



## PRORAČUN PREKIDA FAZE U DISTRIBUTIVNOJ MREŽI

### ANALYSIS OF PHASE INTERRUPTION IN DISTRIBUTION NETWORKS

Mina Lakić, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad

#### Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO

**Kratak sadržaj** – U radu se razmatra prekid faze u radialnoj distributivnoj mreži. Cilj je da se izračunaju naponi i struje u distributivnoj mreži posle prekida faze. Razmatranja su ilustrovana na primeru jedne distributivne mreže 20kV sa 3 izvoda. Razvijeno je programsko rešenje za prekid faze u distributivnoj mreži koje omogućava interakciju sa korisnikom.

**Ključne reči:** prekid faze, fiktivno kolo, distributivna mreža

**Abstract** – This paper deals with phase interruption in radial distribution network. The goal is to calculate voltages and currents in distribution network after the phase has been interrupted. Considerations are illustrated on example with one 20kV distribution network and 3 feeders. Therefore, the software solution with graphical user interface has been developed, for one phase interruption in distribution network, which allows interaction with user.

**Keywords:** Phase interruption,  $\Delta$ -circuit, Distribution network

#### 1. UVOD

U radu se razmatra prekid faze u distributivnoj 20kV mreži. Da bi se na neki način predupredili takvi poremećaji u radu distributivne mreže, potrebno je analizirati takve poremećaje [1,2,3,4]. Ovakvi poremećaji su usloveli razvoj specijalizovanog algoritma za proračune režima sa prekidom faza u distributivnoj mreži.

Da bi se takav model i realizovao, u drugom delu teze se detaljno izvode sve potrebne jednačine za opis režima sa prekidom faza na samom mestu prekida.

U trećem delu rada je započeto sa rešavanjem prethodno definisanog problema proračuna režima sa prekidom faza u distributivnoj mreži.

U četvrtom delu se generalizuju razmatranja iz drugog dela i uz uvažavanje modela distributivne mreže iz trećeg dela izvodi se odgovarajući model za proračun režima sa prekidom faza u radialnoj mreži i daje se odgovarajući algoritam za proračun.

U petom delu je dat primer proračuna režima sa prekidom faza u radialnoj mreži, dok je u šestom delu dat zaključak.

#### NAPOMENA:

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

#### 2. OPŠTA RAZMATRANJA U VEZI SA PRORAČUNOM REŽIMA SA PREKIDOM FAZA

U ovom delu će biti analizirani „čisti“ prekidi jedne faze u distributivnoj mreži. Za početak se uvode dve pretpostavke kojima se obezbeđuju određena pojednostavljena koja su pogodna za izvođenja koja slede, a koja kasnije neće predstavljati smetnju da se izvrši eventualna generalizacija.

Te pretpostavke su:

1. Da su prekidi faza koji se događaju potpuni.

Odnosno, da se admitansa nulte brojne vrednosti nalazi na mestu prekida između tačaka prekida.

2. Da se prekidi faza događaju na krajevima grana.

Cilj ovih razmatranja je da se detaljno opiše režim na mestu prekida i da se za prekid jedne faze u radialnoj mreži izvedu svi izrazi od interesa, a da se u narednim delovima rada na osnovu ovih izvođenja daju izrazi za proračune za prekide u proizvoljno izabranoj jednoj fazi, pa je za analize koje slede izabrana faza L1.

#### 2.1. Osnove proračuna režima sa prekidom faza

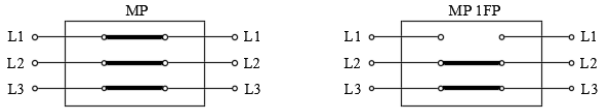
Proračun ustaljenog režima sa prekidom faza globalno se sastoji od dva koraka:

1. Primenom principa superpozicije/dekompozicije režima linearnih kola, režimi distributivne mreže sa kvarom se razlažu – dekomponuju na režim iste distributivne mreže pre kvara i režim tzv. fiktivnog kola. Trofazni simetrični režim distributivne mreže pre kvara se smatra poznatim. Režim fiktivnog kola je, u opštem slučaju, trofazan nesimetričan, sa nesimetrijom istog karaktera kao nesimetrija distributivne mreže sa kvarom. Osnovna pogodnost fiktivnog kola je u njegovoj pasivnosti (nepostojanja naponskih i strujnih izvora) u svim tačkama osim mesta kvara.
2. Proračun nesimetričnog trofaznog režima fiktivnog kola primenom metode simetričnih komponenti. Ovde se trofazno fiktivno kolo sa nesimetričnim režimom, primenom pomenute metode, razlaže na tri trofazna kola sa direktnim, inverznim i nultim režimima. Svako od njih, s obzirom na simetričnost njegovog režima, prikazuje se pofazno. To je omogućeno uvođenjem pretpostavke o uravnoteženosti svih trofaznih elemenata distributivne mreže.

Fiktivno trofazno kolo čine uravnoteženi trofazni elementi i potrošači, a neuravnoteženost unosi samo mesto prekida. Razmatra se slučaj prekida faza isključivo na krajevima trofaznih elemenata, pa prekid ne remeti uravnoteženost elemenata koji konstituišu distributivnu mrežu.

## 2.2. Prikaz i definicija prekida faze

U razmatranjima koja slede analiziraju se „čisti“ jednofazni prekidi faza (bez dodatnih impedansi između tačaka prekida). Topološki prikaz mesta prekida faza pre nastanka kvara, kao i pomenuti kvar – dat je na slici 2.2.



Slika 2.2. – Topološki prikaz prekida faze:  
a – mesto prekida pre nastanka prekida (MP)  
b – jednofazni prekid faze L1 (MP 1FP)

Ako se umesto topologije prekida MP postavi topologija bilo kog prekida MPX (prekid jedne 1FP, dve 2FP ili tri faze 3FP), dobije se distributivna mreža sa prekidom faze izabranog tipa u grani između čvorova k i ustanovljenog čvorova m. Ovakav slučaj prikazan je na slici 2.3. Na njoj su sa  $u_{L1k}^p, u_{L2k}^p, u_{L3k}^p$ , odnosno  $u_{L1m}^p, u_{L2m}^p, u_{L3m}^p$ , označeni fazori faznih napona čvorova k i m, respektivno (indeks „p“ – posle kvara). Sa  $i_{L1k}^p, i_{L2k}^p, i_{L3k}^p$ , odnosno sa  $i_{L1m}^p, i_{L2m}^p, i_{L3m}^p$ , fazori injektiranih struja (iz mesta prekida) u čvorove k i m, respektivno. Sa  $i_{L1}^p, i_{L2}^p, i_{L3}^p$ , označeni su fazori struja kroz mesto prekida posle prekida (različiti od nulte brojne vrednosti samo u fazama u kojima nije došlo do prekida):

$$\begin{aligned} i_{L1}^p &= -i_{L1k}^p = i_{L1m}^p \\ i_{L2}^p &= -i_{L2k}^p = i_{L2m}^p \\ i_{L3}^p &= -i_{L3k}^p = i_{L3m}^p \end{aligned} \quad (2.1)$$

Matematički opis topologije prekida – definicija prekida data je izrazom 2.2:

$$\begin{aligned} H_1[u_{L1k}^p, u_{L2k}^p, u_{L3k}^p, u_{L1m}^p, u_{L2m}^p, u_{L3m}^p, i_{L1}^p, i_{L2}^p, i_{L3}^p] &= 0, \\ H_2[u_{L1k}^p, u_{L2k}^p, u_{L3k}^p, u_{L1m}^p, u_{L2m}^p, u_{L3m}^p, i_{L1}^p, i_{L2}^p, i_{L3}^p] &= 0, \\ H_3[u_{L1k}^p, u_{L2k}^p, u_{L3k}^p, u_{L1m}^p, u_{L2m}^p, u_{L3m}^p, i_{L1}^p, i_{L2}^p, i_{L3}^p] &= 0. \end{aligned} \quad (2.2)$$

Specifikacija linearnih zavisnosti,  $H_1$ ,  $H_2$  i  $H_3$  saglasno topologiji prekida (slika 2.2.), za prekid faze, data je u tabeli 2.1:

Tabela 2.1. Matematički opis prekida faze između čvorova k i m

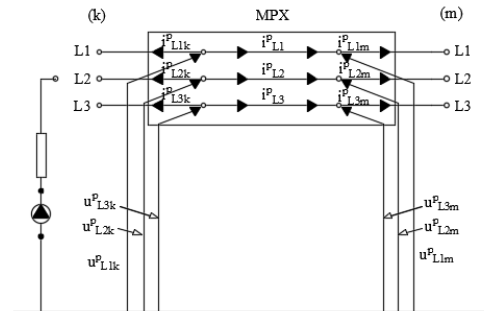
Tip prekida faza funkcije	Prekid jedne faze (faza L1)
$H_1$	$i_{L1}^p = 0$
$H_2$	$u_{L2k}^p - u_{L2m}^p = 0$
$H_3$	$u_{L3k}^p - u_{L3m}^p = 0$

Izrazi specificirani u tabeli 2.1 predstavljaju definiciju prekida jedne faze.

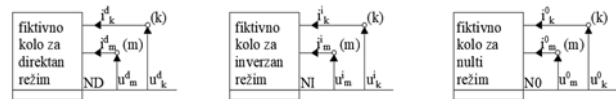
## 2.3. Dekompozicija režima sa prekidom faza na režim pre kvara i režim fiktivnog kola

U opštim izlaganjima iznetim u ovoj glavi, nagoveštene su dve dekompozicije režima sa prekidom faze, na kojim se zasniva proračun tih režima. U ovom delu je reč o prvoj od dve dekompozicije, koja se odnosi na dekompoziciju nesimetričnog trofaznog režima sa

prekidom faze na poznati simetričan režim pre nastanka prekida i nesimetrični režim u fiktivnom trofaznom kolu. Ako se pođe od globalnog prikaza distributivne mreže, sa prekidom faze, datog na slici 2.3, njen se režim neće promeniti ako se između tačaka gde se dešava prekid faze (čvorovi k i m), paralelno sa topologijom prekida, ustanove nulti (po brojnoj vrednosti) idealni strujni izvori prikazani na slici 2.4.



Slika 2.3 – Globalni prikaz mreže sa prekidom faza X između čvorova m i k ( $X = 1FP, 2FP, 3FP$ )



Slika 2.4 – Ekvivalentni sistem sistema sa prekidom faze

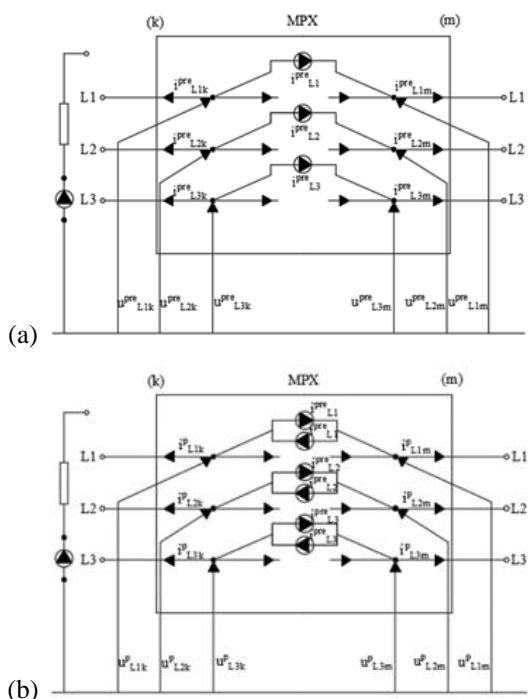
Kolo sa slike 2.4 zajedno sa svojim režimom, može se prikazati pomoću 2 kola. Prvo je dobijeno iz razmatrane distributivne mreže sa prekidom faze (slika 2.4) zapažajući identičnu topologiju i sve idealne naponske izvore, uz tri idealna strujna izvora u sve tri faze između tačaka prekida k i m, usmerena od čvorova k ka čvoru m. Preostala tri strujna izvora su prekinuta.

Ako je određena faza u prekidu, ta je struja jednaka nuli, a struja između čvorova k i m, jednaka sa onom pre prekida, obezbeđuje odgovarajući idealni strujni izvor. Za fazu koja nije u prekidu, ta je struja jednaka odgovarajućoj struji pre prekida u toj fazi, a odgovarajući strujni izvor ne igra nikakvu ulogu.

Drugo kolo – fiktivno, dobija se takođe zapažanjem topologije osnovnog kola (slika 2.4), kratkim spajanjem svih idealnih naponskih izvora i prekidanjem sva tri strujna izvora koji postoje u prethodnom kolu, a zapažanjem samo tri preostala idealna strujna izvora između tačaka prekida, usmerena od čvorova m ka čvoru k. Struje kroz mesto prekida u ovom kolu su obeležene sa  $i_{L1}, i_{L2}, i_{L3}$ .

Vrednosti struja u grani sa prekidom faze dati su izrazima 2.3:

$$\begin{aligned} i_{L1k}^p &= i_{L1k}^{\text{pre}} + i_{L1k} = -i_{L1}^{\text{pre}} + i_{L1k}, \\ i_{L1m}^p &= i_{L1m}^{\text{pre}} + i_{L1m} = i_{L1}^{\text{pre}} + i_{L1m}, \\ i_{L2k}^p &= i_{L2k}^{\text{pre}} + i_{L2k} = -i_{L2}^{\text{pre}} + i_{L2k}, \\ i_{L2m}^p &= i_{L2m}^{\text{pre}} + i_{L2m} = i_{L2}^{\text{pre}} + i_{L2m}, \\ i_{L3k}^p &= i_{L3k}^{\text{pre}} + i_{L3k} = -i_{L3}^{\text{pre}} + i_{L3k}, \\ i_{L3m}^p &= i_{L3m}^{\text{pre}} + i_{L3m} = i_{L3}^{\text{pre}} + i_{L3m}. \end{aligned} \quad (2.3)$$



Slika 2.5. Dekompozicija režima distributivne mreže sa prekidom faze na: a – sistem – režim pre nastanka prekida faze; b – fiktivno kolo

#### 2.4. Dekompozicija fiktivnog kola sa nesimetričnim režimom na tri kola sa simetričnim režimom

Pri proračunu režima sa prekidom faze iz mesta kvara u trofazni fiktivni sistem se „gleda“ iz dva čvora k i m između kojih se dešava prekid faze. Trofazno fiktivno kolo se može prikazati pomoću tri monofazna kola koja su svuda raspregnuta osim na mestu prekida faze, kao na slici 2.6.

$$\mathbf{u}_j^{d,i,0} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{u}_j, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (2.5)$$

$$\mathbf{i}_j^{d,i,0} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{i}_j, \quad j = 1, 2, \dots, n,$$

Slika 2.6 – Rasprezanje trofaznog fiktivnog kola sa nesimetričnim režimom na tri trofazna, pofazno prikazana kola: a – direktnog, b – inverznog i c – multog režima

Za transformaciju faznih veličina u simetrične komponente koristi se sledeća matrica:

$$\mathbf{A} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad a = e^{j\frac{2\pi}{3}}, \quad (2.7)$$

Za simetrične komponente fazora injektiranih struja u čvorove fiktivnog kola važi:

$$\mathbf{i}_j^{d,i,0} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{i}_j \begin{cases} = [0], & \text{za } j \neq k, m, \\ \neq [0], & \text{za } j = k, m, \end{cases} \quad (2.9)$$

Tabela 2.2 – Specifikacija – matematički opis prekida faze u trofaznom fiktivnom kolu sa prekidom između čvorova k i m

Tip prekida faze funkcije	Prekid jedne faze (faza L1)
H <sub>1</sub>	i <sub>L1</sub> = 0
H <sub>2</sub>	u <sub>L2k</sub> - u <sub>L2m</sub> = 0
H <sub>3</sub>	u <sub>L3k</sub> - u <sub>L3m</sub> = 0

Fazori napona i injektiranih struja u čvorovima između kojih nastaje prekid faze transformišu se u simetrične komponente na sledeći način:

$$\mathbf{u}_k^{d,i,0} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{u}_k, \quad (2.11)$$

$$\mathbf{u}_m^{d,i,0} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{u}_m,$$

$$\mathbf{i}_k^{d,i,0} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{i}_k,$$

$$\mathbf{i}_m^{d,i,0} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{i}_m,$$

### 3. MATEMATIČKI MODEL MREŽE

Neophodno je za svako potencijalno mesto prekida izračunati odgovarajuće ekvivalentne admitanse koje se “vide” iz tog čvora ka ostatku kola. Pri konstruisanju matematičkog modela potrebno je, dakle, proračunati potrebne ekvivalente, a tako izračunati ekvivalenti efikasno se koriste za proračun režima (struja i napona) u proizvoljno odabranom lokalnom kolu.

### 4. PRORAČUN REŽIMA SA PREKIDOM FAZA

U izlaganju koje sledi daju se odgovarajući izrazi i postupci za proračun režima sa prekidom faza, na osnovu matematičkog modela mreže.

#### 4.1. Proračun režima sa prekidom faza u radijalnom kolu

Proračun režima sa prekidom faze se sastoji iz dva dela:

1. Proračun režima sa prekidom na mestu prekida,
2. Proračun režima u lokalnom kolu.

##### 4.1.1. Proračun režima na mestu prekida

Kada se raspoložuje sa ekvivalentnim admitansama koje se vide iz čvora ka korenu (y<sub>u</sub>) i iz čvora ka poslednjem lejeru (y<sub>d</sub>) može se izračunati režim na mestu prekida.

$$y_{pe}^x(m) = \frac{y_u^x(m) \cdot y_d^x(m)}{y_u^x(m) + y_d^x(m)}, \quad x \in \{d, i, 0\} \quad (4.1)$$

Simetrične komponente napona u čvoru m sa jedne i druge strane prekida se izračunavaju:

$$u_m^d = i^d / y_u^d(m), \quad u_m^{d'} = -i^d / y_d^d(m),$$

$$u_m^i = i^i / y_u^i(m), \quad u_m^{i'} = -i^i / y_d^i(m), \quad (4.2)$$

$$u_m^0 = i^0 / y_u^0(m), \quad u_m^{0'} = -i^0 / y_d^0(m),$$

Za zadati tip prekida u m-tom čvoru, vrednosti simetričnih komponenti struja na mestu prekida faze su funkcija struje na mestu prekida faze pre prekida i<sup>pre</sup>, izračunate pri proračunu tokova snaga (izraz 4.3).

$$i^d = \frac{z^i z^0}{z^d z^i + z^d z^0 + z^i z^0} \cdot i^{pre}$$

$$i^i = \frac{z^d z^0}{z^d z^i + z^d z^0 + z^i z^0} \cdot i^{pre} \quad (4.3)$$

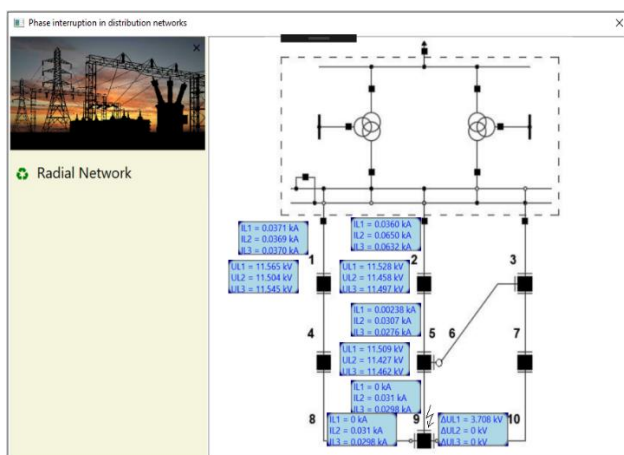
$$i^0 = \frac{z^d z^i}{z^d z^i + z^d z^0 + z^i z^0} \cdot i^{pre}$$

## 5. TEST PRIMER

U ovom delu teze prvo je dat opis test distributivne mreže, a zatim i primer proračuna prekida jedne faze (faze L1).

### 5.1. Opis test distributivne mreže

Razmatrana distributivna mreža prikazana je na slici 5.1. Ona se sastoji od jedne transformatorske stanice VN/SN<sub>1</sub>/SN<sub>2</sub> (110/20/10 kV/kV/kV) i sedam transformatorskih stanica SN/NN (20/0.4 kV/kV). Sve transformatorske stanice su povezane kablovskim deonicama. Transformatori VN/SN<sub>1</sub>/SN<sub>2</sub> su u paralelnom pogonu. Sekundari ovih transformatora su vezani za različite sabirnice, ali je spojno polje između tih sabirnica zatvoreno. Na slici je prikazan korisnički interfejs, program koji omogućava interakciju korisnika sa softverom. Moguće je zadati granu u kojoj se desio prekid faze L1, servis obradi proračun i na korisničkom interfejsu se vide rezultati. U softveru, u C# jeziku, je urađen prekid faze u deonici 9 i dati su rezultati u lokalnom kolu.



Slika 5.1 – Program kojim se računa prekid faze L1

Lokalno kolo čine čvorovi: 5, 2, 1 kao i grane: 9, 5, 2, 1. Kod mesta prekida koji se desio pri kraju grane 9, dati su rezultati struja i napona u sve tri faze. Vidi se da je struja u L1 fazi jednaka nuli, dok su naponi u zdravim fazama takođe nula kako je objasnjeno u teoriji iz glave 2. Simulacija poremećaja u softveru omogućava da se odrede vrednosti karakterističnih veličina kojima se opisuje rad distributivne mreže za vreme trajanja poremećaja.

## 6. ZAKLJUČAK

U radu je obrađen problem proračuna režima distributivne mreže sa prekidom faze. To je pre svega model za proračun režima u distributivnoj mreži koji se zasniva na proračunu ekvivalenata za svaki od čvorova mreže.

Radi se o veoma efikasnom modelu kojim se omogućuje generalno vrlo efikasan proračun, a zatim i vrlo efikasan proračun u proizvoljno izabranom delu mreže.

Matematički model je numerički potpuno stabilan, a vreme proračuna se linearno menja sa promenom dimenzije mreže.

Kada se proračun izvodi u radijalnim mrežama (a distributivne mreže su u najvećem broju slučajeva upravo radijalne) do izražaja dolazi još jedna inherentna pogodnost ovog modela, a to je da se kod proračuna režima sa prekidom faze ne mora uvoditi dodatni čvor na mestu prekida.

## 7. LITERATURA

- [1] N.Čupin: Spoj simetričnih sistema i strujne nesimetrije na transformatorima u slučaju prekida faze, *JUKO CIGRE*, Dubrovnik, 1970., ref. 41.29, str. 289-302.
- [2] E.Sterpin: Problem zaštite od uzdužnog kvara u izoliranim distributivnim zračnim mrežama, *Energija*, br. 9-10., 1973., str. 324-326.
- [3] V.Strezoski, G.Švenda, D.Bekut: Extension of the Canonical Model to Grounded Parts of Power System Under Fault Condition, *EPSR*, 2003.
- [4] D.Bekut, S.Kuzmanović: Proračun režima sa prekidom faza u radijalnoj distributivnoj mreži, *Elektroprivreda*, br. 4, 2002., str. 3-12.
- [5] D.Rajacic, R.Taleski: Two novel methods for radial and weakly-meshed network analysis, *Electric Power System Research*, 48, (1998), pp. 79-87

### Kratka biografija:



**Mina Lakić** rođena je u Novom Sadu 1994. godine. Master rad je odbranila 2019. godine na Fakultetu tehničkih nauka iz Elektrotehnike i računarstva – Elektroenergetski sistemi