

ODREĐIVANJE NESIGURNOSTI GUBITAKA I NAPONSKOG PROFILA DISTRIBUTIVNE MREŽE SA I BEZ DISTRIBUIRANE PROIZVODNJE KORIŠĆENJEM FUZZY ARITMETIKE

DETERMINING THE UNCERTAINTY OF LOSSES AND VOLTAGE PROFILE OF THE DISTRIBUTION NETWORK WITH AND WITHOUT DISTRIBUTED GENERATION USING FUZZY ARITHMETIC

Nikola KRSTIĆ, Elektronski fakultet Niš, Srbija
Dragan TASIĆ, Elektronski fakultet Niš, Srbija

KRATAK SADRŽAJ

U ovom radu je korišćenjem fuzzy aritmetike određena nesigurnost gubitaka i naponskog profila distributivne mreže sa i bez distribuirane proizvodnje u slučaju postojanja nesigurnosti u poznavanju električnih parametara deonica i injektiranih snaga u čvorovima distributivne mreže. Uvažavanje nesigurnosti parametara i injektiranih snaga distributivne mreže je ostvareno predstavljanjem ovih veličina odgovarajućim fuzzy brojevima. Aritmetičke operacije nad fuzzy brojevima potrebne za proračun tokova snaga u mreži i određivanje gubitaka i naponskog profila mreže su ostvarene korišćenjem α -cut metode. Detaljno je objašnjena primena α -cut metode u izvršavanju osnovnih aritmetičkih operacija dva trougaona fuzzy broja. U cilju određivanja očekivane, determinističke vrednosti za gubitke i naponski profil mreže, izvršena je njihova defazifikacija metodom jednakih površina i metodom centra gravitacije. Mesto priključenja i željena snaga distribuirane proizvodnje je određena metaheurističkom optimizacionom metodom genetskog algoritma u cilju minimizacije gubitaka i poboljšanja naponskog profila distributivne mreže. Rezultati su dobijeni za različite nivoe nesigurnosti ulaznih parametara distributivne mreže (električni parametri i injektirane snage) sa i bez prisustva distribuirane proizvodnje.

Ključne reči: fuzzy broj, α -cut metoda, distribuirana proizvodnja, gubici u distributivnoj mreži, naponski profil distributivne mreže.

ABSTRACT

In this paper, using fuzzy arithmetic, the uncertainty of the losses and voltage profile of the distribution network with and without distributed generation is determined considering the uncertainty of electrical parameters of the sections and injected powers in the nodes of the distribution network. The uncertainty of parameters and injected powers of the distributed network is included by representing these quantities with appropriate fuzzy numbers. Arithmetic operations on fuzzy numbers required for power flow calculation and determination of losses and voltage profile of the network are achieved using the α -cut method. The implementation of the α -cut method in performing the basic arithmetic operations of two triangular fuzzy numbers is explained in detail. In order to determine the expected, deterministic value for losses and voltage profile of the distribution network, their defuzzification is performed using the center of area and the center of gravity methods. Location and the required power of distributed generation is determined by the metaheuristic optimization method of genetic algorithm in order to minimize losses and improve voltage profile of the distribution network. The results are obtained for different levels of uncertainty of input parameters of the distribution network (electric parameters and injected powers) with and without distributed generation.

Key words: fuzzy number, α -cut method, distributed generation, distribution network losses, voltage profile of the distribution network.

1. UVOD

Nivo gubitaka u distributivnoj mreži i kvalitet naponskog profila su jedni od osnovnih pokazatelja efikasnosti rada distributivne mreže (1) i kvaliteta isporučene električne energije. Imajući ovo u vidu, jedan od najvažnijih zadataka u radu distributivne mreže je određivanje gubitaka i naponskog profila mreže (2). Kako bi ovo bilo moguće potrebno je poznavati topologiju mreže, električne parametre po granama mreže i injektirane snage u čvorovima mreže. Električni parametri koji u najvećoj meri utiču na tokove snaga u distributivnoj mreži, a time i na gubitke i naponski profil mreže su aktivna otpornost i reaktansa po granama mreže.

U ovom radu je uvažena nesigurnost u poznavanju vrednosti aktivne otpornosti i reaktanse distributivne mreže, koja može iz različitih razloga postojati (nedovoljno tačno poznavanje temperature provodnika, dužine i rastojanja između faznih provodnika, neblagovremeno ažuriranje vrednosti električnih parametara, itd). Takođe, uzimajući u obzir stohastički karakter snage potrošnje, uvažena je i nesigurnost u poznavanju injektiranih snaga u potrošačkim čvorovima distributivne mreže. Nesigurnost u poznavanju električnih parametara po granama i snage potrošnje u čvorovima distributivne mreže je modelovana predstavljanjem ovih veličina fuzzy brojevima (3). Kako bi se odredio zajednički uticaj ovih nesigurnosti na gubitke i naponski profil mreže sa i bez prisustva distribuirane proizvodnje, izvršen je proračun tokova snaga u mreži korišćenjem fuzzy aritmetike (4). Konkretno, električni parametri i snage potrošnje su predstavljeni trougaonim fuzzy brojevima, a proračun tokova snaga i određivanje gubitaka i naponskog profila mreže je izvršen α -cut metodom (5)-(6). Primena α -cut metode u izvršavanju osnovnih aritmetičkih operacija dva trougaona fuzzy broja je detaljno opisana (4). Nakon odrađenog proračuna dobijene su funkcije pripadnosti gubitaka (7) i naponskog profila mreže, čijom defazifikacijom su dobijene njihove očekivane vrednosti. U ovu svrhu je korišćena defazifikaciona metoda jednakih površina i defazifikaciona metoda centra gravitacije (8), koje su takođe detaljno objašnjene.

Distribuirana proizvodnja kao jedan od osnovnih koncepta na kojima se zasniva integracija obnovljivih izvora u elektroenergetski sistem, postaje neizostavni deo distributivne mreže. Imajući to u vidu u radu je sagledan uticaj pomenutih nesigurnosti na gubitke i naponski profil distributivne mreže sa i bez prisustva distribuirane proizvodnje. Mesto priključenja i snaga distribuirane proizvodnje je određena metaheurističkom optimizacionom metodom genetskog algoritma (9) tako da se minimizuju gubici i poboljša naponski profil mreže (10). Snaga dobijena optimizacionom metodom predstavlja najverovatniju snagu distribuirane proizvodnje, koja je takođe predstavljena trougaonim fuzzy brojem. Kako bi se uvažili različiti tipovi i nivoi nesigurnosti, rezultati su generisani za različite trougaone oblike i širine fuzzy brojeva.

2. MESTO PRIKLJUČENJA I SNAGA DISTRIBUIRANE PROIZVODNJE

U radu su razmatrani slučajevi rada distributivne mreže sa i bez distribuirane proizvodnje, kako bi se sagledao uticaj njenog postojanja, kao i uticaj nesigurnosti njene proizvodnje na nesigurnost određivanja gubitaka i naponskog profila distributivne mreže. Mesto priključenja (indeks čvora u mreži) i snaga distribuirane proizvodnje su određeni metaheurističkom optimizacionom metodom genetskog algoritma kako bi se minimizovali gubici i poboljšao naponski profil mreže. Kao indikator gubitaka korišćena je srednja dnevna snaga gubitaka u mreži data izrazom (1), dok je ocena kvaliteta naponskog profila ostvarena preko indeksa kvaliteta naponskog profila (VQI), koji je definisan u izrazu (2):

$$P_{loss} = \frac{3}{24} \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^N R_i I_{i,t}^2 \quad (1)$$

$$VQI = \frac{1}{24} \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^N (V_{ref} - V_{i,t})^2 \quad (2)$$

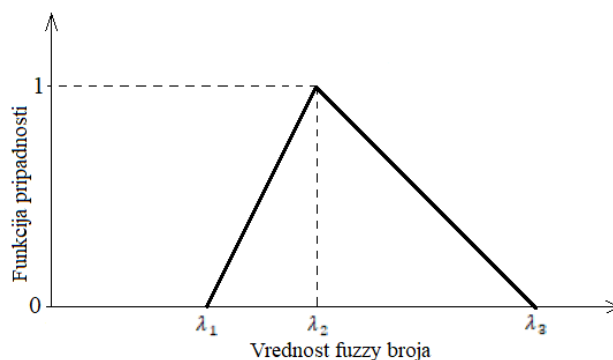
gde je R_i aktivna otpornost i -te grane, $I_{i,t}$ efektivna vrednost struje i -te grane u t -tom času, dok je N ukupan broj grana. Napon $V_{i,t}$ u izrazu (2) je napon čvora na kraju i -te grane u t -tom času, a V_{ref} je referentni napon.

Uvažavanjem odgovarajućih težinskih koeficijenata uz izraze (1) i (2) kriterijumska funkcija u ovom radu je određena tako da se sa podjednakim prioritetom vrši smanjenje gubitaka i poboljšanje naponskog profila distributivne mreže.

U ovom radu je posmatran rad distributivne mreže na dnevnom nivou, a snage distribuirane proizvodnje uvažene kao srednje jednočasovne, čime vektor upravljačkih veličina dobija 25 koordinata (jednu za lokaciju i ostale 24 za snage distribuirane proizvodnje). Važno je istaći da je proračun tokova snaga u distributivnoj mreži prilikom implementacije optimizacione metode izvršen koristeći determinističke vrednosti za električne parametre mreže i snage potrošnje u njenim čvorovima. Za ove determinističke vrednosti su uzete vrednosti fuzzy brojeva električnih parametara i snage potrošnje u kojima je funkcija pripadnosti jednaka jedinici. Takođe, vrednosti snage distribuirane proizvodnje dobijene optimizacionom metodom će kasnije biti iskorišćene kao vrednosti fuzzy brojeva za predstavljanje snage distribuirane proizvodnje u kojima je funkcija pripadnosti jednaka jedinici.

3. α -CUT METODA

Jedna od metoda za izvršavanje različitih aritmetičkih operacija nad fuzzy brojevima je α -cut metoda. Ova metoda se zasniva na principima intervalne aritmetike, u kojoj se fuzzy brojevi (kako same vrednosti tako i njihove funkcije pripadnosti) predstavljaju preko α odsečaka. Konkretno, fuzzy brojevi bivaju podeljeni na karakteristične intervale čije se vrednosti predstavljaju pomoću α odsečaka i ulaze u aritmetičke operacije sa vrednostima koje imaju iste α odsečke, a pripadaju odgovarajućim karakterističnim intervalima drugog fuzzy broja. Kao rezultat dobija se fuzzy broj podeljen na karakteristične intervale čije su vrednosti predstavljene preko α odsečaka, a njihove funkcije pripadnosti određene izražavanjem α odsečaka pomoću odgovarajućih vrednosti fuzzy broja. U nastavku je data primena α -cut metode u izvršavanju osnovnih aritmetičkih operacija (sabiranje, oduzimanje, množenje i deljenje) nad dva pozitivna trougaona fuzzy broja. Primena α cut metode u izvršavanju navedenih matematičkih operacija nad negativnim ili delimično pozitivnim trougaonim fuzzy brojevima se zasniva na istom postupku kao i u slučaju pozitivnih trougaonih fuzzy brojeva, pri čemu je potrebno voditi računa o znaku fuzzy broja kod određivanja intervala minimalnih i maksimalnih vrednosti rezultata matematičke operacije, što je detaljno opisano u radu (4). Uzimajući u obzir navedeno u daljem opisu metode korišćiće se pozitivni trougaoni fuzzy brojevi, koji su predstavljeni sa tri karakteristične vrednosti ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 > 0$). Geometrijska reprezentacija pozitivnog trougaonog fuzzy broja je data na slici 1.



Slika 1 - Geometrijska reprezentacija pozitivnog trougaonog fuzzy broja

U opštem slučaju trougaoni fuzzy broj se može predstaviti preko dva karakteristična intervala A_1 i A_2 čije su vrednosti određene kao: $x = \lambda_1 + \alpha \cdot (\lambda_2 - \lambda_1)$, za A_1 i $x = \lambda_3 - \alpha \cdot (\lambda_3 - \lambda_2)$, za A_2 , pri čemu važi $0 \leq \alpha \leq 1$.

3.1 Sabiranje dva trougaona fuzzy broja

Neka su $\tilde{A} = (\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ i $\tilde{B} = (\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3)$ dva trougaona fuzzy broja. Karakteristični intervale (C_1, C_2) fuzzy broja \tilde{C} , dobijenog kao zbir fuzzy brojeva \tilde{A} i \tilde{B} , se određuju kao: $C_1 = \min(A_1 + B_1, A_1 + B_2, A_2 + B_1, A_2 + B_2)$, $C_2 = \max(A_1 + B_1, A_1 + B_2, A_2 + B_1, A_2 + B_2)$. Uzimajući u obzir da važi: $\lambda_3 > \lambda_2 > \lambda_1 > 0$ i $\gamma_3 > \gamma_2 > \gamma_1 > 0$, dobija se: $C_1 = A_1 + B_1$ i $C_2 = A_2 + B_2$. Sabiranjem vrednosti odgovarajućih intervala fuzzy brojeva \tilde{A} i \tilde{B} predstavljenih preko α odsečaka, dobija se: $x = \lambda_1 + \alpha \cdot (\lambda_2 - \lambda_1) + \gamma_1 + \alpha \cdot (\gamma_2 - \gamma_1) = \lambda_1 + \gamma_1 + \alpha \cdot (\lambda_2 + \gamma_2 - (\lambda_1 + \gamma_1))$, za vrednosti intervala C_1 i $x = \lambda_3 - \alpha \cdot (\lambda_3 - \lambda_2) + \gamma_3 - \alpha \cdot (\gamma_3 - \gamma_2) = \lambda_3 + \gamma_3 - \alpha \cdot (\lambda_3 + \gamma_3 - (\lambda_2 + \gamma_2))$, za vrednosti intervala C_2 , odakle se da zaključiti da je \tilde{C} trougaoni fuzzy broj $\tilde{C} = (\lambda_1 + \gamma_1, \lambda_2 + \gamma_2, \lambda_3 + \gamma_3)$. Izjednačavanjem funkcije pripadnosti μ sa odsečkom α za njenu vrednost u zavisnosti od fuzzy broja x se dobija:

$$\mu_{\tilde{C}}(x) = \begin{cases} \frac{x - (\lambda_1 + \gamma_1)}{\lambda_2 + \gamma_2 - (\lambda_1 + \gamma_1)}, & \lambda_1 + \gamma_1 \leq x \leq \lambda_2 + \gamma_2 \\ \frac{(\lambda_3 + \gamma_3) - x}{\lambda_3 + \gamma_3 - (\lambda_2 + \gamma_2)}, & \lambda_2 + \gamma_2 \leq x \leq \lambda_3 + \gamma_3 \\ 0, & x < \lambda_1 + \gamma_1 \text{ ili } x > \lambda_3 + \gamma_3 \end{cases} \quad (3)$$

3.2 Oduzimanje dva trougaona fuzzy broja

Neka su $\tilde{A} = (\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ i $\tilde{B} = (\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3)$ dva trougaona fuzzy broja. Karakteristični intervale (C_1, C_2) fuzzy broja \tilde{C} , dobijenog kao razlika fuzzy brojeva \tilde{A} i \tilde{B} , se određuju kao: $C_1 = \min(A_1 - B_1, A_1 - B_2, A_2 - B_1, A_2 - B_2)$, $C_2 = \max(A_1 - B_1, A_1 - B_2, A_2 - B_1, A_2 - B_2)$. Uzimajući u obzir da važi: $\lambda_3 > \lambda_2 > \lambda_1 > 0$ i $\gamma_3 > \gamma_2 > \gamma_1 > 0$, dobija se: $C_1 = A_1 - B_2$ i $C_2 = A_2 - B_1$. Oduzimanjem vrednosti odgovarajućih intervala fuzzy brojeva \tilde{A} i \tilde{B} predstavljenih preko α odsečaka, dobija se: $x = \lambda_1 + \alpha \cdot (\lambda_2 - \lambda_1) - (\gamma_3 - \alpha \cdot (\gamma_3 - \gamma_2)) = \lambda_1 - \gamma_3 + \alpha \cdot$

$(\lambda_2 - \gamma_2 - (\lambda_1 - \gamma_3))$, za vrednosti intervala C_1 i $x = \lambda_3 - \alpha \cdot (\lambda_3 - \lambda_2) - (\gamma_1 + \alpha \cdot (\gamma_2 - \gamma_1)) = \lambda_3 - \gamma_1 - \alpha \cdot (\lambda_3 - \gamma_1 - (\lambda_2 - \gamma_2))$, za vrednosti intervala C_2 , odakle se da zaključiti da je \tilde{C} trougaoni fuzzy broj $\tilde{C} = (\lambda_1 - \gamma_3, \lambda_2 - \gamma_2, \lambda_3 - \gamma_1)$. Izjednačavanjem funkcije pripadnosti μ sa odsečkom α za njenu vrednost u zavisnosti od fuzzy broja x se dobija:

$$\mu_{\tilde{C}}(x) = \begin{cases} \frac{x - (\lambda_1 - \gamma_3)}{\lambda_2 - \gamma_2 - (\lambda_1 - \gamma_3)}, & \lambda_1 - \gamma_3 \leq x \leq \lambda_2 - \gamma_2 \\ \frac{(\lambda_3 - \gamma_1) - x}{\lambda_3 - \gamma_1 - (\lambda_2 - \gamma_2)}, & \lambda_2 - \gamma_2 \leq x \leq \lambda_3 - \gamma_1 \\ 0, & x < \lambda_1 - \gamma_3 \text{ ili } x > \lambda_3 - \gamma_1 \end{cases} \quad (4)$$

3.3 Množenje dva trougaona fuzzy broja

Neka su $\tilde{A} = (\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ i $\tilde{B} = (\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3)$ dva trougaona fuzzy broja. Karakteristični intervali (C_1, C_2) fuzzy broja \tilde{C} , dobijenog kao proizvod fuzzy brojeva \tilde{A} i \tilde{B} , se određuju kao: $C_1 = \min(A_1 \cdot B_1, A_1 \cdot B_2, A_2 \cdot B_1, A_2 \cdot B_2)$, $C_2 = \max(A_1 \cdot B_1, A_1 \cdot B_2, A_2 \cdot B_1, A_2 \cdot B_2)$. Uzimajući u obzir da važi: $\lambda_3 > \lambda_2 > \lambda_1 > 0$ i $\gamma_3 > \gamma_2 > \gamma_1 > 0$, dobija se: $C_1 = A_1 \cdot B_1$ i $C_2 = A_2 \cdot B_2$. Množenjem vrednosti odgovarajućih intervala fuzzy brojeva \tilde{A} i \tilde{B} predstavljenih preko α odsečaka, dobija se: $x = (\lambda_1 + \alpha \cdot (\lambda_2 - \lambda_1)) \cdot (\gamma_1 + \alpha \cdot (\gamma_2 - \gamma_1)) = \lambda_1\gamma_1 + \alpha[\gamma_1(\lambda_2 - \lambda_1) + \lambda_1(\gamma_2 - \gamma_1)] + \alpha^2(\lambda_2 - \lambda_1)(\gamma_2 - \gamma_1)$, za vrednosti intervala C_1 i $x = (\lambda_3 - \alpha \cdot (\lambda_3 - \lambda_2)) \cdot (\gamma_3 - \alpha \cdot (\gamma_3 - \gamma_2)) = \lambda_3\gamma_3 - \alpha \cdot [\lambda_3(\gamma_3 - \gamma_2) + \gamma_3(\lambda_3 - \lambda_2)] + \alpha^2(\lambda_3 - \lambda_2)(\gamma_3 - \gamma_2)$, za vrednosti intervala C_2 . Izjednačavanjem funkcije pripadnosti μ sa odsečkom α za njenu vrednost u zavisnosti od fuzzy broja x se dobija:

$$\mu_{\tilde{C}}(x) = \begin{cases} \frac{-u_2 \pm \sqrt{u_2^2 - 4u_1(u_3 - x)}}{2u_1}, & \lambda_1\gamma_1 \leq x \leq \lambda_2\gamma_2 \\ \frac{v_2 \pm \sqrt{v_2^2 - 4v_1(v_3 - x)}}{2v_1}, & \lambda_2\gamma_2 \leq x \leq \lambda_3\gamma_3 \\ 0, & x < \lambda_1\gamma_1 \text{ ili } x > \lambda_3\gamma_3 \end{cases} \quad (5)$$

gde je $u_1 = (\lambda_2 - \lambda_1)(\gamma_2 - \gamma_1)$, $u_2 = \gamma_1(\lambda_2 - \lambda_1) + \lambda_1(\gamma_2 - \gamma_1)$ i $u_3 = \lambda_1\gamma_1$, dok je $v_1 = (\lambda_3 - \lambda_2)(\gamma_3 - \gamma_2)$, $v_2 = \gamma_3(\lambda_3 - \lambda_2) + \lambda_3(\gamma_3 - \gamma_2)$ i $v_3 = \lambda_3\gamma_3$

3.4 Deljenje dva trougaona fuzzy broja

Neka su $\tilde{A} = (\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ i $\tilde{B} = (\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3)$ dva trougaona fuzzy broja. Karakteristični intervali (C_1, C_2) fuzzy broja \tilde{C} , dobijenog kao količnik fuzzy brojeva \tilde{A} i \tilde{B} , se određuju kao: $C_1 = \min(A_1/B_1, A_1/B_2, A_2/B_1, A_2/B_2)$, $C_2 = \max(A_1/B_1, A_1/B_2, A_2/B_1, A_2/B_2)$. Uzimajući u obzir da važi: $\lambda_3 > \lambda_2 > \lambda_1 > 0$ i $\gamma_3 > \gamma_2 > \gamma_1 > 0$, dobija se: $C_1 = A_1/B_2$ i $C_2 = A_2/B_1$. Deljenjem vrednosti odgovarajućih intervala fuzzy brojeva \tilde{A} i \tilde{B} predstavljenih preko α odsečaka, dobija se: $x = (\lambda_1 + \alpha \cdot (\lambda_2 - \lambda_1)) / (\gamma_3 - \alpha \cdot (\gamma_3 - \gamma_2))$, za vrednosti intervala C_1 i $x = (\lambda_3 - \alpha \cdot (\lambda_3 - \lambda_2)) / (\gamma_1 + \alpha \cdot (\gamma_2 - \gamma_1))$, za vrednosti intervala C_2 . Izjednačavanjem funkcije pripadnosti μ sa odsečkom α za njenu vrednost u zavisnosti od fuzzy broja x se dobija:

$$\mu_{\tilde{C}}(x) = \begin{cases} \frac{x\gamma_3 - \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1 + x(\gamma_3 - \gamma_2)}, & \lambda_1/\gamma_3 \leq x \leq \lambda_2/\gamma_2 \\ \frac{\gamma_3 - x\lambda_1}{\lambda_3 - \lambda_2 + x(\gamma_2 - \gamma_1)}, & \lambda_2/\gamma_2 \leq x \leq \lambda_3/\gamma_1 \\ 0, & x < \lambda_1/\gamma_3 \text{ ili } x > \lambda_3/\gamma_1 \end{cases} \quad (6)$$

Granice za vrednost fuzzy broja x u izrazima (3), (4), (5), (6) su dobijene izjednačavanjem odsečka α u izrazima za vrednosti intervala C_1 sa 0 i 1, odnosno izjednačavanjem odsečka α u izrazima za vrednosti intervala C_2 sa 1 i 0, respektivno.

4. PRORAČUN TOKOVA SNAGA I ODREĐIVANJE GUBITAKA I NAPONSKOG PROFILA DISTRIBUTIVNE MREŽE KORIŠĆENJEM FUZZY ARITMETIKE

Za generisanje rezultata u radu je korišćena radijalna distributivna mreža sa 33 čvora, zbog čega je proračun tokova snaga odrađen iterativnom metodom za proračun tokova snaga kod radijalnih distributivnih mrežan (11). Matematičke operacije neophodne u izvršavanju iterativne metode su ostvarene α -cut metodom sobzirom da su električni parametri mreže i snage u njenim čvorovima predstavljeni kao fuzzy brojevi. Imajući u vidu da su u α cut metodi fuzzy brojevi predstavljeni kao skupovi realnih brojeva, a da su struje i naponi u proračunu tokova

snaga kompleksni brojevi, neophodno je predstaviti ih koristeći dva fuzzy broja, jedan za predstavljanje realnog, a drugi za predstavljanje imaginarnog dela, čije će izračunavanje se vršiti zasebno. Korišćenjem fuzzy aritmetike opisane u α cut metodi, jedna iteracija iterativnog postupka za proračun tokova snaga u radijalnim distributivnim mrežama se može opisati na sledeći način:

Korak I: Određivanje fuzzy brojeva struja injektiranih u čvorove mreže (\tilde{I}) koristeći fuzzy brojeve injektiranih snaga ($\tilde{S} = \tilde{P} + j\tilde{Q}$) i fuzzy brojeve napona čvorova (\tilde{U}) dobijenih u prethodnoj iteraciji (u početnoj iteraciji u tu svrhu se koristi napon napojnog čvora mreže). Ovaj korak za i -ti čvor mreže se može opisati izrazom (7) za realni deo kompleksnog predstavnika struje i izrazom (8) za imaginarni deo.

$$Re\{\tilde{I}_i\} = Re\left\{\frac{\tilde{S}_i^*}{\sqrt{3}\tilde{U}_i^*}\right\} = \frac{\tilde{P}_i \cdot Re\{\tilde{U}_i\} + \tilde{Q}_i \cdot Im\{\tilde{U}_i\}}{\sqrt{3}(Re\{\tilde{U}_i\} \cdot Re\{\tilde{U}_i\} + Im\{\tilde{U}_i\} \cdot Im\{\tilde{U}_i\})} \quad (7)$$

$$Im\{\tilde{I}_i\} = Im\left\{\frac{\tilde{S}_i^*}{\sqrt{3}\tilde{U}_i^*}\right\} = \frac{\tilde{P}_i \cdot Im\{\tilde{U}_i\} - \tilde{Q}_i \cdot Re\{\tilde{U}_i\}}{\sqrt{3}(Re\{\tilde{U}_i\} \cdot Re\{\tilde{U}_i\} + Im\{\tilde{U}_i\} \cdot Im\{\tilde{U}_i\})} \quad (8)$$

Korak II: Na osnovu struja injektiranih u čvorove mreže dobijenih u prethodnom koraku, uzimajući u obzir topologiju mreže, određuju se struje po granama mreže, polazeći od potrošačkih ka napojnom čvoru.

Korak III: Koristeći struje po granama mreže (\tilde{I}_g) dobijene u prethodnom koraku određuju se naponi čvorova mreže polazeći od napojnog čvora ka potrošačkim. Ovo je analitički prikazano izrazima (9) i (10) u kojima je izračunat realni i imaginarni deo kompleksnog predstavnika napona čvora na kraju j -te grane (\tilde{U}_j), respektivno. Uzimajući u obzir napon na početku j -te grane (\tilde{U}_i) i pad napona na impedansi ($\tilde{Z}_j = \tilde{R}_j + j\tilde{X}_j$) j -te grane mreže, izrazi (9) i (10) imaju oblik:

$$Re\{\tilde{U}_j\} = Re\{\tilde{U}_i - \tilde{I}_g \cdot \tilde{Z}_j\} = Re\{\tilde{U}_i\} - Re\{\tilde{I}_g\} \cdot \tilde{R}_j + Im\{\tilde{I}_g\} \cdot \tilde{X}_j \quad (9)$$

$$Im\{\tilde{U}_j\} = Im\{\tilde{U}_i - \tilde{I}_g \cdot \tilde{Z}_j\} = Im\{\tilde{U}_i\} - Im\{\tilde{I}_g\} \cdot \tilde{R}_j - Re\{\tilde{I}_g\} \cdot \tilde{X}_j \quad (10)$$

Dobijene vrednosti napona u čvorovima mreže se koriste za dobijanje struja injektiranja u koraku I u narednoj iteraciji. Iterativna metoda se završava kada razlika između napona u dve susedne iteracije, uzimajući u obzir sve čvorove u mreži i sve sate u toku dana, bude manja od zadate tačnosti. Kako su naponi čvorova fuzzy brojevi upoređuju se one vrednosti napona za koje funkcija pripadnosti ima maksimalnu vrednost.

Nakon izvršenja proračuna tokova snaga, dobijeni fuzzy brojevi struja po granama mreže i napona u njenim čvorovima se koriste za određivanje fuzzy brojeva gubitaka i naponskog profila mreže korišćenjem izraza:

$$\tilde{P}_{loss} = \frac{3}{24} \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^N \tilde{R}_i \cdot (Re\{\tilde{I}_{i,t}\} \cdot Re\{\tilde{I}_{i,t}\} + Im\{\tilde{I}_{i,t}\} \cdot Im\{\tilde{I}_{i,t}\}) \quad (11)$$

$$\sqrt{QI} = \frac{1}{24} \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^N \left(V_{ref} - \sqrt{(Re\{\tilde{U}_{i,t}\} \cdot Re\{\tilde{U}_{i,t}\} + Im\{\tilde{U}_{i,t}\} \cdot Im\{\tilde{U}_{i,t}\})} \right)^2 \quad (12)$$

5. METODE DEFAZIFIKACIJE

Kada su određeni fuzzy brojevi kojima su predstavljeni gubici i kvalitet naponskog profila distributivne mreže u uslovima nesigurnosti poznavanja vrednosti električnih parametara i snaga u čvorovima mreže, poželjno je odrediti i determinističke vrednosti pomenutih veličina koje bi označavala njihove najverovatnije (očekivane) vrednosti. U ovu svrhu je izvršena defazifikacija gubitaka i kvaliteta naponskog profila korišćenjem dve različite defazifikacione metode, čiji opis je dat u nastavku.

5.1 Defazifikaciona metoda jednakih površina

Defazifikaciona metoda jednakih površina vrši defazifikaciju fuzzy broja tako što određuje vrednost fuzzy broja koja deli površinu ispod funkcije pripadnosti na dva jednaka dela. Ova vrednost fuzzy broja predstavlja očekivanu (determinističku) vrednost veličine predstavljene fuzzy brojem i rezultat defazifikacije, a dobija se izrazom:

$$\int_{x_{min}^*}^{x^*} \mu(x) dx = \int_{x^*}^{x_{max}^*} \mu(x) dx \quad (13)$$

5.2 Defazifikaciona metoda centra gravitacije

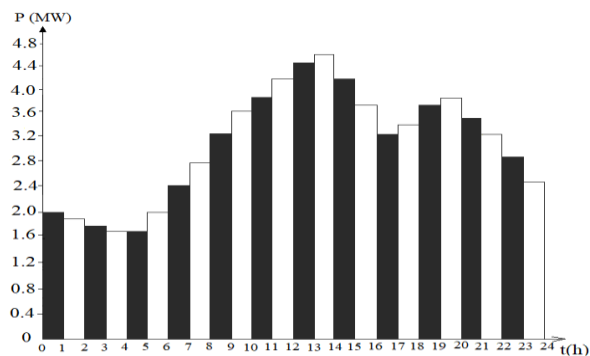
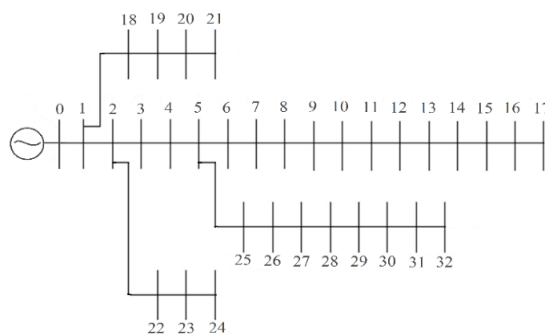
Kao i metoda jednakih površina i ova defazifikaciona metoda je dobila naziv zbog načina na koji vrši defazifikaciju fuzzy broja. Konkretno, očekivana (deterministička) vrednost se ovom defazifikacionom metodom određuje na isti način kao i centar mase tela kod koga funkcija pripadnosti predstavlja funkciju raspodele mase tela po jedinici dužine. Analitički izraz kojim se dobija rezultat defazifikacije je dat kao:

$$x^* = \frac{\int_{x_{min}}^{x_{max}} x \cdot \mu(x) dx}{\int_{x_{min}}^{x_{max}} \mu(x) dx} \quad (14)$$

U izrazima (13) i (14) x^* predstavlja rezultat defazifikacije, dok je x_{min} minimalna, a x_{max} maksimalna vrednost fuzzy broja za koji funkcija pripadnosti μ ima vrednost različitu od nule.

6. PRIKAZ I ANALIZA REZULTATA

Rezultati u ovom radu su generisani koristeći 10 kV radijalnu distributivnu mrežu sa 33 čvora čija je topologija prikazana na slici 2. Za generisanje snage potrošnje korišćen je dnevni dijagram opterećenja distributivne mreže prikazan na slici 3. Snaga prikazana na dijagramu opterećenja mreže je podjednako raspoređena po čvorovima mreže za svaki sat u toku dana. Celokupno opterećenje u mreži je tipa konstantne snage, sa jedinstvenim faktorom opterećenja u toku dana, koji je isti za sve čvorove u mreži i iznosi $\cos\varphi = 0,958$. Maksimalna snaga opterećenja mreže je $P_{max} = 4,56 MW$, dok je srednja snaga $P_{sr} = 3,10 MW$. Važno je napomenuti da su vrednosti snage opterećenja dobijene na osnovu dijagrama opterećenja mreže korišćene kao one vrednosti snage fuzzy brojeva potrošnje za koje funkcija pripadnosti ima jediničnu (maksimalnu) vrednost.



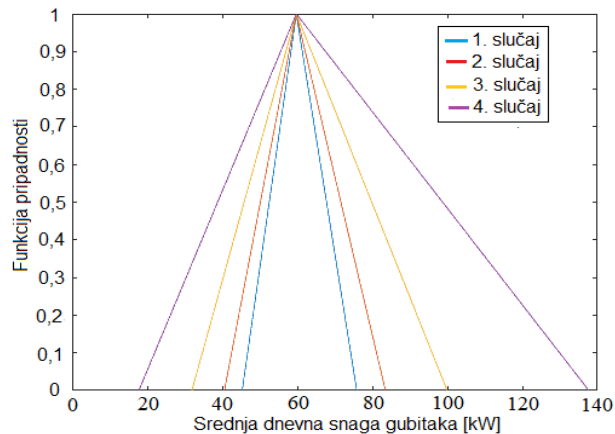
Slika 2 - Topologija korišćene distributivne mreže Slika 3 - Dnevni dijagram opterećenja distributivne mreže

Podužni električni parametri korišćene nadzemne 10 kV mreže na radnoj temperaturi su: podužna aktivna otpornost $r = 0,414 \Omega/km$ i podužna reaktansa $x = 0,365 \Omega/km$. Udaljenost između svaka dva susedna čvora u mreži je ista i iznosi 300 m. Fuzzy brojevi aktivne otpornosti i reaktanse su generisani tako da date vrednosti aktivne otpornosti i reaktanse predstavljaju one vrednosti za koje funkcija pripadnosti ima jediničnu vrednost. Važno je istaći da je za napon napojnog čvora mreže usvojena vrednost od 10 kV što je ujedno i referentni napon. Karakteristične vrednosti fuzzy brojeva (λ_1 , λ_2 i λ_3) snage potrošnje i snage distribuirane proizvodnje ukoliko ista postoji u mreži, korišćene prilikom generisanja rezultata i izražene u relativnim jedinicama su date u Tabeli 1.

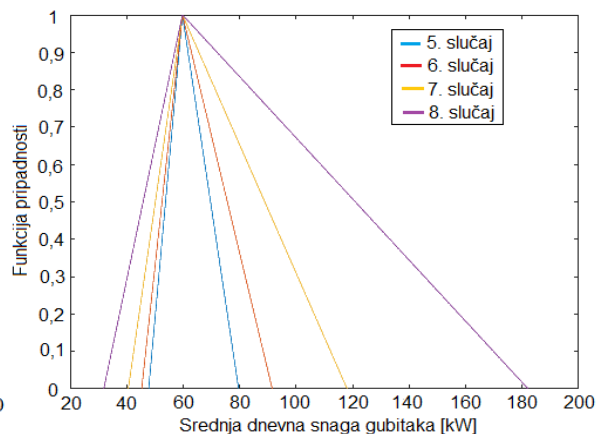
Tabela 1 - Karakteristične vrednosti fuzzy brojeva snage potrošnje i snage distribuirane proizvodnje u r.j.

slučaj	$\lambda_1[r.j.]$	$\lambda_2[r.j.]$	$\lambda_3[r.j.]$
1.	0,95	1	1,05
2.	0,9	1	1,1
3.	0,8	1	1,2
4.	0,6	1	1,4
5.	0,975	1	1,075
6.	0,95	1	1,15
7.	0,9	1	1,3
8.	0,8	1	1,6

Karakteristične vrednosti fuzzy brojeva korišćenih za predstavljanje aktivne otpornosti i reaktanse grana mreže su: $r_1 = 0,85$, $r_2 = 1$, $r_3 = 1,15$ i $x_1 = 0,85$, $x_2 = 1$ i $x_3 = 1,15$, respektivno.



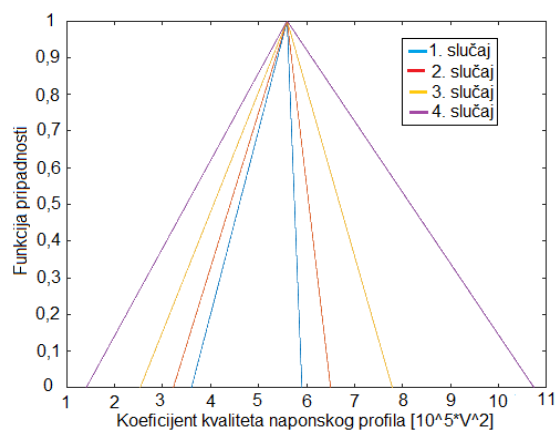
Slika 4 - Srednja dnevna snaga gubitaka bez prisustva distribuirane proizvodnje za slučajeve 1, 2, 3 i 4.



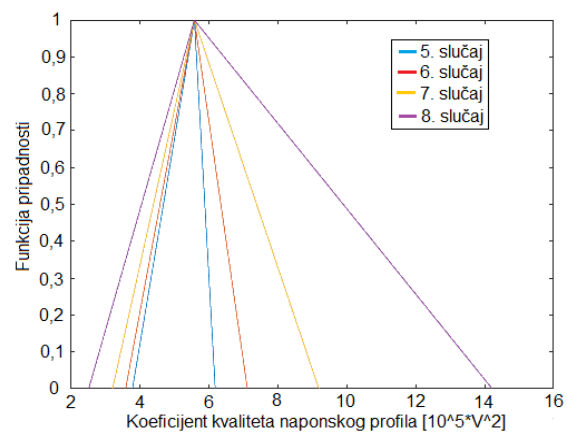
Slika 5 - Srednja dnevna snaga gubitaka bez prisustva distribuirane proizvodnje za slučajeve 5, 6, 7 i 8.

Na slici 4 su prikazane vrednosti srednje dnevne snage gubitaka u mreži i njihove funkcije pripadnosti za slučajeve 1, 2, 3 i 4, dok je to isto prikazano na slici 5 samo za slučajeve 5, 6, 7 i 8.

Slika 6 prikazuje vrednosti koeficijenta kvaliteta naponskog profila mreže i njihove funkcije pripadnosti za slučajeve 1, 2, 3 i 4, dok slika 7 prikazuje to isto samo za slučajeve 5, 6, 7 i 8. Slike 4, 5, 6 i 7 su dobijene kada u mreži nemamo prisustvo distribuirane proizvodnje.



Slika 6 - Koeficijent kvaliteta naponskog profila bez distribuirane proizvodnje za slučajeve 1, 2, 3 i 4.

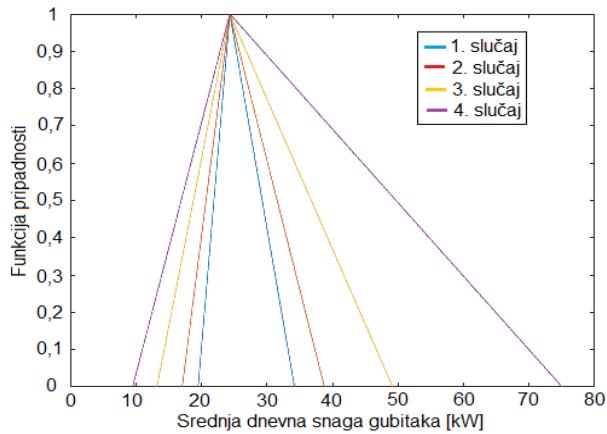


Slika 7 - Koeficijent kvaliteta naponskog profila bez distribuirane proizvodnje za slučajeve 5, 6, 7 i 8.

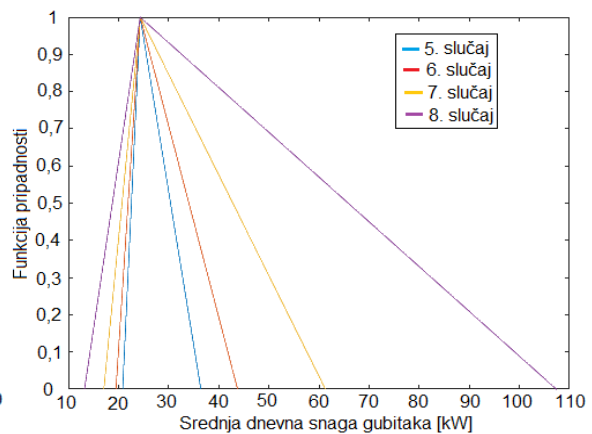
Na osnovu slika 4, 5, 6 i 7 može se videti da u slučajevima 5, 6, 7 i 8 srednja dnevna snaga gubitaka i koeficijent kvaliteta naponskog profila mreže su predstavljeni fuzzy brojevima koji imaju širi interval nesigurnosti i nešto veće karakteristične vrednosti u odnosu na slučajeve 1, 2, 3 i 4. Ovo se može objasniti većim karakterističnim vrednostima fuzzy brojeva kojima su opisane snage potrošnje u čvorovima mreže za slučajevima 5, 6, 7 i 8. Takođe, slike 4, 5, 6 i 7 pokazuju da kada ne postoji distribuirana proizvodnja karakteristične vrednosti fuzzy brojeva srednje dnevne snage gubitaka i koeficijenta kvaliteta naponskog profila mreže su proporcionalne kvadratu karakterističnih vrednosti fuzzy brojeva snage potrošnje iz tabele 1.

U slučaju kada u mreži postoji distribuirana proizvodnja fuzzy broj kojim je ona predstavljena se određuje na osnovu karakterističnih vrednosti iz tabele 1, pri čemu je druga karakteristična vrednost (ona sa jediničnom funkcijom pripadnosti) u apsolutnim jedinicama jednaka snazi dobijenoj korišćenjem optimizacione metode genetskog algoritma kako bi se minimizovali gubici i poboljšao naponski profil mreže. Važno je napomenuti da kada je snaga distribuirane proizvodnje predstavljena fuzzy brojevima čije karakteristične vrednosti odgovaraju slučajevima od 1 do 8, snaga potrošnje je predstavljena fuzzy brojem čije karakteristične vrednosti odgovaraju slučaju 3.

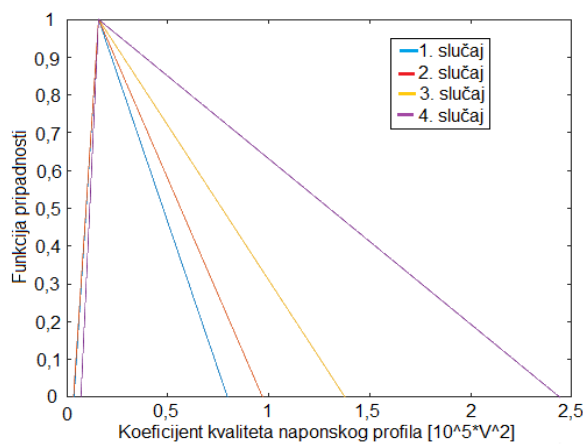
Na slici 8 su prikazane vrednosti srednje dnevne snage gubitaka i njihove funkcije pripadnosti kada snaga distribuirane proizvodnje odgovara slučajevima 1, 2, 3 i 4, dok je to isto prikazano na slici 9 kada snaga distribuirane proizvodnje odgovara slučajevima 5, 6, 7 i 8. Slika 10 prikazuje vrednosti koeficijenta kvaliteta naponskog profila mreže i njihove funkcije pripadnosti kada snaga distribuirane proizvodnje odgovara slučajevima 1, 2, 3 i 4, dok slika 11 prikazuje to isto kada snaga distribuirane proizvodnje odgovara slučajevima 5, 6, 7 i 8.



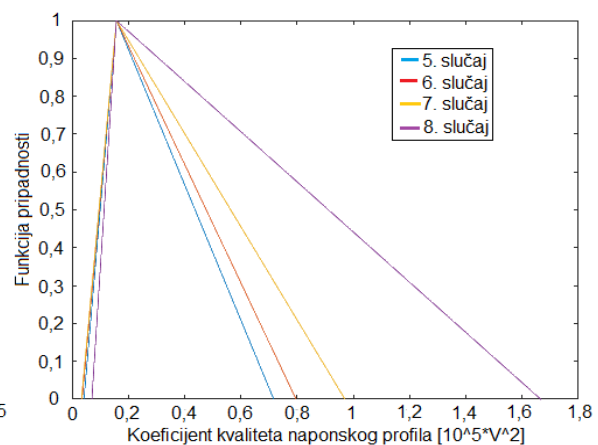
Slika 8 - Srednja dnevna snaga gubitaka sa prisustvom distribuirane proizvodnje za slučajeve 1, 2, 3 i 4.



Slika 9 - Srednja dnevna snaga gubitaka sa prisustvom distribuirane proizvodnje za slučajeve 5, 6, 7 i 8.



Slika 10 - Koeficijent kvaliteta naponskog profila sa distribuiranom proizvodnjom za slučajeve 1, 2, 3 i 4.



Slika 11 - Koeficijent kvaliteta naponskog profila sa distribuiranom proizvodnjom za slučajeve 5, 6, 7 i 8.

Poređenjem slika 4, 5, 6 i 7 sa slikama 8, 9, 10 i 11 može se videti da je srednja dnevna snaga gubitaka manja, a naponski profil bolji u slučaju kada u mreži postoji distribuirana proizvodnja. Ujedno, da se videti da gubici u mreži mogu biti znatno uvećani, a naponski profil pogoršan ukoliko postoji velika neizvesnost u snazi distribuirane proizvodnje (slučaji 4 i 8). Takođe, zanimljivo je primetiti da su u slučajevima 5, 6, 7 i 8 (potencijalno veće snage distribuirane proizvodnje u odnosu na slučajeve 1, 2, 3 i 4) gubici u mreži i njihov interval nesigurnosti veći, a naponski profil bolji i njegov interval nesigurnosti manji u odnosu na slučajeve 1, 2, 3 i 4.

U Tabeli 2 su date determinističke (očekivane) vrednosti srednje dnevne snage gubitaka i koeficijenta kvaliteta naponskog profila mreže, za slučajeve od 1 do 8, pri čemu se vrednosti u zagradama odnose na slučajeve kada u distributivnoj mreži postoji, a vrednosti van zagrada kada u distributivnoj mreži ne postoji distribuirana proizvodnja. Ove determinističke vrednosti su dobijene primenom defazifikacionih metoda jednakih površina (P_{loss}^{jp} , VQI^{jp}) i centra gravitacije (P_{loss}^{cg} , VQI^{cg}).

Tabela 2 - Determinističke vrednosti srednje dnevne snage gubitaka i koeficijenta kvaliteta naponskog profila

slučaj	P_{loss}^{jp} [kW]	P_{loss}^{cg} [kW]	VQI^{jp} [$10^3 V^2$]	VQI^{cg} [$10^3 V^2$]
1.	60,159 (25,674)	60,306 (26,012)	512,167 (30,289)	503,470 (32,961)
2.	60,879 (26,237)	61,271 (26,728)	519,747 (35,212)	510,723 (38,653)
3.	62,952 (28,005)	63,865 (28,908)	537,498 (48,142)	530,561 (53,447)
4.	69,232 (34,249)	71,724 (36,272)	585,184 (79,113)	591,565 (88,860)
5.	61,806 (26,702)	62,387 (27,197)	526,887 (28,148)	519,825 (30,536)
6.	64,374 (28,368)	65,525 (29,194)	547,962 (30,289)	544,214 (32,961)
7.	70,442 (32,666)	72,762 (34,214)	592,605 (35,211)	600,688 (38,653)
8.	86,106 (44,723)	91,188 (48,274)	712,782 (56,709)	745,252 (63,051)

Rezultati u Tabeli 2 još jednom potvrđuju da je srednja dnevna snaga gubitaka dosta manja, a naponski profil znatno poboljšan ukoliko postoji prisustvo distribuirane proizvodnje u mreži. Iz Tabele 2 se primećuje da

determinističke (očekivane) vrednosti snage gubitaka i koeficijenta kvaliteta naponskog profila dobijene dvema korišćenim defazifikacionim metodama su veoma slične, a veće razlike među njima se dobijaju u onim slučajevima kada postoji veća nesimetrija u izgledu fuzzy broja kojima su predstavljene ove veličine, jer defazifikaciona metoda centra gravitacije uzima sa većom težinom vrednosti koje su bliže krajevima intervala nesigurnosti.

7. ZAKLJUČAK

U ovom radu je izložen i detaljno opisan postupak za određivanje nesigurnosti snage gubitaka i kvaliteta naponskog profila distributivne mreže u slučaju istovremenog postojanja nesigurnosti snage u čvorovima mreže i podužnih električnih parametara grana mreže, sa i bez prisustva distribuirane proizvodnje. Dobijeni rezultati pokazuju da ukoliko ne postoji distribuirana proizvodnja u mreži, granične vrednosti intervala nesigurnosti srednje dnevne snage gubitaka i koeficijenta kvaliteta naponskog profila mreže su približno proporcionalne kvadratu graničnih vrednosti intervala nesigurnosti snage potrošnje. Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da postojanje distribuirane proizvodnje čija je snaga određena tako da minimizuje gubitke i poboljša naponski profil mreže, a čiji interval nesigurnosti nije isuviše veliki, može znatno smanjiti vrednosti i suziti interval nesigurnosti snage gubitaka i koeficijenta kvaliteta naponskog profila distributivne mreže. Konkretno, rezultati su pokazali da interval nesigurnosti snage distribuirane proizvodnje iznad $\pm 30\%$ može povećati gubitke i pogoršati naponski profil distributivne mreže. Obe korišćene defazifikacione metode su dale približno iste determinističke vrednosti kako za gubitke tako i za kvalitet naponskog profila mreže, veća razlika jedino postoji u slučajevima veće nesimetrije fuzzy brojeva kojima su predstavljene pomenute veličine.

LITERATURA

- [1] Rajaković N and Tasić D, 2008, "Distributivne i industrijske mreže", "Akademska misao", Beograd.
- [2] Salman M, Hongsheng S, Aman M and Khan Y, 2022, "Enhancing voltage profile and power loss reduction considering distributed generation (DG) resources", "Engineering, Technology and Applied Science Research", "Vol. 12, No. 4", pp. 8864-8871.
- [3] Giachetti R and Young R, 1997, "A parametric representation of fuzzy numbers and their arithmetic operators", "Fuzzy Sets and Systems", "Vol. 91, No. 2", pp. 185-202.
- [4] Mukherjee A, Gazi K, Salahshour S, Ghosh A and Mondal S, 2023, "A brief analysis and interpretation on arithmetic operations of fuzzy numbers", "Results in Control and Optimization", "Vol. 13", pp. 100312.
- [5] Cortes M, Palma-Behnke R and Jimenez-Estevéz G, 2007, "Fuzzy load flow based on α -Cuts arithmetics", "39th North American Power Symposium, NAPS", "Vol. 91, No. 2", pp. 650-658.
- [6] Gouveia E, Costa P, Sagredo J and Soroudi A, 2016, "Probabilistic security constrained fuzzy power flow models", "51st International Universities Power Engineering Conference (UPEC)", Coimbra, Portugal.
- [7] Tasić D and Stojanović M, 2005, "Fuzzy approaches to distribution energy losses calculation", "Acta Electrotechnica et Informatica", "Vol. 5, No. 2", pp. 1-7.
- [8] Gilda K, and Satarkar S, 2020, "Analytical overview of defuzzification methods", "International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology", "Vol. 6, No. 2", pp. 359-365.
- [9] Radosavljević, J, 2018, "Metaheuristic optimization in power engineering", "Institution of Engineering and Technology", London.
- [10] Haider W, Hassan S, Mehdi A, Hussain A, Adjayeng G and Kim C, 2021, "Voltage profile enhancement and loss minimization using optimal placement and sizing of distributed generation in reconfigured network", "Machines", "Vol. 9, No. 1", pp. 20.
- [11] Michline J and Ganesh S, 2014, "Power flow analysis for radial distribution system using backward/forward sweep method", "International Journal of Electrical and Computer Engineering", "Vol. 8, No. 10", pp. 1628-1632.