

PLANIRANJE RAZVOJA DISTRIBUTIVNIH MREŽA KORIŠĆENJEM PRISTUPA ZASNOVANOG NA UPRAVLJANJU RIZIKOM

A RISK-BASED APPROACH FOR DEVELOPMENT PLANNING OF RADIAL DISTRIBUTION NETWORKS

Stanko KNEŽEVIĆ, Schneider Electric, Novi Sad, Srbija
Željko POPOVIĆ, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija

KRATAK SADRŽAJ

Ovaj rad predlaže pristup planiranju razvoja distributivnih mreža u prisustvu neizvesnosti opterećenja i proizvodnje. Predloženi pristup je zasnovan na intervalnoj aritmetici, mešovitom celobrojnom linearnom programiranju i analizi rizika. Predloženi pristup omogućava dobijanje skupa planova razvoja koji se procenjuju s obzirom na moguće posledice usled neizvesnosti opterećenja i proizvodnje. Najbolji plan razvoja među njima se bira primenom Hurvicovog kriterijuma za merenje rizika, koji omogućava modelovanje različitih preferencija rizika donosioca odluka. Prema tome, predloženi pristup daje donosiocu odluka alat za određivanje plana razvoja koji će biti najefektniji bez obzira koja kombinacija proizvodnje i potrošnje će se pojaviti u budućnosti.

Ključne reči: planiranje razvoja distributivnih mreža, neizvesnost, rizik, Hurvicov kriterijum

ABSTRACT

This paper proposes an approach for distribution network development planning in the presence of load and distribution generation uncertainty. The proposed approach is based on Relative Distance Measure interval arithmetic, mixed integer linear programming, and risk analysis. It enables obtaining a set of development plans that are evaluated considering the possible outcomes due to load and generation uncertainty. The best among them is selected by employing the Hurwitz criterion for measuring risk, which enables modelling of different decision maker's risk preference. Hence, the proposed approach provides a decision-maker with a means for obtaining the development plan that will respond most efficiently, whatever future occurs.

Key words: distribution network planning, uncertainty, risk, Hurwitz criterion

Željko Popović, zpopovic@uns.ac.rs
Stanko Knežević, stanko.knezevic@se.com

1. UVOD

Planiranje razvoja distributivne mreže je težak problem od velike praktične važnosti sa dugom istorijom kontinuiranih napora i doprinosa za poboljšana rešenja [1]. Pored velike dimenzije distributivnih mreža, jedan od glavnih izazova u planiranju je visok stepen neizvesnosti ulaznih parametara. Različiti uslovi rada (temperatura okoline, brzina vetra, vlažnost, zagađenje, pritisak, itd.), nekompletna merenja, nepredviđene ekonomske promene i nekontrolisani događaji tokom horizonta planiranja mogu doprineti neizvesnostima u budućem rastu opterećenja i proizvodnji iz obnovljivih distribuiranih izvora (DG). U takvom okruženju može doći do mnogih mogućih budućnosti, a cilj donosioca odluka postaje da definiše plan razvoja koji efikasno može da odgovori na bilo koju verovatnu budućnost koja se može pojaviti. Međutim, do sada predloženi pristupi planiranju razvoja distributivnih mreža koji uzimaju u obzir neizvesnost opterećenja i proizvodnje uglavnom koriste koncept robusne optimizacije za definisanje najboljeg plana proširenja, što dovodi do previše konzervativnih rešenja [1], [2]. Takođe, predloženi pristupi ne omogućavaju sagledavanje preferencija prema riziku donosioca odluka i odabir rešenja (plan razvoja) koji minimizira rizik od značajnih finansijskih gubitaka (troškova) prema usvojenoj preferenciji rizika. Konačno, oni ne uzimaju u obzir korelacije koje postoje između različitih tipova opterećenja

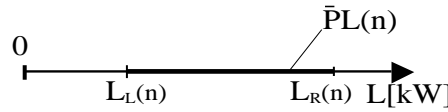
(stambenih, komercijalnih, industrijskih), između opterećenja i DG, i između DG, što može dovesti do previše konzervativnih rešenja.

U ovom radu su neizvesnost opterećenja i proizvodnje opisane primenom koncepta intervalnih brojeva. Prema ovom konceptu, vrednosti opterećenja i proizvodnje se transformišu u intervalne brojeve. Zatim se analiziraju neizvesnost opterećenja i proizvodnje za moguće (dozvoljene) vrednosti njihovih intervala uzimajući u obzir međusobnu zavisnost (korelacije). To se postiže uvođenjem intervalne aritmetike zasnovane na merenju relativne udaljenosti (Relative Distance Measure (RDM) aritmetika) koja osigurava da aritmetičke operacije nad intervalima ne dovode do previše pesimističkih rezultata (precenjenih intervala) i omogućava ispravnu realizaciju aritmetičkih operacija za sve vrste korelacije među intervalnim veličinama. Uzimajući u obzir korelacije koje postoje između različitih tipova opterećenja, između opterećenja i DG, i između DG, dobijaju se dozvoljene kombinacije intervalnih opterećenja i intervalnih proizvodnji. Za svaku od ovih kombinacija, problem planiranja razvoja je definisan i rešen primenom predloženog RDM intervalnog modela mešovitog celobrojnog linearnog programiranja (MILP). Predloženi MILP model razmatra investicione troškove, troškove gubitaka i troškove prekida. Na ovaj način se dobijaju raznovrsni planovi razvoja. Zatim se za svaki plan određuju moguće posledice za svaku dozvoljenu kombinaciju intervalnih veličina uzimajući u obzir upravljanje opterećenjem u cilju eliminisanje narušenih termičkih ograničenja. Upravljanje opterećenjem u ovom slučaju predstavlja resurs za upravljanje rizikom koji proizilazi iz neizvesnosti u opterećenju i proizvodnji. Uzimajući u obzir dobijene rezultate, najbolji plan se bira primenom Hurvicovog kriterijuma za procenu rizika, koji omogućava poređenje (rangiranje) intervalnih vrednosti ukupnih troškova na osnovu preferencije rizika donosioca odluke (DO). Na ovaj način, predloženi pristup omogućava dobijanje najboljeg plana razvoja mreže uzimajući u obzir različite nivoe pesimizma (DO koji nije sklon riziku) ili optimizma (DO koji se sklon riziku).

2. FORMULACIJA PROBLEMA

2.1 Neizvesnost opterećenja i proizvodnje

Neizvesnost potrošnje u čvoru (n) opisuje se intervalnim brojem $\overline{PL}(n)=[PL_L(n), PL_R(n)]$, kako je prikazano na slici 1.



Slika 1 – Predstavljanje intervalnog opterećenja PL u čvoru (n)

Ovaj broj je definisan u terminima intervalne (RDM) aritmetike na sledeći način [3], [4]:

$$\overline{PL}(n)=PL_L(n)+\alpha_{L(n)}\cdot(PL_R(n)-PL_L(n))=PL_L(n)+\alpha_{L(n)}\cdot\Delta PL(n), \quad \alpha_{L(n)} \in [0,1], \quad (1)$$

Neizvesnost proizvodnje obnovljivih izvora u čvoru (n) opisuje se na sličan način:

$$\overline{PG}(n)=PG_L(n)+\alpha_{G(n)}\cdot(PG_R(n)-PG_L(n))=PG_L(n)+\alpha_{G(n)}\cdot\Delta G(n), \quad \alpha_{G(n)} \in [0,1] \quad (2)$$

Izrazima (1) i (2) opisuju se naizvesnosti potrošnje i proizvodnje aktivne snage u čvoru (n). Dakle, variranjem α -vrednosti u izrazima (1) i (2) u intervalu $[0,1]$ mogu se odrediti sve moguće vrednosti potrošnje i proizvodnje u čvoru (n), tj. mogu se odrediti sva stanja prirode koja se mogu realizovati u razmatranoj mreži. Tačna (crisp) vrednost intervalnog broja \bar{x} koja se dobija za određenu vrednost α_x označava se sa $^{\alpha} \alpha_x$.

Korelacije koje postoje između intervalnih brojeva \bar{x} i \bar{y} se mogu uvažiti kako je opisano u [5]:

$$D(r) = \{(\alpha_x, \alpha_y): \max(0, -\alpha_x - r, \alpha_x - 1 + r) \leq \alpha_y \leq \min(1, \alpha_x + 1 - r, -\alpha_x + 2 + r), \alpha_x \in [0,1], \alpha_y \in [0,1]\} \quad (3)$$

Prema izrazu (3), postoji relacija zavisnosti za svaku vrednost koeficijenta korelacije r koja pripada $[-1,+1]$. Koeficijent korelacije između opterećenja, između DG, i koeficijent korelacije između DG i opterećenja mogu se dobiti pomoću statističke analize postojećih podataka. Ako postoji zavisnost (korelacija) između razmatranih veličina, to znači da nisu sve kombinacije vrednosti dozvoljene. Više detalja može se naći u [3], [4].

2.2 Hurvicov kriterijum za ocenu rizika

Rangiranje intervala, $\bar{x} = [x_L, x_R]$ i $\bar{y} = [y_L, y_R]$, vrši se korišćenjem Hurvicovog kriterijuma [3], [6]. Ovaj kriterijum je opisan sa (4).

$$\delta \cdot x_L + (1 - \delta) \cdot x_R \begin{cases} > \\ < \\ = \end{cases} \delta \cdot y_L + (1 - \delta) \cdot y_R \quad (4)$$

Ovde x_L i y_L predstavljaju leve krajnje tačke, dok x_R i y_R predstavljaju desne krajnje tačke razmatranih intervala.

U (4) $\delta \in [0,1]$ je parametar koji opisuje stav prema riziku (preferencije) donosioca odluke [3], [6]. Ako se uzmu u obzir troškovi, $\delta = 1$ opisuje izuzetno optimističnog donosioca odluka, dok $\delta = 0$ opisuje izuzetno sećpesimističnog donosioca odluka. Dakle, vrednosti intervala se mapiraju u realne brojeve s obzirom na stav prema riziku donosioca odluke izražen Hurvicovim kriterijumom. Zatim se rangiranje zasniva na prirodnom redosledu rezultujućih realnih brojeva. Donosilac odluka koji nije sklon riziku (pesimistički) će izabrati $\delta \in [0.5,0]$ da bi dobio rešenje koje minimizira rizik od značajnih finansijskih gubitaka (troškova) u sistemu. Više detalja o Hurvicovom kriterijum se može naći u [3].

3. PROCEDURA ZA PLANIRANJE RAZVOJA DISTRIBUTIVNIH MREŽA U PRISUSTVU NEIZVESNOSTI ZASNOVANA NA UPRAVLJANJU RIZIKOM

Cilj planiranja razvoja radijalnih distributivnih mreža u prisustvu neizvesnosti opterećenja i proizvodnje može se izraziti na sledeći način: pronaći rešenje koje minimizira rizik od značajnih gubitaka (troškova) uz zadovoljavanje operativnih ograničenja u mreži (naponska i termička ograničenja). Ovde se razmatraju sledeći troškovi: troškovi ulaganja (troškovi pojačanja ili zamene postojećih deonica i troškovi izgradnje novih deonica), troškovi gubitaka električne energije, troškovi usled prekida napajanja potrošača zbog kvarova na deonicima i zbog kvarova na DG i troškovi smanjenja koji obuhvataju troškove usled upravljanja opterećenja i troškove usled smanjenja (ograničavanja) snage DG.

Optimalan plan razvoja distributivne mreže određuje se na sledeći način. Prvo se generiše skup planova razvoja distributivne mreže koristeći proceduru koja je opisana u poglavlju 3.1. U ovoj proceduri se obrađuju sva moguća stanja prirode, tj. sve moguće realizacije neizvesnih veličina ($\overline{PL}(n)$, $\overline{PG}(n)$) i za svaku od njih se rešava model celobrojnog mešovitog linearnog programiranja (MILP) koji je prikazan u poglavlju 3.3. Na ovaj način generiše se skup različitih planova razvoja distributivnih mreža. Zatim se dobijeni planovi ocenjuju za sva moguća stanja prirode, tj. za sve moguće realizacije neizvesnih veličina ($\overline{PL}(n)$, $\overline{PG}(n)$), na način opisan u poglavlju 2.2. Izbor najboljeg plana, kojim se minimizira rizik od finansijskih gubitaka prema preferenciji rizika donosioca odluke se vrši korišćenjem Hurvicovog kriterijuma.

3.1 Procedura za dobijanje skupa planova razvoja mreže

Skup planova razvoja mreže dobija se istovremenom razmatranjem dva nivoa opterećenja: režima maksimalnog opterećenja i režima minimalnog opterećenja. U režimu maksimalnog opterećenja razmatraju se operativna ograničenja (naponska i termička) zajedno sa investicionim troškovima, troškovima gubitaka i troškovima prekida usled kvarova na deonicima i DG. Gore navedeni troškovi se ne razmatraju u minimalnom režimu, već samo operativna ograničenja. Troškovi upravljanja opterećenjem, smanjenje opterećenja i smanjenje proizvodnje DG se razmatraju u procesu ocenjivanja planova razvoja kao što je opisano u sledećem odeljku. Navedeni pristup omogućava razmatranje raspoloživog kapaciteta (hosting capacity) u planiranju razvoja distributivnih mreže.

Procedura za dobijanje skupa planova razvoja mreže je opisana na sledeći način:

- 1) Definirati skup dozvoljenih kombinacija $\alpha_{L(n)}$ - vrednosti za svaki par opterećenja, koristeći relaciju zavisnosti (3) i koeficijent korelacije (r_L) među njima. Pretpostavlja se da postoji savršena pozitivna korelacija između odgovarajućih intervala u režimima minimalnog i maksimalnog opterećenja. Dakle, skup dozvoljenih kombinacija α -vrednosti će biti isti u oba režima za razmatrane intervalne veličine.
- 2) Definirati skup dozvoljenih kombinacija $\alpha_{G(n)}$ - vrednosti za svaki par DG, koristeći relaciju zavisnosti (3) i koeficijent korelacije (r_G) među njima.
- 3) Definirati skup dozvoljenih kombinacija $\alpha_{L(n)}$ -vrednosti i $\alpha_{G(n)}$ -vrednosti za svaki par opterećenja i DG, koristeći relaciju zavisnosti (3) i koeficijent korelacije (r_{LG}) među njima.
- 4) Izabrati vrednosti za $\alpha_{L(n)}$ i $\alpha_{G(n)}$ među vrednostima dobijenim u koracima 2)-4),
- 5) Za vrednosti izabrane u 4), odredite tačne (crisp) vrednosti opterećenja i proizvodnje iz njihovih intervala primenom relacija (1) i (2).
- 6) Za tačne (crisp) vrednosti iz 5), odredite plan razvoja mreže koristeći MILP model (5)-(17). Ovde se pretpostavlja da su cena upravljanja opterećenjem, smanjenje opterećenja i cena smanjenja proizvodnje DG veoma veliki. Na ovaj način se dobija plan koji zadovoljava operativna ograničenja za razmatrane tačne vrednosti neizvesnih veličina bez korišćenja upravljanja opterećenjem, smanjenja opterećenja i smanjenja proizvodnje DG.
- 7) Izabrati drugu kombinaciju $\alpha_{L(n)}$ i $\alpha_{G(n)}$ iz skupa dobijenog u 2)-4). Ponovite 6) i 7).
- 8) Ponavljajte 7) za sve dozvoljene kombinacije $\alpha_{L(n)}$ i $\alpha_{G(n)}$.

Gornja procedura omogućava dobijanje skupa planova razvoja mreže koji se dalje ocenjuju, korišćenjem procedure opisane u poglavlju 3.2, da bi se definisalo rešenje koje minimizira rizik od značajnih finansijskih gubitaka (troškova) u skladu sa izabranim preferencijam rizika donosioca odluke.

3.2 Procedura za izbor najboljeg plana razvoja mreže

Procedura za ocenu planova razvoja mreže, dobijenih na način opisan u poglavlju 3.1, i izbor rešenja koje minimizira rizik od finansijskih gubitaka sastoji se od sledećih koraka:

- a) Iz skupa dobijenih planova razvoja bira se jedan plan. Treba imati na umu da su za ovaj plan poznate vrednosti svih promenljivih odluke (binarne promenljivih) u modelu (5)-(17), tj. poznata je konfiguracija mreže i presek deonica.
- b) Za plan odabran u a), trošak svih posledica utvrđuje se na sledeći način:
 - Za dozvoljenu kombinaciju $\alpha_{L(n)}$ i $\alpha_{G(n)}$ vrednosti, opisanu u koraku 4) u poglavlju 3.1, rešiti MILP model (5)-(17). Ovde se uzimaju u obzir stvarna cena troškova upravljanja opterećenjem, cena smanjenja opterećenja i cena smanjenja proizvodnje DG. Za neke kombinacije gore navedenih α vrednosti može doći do narušenih termičkih i naposkih ograničenja u mreži, što će biti eliminisano upravljanjem opterećenja i smanjenjem proizvodnje DG. Na ovaj način se određuje trošak upravljanja opterećenjem i trošak smanjenja proizvodnje DG zajedno sa troškovima gubitaka i troškovima prekida.
 - Sečeno opterećenje i sečena proizvodnja u minimalnom i maksimalnom režimu se množe sa dužinom trajanja odgovarajućeg režima. Ova trajanja su takođe neizvesna i mogu se opisati intervalima, slično kao (1) i (2). Ovde se pretpostavlja da postoji savršena negativna korelacija između maksimalnog opterećenja i njegovog trajanja i savršena pozitivna korelacija između minimalnog opterećenja i njegovog trajanja. Na ovaj način se dobija ukupni trošak, opisan relacijom (5), za razmatranu kombinaciju $\alpha_{L(n)}$ i $\alpha_{G(n)}$ vrednosti.
 - Dva gornja koraka se ponavljaju za sve kombinacije $\alpha_{L(n)}$ i $\alpha_{G(n)}$ vrednosti, definisane u koraku 4) u poglavlju 3.1. Na osnovu dobijenih vrednosti ukupnih troškova za svaku razmatranu kombinacije intervalnih opterećenja i proizvodnji određuje se ukupni intervalni trošak odgovarajućeg plana.
- c) Proces opisan u b) se ponavlja za sve planove. Dakle, svaki plan je opisan intervalnim ukupnim troškom. Rangiranje tih intervalnih brojeva se vrši korišćenjem Hurvicovog kriterijuma (4). Na ovaj način se određuje plan koji minimizira rizik od finansijskih gubitaka, tj. plan minimalnog rizika.

3.3 Model mešovitog celobrojnog linearnog programiranja (MILP)

MILP model zasnovan na RDM intervalnoj aritmetici za planiranje razvoja radijalnih distributivnih mreža opisan je jednačinama (5)-(17), prikazanim u nastavku.

a) Kriterijumska funkcija

$$\min \{ {}^\alpha C_{inv} + {}^\alpha C_{loss} + {}^\alpha C_{int} + {}^\alpha C_{curt} \}, \quad (5)$$

gde je ${}^\alpha C_{inv}$ investicioni trošak, ${}^\alpha C_{loss}$ trošak gubitaka, ${}^\alpha C_{int}$ trošak prekida potrošača zbog kvarova na deonicima i na DG, ${}^\alpha C_{curt}$ predstavlja trošak usled upravljanja opterećenjem i sečenja DG za razmatranu kombinaciju α vrednosti opterećenja i proizvodnje.

Investicioni trošak nastaje u početnoj godini razmatranog planskog perioda i sastoji se od troškova izgradnje novih elemenata i troškova pojačanja i zamene postojećih elemenata u mreži. Koristi se linearna aproksimacija troškova gubitaka koja omogućava precizno izračunavanje gubitaka u MILP modelima bez uključivanja dodatnih celobrojnih varijabli [6]. Troškovi prekida se sastoje od troškova neisporučene energije usled kvarova na deonicama i DG, koji se mogu razlikovati za različite kategorije (tipove) kupaca.

Troškovi smanjenja ${}^\alpha C_{curt}$ se sastoje od troškova upravljanja opterećenjem i troškova smanjenja opterećenja ako resur upravljanja opterećenjem nije dovoljan za rešavanje problema. Troškovi smanjenja proizvodnje se takođe uzimaju u obzir.

b) Ograničenja u režimu maksimalnog opterećenja (M)

$${}^\alpha g_i^M ({}^\alpha I_{l,s}^M, {}^\alpha w_{l,s}, {}^\alpha dg z_{dg}^M, {}^\alpha dzc_d^M, {}^\alpha dzdr_d^M) = 0, i \in N \quad (6)$$

$${}^\alpha f_i^M(V) = 0 \quad (7)$$

$${}^\alpha I_{l,s}^M \leq {}^\alpha w_{l,s} \cdot I_{(l,s)max}, l \in NL, s \in SL \quad (8)$$

$$V_{min} \leq \alpha V_i^M \leq V_{max} \quad (9)$$

$$\alpha g_i^M(\alpha I_{fict}^M, \alpha w_{l,s}, \alpha dgz_{dg}^m, \alpha dzc_d^m, \alpha dzdr_d^m) = 0 \quad (10)$$

$$\alpha f_i^M(V_{fict}) = 0 \quad (11)$$

$$\alpha I_{l,s}^{M,fict} \leq \alpha w_{l,s} \cdot I_{(l,s)max} \quad (12)$$

$$\alpha \varphi^M(\alpha w) = 0 \quad (13)$$

c) Ograničenja u režimu minimalnog opterećenja (m)

$$\alpha g_i^m(\alpha I_{l,s}^m, \alpha w_{l,s}, \alpha dgz_{dg}^m, \alpha dzc_d^m, \alpha dzdr_d^m) = 0, i \in N \quad (14)$$

$$\alpha f_i^m(V) = 0 \quad (15)$$

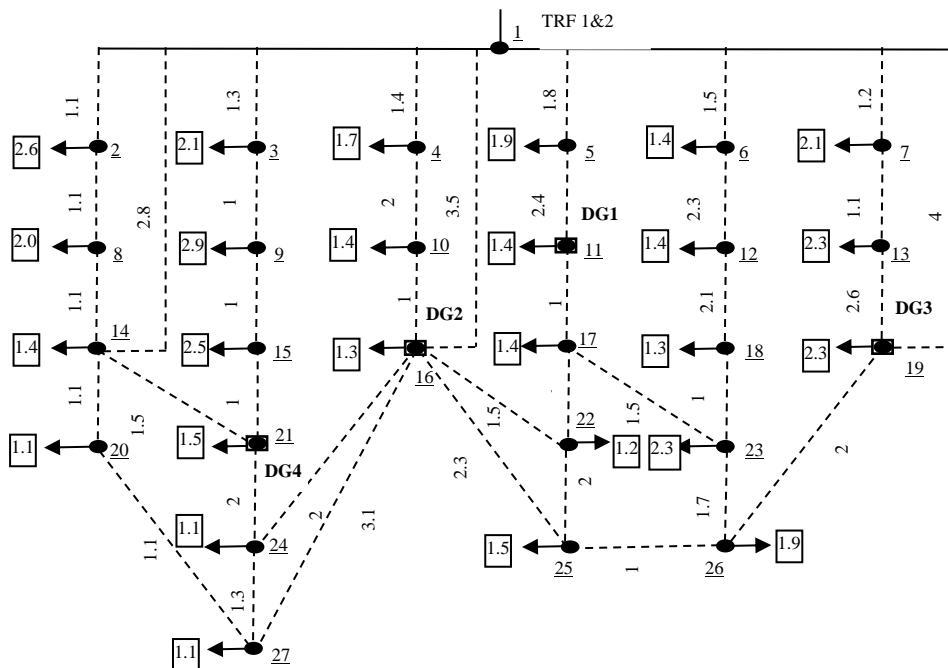
$$\alpha I_{l,s}^m \leq \alpha w_{l,s} \cdot I_{(l,s)max}, l \in NL, s \in SL \quad (16)$$

$$V_{min} \leq \alpha V_i^m \leq V_{max}, i \in N \quad (17)$$

Prvi Kirhofov zakon u režimu vršnog opterećenja, označenog superskriptom M , za jednu kombinaciju α vrednosti razmatranih intervala opisan je relacijom (6). Skup grana u mreži je označen sa NL , skup čvorova u mreži je označen sa N , a skup razmatranih preseka grana je označen sa SL . Ovde $\alpha I_{l,s}^M$ predstavlja struju kroz deonice (l) preseka (s) povezane sa čvorom (i), $\alpha w_{l,s}$ predstavlja binarnu promenljivu za deonicu povezanu sa čvorom (i) (status deonice (i) preseka (s)). Kontinualne promenljive $\alpha dgz_{dg}^{M(m)}$ opisuju mogućnost smanjenja proizvodnje DG u maksimalnom (M) i minimalnom (m) režimu, $\alpha dzc_d^{M(m)}$ varijable opisuju mogućnost smanjenja opterećenja u maksimalnom (M) i minimalnom (m) režimu, a $\alpha dzdr_d^{M(m)}$ varijable opisuju mogućnost smanjenja opterećenja kroz programe za upravljanje opterećenjem u maksimumu i minimalni režim. Jednačine (7) opisuju drugi Kirhofov zakon. Jednačine (8) opisuju ograničenje kapaciteta deonice (l) preseka (s), dok (9) predstavljaju ograničenja napona u mreži. Sa (10)-(12) su opisani troškovi prekida dobijeni korišćenjem koncepta fiktivnih mreža predloženog u [7]. Jednačina (13) predstavlja topološka ograničenja koja obezbeđuju radialnu konfiguraciju mreže bez mogućnosti pojave ostrvskog rada DG. Ograničenja (14)-(17) obezbeđuju da su operativna ograničenja (naponska i termička) zadovoljena u režimu minimalnog opterećenja u mreži.

4. PRIMER PRIMENE

Predloženi pristup je korišćen za određivanje najboljeg plana razvoja mreže za 20 kV mrežu prikazanu na slici 2. Test sistem se sastoji od jednog napojnog čvora, 35 mogućih novih grana (isprekidane linije) i 27 čvorova. U napojnoj trafostanici postoje dva transformatora 110/20 kV/kV (TRF1&2, grana 0-1) snage 33 MVA po transformatoru.



Slika 2 - Test mreža

Četiri različita preseka se uzimaju u obzir za izgradnju/pojačanje grana. Podaci o fizičkim karakteristikama i jediničnim troškovima za svaki presek preuzeti su iz [8]. Na slici 2 dužine svih grana su date u kilometrima. Pretpostavlja se da u svakoj grani postoji prekidač. Čvorovi sa potrošačima su označeni punim krugovima, dok su DG prikazani kvadratnim linijama. Maksimalna opterećenja, u MVA, svakog potrošačkog čvora su prikazani u kvadratnim linijama. Pretpostavlja se da minimalno opterećenje u svakom čvoru predstavlja 35% njegove maksimalne vrednosti. Razmatrana su četiri distribuirana generatora sa sledećom proizvodnjom: DG1 (4 MVA), DG2 (2,5 MVA), DG3 (5 MVA), DG4 (4,5 MVA). Jedinični trošak neisporučene energije za opterećenja u čvorovima (3,4,5,6,7,8,18,20,22,24,25,26) je 0.5 US\$/kWh, za opterećenja u čvorovima (10,11,12,13,14,15,21,27) iznosi 15 US\$/kWh, a za opterećenja u čvorovima (2,9,16,17,19,23) je 5,39 US\$/kWh. Stopa otkaza za sve grane je 0.07 (kvar/km/god) i vreme popravke je 3 h. Stopa otkaza za DG je 0.25 otkaza/godišnje i vreme popravke je 50 h, trošak gubitka proizvodnje (smanjenja) za sve DG je 0.1 US\$/kWh i faktor snage DG je 1. Napon u čvoru napajanja (1) je 20.5 kV, gornja granica napona je postavljena na 21 kV, a donja granica napona je postavljena na 19 kV. Pretpostavlja se i sledeće: faktor snage u mreži je 0.95, vremenski horizont koji se razmatra je 30 godina, a godišnja diskontna stopa je 8%.

Pretpostavlja se da opterećenja u maksimalnom režimu opterećenja odstupaju za $\pm 20\%$ od maksimalne vrednosti, dok se za opterećenje u minimalnom režimu opterećenja pretpostavlja da odstupaju za $\pm 25\%$ od minimalne vrednosti. Pretpostavlja se da proizvodnja DG varira od nule do maksimalne vrednosti. takođe se pretpostavlja da postoji savršena pozitivna korelacija ($r=1$) između obnovljivih generatora istog tipa (npr. vetrogeneratori) kao i između opterećenja istog tipa (npr. stambena, komercijalna, industrijska). Dalje se pretpostavlja da opterećenja i proizvodnja DG nisu u korelaciji, odnosno da je koeficijent korelacije između njih $r=0$. Pretpostavlja se da je koeficijent korelacije između stambenog i komercijalnog opterećenja 0.8, dok je koeficijent korelacije između stambenog i industrijskog opterećenja 0.7. Pretpostavlja se i sledeće: $(\alpha_L, \alpha_G) \in \{0, 0.25, 0.5, 0.75, 1\}$. Na osnovu navedenog i na osnovu procedure za dobijanje skup planova razvoja mreže predložene u poglavlju 3.1, razmatra se 585 validnih kombinacija ulaznih parametara. Dakle, 585 proračuna je izvršeno korišćenjem MILP modela datog u poglavlju 3.3. Na ovaj način se dobijaju 332 različita plana proširenja mreže. Najbolji plan proširenja mreže određen je rangiranjem dobijenih planova od strane donosioca odluke koji nije sklon riziku, odnosno korišćenjem vrednosti $\delta=0.3$ u relaciji (4). Najbolji plan proširenja mreže koji minimizira rizik od značajnih finansijskih gubitaka (troškova) označen je sa P1 u tabeli 1.

Tabela 1 - Rezultati testiranja

	Nova izgrađenost	Ukupni intervalni trošak [US\$]	Hurvicova vrednost [US\$]	Investicioni trošak [US\$]
P1	<u>1-2</u> (8), <u>1-3</u> (10), <u>1-4</u> (5), <u>1-5</u> (5), <u>1-6</u> (5), <u>1-7</u> (8), <u>1-14</u> (8), <u>1-16</u> (14), <u>1-19</u> (5), <u>2-8</u> (5), <u>3-9</u> (8), <u>5-11</u> (5), <u>6-12</u> (5), <u>7-13</u> (5), <u>9-15</u> (5), <u>10-16</u> (5), <u>12-18</u> (5), <u>14-20</u> (5), <u>14-21</u> (5), <u>16-22</u> (5), <u>16-25</u> (5), <u>17-22</u> (5), <u>17-23</u> (5), <u>20-27</u> (5), <u>24-27</u> (5), <u>25-26</u> (5)	[4427 202 , 5,283,891]	4,941,215	2,694,000
P2	<u>1-2</u> (5), <u>1-3</u> (5), <u>1-4</u> (5), <u>1-5</u> (8), <u>1-6</u> (5), <u>1-7</u> (5), <u>1-14</u> (8), <u>1-16</u> (5), <u>1-19</u> (5), <u>2-8</u> (5), <u>3-9</u> (5), <u>5-11</u> (5), <u>6-12</u> (5), <u>7-13</u> (5), <u>10-16</u> (5), <u>11-17</u> (5), <u>14-20</u> (5), <u>14-21</u> (5), <u>15-21</u> (5), <u>16-22</u> (5), <u>17-23</u> (5), <u>18-23</u> (5), <u>19-26</u> (5), <u>20-27</u> (5), <u>24-27</u> (5), <u>25-26</u> (5)	[4,137,896 , 5,504,425] [4,187,335 , 5,555,793] *	4,957,813 5,008,410*	2,368,000
P3	<u>1-2</u> (5), <u>1-3</u> (5), <u>1-4</u> (5), <u>1-5</u> (8), <u>1-6</u> (5), <u>1-7</u> (5), <u>1-14</u> (10), <u>1-16</u> (5), <u>1-19</u> (8), <u>2-8</u> (5), <u>5-11</u> (5), <u>6-12</u> (5), <u>7-13</u> (5), <u>9-15</u> (5), <u>10-16</u> (5), <u>11-17</u> (5), <u>14-20</u> (5), <u>14-21</u> (8), <u>15-21</u> (8), <u>16-24</u> (5), <u>17-23</u> (5), <u>18-23</u> (5), <u>19-26</u> (5), <u>20-27</u> (5), <u>22-25</u> (5), <u>25-26</u> (5)	[4,489,680 , 5,716,621]	5,225,845	2,590,000
	<u>X</u> – <u>Y</u> (Z) – deonica između čvora <u>X</u> i čvora <u>Y</u> poprečnog preseka Z			

Dalje se analiziraju planovi razvoja mreže P2 i P3, prikazani u tabeli 1.

Plan P2 se dobija uz pretpostavku da postoji savršena pozitivna korelacija ($r=1$) između opterećenja, što dovodi do 162 validne kombinacije ulaznih parametara u svakom režimu. Najbolji plan proširenja mreže u ovom slučaju se razlikuje od rešenja u P1. Međutim, ako se primeni plan P2 i uzme se u obzir korelacija između opterećenja kao u P1, ukupni trošak intervala biće [4,187,335, 5,555,793] USD, kao što je označeno (*) u tabeli 1. Prema (4) i $\delta=0.4$, ovaj trošak je veći od onog dobijenog u P1, što se može videti u koloni Hurvicova vrednost u tabeli 1.

Gore navedeni rezultati naglašavaju važnost razmatranja korelacije između opterećenja u problemima planiranja razvoja distributivnih mreža.

Konačno, plan P3 opisuje plan dobijen za karakteristične kombinacije intervalne proizvodnje i intervalne potrošnje, koji se obično koristi u pristupima koji razmatraju najgore slučajeve (worst-case analysis) i proračunima koji koriste tačne (crisp) vrednosti. Ovde P3 odgovara kombinaciji (maksimalna generacija,

minimalno opterećenje). Njegovi intervalni troškovi, mereni na osnovu $\delta = 0.4$, veći su od intervalnih troškova plana P1. Ovaj rezultat naglašava nedostatak analiza zasnovanih na tačnim (crisp) vrednostim kao i analiza baziranih na najgorem slučaju i neophodnost korišćenja pristupa zasnovanih na riziku u problemima planiranja razvoja distributivnih mreže u prisustvu neizvesnosti.

5. ZAKLJUČAK

U radu je prikazan pristup za planiranje razvoja radijalnih distributivnih mreža u prisustvu neizvesnosti opterećenja i proizvodnje. Predloženi pristup istovremeno razmatra maksimalne i minimalne nivoe opterećenja u mreži kako bi se dobio skup kvalitetnih planova razvoja mreže korišćenjem koncepta zvanog na intervalnoj RDM aritmetici. Dobijeni planovi se ocenjuju i bira se kao najbolji onaj koji minimizira rizik od finansijskih gubitaka, korišćenjem Hurvicog kriterijumu za merenje rizika kojim se uvažavaju preferencijama donosioca odluke prema riziku. Prikazani rezultati pokazuju važnost upotrebe pristupa zasnovanih na riziku i razmatranja korelacije između neizvesnih veličina (opterećenja i proizvodnji iz obnovljivih izvora) za dobijanje najboljeg plana razvoja mreže u prisustvu neizvesnosti.

LITERATURA

- [1] P. Georgilakis, N. Hatziargyriou, 2015, "A review of power distribution planning in the modern power systems era: Models, methods and future research", *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 121, 89–100.
- [2] A. Ehsan, Q. Yang, 2019, "State-of-the-art techniques for modelling of uncertainties in active distribution network planning: A review", *Appl. Energy*, vol. 239, 1509-1523.
- [3] Z. N. Popovic, S. D. Knezevic, 2022, "Dynamic reconfiguration of distribution networks considering hosting capacity: A risk-based approach", *IEEE Trans. Power Syst. (Early Access)*, doi: 10.1109/TPWRS.2022.3206049.
- [4] Z. N. Popovic, S. D. Knezevic, B. B. Brbaklic, 2020, "A risk management procedure for island partitioning of automated radial distribution networks with distributed generators", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 35, 3895 – 3905.
- [5] S. Ferson, V. Kreinovich, 2006, "Modeling correlation and dependence among intervals", *Proceedings International Workshop Reliable Engineering Computing*, 115-126.
- [6] J. J. Saade, H. Schwarzlander, 1992, "Ordering fuzzy sets over the real line: An approach based on decision making under uncertainty", *Fuzzy Sets Syst.*, vol. 50, 237-246.
- [7] Z. N. Popovic, V. Kerleta, D. Popovic, 2014, "Hybrid simulated annealing and mixed integer linear programming algorithm for optimal planning of radial distribution networks with distributed generation" *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 108, 211-222.
- [8] Z. N. Popovic, S. Knezevic, B. Brbaklic, S. Koehler, 2018, "Risk-based Planning of Radial Distribution Networks with Distributed Generation and Demand Response in the Presence of Uncertainty", *Proceedings CIGRE*, 5040 - 5049.