

Izbor optimalne pozicije riklozera u srednjenaponskim distributivnim mrežama u prisustvu nesigurnosti podataka

Predrag Mršić^{1,2}, Jelisaveta Krstivojević¹

¹Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet, Beograd, Srbija

²Univerzitet u Banjoj Luci - Elektrotehnički fakultet, Banja Luka, Bosna i Hercegovina
predrag.mrsic@etf.unibl.org, j.krstivojevic@etf.bg.ac.rs

Sažetak — U radu je prezentovan metod za izbor optimalnih lokacija riklozera u srednjenaponskim (SN) distributivnim mrežama. Izbor optimalnih lokacija se vrši tako da vrednosti pokazatelja pouzdanosti SN distributivne mreže budu poboljšani. Kriterijumska funkcija na osnovu koje je izvršen izbor optimalnih lokacija riklozera uzima u obzir srednju učestanost nastanka prekida napajanja, srednje kumulativno vrijeme trajanja prekida napajanja i prosječnu neisporučenu električnu energiju po potrošaču. Prilikom proračuna navedenih pokazatelja pouzdanosti uvažena je nesigurnost podataka. Metoda je prezentovana na IEEE test mreži sa 33 čvora.

Ključne riječi - riklozer, pokazatelji pouzdanosti, distributivna mreža, Monte Carlo metoda

I. UVOD

Potrošači električne energije, zbog svog položaja u elektroenergetskom sistemu, trpe prekide napajanja zbog kvarova u bilo kom dijelu elektroenergetskog sistema. Statistički podaci velikih elektroenergetskih kompanija pokazuju da je oko 90% prekida napajanja krajnjih potrošača posljedica kvarova na elementima distributivnog sistema [1], [2]. Da bi se povećala pouzdanost napajanja potrošača, ne računajući velike kapitalne remonte, u mrežu se ugrađuju indikatori kvarova (engl. *Fault Passage Indicators*) i riklozeri (engl. *Reclosers*). Ugradnjom indikatora kvarova skraćuje se vrijeme nalaženja mjesta kvara, a samim tim i vrijeme trajanja prekida napajanja. Za razliku od indikatora kvarova, ugradnjom riklozera, kojima se sekcionišu dijelovi mreže u kvaru, pored skraćivanja vremena trajanja prekida napajanja, smanjuje se i broj prekida [3], [4].

Izbor lokacija za postavljanje riklozera se može posmatrati kao dio problema optimalnog pozicioniranja rasklopne opreme [4], [5], kao dio problema optimalnog pozicioniranja riklozera i distribuiranih izvora energije [6], [7] ili zasebno [8], [9]. U radu [4] se vrši izbor optimalnih lokacija za postavljanje rastavljača i riklozera tako da se maksimalno poboljšaju pokazatelji pouzdanosti, minimizuju troškovi investicije i troškovi prekida napajanja potrošača u prisustvu neizvjesnosti podataka o potrošnji, učestanostima otkaza vodova i vremena popravke kvarova. Koristeći MILP (*Mixed Integer Linear Programming*) u [5] vrši se izbor optimalnog broja, lokacija i tipa uređaja za automatizaciju distributivne mreže kao što su daljinski kontrolisani prekidači, riklozeri i rastavljači, te indikatori kvarova povezani u SCADA sistem. Niz radova se bavi određi-

vanjem lokacija za postavljanje riklozera i distribuiranih izvora energije u distributivnu mrežu. Za rješavanje kriterijumskih funkcija koristi se genetski algoritam [6], [7]. U navedenim radovima se ne uzima u obzir učestanost otkaza rasklopne opreme, nego samo vodova. Predmet ovog rada je izbor optimalnih lokacija za postavljanje jednog ili dva riklozera u srednjenaponsku distributivnu mrežu sa ciljem povećanja pouzdanosti napajanja potrošača. Optimalne lokacije se određuju koristeći stohastičku *Monte Carlo* metodu. Kriterijumska funkcija za izbor optimalnih lokacija riklozera uzima u obzir ponderisane vrijednosti normalizovanih pokazatelja pouzdanosti SN distributivne mreže. Prilikom proračuna pokazatelja pouzdanosti uvažena je nesigurnost podataka o učestanosti otkaza vodova, rasklopne opreme, kao i samog riklozera koji se ugrađuje u SN mrežu. Takođe, uvažena je i nesigurnost podataka o snagama potrošača priključenim u čvorove mreže.

II. TEORIJSKA OSNOVA

A. Pokazatelji pouzdanosti

U radu je izbor optimalne lokacije riklozera izvršen na osnovu kriterijumske funkcije koja se zasniva na minimizaciji sledećih pokazatelja pouzdanosti: *SAIFI* (*System Average Interruption Frequency Index*), *SAIDI* (*System Average Interruption Duration Index*) i *AENS* (*Average Energy Not Supplied*). Pokazatelj *SAIFI* predstavlja prosječan broj dugotrajnih prekida napajanja potrošača tokom posmatranog perioda (obično godina dana). Računa se kao odnos sume broja potrošača koji su ostali bez napajanja u toku godine usljed dugotrajnih prekida i ukupnog broja potrošača u posmatranom sistemu, odnosno mreži [2], [3]:

$$SAIFI = \frac{1}{N} \sum_i f_i N_i \approx \frac{1}{N} \sum_i \lambda_i N_i \left[\frac{1}{\text{god}} \right], \quad (1)$$

gdje je f_i učestanost prekida i , λ_i intenzitet prekida i , N_i broj potrošača koji su ostali bez napajanja tokom prekida i , N ukupan broj potrošača u analiziranom području. U praktičnim proračunima se obično umjesto učestanosti prekida f_i koristi intenzitet prekida λ_i , jer se vrijednosti ova dva pokazatelja neznatno razlikuju.

Pokazatelj *SAIDI* predstavlja prosječno kumulativno trajanje dugotrajnih prekida jednog potrošača u analiziranom periodu [2], [3]:

$$SAIDI = \frac{1}{N} \sum_i f_i \cdot r_i \cdot N_i \left[\frac{\text{h}}{\text{god}} \right], \quad (2)$$

gdje je r_i trajanje prekida napajanja tokom događaja i . Dakle, vrijednost pokazatelja $SAIDI$ se može poboljšati smanjenjem broja prekida napajanja, ali i smanjenjem trajanja tih prekida. Osim navedenih pokazatelja pouzdanosti, u analizama pouzdanosti efekti dugotrajnih prekida se mogu obuhvatiti i preko pokazatelja $AENS$ [2], [3]:

$$AENS = \frac{1}{N} \sum_i f_i \cdot r_i \cdot P_i \left[\frac{\text{Wh}}{\text{god}} \right], \quad (3)$$

gdje je P_i snaga potrošača koji su ostali bez napajanja tokom prekida i .

B. Kriterijumska funkcija

U radu je predložen algoritam kojim se mogu odrediti optimalne lokacije riklozera na osnovu poboljšanja vrijednosti pokazatelja pouzdanosti distributivne srednjenaponske mreže. Izbor optimalnih lokacija riklozera je izvršen na osnovu minimizacije kriterijumske funkcije koja je definisana izrazom:

$$F_i = \omega_1 \frac{SAIFI_i}{SAIFI_0} + \omega_2 \frac{SAIDI_i}{SAIDI_0} + \omega_3 \frac{AENS_i}{AENS_0}, \quad (4)$$

gdje su: ω_1 , ω_2 i ω_3 težinski koeficijenti, $SAIFI_i$ nova vrijednost pokazatelja $SAIFI$ nakon priključenja riklozera na početku voda i , $SAIDI_i$ nova vrijednost pokazatelja $SAIDI$ nakon priključenja riklozera na početku voda i i $AENS_i$ nova vrijednost pokazatelja $AENS$ nakon priključenja riklozera na početku voda i . $SAIFI_0$, $SAIDI_0$ i $AENS_0$ su pokazatelji pouzdanosti proračunati za početnu konfiguraciju mreže.

C. Generisanje nezvjesnih promjenljivih

Metode za analizu pouzdanosti u elektroenergetskom sistemu se mogu podijeliti na analitičke i simulacione. Analitičke metode se zasnivaju na korišćenju prosečnih vrednosti pokazatelja pouzdanosti elemenata, koji se dobijaju na osnovu obrade podataka prikupljenih u dužem vremenskom intervalu. Dugo godina su korišćene zbog kratkog vremena potrebnog za dobijanje rezultata, jer u proračunima koriste samo jednu vrednost pokazatelja pouzdanosti nekog elementa. Za razliku od analitičnih metoda simulacione metode omogućavaju korišćenje gustina raspodjele određenih promjenljivih prilikom proračuna pokazatelja pouzdanosti. One zahtijevaju dosta više računarskog vremena, ali omogućavaju da se dobije kompletnija slika o pouzdanosti sistema budući da se rezultati dobijaju kao funkcija raspodjele vjerovatnoće. Za analizu pouzdanosti u elektroenergetskim sistemima najčešće se primjenjuje *Monte-Carlo* metoda [2].

U ovom radu promjenljive koje se koriste prilikom izbora optimalne lokacije riklozera, a koje se ne znaju sa punom izvješnošću su: učestanost otkaza voda, rastavljača i riklozera, kao i aktivne snage potrošača. Da bi se uvažila nesigurnost navedenih podataka, date promjenljive su modelovane standardnom normalnom gustinom raspodjele vjerovatnoće [10]:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (5)$$

gdje je μ srednja vrijednost, σ standardna devijacija i x slučajna promjenljiva.

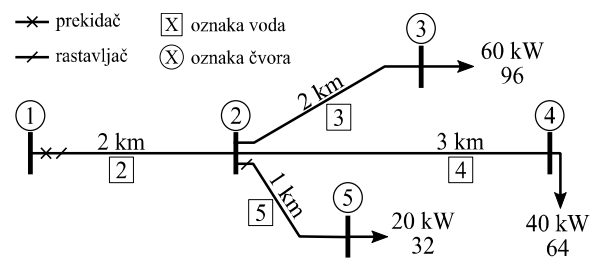
D. Riklozери

Riklozери su uređaji koji mogu detektovati i prekinuti struju kvara. Koriste se u SN mrežama za sekcionisanje dijela mreže u kvaru. Kako je većina kvarova prolaznog karaktera riklozери se standardno podešavaju na tri ciklusa uključenja-isključenja. Ako se poslije tri ciklusa ne uspije uspostaviti napajanje potrošača, riklozери trajno isključuje dio mreže u kvaru. Ugradnjom riklozera povećava se pouzdanost napajanja potrošača tako što se pri kvaru u mreži ne isključuje sa napajanja kompletna mreže, nego samo njen dio [2].

III. METODOLOGIJA

Za proračun pokazatelja pouzdanosti razvijena je programska funkcija koja na osnovu: topologije mreže, učestanosti otkaza vodova u mreži, vremena popravke kvarova na vodovima, opterećenja priključenih u čvorove mreže, vremena potrebnog za otkrivanje mjesta kvara i vremena potrebnog za sekcionisanje mjesta kvara računa pokazatelje pouzdanosti $SAIFI$, $SAIDI$ i $AENS$. Programska funkcija je razvijena za radijalne distributivne mreže. Topologiju mreže i položaj rasklopne opreme je potrebno unijeti u formi matrice kao u [11]. U nastavku će na jednostavnom primjeru biti objašnjen način proračuna pokazatelja pouzdanosti.

Matrica ulaznih podataka za mrežu prikazanu na Sl. 1 data je u tabeli I. U mreži se nalazi pet čvorova, pa matrica podataka ima četiri reda. Prva kolona je vektor rednih brojeva čvorova od 2 do 5. Čvor 2 se napaja sa čvora 1, pa je prvi element u drugoj koloni 1, zatim, čvor 3 se napaja sa čvora 2, pa je drugi element 2, itd. U treću kolonu se unose dužine vodova. Četvrta, peta i šesta kolona označavaju prisustvo rastavljača (D), prekidača / riklozera (R), odnosno osigurača (F) na početku voda. Na primjer, na početku voda koji povezuje čvorove 2 i 5 se nalazi rastavljač, pa se u četvrtoj koloni na poziciji koja odgovara tom vodu nalazi „1” (četvrti element u koloni). Sedma i osma kolona sadrže podatke o snazi i broju potrošača koji su priključeni u čvorovima mreže. I, na kraju, u devetu kolonu se unosi učestanost otkaza vodova (npr. 0,3 1/(km·god)).



Slika 1. Radijalna distributivna mreža.

TABELA I. MATRICA ULAZNIH PODATAKA ZA MREŽU SA SL. 1

čvor i	čvor j	L_{ij} [km]	D	C/R	F	P [kW]	N	f [1/(km·god)]
2	1	2	1	1	0	0	0	0,30
3	2	2	0	0	0	60	96	0,30
4	2	3	0	0	0	40	64	0,30
5	2	1	1	0	0	20	32	0,30

A. Formiranje stabla mreže

Unosom topologije mreže u formi koja je prethodno izložena omogućava se jednostavno formiranje stabla mreže. Prvo se formira matrica incidencije tako što se na dijagonalu matrice unesu „1”, a za vandijagonalne elemente se unosi „0” ili „-1”. Ako su čvorovi i i j direktno povezani na poziciju (i, j) unosi se „-1”, u suprotnom se unosi „0”. Matrica incidencije je kvadratna, čija je dimenzija jednaka broju čvorova u mreži. Dakle, za mrežu prikazanu na Sl. 1 matrica incidencije je **A**. Invertovanjem matrice incidencije dobija se matrica koja definiše preko kojih čvorova se napaja svaki od čvorova mreže [12], u posmatranom primjeru matrica **B**:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Posmatrajmo, na primjer, četvrtu kolonu matrice **B**. Ona definiše preko kojih čvorova se napajaju potrošači priključeni u čvor 4. Ako se u presjeku posmatrane vrste i određene kolone nalazi „1”, potrošači u posmatranom čvoru se napajaju preko čvorova koji predstavljaju odgovarajuće kolone. U posmatranom primjeru, u presjeku četvrte vrste i prve, druge i četvrte kolone nalazi se jedinica, te se potrošači u čvoru četiri napajaju preko čvorova jedan i dva, što možemo vidjeti i na Sl. 1.

B. Određivanje elementa kojim se isključuje kvar

Isključenje kvara prekidačem, osiguračem ili riklozerom dovodi do isključenja napajanja u dijelu mreže bez obzira koji element će isključiti napajanje mjesta kvara. Stoga se formira jedan vektor (**C**) koji sadrži podatke o lokacijama navedenih uređaja. Za potrebe proračuna pokazatelja pouzdanosti, nakon simulacije kvara na određenoj dionici mreže, potrebno je prvo odrediti element kojim bi se isključio kvar. Da bi se on odredio, potrebno je imati podatak preko kojih vodova bi se napajao posmatrani kvar. Te podatke dobijamo iz matrice **B** poredeći podatke o lokacijama prekidača, riklozera i osigurača u mreži sa podacima preko kojih vodova se napaja kvar. Da bi prekidač, osigurač ili riklozer isključio kvar, potrebno je da se na odgovarajućem vodu preko koga se napaja kvar nalazi dati uređaj. Npr. ako se dogodi kvar na vodu 5, tada se posmatra peta vrsta matrice **B** i vektor **C** na osnovu kojih se formira vektor **K** (ako se na istim pozicijama pete vrste matrice **B** i vektora **C** nalazi „1” onda se na tu poziciju vektora **K** upisuje „1”, u suprotnom se upisuje „0”), koji definiše koji prekidač, riklozer ili osigurač može isključiti kvar:

$$\begin{aligned} \mathbf{B}_{5\bullet} &= [1 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 1] \\ \mathbf{C} &= [0 \quad 1 \quad 0 \quad 1 \quad 0] \\ \mathbf{K} &= [0 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \end{aligned} \quad (7)$$

Množenjem elemenata dobijenog vektora **K** sa elementima vektora rednih brojeva čvorova u mreži dobija se vektor čiji su elementi različiti od nule ako se na početku voda preko koga se napaja kvar, nalazi prekidač, osigurač ili riklozer. Ako su čvorovi u mreži numerisani prema [11] onda se traži maksimum dobijenog vektora (taj element je električno najbliži mjestu kvara). U posmatranom primjeru to bi bilo:

$$R_{isk} = \max([1 \cdot k_{11} \quad \dots \quad 5 \cdot k_{15}]) = 2. \quad (8)$$

C. Određivanje elementa kojim se izoluje kvar

Procedura za određivanje prekidača, osigurača, riklozera ili rastavljača kojim bi se izolovao kvara je ista kao i procedura za određivanje prekidača, riklozera ili osigurača kojim bi se isključio kvar, samo se pri formiranju vektora **C** uzimaju u obzir i lokacije rastavljača.

D. Proračun pokazatelja pouzdanosti

Pokazatelji pouzdanosti se računaju po formulama izloženim u drugom poglavlju ovog rada. Nakon nastanka kvara i određivanja elementa kojim se bi se isključio kvar i elementa kojim bi se izolovao kvar, određuje se koji će potrošači ostati bez napajanja i koliko dugo. Ako posmatramo isti kvar kao u prethodnim dijelovima ovog rada, tj. kvar na vodu 5 (Sl. 1), on bi bio isključen prekidačem na vodu 2 i izolovan rastavljačem na vodu 5. Potrošače koji će imati prekid napajanja pri posmatranom kvaru određujemo tako što na poziciju matrice **A**, koja odgovara vodu na kome se nalazi prekidač kojim bi se isključio kvar, unosimo „0” umjesto „-1”. U posmatranom slučaju unosimo na poziciju (2, 1), jer bi se kvar isključio prekidačem koji se nalazi na vodu 2. Invertovanjem dobijene matrice dobija se podatak koji od čvorova ostaju bez napajanja, a koji ne kada se isključi prekidač. Posmatra se prva kolona matrice (u ovom primjeru **B^{5C}**). Ako se jedinica nalazi u presjeku prve kolone i određene vrste, čvor koji označava vrstu i dalje ima napajanje, a ako se nalazi nula, čvor gubi napajanje isključenjem prekidača. Razlog zašto se posmatra prva kolona se krije u činjenici da je čvor jedan napojni čvor mreže. U posmatranom primjeru se dobija da napon ostaje prisutan samo u čvoru jedan:

$$\mathbf{B}^{5C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Broj potrošača koji će imati prekid napajanja pri određenom kvaru, potreban za računanje pokazatelja *SAIFI* i *SAIDI*, dobija se vektorskim množenjem vektora broja potrošača po čvorovima mreže (**N**) i vektora koji se dobija kada se od jediničnog vektora oduzme prva kolona matrice **B** (u posmatranom slučaju **B^{5C}**):

$$N_5 = \mathbf{N} \cdot (\mathbf{1} - \mathbf{B}_{\bullet 1}^{5C}) = 192. \quad (10)$$

Proračun pokazatelja *SAIFI* se vrši po formuli (1), pri čemu se učestanost otkaza voda dobija množenjem podužne učestanosti otkaza sa dužinom voda. Pri proračunu pokazatelja *SAIDI* situacija je nešto komplikovanija, jer se za pojedine potrošače mora proračunati trajanje prekida napajanja. Tu razlikujemo nekoliko slučajeva:

- potrošači koji ne gube napajanje pri isključenju kvara,
- potrošači kojima se napajanje vraća poslije lociranja kvara i sekcionisanja mjesta kvara i
- potrošači kojima se napajanje vraća tek nakon popravke kvara.

Proračun pokazatelja *SAIDI* se računa na osnovu vremena trajanja prekida napajanja za svaki čvor, pri kvarovima na svakom od vodova u mreži. U opštem slučaju pokazatelj *SAIDI* se računa na sljedeći način:

$$SAIDI = \frac{1}{N} \sum_i f_i \cdot (T_{ri} + T_l) \cdot \mathbf{N} \cdot \mathbf{H} + f_i \cdot (T_{di} + T_l) \cdot \mathbf{N} \cdot \mathbf{G}, \quad (11)$$

gdje je $\mathbf{H}_{M \times I}$ vektor kolona čiji su elementi „1” ako se napajanje odgovarajućeg čvora uspostavlja tek nakon popravke kvara:

$$\mathbf{H} = \left[(1 - b_{11}^c)(1 - b_{11}^d) \quad (1 - b_{12}^c)(1 - b_{12}^d) \quad \dots \right], \quad (12)$$

a $\mathbf{G}_{M \times I}$ vektor kolona čiji su elementi „1” ako se napajanje odgovarajućeg čvora uspostavlja nakon izolacije mjesta kvara:

$$\mathbf{G} = \left[(1 - b_{11}^c)b_{11}^d \quad (1 - b_{12}^c)b_{12}^d \quad \dots \quad (1 - b_{1M}^c)b_{1M}^d \right], \quad (13)$$

\mathbf{N} vektor vrsta broja potrošača priključenih u čvorove mreže, f_i učestanost otkaza posmatranog voda, T_{ri} vrijeme popravke kvara, T_l vrijeme lociranja kvara, T_{di} vrijeme potrebno za sekcionisanje mjesta kvara, b_{in}^c element matrice $\mathbf{B}_{M \times M}^c$, b_{in}^d element matrice $\mathbf{B}_{M \times M}^d$ (matrica koja definiše koji čvorovi će ostati pod naponom nakon izolovanja kvara), N ukupan broj potrošača u mreži i M broj čvorova u mreži.

Slična procedura se koristi i za proračun pokazatelja *AENS*, samo što se umjesto broja potrošača priključenih u čvorove mreže koristi snaga potrošača:

$$AENS = \frac{1}{N} \sum_i f_i \cdot (T_{ri} + T_l) \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{H} + f_i \cdot (T_{di} + T_l) \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{G}, \quad (14)$$

gdje je $\mathbf{P}_{1 \times M}$ vektor vrsta snaga potrošača priključenih u čvorove.

E. Uvažavanje otkaza rasklopne opreme na pokazatelje pouzdanosti

U prethodno izvedenoj proceduri se smatra da je rasklopna oprema 100% pouzdana, tj. da se kvarovi dešavaju samo na vodovima. U proračunu koji je sproveden u ovom radu uvažena je pouzdanost i ovih elemenata pri proračunu pokazatelja pouzdanosti. Da bi se proračun pojednostavio, kao i da bi broj računskih operacija u algoritmu bio smanjen, formirani su tzv. „ekvivalentni vodovi”. Posmatrajmo kvar na rastavljaču koji se nalazi na početku voda 5 (Sl. 1). Kvar na posmatranom rastavljaču se isključuje i izoluje prekidačem na vodu 2. U posmatranom slučaju isti efekat se javlja kao da je kvar na vodu koji napaja posmatrani rastavljač, tj. vodu 2. U opštem slučaju ako je u čvor priključen element koji nije 100% pouzdan, njegovu pouzdanost treba uvažiti pri proračunu ekvivalentne pouzdanosti voda koji napaja posmatrani element i to tako da se na učestanost otkaza voda koji napaja određeni čvor doda učestanost otkaza elemenata rasklopne opreme koji se nalaze na počecima vodova koji se napajaju iz posmatranog čvora. Izuzetak se javlja kod proračuna f_e i r_e ekvivalentnog voda za vod koji polazi iz napojne transformatorske stanice. U ovom slučaju se dobija tako što se saberu učestanosti otkaza prekidača i rastavljača koji se nalaze na tom vodu.

Način proračuna ekvivalentnog vremena trajanja popravke kvara će biti demonstriran na primjeru. Proračun ekvivalentnog vremena trajanja popravke kvara na ekvivalentnom vodu 2 se vrši na osnovu izraza (uzimamo u obzir postojanje prekidača i rastavljača na vodu 2 i rastavljača na vodu 5) [2]:

$$f_e r_e \approx f_2 r_2 + 2 f_d r_d + f_f r_f. \quad (15)$$

gdje je r_e ekvivalentno vrijeme popravke kvara na ekvivalentnom vodu 2, a r_2 , r_d , r_f vremena popravke kvara na vodu 2, rastavljaču i osiguraču, respektivno. Iz izraza (15) jednostavno se dobija ekvivalentno vrijeme popravke kvara na ekvivalentnom vodu 2:

$$r_e \approx \frac{f_2 r_2 + 2 f_d r_d + f_f r_f}{f_e}. \quad (16)$$

IV. ALGORITAM ZA PRORAČUN OPTIMALNIH LOKACIJA RIKLOZERA

Izbor optimalnih lokacija za postavljanje riklozera će biti urađen primjenom *Monte Carlo* metode. Za svaki vod, rastavljač, riklozer i potrošač u svakoj simulaciji učestanost otkaza, odnosno aktivna snaga, dobija se množeći srednju vrijednost datih promjenljivih sa koeficijentom koji se izvlači iz normalne raspodjele čija je srednja vrijednost jednaka 1 r.j, a standardna devijacija učestanosti otkaza je 0,1 r.j, odnosno aktivne snage potrošača 0,07 r.j. Na primjer, vektor opterećenja po čvorovima mreže se dobija na osnovu potrošnje po čvorovima mreže P_i i normalne raspodjele $N(\mu, \sigma)$ sa parametrima $\mu = 1$ r.j. i $\sigma = 0,07$ r.j:

$$\mathbf{P} = \left[P_1 N(\mu, \sigma) \quad \dots \quad P_M N(\mu, \sigma) \right]. \quad (17)$$

Izbor optimalnih lokacija riklozera se vrši prema algoritmu prikazanom na Sl. 2. Prvo se vrši učitavanje podataka, matrice podataka o mreži i potrošačima, kao što su: topologija mreže, učestanosti otkaza i vremena popravke rasklopne opreme, težinski koeficijenti, standardna devijacija za promjenljive koje su modelovane normalnom gustinom raspodjele vjerovatnoće i broj simulacija. Zatim se vrši proračun konstanti, kao što je broj čvorova u mreži i alokacija memorije. Nakon ovoga, dolazi se do glavne petlje u kojoj se za određeni broj iteracija i za svaku poziciju riklozera prvo računaju učestanosti otkaza rasklopne opreme i snage potrošača priključenih u čvorove mreže uvažavajući nesigurnost podataka (primenom izraza (5)). Zatim se za različite pozicije riklozera računaju pokazatelji pouzdanosti i vrijednost kriterijumske funkcije. Nakon završetka glavne petlje, računa se srednja vrijednost kriterijumske funkcije za svaku od pozicija riklozera i određuje najmanja srednja vrijednost. Na kraju programa se dobijaju rezultati simulacije i optimalne lokacije riklozera.

V. REZULTATI SIMULACIJA

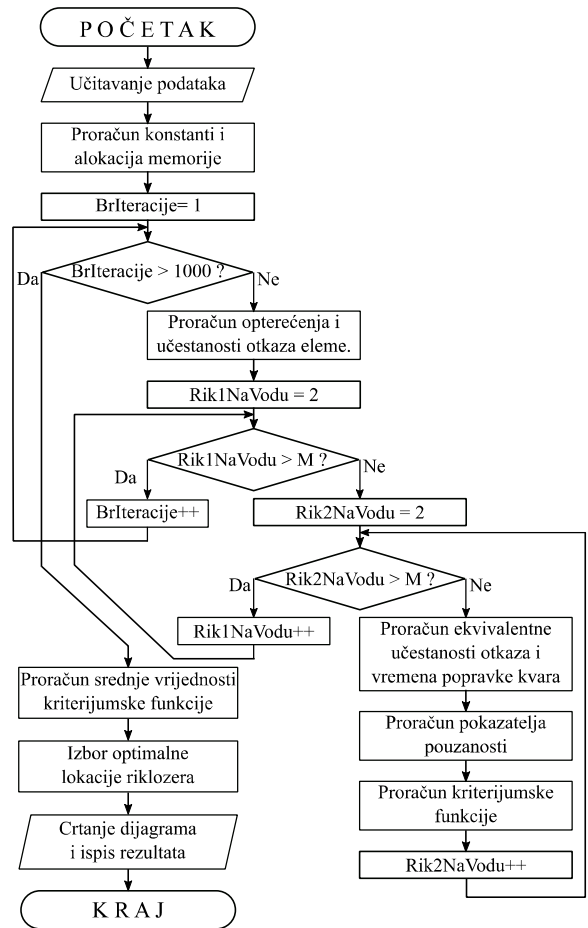
Primjer izbora optimalnih lokacija za postavljanje riklozera će biti demonstriran na primjeru IEEE test mreže sa 33 čvora, koja je prikazana na Sl. 3. Topologija mreže, podaci o dužini vodova, broju potrošača i opterećenjima priključenim u čvorove mreže su dati u [12]. Pretpostavljeno je da su svi potrošači istog tipa. Pokazatelji pouzdanosti elemenata i dodatni podaci potrebni za simulaciju su dati u tabeli II.

TABELA II. PODACI KORIŠĆENI PRI SIMULACIJI [2], [14]

Promjenljiva	Vrijednost	Jedinica
Učestanost otkaza rastavljača	0,0028	1/god
Učestanost otkaza riklozera	0,0125	1/god
Učestanost otkaza voda po km	0,31	1/god
Učestanost otkaza prekidača	0,0125	1/god
Vrijeme popravke voda	11	h
Vrijeme lociranja kvara	1,5	h
Vrijeme popravke riklozera	2	h
Vrijeme popravke rastavljača	10,5	h
Vrijeme manipulacije rastavljačem	0,5	h
Težinski koeficijenti ($\omega_1, \omega_2, \omega_3$)	1	/
Broj iteracija koji se simulira	1000	/

Zavisnost srednje vrijednosti objektivne funkcije od lokacije riklozera za IEEE test mrežu sa 33 čvora prikazana je na Sl. 4. Sa nje se može vidjeti da je optimalna lokacija za postavljanje jednog riklozera na početku voda 8, tj. na početku voda koji povezuje čvorove 7 i 8. Objektivna funkcija na osnovu koje je izvršen izbor optimalne lokacije za postavljanje riklozera (4) uzima u obzir tri pokazatelja pouzdanosti. U slučaju da se objektivna funkcija zasniva samo na jednom pokazatelju pouzdanosti dobijamo tri krive date na Sl. 5. Ako se posmatra samo jedan od navedenih pokazatelja pouzdanosti, opet se dobija da je optimalna lokacija za postavljanje jednog riklozera na početku voda 8, kada se dobija minimalna srednja vrijednost objektivne funkcije.

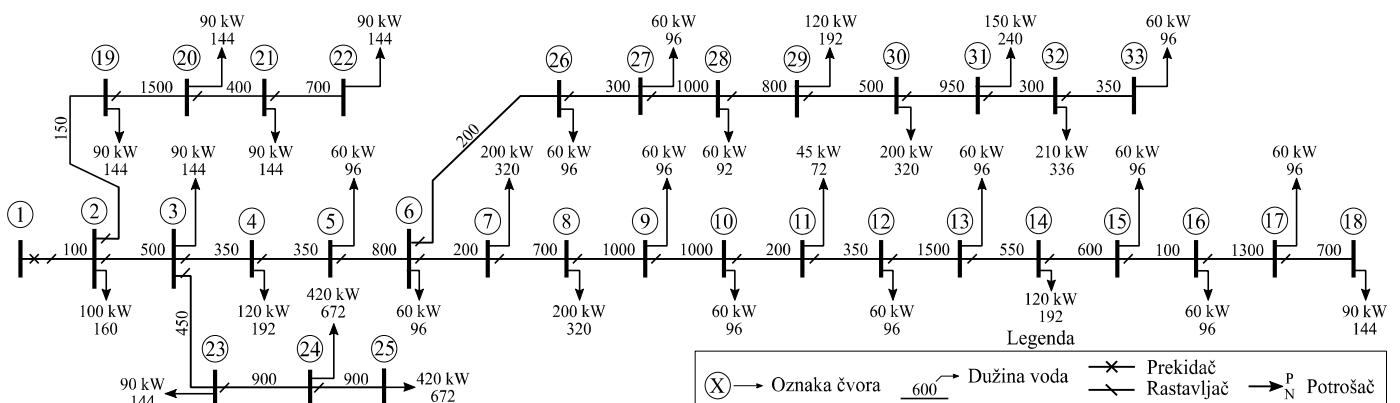
Srednja vrijednost objektivne funkcije u slučaju ugradnje dva riklozera prikazana je na Sl. 6. Minimalna vrijednost objektivne funkcije se ima ako bi se riklozera ugradili na počecima vodova 8 i 26. Takođe, kao što je očekivano, može se primijetiti da bi se ista srednja vrijednost objektivne funkcije dobila ako bi se riklozera postavili na vodove 26 i 8. Razlog zašto je to tako se krije u činjenici da permutacija riklozera daje isti rezultat. Iz istog razloga, dijagram prikazan na Sl. 6 je simetričan u odnosu na dijagonalu. Minimalne, srednje i maksimalne vrijednosti pokazatelja pouzdanosti i posmatrane kriterijumske funkcije za mrežu bez riklozera, sa jednim i sa dva riklozera su date u tabeli III. Ugradnjom dva riklozera srednja vrijednost pokazatelja SAIFI se približno smanjuje na polovinu vrijednosti prije ugradnje, dok se srednje vrijednosti pokazatelja SAIDI i AENS smanjuju, ali ne u mjeri kao SAIFI.



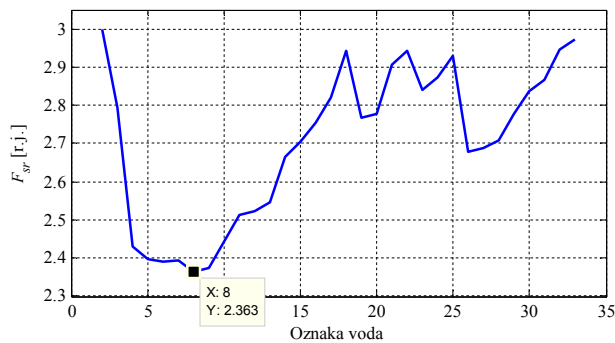
Slika 2. Tok algoritma za izbor optimalnih lokacija jednog i dva riklozera.

TABELA III. VRIJEDNOSTI POKAZATELJA POUZDANOSTI

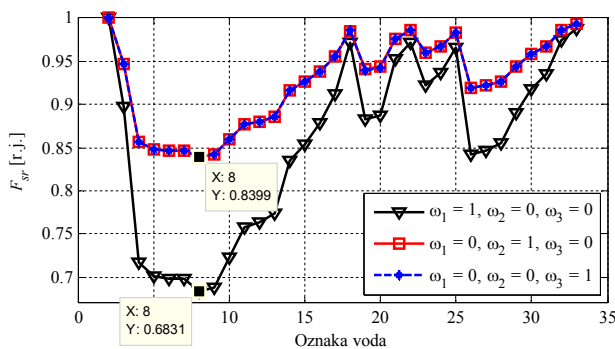
	Bez riklozera	Sa jednim riklozera	Sa dva riklozera
	min/srednja/max	min/srednja/max	min/srednja/max
SAIFI [1/god]	2,51 / 2,71 / 2,95	1,72 / 1,85 / 1,97	1,30 / 1,42 / 1,51
SAIDI [h/god]	9,9 / 10,7 / 11,7	8,3 / 9,0 / 9,7	7,4 / 8,2 / 8,7
AENS [kWh/god]	6,2 / 6,7 / 7,4	5,3 / 5,6 / 6,1	4,7 / 5,1 / 5,5
F_{sr} [r.j.]	/	2,31 / 2,36 / 2,41	1,99 / 2,04 / 2,08



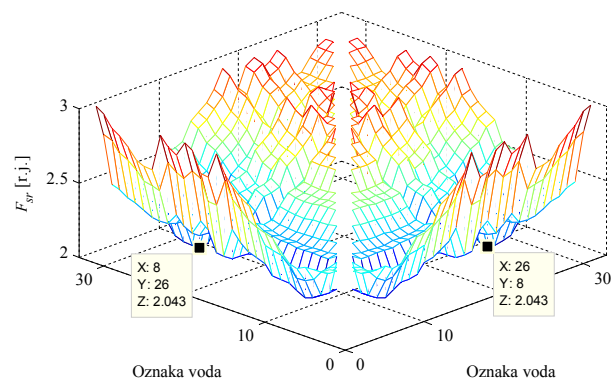
Slika 3. IEEE test mreža sa 33 čvora.



Slika 4. Srednja vrijednost objektivne funkcije za jedan riklozer.



Slika 5. Srednja vrijednost objektivne funkcije za jedan riklozer i različite težinske koeficijente.



Slika 6. Srednja vrijednost objektivne funkcije za različite pozicije dva riklozera.

VI. ZAKLJUČAK

U ovom radu je izložen algoritam za određivanje optimalnih lokacija za postavljanje jednog ili dva riklozera u distributivnu srednjenaponsku mrežu uz uvažavanje nesigurnosti podataka. Izbor optimalnih lokacija je izvršen na osnovu minimalne dobijene vrednosti kriterijumske funkcije koja uzima u obzir normalizovane pokazatelje pouzdanosti *SAIFI*, *SAIDI* i *AENS*. Na taj način izabrana je lokacija koja najviše doprinosi poboljšanju pouzdanosti napajanja potrošača. Predstavljeni algoritam bi jednostavno mogao da se nadogradi tako da uvaži i druge pokazatelje pouzdanosti, kao i ekonomske aspekte ugradnje riklozera i procenu ušteta usled skraćenog trajanja prekida napajanja potrošača. U budućem radu, planirana je nadogradnja i prilagođavanje algoritma tako da se pronađe optimalan broj riklozera, koji se mogu ugraditi u mrežu, uz analizu troškova i ušteta koji se ostvaruju.

LITERATURA

- [1] A. Moradi, M. Fotuhi-Firuzabad, M. Rashidi-Nejad, "A Reliability cost/worth Approach to Determine Optimum Switching Placement in Distribution Systems", Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, 2005 IEEE/PES, 2005, pp. 1-5.
- [2] J. Nahman, V. Mijailović, "Pouzdanost sistema za distribuciju električne energije," Akademska misao, Beograd, 2009.M.
- [3] R. E. Brown, Electric Power Distribution Reliability, Marcel Dekker, Inc, New York, 2002.
- [4] A. Alam, V. Pant, B. Das, "Switch and Recloser Placement in Distribution System Considering Uncertainties in Loads, Failure Rates and Repair Rates", Electric Power Systems Research, vol. 140, pp. 619-630, November 2016.
- [5] Ž. Popović, B. Brbaklić, S. Knežević, "A Mixed Integer Linear Programming Based Approach for Optimal Placement of Different Types of Automation Devices in Distribution Networks", Electric Power Systems Research, vol. 148, pp. 136-146, July 2017.
- [6] D.H. Popović, J.A. Greatbanks, M. Begović, A. Pregelj, "Placement of Distributed Generators and Reclosers for Distribution Network Security and Reliability", Electrical Power and Energy Systems, vol. 27, no.5-6, pp. 398-408, June-July 2005.
- [7] A. Pregelj, M. Begović, A. Rohatgi, "Recloser Allocation for Improved Reliability of DG-Enhanced Distribution Networks", IEEE Trans. Power Syst. vol. 21, no. 3, pp. 1442-1449, August 2006.
- [8] N. Dehghani, R.Dashti, "Optimization of Recloser Placement to Improve Reliability by Genetic Algorithm", Energy and Power Engineering, vol. 3 no. 4, pp. 508-512, September 2011.
- [9] Sh. Abdi, K. Afshar, S. Ahmadi, N. Bigdeli, M. Abdi, "Optimal Recloser and Auto-sectionalizer Allocation in Distribution Networks Using IPSO-Monte Carlo Approach", Electrical Power and Energy Systems, vol. 55, pp. 602-611, February 2014.
- [10] R. Billinton, W. Li, Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods, Springer Science+Business Media, LLC, 1994.
- [11] Č. Zeljković, P. Mršić, Đ. Lekić, B. Erceg, P. Matić, S. Zubić, P. Balcerek, "Performance Assessment of Fault Locators and Fault Passage Indicators in Distribution Networks by the Non-Sequential Monte Carlo Simulation", 2018 International Symposium on Industrial Electronics, Banja Luka, 2018.
- [12] W. F. Usida, D.V. Coury, R.A. Flauzino and I.N.da Silva, "Efficient Placement of Fault Indicators in an Actual Distribution System Using Evolutionary Computing", IEEE Trans. Power Syst. vol. 27, no. 4, pp. 1841 - 1849, November 2014.
- [13] S. Ghasemi, J. Moshagh, "Radial distribution systems reconfiguration considering power losses cost and damage cost due to power supply interruption of consumers", International Journal on Electrical Engineering and Informatics, 5(3), 297, 2013.
- [14] M. Tanasković, T. Bojković, D. Perić, "Distribucija električne energije - rešeni primeri", 2. izdanje, Akademska misao, 2009.

ABSTRACT

In this paper, a method for optimal placement of reclosers in medium voltage distribution networks for maximizing system reliability is presented. The system average interruption frequency index, system average interruption duration index and average energy not supplied are taken into account in the objective function to be minimized. Uncertainty of the input data is observed and their ranges were defined. The proposed method has been demonstrated on the IEEE 33-bus test network.

OPTIMAL RECLOSER PLACEMENT IN MEDIUM VOLTAGE DISTRIBUTION NETWORKS CONSIDERING UNCERTAINTIES OF INPUT DATA

Predrag Mršić, Jelisaveta Krstivojević