

# UVAŽAVANJE NEIZVESNOSTI POTROŠNJE I PROIZVODNJE U PRORAČUNIMA TOKOVA SNAGA I KRATKIH SPOJEVA

## UNCERTAINTY CONSIDERATION OF CONSUMPTION AND PRODUCTION IN LOAD FLOW AND SHORT CIRCUIT CALCULATIONS

Predrag M. VIDOVIĆ, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija

Marko Z. OBRENIĆ, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija

Luka V. STREZOSKI, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija

Andrija T. SARIĆ, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija

### KRATAK SADRŽAJ

U distributivnim mrežama nalazi se veliki broj potrošača, kao i obnovljivih distribuiranih resursa – generatora, kao što su solarni, vetro, hidro generatori i drugi. I potrošači i generatori imaju neizvesnu potrošnju, odnosno proizvodnju, respektivno. Često je moguće uspostaviti korelacije između tih potrošnji i proizvodnji. Te korelacije definišu se preko faktora korelacija. Robusni proračuni u distributivnim mrežama moraju da uvažavaju te neizvesnosti koje su neodvojiv deo potrošnje i proizvodnje. U ovom radu data su dva osnovna proračuna distributivnih mreža – tokovi snaga i kratki spojevi, koji uvažavaju neizvesnosti potrošnje i proizvodnje. Rezultati tih proračuna dati su na dve vrste mreža, na test mreži sa 6 čvorova i na realnoj distributivnoj mreži sa 1003 čvora. Rezultati na tim mrežama pokazuju da se predloženi algoritmi mogu koristiti za proračune režima mreža kada postoje neizvesnosti potrošnje i proizvodnje, dok rezultati na realnoj distributivnoj mreži pokazuju da se ti algoritmi mogu koristiti i za velike distributivne mreže.

**Ključne reči:** distributivna mreža, tokovi snaga, kratki spojevi, neizvesnost, intervali.

### ABSTRACT

In distribution networks there are many energy consumers, as well as distributed energy resources – distributed generators, such as: solar, wind, small hydro and many others. Both energy consumers and generators have the uncertain consumption and production, respectively. Correlation between consumption and generation often can be established. The mentioned correlation should be defined with a correlation coefficient. Robust calculations in distribution networks need to consider the uncertainties that are an inseparable part of the consumption and generation. In this paper, two basic calculations in distribution networks are presented – load flow and short circuit calculations, with considered uncertainties of consumption and generation. Results of these calculations are presented on two networks, 6-bus test network and 1003-bus real distribution network. The results show that the proposed algorithms can be used for calculation of regime when uncertainties of the consumption and generation are present, while the results on the real distribution network show that the algorithms can also be performed on large-scale distribution networks.

**Key words:** distribution network, load flow, short circuits, uncertainty, intervals.

Predrag Vidović, pvidovic@uns.ac.rs

### 1. UVOD

Proračuni tokova snaga i kratkih spojeva su dva osnovna proračuna u distributivnim mrežama. Jako veliki broj drugih proračuna direktno je zasnovan na jednom od ova dva proračuna, kao što su rekonfiguracija mreže, naponsko-reaktivna optimizacija, relejna zaštita (koordinacija, podešavanje, osetljivost...), određivanje kapaciteta prekidača i osigurača itd. U literaturi postoji više algoritama za proračune tokova snaga i kratkih spojeva. U većini slučajeva to su deterministički proračuni. Međutim, u distributivnim mrežama postoji neizvesnost

proizvodnje i proizvodnje. Proračuni tokova snaga i kratkih spojeva distributivnih mreža moraju uvažiti pomenute neizvesnosti.

Tokovi snaga su neophodan alat za analizu, upravljanje i planiranje distributivnih mreža. Postoji više algoritama za proračune simetričnih tokova snaga u distributivnim mrežama: sumiranje struja [1], sumiranje snaga [2], sumiranje admitansi i struja [3] i mnogi drugi. S druge strane, nesimetrični tokovi snaga predstavljeni su u [4], [5]. Sve navedene reference su klasični proračuni tokova snaga, drugim rečima to su deterministički proračuni. Međutim, u distributivnim mrežama se nalazi sve veći i veći broj obnovljivih i distribuiranih resursa, kao što su farme vetrogeneratora, solarni paneli, male hidroelektrane itd [6]. Proizvodnja distribuiranih resursa je stohastična i oni unose značajnu neizvesnost u ukupnoj proizvodnji distributivnih mreža. Slično, potrošnje u tokovima snaga su često dobijene prognozom, pa samim tim i te potrošnje imaju naizvesnost. Stoga, tokovi snaga treba da uvažavaju neizvesnosti potrošnje i proizvodnje. Postoji nekoliko metodologija za tokove snaga koje uvažavaju pomenute neizvesnosti. Ref. [7] uvažava neizvesnosti potrošnje, cene električne energije i proizvodnje obnovljivih distribuiranih generatora. Distributivni tokovi snaga [8], [9] preko fazi logike uvažavaju neizvesnost potrošnje i proizvodnje.

U prenosnim sistemima proračuni kratkih spojeva su razvijeni i implementirani u poslednjih pedeset godina [10-12]. Ti proračuni se zasnivaju na faktorizaciji matrice admitansi. Broj čvorova u distributivnim mrežama je daleko veći od broja čvorova u prenosnim mrežama, što prouzrokuje matricu admitansi jako velikih dimenzija. Implicitna inverzija (faktorizacija) matrice admitansi je velika mana postupaka proračuna kratkih spojeva orijentisanih na čvorove [13, 14]. Distribuiranih energetski resursa koji su priključeni na distributivne mreže preko energetske elektronike je sve više širom sveta. Njih treba uvažiti u proračunima kratkih spojeva distributivnih mreža [15-18]. U ref. [19] u algoritam za proračun kratkih spojeva uključeni su svi tipove nadolazećih distribuiranih energetskih resursa. Zbog velike proizvodnje iz distribuiranih energetskih resursa, kao i potrošnje u distributivnim mrežama, može se reći da je priroda potrošnje i proizvodnje neizvesna. U algoritmima za proračune kratkih spojeva, za razliku od algoritama za proračune tokova snaga, naizvesnost potrošnje i proizvodnje nije uvažavana.

U ovom radu je neizvesnost potrošnje i proizvodnje predstavljena preko intervala. Takođe, uvažena je korelacija među intervalima. Tako predstavljena potrošnja i proizvodnja su direktno uključene u proračune tokova snaga i proračune kratkih spojeva distributivnih mreža.

Predloženi algoritmi za proračune tokova snaga i kratkih spojeva uvažavaju neizvesnosti proizvodnje i potrošnje u distributivnim mrežama. Promenljive koje sadrže neizvesnost prikazane su preko intervala, a uvažena je i korelacija među njima. Najvažniji doprinosi ovog rada su:

1. Uvažena je korelacija promenljivih koje predstavljaju potrošnju i proizvodnju;
2. Neizvesnosti i korelacije potrošnje i proizvodnje direktno su uključene u proračune tokova snaga i kratkih spojeva;
3. Konzervativnost intervala je redukovana uvažavanjem korelacije među promenljivim, pa su i rezultati realističniji.

Ostatak rada je organizovan na sledeći način: u glavi 2 dat je kratak pregled intervalne aritmetike, dok su u glavi 3 opisani modeli elemenata. U glavi 5 opisani su proračuni tokova snaga i kratkih spojeva koji uvažavaju neizvesnosti proizvodnje i potrošnje, dok su u glavi 6 dati rezultati i diskusija rezultata. U glavi 7 dati su zaključci.

## 2. OSNOVNE ARITMETIČKE OPERACIJE INTERVALA

Neka je promenljiva  $x$  predstavljena preko intervala  $x \in [\underline{x}, \bar{x}]$ , tada  $\underline{x}$  i  $\bar{x}$  predstavljaju donje i gornje ograničenje promenljive  $x$ . Intervali se predstavljaju na sledeći način [20, 21]:

$$x \in [x_m + \alpha_x \Delta L_x], \quad \alpha_x \in [-1, 1], \quad (2.1a)$$

gde su:

$$x_m = \frac{\underline{x} + \bar{x}}{2} \quad - \text{centar intervala}, \quad (2.1b)$$

$$\Delta L_x = \bar{x} - x_m = x_m - \underline{x} \quad - \text{polovina dužine intervala}, \quad (2.1c)$$

$$\alpha_x \quad - \text{realan broj između } -1 \text{ i } 1.$$

Aritmetičke operacije i njihove osobine su najvažniji aspekti intervala. U ovom radu korišćene su sledeće aritmetičke operacije [20, 21]:

$$\text{Sabiranje} \quad c = a + b = a_m + \alpha_a \Delta L_a + b_m + \alpha_b \Delta L_b, \quad \alpha_a, \alpha_b \in [-1, 1], \quad (2.2a)$$

$$\text{Oduzimanje} \quad c = a - b = a_m + \alpha_a \Delta L_a - b_m - \alpha_b \Delta L_b, \quad \alpha_a, \alpha_b \in [-1, 1], \quad (2.2b)$$

$$\text{Množenje} \quad c = a \cdot b = (a_m + \alpha_a \Delta L_a)(b_m + \alpha_b \Delta L_b), \quad \alpha_a, \alpha_b \in [-1, 1], \quad (2.2c)$$

$$\text{Deljenje} \quad c = a / b = (a_m + \alpha_a \Delta L_a) / (b_m + \alpha_b \Delta L_b) = [\underline{a}, \bar{a}] / [\underline{b}, \bar{b}], \quad \alpha_a, \alpha_b \in [-1, 1]. \quad (2.2d)$$

Korelacije među promenljivim su definisane preko koeficijenata korelacije i definisane su na sledeći način [22]:

$$k_{ab} \in \begin{cases} [-1, 0) & \text{– Negativno korelisane promenljive,} \\ 0 & \text{– Nekorelisane promenljive,} \\ (0, 1] & \text{– Pozitivno korelisane promenljive.} \end{cases} \quad (2.3)$$

Sabiranje i oduzimanje dve promenljive  $a$  i  $b$  koje su korelisane koeficijentom korelacije  $k_{ab}$ , glasi [23]:

Sabiranje dve negativno korelisane varijable

$$c = a + b = a_m + b_m + (1 + k_{ab})(\alpha_a \Delta L_a + \alpha_b \Delta L_b), \quad \alpha_a, \alpha_b \in [-1, 1]. \quad (2.4)$$

Oduzimanje dve pozitivno korelisane varijable

$$c = a - b = a_m - b_m + (1 - k_{ab})(\alpha_a \Delta L_a - \alpha_b \Delta L_b), \quad \alpha_a, \alpha_b \in [-1, 1]. \quad (2.5)$$

Sabiranje dve negativno korelisane varijable (2.4) i oduzimanje dve pozitivno korelisane varijable (2.5) kao rezultat imaju sužavanje rezultantnog intervala.

### 3. MODELI ELEMENATA

Aktivne i reaktivne snage potrošnje su zavisne od napona respektivno kao [24]:

$$P_{xk} = P_{0xk} + P_{1xk} u_{xk} + P_{2xk} u_{xk}^2, \quad (3.1a)$$

$$Q_{xk} = Q_{0xk} + Q_{1xk} u_{xk} + Q_{2xk} u_{xk}^2, \quad (3.1b)$$

$$x \in \{a, b, c\}, \quad k=1, 2, \dots, N_c,$$

gde su:

Delovi snage nezavisni od napona, čvora  $k$ , faze  $x$  su:

$$P_{0xk} = k_{sp} P_{xk}^{\text{spec}}, \quad Q_{0xk} = k_{sq} Q_{xk}^{\text{spec}};$$

Delovi snage linearno zavisni od napona, čvora  $k$ , faze  $x$  su:

$$P_{1xk} = k_{ip} P_{xk}^{\text{spec}}, \quad Q_{1xk} = k_{iq} Q_{xk}^{\text{spec}};$$

Delovi snage kvadratno zavisni od napona, čvora  $k$ , faze  $x$  su:

$$P_{2xk} = k_{yp} P_{xk}^{\text{spec}}, \quad Q_{2xk} = k_{yq} Q_{xk}^{\text{spec}};$$

$P_{xk}^{\text{spec}}, Q_{xk}^{\text{spec}}$  – specificirane aktivne i reaktivne snage pri nominalnom naponu, respektivno;

$k_{sp}, k_{ip}, k_{yp}, k_{sq}, k_{iq}, k_{yq}$  – koeficijenti učešća aktivne i reaktivne snage, respektivno;

$$k_{sp} + k_{ip} + k_{yp} = 1;$$

$$k_{sq} + k_{iq} + k_{yq} = 1;$$

Relativni napon čvora  $k$  za fazu  $x$  je:

$$u_{xk} = U_{xk} / U_n;$$

$U_{xk}$  – moduo napona, čvora  $k$ , faze  $x$ ;

$U_n$  – nominalni napon potrošača;

$N_c$  – ukupan broj čvorova mreže.

Specificirane snage generatora definisane su prognoziranim proizvodnjama.

U proračunima tokova snage potrošnja i proizvodnja definiše se preko snaga potrošača i generatora, dok se u proračunima kratkih spojeva potrošači uvažavaju preko impedansi koje se određuju na osnovu nominalnih snaga i napona. Generatori se zamenjuju preko sub-tranzitne, tranzitne ili ustaljene impedanse.

Sekcije se modeluju standardnom  $\Pi$  šemom sa rednom impedansom i dve očne admitanse. S druge strane, transformatori se modeluju impedansom kratkog spoja, impedansom magnećenja i odnosom transformacije.

#### 4. UVAŽAVANJE INTERVALA U OSNOVNIM PRORAČUNIMA

Proračuni tokova snaga i kratkih spojeva u ovom radu se sprovode na trofaznim uravnoteženim mrežama u simetričnim režimima. U tim mrežama snage potrošnje po fazama su međusobno jednake. Ovi proračuni su detaljno opisani u nastavku.

##### 4.1. Tokovi snaga

Tokovi snaga predstavljeni u ovom radu predstavljaju sintezu proračuna predstavljenih u [1], [25] (korak na gore je iz [25], a korak na dole je iz [1]). Sve kompleksne promenljive ovde su prikazane kao realne. Osnovni koraci predloženog proračuna su:

###### Korak 1 – Proračun struja grana

Proračun struja grana radi se na osnovu matrice (**BIBC**) – „Bus-Injection to Branch-Current“ (više detalja nalazi se u [25]). Ova matrica predstavlja vezu između struja grana i injektiranih struja u čvorove koji su direktno ili indirektno spojeni preko te grane. Kada se računa struja grane  $j$  tada su poznati čvorovi koji se napajaju preko te grane (kao i potrošači i generatori koji su priključeni u te čvorove) na osnovu vrste  $j$  matrice **BIBC**. Takođe, poznato je koji potrošači i generatori su korelisani, kao i koeficijenti tih korelacija. Generatori se smatraju kao potrošači negativnih snaga. Struje potrošača i generatora glase:

$$\begin{aligned} I_{Lil}^{re} &= \frac{P_{Lil}(U_i)U_i^{re} + Q_{Lil}(U_i)U_i^{im}}{(U_i^{re})^2 + (U_i^{im})^2}; \quad I_{Gig}^{re} = -\frac{P_{Gig}(U_i)U_i^{im} + Q_{Gig}(U_i)U_i^{re}}{(U_i^{re})^2 + (U_i^{im})^2}; \\ I_{Lil}^{im} &= \frac{P_{Lil}(U_i)U_i^{im} - Q_{Lil}(U_i)U_i^{re}}{(U_i^{re})^2 + (U_i^{im})^2}; \quad I_{Gig}^{im} = -\frac{P_{Gig}(U_i)U_i^{im} - Q_{Gig}(U_i)U_i^{re}}{(U_i^{re})^2 + (U_i^{im})^2}; \end{aligned} \quad (4.1.1)$$

$$i = 1, 2, \dots, n; \quad l = 1, 2, \dots, L_i; \quad g = 1, 2, \dots, G_i,$$

gde su:

$U_i$  – modul napona čvora  $i$ ;

$L_i, G_i$  – ukupan broj potrošača i generatora u čvoru  $i$ , respektivno;

"re", "im" (u superskriptima) – realni i imaginarni deo promenljive (struje ili napona), respektivno.

Važno je naglasiti da se sumiranje struja u čvorovima (struja potrošnje i proizvodnje) ne radi u relaciji (4.1.1), zato što nisu uvedene korelacije među promenljivim. To se radi u relaciji (4.1.2). Koristeći se matricom **BIBC** i relacijama (4.1.1) struje grana se računaju na sledeći način:

$$I_{bk}^{re} = \sum_{i=1}^n \left[ \mathbf{BIBC}(k, i) \times \left( \sum_{l=1}^{L_i} I_{Lil}^{re} + \sum_{g=1}^{G_i} I_{Gig}^{re} \right) \right], \quad I_{bk}^{im} = \sum_{i=1}^n \left[ \mathbf{BIBC}(k, i) \times \left( \sum_{l=1}^{L_i} I_{Lil}^{im} + \sum_{g=1}^{G_i} I_{Gig}^{im} \right) \right]. \quad (4.1.2)$$

###### Korak 2 – Proračun napona čvorova

Naponi čvorova ( $j=1, 2, n$ ) računaju se na sledeći način:

$$U_j^{re} = U_f^{re} - R_k I_{bk}^{re} + X_k I_{bk}^{im}, \quad U_j^{im} = U_f^{im} - X_k I_{bk}^{re} - R_k I_{bk}^{im}, \quad (4.1.3)$$

gde su:

$U_j^{re}, U_j^{im}$  – realni i imaginarni deo napona čvora  $j$ , respektivno;

$U_f^{re}, U_f^{im}$  – realni i imaginarni deo napona čvora prethodnika čvoru  $j$ , respektivno;

$R_k, X_k$  – rezistansa i reaktansa grane  $k$ , respektivno (grana  $k$  se završava na čvoru  $j$ , ili  $j = k$ ).

###### Korak 3 – Provera kriterijuma konvergencije

Kriterijum konvergencije je definisan kao maksimalna razlika modula napona u dve uzastopne iteracije. U ovom radu ta maksimalna razlika mora da bude manja od  $\varepsilon = 10^{-4}$ .

## 4.2. Kratki spojevi

Proračun kratkih spojeva u ovom radu zasniva se na teoremi superpozicije [1, 2]. Na osnovu teoreme superpozicije stanje sa kvarom se dekomponuje na poznato stanje prije kratkog spoja i stanje  $\Delta$ -kola. Kada se izračuna režim  $\Delta$ -kola on se sabere s poznatim režimom pre kratkog spoja i dobije se režim kola s kvarom. Algoritam za proračun kratkog spoja sastoji se od sledeća četiri koraka:

1. Proračun režima pre kratkog spoja;
2. Proračun ekvivalentnih impedansi u  $\Delta$ -kolu;
3. Proračun struje kratkog spoja u  $\Delta$ -kolu;
4. Proračun režima s kvarom superpozicijom režima pre kratkog spoja i režima  $\Delta$ -kola.

Ovi koraci su objašnjeni u nastavku.

### Korak 1 – Proračun režima pre kratkog spoja

Proračun režima pre kratkog spoja (naponi i struje) radi se proračunom tokova snaga koji su objašnjeni u delu 4.1. U ovom slučaju, veličine režima pre kratkog spoja predstavljene su preko intervala, na osnovu neizvesnosti potrošnje i proizvodnje.

### Korak 2 – Proračun ekvivalentnih impedansi u $\Delta$ -kolu

Potrošači i generatori se u proračunima kratkih spojeva zamenjuju impedansama, kako je objašnjeno u glavi 3. Pošto se radi o uravnoteženim potrošačima, onda su impedanse za direktni, inverzni i nulti redosled međusobno iste i jednake su faznoj impedansi potrošača. Impedanse generatora za različite redoslede se međusobno razlikuju. Proračun ekvivalentnih impedansi viđenih iz čvora s kvarom ka ostatku sistema radi se proračunom tokova snaga. Prvo se potrošači i generatori zamene impedansama direktnog redosleda. U čvoru s kvarom injektira se jedinična struja, a u svim ostalim čvorovima se injektira struja jednaka nuli. Nakon proračuna tokova snaga napon čvora  $k$  po vrednosti je jednak ekvivalentnoj impedansi viđenom iz čvora  $k$  ka ostatku mreže. Ponavljanjem postupka u kolima inverznog i nultog redosleda dobiju se sve tri ekvivalentne impedanse. Nakon proračuna impedansi u domenu simetričnih komponenti one se mogu transformisati u fazni domen.

### Korak 3 – Proračun struje kratkog spoja u $\Delta$ -kolu

U radu je opisan proračun struje jednofaznog kratkog spoja. Svi ostali tipovi struja kratkih spojeva rade se na sličan način, pa zbog nedostatka prostora nisu opisani. Realni i imaginarni deo struje jednopolnog kratkog spoja iznosi:

$$\hat{I}_{xk}^{\Delta} = I_{xk}^{\Delta Re} + jI_{xk}^{\Delta Im} = \frac{U_{xk}^{Re} + jU_{xk}^{Im}}{Z_{xxk}^{Re} + jZ_{xxk}^{Im}} = \frac{U_{xk}^{Re}Z_{xxk}^{Re} + U_{xk}^{Im}Z_{xxk}^{Im}}{(Z_{xxk}^{Re})^2 + (Z_{xxk}^{Im})^2} + j \frac{U_{xk}^{Im}Z_{xxk}^{Re} - U_{xk}^{Re}Z_{xxk}^{Im}}{(Z_{xxk}^{Re})^2 + (Z_{xxk}^{Im})^2}, \quad (4.2.1a)$$

$$I_{xk}^{\Delta Re} = \frac{U_{xk}^{Re}Z_{xxk}^{Re} + U_{xk}^{Im}Z_{xxk}^{Im}}{(Z_{xxk}^{Re})^2 + (Z_{xxk}^{Im})^2}, \quad I_{xk}^{\Delta Im} = \frac{U_{xk}^{Im}Z_{xxk}^{Re} - U_{xk}^{Re}Z_{xxk}^{Im}}{(Z_{xxk}^{Re})^2 + (Z_{xxk}^{Im})^2}, \quad (4.2.1b)$$

$x \in \{a, b, c\}$ ,

gde su:

$$U_{xk}^{Re} = [U_{xk}^{Re}, \bar{U}_{xk}^{Re}], \quad U_{xk}^{Im} = [U_{xk}^{Im}, \bar{U}_{xk}^{Im}] \quad - \text{realni i imaginarni deo napona čvora } k, \text{ faze } x, \text{ respektivno;}$$

$$I_{xk}^{\Delta Re} = [I_{xk}^{\Delta Re}, \bar{I}_{xk}^{\Delta Re}], \quad I_{xk}^{\Delta Im} = [I_{xk}^{\Delta Im}, \bar{I}_{xk}^{\Delta Im}] \quad - \text{realni i imaginarni deo struje kratkog spoja čvora } k, \text{ faze } x \text{ u } \Delta\text{-kolu, respektivno;}$$

$$Z_{xxk}^{Re} = [Z_{xxk}^{Re}, \bar{Z}_{xxk}^{Re}], \quad Z_{xxk}^{Im} = [Z_{xxk}^{Im}, \bar{Z}_{xxk}^{Im}] \quad - \text{realni i imaginarni deo ekvivalentne impedanse čvora } k, \text{ faze } x, \text{ respektivno.}$$

Koristeći se proračunom tokova snaga, sa naponom korena jednakim nuli i strujama (4.2.1b) injektiranim u čvor  $k$ , može da se izračuna stanje  $\Delta$ -kola.

### Korak 4 – Proračun režima s kvarom

Režim pre kratkog spoja je poznat iz proračuna tokova snaga (Korak 1), dok je režim  $\Delta$ -kola određen u Koraku 3. Superpozicijom ta dva režima dobije se režim s kvarom. Naponi čvorova i struje grana određuju se na sledeći način:

$$U_{xk}^{f Re} = [U_{xk}^{f Re}, \bar{U}_{xk}^{f Re}] = U_{xk}^{\Delta Re} + U_{xk}^{Re}, \quad U_{xk}^{f Im} = [U_{xk}^{f Im}, \bar{U}_{xk}^{f Im}] = U_{xk}^{\Delta Im} + U_{xk}^{Im}, \quad (4.2.2a)$$

$$I_{xb}^{f Re} = [I_{xb}^{f Re}, \bar{I}_{xb}^{f Re}] = I_{xb}^{\Delta Re} + I_{xb}^{Re}, \quad I_{xb}^{f Im} = [I_{xb}^{f Im}, \bar{I}_{xb}^{f Im}] = I_{xb}^{\Delta Im} + I_{xb}^{Im} \quad (4.2.2b)$$

$x \in \{a, b, c\}$ ,  $k=1, 2, \dots, n$ ,  $b=1, 2, \dots, N_{gr}$ ,

gde je  $N_{gr}$  ukupan broj grana.

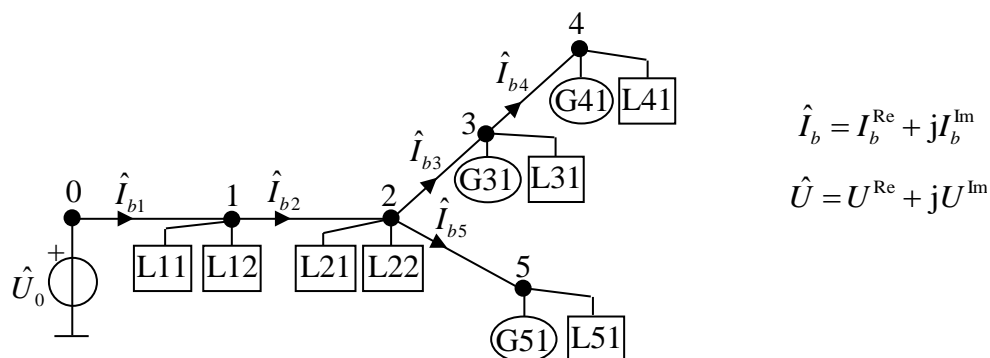
Simbol  $f$  odnosi se na režim s kvarom, dok simbol  $\Delta$  se odnosi na režim  $\Delta$ -kola. Promenljive koje nemaju  $f$  i  $\Delta$  u superskriptu odnose se na režim pre kratkog spoja.

## 5. REZULTATI I DISKUSIJA

### 5.1. Test primer distributivne mreže sa 6 čvorova

Na slici 1 prikazana je test mreža sa šest čvorova. Čvor označen sa 0 je čvor tipa  $\Theta V$ , dok su ostali čvorovi tipa PQ. Numeracija čvorova i grana urađena je po slojevima [1, 2]. Grane i čvorovi na njihovim krajevima udaljenijim od izvora napajanja imaju isti indeks. Potrošači su označeni sa 'L' u kvadratima, dok su generatori označeni sa 'G' u krugovima. Prvi indeks pored L i G odnosi se na indeks čvora, dok se drugi odnosi na tip potrošača, odnosno generatora. Bazna snaga je  $S^b = 300$  kVA, a bazni napon je  $V^b = 12.47$  kV. Dužine svih grana su iste i iznose (0.3787 milje). Sve grane su uravnotežene sa impedansama  $r + jx = (0.306 + j0.627) \Omega/\text{milji}$ , dok su admitanse zanemarene u ovom primeru.

U Tabeli 1 date su aktivne i reaktivne snage, kao i faktor snage potrošača i generatora, sa korelacijama između potrošača i generatora. Sve snage su specificirane na nominalnom naponu. Snage potrošača zavise od napona u skladu s relacijama (3.1a) i (3.1b). Koeficijenti učešća aktivne i reaktivne snage iznose  $k_{sp} = k_{sq} = 0.9$ ,  $k_{ip} = k_{iq} = 0.1$ ,  $k_{yp} = k_{yq} = 0$ . Svi potrošači i generatori (njihove aktivne i reaktivne snage) imaju neizvesnost  $\pm 5\%$ .



SLIKA 1– TEST DISTRIBUTIVNA MREŽA SA 6 ČVOROVA

TABELA I – ULAZNI PODACI ZA POTROŠAČE I GENERATORE U TEST DISTRIBUTIVNOJ MREŽI SA 6 ČVOROVA

Sabirnica	1	2	3	4	5
<b>Potrošači i generatori</b>	L11 L12	L21 L22	L31 G31	L41 G41	L51 G51
<b>Aktivne snage[r.j.]</b>	4.00 2.00	4.00 1.00	4.00 1.00	4.00 1.00	4.00 1.00
<b>Faktor snage</b>	0.90 0.90	0.90 0.90	0.90 0.90	0.90 1.00	0.90 1.00
	ind ind	ind ind	ind ind	ind	ind
<b>Korelisan sa</b>	L51 –	L41 –	G31 L31	L21 G51	L11 G41
<b>Koeficijent korelacije</b>	-0.58 –	-0.57 –	1.00 1.00	-0.57 -0.85	-0.58 -0.85

U tabeli II dati su rezultati tokova snaga (deterministički proračun, proračun klasičnim intervalima i proračun korelisanim intervalima) za test distributivnu mrežu sa 6 čvorova. Svi rezultati su zapisani u formi kompleksnih brojeva.

TABLE II – REZULTATI TOKOVA SNAGA ZA DISTRIBUTIVNU MREŽU SA SLIKE 1

Deterministički proračun	Proračun klasičnim intervalima	Proračun korelisanim intervalima
<b>Grana</b>	<b>Struje grana (<math>\hat{I}_b</math>)</b>	
1	[14.543,17.738]+j[-12.063,-10.782]	[15.596,16.677]+j[-11.509,-11.329]
2	[8.822,11.381]+j[-8.942,-7.980]	[9.618,10.576]+j[-8.506,-8.409]
3	[3.402,4.680]+j[-4.214,-3.756]	[3.716,4.361]+j[-4.097,-3.869]
4	[1.701,2.342]+j[-2.109,-1.879]	[1.702,2.339]+j[-2.103,-1.883]
5	[0.640,1.365]+j[-2.088,-1.866]	[0.634,1.368]+j[-2.085,-1.868]

Čvorovi	Naponi čvorova ( $\hat{U}$ )		
1	0.991-j0.004	[0.990,0.991]+j[-0.005,-0.003]	[0.990,0.991]+j[-0.005,-0.004]
2	0.985-j0.007	[0.983,0.986]+j[-0.009,-0.006]	[0.984,0.985]+j[-0.008,-0.007]
3	0.982-j0.008	[0.980,0.983]+j[-0.010,-0.006]	[0.981,0.982]+j[-0.009,-0.007]
4	0.980-j0.009	[0.979,0.982]+j[-0.011,-0.006]	[0.980,0.981]+j[-0.009,-0.008]
5	0.983-j0.007	[0.982,0.985]+j[-0.009,-0.005]	[0.983,0.984]+j[-0.008,-0.006]

Na osnovu rezultata u tabeli III vidi se da se uvažavanjem korelacija među intervalima smanjuje širina intervala.

U Tabeli III dati su rezultati (deterministički proračun, proračun zasnovan na klasičnim intervalima i proračun zasnovan na korelisanim intervalima) dobijeni simuliranjem jednofaznog kratkog spoja (faza L1) u čvorovima od prvog do petog na test distributivnoj mreži sa 6 čvorova – Slika 1. Rezultati su dati samo za fazu koja je pogođena kratkim spojem.

TABELA III – JEDNOFAZNI KRATAK SPOJ (L1) SUMULIRAN U ČVOROVIMA MREŽE SA SLIKE 1

Čvor	Faza	Kompleksne vrednosti struje kratkog spoja [kA]		
		Deterministički proračun	Proračun klasičnim intervalima	Proračun korelisanim intervalima
1	L1	11.751 -j24.362	[11.720, 11.781] +j[-24.389, -24.334]	[11.740, 11.761] +j[-24.371, -24.352]
2	L1	5.805 -j12.124	[5.778, 5.832] +j[-12.148, -12.099]	[5.795, 5.815] +j[-12.133, -12.115]
3	L1	3.851 -j8.064	[3.829, 3.874] +j[-8.084, -8.044]	[3.843, 3.860] +j[-8.072, -8.057]
4	L1	3.004 -j6.382	[2.966, 3.043] +j[-6.429, -6.335]	[2.986, 3.022] +j[-6.404, -6.360]
5	L1	3.866 -j8.073	[3.845, 3.886] +j[-8.092, -8.055]	[3.857, 3.874] +j[-8.081, -8.066]

Na osnovu rezultata datih u tabeli III može se zaključiti da proračun korelisanim intervalima daje dosta uže granice od proračuna klasičnim intervalima. Širina intervala redukovana je zahvaljujući koeficijentima korelacije koji su uključeni u proračun sa korelisanim intervalima.

## 5.2. Realan test primer sa 1003 čvora

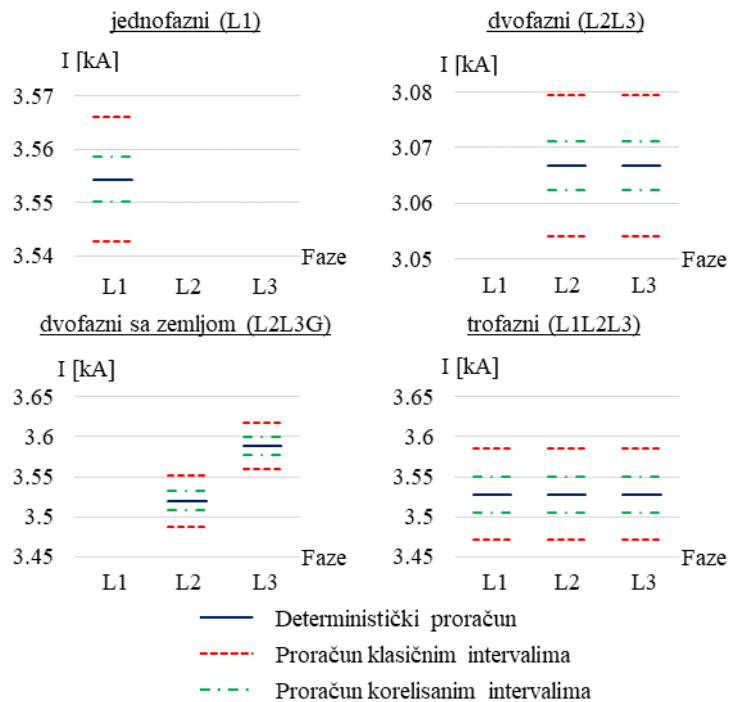
Osnovne karakteristike mreže date su u tabeli IV.

TABELA IV – ULAZNI PODACI REALNE DISTRIBUTIVNE MREŽE SA 1003 ČVORA

<b>Broj izvoda</b>	4
<b>Broj grana</b>	1002
<b>Broj potrošača</b>	496
<b>Broj generatora</b>	15
<b>Ukupna dužina mreže [km]</b>	94.81

Svi potrošači i generatori u mreži koji su korelisani imaju neizvesnost potrošnje 5 %. U mreži postoji pet parova korelisanih potrošača, tri para korelisanih generatora i jedan par korelisanih potrošača i generatora.

Rezultati tokova snaga nisu eksplicitno prikazani zbog nedostatka prostora, ali su ti rezultati korišćeni za potrebe proračuna kratkih spojeva.



SLIKA 2 – STRUJE KRATKIH SPOJEVA SIMULIRANIH NA KRAJU IZVODA

Na slici 2 prikazane su vrednosti struja kratkih spojeva (deterministički proračun, proračun klasičnim intervalima i proračun korelisanim intervalima) na kraju izvoda. Na ovom primeru nije velika razlika širine intervala struja dobijenih proračunom klasičnih intervala i proračunom korelisanih intervala, jer je mali broj korelisanih elemenata u ovoj distributivnoj mreži. Sa većim brojem solarnih generatora i vetrogeneratora u mreži (u budućnosti će ih biti sve više) biće moguće izračunati korelaciju za generatore. Posebno je bitno što su oni na istoj lokaciji, ili su blizu jedni drugim. U tom slučaju, korišćenje korelacija će dati veliki doprinos u redukovanoj širini intervala.

## 6. ZAKLJUČAK

Predloženi algoritmi za proračune tokova snaga i kratkih spojeva u distributivnim mrežama su zasnovani na intervalima. Za uvažavanje korelacija, predložen je poseban oblik intervalne aritmetike. Predloženi algoritmi se koriste kada se u distributivnoj mreži nalazi više nenadgledanih generatora i potrošača, čiji izlazi su dobijeni prognozom potrošnje i proizvodnje. U ovom slučaju, snage potrošača i generatora nisu tačno poznate. U predloženim algoritmima uključena je korelacija među potrošačima i generatorima. Time je značajno redukovana konzervativnost intervala značajno. Rezultati dobijeni proračunom zasnovanom na korelisanim intervalima su realističniji od rezultata dobijenih proračunom zasnovanom na klasičnim intervalima.

## 8. LITERATURA

- [1] Shirmohammadi D, Hong HW, Semlyen A, Luo GX (1988) A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks. IEEE Transactions on Power Systems 2: 753–762.
- [2] Luo GX, Semlyen A (1990) Efficient load flow for large weakly meshed networks. IEEE Transactions on Power Systems 4: 1309–1316.
- [3] Rajcic D, Taleski R. (1998) Two novel methods for radial and weakly meshed network analysis. Electric Power Systems Research 2: 79–87.
- [4] Strezoski VC, Trpezanovski LD. (2000) Three-phase asymmetrical load-flow. International Journal of Electrical Power & Energy Systems 7: 511–520.
- [5] Strezoski VC, Vidović PM (2015) Power flow for general mixed distribution networks. International Transactions on Electrical Energy Systems 10: 2455–2471.
- [6] Bo L, Yan Z. (2009) Power flow algorithm and practical contingency analysis for distribution systems with distributed generation. International Transactions on Electrical Energy Systems 6: 880–889.



- [7] Bagheri A, Monsef H, Lesan H (2015) Evaluating the effects of renewable and nonrenewable DGs on DNEP from the reliability, uncertainty, and operational points of view by employing hybrid GA and OPF. *International Transactions on Electrical Energy Systems* 12: 3304–3328.
- [8] Bijwe PR, Raju GKV (2006) Fuzzy distribution power flow for weakly meshed systems. *IEEE Transactions on Power Systems* 4: 1645–1652.
- [9] Zhenxing W, Libao S, Zheng X, Qiang L, Liangzhong Y, Yixin N. (2014) Fuzzy power flow solution considering wind power variability and uncertainty. *International Transactions on Electrical Energy Systems* 3: 547–572.
- [10] Anderson PM (1995) *Analysis of faulted power systems*. IEEE Press, New York, NY, USA.
- [11] Bergen AR, Vittal V (2000) *Power system analysis* (2nd edition). Prentice Hall, New Jersey.
- [12] Strezoski VC, Bekut DD (1991) A canonical model for the study of faults in power systems. *IEEE Transactions on Power Systems* 4: 1493–1499.
- [13] Lacroix JS, Kocar I, Belletête M (2013) Accelerated computation of multiphase short circuit summary for unbalanced distribution systems using the concept of selected inversion. *IEEE Transactions on Power Systems* 2: 1515–1522.
- [14] Tu DV, Chaitusaney S, Yokoyama A (2014) Maximum-allowable distributed generation considering fault ride-through requirement and reach reduction of utility relay. *IEEE Transactions on Power Delivery* 2: 534–541.
- [15] Sulla F, Svensson J, Samuelsson O (2011) Symmetrical and unsymmetrical short-circuit current of squirrel-cage and doubly-fed induction generators. *Electric Power Systems Research* 7: 1610–1618.
- [16] Howard DF, Smith TM, Starke M, Harley RG (2012) Short circuit analysis of induction machines – wind power application. *IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition, Orlando, FL*.
- [17] Joint Working Group (2015) Fault current contribution from wind plants. *IEEE Power and Energy Society*.
- [18] Gao F, Irvani MR (2008) A control strategy for a distributed generation unit in grid-connected and autonomous modes of operation. *IEEE Transactions on Power Delivery* 2: 850–859.
- [19] Strezoski LV, Prica MD, Loparo KA (2017) Generalized  $\Delta$ -circuit concept for integration of distributed generators in online short-circuit calculations. *IEEE Transactions on Power Systems* 4: 3237–3245.
- [20] Piegat A, Landowski M (2012) Is the conventional interval arithmetic correct? *Journal of Theoretical and Applied Computer Science* 2: 27–44.
- [21] Piegat A, Landowski M (2013) Two interpretations of multidimensional RDM interval arithmetic-multiplication and division. *International Journal of Fuzzy Systems* 4: 488–496.
- [22] Ranković A, Maksimović BM, Sarić AT, Lukić U (2014) ANN-based correlation of measurements in micro-grid state estimation. *International Transactions on Electrical Energy Systems* 10: 2181–2202.
- [23] Vidović PM, Sarić AT (2017) A novel correlated intervals-based algorithm for distribution power flow calculation. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 90: 245–255.
- [24] Garcia PAN, Pereira JLR, Carneiro Jr S, da Costa VM, Martins N (2000) Three-phase power flow calculations using the current injection method. *IEEE Transactions on Power Systems* 2: 508–514.
- [25] Teng JH. (2003) A direct approach for distribution system load flow solutions. *IEEE Transactions on Power Delivery* 3: 882–887.