

ODREĐIVANJE OPTIMALNOG SCENARIJA AUTOMATIZACIJE U DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA U PRISUSTVU NEIZVESNOSTI

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

KRATAK SADRŽAJ

U ovome radu je prikazana procedura zasnova na upravljanju rizikom za dobijanje najboljeg scenarija automatizacije u prisustvu neizvesnosti u distributivnim mrežama u kojima se koriste podsticajne šeme za vrednovanje pouzdanosti. Predloženi pristup razmatra neizvesnosti vezane za budući rast opterećenja, intenzitet otkaza elemenata mreže i trajanje prekida u napajanju. On koristi fazi skupove, fazi mešovito celobrojno linearno programiranje i alat za upravljanje rizikom za određivanje optimalnog tipa, broja i lokacije uređaja za automatizaciju u prisustvu napred navedenih neizvesnosti. Predloženi pristup razmatra podsticajne šeme za vrednovanje pouzdanosti koje koriste prošireni skup indeksa pouzdanosti (SAIFI, SAIDI, MAIFI, ASIDI) zajedno sa troškom uređaja za automatizaciju i troškom relokacije postojećih uređaja.

Ključne reči — automatizacije mreže, analiza rizika, podsticajna šema, indeksi pouzdanosti, fazi skup

SUMMARY

This paper presents a risk-based procedure for obtaining the best network automation scenario in the presence of uncertainty in distribution networks where performance-based regulation of continuity of supply is used. The proposed approach takes into account the uncertainty in loads, failure rates, and interruption duration. It employs fuzzy sets, fuzzy mixed integer linear programming algorithm, and a tool for managing risk to determine the optimal number, type and location of different types of automation devices in the presence of the aforementioned uncertainty. The presented approach considers performance-based (reward/penalty) schemes for an extended group of network reliability indices (SAIFI, SAIDI, MAIFI, and ASIDI) along with the cost of new automation devices and cost of relocation of the existing devices.

Key words — network automation, risk analysis, performance-based regulation, reliability indices, fuzzy set.

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

SPISAK OZNAKA

$\tilde{\lambda}^{\text{fault}}(f, i)$, $\tilde{\lambda}^{\text{tfault}}(f, i)$ – fazi intenziteti otkaza za trajne i prolazne kvarove na elementu (i) na fideru (f), respektivno,
CP_{INDEX}, CR_{INDEX} – trošak penala i nagrada za razmatrani indeks pouzdanosti, respektivno,
CLP _{j} – komponente (tipovi) opterećenja u čvoru j
E(SCR _{i}) – ukupni očekivani trošak pouzdanosti za scenario automatizacije mreže SCR _{i} ,
LDĜ(f, j, k) – fazi opterećenje potrošača tipa (k) u čvoru (j) na fideru (f),
LDĜ_{sys}(t) – ukupno fazi opterećenje u razmatranoj mreži u godini t ,
L(f, i) – dužine deonice (i) na fideru (f),
M – pozitivna konstanta dovoljno velike vrednosti,
NF, NC _{f} , NLPR _{f} – broj fidera u mreži, broj deonica na fideru (f), i broj čvorova na fideru (f), respektivno,
N_{con}(f, j), N_{Σcon} – broj potrošača u čvoru (j) i ukupan broj potrošača u mreži, respektivno,
T, d – period razmatranja i intersna (diskontna) stopa, respektivno
 $\tilde{T}_{\text{fuzzy}}(f, i, j)$ – fazi koeficijent koji opisuje neizvosnost trajanja prekida,
N(f, i, j) – promenljiva koja opisuje broj potrošača u čvoru (j) pogođenih dugotrajnim kvarom (i) na fideru (f),
NCT(f, i, j) – promenljiva koja opisuje broj potrošača u čvoru (j) pogođenih prolaznim kvarom (i) na fideru (f),
t(f, i, j) – promenljiva koja predstavlja trajanja prekida napajanja u čvoru (j) na fideru (f) usled kvara (i),
SAĪDI, SAĪFI, MAĪFI, ASĪDI – fazi promenljive koje opisuju razmatrane indekse pouzdanosti,
CINĀEX – fazi promenljiva koja predstavlja penale/nagrade za date indekse pouzdanosti.

UVOD

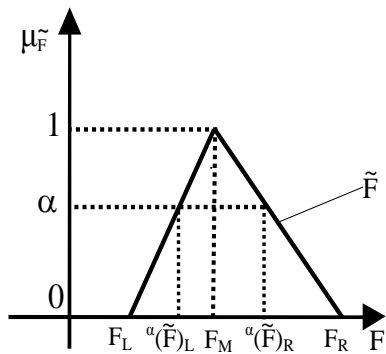
Pouzdanost napajanja je izuzetno važna za korisnike distributivnog sistema. Zbog toga regulatorna tela moraju osigurati da postojeći nivo pouzdanosti u distributivnom sistemu bude očuvan (ako je dostigao zadovoljavajući nivo) ili unapređen (ako zadovoljavajući nivo nije dostignut). Da bi ostvarili ove ciljeve regulatorna tela primenjuju različite strategije [1], [2]. Jedan od najčešće korišćenih strategija se bazira na primeni podsticajnih mera (šema), odnosno šema zasnovanih na nagradama i penalima [1]-[4]. Njima se nagrađuju kompanije za ostvarenu dobru pouzdanost a kažnjavaju za lošu pouzdanost. Kao mera pouzdanosti se najčešće koriste indeksi pouzdanosti, i to najčešće SAIDI I SAIFI [1]-[4]. Zbog napred navedenog, očuvanje i unapređenje pouzdanosti napajanja korisnika sistema postaje jedan od glavnih ciljeva distributivnih kompanija (ODS). Automatizacija mreže je prepoznata kao jedna od najefektivnijih strategija za unapređenje pouzdanosti i efikasnosti u distributivnim kompanijama. U automatizaciji mreža se koriste daljinski kontrolisani rasklopni uređaji (RCS) i indikatori prolaska struje kvara (FPI) za unapređenje pouzdanosti kroz smanjenje dužine trajanja prekida napajanja kao i broja pogođenih korisnika sistema. Određivanje optimalnog broja, tipa i lokacije uređaja za automatizaciju (AD) koje treba ugraditi u distributivnu mrežu je kompleksan kombinatorni optimizacioni problem koji se već dugo proučava [5]-[14]. Predloženi pristupi za rešavanje ovog problema razmatraju troškove korisnika usled dugotrajnih prekida u snabdevanju, [5]-[12], i kratkotrajnih prekida, [8]-[12], zajedno sa troškovima uređaja za automatizaciju, [5]-[14], da bi odredili optimalni scenario automatizacije. Nekoliko predloženih pristupa, [12]-[14], razmatra indekse pouzdanosti u određivanju najboljeg scenarija automatizacije. Mađutim, pristupi predloženi do sada ne razmatraju neizvesnosti vezana za mnoge parametere koji se koriste u proračunima pouzdanosti [15]. Ti parametri se mogu proceniti samo sa određenom neizvesnošću iz mnogo razloga [15], [16]. Budući rast opterećenje se ne može precizno odrediti. Isti slučaj je i sa intenzitetima otkaza elemenata mreže i dužinom trajanja procesa lokalizacije, izolacije i restauracije napajanja, koji su od velikog značaja u proračunima pouzdanosti [15]. U prisustvu navedenih neizvesnosti se može pojaviti ne samo jedna (deterministička) već više različitih budućnosti. U takvom okruženju se mora odrediti scenario automatizacije koji može odgovoriti na najefikasniji način bilo koja od mogućih budućnosti da se desi. Pristupi predloženi do sada razmatraju samo jednu od mnogih budućnosti, što vodi do loših rešenja. Takođe, predloženi pristupi nisu razmatrali korišćenje podsticajnih šema u određivanju najboljeg scenarija automatizacije.

U ovom radu se koriste fazi skupovi za opisivanje neizvesnosti budućeg rasta opterećenja, intenziteta otkaza kao i trajanja prekida napajanja. Predložen je algoritam fazi mešovito celobrojnog lineranog programiranja (MILP) u kome se trougaoni fazi brojevi koriste da opišu ranije navedene neizvesnosti i time prevedu klasičan MILP model u fazi domen. Ovaj pristup omogućuje da se neizvesnosti analiziraju istovremeno za sve moguće intervale (α -preseke) fazi brojeva. Za svaki interval predloženi MILP algoritam jednovremeno određuje broj i lokacije različitih tipova novih uređaja (reklozera, sekcionera, indikatora kvara) za automatizaciju kao i nove lokacije postojećih uređaja tako da ukupan trošak pouzdanosti bude minimalan. Ovaj trošak čine penali i nagrade definisani podsticajnom šemom za različite indekse pouzdanosti (SAIFI, SAIDI, MAIFI, ASIDI), trošak novih uređaja za automatizaciju i trošak relokacije postojećih uređaja. Na ovaj način predloženi pristup omogućuje dobijanje velikog broja različitih scenarija automatizacije koji se ocenjuju korišćenjem kriterijuma za ocenu rizika zasnovanog na maksimalnoj očekivanoj vrednosti (max EMV) [17]. Prema tome, pristup predložen u ovom radu omogućuje donosiocu odluke da odredi onaj scenario automatizacije koji obezbeđuje najmanji finasijski rizik, odnosno koji obezbeđuje minimalni očekivani trošak pouzdanosti. Efektivnost predloženog pristupa je testirana na često korišćenom test sistemu Bus 4 [18] i dobijeni rezultati su detaljno analizirani.

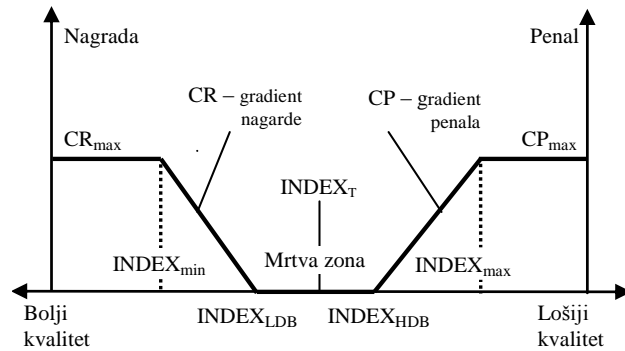
MODELOVANJE NEIZVESNOSTI I PODSTICAJNE ŠEME ZA VREDNOVANJE POUZDANOSTI

Modelovanje neizvesnosti

Različiti radni uslovi (vlažnost, zagađenje, itd.), slaba redundansa merenja kao i nepredvidive ekonomske promene i nekontrolisani događaji tokom perioda planiranja automatizacije distributivnih mreža mogu uticati na neizvesnost u potrošnji, intenzitetu otkaza i vremenu prekida u distributivnim mrežama [15], [16]. Za opisivanje pomenutih neizvesnosti u planiranju automatizacije distributivnih mreža koriste se fazi brojevi. Neizvesnost potrošnje, intenziteta otkaza i vremena prekida je opisana pomoću trougaonih fazi brojeva (TFN) [15], [19]. Na slici 1 je prikazana veličina F , čije vrednosti nisu poznate sa izvesnošću, predstavljena kao trougaoni fazi broj \tilde{F} . Ovaj fazi broj je u potpunosti opisan sa tri broja (F_L, F_M, F_R). Na osnovu ove predstave, vrednost veličine F je očekivana da bude oko srednje vrednosti F_M , ne manja od F_L i ne veća od F_R , kao što je i prikazano na slici 1. Uveden je parameter α i za svaku vrednost α definiše se interval mogućih vrednosti opisan sa levom ${}^\alpha(\tilde{F})_L$ i desnom stranom ${}^\alpha(\tilde{F})_R$ fazi broja, kao na slici 1. Sa povećanjem α , vrednosti leve i desne strane intervala postaju bliske, dok su za $\alpha=1$ one identične. Stoga, uzimajući vrednosti α u intervalu $[0,1]$, sve moguće vrednosti \tilde{F} mogu biti generisane. Ovaj koncept se koristi za generisanje i evaluaciju velikog broja različitih scenarija automatizacije, kao što je prikazano u nastavku.



Slika 1. Funkcija pripadnosti za TFN



Slika 2. Podsticajna šema

Modelovanje podsticajne šeme za vrednovanje pouzdanosti

Izgleđ podsticajne šeme za vrednovanje pouzdanosti je data na slici 2 [1], [2]. Željena vrednost razmatranih indeksa pouzdanosti kao mere kontinuitete snabdevanja je označen sa $INDEX_T$ na slici 2. Vrednost penala odnosno nagrade za postignuti nivo pouzdanosti se određuje u odnosu na željenu vrednost ($INDEX_T$), koje je obično propisana od strane regulatornog tela. Pored željene vrednosti, date su donja ($INDEX_{min}$) i gornja ($INDEX_{max}$) vrednost indeksa preko kojih se primenjuje maksimalna vrednost nagrade (CR_{max}) odnosno penala (CP_{max}). Pojam mrtve zone se takođe koristi kao interval oko željene vrednosti određen sa donjom ($INDEX_{LDB}$) i gornjom ($INDEX_{HDB}$) granicom unutar kojih se ne primenjuje ni nagrada ni penali. Dizajniranje odgovarajuće podsticajne šeme za vrednovanje pouzdanosti je detaljno proučavano poslednjih godina i prikazano u [20]-[22].

Najčešće korišćeni indeksi u podsticajnoj šemi su SAIDI i SAIFI [1]-[4]. Za određivanje najboljeg scenarija automatizacije su pored njih u ovom radu razmatrani i MAIFI i ASIDI. MAIFI, koji uvažava kratkotrajne prekide, je od posebnog značaja za velike industrije i komercijalne potrošače zbog toga što ovi prekidi mogu kod njih izazvati oštećenja opreme (npr. kod velikih motora i elektronike) [1]. SAIFI i SAIDI, koji uzimaju u obzir samo dugotrajne prekide, se, kao i MAIFI, baziraju na broju pogođenih kupaca. Međutim, za merenje pouzdanosti u oblastima sa relativno malim brojem kupaca koji imaju veliku koncentraciju opterećenja (industrijski i komercijalni potrošači), indeksi bazirani na opterećenju, kao što je ASIDI su preporučljivi [1], [2].

PROCEDURA ZA PLANIRANJE AUTOMATIZACIJE MREŽE ZASNOVANA NA RIZIKU

Procedura za izračunavanje

Određivanje najboljeg scenarija automatizacije distributivnih mreža u prisustvu neizvesnosti obuhvata sledeće korake.

1) Određivanje skupa različitih scenarija automatizacije

- 1.1) Uzeti da je $\alpha=0$.
- 1.2) Za tekuću vrednost α odrediti levu ($\alpha(\tilde{F})_L$) i desnu stranu ($\alpha(\tilde{F})_R$) svih ulaznih fazi veličina koristeći njihove funkcije pripadnosti. Ovde, ulazne fazi veličine su: fazi intenzitet otkaza za trajne ($\tilde{\lambda}^{fault}$) i prolazne ($\tilde{\lambda}^{tfault}$) kvarove, fazi opterećenje ($L\tilde{D}G$) i fazi koeficijent trajanja prekida (\tilde{T}_{fuzzy}).
- 1.3) Koristeći leve i desne vrednosti fazi brojeva iz prethodnog koraka, rešiti fazi MILP model dat u nastavku. Na ovaj način se dobijaju optimalni scenariji automatizacije (optimalan broj, tip i lokacija novih uređaja i optimalna lokacija postojećih uređaja za automatizaciju) za levu i desnu stranu intervala tekućeg α preseka.
- 1.4) Povećati α , npr. za $\Delta\alpha=0.01$, i ponoviti korake 1.2 i 1.3 za uvećanu vrednost α .
- 1.5) Ponoviti korak 1.4 postepeno povećavajući vrednost α sve do $\alpha=1$. Kroz korake 1.2-1.5 dobijaju se različiti scenariji automatizacije, označeni dalje u tekstu sa NSC. Evaluacija ovih scenarija je predstavljena u nastavku.

2) Proračun fazi indeksa pouzdanosti

- 2.1) Izabrati jedan od NSC scenarija. Taj scenario je dalje označavan sa SCR_i .
- 2.2) Uzeti da je $\alpha=0$.
- 2.3) Za tekuću vrednost α odrediti levu ($\alpha(\tilde{F})_L$) i desnu stranu ($\alpha(\tilde{F})_R$) svih ulaznih veličina.
- 2.4) Koristeći leve i desne vrednosti fazi brojeva iz koraka 2.3 izračunati leve i desne strane fazi indeksa pouzdanosti ($\alpha(SA\tilde{I}D\tilde{I})_{L(R)}$, $\alpha(SA\tilde{I}F\tilde{I})_{L(R)}$, $\alpha(MA\tilde{I}F\tilde{I})_{L(R)}$ and $\alpha(AS\tilde{I}D\tilde{I})_{L(R)}$) u mreži kada je primenjen scenario automatizacije SCR_i .
- 2.5) Povećati α , npr za $\Delta\alpha=0.01$, i ponoviti korake 2.3 i 2.4 za tako uvećanu vrednost.
- 2.6) Ponoviti korak 2.5 postepeno povećavajući α vrednosti sve do $\alpha=1$. Na taj način kompletan trougaoni fazi broj koji opisuje fazi indekse pouzdanosti ($SA\tilde{I}D\tilde{I}$, $SA\tilde{I}F\tilde{I}$, $MA\tilde{I}F\tilde{I}$, $AS\tilde{I}D\tilde{I}$) je određen za scenario automatizacije

SCR_i .

2.7) Ponoviti korake 2.1- 2.6 sve dok svih NSC scenariji nije obrađeno. Na taj način dobijaju se fazi indeksi za svaki od NSC scenarija.

3) Selektovanje optimalnog scenarija automatizacije mreže

Optimalni scenario automatizacije mreže ($d(SCR_{opt})$) je dobijen primenom kriterijuma za ocenu rizika zasnovanog na maksimalnoj očekivanoj vrednosti (max EMV) [17]. U planiranju automatizacije mreža, ovaj kriterijum odgovara scenariju sa minimalnim očekivanim troškom pouzdanosti.

$$d(SCR_{opt}) = \min_i E(SCR_i), \quad i = 1, \dots, NSC \quad (1)$$

Ukupni očekivani trošak pouzdanosti ($E(SCR_i)$) predstavlja sumu svih očekivanih penala/nagrada u period planiranja T za sve intervale (α -preseke) fazi indeksa pouzdanosti:

$$E(SCR_i) = C_i^{AD} + C_i^{RL} + \sum_{\alpha} \left\{ P(\alpha, IN\tilde{D}EX)_{L(R)}^i \cdot \sum_{t=1}^T \alpha (CIN\tilde{D}EX)_{L(R)}^i / (1+d)^t \right\} \quad (2)$$

Verovatnoća pojavljivanja leve i desne strane α preseka fazi indeksa pouzdanosti se dobija primenom pristupa koji je predložen u [19]. Ovaj pristup je ilustrirana na slici 3 i definiše sledeće:

$$P(\alpha, IN\tilde{D}EX)_{L(R)} = P_{L(R)} / P_{tot}, \quad (3)$$

gde je $P_{L(R)}$ površina ispod funkcije pripadnosti fazi broja koja odgovara LHS (RHS) vrednosti razmatranog α -preseka, kao što je prikazano na slici 3. P_{tot} je ukupna površina ispod funkcije pripadnosti TFN.

Trošak penala (nagrada) kod podsticajne šeme za vrednovanje pouzdanosti za levu i desnu stranu α preseka indeksa pouzdanosti u scenariju SCR_i (${}^{\alpha}(CIN\tilde{D}EX)_{L(R)}^i$) je opisan u nastavku zajedno sa troškovima novih uređaja za automatizaciju (C^{AD}) i troškovima relokacije postojećih uređaja. Obratiti pažnju da izraz ${}^{\alpha}(CIN\tilde{D}EX)_L$ na slici 3 predstavlja nagradu za levu stranu α preseka za razmatrani fazi indeks pouzdanosti.

Model fazi mešovito celobrojnog lineranog programiranja

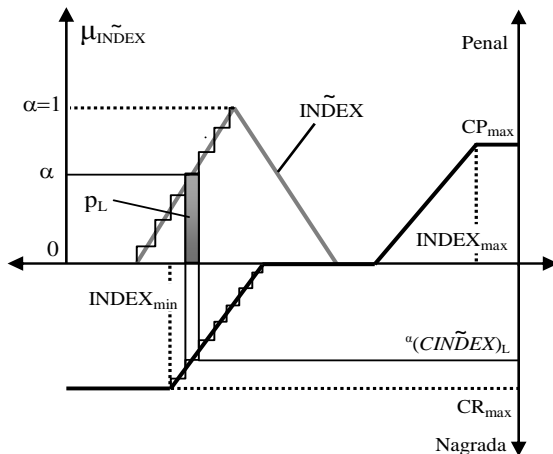
MILP model za određivanje optimalnog broja, tipa i lokacije novih uređaja automatizacije zajedno sa relokacijom postojećih uređaja za levu (${}^{\alpha}(\tilde{F})_L$) i desnu stranu (${}^{\alpha}(\tilde{F})_R$) α preseka fazi indeksa pouzdanosti dat je u nastavku.

U ovom radu se koristi formulacija iz [12] za modelovanje uticaja tipa i lokacije uređaja na vreme trajanja prekida i na broj potrošača pogođenih dugotrajnim i kratkotrajnim prekidima. Takođe, modelovanje ukupnog troška C^{AD} (investicioni trošak, trošak instalacije i operativni trošak) novih uređaja i troška relokacije postojećih uređaja C^{RL} (trošak montaže i demontaže) predložena u [12] se koristi i ovde.

$$\text{Fazi objektivna funkcija: } \min \left\{ C^{AD} + C^{RL} + \sum_{i=1}^T \alpha (CIN\tilde{D}EX)_{L(R)} / (1+d)^t \right\}, \quad \alpha \in [0,1], \quad i = 1, \dots, NSC, \quad (4)$$

Jednačina (4) opisuje fazi objektivnu funkciju. Ona minimizira ukupni trošak pouzdanosti koji se sastoji od troška novih uređaja, troška relokacije postojećih uređaja i troška penala (nagrada) zbog primene podsticajne šeme za vrednovanje pouzdanosti u planiranom periodu za levu (${}^{\alpha}(\tilde{F})_L$) i desnu stranu (${}^{\alpha}(\tilde{F})_R$) α preseka fazi indeksa pouzdanosti.

$${}^{\alpha}CIN\tilde{D}EX = \sum_{RI} \alpha \Delta RI_{max} \cdot CP_{RI} - \alpha \Delta RI_{min} \cdot CR_{RI}, \quad IN\tilde{D}EX \in \{SA\tilde{I}FI, SA\tilde{I}DI, MA\tilde{I}FI, AS\tilde{I}DI\} \quad (5)$$



Slika 3. Izračunavanje očekivanog troška (nagrada) za jedan α -presek

Jednačina (5), zajedno sa (6)-(16), opisuju trošak penala koji postoji ako je leva (desna) strana α preseka fazi indeksa pouzdanosti veća od gornje granice mrtve zone podsticajne šeme, i nagradu, koja postoji ako je leva (desna) strana α preseka fazi indeksa pouzdanosti manja od donje granice mrtve zone podsticajne šeme. Formulacija MILP modela (12)-(16) koja detaljno opisuje vezu između fazi indeksa pouzdanosti i penala/nagrada datih u jednačini (5) je data u prilogu.

$$\text{Fazi indeksi pouzdanosti: } \alpha(SA\tilde{I}D)_{L(R)} = \frac{1}{N_{\Sigma\text{con}}} \cdot \sum_f \sum_i \sum_j N(f,i,j) \cdot L(f,i) \cdot \alpha(\tilde{\lambda}^{\text{fault}}(f,i) \cdot \tilde{t}(f,i,j))_{L(R)} \quad (6)$$

$$N(f,i,j) = N_{\text{con}}(f,j) \cdot (1 - w^{\text{virt}}(f,i,j)) \quad (7)$$

$$\tilde{t}(f,i,j) = \tilde{T}_{\text{fuzzy}}(f,i,j) \cdot t(f,i,j) \quad f \in NF, i \in NC_f, j \in NLPR_f \quad (8)$$

Jednačine (6), (7) i (8) definišu levu ($\alpha(SA\tilde{I}D)_L$) i desnu stranu ($\alpha(SA\tilde{I}D)_R$) indeksa SA $\tilde{I}D$ za tekući α presek. Ove jednačine zajedno sa (12)-(16) opisuju vrednost SA $\tilde{I}D$ koja se nalazi u zoni penala ili nagrade podsticajne šeme. Neizvesnost u trajanju prekida napajanja je modelovano koristeći fazi koeficijent \tilde{T}_{fuzzy} u (8), koji prevodi krip vrednost $t(f,i,j)$ u fazi domen. Proizvod kontinulane i binarne promenljive koji se pojavljuje u (6) se linearizuje na način predložen u [23]. Treba napomenuti da su eksponent α i indeks L(R) kod kontinualnih i binarnih promenljivih izostavljeni u daljem tekstu zbog preglednosti.

Vrednosti SA $\tilde{I}FI$, MA $\tilde{I}FI$ i AS $\tilde{I}DI$ koje se nalaze u oblasti penala ili nagrade podsticajne šeme za levu (desnu) stranu α preseka je opisana jednačinama (9), (10) i (11), respektivno, kao i jednačinama (12)-(16).

$$\alpha(SA\tilde{I}FI)_{L(R)} = \frac{1}{N_{\Sigma\text{con}}} \cdot \sum_f \sum_i \sum_j \alpha(\tilde{\lambda}^{\text{fault}}(f,i))_{L(R)} \cdot L(f,i) \cdot N(f,i,j) \quad (9)$$

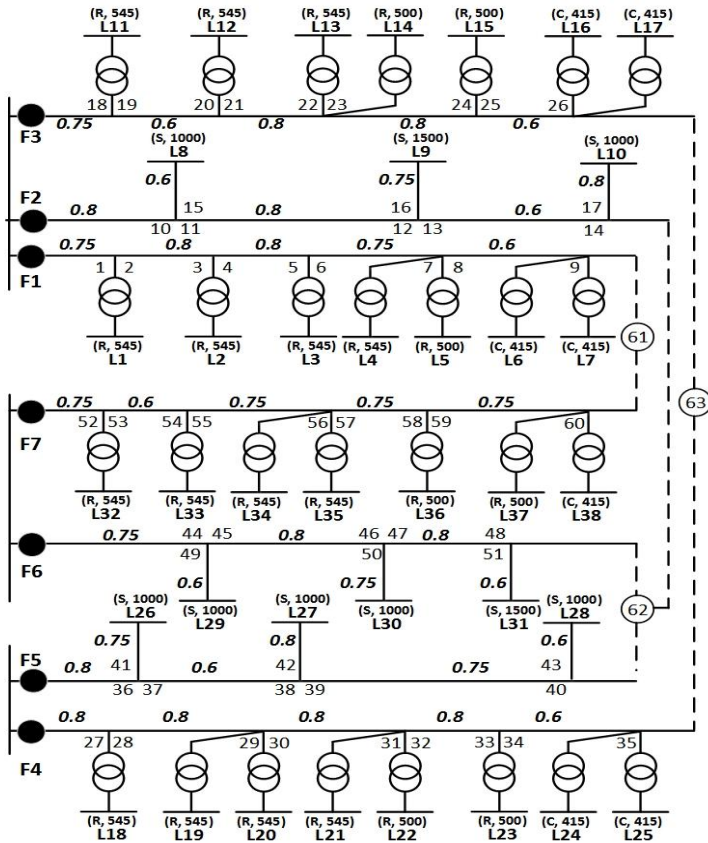
$$\alpha(MA\tilde{I}FI)_{L(R)} = \frac{1}{N_{\Sigma\text{con}}} \cdot \sum_f \sum_i \sum_j \alpha(\tilde{\lambda}^{\text{fault}}(f,i))_{L(R)} \cdot L(f,i) \cdot NCT(f,i,j) \quad (10)$$

$$\alpha(AS\tilde{I}DI)_{L(R)} = \frac{1}{T} \cdot \sum_{t=1}^T (1+p)^t \cdot \left\{ \sum_f \sum_i \sum_j \sum_k L(f,i) \cdot \alpha[(\tilde{\lambda}^{\text{fault}}(f,i) \cdot \tilde{t}(f,i,j) \cdot \tilde{L}\tilde{D}G(f,j,k)) / \tilde{L}\tilde{D}G_{\text{sys}}(t)]_{L(R)} \right\} k \in CLP_j \quad (11)$$

Treba takođe napomenuti da se ograničenje budžeta iz [12] mogu primeniti i ovde.

PRIMER PRIMENE

Predložena procedura za određivanje optimalnog scenarija automatizacije zasnovana na proceni rizika testirana je na mreži datoj na slici 4. Ovo je test šema preuzeta iz [18] koja se sastoji od 38 potrošačkih čvorova i 63



Slika 4. Test mreža

Tabela 1 Parametri podsticajne šeme

	INDEX _{LDB}	INDEX _{HDB}	INDEX _{max}	INDEX _{min}	INDEX _r
MAIFI [tkv./potr./g]	0.25	0.27	0.22	0.3	0.26
SAIFI [kv./potr./g]	0.2	0.22	0.18	0.24	0.21
SAIDI [h/potr./g]	0.6	0.66	0.54	0.72	0.63
ASIDI [h/kVA/g]	0.64	0.7	0.57	0.77	0.67

potencijalnih lokacija za AD. Na slici 4 puni kružići predstavljaju normalno zatvorene rasklopne uređaje, dok prazni kružići predstavljaju normalno otvorene rasklopne uređaje (NOP). Pretpostavka je da su prekidači na početku voda daljinski kontrolisani, ali ne i NOP. Ostali ulazni podaci su preuzeti iz [12] i [18]. Trougaoni fazi brojevi koji kvantifikuju neizvesnot ulaznih veličina su sledeći: $\lambda^{\text{fault}} = \lambda^{\text{fault}} = (0.0585, 0.065, 0.0975)$ [kv./g./km], $T_{\text{fuzzy}} = (0.9, 1, 1.4)$, $LDG_{\text{fuzzy}} = (0.9, 1, 1.5)$. Pretpostavka je da su ulazne veličine iste za sve kombinacije(f), (i) i (j).

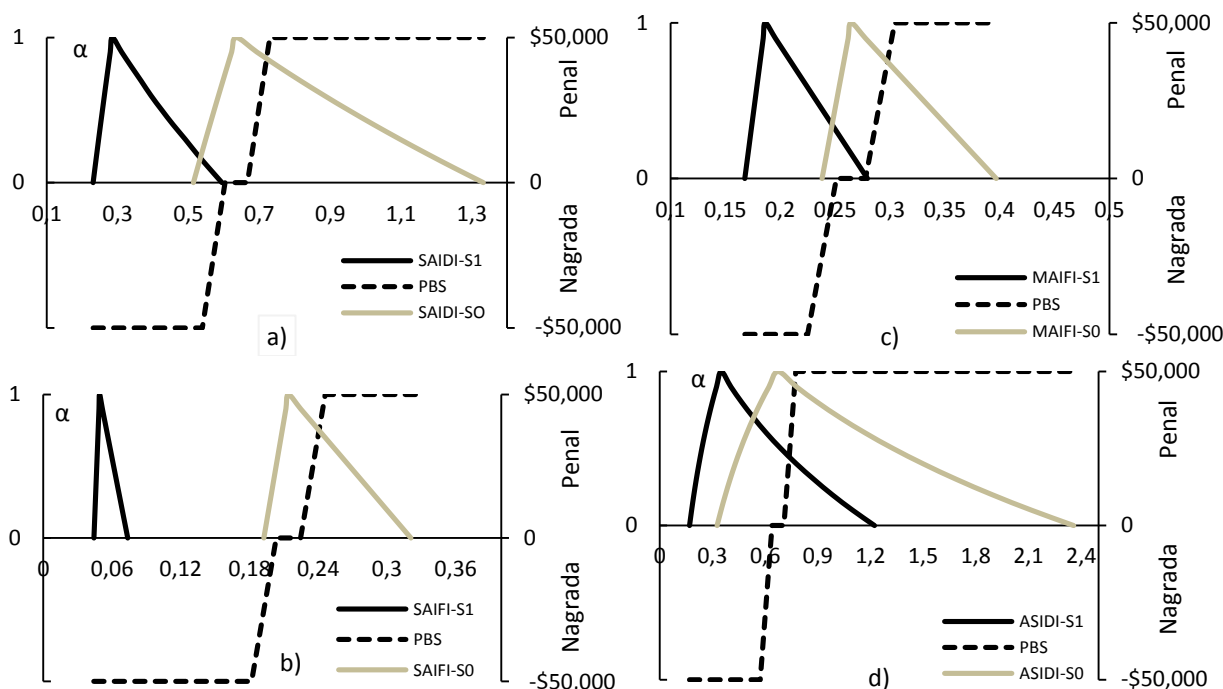
Fazi potrošnja je dobijena množenjem fazi koeficijentom potrošnje ($L\bar{D}G_{\text{fuzzy}}$) i krisp vrednosti opterećenja datih na slici 4. Razmatra se ugradnja indikatora prolaska struje kvara, reklozera i sekcionera. Dodatno, pretpostavka je da u mreži već postoje sekcioner na lokaciji 32, kao i reklozera na lokaciji 12 i 38. Pretpostavljeno je sledeće: vreme razmatranja je 15 godina, intersna (diskontna) stopa je 8%, godišnja stopa rasta je 2% za svaki tip potrošnje. Parametri podsticajne šeme za svaki od indeksa pouzdanosti data su u tabeli 1. Uzeto je da je nagrada i penal za svaki indeks ista i iznosi U.S. \$ 50,000. U nastavku su diskutovani scenariji automatizacije (primeri) označeni sa S0-S4, čiji rezultati su predstavljeni u tabeli 2.

S0 predstavlja scenario sa inicijalnim stanjem gde su samo postojeći uređaji uzeti u razmatranje. Uvažavajući neizvesnost kod intenziteta otkaza, potrošnje i trajanja prekida napajanja, fazi brojevi indeksa pouzdanosti su izračunati i dati na slici 5 zajedno sa podsticajno šemom. Njihove numeričke vrednosti su date u tabeli 2. U ovom slučaju, verovatnoća da se SAIFI i MAIFI nalaze u zoni penala je 68%, u mrtvoj zoni 28% i u zoni nagrade 4%. SAIDI ima 76% i 15% verovatnoće da se nalazi u zoni penala odnosno nagrade, respektivno. Fazi brojevi MAIFI i SAIFI direktno zavise jedino od fazi intenziteta otkaza, dok na oblik fazi broja SAIDI utiče i neizvesnost trajanja prekida napajanja. Najveći uticaj neizvesnosti ulaznih veličina je izražen kod ASIDI te je širina ovog fazi broja najveća od svih indeksa pouzdanosti, kao što se može videti na slici 5. Ovaj indeks ima 75% verovatnoće da se nalazi u zoni penala i 18% verovatnoće da se nalazi u zoni nagrade. Za slučaj S0, primenjujući izraze (2) i (3), očekivani iznos nagrade $ER(S0)$ je U.S.\$ 86,801, a očekivani penal $EP(S0)$ je U.S.\$1,061,128. Dalje sledi da je ukupan očekivani trošak $E(S0)$ U.S.\$974,327, kao što je i dato u tabeli 2. Obratiti pažnju da je trošak budžeta ($C^{\text{AD}} + C^{\text{RL}}$) za ovaj slučaj jednak 0. Stoga, DSO može očekivati u budućnosti plaćanje penala ako se ne preduzmu mere unapređenja, odnosno, DSO se suočava sa značajnim rizikom od finansijskih gubitaka.

S1 opisuje slučaj kada je automatizacija mreže primenjena u cilju smanjivanja rizika od budućih finansijskih gubitaka usled neizvesnosti ulaznih veličina. Koristeći predloženi pristup, 151 scenario automatizacije je kreiran i najbolji od njih, koji osigurava minimalni očekivani trošak pouzdanosti je predstavljen u tabeli 2. Ovde, negativni trošak koji se javlja u tabeli 2 predstavlja korist koju ostvaruje DSO. U tabeli 2 su date lokacije novih reklozera,

Tabela 2 Test rezultati

Sc.	Novi uređaji			Relokacija		Indeksi pouzdanosti				ER(SCR) [U.S.\$]	C ^{AD} + C ^{RL} [U.S.\$]	E(SCR) [U.S.\$]
	Reklozer	Sekcioner	FPI	Sa	Na	SAIDI [h/potr./g.]	SAIFI [kv./potr./g.]	MAIFI [tkv./potr./g.]	ASIDI [h/kVA/g.]			
S0	-	-	-	-	-	(0.51, 0.63, 1.33)	(0.19, 0.21, 0.32)	(0.24, 0.26, 0.4)	(0.33, 0.67, 2.36)	86,801 1,061,128	0	974,327
S1	2, 4, 6, 8, 19, 21, 23, 25, 28, 30, 53, 55, 57, 59	7, 10, 11, 13, 22, 29, 31, 36, 38, 40, 45, 46, 47, 48, 56, 61, 62, 63	41, 42	12 32 38	32 12 34	(0.23, 0.29, 0.59)	(0.04, 0.05, 0.07)	(0.17, 0.19, 0.28)	(0.17, 0.35, 1.22)	1,480,581 91,466	223,726	-1,165,389
S2	4, 8, 19, 23, 53, 57	3, 7, 11, 13, 22, 26, 29, 31, 35, 38, 39, 45, 46, 48, 56, 60, 61, 62, 63	16, 36, 41, 50	12 32 38	32 12 30	(0.27, 0.3, 0.42)	(0.06, 0.06, 0.06)	(0.22, 0.22, 0.22)	(0.2, 0.36, 0.85)	1,641,348 14,576	163,311	-1,463,460
S2*	S2	S2	S2	S2	S2	(0.25, 0.3, 0.63)	(0.06, 0.06, 0.09)	(0.2, 0.22, 0.33)	(0.18, 0.36, 1.28)	1,260,067 160,372 224,256	163,311	-936,383
S3	2, 4, 6, 8, 19, 21, 23, 25, 28, 34, 53, 55, 57, 59	1, 3, 5, 7, 9, 10, 11, 13, 14, 18, 20, 22, 24, 26, 27, 29, 31, 33, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 44, 45, 46, 47, 48, 52, 54, 56, 58, 60, 61, 62, 63	-	12 32 38	32 12 30	(0.2, 0.25, 0.53)	(0.02, 0.02, 0.03)	(0.17, 0.19, 0.28)	(0.15, 0.32, 1.1)	1,451,789. 62,156	329,129	-1,060,504
S4	-	2, 4, 7, 8, 19, 22, 23, 29, 31, 53, 56, 59, 61, 63	24, 33	12 32 38	57 32 30	(0.25, 0.3, 0.64)	(0.06, 0.07, 0.1)	(0.4, 0.44, 0.66)	(0.3, 0.62, 2.18)	924,361 707,588	82,156	-134,617



Slika 5. Fazi indeksi pouzdanosti (a-d) u slučajevima S0 i S1

sekcionera i indikatora prolaska kvara, kao i nove lokacije postojećih uređaja. Funkcije pripadnosti za izračunate fazi indekse pouzdanosti za ovaj slučaj prikazane su na slici 5, a karakteristične vrednosti fazi brojeva su date u tabeli 2. Može se primeniti sa slike 5 da će se nagrada za SAIFI ostvariti sa verovatnoćom od 100% bez obzira na neizvesnost ulaznih veličina, tj. Bez obzira koja od mogućih budućnosti će se desiti. Dalje, SAIDI i MAIFI sa sigurnošću neće biti u zoni penala, šta god da se desi u budućnosti. Međutim, ASIDI će biti u zoni penala sa verovatnoćom od 25% i u zoni nagrade sa verovatnoćom od 68%. To vodi do očekivane nagrade od U.S.\$1,480,581 i očekivanog penala od U.S.\$91,466, kao što je i dato u tabeli 2. Dakle, primenjujući ovaj scenario automatizacije, DSO može očekivati korist od U.S.\$1,165,389 u budućnosti.

Da bi se pokazao uticaj nivoa neizvesnosti na planiranje automatizacije mreža, analiziran je slučaj S2. U ovom slučaju je zanemarena neizvesnost intenziteta otkaza i on je tretiran kao krisk broj definisan kernelom fazi broja (F_M). Ova vrednost se uobičajeno koristi u determinističkim pristupima [15]. Najbolji scenario automatizacije za ovaj slučaj se razlikuje od S1. Troškovi budžeta su manji za 27% u poređenju sa S1. Međutim, kada bi se ovaj scenario automatizacije primenio uz uvažavanje neizvesnosti intenziteta otkaza, ukupna očekivana korist bi bila U.S.\$935,666, što je za 20% manje u poređenju sa S1. Ovaj slučaj je označen sa S2* u tabeli 2. Ovi rezultati pokazuju da zanemarivanje neizvesnosti ulaznih parametara može voditi ka previše optimističnom scenariju automatizacije mreže (sa premalo AD uređaja). To zauvrat vodi ka manjoj vrednosti očekivane dobiti. Rezultati takođe naglašavaju da povećanje neizvesnosti, što predstavlja slučaj S1 u odnosu na S2 zbog uvažavanja neizvesnosti intenziteta otkaza, vodi ka povećanju troškova budžeta, tj. do povećanja broja automatizovanih uređaja u mreži.

Dalje, slučaj S3 je analiziran kada je desna strana trougaonih fazi brojeva korišćena umesto kompletnih fazi brojeva za modelovanje potrošnje, trajanja prekida napajanja i intenziteta otkaza. Ovo bi se moglo smatrati kao najgori mogući scenario. U ovom slučaju, troškovi budžeta su veći za 32% dok je ukupna očekivana dobit manja za 9% u poređenju sa S1. Ovaj scenario automatizacije može se smatrati kao pesimistički (previše AD uređaja)

Prethodni rezultati pokazuju da najbolji scenario automatizacije nije dobijen za karakteristične tačke posmatranih fazi brojeva. Ovo implicira da klasični deterministički pristup, koji se bazira na karakterističnim tačkama fazi brojeva, može da podceni ili preceni razmatrane indekse pouzdanosti i da vodi ka previše optimističnom (premalo uređaja kao što je u slučaju S2) ili previše pesimističnom (previše uređaja kao u S3) scenariju automatizacije. Rezultati takođe pokazuju da promena nivo neizvesnosti ulaznih parametara dovodi do značajnih razlika u odabiru najboljeg scenarija automatizacije. Veći nivo neizvesnosti može voditi do većih budžetskih troškova, tj do većeg nivoa automatizacije mreže. Važno je primetiti da se automatizacija mreže može koristiti od strane DSO kao alat za upravljanje (smanjenje) finansijskim rizikom u prisustvu neizvesnosti ulaznih veličina, odnosno indeksa pouzdanosti. Ovo takođe implicira da prisustvo neizvesnosti treba razmatrati i prilikom dizajniranja podsticajne šeme sa ciljem da se smanji izlaganje DSO velikim finansijskim rizicima.

Konačno, uticaj tipa razmatranih indeksa pouzdanosti na scenario automatizacije mreže je analiziran u slučaju S4 gde MAIFI i ASIDI nisu uzeti u razmatranje. Dobijeni optimalni scenario automatizacije u S4 se razlikuje od S1 po broju, tipu i lokaciji uređaja automatizacije. Treba primetiti da reklozeri nisu predloženi u optimalnom scenariju S4. Takođe, nije predloženo ni opremanje fidera sa velikim industrijskim potrošačima (F2, F5 i F6). To implicira da će

veliki industrijski potrošači imati lošiji kvalitet snabdevanja u slučaju trajnih kvarova a ostali potrošači u slučaju tranzijentnih (prolaznih) kvarova u poređenju sa slučajem S1 U tabeli 2 se može primetiti da su MAIFI i ASIDI očekivano lošiji nego u slučaju S1. Ovi rezultati naglašavaju važnost razmatranja indeksa MAIFI i ASIDI prilikom vrednovanja kontinuiteta isporuke električne energije korišćenjem podsticajne šeme.

ZAKLJUČAK

U ovome radu je predložena procedura bazirana na analizi rizika za određivanje naboljeg scenarija automatizacije u prisustvu neizvesnosti u distributivnim mrežama u kojima se koriste podsticajne šeme za vrednovanje pouzdanosti. Cilj predloženog pristupa je da odredi scenario automatizacije koji minimizira finansijski rizik, odono rizik od značajnih troškova pouzdanosti u razmatranom period. 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 uvažavanja neizvesnosti ulaznih veličina koje se koristi u proračunima indeksa pouzdanosti u procesu planiranja automatizacije mreže. Oni takođe pokazuju moguće nedostatke klasičnih pristupa, koji razmatraju samo jednu vrednost ulaznih veličina, u određivanju najboljeg scenarija automatizacije u prisustvu neizvesnosti. Konačno, rezultati naglašavaju važnost uključivanja indeksa pouzdanosti koji uvažavaju kratkotrajne prekide (npr. MAIFI) i veličinu opterećenja (npr. ASIDI) u dizajniranju adekvatne regulacije kontinuiteta snabdevanja u distributivnim mrežama.

PRILOG

$${}^{\alpha}\tilde{RI} - {}^{\alpha}\Delta\tilde{RI}_{\max} - {}^{\alpha}\tilde{RI}_{\max} \leq RI_{\text{HDB}} \quad (12)$$

$${}^{\alpha}\tilde{RI} + x \cdot {}^{\alpha}\Delta\tilde{RI}_{\min} \leq RI_{\text{LDB}} + (1-x) \cdot M \quad (13)$$

Ograničenje (12) i (13) definišu da li je LHS (RHS) vrednost α -preseka fazi indeksa locirana u zoni nagrade ili penala. Ovde, $\Delta\tilde{RI}_{\max}$ je pomoćna fazi promenljiva, x je pomoćna binarna promenljiva i M je velika pozitivna konstanta.

$$y \cdot (RI_{\max} - RI_{\text{HDB}}) \leq {}^{\alpha}\Delta\tilde{RI}_{\max} \leq RI_{\max} - RI_{\text{HDB}} \quad (14)$$

$${}^{\alpha}\Delta\tilde{RI}_{\max} \leq y \cdot M \quad (15)$$

Ograničenja (14) i (15) opisuju iznos fazi indeksa u zoni penala za LHS (RHS) vrednost α -preseka. Ovde je y pomoćna binarna promenljiva.

$${}^{\alpha}\Delta\tilde{RI}_{\min} \leq RI_{\text{LDB}} - RI_{\min} \quad (16)$$

Ograničenje (16) opisuje iznos fazi indeksa u zoni nagrade za LHS (RHS) vrednost α -preseka.

LITERATURA

- [1] Council of European Energy Regulators, 2016, 6th CEER Benchmarking Report on the Quality of Electricity and Gas Supply. [Online].
- [2] R. E. Brown, 2009, "Electric Power Distribution Reliability", 2nd ed., New York: Taylor & Francis Group,.
- [3] R. Brown, J. Burke, 2000, "Managing the risk of performance based rates", IEEE Trans. Power Syst., no. 2, pp. 893-898.
- [4] R. Billinton, L. Cui, Z. Pan, 2002, "Quantitative reliability considerations in the determination of performance-based rates and customer service disruption payments", IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., no. 6, pp. 640-644,
- [5] I. Lim, T. S. Sidhu, M. S. Choi, S. J. Lee, B. N. Ha, 2013, "An optimal composition and placement of automatic switches in DAS", IEEE Trans. Power Del., no. 3, pp. 1474-1482.
- [6] L. S. Assis, J. F. V. González, F. L. Usberti, C. Lyra, C. Cavellucci, F.J. Von Zuben, 2015, "Switch allocation problems in power distribution systems", IEEE Trans. Power Syst., no.1, pp. 246-253.
- [7] S. Ray, A. Bhattacharya, S. Bhattacharjee, 2016, "Optimal placement of switches in a radial distribution network for reliability improvement", Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol.76, pp. 53-68.
- [8] A. Heidari, V.G. Agelidis, M. Kia, 2015, 'Considerations of sectionalizing switches in distribution networks with distributed generation', IEEE Trans. Power Del., no. 3, pp. 1401-1409.
- [9] O. K. Siirto, A. Safdarian, M. Lehtonen, M. Fotuhi-Firuzabad, 2015, "Optimal distribution network automation considering earth fault events", IEEE Trans. Smart Grid, no.2, pp. 1010-1018.
- [10] A. Heidari, V. G. Agelidis, M. Kia, J. Pou, J. Aghaei, M. Shafie-khah, J. P. Catalao, 2017, "Reliability optimization of automated distribution networks with probability customer interruption cost model in the presence of DG units", IEEE Trans. Smart Grid, no.1, pp.305-315.
- [11] Z. Popovic, S. Knezevic, B. Brbaklic, 2018, "Optimal reliability improvement strategy in radial distribution networks with island operation of distributed generation", IET Gener. Transm. Distrib., no. 1, pp. 78 - 87.

- [12] Z. Popovic, B. Brbaklic, S. Knezevic, 2017, "A mixed integer linear programming based approach for optimal placement of different types of automation devices in distribution networks", Electr. Power Syst. Res., vol. 148, pp. 136-146.
- [13] L. Wang, C. Singh, 2008, "Reliability-constrained optimum placement of reclosers and distributed generators in distribution networks using an ant colony system algorithm", IEEE Trans. Syst. Man Cyber.-Part C: Applications and reviews, vol. 38, no.6, pp. 757-764.
- [14] A. V. Pombo, J. M. Pina, V. F. Pires, 2016, "A multiobjective placement of switching devices in distribution networks incorporating distributed energy resources", Electr. Power Syst. Res., no.1, pp. 34-45.
- [15] J. Nahman, D. Peric, 2003, "Distribution system performance evaluation accounting for data uncertainty", IEEE Trans. Power Del., no. 3, pp. 694-700.
- [16] A. B. Rodrigues, M. G. Silva, 2013, "Confidence intervals estimation for reliability data of power distribution equipments using bootstrap", IEEE Trans. Power Syst., no. 3, pp. 3283 - 3291.
- [17] G. Anderson, R. Entriken, P. Nitu, 1999, "Risk Assessment and Financial Management", Tutorial at IEEE PES Winter Meeting, pp. 36-51.
- [18] R. Billinton, I. Sjarief, 1991, "A reliability test system for educational purposes-basic distribution system data and results", IEEE Trans. Power Syst., no.2, pp. 813-820.
- [19] D. Popovic, Z. Popovic, 2004, "A Risk Management Procedure for Supply Restoration in Distribution Networks", IEEE Trans. Power Syst., no. 1, pp. 221-229.
- [20] K. Alvehag, K. Awodele, 2014, "Impact of Reward and Penalty Scheme on the Incentives for Distribution System Reliability", IEEE Trans. Power Syst., no. 1, pp. 386 - 394.
- [21] H. Mohammadnezhad, M. Fotuhi-Firuzabad, 2010, "Impact of penalty-reward mechanism on the performance of electric distribution systems and regulator budget", IET Gener. Transm. Distrib., no. 7, pp. 770-779.
- [22] R. Billinton, Z. Pan, 2004, "Historic performance-based distribution system risk assessment", IEEE Trans. Power Del., no.4, pp. 1759-1765.
- [23] A. Abraham, A. Hassanien, P. Siarry, 2009, "Foundations of Computational Intelligence", vol. 3, Berlin: Springer-Verlag.