

**KOORDINACIJA PREKOSTRUJE ZAŠTITE SA INVERZONOM KARAKTERISTIKOM REAGOVANJA U DISTRIBUTIVNOJ MREŽI****COORDINATION OF OVERCURRENT PROTECTION WITH INVERSE CHARACTERISTIC IN DISTRIBUTION NETWORK**Viktor Trifunjagić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

**Kratak sadržaj** – Ovaj rad bavi se problemom podešenja relejne zaštite na distributivnom vodu. Korišćene su prekostrujna zaštita sa inverznom karakteristikom reagovanja sa različitim stepenom inverznosti i topljivi osigurači. Zatim je vršena provera koordinacije između zaštita u dve situacije. Prvi slučaj je kada su u mreži samo releji, dok je druga situacija kada je korišćena kombinacija releja i topljivih osigurača. Na kraju je izvršena provera koordinacije u realnim mrežama.

**Ključne reči:** zaštitni releji, topljivi osigurači, prekostrujna zaštita, distributivna mreža

**Abstract** – This paper deals with adjustment of relay protection on distribution feeder. Protection relays with different types of inverse characteristics are being used, as well as fuses. It is checked if coordination between the protections is being satisfied in two cases. The first situation covers the case of protection by relays only, while the second situation covers the protection combination of relays and fuses. In the end, it is checked coordination of protection in real networks.

**Keywords:** protection relays, fuses, overcurrent protection, distribution network

**1. UVOD**

Kvarovi u elektroenergetskom sistemu predstavljaju poremećeno stanje mreže i veoma su česta pojava. Velika razorna moć kvara predstavlja opasnost po opremu koja se nalazi u sistemu, kao i po potrošače koji ostaju bez napajanja. Zbog karaktera kvarova i njihove učestale stohastične prirode, zaštita elektroenergetskih sistema je postala sastavni deo svakog prenosnog i distributivnog sistema. Zadatak zaštite je sprečavanje nastanka kvarova ili njihovo što kraće uklanjanje. Kako se tehnologija razvijala, tako se razvijao sve veći broj različitih vrsta zaštite. Najčešće korišćene zaštite su prekostrujni releji i topljivi osigurači. Princip delovanja navedene zaštite je da će reagovati za određeno vreme kada struja koja prolazi kroz poziciju na koju su postavljeni releji premaši podešenu vrednost. Jedna od važnih osobina zaštite jeste i odgovarajući izbor njene pozicije u sistemu i potrošačkom području pošto će zaštite svojim reagovanjem, ostaviti taj deo bez napajanja.

**NAPOMENA:**

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Duško Bekut, redovni profesor.

Kako bi se uvek isključio najmanji mogući broj potrošača, postavlja se više nivoa zaštite u mrežama. Međutim, prednost koja se dobija postavljanjem više nivoa zaštite se gubi ako ta zaštita nije dobro koordinisana.

U drugom delu rada je su kratko predstavljene distributivne mpeže, dok je u trećem dat pregled modela elemenata distributivne mreže. U četvrtom delu su analizirani primeri koordinacije mreže. U poslednja dva dela su dati zaključak i literatura korišćena za pisanje ovog rada.

**2. DISTRIBUTIVNE MREŽE**

Distributivna mreža služi za distribuciju električne energije do krajnjih potrošača, te na nju mogu biti priključene manje elektrane iz kojih distributivna mreža preuzima deo električne energije. Takođe preuzima električnu energiju iz prenosne mreže u transformatorskim stanicama sa 110/35, 30, 20 ili 10 kV [1].

Kao glavne karakteristike distributivne mreže mogu se istaći sledeće karakteristike:

- 1) Kod distributivnih mreža prenos snage se odvija na manje udaljenosti.
- 2) Izvedba distributivnih mreža je jednostavnija od prenosnih bez obzira što se sastoje od istih elemenata zbog toga što su projektovane na manje nazivne napone.
- 3) Niskonaponske i srednjenaponske mreže nemaju mogućnost dvostrukog napajanja.
- 4) U distributivnoj mreži radi uštede nemaju svi elementi svoju zaštitu ni prekidače. Nakon kratkog spoja (KS) potrošač imaju prekid napajanja u trajanju od 0.5 pa čak do 8 i više časova.

Što se tiče osnovne strukture srednjenaponske distributivne mreže, ona može biti izvedena sa dva naponska nivoa, najčešće 35-10 kV ili sa naponom od 20 kV. Distribucija električne energije prema niskom naponu se odvija pomoću preko transformacije 10-0.4 kV ili 20-0.4 kV.

**2.1. PRORAČUN STRUJA KRATKIH SPOJEVA U DISTRIBUTIVNOJ MREŽI**

Prema [2] pojava kratkih spojeva u distributivnoj mreži je neizbežna iz tog razloga što izolacija elemenata ne može da bude 100% pouzdana. Dakle, mora se unapred predvideti mogućnost pojave kvara i preduzeti odgovarajuće mere da bi se negativne posledice svele na po ljude bezopasan nivo, ali i na ekonomski opravdanu meru.

Kratak spoj (KS) kao tip kvara može da bude simetričan trolpolni (3pKS) i nesimetričan dvopolni (2pKS), dvopolni sa zemljom (2pKS) i jednopolni (1pKS). Jednopolni KS je u praksi najčešći. Trolpolni KS su praćeni najintezivnijim strujama KS. Prekidne moći savremenih prekidača koji se primenjuju su date u tabeli 2.1.

Tabela 2.1. – Prekidne moći prekidača

| Un[kV]        | Prekidna moć[kA] | In[kA]        |
|---------------|------------------|---------------|
| 10            | 12 ... 25        | 400 ... 2500  |
| 20            | 12 ... 16        | 800 ... 1250  |
| 110           | 18 ... 39        | 630 ... 2000  |
| SF6 prekidači |                  |               |
| 110           | 40               | 2000 ... 3150 |

Distributivne mreže prema [3] u većini slučajeva, u normalnom režimu rade kao radijalne, a vrlo retko kao slaboupetljane.

## 2.2. RELEJNA ZAŠTITA U DISTRIBUTIVNOJ MREŽI

Ono što jeste jedan od osnovnih ciljeva i uloge relejne zaštite u DM (distributivnoj mreži) jeste da se elementi najbrže moguće isključe ili/i deo sistema sa kvarom, ali uz očuvanje funkcionalnosti ostalog dela sistema. Zahtevi koji se prema [4] trebaju ispoštovati radi ispunjenja ovog cilja su sledeći:

- 1) Selektivnost.
- 2) Brzina reagovanja.
- 3) Osetljivost.
- 4) Pouzdanost i sigurnost.
- 5) Jednostavnost.
- 6) Ekonomičnost.

## 3. MODELI ELEMENATA U DISTRIBUTIVNOJ MREŽI

Pod modelom elementa EES ili celog sistema podrazumeva se manje ili više uprošćena predstava tog elementa ili sistema koja je pogodna za simulaciju različitih pojava koje se dešavaju na elementu ili u sistemu. Razlikuju se matematički i fizički modeli. U matematičkim modelima pojave se opisuju matematičkim relacijama ili jednačinama, kojima se nastoji što vernije očuvati sličnost sa pojavama na objektima koji se proučavaju.

Fizički model u direktnom smislu predstavlja redukciju stvarnog objekta ili sistema, pri čemu model treba da je takav da očuva identičnu vezu između pojedinih elemenata objekta, odnosno sistema kakva postoji u realnosti, ili, drugim rečima, mora se očuvati visoki stepen sličnosti između modela i realnog objekta, odnosno sistema.

### 3.1. MODEL VODA

Vodovi su elementi elektroenergetskog sistema namenjeni prenosu i distribuciji ("transportu" i "raspodeli") napona i električne energije [5]. Postoje dve vrste vodova: nadzemni (vazdušni) i kablovski (kablovi). Osnovni nominalni podaci za vodove su pogonski parametri voda:  $R$ ,  $L$ ,  $G$ ,  $C$ , dužina voda  $l$ , kojima su pridruženi nominalni linijski napon  $V_n$  i nominalna struja voda  $I_n$ .

Nominalni napon i struja određuju nominalnu snagu voda:

$$S_n = 3U_n I_n = \sqrt{3}V_n I_n. \quad (3.1)$$

### 3.2. MODEL TRANSFORMATORA

U cilju efikasnog prenosa velikih snaga sa održavanjem gubitaka aktivne snage i energije na tolerantnom nivou, neophodno je u EES-u prenos električne energije realizovati na visokim naponima [5]. Ovako visoke napone nemoguće je ostvariti na naponskom nivou proizvodnje električne energije, pošto raspoloživi izolacioni materijali ograničavaju naponske nivoe u generatoru na granici od 25 kV, već se traženi visoki naponi proizvode u transformatorima.

### 3.3. MODEL PREKOSTRUJNOG RELEJA

Relej je naprava koja se koristi za prekidanje ili uspostavljanje strujnog kola putem elektromagneta koji otvara i zatvara strujne kontakte [6]. Elektromagnet se obično sastoji od mnogobrojnih namotaja bakrene žice na železnom jezgru. Kada struja teče kroz žicu (primarno strujno kolo), oko elektromagneta se stvara magnetno polje koje privlači železnu kotvu. Kotva nosi na sebi električne kontakte, koji onda otvaraju ili zatvaraju sekundarno strujno kolo (strujni krug). Kada se prekine struja kroz elektromagnet, elektromagnet više ne privlači železnu kotvu, i ona se vraća u početni položaj, obično uz pomoć opruge. Time električni kontakti prekidaju ili uspostavljaju strujno kolo, u zavisnosti od tipa kontakata (Normalno otvoreni/Normalno zatvoreni).

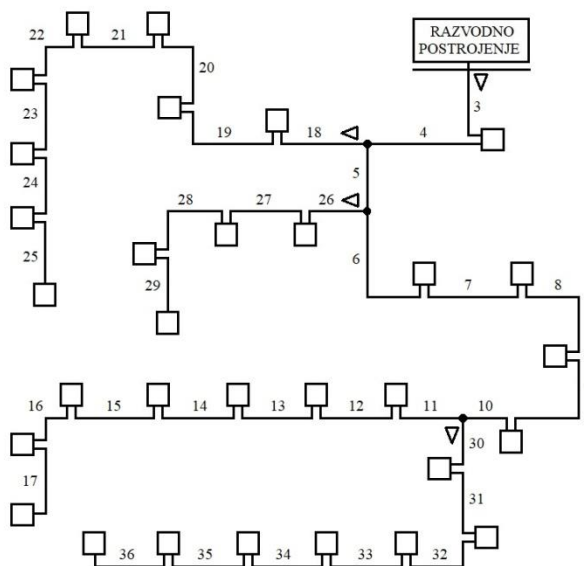
### 3.4. TOPLJIVI OSIGURAČI

Postoje dve vrste osigurača i to su niskoučinski, koji sadrže brze ili spore topljive umetke i visokoučinski, čiji umeci imaju završetke u vidu noževa. Maksimalna podnosiva struja, odnosno prekidna moć svih navedenih umetaka je nezavisna od nazivne struje umetka, koja iznosi čak 50 kA [7]. Glavni deo jednog topljivog osigurača je topljivi umetak ili drugim rečima patrona, koja sadrži posebno dimenzionisan elektroprovodni deo čiji se topljenjem ostvaruje prekidanje prevelike struje. Na taj način se vrši zaštitna funkcija ovih elemenata.

## 4. PRIMERI ZAŠTITE MREŽE

Test mreža je prikazana na slici 4.1. Potrošači su na slici predstavljeni kvadratima, dok su ekvivalent napojne mreže i transformator 35/10 kV/kV predstavljeni blokom "razvodno postrojenje".

Za potrebe analiza u ovom radu razvijena je jednostavna programska podrška. Ona se koristi za sve proračune. Prvo će biti testirana mreža koja sadrži samo releje sa strujno zavisnom karakteristikom, a zatim će biti testirana mreža koja sadrži relej sa strujno zavisnom karakteristikom i osigurače na lateralnim izvodima (mesta ugradnje označene malim trouglovima na slici 4.1).



Slika 4.1. – Test mreža

Test mrežu čini ekvivalent napojne mreže (snaga tropolnog kratkog spoja 750 MVA), transformatorska stanica 35/10 kV/kV (jedan transformator 20 MVA; uk=6%) i jedan izvod 10 kV Cu 95 mm<sup>2</sup> sa tri ogranka. Fider je podeljen na sekcije, na čijem svakom kraju se nalazi potrošački centar, pri čemu je svaka sekcija numerisana.

#### 4.1. ZAŠTITA MREŽE RELEJIMA SA INVERZONOM KARAKTERISTIKOM

U ovom potpoglavlju se analizira situacija kada su na sekcijama 3, 18, 26 i 30 postavljeni releji sa strujno zavisnom karakteristikom reagovanja. Na osnovu vrednosti struja u normalnom radnom režimu, struje releja proračunavaju se na sledeći način:

$$I_{pod} = \frac{k_{sigurnosti} \cdot k_{samouustanja} \cdot I_{radno}}{a}, \quad (4.1)$$

gde je:

$k_{sigurnosti}$  – koeficijent sigurnosti (tipično 1.2),

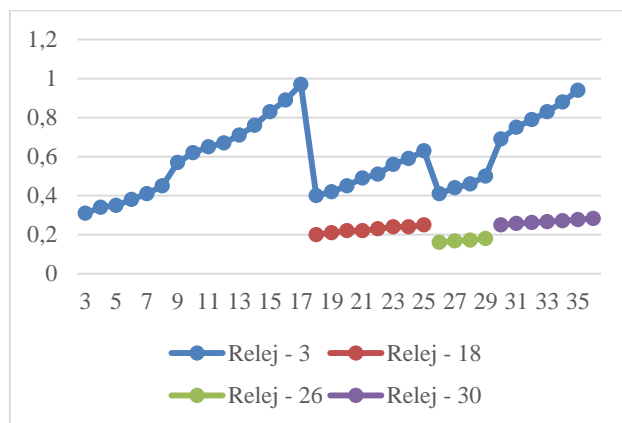
$k_{samouustanja}$  – koeficijent samo puštanja (1-6),

$a$  – koeficijent otpuštanja,

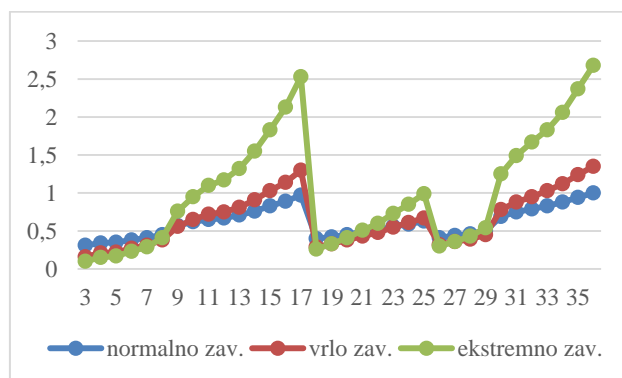
$I_{radno}$  – radna struja.

Na osnovu formule i usvojenih vrednosti koeficijenata se mogu izračunati struje podešenja releja na sekcijama 3, 18, 26 i 30, pri čemu one iznose 1230 A, 250 A, 110 A i 220 A, respektivno. Analiziraju se situacije kada je karakteristika releja: normalno zavisna, vrlo zavisna, ekstremno zavisna i vrlo dugo zavisna. Na slici 4.2. su prikazani releji sa normalno zavisnom karakteristikom.

Sa slike se može primetiti da je vreme reagovanja releja duže udaljavanjem mesta kvara od ekvivalenta napojne 35 kV mreže. Takođe se može zaključiti da su vremena reagovanja releja na lateralima kraća od vremena reagovanja releja na sekciji 3 za minimum 0,2 s, što znači da je uslov selektivnosti ispunjen – uvek će pre reagovati relej koji je bliže kvaru. Slični zaključci se mogu zaključiti i za ostale tipove karakteristika releja. Na slici 4.3. prikazane su sve karakteristike reagovanja releja sa strujno zavisnom karakteristikom koji je dat u delu 3.



Slika 4.2. – Releji sa normalno zavisnom karakteristikom



Slika 4.3. – Poređenje karakteristika reagovanja releja iz sekcije 3

Sa grafika 4.3. se može videti da releji sa većim stepenom zavisnosti reaguju brže za veće struje kvara (kvarovi bliže razvodnom postrojenju), a sporije za niže vrednosti struje kvara (kvarovi koji su u dubini mreže).

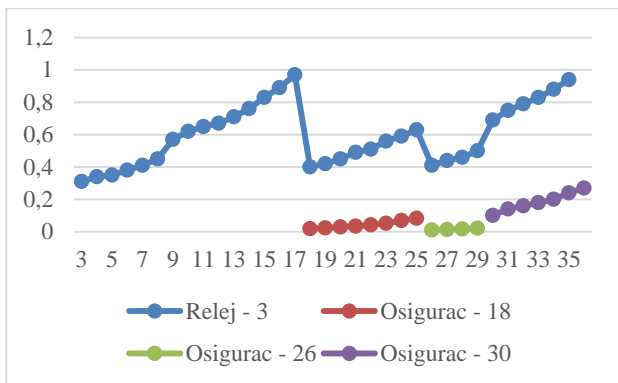
#### 4.2. ZAŠTITA MREŽE RELEJIMA SA INVERZONOM KARAKTERISTIKOM I OSIGURAČIMA

U ovom potpoglavlju će biti analizirana situacija kada je na sekciji 3 postavljen relej za inverznom karakteristikom reagovanja, dok će na sekcijama 18, 26 i 30 biti postavljeni osigurači. Nominalne struje osigurača će se izabrati na sledeći način:

$$I_{min,pod} = k_{sigurnosti} \cdot I_{max,radno}. \quad (4.2)$$

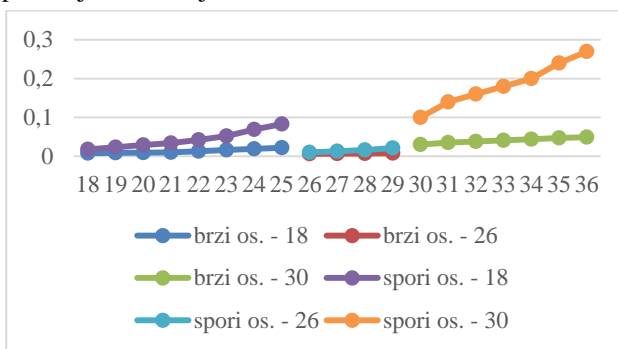
Minimalne podešene vrednosti struja osigurača iznose 205 A, 92 A i 180 A, zbog čega su izabrati osigurači sa nominalnim strujama od 100 A, u sekciji 26, i 200 A, u sekcijama 18 i 30. Analiziraju se situacije kada relej ima različite vrste inverznih karakteristika dok su osigurači sa brzim i tromim umetkom. Na slici 4.4. je prikazana koordinacija releja i osigurača sa tromim umetkom.

Sa slike 4.4 se može primetiti da su vremena reagovanja osigurača na lateralima kraća od vremena reagovanja releja na sekciji 3 za minimum 0,3 - 0,4 s, što znači da je uslov selektivnosti ispunjen – uvek će pre reagovati relej koji je bliže kvaru iz čega se može zaključiti da je zaštita dobro koordinisana.



Slika 4.4. – Koordinacija releja sa normalno zavisnom karakteristikom i osigurača sa tromim umetkom

Na slici 4.5. prikazane su karakteristike reagovanja osigurača sa tromim, odnosno brzim umetkom, koji su postavljani u sekcijama 18, 26 i 30.



Slika 4.5. – Poređenje karakteristika reagovanja osigurača sa brzim i tromim umetkom

#### 4.3. ZAŠTITA REALNIH MREŽA

Analizira se realna elektroenergetska mreža. Svi parametri i podaci o mreži su isti kao i podaci o test mreži koja je opisana u poglavlju 4.1. Osim svega navedenog, u realnim mrežama postoji i zaštita potrošačkih područja. Potrošačka područja se štite osiguračima od 100 A koji se nalaze ispred elektroenergetskog transformatora 10/0,4 kV/kV. U situacijama kada osim releja na glavnom izvodu i releja ili osigurača na lateralnim izvodima postoji i osigurač ispred potrošačkog centra, potrebno je izvršiti proveru usaglašenosti vremena reagovanja svih zaštitnih uređaja. Zaštitni uređaj koji je, gledajući prema napojnoj transformatorskoj stanici, najbliži mestu kvara bi trebao da ima najkraće vreme reagovanja.

Na lateralnom izvodu 18-25 najmanja struja koja prolazi kroz relej u sekciji 18 se dobija kada se kvar desi u čvoru 25. Osigurač u potrošačkom području 25 će videti kvar na niskonaponskim sabirnicama tog transformatora, što je ekvivalentno struji kvara u čvoru 25 i ta struja iznosi 3,69 kA. Tromi osigurač od 100 A u potrošačkom području 25 će odreagovati za 0,01 s pri navedenoj struji kvara. Struja reagovanja releja na sekciji 18 pri kvaru u čvoru 25 za:

- 1) normalnu karakteristiku iznosi 0,253 s,
- 2) vrlo zavisnu karakteristiku iznosi 0,098 s,
- 3) ekstremno zavisnu karakteristiku iznosi 0,037 s.

Može se zaključiti da je za sve tipove karakteristika zaštita dobro koordinisana jer u svim situacijama osigurač ispred potrošačkog područja reaguje pre releja u sekciji 18.

## 5. ZAKLJUČAK

U radu je izvršeno podešenje i provera koordinacije različitih tipova zaštite u test mreži. Zaštita je postavljena na samom početku distributivnog voda i na svakom njegovom lateralnom izvodu. Podešenje zaštite je izvršeno na osnovu proračunatih struja u normalnom radnom režimu, a zatim su određivana vremena reagovanja zaštite na osnovu struja kratkog spoja u svakom od čvorova mreže. Ispitivanje koordinacije je vršeno po principu zadovoljenja uslova da zaštita koja je bliže kvaru ima kraće vreme reagovanja od zaštite koja je dalje od kvara. Na samom vrhu distributivnog voda se nalazi prekostrujni relej dok su na izvodima analizirane situacije kada se nalaze prekostrujni releji i topljivi osigurači. Analizom situacija su izvedeni sledeći zaključci:

- 1) Vreme reagovanja releja je duže udaljavanjem mesta kvara od pozicije releja u mreži.
- 2) Vremena reagovanja zaštite na lateralima su kraća od vremena reagovanja releja na početku distributivnog voda za minimum 0,2 s, što znači da je uslov selektivnosti ispunjen.
- 3) Releji sa većim stepenom inverznosti reaguju brže za veće struje kvara (kvarovi bliže razvodnom postrojenju), a sporije za niže vrednosti struje kvara (kvarovi koji su u dubini mreže).
- 4) Povećanjem dužina vodova oblast zaštite se smanjuje.
- 5) Osiguraču sa brzim umetkom potrebno je manje vremena da odreaguje od osigurača sa tromim umetkom. Oba tipa se mogu upotrebiti za zaštitu u ovom primeru.

## 5. LITERATURA

- [1] N. Rajaković, D. Tasić, G. Savanović, *Distributivne i industrijske mreže*, Beograd, 2004.
- [2] M. Nimrihter, *Elektrodistributivni sistemi*, FTN Izdavaštvo, Novi Sad, 2009.
- [3] N. Rajaković, D. Tasić, *Distributivne i industrijske mreže*, Akademska misao, Beograd, 2008.
- [4] D. Bekut, *Relejna zaštita*, FTN Izdavaštvo, Novi Sad, 2009.
- [5] V.C.Strezoski, *Osnovi elektroenergetike*, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad, 1996.
- [6] Releji – teorija upravljanja, <https://www.automatika.rs/bazaznanja/teorijaupravljanja/releji.html>
- [7] M. Milanković, D. Perić, I. Vlajić-Naumovska, *Osnovi elektroenergetike*, Beograd, 2016.

### Kratka biografija:



**Viktor Trifunjagić** je rođen u Zrenjaninu 1995. godine. Osnovne studije je završila na Fakultetu tehničkih nauka 2018. godine na departmanu Elektrotehnika i računarstvo – Elektroenergetski sistemi. Master rad je odbranio 2019. godine, na istom fakultetu na smeru Elektroenergetski sistemi.