



**PROVERA FUNKCIONALNOSTI RADA RELEJA U SREDNJE NAPONSKIM NEBALANSIRANIM DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA**

**CHECKING FUNCTIONALITY OF THE RELAY OPERATION IN MEDIUM-VOLTAGE UNBALANCED DISTRIBUTED NETWORKS**

Nemanja Mihajlov, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

**Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

**Kratak sadržaj** – U radu je dat pregled relejnih zaštita koje se koriste u srednjenaponskim nebalansiranim distributivnim mrežama. Opisane su distantna i prekostrujna zaštita sa svojim karakteristikama. Kvarovi koji se dešavaju na srednjem naponu, kao i primeri podešenja distantnih i prekostrujnih releja.

**Ključne reči:** Rad releja, relejna zaštita, kvarovi, nebalansirane mreže

**Abstract** – In this paper is given an overview of relay protection used in medium-voltage unbalanced distribution networks. Distant and overcurrent protection with its characteristics are described. Middle-voltage faults as well as examples of distant and overcurrent relay settings.

**Keywords:** Relay operation, relay protection, faults, unbalanced networks

**1. UVOD**

Funkcionalnost rada releja smatra se jednom od najbitnijih karakteristika savremenih elektroenergetskih sistema (EES). Esencijalnost ispravnog rada releja ogleda se u tome da svi planirani i neplanirani kvarovi kao i opasna pogonska stanja, koja remete sigurnost i pouzdanost EES, budu na vreme otklonjeni. Time se omogućava nesmetan rad mreže u kojoj su instalirani releji. Srednjenaponske distributivne mreže odlikuju se radijalnim ili slabopetljanim pogonom, gde se različite vrste relejnih zaštita primenjuju.

Kada je reč o nebalansiranim mrežama, tipični predstavnici ovih mreža su severnoameričke distributivne mreže. Transformatori sa specifičnim spregama (sprežnim odnosom) i potrošači sa svojim zahtevima za isporukom električne energije, čine nestandardnim ove EES u odnosu na evropske mreže, te se s toga poseban tretman nad ovim mrežama i primenjuje.

Relejna zaštita i provere u ovim mrežama zahtevaju: brzinu, koordinaciju, preciznost, tačnost i usmerenje. Iza svega navedenog, krije se atraktivnost u podešenju rada relejne zaštite u ovim mrežama (prim. aut. severnoameričkim).

**NAPOMENA:**

**Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Duško Bekut, red. prof.**

Nakon uvoda, u drugoj glavi date su teorijske osnove funkcionalnosti relejne zaštite, ispitane na prekostrujnoj i distantnoj zaštiti.

U trećoj glavi rada opisane su srednjenaponske nebalansirane distributivne mreže, sa vrstama kvarova koji se pojavljuju u njima. U prvom delu je predstavljena struktura distributivnih sistema, prednosti i mane evropskih i severnoameričkih sistema. U drugom delu predstavljeni su transformatori sa specifičnim sprežnim odnosom kao i regulatori napona sa svojim funkcionalnostima.

U četvrtoj glavi dat je praktičan primer transformatorske stanice sa prekostrujnim relejima. Ispitivanja funkcionalnosti prekostrujne zaštite odrađena su preko softverskih rešenja.

Nakon zaključka iznetog u petoj glavi, navedena je literatura, korišćena za realizaciju ovog rada.

**2. TEORIJSKE OSNOVE**

Distributivni sistemi su izloženi toku struje kroz elemente EES koja može da pređe nominalne vrednosti. Razlog zašto struje izlaze izvan svojih zadatih limita mogu biti zbog preopterećenja određenih elemenata (npr. vodova) i kratkih spojeva ili startovanja motora.

Stoga, upravljanje potrošnjom, (*Demand-Side management*), kao i krive preopterećenja ili soft startovanje motora, neki su od načina za izbegavanje potencijalnog preopterećenja [1].

Dodatno, distributivne mreže opremljene su zaštitnim relejima koji daju komande prekidačkoj opremi za određene akcije u cilju suzbijanja abnormalnih sistemskih uslova.

Optimalna podešenja zaštite potrebna su za radne uslove elektroenergetskog sistema, kako bi se osigurao rad unutar unapred postavljenih zahteva za pouzdanim snabdevanjem električnom energijom i sigurnošću elemenata mreže. Neophodna je zaštita opreme, osoblja, ljudi i mreže generalno govoreći.

Međutim, trenutna podešenja koja se koriste u EES, često nisu na optimalnom nivou. Mreža često nije optimalna za određeno stanje sistema, te je s toga neophodno da se podešenje relejne zaštite prilagodi stvarnim uslovima koji se menjaju. Kada se promeni topologija mreže, podešenja zaštitnih uređaja treba što pre ažurirati kako bi se zaštitio sistem od novih potencijalnih kvarova.

## 2.1. Prekostrujna relejna zaštita

Svaki prekostrujni relej da bi ispravno funkcionisao mora biti energizovan. Ova vrsta energije može da se obezbedi iz strujnih transformatora (obezbeđuje sistem) ili iz kondenzatorskih uređaja, kada su u pitanju manji sistemi, dok se kod velikih sistema energizacija obezbeđuje u vidu posebne baterije. Radna struja za sve tipove prekostrujnih releja može biti ili podešena ili podesiva.

Kontakti releja se zatvaraju kada se predviđena podešena vrednost struje premaši. Tada kontakti releja iniciraju strujni prekidač da odseče vrednost struje koja se pojavila. U zavisnosti od toga koju brzinu želimo da postignemo sa datim prekostrujnim relejom, razlikujemo tri vrste strujnih karakteristika:

- Trenutna strujna karakteristika.
- Strujno-vremenska karakteristika.
- Inverzna vremenska karakteristika.

## 2.2. Prekostrujna zaštita za kvarove sa zemljom

Kvarovi sa zemljom su najčešći tip kvara koji se pojavljuje u distributivnim mrežama. S toga, mora postojati koncept šticećenja od kvarova nastalih sa zemljom. Kod takvih kvarova, deo struje putuje kroz zemlju, a vrednost struje zavisi od konfiguracije mreže, tipa kvara (npr. jednopolni sa zemljom, dvopolni sa zemljom), lokacije kvara, i tipa sistema uzemljenja. Ova vrednost struje kvara predstavlja sumu faznih struja koja nije jednaka nuli, kao u normalnim uravnoteženim uslovima sistema. Kod nebalansiranih mreža ta struja je poznata i kao struja ostataka (reziduala) i to iskazana formulom:

$$I_{res} = \sum I_{ph} = I_{ph1} + I_{ph2} + I_{ph3} > 0 \quad (1)$$

gde su:

$I_{ph1}$  – struja u fazi 1,

$I_{ph2}$  – struja u fazi 2,

$I_{ph3}$  – struja u fazi 3,

$I_{ph}$  – ukupna vrednost struje.

Kvarovi sa zemljom – zemljospoju funkcionišu na sličan način kao i prekostrujna zaštita namenjena za fazne kvarove. Kada se operativna zona rada releja, iskazana karakteristikom releja, nalazi u stanju funkcionalnosti – tada će biti omogućen nesmetan rad releja koji su namenjeni za kvarove sa zemljom. Neophodno je da zemljospojna zaštita bude vrlo osetljiva na struje kvara, koje mogu imati niske vrednosti, u slučajevima kada su impedansa kvara ili impedansa uzemljenja velikih vrednosti. S druge strane, prag struje podešenja kod kvarova sa zemljom treba biti iznad vrednosti nulte struje, koja proizilazi iz dozvoljenih radnih uslova neuravnoteženosti u mreži, i na taj način izbeći pogrešno okidanje releja.

## 2.3. Distantna zaštita

Rad distantnih releja nije regulisan striktno strujom ili snagom, već zavisi od odnosa primenjenog napona i struje. Releji stoga efektivno mere impedansu u zoni koju štite. U uslovima kvara, napon je degradiran, i tada se struja u velikom intenzitetu povećava. Ovo se detektuje distantnim relejom kada impedansa opadne tokom kvara. Iniciran je prekid napajanja, koji se obavlja slanjem

signala strujnom prekidaču da prekine strujno kolo. Ovaj tip releja (*distance relays*) koristi se u nadzemnim i kablovskim mrežama. Prednost im se ogleda u brzini, kada druge zaštite nisu u mogućnosti da ispoštuju zahtevane vremenske uslove. Impedansom može da se odredi dužina nadzemnog voda ili kabla, te se distantna zaštita naziva i zaštita distantnom impedansom.

## 2.4. Karakteristike distantnih releja

Kada se analizira impedantna karakteristika distantnog releja, tada se može definisati i izraziti kao jednostavna karakteristika koja se nalazi u (R–X) ravni. Na apscisi se nalazi otpornost (R) izražena u [Ohm], a na ordinati se preslikavaju vrednosti reaktanse (X) koja se, takođe, izražava u [Ohm]. Distantni relej sa ovom karakteristikom je osetljiv samo na modul merene impedanse. Velika mana je što ne postoji usmerenje u radu releja sa ovom karakteristikom. Usmerenje se mora obezbediti na neki dodatni način, i upravo se ovim favorizuju ugaono admitantni releji koji se najčešće koriste kada je zahtevano usmerenje releja u mreži.

Linija koja predstavlja liniju voda se pomera po MHO dijagramu ( ugaono admitantnoj karakteristici) u zavisnosti od situacije, za različite vrste simuliranih kvarova. Tako za trofazne kvarove koji su u sve tri faze zahvaćeni simetrično, relej će pratiti standardnu MHO karakteristiku. Što je veća impedansa izvora (*source impedance*), veći je i krug u R–X ravni, kome je tim postupkom povećan kapacitet za toleranciju otpornosti – uticaj rezistanse, a baš upravo postojanje otpora na mestu kvara predstavlja problem pri radu distantnih releja.

## 3. ZAŠTITA NEBALANSIRANIH MREŽA

Razmatraće se specifičnosti i razlike između evropskih i severno–američkih distributivnih mreža. Severno–američki i evropski tip mreže su dva sistema distributivnih naponskih nivoa koji se najčešće koriste u celom svetu.

### 3.1. Struktura distributivnih sistema

Opsezi naponskih nivoa koji se koriste u gore navedenim EES prikazani su u Tabeli 1.

Izbor napona zavisi od tipa opterećenja (kućna, komercijalna ili industrijska potrošnja). Takođe zavisi i od veličine opterećenja, kao i udaljenosti na kojoj je locirano dato opterećenje [1].

Tabela 1. – Distributivni naponi Severne Amerike i Evrope

Naponski tip	Severno-američki sistem	Evropski sistem
Primarni distributivni napon (faza–faza)	Od 4 do 35 kV	Od 6.6 do 33kV
Trofazni sekundarni napon (faza–faza)	208, 480 ili 600V	380,400 ili 416V
Monofazni sekundarni napon (faza sa zemljom)	120/240, 277 ili 347V	220,230 ili 240V

Primetno je da su distributivni naponi u evropskim sistemima viši nego u severno-američkim sistemima. To nosi određene prednosti i mane. Prednosti: Sistem može

da podnese više prenesene snage, imaće manje padove napona i manje gubitke za dati tok snage. Posledično, sistem može da pokrije mnogo šire oblasti. Zbog velikog dometa dalekovoda, sistem zahteva manje transformatorskih stanica u distribuciji.

Mane: Previše prekida napajanja potrošačima sledi usled problema na dalekovodima, odnosno povećan je broj kvarova, što posledično smanjuje pouzdanost. Stoga, glavni fokus je na održavanju željenog opterećenja shodno naponskim profilima.

### 3.2. Kvarovi u nebalansiranim mrežama

Većina električnih kvarova u distributivnim elektroenergetskim sistemima (EES), obezbeđuje pored značajne predate snage i gubitke koji su značajni, ukoliko kvar nije na vreme otklonjen iz sistema. Kada je kvar detektovan relejnom zaštitom u sistemu, prekidači će odvojiti deo mreže sa kvarom od ispravnog pogona. Zaštita je stoga ekstremno važna za normalan rad u bilo kom EES. Releji moraju da ispunjavaju zadata očekivanja u smislu podešenja i tačnosti reagovanja, u suprotnom kvar će opstati i doći će do dodatnih prekida ili oštećenja. Takođe, relejna zaštita ne sme da reaguje kada to od nje nije zatraženo. U tim situacijama dolazi do potencijalnog ugrožavanja toka struje i pojaviće se eventualni kvarovi na tom delu mreže, umesto ispravnih, tj. „zdravih“ faza struje.

Kvarovi se mogu podeliti na:

- kvarove između faza (međufazne),
- kvarove sa zemljom (zemljospoje).

Vrednost fazne struje kvara najčešće zavisi od impedanse izvora (*source-a*) i impedansi na putu do mesta kvara. Međutim, kada je reč o kvarovima sa zemljom, tu je bitan još jedan važan faktor, a to je način na koji je sistem uzemljen tj. proverava da li je uopšte mreža uzemljena. Kako se impedansa u nultom režimu povećava, tako struja zemljospoja smanjuje svoju vrednost, te je s toga teško detektovati ovu vrstu kvara. Dispečeri uprkos ovom problemu, često se susreću sa veoma visokom vrednošću impedanse uzemljenja nultog režima.

U nesimetričnom sistemu nije moguće, kao u simetričnom, prilike u mreži odrediti posmatranjem stanja samo u jednoj fazi, pa nije moguće ni trofaznu mrežu neposredno zameniti s ekvivalentnom jednofaznom šemom, a uz to, određivanje prilika na osnovu trofazne šeme zahteva duge proračune. Ovakvi režimi se računaju metodom simetričnih komponenti. Simetrične komponente omogućavaju da se nesimetrični trofazni sistem raspregne na tri sistema (direktni, inverzni i nulti), koji se analiziraju metodama za analizu monofaznih sistema [2].

### 3.3. Specifična Y-Y sprega transformatora

Konfiguracija ovih transformatora je sledeća: Trofazni su, sa tri stuba (trostubni), sa magnetnim jezgrom, Y-Y sprega transformatora ili u posebnim slučajevima autotransformator. Problem koji se razmatra je sledeći:

U transformatoru povezanosti namotaja Yy (zvezda-zvezda), sa jezgrom, sekundarni namotaj se ponaša kao neuzemljena zvezda, odnosno kao  $\Delta$  (trougao) sa visokom impedansom. Potencijalna oštećenja mogu nastati usled struje cirkulacije u ovom slučaju. Prekostrujni relej je energizovan preko strujnih transformatora povezanih tako

da uvećavaju efektivnu tercijarnu struju. U slučaju dvonamotajnih transformatora, neophodna nulta sekvenca je obezbeđena povezivanjem visoke i niskonaponske strane strujnih transformatora [3, 4].

### 3.4. Regulatori napona

Funkcija regulatora napona ogleda se u tome da održe vrednosti naponskih prilika u zadatim granicama. Tokom pada napona, regulatori napona povećavaju vrednost napona do željenog nivoa, osetljivog opterećenja i u obratnom slučaju tokom prenapona, imaju funkciju da smanjuju vrednosti napona. Najčešće, pri upotrebi regulatora napona u praksi, nalazi se na situaciju kada treba da se smanji vrednost pada napona. Dva ključna uslova za postizanje zadovoljenja potrošača moraju biti razmatrana. Prvi je kontinualno napajanje električnom energijom od strane distributivnog preduzeća. Drugi je dobar kvalitet električne energije koji je obezbeđen između ostalog regulatorima napona, prekidačkom opremom, kao i uređajima za poboljšanje kvaliteta električne energije (VAR kompenzatori, STATCOM-i itd).

Napon na različitim terminalima u mreži mora biti održavan na konstantnim vrednostima aproksimativno. Dozvoljene varijacije limita zavise od IEC-a (*International Electrotechnical Commission*) ili od IEEE standarda.

Ukoliko se želi postizanje snabdevanja potrošača konstantnom amplitudom napona i bez narušenih naponskih limita, cena električne energije sa proizvođačke strane biće znatno povećana. S druge strane, ukoliko je napon takve prirode da narušava limite, tada se u svrhu izbegavanja plaćanja visoke cene snabdevačima električnom energijom, ulaže u prekidačku opremu. Upravo je između ove dve granične situacije potrebno naći balans i kompromis.

## 4. PROVERA FUNKCIONALNOSTI RELEJA

Provera efikasnosti zaštite uključuje proveru sledećih kriterijuma:

- osetljivosti,
- opterećenja,
- tajminga (vremena okidanja),
- usmerenja (smera).

Osetljivost – proverava se da li je razmatrani relej izvan određenih limita (specificiranih vrednosti unapred zadatih), za ranije određenu vrednost tipa i lokacije kvara. Obično, kvarovi bivaju simulirani na kraju osnovne zone šticećenja. Kada se proverava osetljivost faznih releja, tada se razmatra trolni kratak spoj bez uticaja rezistanse na luk, koji se pojavljuje na mestu kvara. U terminologiji ovi kratki spojevi, poznati su i kao metalni kratki spojevi (*solid*), čime se zanemaruje uticaj rezistanse (otpora) na mestu kvara.

U četvorožičnim distributivnim sistemima, radi uštede osigurača, dve faze pripadaju primarnoj zoni reklozera. Fazni reklozer tada će biti proveren na dvofaze greške na kraju odgovarajućih laterala. Ovo je tipično za severno-američke distributivne mreže, da mogu posedovati veliki broj bočnih izvoda, u terminologiji poznatih kao bočni laterali, ili samo laterali. Kada se razmatra situacija sa

zemljospojnom zaštitom, tada će isto kao i u slučaju fazne logike, biti zanemaren uticaj rezistanse na luk na mestu kratkog spoja.

Provera osetljivosti dalje implicira proveru opterećenja.

Opterećenje – proverava se da li je maksimalno opterećenje elementa u specificiranim limitima. Opterećenje štice elementa mora biti u okviru zadatih ograničenja kako bi se izbeglo nepotrebno delovanje (okidanje) releja u slučaju velikih opterećenja u mreži.

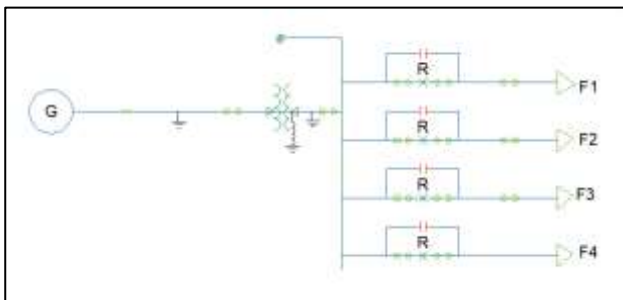
Tajming (okidanje) – proverava da li je vreme odsecanja kvara u specificiranim limitima. Vreme isključenja kvara mora biti takvo da obezbedi čišćenje kvara u što bržem vremenskom periodu, kako bi se obezbedila odgovarajuća koordinacija između zaštitnih uređaja.

Usmerenje se proverava da li je smer delovanja releja podešen na odgovarajući način, posmatrajući topologiju mreže. Provera usmerenja uključuje provere karakteristike releja, ugla releja, za direktan ili inverzan način podešenja, poredeći vrednosti na gore ili na dole, u zavisnosti od oznaka i konfiguracije fidera i reklozera u mreži.

Koordinacija nije odrađena u softverskom paketu za proveru relejne zaštite. Kada su svi uslovi iznad: osetljivost, tajming, opterećenje, kao i usmerenje (ukoliko se specifikira) u zadatim granicama, ne narušavajući prethodno zadate limite, tada će dispečer mreže imati u potpunosti operativnu konfiguraciju mreže u razmatranim održivim opsezima. Postoji opcija u softveru da li operater želi da uključi ili eventualno isključi opciju za usmerenje. Isključenjem opcije za usmerenje, postoji bojaznost koja može dovesti do neselektivnosti, i tada neselektivan rad mreže implicira neispravan rad relejne zaštite.

#### 4.1. Praktičan primer zaštite transformatorske stanice

Na slici 4.1.1. mogu se uočiti distributivni fideri na kojima se nalazi prekostrujna relejna zaštita.



Slika 4.1.1. – Jednopolna šema sa prekostrujnim relejima

Na jednopolnoj šemi nalaze se 4 fidera koji su snabdeveni sa po 4 releja, od toga svaki relej sa po dve vrste zaštite, jednu za međufazne kvarove, i drugu za kvarove sa zemljom, kada je u pitanju prekostrujna zaštita.

Kataloški podaci transformatora, takođe, se ispituju. Broj namotaja, njegove sprege, potencijalna uzemljenja visoke i niskonaponske strane transformatora. Impedansa kratkog spoja, direktnog i nultog režima, kao i broj regulacionih otepa.

Ukoliko se svi podaci poklapaju, dati transformator sa kataloškim nazivom u smislu funkcionalnosti relejne

zaštite i prekidačke opreme zadovoljiće sa aspekta ispravnog rada releja.

Ustanovljeno je da relejna zaštita koja se nalazi na fiderima gledajući sa sekundarne strane transformatora u potpunosti odgovara podešenjima, kao i da podešeni transformator u ispravnom stanju ne remeti rad mreže.

## 5. ZAKLJUČAK

U radu su ispitane funkcionalnosti relejne zaštite, konkretno njenih najčešće korišćenih tipova u srednjenaponskim nebalansiranim distributivnim mrežama, a to su prekostrujni i distantni releji.

Takođe, dat je kratak osvrt i na uređaje bez kojih je nemoguće zamisliti rad releja u srednjenaponskim nebalansiranim mrežama: transformatori sa specifičnim odnosima transformacije i regulatori napona u izvedenim varijantama. Različiti tretman rada releja uzet je za određene tipove kvarova kod prekostrujne i distantne zaštite. Pristup uz određena aproksimativna zanemarenja kao što je postojanje rezistanse na mestu kvara, rađen je u svrhu ispitivanja koordinacije, osetljivosti, opterećenja, tajminga i usmerenja.

Praktičan deo rada podrazumevao je sve provere kroz softverska rešenja za datu topologiju mreže. Zapisani su specifični elementi sa jednopolnih šema i njihove vrednosti. Upravo ti elementi prolazili su kroz validacije, do zadovoljavajućih kriterijuma odnosno omogućenja nesmetanog rada mreže i pokrivenosti čitavih oblasti kojima upravljaju dispečeri.

Na samom kraju rada uporednom analizom između teorijskih osnova i praktičnog primera, ustanovljeno je da za datu transformatorsku stanicu uz svu snabdevenost elementima pored releja i prekidačke opreme, za date fidere na kojima se nalaze releji, omogućen je nesmetan rad mreže.

## 6. LITERATURA

[1] Abdelhay A. Sallam, OM P. Malik – *Electric Distribution Systems Planning and Utilization*, New Jersey 2011,

[2] Vladimir C. Strezoski – *Analiza elektroenergetskih sistema 1 i 2*, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad 2017,

[3] Colin Bayliss, Brian Hardy – *Transmission and Distribution Electrical Engineering*, Massachusetts, USA 2007,

[4] Duško Bekut – *Relejna zaštita* – Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad 2009.

### Kratka biografija:



**Nemanja Mihajlov** je rođen u Zrenjaninu 1994. god. Diplomirao je na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektrotehnike i računarstva – Elektroenergetski sistemi 2017. godine i nakon toga upisao master studije na istom fakultetu.