

# OPTIMALNO KREIRANJE OSTRVA KORIŠĆENJEM PRISTUPA ZASNOVANOG NA UPRAVLJANJU RIZIKOM

## OPTIMAL ISLAND PARTITIONING OF RADIAL DISTRIBUTION NETWORKS WITH DISTRIBUTED GENERATORS USING RISK BASED APPROACH

Željko POPOVIĆ, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija  
Stanko KNEŽEVIĆ, Schneider Electric DMS NS, Novi Sad, Srbija

### KRATAK SADRŽAJ

Pouzdanost napajanja je izuzetno važna za korisnike u distributivnim mrežama i zbog toga je unapređenje pouzdanosti postao jedan od osnovnih ciljeva u distributivnim kompanijama. Kreiranje ostrva u slučaju trajnih kvarova, korišćenjem daljinski kontrolisanih rasklopnih uređaja (reklozera, sklopka-rastavljača), može značajno da unapredi pouzdanost u radijalnim distributivnim mrežama sa distributivnim generatorima. U ovom radu je prikazana procedura za određivanje optimalnog kreiranja ostrva (mikro-mreža) u automatizovanim radijalnim distributivnim mrežama sa distributivnim generatorima uvažavajući neizvesnost u potrošnji i proizvodnji. Predloženi pristup je zasnovan na konceptu fazi skupova, fazi mešovitom celobrojnom programiranju i na analizi rizika. On obezbeđuje generisanje (dobijanje) velikog broja različitih scenarija za kreiranje ostrva. Najbolji među njima se bira na osnovu kriterijuma za merenje i upravljanje rizikom zasnovanog na maksimalnoj očekivanoj dobiti. Na ovaj način predloženi pristup omogućuje donosiocu odluke da izabere onaj scenarijo kreiranja ostrva koji na najefektniji način odgovara na neizvesnost opterećenja (potrošnje) i proizvodnje distributivnih generatora, odnosno scenario koji minimizira rizik od neuspešnog kreiranja ostrva u prisustvu neizvesnosti proizvodnje i potrošnje.

**Ključne reči:** distributivna mreža, kreiranje ostrva, neizvesnost, analiza rizika

### SUMMARY

Distribution network reliability becomes essential for customer satisfaction and thus improving service reliability becomes the major concern for distribution utilities. Intentional islanding can increase the reliability in radial networks with distributed generation in the case of sustained faults by creating one or more islands in the network using remotely controlled switches (reclosers, sectionalizing switches). This paper proposes an approach for optimal island partitioning in automated radial distribution networks with distributed generators considering load and generation uncertainty. The proposed approach is based on fuzzy set concept, fuzzy mixed integer linear programming, and risk analysis. It enables obtaining a number of different islanding scenarios. The best among them is selected by employing the maximal expected monetary value criterion for measuring and managing risk. In this way, the proposed approach provides a decision-maker with a means of determining the islanding scenario that responds to load and generation uncertainty in the most effective way, i.e., that minimizes the risk of unsuccessful islanding in the presence of load and generation uncertainty.

**Key words:** distribution network, island partitioning, uncertainty, risk analysis

Željko Popović, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, [zpopovic@uns.ac.rs](mailto:zpopovic@uns.ac.rs)  
Stanko Knežević, Schneider Electric DMS NS, Novi Sad, [stanko.knezevic@schneider-electric-dms.com](mailto:stanko.knezevic@schneider-electric-dms.com)

## 1. UVOD

Jedan od osnovnih zadataka distributivnih preduzeća je da obezbede pouzdano snabdevanje električnom energijom svih korisnika. Zbog toga je cilj operatora distributivnih sistema (ODS) da održavaju postojeći nivo pouzdanosti distributivnih mreža, tamo gde je dostignut odgovarajući nivo, ili da ga unapređuju. Da bi se ostvarili ti ciljevi, primenjuju se različite strategije. Automatizacija mreže je jedna od najefikasnijih strategija za unapređenje pouzdanosti, koja pomoću daljinski kontrolisanih rasklopnih uređaja (reklozeri i sekcioneri) utiče na smanjenje broja korisnika pogođenih kvarom kao i na vreme trajanja prekida napajanja [1]-[3]. Formiranje ostrva (mikro-mreže) u slučaju trajnih kvarova može dodatno unaprediti pouzdanost u radijalnim mrežama. Ostrvo se kreira pomoću daljinski kontrolisanih uređaja (reklozera i sekcionera) i ono je uspešno kreirano ako generatori unutar ostrva mogu da snabdevaju potrošače u ostrvu a da pri tom nisu narušena naponska i termička ograničenja. Do sada je predložen veliki broj pristupa i modela za određivanje lokacija daljinski kontrolisanih uređaja uz uvažavanje mogućnosti kreiranja ostrva u distributivnim mrežama [4]-[9]. Detaljan pregled predloženih pristupa je dat u [9]. Predložene metode se bave dugoročnim planiranjem automatizacije mreža, odnosno definišu broj i lokaciju daljinski kontrolisanih uređaja u radijalnim mrežama gde je formiranje ostrva dozvoljeno razmatrajući period od 15-20 godina u budućnosti. Koristeći automatizovane (daljinski kontrolisane) rasklopne uređaje definisane u fazi planiranja automatizacije, operator distributivnog sistema u svakodnevnom radu, za slučaj trajnog kvara, razmatra kreiranje ostrva u cilju unapređenja pouzdanosti. Kreirano ostrvo napaja deo potrošača koji se nalazi ispod mesta kvara i na taj način se smanjuje trošak neisporučene energije. U [10]-[13] je predloženo nekoliko pristupa za optimalno kreiranje ostrva kod trajnih kvarova u cilju unapređenja pouzdanosti u distributivnim mrežama. Pristup za određivanje optimalnih ostrva zasnovan na modifikovanoj diskretnoj verziji algoritma roja čestica je predložen u [10]. Dvo-etapni pristup, predložen u [11] koristi aproksimativni metod zasnovan na algoritmu grana i granica za dobijanje najboljeg scenarija za kreiranje ostrva. Sličan dvoetafni heuristički metod, zasnovan na modifikovanom SFLA (shuffled frog leap algorithm) algoritmu je predložen u [12]. Dvo-etapna heuristička procedura je takođe predložena i u [13] gde je korišćen algoritam zasnovan na teoriji grafova u prvoj etapi da bi se dobila preliminarna rešenja (ostrva) a zatim su tako dobijena ostrva dalje prilagođavana (menjana) u drugoj etapi da bi se obezbedila njihova održivost, odnosno da bi se obezbedilo da su sva operativna ograničenja u ostrvima zadovoljena. Međutim, zbog nepredvidive prirode distributivnih generatora (npr. vetrogeneratora) [14] i neizvesnosti u potrošnji [15], može se pojaviti ne samo jedna, već više različitih kombinacija potrošnje i proizvodnje tokom trajanja kvara. S obzirom na to, potrebno je odrediti scenario za kreiranje ostrva koji će na najefektivniji način odgovoriti na sve moguće događaje, odnosno na bilo koju kombinaciju potrošnje i proizvodnje. Prema tome, cilj je odrediti (optimalni) scenario za kreiranje ostrva koji će minimizirati rizik od pojave neuspešno kreiranih ostrva usled neizvesnosti proizvodnje i potrošnje. Stoga, deterministički pristup baziran na tačno određenim vrednostima (krisp vrednostima), predložen u npr. [10]- [13], može voditi do loših (pogrešnih) rešenja u prisustvu neizvesnosti potrošnje i proizvodnje.

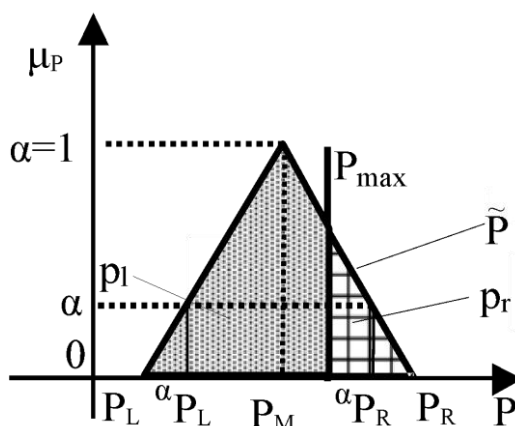
U ovom radu su korišćeni fazi skupovi za opisivanje neizvesnosti potrošnje i proizvodnje. Koristeći fazi skupove, vrednosti potrošnje i proizvodnje su predstavljene trougaonim fazi brojevima. Neizvesnost potrošnje i proizvodnje je analizirana posmatrajući skup mogućih intervala ( $\alpha$ -preseke) fazi brojeva. Za svaki razmatrani  $\alpha$ -presek (interval) fazi brojeva, problem određivanja optimalnog scenarija kreiranja ostrva je rešen primenom algoritma fazi mešovitog celobrojnog lineranog programiranja (MILP) [16], [17]. Na ovaj način, predloženi pristup omogućuje dobijanje velikog broja različitih scenarija kreiranja ostrva. U nekim scenarijima, zbog neizvesnosti potrošnje i proizvodnje, može doći do narušavanja naponskih i termičkih ograničenja u ostrvu sa određenom izvesnošću. Ova narušavanja ograničenja i njihove izvesnosti se određuju za svaki scenario. Tako dobijeni scenariji za kreiranje ostrva su ocenjeni na osnovu kriterijuma za ocenu rizika zasnovanog na maksimalnoj očekivanoj vrednosti (max EMV) [19]. Na osnovu datog kriterijuma se za svaki scenario određuje ukupan očekivani trošak prekida u fazi domenu i scenario sa minimalnim očekivanim troškom se bira kao najbolji. Očekivani trošak prekida se sastoji od sume očekivanih troškova neisporučene energije u svim čvorovima potrošača ispod mesta kvara, i sume očekivanih troškova neproizvedene energije distributivnih generatora koji se nalaze ispod mesta kvara a ne učestvuju u kreiranju ostrva. Na ovaj način, predloženi pristup omogućava određivanje najefektivnijeg scenarija za kreiranje ostrva u prisustvu neizvesnosti u potrošnji i proizvodnji.

Dobijeni rezultati testiranja pokazuju značaj primene pristupa zasnovanog na analizi rizika za određivanje optimalnog scenarija za kreiranja ostrva u prisustvu neizvesnosti potrošnje i proizvodnje. Optimalan scenario dobijen primenom predloženog pristupa je upoređivan sa scenarijima dobijeni primenom tradicionalnog (determinističkog) pristupa zasnovanog na tačnom poznavanju potrošnje i proizvodnje. Testiranje je urađeno na IEEE šemi namenjenoj za testiranje pouzdanosti.

## 2. MODELOVANJE NEIZVESNOSTI POTROŠNJE I PROIZVODNJE

Za opisivanje neizvesnosti u potrošnji i proizvodnji koriste se fazi brojevi. Neizvesnost potrošnje i proizvodnje, odnosno sve njihove moguće vrednosti, opisane su pomoću trougaonih fazi brojeva (TFN) na osnovu pristupa koji je predložen u [15] i [19]. Na slici 1 predstavljen je jedan trougaoni fazi broj  $\tilde{P}$  sa karakterističnim vrednostima. Na osnovu ovoga pristupa se definiše da će vrednost potrošnje i proizvodnje u datom čvoru biti oko srednje vrednosti  $P_M$ , ne manja od  $P_L$  i ne veća od  $P_R$ .

Za aritmetičke operacije sa fazi brojevima uvodi se parametar  $\alpha$  ( $\alpha$ -presek) kod fazi potrošnje i fazi proizvodnje kao što je prikazano na slici 1. Za svako  $\alpha$  se definiše zatvoreni interval mogućih vrednosti opisan sa levom  ${}^{\alpha}P_L$  i desnom  ${}^{\alpha}P_R$  graničnom vrednošću, kao na slici 1. Sa povećanjem  $\alpha$ , vrednosti leve i desne strane intervala postaju bliske, dok su za  $\alpha=1$  one identične. Ovakvo predstavljanje fazi brojeva omogućuje definisanje aritmetičkih operacija nad fazi brojevima koristeći aritmetičke operacije nad njihovim  $\alpha$ -presecima [20] kao i poređenje fazi brojeva [21]. Varirajući vrednosti  $\alpha$  u intervalu  $[0,1]$ , sve moguće kombinacije potrošnje i proizvodnje u mreži mogu biti simulirane.



SLIKA 1. FAZI PROIZVODNJA I POTROŠNJA

Kako su potrošnja i proizvodnja opisane fazi brojevima, i tokovi snaga u mreži će takođe biti opisani fazi brojevima. Neka je na slici 1 dat izgled fazi broja  $\tilde{P}$ , koji predstavlja fazi tok snage neke deonice u ostrvu. Očigledno je da vrednost fazi toka snage date deonice zavisi od fazi potrošnje i proizvodnje u kreiranom ostrvu. Pored toga, data deonica ima termičko ograničenje koje je na slici 1 označeno sa  $P_{max}$ . Važno je napomenuti da se za neku kombinaciju potrošnje i proizvodnje može desiti da je tok snage kroz datu deonicu manji od  $P_{max}$ , tj. da nisu narušena termička ograničenja deonice. Takođe, ako se desi da je tok snage po deonici veći od  $P_{max}$ , termičko ograničenje će biti narušeno. Stepen izvesnosti, tj. izvesnost narušavanja ograničenja  $P_{max}$  se računa kao što je predloženo u [15]:

$$P(P \geq P_{max}) = \frac{p_r}{p_r + p_l} \quad (1)$$

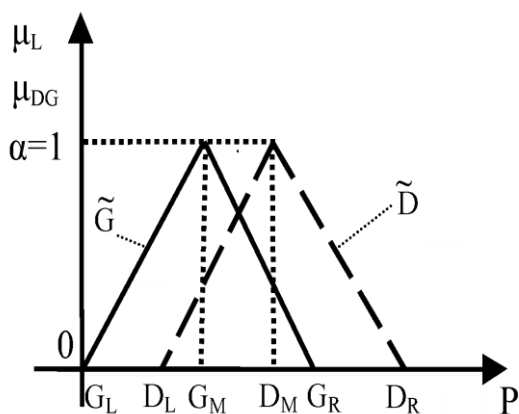
Gde su  $p_l$  i  $p_r$  površine ispod funkcija pripadnosti fazi broja kao što je prikazano na slici 1. Stoga, termičko ograničenje  $P_{max}$  će biti narušeno sa izvesnošću  $P(\tilde{P} \geq P_{max})$ . Na sličan način se može odrediti i izvesnost narušavanja naponskih ograničenja u mreži.

Pored termičkih i naponskih ograničenja na elementima unutar ostrva, važno je voditi računa i o ograničenjima kapaciteta samih generatora. Stoga je potrebno voditi računa da je ukupna potrošnja u ostrvu manja ili jednaka kapacitetu generatora koji učestvuju u kreiranju ostrva. Na slici 2. su predstavljeni fazi brojevi ukupne potrošnje i proizvodnje u ostrvu, označeni sa  $\tilde{D}$  i  $\tilde{G}$ , respektivno. Izvesnost da je kapacitet generatora narušen, tj. izvesnost da je fazi potrošnja veća od fazi proizvodnje ( $P(\tilde{D} \geq \tilde{G})$ ) unutar ostrva se računa na osnovu pristupa predloženog u [21]. Ovaj pristup predlaže poređenje fazi brojeva koja se zasniva na poređenju izvesnosti njihovih  $\alpha$  preseka. Na osnovu toga, izvesnost da će fazi potrošnja  $\tilde{D}$  biti veća od fazi proizvodnje  $\tilde{G}$ , i obrnuto je data sledećim izrazima:

$$P(\tilde{D} \geq \tilde{G}) = \int_0^1 P({}^{\alpha}\tilde{D} \geq {}^{\alpha}\tilde{G})d\alpha \quad (2)$$

$$P(\tilde{G} \geq \tilde{D}) = 1 - P(\tilde{D} \geq \tilde{G}) \quad (3)$$

Detaljno prikaz proračuna izvesnosti na osnovu izraza (2) i (3) je dat u [21].



SLIKA 2. POREĐENJE FAZI POTROŠNJE ( $\tilde{D}$ ) I FAZI PROIZVODNJE ( $\tilde{G}$ )

### 3. PROCEDURA ZA KREIRANJE OSTRVA ZASNOVANA NA RIZIKU

#### 3.1. Procedura za određivanje skupa scenarija za kreiranje ostrva

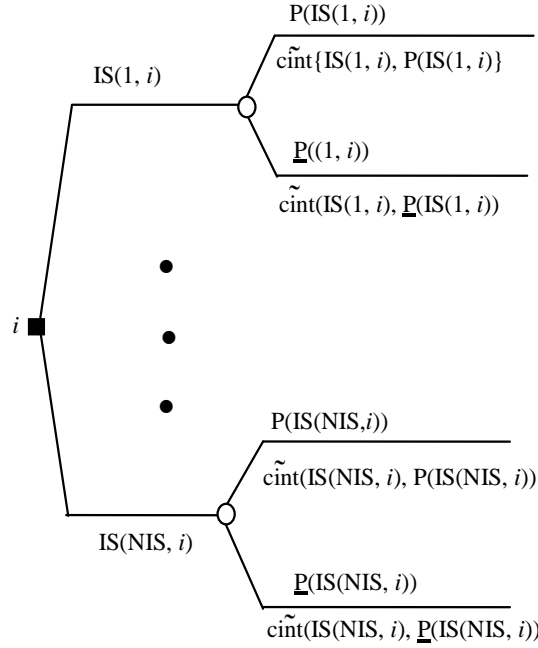
Za slučaj trajnog kvara u radialnoj mreži može se kreirati veliki broj različitih scenarija ostrvskog rada u prisustvu neizvesnosti potrošnje i proizvodnje. Procedura za dobijanje različitih scenarija se sastoji od sledećih koraka:

1. Uzeti da je  $\alpha=0$ .
2. Za tekuću vrednost  $\alpha$  odrediti levu i desnu graničnu vrednost za fazi potrošnju i fazi proizvodnju koristeći njihove funkcije pripadnosti (videti sliku 1)  $\mu_L$  i  $\mu_R$ .
3. Za vrednosti fazi potrošnje i fazi proizvodnje određene u prethodnom koraku, odnosno za tekuću vrednost  $\alpha$  preseka odrediti najbolji scenario kreiranja ostrva za posmatrani kvar. Ovaj scenario se dobija primenom MILP model koji je detaljno objašnjen u poglavlju 4. Za dobijanje optimalnog scenarija primenjuje se koncept fazi lineranog i intervalnog linearnog programiranja [16], [17]. MILP model koristi daljinski kontrolisanu rasklopnu opremu koja postoji u mreži za kreiranje ostrva i isključenje potrošnje u distributivnim transformatorskim stanicama (TS SN/NN) sa ciljem da minimizira trošak prekida za tekuće granične (krisp) vrednosti fazi potrošnje i proizvodnje.
4. Povećati  $\alpha$ , npr. za  $\Delta\alpha=0.01$ , i ponoviti korake 2 i 3 za tako uvećanu vrednost  $\alpha$ .
5. Ponoviti korak 4) postepeno povećavajući vrednost  $\alpha$  sve do  $\alpha=1$ .

Primenjujući korake 1)-5) dobija se skup različitih scenarija za kreiranje ostrva. Najbolji scenario iz skupa dobijenih scenarija se bira na osnovu procedure koja je prikazana u nastavku.

#### 3.2. Izbor optimalnog scenarija za kreiranje ostrva

Stablo odlučivanja za određivanje optimalnog scenarija za kreiranje ostrva u prisustvu kvara (i) dato je na slici 3. U čvoru odlučivanja (i), označen kvadratom na slici 3, razmatra se velik broj različitih načina (scenarija) za kreiranje ostrva. Svaki scenario za kreiranje ostrva je prikazan kao grana koja polazi iz datog čvora odlučivanja i može biti uspešan ili neuspešan. Na slici 3 je sa  $IS(1,i)$  označeno ostrvo koje je neuspešno kreirano sa izvesnošću  $P(IS(1,i))$ . Ostrvo će biti neuspešno kreirano ako se desi da je potrošnja veća od proizvodnje u ostrvu i/ili ako postoji narušavanje termičkog ili naponskog ograničenja na nekom elementu u ostrvu. Izvesnost da će ostrvo biti neuspešno kreirano računa se kao što je predloženo u izrazu (2). Ako istovremeno postoji više narušenih ograničenja tada se bira najveća izvesnost narušavanja ograničenja i ona se uzima kao izvesnost da će ostrvo biti neuspešno. Na osnovu toga, izvesnost da će ostrvo biti uspešno kreirano data je sa  $P(IS(1,i))$  i računa se kao  $(P(\cdot) = 1 - \underline{P}(\cdot))$ . Ako je ostrvo  $IS(1,i)$  uspešno kreirano, tada je očekivani trošak prekida za potrošače na putanji ispod kvara (i) označen sa  $ci\tilde{n}t(IS(1,i), P(IS(1,i)))$  na slici 3. Za slučaj neuspešno kreiranog ostrva, očekivani



SLIKA 3. STABLO ODLUČIVANJA ZA ODREĐIVANJE OPTIMALNOG SCENARIJA KREIRANJA OSTRVA

trošak prekida je označen sa  $ciñt(IS(1, i), \underline{P}(IS(1, i)))$ . Ovi fazi troškovi su detaljno opisani u poglavlju 4. Prethodno opisani način kreiranja stabla odlučivanja se koristi za opisivanje svakog od scenarija za kreiranje ostrva dobijenog primenom procedure za određivanje skupa scenarija za kreiranje ostrva.

Kada su svi elementi stabla odlučivanja određeni, fazi očekivani trošak prekida u ostrvu  $is$ ,  $is = 1, \dots, NIS$  za slučaj kvara ( $i$ ) se računa na sledeći način:

$$\begin{aligned} \tilde{E}(is, i) = & \underline{P}(IS(is, i)) \cdot ciñt(IS(is, i), \underline{P}(IS(is, i))) + P(IS(is, i)) \cdot \\ & ciñt(IS(is, i), P(IS(is, i))) \end{aligned} \quad (4)$$

Konačno, optimalni scenario kreiranja ostrva se određuje primenom kriterijuma za ocenu rizika zasnovanom na maksimalnoj očekivanoj vrednosti (max EMV) [18], koji odgovara scenariju sa najmanjim fazi očekivanim troškom prekida,  $\tilde{E}(OI(i))$ . Prema tome, optimalni scenario se bira na sledeći način:

$$\tilde{E}(OI(i)) = \min_{is} \tilde{E}(is, i) \quad (5)$$

#### 4. MODEL FAZI MEŠOVITOG CELOBROJNOG LINEARNOG PROGRAMIRANJA

MILP model za određivanje optimalnog scenarija kreiranja ostrva za levu (L) i desnu (R) graničnu vrednost nekog  $\alpha$  preseka fazi proizvodnje i potrošnje dat je u nastavku. U ovom radu se koristi koncept za rešavanje fazi lineranog i intervalnog linearnog programiranja predložen u [16] i [17].

##### 4.1. Fazi kriterijumska funkcija

$$\begin{aligned} \min \alpha (ciñt(i))_{L(R)} = & \sum_j \alpha (\tilde{D}(j))_{L(R)} \cdot t(i, j) \cdot C(j) + \sum_l \alpha (\tilde{G}(l))_{L(R)} \cdot t(i, l) \cdot CG(l) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\alpha \in [0, 1], l \in NGL(i), j \in NLL(i)$$

Izraz (6) opisuje objektivnu funkciju koja ima za cilj minimizaciju troškova prekida fazi potrošnje i proizvodnje za  $\alpha$  presek. Ovde,  $C(j)$  i  $CG(l)$  predstavljaju trošak usled dugotrajnog prekida za potrošače i distributivne generatore u čvoru ( $j$ ), respektivno,  $NGL(i)$  i  $NLL(i)$  predstavljaju skup distributivnih generatora i skup potrošača koji se nalaze ispod kvara ( $i$ ), respektivno. Indeksi L(R) označavaju da je problem određivanja optimalnog ostrva prvo rešen za levu (L), pa zatim za desnu (R) graničnu vrednost fazi potrošnje i proizvodnje za dati  $\alpha$  presek.

## 4.2. Ograničenja

### 4.2.1. Vreme trajanja restauracije napajanja.

$$t(i, j) = (1 - w_{load}(i, j)) \cdot TRepair(i) + w_{load}(i, j) \cdot tisl(i), j \in NLL(i) \quad (7)$$

$$t(i, l) = (1 - wdg(i, l)) \cdot TRepair(i) + wdg(i, l) \cdot tisl(i), l \in NGL(i) \quad (8)$$

Ograničenje (7) definiše vreme trajanja restauracije ( $t(i,j)$ ) za potrošače u čvoru ( $j$ ) koji se nalazi ispod kvara ( $i$ ). Ograničenje (8) definiše vreme trajanja restauracije ( $t(i,l)$ ) za distributivne generatore u čvoru ( $l$ ) koji se nalazi ispod kvara ( $i$ ).  $TRepair(i)$  predstavlja vreme trajanja popravke kvara ( $i$ ). Binarna promenljiva  $wload(i,j)$  je definisana izrazom (17) i ima vrednost 1 ako je potrošač snabdeven električnom energijom u ostrvu, odnosno 0 ukoliko je isključen u procesu kreiranja ostrva. Binarna promenljiva  $wdg(i,l)$  definiše se svaki generator i ima vrednost 1 ukoliko generator učestvuje u kreiranju ostrva. Kontinualna promenljiva  $tisl(i)$  definiše vreme kreiranja ostrva i data je izrazom (18) i (19). U izrazu (7) i (8) postoji proizvod binarne i kontinualne promenljive. Proizvodi dve binarne, kao i proizvodi binarne i kontinualne promenljive su linearizovani kao što je predloženo u [22].

**4.2.2. Ograničenja u ostrvima.** Kreiranje ostrva se vrši primenom koncepta lokalne mreže (LN) [9]. Lokalna mreža se kreira za slučaj trajnog prekida kada postoje distributivni generatori i potrošači ispod kvara ( $i$ ). Lokalna mreža predstavlja deo radijalne mreže koja se nalazi ispod kvara ( $i$ ) i ima najmanje jedan distributivni generator sposoban da kreira ostrvo. Za svaku lokalnu mrežu ispod kvara ( $i$ ) definiše se skup indeksa grana  $A(i)$ , skup čvorova u kojima se nalaze distributivni generatori  $NGL(i)$  i skup indeksa čvorova u kojima se nalaze potrošači  $NLL(i)$ . U lokalnoj mreži može se kreirati jedno ili više ostrva. Optimalna ostrva unutar lokalne mreže su dobijena pomoću izraza (9)-(19).

#### 4.2.2.1. Balans potrošnje i proizvodnje u ostrvu (ostrvima).

$$\sum_{aa \in T(aa,j)} (x(a, i) + x(a', i)) - \sum_{aa \in F(aa,j)} (x(a, i) + x(a', i)) \quad (9)$$

$$= w_{load}(i, j) \cdot k_I \cdot {}^\alpha \tilde{D}(j)_L - {}^\alpha \tilde{d}g(i, j)_R$$

$$\sum_{aa \in T(aa,j)} (x(a, i) + x(a', i)) - \sum_{aa \in F(aa,j)} (x(a, i) + x(a', i)) \quad (9')$$

$$= w_{load}(i, j) \cdot k_I \cdot {}^\alpha \tilde{D}(j)_R - {}^\alpha \tilde{d}g(i, j)_L$$

$${}^\alpha \tilde{d}g(i, j)_{L(R)} \leq wdg(i, j) \cdot k_I \cdot {}^\alpha \tilde{G}(j)_{L(R)}, k_I = 1/\sqrt{3} \cdot V_n \cdot \cos\varphi, \quad (10)$$

$$aa = \{a, a'\}, T(aa, j) \wedge F(aa, j) \in A(i)$$

Ograničenje (9) obezbeđuje da je u svakom čvoru lokalne mreže zadovoljen balans potrošnje i proizvodnje za levu (L) i desnu (R) graničnu vrednost fazi potrošnje i fazi proizvodnje datog  $\alpha$  preseka. Ova ograničenja su formulisana u saglasnosti sa konceptom rešavanja linerarnog programiranja sa intervalnim brojevima [16], [17]. Zbog toga se izrazi (9) i (9') ne razmatraju jednovremeno. Promenljive  $x(a, i)$  i  $x(a', i)$  predstavljaju struje kroz usmerenu granu ( $a$ ) i ( $a'$ ) u lokalnoj mreži dok promenljiva  $d\tilde{g}(i, j)$  predstavlja fazi proizvodnju distributivnog generatora u čvoru ( $j$ ). Mogućnost isključenja potrošnje u čvoru ( $i$ ) je opisano binarnom promenljivom  $wload(i,j)$  i ograničenjem (17). Ograničenje (10) definiše maksimalnu moguću proizvodnju distributivnog generatora u čvoru ( $j$ ) koji je priključen ( $wdg(.)=1$ ) u lokalnoj mreži.  $A(i)$  predstavlja skup grana koje se nalaze ispod kvara ( $i$ ),  $F(aa,j)$  predstavlja skup usmerenih grana za koje je čvor ( $j$ ) početni čvor, a  $T(aa,j)$  predstavlja skup grana za koje je čvor ( $j$ ) krajnji čvor.

#### 4.2.2.2. Ograničenja kapaciteta u ostrvu.

$$x(a, i) - (1 - w^{virt}(a, i)) \cdot x_{max}(f, a) \leq 0 \quad (11)$$

$$x(a', i) - (1 - w^{virt}(a, i)) \cdot x_{max}(f, a) \leq 0, (a, a') \in A(i) \quad (12)$$

$$w^{virt}(a, i) - \sum_{s \in a} w(s) \leq 0, a \in A(i) \quad (13)$$

Ograničenja (11) i (12) obezbeđuju da struje kroz grane ( $a$ ) i ( $a'$ ) ne budu veće od maksimalne struje ( $x_{max}(\cdot)$ ). Status reklozera (otvoren/zatvoren) na krajevima grane su definisani binarnim promenljivama  $w(s)$ . Dalje, binarna promenljiva  $w^{virt}(\cdot)$ , data u ograničenju (13), definiše status grane ( $a$ ).

#### 4.2.2.3. Naponska ograničenja u ostrvu.

$$V_l(i) \geq V_m(i) + Z_a \cdot (x(a, i) - x(a', i)) - w^{virt}(a, i) \cdot V^{min} \quad (14)$$

$$V_l(i) \leq V_m(i) + Z_a \cdot (x(a, i) - x(a', i)) + w^{virt}(a, i) \cdot V^{min} \quad (15)$$

$$V^{max} \geq \tilde{V}_{l(m)}(i) \geq V^{min} \quad (16)$$

$$l, m \in NGL(i) \cup NLL(i), (a, a') \in F((a, a'), l) \cap T((a, a'), m)$$

Ograničenja (14)-(16) omogućuju da naponi u svim čvorovima ostrva za tekući  $\alpha$ -presek fazi potrošnje i fazi proizvodnje budu unutar unapred definisanih granica. Ovde, promenljiva  $V_{l(m)}$  predstavlja napon u čvoru  $l(m)$ ,  $Z_a$  je impedansa grane ( $a$ ) dok su  $V^{min}$  and  $V^{max}$  minimalni i maksimalni naponi, respektivno.

#### 4.2.2.4. Isključenje potrošnje u ostrvu.

$$(1 - w_{load}(i, j)) \cdot (1 - ww(j, i)) \cdot (x(a, i) + x(a', i)) = 0, \quad (17)$$

$$(j, s) \in NLL(i), (a, a') \in T((a, a'), j)$$

Ograničenje (17) definiše da će potrošač u lokalnoj mreži biti isključen ako je daljinski kontrolisani sekcioner, koji je instaliran u transformatorskoj stanici u čvoru ( $j$ ), otvoren, tj. ( $ww(\cdot)=1$ ) ili ako je tok struje kroz sve grane kojima je čvor  $j$  terminalni čvor ( $T(\cdot)$ ) jednak nuli. Dakle, potrošač će biti bez napajana ako je proizvodnja distributivnih generatora u ostrvu jednaka nuli ili potrošač nije galvanski povezan sa distributivnim generatorom.

#### 4.2.2.5. Vreme kreiranja ostrva.

$$tisl(i) \geq \sum_{a \in A(i)} w^{virt}(a, i) \cdot T_{rec} + \sum_{j \in NLPL(i)} ww(j, i) \cdot T_{sec} \quad (18)$$

$$tisl(i) \geq wdg(i, j) \cdot TDG(j), j \in NGL(i) \quad (19)$$

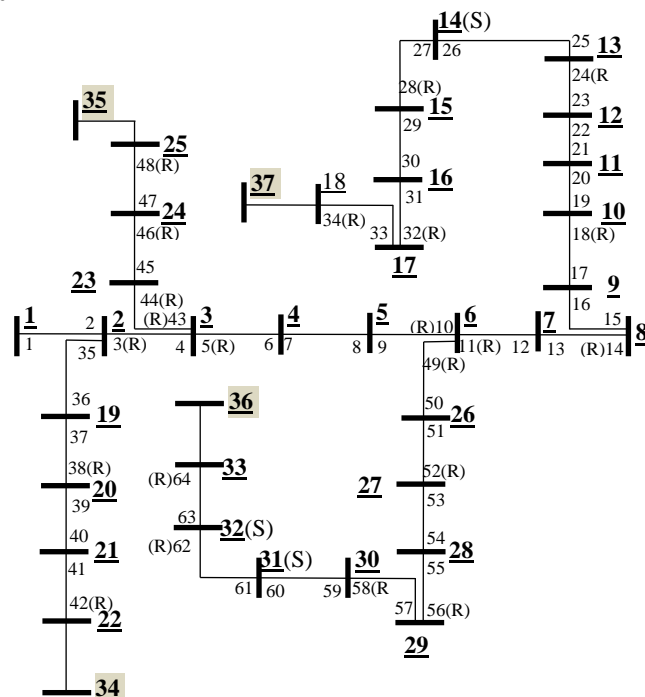
Ograničenja (18) i (19) definišu vreme potrebno da se kreira ostrvo ( $tisl(\cdot)$ ) uzimajući u obzir nedostupnost generatora nakon trajnog kvara ( $TDG(\cdot)$ ), kao i vreme potrebno operatoru mreže da iz kontrolnog centra obavi manipulisanje daljinski kontrolisanim reklozerima ( $T_{rec}$ ) i sekcionerima ( $T_{sec}$ ) koji učestvuju u kreiranju ostrva.

## 5. PRIMER PRIMENE

Predložen pristup, baziran na uvažavanju rizika, je primenjen na modifikovanoj IEEE šemi od 33 čvora. Šema je prikazana na slici 4 i sastoji se od 32 potrošačka čvora, čiji indeksi su označeni podvučenom crtom. Za potrebe testiranja dodata su 4 distributivna generatora čiji indeksi su označeni osenčenim brojevima (34, 35, 36, 37). Fazi brojevi koji kvantifikuju neizvesnost ulaznih promenljivih su sledeći:  $K\tilde{G} = (0.16, 0.6, 1.1)$  i  $K\tilde{D} = (1.45, 2, 2.429)$ . Fazi potrošnja i fazi proizvodnja je dobijena množenjem vrednosti potrošnje i proizvodnje iz [9] sa fazi koeficijentima  $K\tilde{D}$  i  $K\tilde{G}$ , respektivno. Naponski nivo mreže je 11 kV, dok minimalni i maksimalni naponi iznose 11.6 kV i 10.4 kV, respektivno. Faktor snage u mreži je 0.95. Optimalni scenario automatizacije, odnosno optimalni broj i lokacija (raspored) daljinski kontrolisanih uređaja u mreži su preuzeti iz rada [9]. Lokacije reklozera i sekcionera u mreži, na slici 4 su označene sa (R) i (S), respektivno. U ovom primeru razmatra se kreiranje ostrva u slučaju kvara na sekciji između čvora 1 i 2.

Primenom procedure za dobijanje scenarija kreiranja ostrva, prikazanoj u 3.1, dobija se 49 različitih scenarija. Pet karakterističnih slučajeva (IS1-IS5) su analizirani i njihovi rezultati su dati u Tabeli 1.

Slučaj IS1 predstavlja optimalan scenario za kreiranje ostrva dobijen primenom predloženog pristupa zasnovanog na analizi rizika. Ovaj scenario, od dobijenih 49 scenarija, ima najmanji očekivani trošak prekida napajanja (E(IS)). Statusi daljinski kontrolisanih rasklopnih uređaja koji učestvuju u kreiranju optimalnog scenarija su dati u Tabeli 1. Dalje, slučajevi od IS2 do IS5 opisuju scenarije kreiranja ostrva koji su dobijeni za kombinacije karakterističnih



SLIKA 4. IEEE ŠEMA SA 33 ČVORA

vrednosti potrošnje i proizvodnje, koje se koriste u analizi distributivnih mreža kod tradicionalnog, determinističkog, pristupa. Analizirane su sledeće kombinacije karakterističnih vrednosti: IS2 – maksimalna proizvodnja (GR) i minimalna potrošnja (DL); IS3 – maksimalna proizvodnja (GR) i maksimalna potrošnja (DR); IS4 – minimalna proizvodnja (GL) i maksimalna potrošnja (DR); IS5 – minimalna proizvodnja (GL) i minimalna potrošnja (DL). Kao što se može videti u Tabeli 1, nijedan od predloženih scenarija ne daje optimalno rešenje. Ukupni očekivani troškovi prekida (E(IS)) za svaki od ovih scenarija su veći u poređenju sa optimalnim scenarijom iz slučaja IS1, koji je dobijen primenom kriterijuma za ocenu rizika zasnovanom na maksimalnoj očekivanoj vrednosti. Dakle, ako se izabere scenario IS1 tada donosilac odluke minimizira rizik od značajnog finansijskog gubitka za slučaj da se desi bilo koja kombinacija potrošnje i proizvodnje u ostrvu, tj. rizik od neuspešnog kreiranja ostrva je sveden na minimum.

## 6. ZAKLJUČAK

U radu je predložena procedura bazirana na analizi rizika za dobijanje najboljeg scenarija kreiranja ostrva u radialnim mrežama u prisustvu neizvesnosti potrošnje i proizvodnje. Cilj predloženog pristupa je da se odredi scenario kreiranja ostrva koji minimizira finansijski rizik, odnosno rizik od neuspešnog kreiranja ostrva kod trajnih kvarova. Ovaj cilj je postignut korišćenjem fazi skupova, fazi MILP algoritma i max EMV (maksimalna očekivana vrednost) kriterijuma za merenje i upravljanje rizikom. Prikazani rezultati pokazuju neophodnost

TABELA 1. TEST REZULTATI

Scenario.	Otvorena prekidačka oprema		Status DG	$\tilde{E}(IS)$ [U.S.\$]
	Reklozer	Sekcioner		
IS1	5, 32, 40, 64	L22	34 (ON), 35 (ON), 36 (ON), 37(ON)	48,408
IS2	5, 32, 40, 45	L30, L31, L32	34 (ON), 35 (ON), 36 (ON), 37 (ON)	55,701
IS3	5, 32, 40, 48, 56	L22, L30, L31, L32	34 (ON), 36 (ON), 37 (ON)	50,843
IS4	5, 32, 40, 48, 56	-	35 (ON), 36 (ON), 37 (ON)	52,016
IS5	5, 34, 64	L30, L31, L32	34 (ON), 36 (ON), 37 (ON)	56,407

xx(ON) – DG u čvoru xx učestvuje u kreiranju ostrva



primene analize rizika u procesu dobijanja najboljeg scenarija kreiranja ostrva u radijalnim distributivnim mrežama u prisustvu neizvesnosti. Rezultati takođe pokazuju i moguće nedostatke klasičnih pristupa, koji razmatraju samo jednu vrednost proizvodnje i potrošnje, u određivanju najboljeg scenarija kreiranja ostrva u prisustvu neizvesnosti.

## 7. LITERATURA

1. Popovic Z, Knezevic S, Brbaklic B, 2015, "Optimal number, type and location of remotely controlled and supervised devices in distribution networks", 2015 IEEE PowerTech, 1–6.
2. Ray S, Bhattacharya A, Bhattacharjee S, 2016, "Optimal placement of switches in a radial distribution network for reliability improvement", *Int. J. Electr. PowerEnergy Syst.*, 76, 53–68.
3. Popovic Z, Brbaklic B, Knezevic S, 2017, "A mixed integer linear programming based approach for optimal placement of different types of automation devices in distribution networks", *Electr. Power Syst. Res.*, 148, 136-146.
4. Wang L, Singh C, 2008, "Reliability-constrained optimum placement of reclosers and distributed generators in distribution networks using an ACS algorithm", *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, Part C*, 38, 757–764.
5. Falaghi H, Haghifam M-R, Singh Ch, 2009, "Ant colony optimization based method for placement of sectionalizing switches in distribution networks using a fuzzy multiobjective approach", *IEEE Trans. Power Del.*, 24, 268-276.
6. Raoofat M, 2011, "Simultaneous allocation of dgs and remote controllable switches in distribution networks considering multilevel load model", *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 33, 1429 – 1436.
7. Heidari A, Agelidis VG, Kia M, 2015, "Considerations of sectionalizing switches in distribution networks with distributed generation", *IEEE Trans. Power Del.*, 30, 1401-1409.
8. Heidari A, Agelidis VG, Kia M, et al., 2017, "Reliability optimization of automated distribution networks with probability customer interruption cost model in the presence of DG units", *IEEE Trans. Smart Grid*, 8, 305-315.
9. Popovic Z, Knezevic S, Brbaklic B, 2018, "Optimal reliability improvement strategy in radial distribution networks with island operation of distributed generation", *IET Gener. Transm. Distrib.*, 12, 78 – 87.
10. El-Zonkoly A, Saad M, Khalil R, 2013, "New algorithm based on CLPSO for controlled islanding of distribution systems", *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 45, 391-403.
11. Jikeng L, Xudong W, Peng W, et al., 2012, "Two-stage method for optimal island partition of distribution system with distributed generations", *IET Gener. Transm. Distrib.*, 6, 218-225.
12. Oboudi MH, Hooshmand R, Karamad A, 2016, "Feasible method for making controlled intentional islanding of microgrids based on the modified shuffled frog leap algorithm", *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 78, 745-754.
13. Hosseinnezhad V, Rafiee M, Ahmadian M, et al., 2018, "Optimal island partitioning of smart distribution systems to improve system restoration under emergency conditions", *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 97, 155-164.
14. Li Y, Zio E, 2012, "Uncertainty analysis of the adequacy assessment model of a distributed generation system", *Renew. Energy*, 41, 235-244.
15. Popovic D, Popovic Z, 2004, "A risk management procedure for supply restoration in distribution networks", *IEEE Trans. Power Syst.*, 19, 221-229.
16. Shaocheng T, 1994, "Interval number and fuzzy number linear programming", *Fuzzy Sets Syst.*, 66, 301-306.
17. Sengupta A, Pal TK, 2009, "Fuzzy Preference Ordering of Interval Numbers in Decision Problems", Berlin: Springer-Verlag, 54.
18. Anderson G, Entriken R, Nitu P, 2009, "Risk Assessment and Financial Management", New York: IEEE.
19. Pota M, Esposito M, De Pietro G, 2013, "Transforming probability distributions into membership functions of fuzzy classes: A hypothesis test approach", *Fuzzy Sets Syst.*, 233, 52-73.
20. Klir GJ, Yuan B, 1995, "Fuzzy Sets and Fuzzy Logic", New York: Prentice-Hall.
21. Huynh VN, Nakamori Y, Lawry J, 2008, "A probability-based approach to comparison of fuzzy numbers and applications to target-oriented decision making", *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, 16, 371-387.
22. Abraham A, Hassani A-E, Engelbrecht A, 2009, "Foundations of computational intelligence", Berlin: Springer-Verlag.
23. Singh D, Misra RK, Singh D., 2007, "Effect of load models in distributed generation planning", *IEEE Trans. Power Syst.*, 22, 2204-2212.