonu. Problem nam je za bolju analizu metode što kvarove iz pogona, snimljene sa zaštitnih releju, ne možemo vjerodostojno koristiti za probe u uredu, jer su oni uzorkovani malim brojem točaka. Jedino iskustvo u pogonu s tranzijentnom metodom su bila mjerenja na području Elektre Zabok gdje su puštene u pogon transformatorske stanice Bobovje 110/20 kV i Strahinje 35/20 kV s rezonantnim uzemljenjem. Numerički releji u tim transformatorskim stanicama opremljeni su modulom za tranzijentnu metodu i koriste ju kao dodatak vatmetričkoj zaštiti. U tim stanicama su vršeni pokusi zemljospoja direktnim metalnim spojem, preko žice na zemlji i preko iskrišta. U TS Bobovje tranzijentna metoda je uvijek startala dok smo u TS Strahinje imali problema zbog krivog podešenja nazivnog napona. Naknadnim reprodukcijama kvarova snimljenih mjernim uređajem, nakon promjene podešenja, ustanovljena je prorada tranzijentne metode u svim slučajevima osim u slučaju kvara preko žice na tlu. Problem je bio moment kvara pogodan baš u trenutku prolaska napona kroz nulu a sam kvar je bio visokoomskog karaktera. Na slici 4 vidi se snimka tog visokoomskog kvara s otporom na mjestu kvara oko 1 do 2 $k\Omega$.



Slika 4. Primjer visokoomskog zemljospoja u momentu paljenja kod $u_0=0$

Upravo kod kvarova s paljenjem u momentu kada je napon faze u kvaru jednak nuli, ne dolazi do pojave tranzijenata izbivanja, međutim istovremeno postoje tranzijenti nabijanja. Problem može nastati kada dođe do visokoomskog kvara te je i proces nabijanja jako prigušen. Tranzijenti koji se javljaju u početku zemljospoja trebali bi biti dovoljni za otkrivanje smjera kvara, samo je pitanje kako ih dovoljno točno prenijeti do releja i kasnije ih što točnije harmonički filtrirati. Ipak zbog ovog ograničenja tranzijentna metoda primjenjivija je u mrežama u kojima je vjerojatnost zemljospoja s većim otporima na mjestu kvara manja. Selektivnost metode može se povećati nižim podešenjima praga prorade nultog napona i tranzijenata struje, a za to bi trebalo imati iskustava sa mrežom na kojoj su postavljeni releji.

Što se tiče prenošenja mjernih veličina do releja, dovoljna je bilo kakva kombinacija klasičnih strujnih i naponskih transformatora koji se koriste za zaštitu, dok kvaliteta analogno-digitalne pretvorbe i filtriranja signala određuje cijenu i primjenu metode.

Obzirom da se klasična tranzijentna metoda primjenjuje u donekle ograničenim klasičnim relejima iz gore navedenih razloga, može doći do nepravilne metode za vod u zemljospoju, tako da je njena primjena preporučljiva u kombinaciji s ostalim usmjerenim metodama koje koriste klasični releji. Konkretno u našem primjeru koristi se vatmetrička metoda koja se aktivira nakon pojave nultog napona u određenom trajanju. Za prorađu koristi radni dio struje kvara uz uvjet da je njen kut u odnosu na vektor nulte struje manji od podešenog graničnog kuta. Obzirom na manju vjerojatnost krive prorađu tranzijentne metode za zdravi vod, ona se koristi sa manjim vremenom isključenja.

Ispitivanje releja s tranzijentnom metodom ne može se vršiti klasičnim ispitnim uređajima, nego uređajima koji mogu generirati više harmonike ili reproducirati već gotove datoteke s tranzijentima.

4. NOVA TRANZIJENTNA METODA

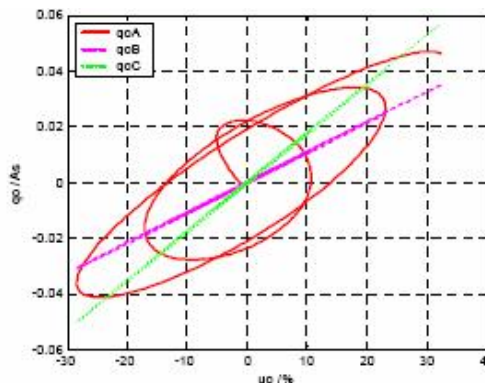
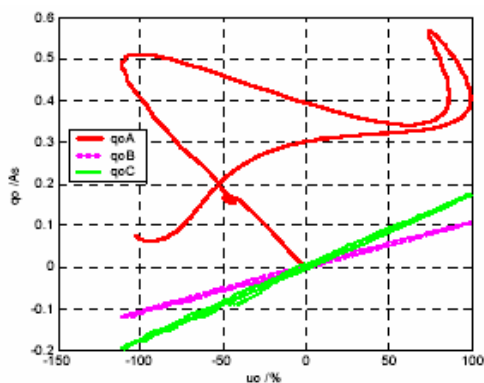
Nova tranzijentna metoda je usavršena primjena tranzijenata nabijanja pomoću nultog napona i nulte struje. Nabijanje zdravog voda se može opisati jednadžbom:

$$u_o(t) = u_o(t_o) + \frac{1}{C_{ekvB}} \int_{t_o}^t i_{oB}(\tau) d\tau$$

gdje je C_{ekvB} ekvivalentni dozemni kapacitet voda B, a i_{oB} njegova nulta struja.

Novi digitalni releji koriste signalne procesore koji imaju velike memorije (eng. ring buffers) i periode uzorkovanja od 10 kHz i više, što omogućava da relej za prorađu koristi i mjerne podatke iz prošlosti. Zahvaljujući tome vrijeme to se može odabrati tako da je $u_o(t_o)=0$.

Nakon odabira jednog od prošlih prolaza u_o kroz nulu, integrira se nulta struja od te točke do točke prorade (trenutka u kojem je vrijednost u_o prešla postavljenu vrijednost). Rezultat integriranja pokazuje da se krivulja integrala q_o razlikuje od krivulje u_o samo za faktor C_{ekv} koji je pripadni dozemni kapacitet pojedinog voda. Integracija i_o predstavlja stvarni naboj q_o na vodu. Dijagram ove relacije na kojem je integral i_o na ordinati, a napon u_o na apscisi je pravac s gradijentom C_{ekv} . Stoga se ovaj dijagram naziva q_u -dijagram.

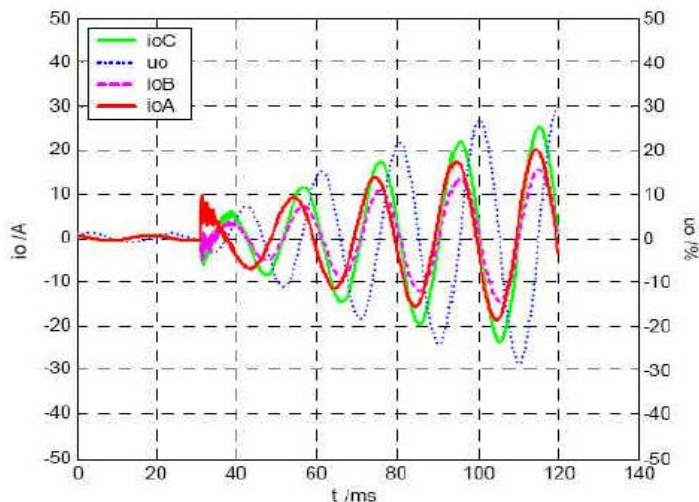


Slika 5. q_u -dijagram niskoomskog zemljospoja Slika 6. q_u -dijagram visookskog zemljospoja

Kada se radi o vodu u kvaru, ova relacija više ne vrijedi. Zbroj svih struja nabijanja zdravih vodova zatvara se kroz vod u kvaru. Rezultat integracije nulte struje nije proporcionalan nultom naponu. Na slici 5. prikazan je q_u -dijagram za mrežu s dva zdrava voda B i C i vodom A na kojem je nastao niskoomski zemljospoj.

Integriranjem i_o kroz duži vremenski period moguće je i selektivno otkrivanje visookmskih zemljospojeva do nekoliko $k\Omega$. U ovom slučaju integriranje mora početi nekoliko perioda prije nastanka zemljospoja. Na slici 6 prikazan je q_u -dijagram za zemljospoj s otporom kvara od $2 k\Omega$ (odgovarajući vremenski dijagram je prikazan na slici 7).

Iz priloženih dijagrama vidljivo je da se vod u kvaru može odrediti na temelju toga je li njemu pripadajuća krivulja pravac ili zakrivljena linija. Ovdje je potrebno naglasiti da je u releje koji koriste ovu metodu potrebno ugraditi i algoritme koji koriste metode najmanjih kvadrata i prepoznavanja uzoraka.



Slika 5. Nulti napon i nulta struja voda u kvaru A i zdravih vodova B i C na početku zemljospoja s velikim otporom na mjestu kvara

Velika prednost nove tranzijentne metode je selektivno otkrivanje ponavljajućih zemljospojeva. Oni se uglavnom javljaju na kabelskim dionicama, a pojavljuju se dva problema za klasične metode. Nulti napon ne pada uvijek ispod prorađne vrijednosti, a nulta struja nema stabilnu frekvenciju. Prvi problem se uglavnom tiče tranzijentne metode zato što releji ne mogu biti ponovno pobuđeni. Drugi problem se tiče metoda koje koriste brzu Fourierovu transformaciju radi izračuna komponenta osnovne frekvencije gdje se pogrešna odluka može desiti u kvarnom i zdravom vodu.

Releji koji koriste novu tranzijentnu metodu su specijalni zemljospojni releji, a uključuju i kombinacije s drugim zemljospojnim metodama (harmonička, vatmetrička). Takva relejna kombinacija upravo se ugrađuje u 4TS26 V. Gorici, koja treba prijeći na rezonantno uzemljenje.

5. ZAKLJUČAK

Metode zemljospojne relejne zaštite koje se koriste u klasičnim numeričkim relejima nedostatne su za selektivno otkrivanje svih vrsta zemljospojeva. Tranzijentna metoda je nastala zbog malih stacionarnih struja zemljospoja koje se javljaju u rezonantno uzemljenim mrežama. Bez posebnih zahtjeva na mjerne pretvarače ona selektivno otkriva niskoomske zemljospojeve, no za visookomske i ponavljajuće zemljospojeve nije pouzdana pa ju je poželjno koristiti u kombinaciji s klasičnim usmjerenim zemljospojnim zaštitama. Tranzijentna metoda se može koristiti u neovisnom zemljospojnom releju ili kao dio klasičnog numeričkog releja.

Zbog nedostataka klasične, razvijena je nova tranzijentna metoda koja se implementira u specijalne zemljospojne releje koji koriste procesore s jačom memorijom i većom brzinom uzorkovanja. Ona pouzdano otkriva zemljospoj u vodu i za slučajeve ponavljajućih i visookomskih kvarova do nekoliko k Ω . Obzirom na postojanost tranzijenata u svim vrstama zemljospojeva može se očekivati da se daljnjim razvojem tehnologija nastavi razvijati tranzijentna metoda kako bi što selektivnije otkrivala sve vrste zemljospojeva.

LITERATURA

- [1] Gernot Druml, Andreas Kugi, Olaf Seifert, "A new Algorithm for Transient, Highohmic and Restriking Earthfaults", 17th International Conference on Electricity Distribution, Barcelona, 12-15 May 2003

- [2] Peter Imriš, "Transient based earth fault location in 110 kV Subtransmission networks", TKK Dissertations 42, Helsinki University of Technology, Espoo 2006
- [3] I.G. Kuliš, S. Žutobradić, "Istraživanje metoda za detekciju kvarova u mrežama s neutralnom točkom uzemljenom preko Petersenove prigušnice", Zagreb, Prosinac, 2005.
- [4] AREVA, MiCOM P139 Time-Overcurrent Protection and Control Unit, Technical Manual
- [5] Siemens AG, Transient earth-fault relay 7SN60, Instruction Manual
- [6] A-Eberle GmbH&CoKG, EWR 22, Operating Manual
- [7] A-Eberle GmbH&CoKG, Earthfault-Detection-Relay EOR-D, Technical Data