

PLANIRANJE RAZVOJA DISTRIBUTIVNIH MREŽA OTPORNIH NA EKSTREMNE VREMENSKE NEPOGODE: FORMULACIJA PROBLEMA

RESILIENT DISTRIBUTION NETWORK PLANNING AGAINST THE SEVERE WEATHER CONDITIONS: PROBLEM FORMULATION

Željko POPOVIĆ, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija
Neven KOVAČKI, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija

KRATAK SADRŽAJ

U radu je predložen pristup, zasnovan na upravljanju rizikom, za planiranje distributivnih mreža otpornih na ekstremne vremenske uslove (oluje). Predloženi pristup je zasnovan na konceptu intervalnih brojeva, intervalnoj RDM (Relative Distance Measure) aritmetici, mešovitom celobrojnom lineranom programiranju i alatu za ocenu rizika. On omogućava dobijanje velikog broja različitih planova otpornih (žilavih) distributivnih mreža uzimajući u obzir zavisnosti koje postoje među sledećim neizvesnim veličinama (parametrima): maksimalnoj brzini vetra, trajanju oluje i njenoj učestanost pojavljivanja, lomljivosti (krhkosti) komponenti u mreži (provodnika i stubova), dužini trajanja popravki, prognoziranom opterećenju i proizvodnji iz obnovljivih izvora (generatora). Da bi se unapredila efikasnost predloženog pristupa, u radu je predložen hibridni algoritam baziran na simuliranom kaljenju i mešovitom celobrojnom lineranom programiranju. Najbolji plan otporne distributivne mreže se bira korišćenjem kriterijuma minimalnog rizika (Minimax kriterijum). Na taj način predloženi pristup omogućuje donosiocu odluke da odabere onaj plan otporne mreže koji minimizira rizik od značajnih troškova usled ekstremnih oluja.

Ključne reči: Otpronost (žilavost), ojačavanje, kreiranje ostrva, neizvesnost, intervalna aritmetika, analiza rizika

SUMMARY

This paper proposes a risk-based approach for planning resilient radial distribution networks to severe windstorms. The proposed approach is based on the concept of interval analysis, Relative Distance Measure (RDM) interval arithmetic, mixed integer linear programming, and risk analysis. It enables obtaining a number of different resilient network plans taking into account dependence among the following uncertain inputs: maximum wind speed, storm duration and its annual frequency of occurrence, fragility of network components, repair duration, forecasted load and generation from renewable generators. In order to improve the computational efficiency of the proposed approach a hybrid simulated annealing and mixed integer linear programming algorithm is introduced. The best resilient plan is selected by employing the Minimal risk (Minimax) criterion for measuring and managing risk. In this way, the proposed approach provides a decision-maker with a means of determining the resilient network plan that minimizes the risk of significant costs due to severe windstorms.

Key words: Resilience, Hardening, Island partitioning, Uncertainty, Interval arithmetic, Risk analysis

Željko Popović, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, zpopovic@uns.ac.rs
Neven Kovački, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, kovackin@uns.ac.rs

1. UVOD

Unapređenje otpornosti distributivnih mreža na ekstremne oluje je u poslednjim godinama u fokusu kako distributivnih kompanija tako i celog društva [1, 2]. Otpornost mreže se može unaprediti korišćenjem različitih strategija. Te strategije obuhvataju fizičko ojačavanje mreže, kao što je ojačavanje stubova i provodnika (linija), u cilju smanjivanja verovatnoće kvara pojedinih komponenti mreže usled ekstremnih oluja, i unapređenje operativnih sposobnosti mreže, kao što je obezbeđivanje privremnog snabdevanja električnom energijom kroz formiranje ostrva u mreži u periodu trajanja prekida izazvanih ekstremnim olujama u cilju smanjenja vremena restauracija [3]. Strategije iz navedenih kategorija su međusobno zavisne i trebaju se razmatrati jednovremeno da

bi se definisao najbolji plan otporne mreže. Takođe, vrednosti ulaznih podataka koji se koriste za planiranje otpornih mreža, kao što su: maksimalna brzina vetra, trajanje oluje i njena učestanost pojavljivanja, lomljivost (krhkost) komponenti u mreži, dužini trajanja popravki, prognoziranje opterećenje i proizvodnja iz obnovljivih izvora (generatora), su neizvesne (ne znaju se njihove tačne vrednosti) iz mnogo razloga. Zbog svega prethodno navedenog planiranje otpornih distributivnih mreža je izuzetno kompleksan problem. Za rešavanje tako kompleksnog problema su poslednjih godina predloženi razni pristupi [4]-[11]. Među njima se nalazi nekoliko pristupa koji jednovremeno razmatraju napred naveden strategije za unapređenje otpornosti mreže [8]-[11]. U [8] je predložen dvo-etapni pristup zasnovan na konceptu robusne optimizacije za dobijanje najboljeg plana otporne distributivne mreže. Ovaj pristup razmatra ojačavanje linija i alokaciju rezervnih generatora (npr. dizel generatora) u cilju smanjenja vremena restauracije. Međutim, ojačavanje stubova nije razmatrano dok je ojačavanje linija razmatrano ali bez uvažavanja (modelovanja) njihove lomljivosti (krhkosti). Takođe nije razmatrana ni mogućnost sprečavanja (ograničavanja) propagacije kvara u mreži primenom odgovarajućih zaštitnih uređaja (reklozera). U [9] je najbolji plan otporne mreže dobijen primenom heurističkog dekompozicionog algoritma zasnovanog na analizi scenarija uz uvažavanje ojačavanja linija, alokacije rezervnih generatora i alokacije sekcionalizera (sklopka rastavljača) u mreži. I ovaj pristup ne uvažava ojačavanje stubova u mreži kao ni mogućnost sprečavanja (ograničavanje) propagacije kvara u mreži. U [10] i [11] je problem otpornih mreža modelovan kao dvo-etapni stohastički mešovito-celobrojni problem. Ovi pristupi razmatraju ojačavanje stubova, instaliranje rezervnih generatora i alokaciju sekcionalizera u mreži. Međutim, oni ne uvažavaju ojačavanje linija niti razmatraju mogućnost ograničavanja propagacije kvara u mreži. Svi napred navedeni pristupi ne uvažavaju neizvesnost krhkosti (lomljivosti) komponenti mreže, neizvesnost maksimalne brzine vetra, neizvesnost trajanja oluje i frekvencije njenog pojavljivanja. Oni takođe ne uvažavaju mogućnost kreiranja ostrva korišćenjem obnovljivih izvora (npr. vetrogeneratora) uz uvažavanje neizvesnosti njihove proizvodnje. Pored toga, predloženi modeli koriste probabilistički bazirane pristupe za opis neizvesnosti nekih ulaznih parametara, što zahteva obimna izračunavanja, i ne razmatraju zavisnosti koje postoje među neizvesnim parametrima, što može da vodi do konzervativnih (suviše skupih) rešenja [12,13,14]. Konačno, predloženi pristupi primenjuju kocept robusne optimizacije za dobijanje najboljeg plana otporne mreže, što takođe može da vodi do krajnje konzervativnih rešenja [15].

U ovom radu je korišćen koncept intervalnih brojeva za opisivanje neizvesnosti sledećih ulaznih parametara: maksimalne brzine vetra, trajanja oluje i njene učestanost pojavljivanja, lomljivosti (krhkosti) komponenti u mreži (provodnika i stubova), dužini trajanja popravki, prognoziranom opterećenju i proizvodnji iz obnovljivih izvora (generatora). U skladu sa ovim konceptom su vrednosti neizvesnih parametara prevedene u intervalne brojeve. Neizvesni parametri su analizirani za moguće vrednosti iz njihovih intervala, uvažavajući zavisnosti koje postoje među njima, kroz primenu intervalne RDM aritmetike. Predložen je model mešovitog celobrojnog lineranog programiranja (MILP), baziran na intervalnoj RDM aritmetici, za određivanje optimalnog plana otporne mreže za razmatrano stanje prirode, odnosno za jednu kombinaciju mogućih vrednosti razmatranih intervalnih ulaznih parametara. U cilju smanjenja računarske kompleksnosti predloženog MILP modela, predložen je hibridni algoritam simuliranog kaljenja i MILP kojim se originalni problem dekomponuje u niz MILP podproblema manje kompleksnosti koji se mogu efikasno rešiti. Prema tome, predloženi pristup omogućuje dobijanje velikog broja različitih planova otporne mreže. Svakim planom se definiše ojačavanje stubova i linija u cilju smanjenja verovatnoće pojave kvara elemenata mreže, definiše se broj i lokacija reklozera u mreži u cilju smanjenja izvesnosti propagacije kvara i definiše se scenario kreiranja ostrva kojim se omogućuje privremeno napajanje potrošača dok se ne završe popravke u mreži. Scenario kreiranja ostrva se određuje kroz definisanje broja i lokacije rasklopnih uređaja (sekcionalizera i reklozera) koji će se ugraditi u mreži i kroz broj, veličinu (snagu) i lokaciju ugradnje rezervnih generatora (npr. dizel generatora) koji će omogućiti, zajedno sa obnovljivim izvorima (generatorima), kreiranje ostrva nako završetka oluje. U nekim od dobijenih planova otporne mreže se, zbog neizvesnosti proizvodnje i potrošnje, mogu pojaviti narušavanja nekih operativnih ograničenja (naponskih i/ili termičkih ograničenja) u nekim ostrvima. Ove moguće posledice se procenjuju za svako stanje prirode i za svako kreirano ostrvo u svakom od dobijenih planova otporne mreže. Nakon toga se svi dobijeni planovi ocenjuju i najbolji od njih se bira korišćenjem kriterijuma minimalnog rizika (Minimax kriterijum) [16].

2. FORMULACIJA PROBLEMA

U toku ekstremnih oluja se najviše kvarova na nadzemnim vodovima javlja zbog toga što vetrovi velikog inteziteta direktno ili indirektno prouzrokuju kvarove na nadzemnim provodnicima (linijama) i stubovima. Lom jednoga stuba ili provodnika će dovesti do isključenja celokupnog voda ukoliko ne postoje zaštitni uređaji na vodu (reklozera) između elementa u kvaru i početka voda. Zbog toga se lomljivost (krhkost) jednog voda modeluje kao redna veza uzimajući u obzir lomljivost (krhkost), odnosno verovatnoću kvara/loma nekog elementa (stuba, provodnika) pri nekoj brzini vetra, svakog stuba i grane (provodnika) koji pripadaju vodu [17]. Verovatnoća kvara nekoga stuba ili grane (provodnika) je modelovana kao funkcija brzine vetra koristeći koncept krivih lomljivosti (krhkosti) uz uvažavanje njihove neizvesnosti, kao što je opisano u poglavlju 3.

Podrazumevano je da se popravka oštećenih komponenti ne vrši dok oluja traje, što je zbog bezbednosti ljudi

uobičajena praksa u distributivnim kompanijama [18]. Zbog toga se u planiranju otpornih distributivnih mreža uzima u obzir trajanje oluje, odnosno trajanje perioda bez popravki. Trajanje perioda bez popravki zavisi od maksimalne brzine vetra, trajanja oluje i varijacija brzine vetra tokom trajanja oluje, kao što je opisano u poglavlju 3. Međutim, profil brzine vetra (maksimalna vrednost, trajanje i varijacije tokom vremena) koji se može pojaviti u budućnosti (15-30 godina u budućnosti) se ne može precizno prognozirati zbog mnogo razloga [19, 20, 21]. Shodno tome, ni dužina trajanja period bez popravki kao ni dužina trajanja popravki pojedinih komponenti, koja takođe zavisi od maksimalne brzine vetra [22], se ne može precizno prognozirati. Takođe, zbog istih razloga, godišnja frekvencija pojavljivanja oluje se ne može precizno prognozirati [22]. Ovdje treba naglasiti da postoji zavisnost (korelacija) između napred navedenih neizvesnih veličina (parametara). Odnosno, postoji zavisnost (korelacija) između maksimalne brzine vetra, trajanja oluje, godišnje frekvencije pojavljivanja oluje i trajanja popravki komponenti mreže [20, 22]. Ove zavisnosti (korelacije) se trebaju uvažiti u planiranju otpornih distributivnih mreža bez obzira na korišćeni pristup (npr. probabilistički ili pristup zasnovan na intervalnoj aritmetici) da bi se obezbedilo da dobijeni rezultati ne budu isuviše konzervativni. Takođe, promenljivi operativni uslovi (vlažnost, zagađenje i sl.), nekompletna merenja kao i nepredvidive klimatske i ekonomske promene u toku perioda planiranja dovode do neizvesnosti u prognozi buduće potrošnje i proizvodnje iz obnovljivih izvora [23, 24]. Modelovanje napred navedenih neizvesnosti ulaznih parametara, koji predstavljaju osnovne ulazne podatke kod planiranja otpornih distributivnih mreža, i zavisnosti (korelacije) koje postoje između njih je prikazano u poglavlju 3.

U prisustvu neizvesnosti ulaznih parametara, cilj planiranja otpornih distributivnih mreža se može definisati na sledeći način: odrediti plan otporne distributivne mreže koji minimizira finansijski rizik kod ekstremnih oluja, odnosno koji minimizira rizik od pojave velikih (značajnih) troškova (investicionih i operativnih troškova, troškova popravki i troškova prekida napajanja korisnika sistema) kod ekstremnih oluja u razmatranom periodu planiranja. Ojačavanje provodnika i stubova, alokacija zaštitnih uređaja (reklozera) i kreiranje ostrva (mikro-mreža) korišćenjem neobnovljivih i obnovljivih izvora (generatora) se razmatraju u ovome radu kao strategije za unapređenje otpornosti distributivnih mreža. Ove strategije su međusobno povezane i razmatraju se jednovremeno u okviru procedure za planiranje otpornih distributivnih mreža zasnovane na upravljanju rizikom koja je predložena u ovome radu i prikazana u poglavlju 4.

3. MODELOVANJE NEIZVESNOSTI

U cilju kvantifikacije uticaja neizvesnosti ulaznih parametara, koja se najčešće javlja zbog nekompletnih i nepreciznih informacija o budućnosti, na planiranje otpornih distributivnih mreža korišćen je koncept intervalne analize. Pokazano je da je intervalna analiza računarski manje kompleksa u odnosu na probabilističke pristupe kao i da je efikasnija u kvantifikaciji ponašanja sistema i da obezbeđuje kvalitetan uvid i razumevanje problema u prisustvu nekompletnih i nepreciznih informacija [12, 25, 26].

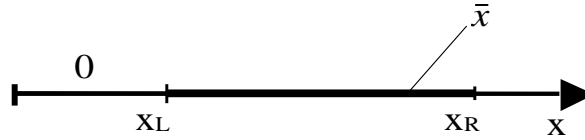
Aritmetičke operacije nad intervalnim brojevima, definisane pravilima standardne intervalne aritmetike, daju interval kao rezultat. Ovaj interval ima tendenciju da bude previše širok i zbog toga može dovesti do neprihvatljivih ili čak pogrešnih rešenja u slučajevima kompleksnih izraza, a posebno u slučajevima kada su neke od veličina međusobno zavisne [12, 13, 14]. Ovo je slučaj i u planiranju otpornih distributivnih mreža gde postoji zavisnost (korelacija) među neizvesnim ulaznim veličinama (parametrima) [20]. Takođe, u cilju definisanja najboljeg plana otporne distributivne mreže donosilac odluke je zainteresovan da dobije i oceni sve planove koji se mogu kreirati u mreži kada se znaju intervalne a ne precizne vrednosti ulaznih parametara. Ovi planovi se dobijaju kada se razmatraju ne samo gornje i donje granice intervala ulaznih parametara već kada se razmatraju sve validne kombinacije njihovih intervalnih vrednosti. Treba imati na umu da u slučaju postojanja zavisnosti (korelacije) između intervalnih parametara neće kombinacije svih vrednosti iz intervala biti validne već samo one kombinacije koje su definisane odgovarajućom relacijom zavisnosti, kao što je prikazano u poglavlju 3.1. U cilju prevazilaženja napred navedenih nedostataka klasične intervalne aritmetike, u ovome radu je korišćena intervalna RDM (Relative Distance Measure) aritmetika [13].

3.1 Elementi intervalne RDM aritmetike

Neizvesni parametri (veličine) su u ovome radu opisani intervalnim brojevima. Na slici 1 je veličina x , čija vrednost nije precizno definisana (poznata), prikazana kao intervalni broj \bar{x} . Ovaj intervalni broj je definisan njegovom levom graničnom vrednošću (donja granična vrednost) x_L i desnom graničnom vrednošću (gornja granična vrednost) x_R , $\bar{x}=[x_L, x_R]$. U terminima intervalne RDM aritmetike sledeći model predstavlja sve moguće vrednosti razmatrane veličine koje se mogu pojaviti u sistemu:

$$X^{PS} : x^{PS} = x_L + \alpha_x \cdot (x_R - x_L), \quad \alpha_x \in [0,1] \quad (1)$$

gde skup X^{PS} sadrži sve moguće vrednosti veličine x^{PS} . Parametar RDM aritmetike α_x definiše relativnu poziciju



SLIKA 1. INTERVALNI OPIS VELIČINE X

izabrane vrednosti parametra x u intervalu $[x_L, x_R]$. Sve moguće vrednosti (z^{ps}) bilo koje aritmetičke operacije (*) nad intervalnim brojevima su definisane na sledeći način:

$$Z^{ps} : z^{ps} = x^{ps}(\alpha_x) * y^{ps}(\alpha_y), \quad \alpha_x, \alpha_y \in [0,1] \quad (2)$$

Razmotrimo oduzimanje sledećih intervalnih brojeva $\bar{x}=[x_L, x_R]=[2,5]$ i $\bar{y}=[y_L, y_R]=[1,3]$. U terminima RDM aritmetike ova operacija je opisana sledećim izrazima:

$$Z^{ps} : z^{ps} = x^{ps}(\alpha_x) - y^{ps}(\alpha_y), \quad \alpha_x, \alpha_y \in [0,1] \quad (3)$$

$$x^{ps}(\alpha_x) = 2 + 3 \cdot \alpha_x, \quad y^{ps}(\alpha_y) = 1 + 2 \cdot \alpha_y \quad (4)$$

$$z^{ps} = (2 + 3 \cdot \alpha_x) - (1 + 2 \cdot \alpha_y) = 1 + 3 \cdot \alpha_x - 2 \cdot \alpha_y \quad (5)$$

Prema tome, variranjem vrednosti za α_x i α_y u opsegu $[0,1]$ sve moguće vrednosti z^{ps} će biti generisane, odnosno sva moguća stanja sistema definisana relacijom $\bar{z}=\bar{x} - \bar{y}$ će biti generisana.

Raspon $s(Z^{ps})$, odnosno leva granična vrednost i desna granična vrednost neke aritmetičke operacije (*) nad intervalnim brojevima se definiše na sledeći način [13]:

$$s(Z^{ps}) = [z_L, z_R] = \left[\min_{\alpha_x, \alpha_y \in [0,1]} z^{ps}(\alpha_x, \alpha_y), \max_{\alpha_x, \alpha_y \in [0,1]} z^{ps}(\alpha_x, \alpha_y) \right] = \left[\min_{\alpha_x, \alpha_y \in [0,1]} (x^{ps}(\alpha_x) * y^{ps}(\alpha_y)), \max_{\alpha_x, \alpha_y \in [0,1]} (x^{ps}(\alpha_x) * y^{ps}(\alpha_y)) \right] \quad (6)$$

Razmotrimo sada jedan kompleksniji izraz sa intervalnim brojevima:

$$\bar{z} = \bar{x}_1^2 + \bar{x}_2^2 - \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2, \quad \bar{x}_1 = [1,2], \quad \bar{x}_2 = [3,4] \quad (7)$$

Korišćenjem klasične intervalne aritmetike se dobija sledeći rezultat: $\bar{z}=[2,17]$. primenjujući pravila intervalne RDM aritmetike i relacije (6) dobija se sledeći rezultat (raspon): $\bar{z}=[6.75,13]$. Ovaj rezultat predstavlja tačan opseg (rezultat) izraza (7).

Prethodni rezultat pokazuje da intervalna RDM aritmetika prevazilazi problem preširokih intervala koji se dobijaju primenom klasične intervalne aritmetike. Takođe, intervalna RDM aritmetika omogućuje tačnu realizaciju aritmetičkih operacija za sve tipove zavisnosti koji mogu da postoje među intervalnim brojevima (parametrima). Zavisnost između intervala je definisana kao bilo koje ograničenje u uparivanju vrednosti intervalnih brojeva. Razmotrimo dva intervala $\bar{x} = x_L + \alpha_x \cdot (x_R - x_L)$ i $\bar{y} = y_L + \alpha_y \cdot (y_R - y_L)$. Relacija zavisnosti intervala D je definisana kao podskup od $U=[0,1] \times [0,1] = \{(\alpha_x, \alpha_y) : \alpha_x \in [0,1], \alpha_y \in [0,1]\}$ takav da postoji u relaciji bar jedan par (α_x, α_y) za svaku vrednost α_x i α_y [27]. Ako je relacija zavisnosti sve od U, ona se zove relacija zavisnosti svih parova. To je najveća moguća zavisnost i može se reći da su intervali za koje važi ova relacija nezavisni. Ako postoji samo jedan par (α_x, α_y) za svaku vrednost $\alpha_x \in [0,1]$ i samo jedan par (α_x, α_y) za svako $\alpha_y \in [0,1]$, onda se takva relacija zove relacija jednog para. Postoje dva slučaja relacije jednog para koji su od posebnog interesa. Prvi slučaj je perfektna pozitivna relacija:

$$I = \{(\alpha_x, \alpha_y) : \alpha_x = \alpha_y, \alpha_x \in [0,1], \alpha_y \in [0,1]\} \quad (8)$$

U ovom slučaju za pozitivan rast u jednom intervalnom parametru postoji pozitivan rast u drugom intervalnom parametru, odnosno male vrednosti iz jednog intervala su perfektno uparene sa malim vrednostima iz drugog intervala a takođe su i velike vrednosti dvaju intervala perfektno uparene. Drugi važan slučaj je slučaj perfektno negativne relacije:

$$O = \{(\alpha_x, \alpha_y) : 1 - \alpha_x = \alpha_y, \alpha_x \in [0,1], \alpha_y \in [0,1]\} \quad (9)$$

U ovom slučaju za pozitivan porast jedne intervalne veličine se javlja smanjenje druge intervalne veličine.

Kompletan model korelacije je bilo koje mapiranje R iz $[-1, +1]$ na D takvo da važi $R(-1)=O$, $R(0)=U$, i $R(1)=I$ [27]. Jedno ovakvo mapiranje, koje se koristi u ovom radu, je opisano jednačinom (10) [27].

$$D(r) = \{(\alpha_x, \alpha_y) : \max(0, -\alpha_x - r, \alpha_x - 1 + r) \leq \alpha_y \leq \min(1, \alpha_x + 1 - r, -\alpha_x + 2 + r), \alpha_x \in [0,1], \alpha_y \in [0,1]\} \quad (10)$$

Relacija (10) definiše da postoji relacija zavisnosti za svaku vrednost koeficijenta korelacije r koja pripada intervalu $[-1, +1]$. Vrednosti koeficijenta korelacije r koje postoji između neizvesnih ulaznih parametar (veličina)

koje su razmatrane u ovome radu se mogu odrediti na osnovu inženjerskih procena, empirijskih dokaza i statističke analize postojećih podataka [20, 28, 29].

Razmotrimo sada primer u kome koeficijenti korelacije između dve intervalne veličine \bar{x} i \bar{y} mogu imati sledeće vrednosti: $r=1$, $r=-1$, $r=0.5$, $r=0.7$, i $r=0$. Podrazumeva se da α_x and α_y uzimaju sledeće vrednosti: $\alpha_x, \alpha_y \in \{0, 0.1, 0.2, 0.3, \dots, 1\}$. Primenjujući izraz (10) dobija se sledeće: za $r=1$ (perfektna pozitivna relacija) i $r=-1$ (perfektna negativna relacija) broj validnih kombinacija razmatranih intervalnih veličina će biti 11, za $r=0.7$ broj validnih kombinacija će biti 65, za $r=0.5$ ovaj broj je 91 i za $r=0$ broj validnih kombinacija je 121. Prema tome, nivo zavisnosti među intervalnim veličinama ima veliki uticaj na broj validnih kombinacija intervalnih veličina i samim tim i na računarsku kompleksnost (broj proračuna) intervalne analize.

3.2 Modelovanje neizvesnosti korišćenjem intervalne RDM aritmetike

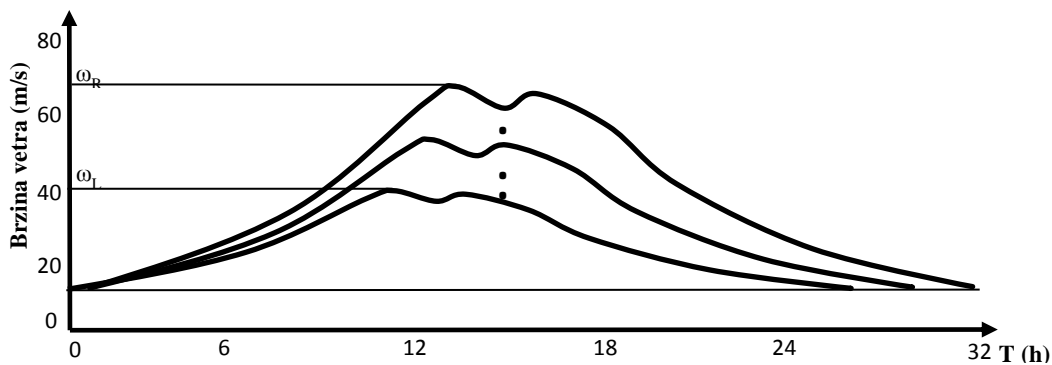
3.2.1 Neizvesnost maksimalne brzine vetra, trajanja oluje i frekvencije pojavljivanja oluje. Na slici 2 je prikazana varijacija brzine vetra na površini u različitim vremeskim intervalima u toku prolaska oluje preko područja koje pokriva distributivni sistem [30]. Svaka kriva na slici 2 predstavlja vremenski profil brzine vetra za jednu maksimalnu brzinu vetra koja se može pojaviti u razmatranom distributivnom sistemu [20]. Pošto su područja koja pokriva jedna distributivna mreža uobičajeno mnogo manja u poređenju sa područjima koja su pogođena olujom, može se pretpostaviti da su sve komponente (provodnici i stubovi) jedne distributivne mreže pogođene istim vremenskim profilom brzine vetra [11, 30]. Na osnovu slike 2 i diskusije u poglavlju 3.1, maksimalna brzina vetra se može opisati intervalnim brojem $\bar{\omega} = [\omega_L, \omega_R]$. U terminima RDM aritmetike neizvesnost maksimalne brzine vetra se opisuje na sledeći način:

$$\bar{\omega} = \omega_L + \alpha_{\omega} \cdot (\omega_R - \omega_L), \alpha_{\omega} \in [0, 1] \quad (11)$$

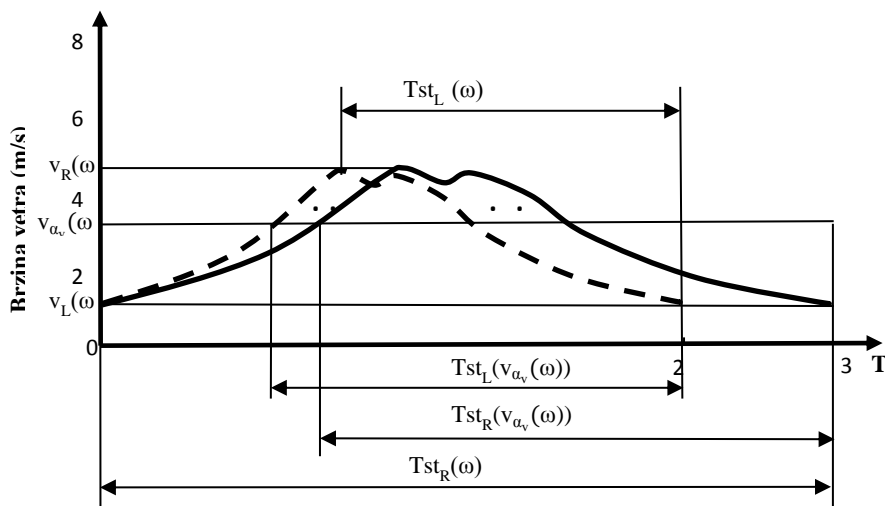
Takođe, dužina trajanja oluje za neku maksimalnu brzinu vetra se ne može prognozirati precizno [20]. Prema tome, za neku maksimalnu brzinu vetra će se razmatrati više od jednog profila brzine vetra, kao što je prikazano na slici 3, da bi se uzela u obzir neizvesnost dužine trajanja oluje. Varijacije u promeni intenziteta brzine vetra tokom trajanja oluje, kao što se vidi na slici 3, za maksimalnu brzinu vetra ω se mogu opisati u terminima intervalne RDM aritmetike na sledeći način:

$$\bar{v}(\omega) = v_L(\omega) + \alpha_v \cdot (v_R(\omega) - v_L(\omega)), \alpha_v \in [0, 1] \quad (12)$$

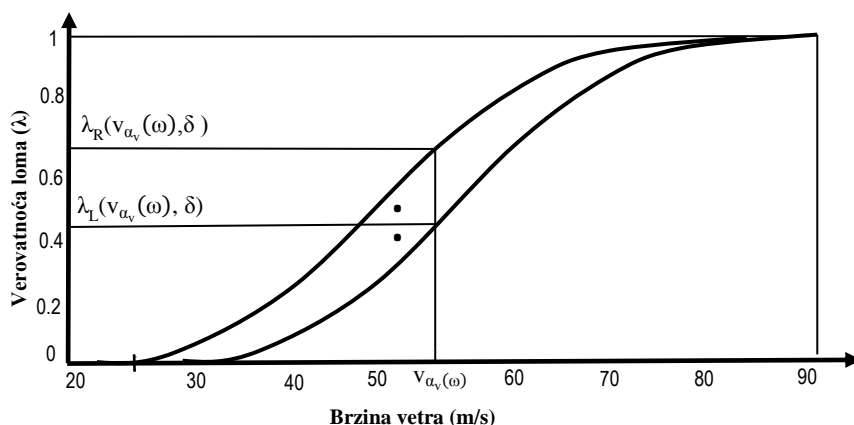
Prema tome, za svaku maksimalnu brzinu vetra ω sve moguće brzine vetra iz intervala $[v_L(\omega), v_R(\omega)]$ će se razmatrati. Odnosno, za svaku vrednost α_{ω} kompletan skup vrednosti α_v , npr. $\alpha_v \in \{0, 0.1, 0.2, \dots, 0.9, 1\}$, se razmatra.



SLIKA 2. INTERVALNI OPIS NEIZVESNOSTI MAKSIMALNE BRZINE VETRA



SLIKA 3. INTERVALNI OPIS NEIZVESNOSTI TRAJANJA OLUJE I TRAJANJA PERIODA BEZ POPRAVKI



SLIKA 4. INTERVALNI OPIS NEIZVESNOSTI LOMLJIVOSTI (KRHKOSTI) PROVODNIKA (LINIJA) I STUBOVA

Razmotimo brzinu vetra $v_{\alpha_v}(\omega)$, prikazanu na slici 3. Za komponentu mreže koja se polomi pri ovoj brzini popravka neće početi sve dok se oluja ne završi, kao što je rečeno u poglavlju 2. To znači da će trajanje perioda bez popravke u ovom slučaju, kao što se vidi na slici 3, trajati između $Tst_L(v_{\alpha_v}(\omega))$ i $Tst_R(v_{\alpha_v}(\omega))$. Saglasno tome, neizvesnost trajanja perioda bez popravke pri brzini vetra $v_{\alpha_v}(\omega)$ se opisuje intervalnim brojem $\bar{T}st(v_{\alpha_v}(\omega)) = [Tst_L(v_{\alpha_v}(\omega)), Tst_R(v_{\alpha_v}(\omega))]$. U terminima RDM aritmetike ova neizvesnost se opisuje kao:

$$\bar{T}st(v_{\alpha_v}(\omega)) = Tst_L(v_{\alpha_v}(\omega)) + \alpha_{Tst} \cdot (Tst_R(v_{\alpha_v}(\omega)) - Tst_L(v_{\alpha_v}(\omega))), \alpha_{Tst} \in [0, 1] \quad (13)$$

Generalno, neizvesnost trajanja perioda bez popravki za maksimalnu brzinu vetra ω se može opisati intervalnim brojem $\bar{T}st(\omega) = [Tst_L(\omega), Tst_R(\omega)]$, gde je $Tst_L(\omega)$ minimalno a $Tst_R(\omega)$ maksimalno trajanje perioda bez popravki za razmatranu maksimalnu brzinu vetra, kao što je i prikazano na slici 3. Treba primetiti da je interval $[Tst_L(v_{\alpha_v}(\omega)), Tst_R(v_{\alpha_v}(\omega))]$ uži od intervala $[Tst_L(\omega), Tst_R(\omega)]$, što se vidi na slici 3. To znači da se za brzinu vetra $v_{\alpha_v}(\omega)$ neće razmatrati sve vrednosti iz intervala $[Tst_L(\omega), Tst_R(\omega)]$ već samo vrednosti iz intervala $[Tst_L(v_{\alpha_v}(\omega)), Tst_R(v_{\alpha_v}(\omega))]$. Treba takođe primetiti da se za svaku brzinu vetra $v_{\alpha_v}(\omega)$, odnosno za svaku α_v -vrednost razmatra kompletan skup vrednosti α_{Tst} .

Godišnja frekvencija pojavljivanja oluje se takođe ne može precizno prognozovati [20]. Neizvesnost godišnje frekvencije pojavljivanja oluje se opisuje intervalnim brojem $\bar{\phi} = [\phi_L, \phi_R]$. U terminima RDM aritmetike ova neizvesnost se opisuje kao:

$$\bar{\phi} = \phi_L + \alpha_{\phi} \cdot (\phi_R - \phi_L), \alpha_{\phi} \in [0, 1] \quad (14)$$

Postoji korelacija (zavisnost) između intervalne vrednosti maksimalne brzine vetra i intervalne vrednosti godišnje frekvencije pojavljivanja oluje [20]. Koeficijent korelacije između ovih intervalnih veličina se može odrediti na osnovu statističke obrade postojećih podataka [20]. Koristeći dobijeni koeficijent korelacije i izraz (10) definiše se skup validnih kombinacija intervalnih vrednosti maksimalne brzine vetra i intervalnih vrednosti godišnje frekvencije pojavljivanja oluje. Ovaj skup se koristi u planiranju otpornih mreža na način opisan u poglavlju 4.

3.2.2 Neizvesnost trajanja popravke. Neizvesnost trajanja popravke [22, 30] komponente mreže tipa δ (provodnik ili stub) se opisuje intervalnim brojem $\bar{\text{Trp}}(\delta)=[\text{Trp}_L(\delta), \text{Trp}_R(\delta)]$. U terminima RDM aritmetike ova neizvesnost se opisuje na sledeći način:

$$\bar{\text{Trp}}(\delta)=\text{Trp}_L(\delta)+\alpha_{\text{Trp}(\delta)} \cdot (\text{Trp}_R(\delta) - \text{Trp}_L(\delta)), \alpha_{\text{Trp}(\delta)} \in [0,1] \quad (15)$$

Zbog nedostatka podataka sa terena, usvaja se da je neizvesnost trajanja popravke ista za sve tipove stubova kao i za sve tipove provodnika [18, 30]. Prema tome, δ predstavlja samo dva tipa komponenti: stubove i provodnike. Takođe, u ovome radu se usvaja da je intervalna dužina trajanja popravke perfektno korelisana sa intervalnim trajanjem popravke provodnika (linija) [22]. Shodno tome, u nastavku rada će se umesto izraza (15) koristiti sledeće označavanje: $\bar{\text{Trp}}(\delta)=\text{Trp}_L(\delta)+\alpha_{\text{Trp}} \cdot (\text{Trp}_R(\delta) - \text{Trp}_L(\delta)), \alpha_{\text{Trp}} \in [0,1]$ (15')

Korelacija koja postoji između intervalne vrednosti maksimalne brzine vetra i intervalne vrednosti trajanja popravki [22] se koristi u izrazu (10) za dobijanje skupa validnih kombinacija ovih intervalnih brojeva. Ovaj skup se koristi u planiraju otpornih mreža na način opisan u poglavlju 4.

3.2.3 Neizvesnost lomljivosti (krhkosti). Lomljivost provodnika i stubova mreže usled ekstremnih oluja je opisana korišćenjem koncepta krivih lomljivosti (krhkosti), koje definišu verovatnoću kvara komponente mreže (stuba, provodnika) u funkciji brzine vetra [30]. Zbog mnogo razloga (npr. nepredvidivost stanja tla, sadržaja vlage, prisustva termita, procesa starenja) krive lomljivosti postojećih komponenti, a posebno stubova, se ne mogu odrediti precizno u periodu planiranja (npr. 15-30 godina). Zbog toga se za neku komponentu, umesto jedne krive lomljivosti razmatra skup krivih lomljivosti, kao što je prikazano na slici 4. Na osnovu slike 4 se neizvesnost lomljivosti komponente (stuba, provodnika) δ pri brzini vetra $v_{\alpha_v}(\omega)$ može opisati intervalnim brojem $\bar{\lambda}(v_{\alpha_v}(\omega), \delta)=[\lambda_L(v_{\alpha_v}(\omega), \delta), \lambda_R(v_{\alpha_v}(\omega), \delta)]$. U terminima RDM aritmetike ovo se opisuje na sledeći način:

$$\bar{\lambda}(v_{\alpha_v}(\omega), \delta)=\lambda_L(v_{\alpha_v}(\omega), \delta)+\alpha_{\lambda(\delta)} \cdot (\lambda_R(v_{\alpha_v}(\omega), \delta) - \lambda_L(v_{\alpha_v}(\omega), \delta)), \alpha_{\lambda(\delta)} \in [0,1] \quad (16)$$

Ovde, δ predstavlja sve tipove stubova, postojeće i nove, kao i sve tipove postojećih i novih provodnika (linija). Treba primetiti da je za brzinu vetra $v_{\alpha_v}(\omega)$ neizvesnost lomljivosti (verovatnoće kvara) opisana intervalnim brojem $\bar{\lambda}(v_{\alpha_v}(\omega), \delta)=[\lambda_L(v_{\alpha_v}(\omega), \delta), \lambda_R(v_{\alpha_v}(\omega), \delta)]$, kao što se vidi na slici 4. Prema tome, za svaku vrednost $v_{\alpha_v}(\omega)$, odnosno za svaku vrednost α_v iz (12), kompletan skup vrednosti $\alpha_{\lambda(\delta)}$ ($\alpha_{\lambda(\delta)} \in \{0,0.1,0.2,\dots,0.9,1\}$) se razmatra.

Može se smatrati da se krive lomljivosti za nove komponente mreže znaju precizno. U tom slučaju za njih postoji samo jedna kriva lomljivosti. To dalje znači da postoji samo jedna vrednost lomljivosti (verovatnoće kvara) nove komponente za svaku intervalnu vrednost brzine vetra.

3.2.4 Neizvesnost potrošnje i proizvodnje. Neizvesnost opterećenja u čvoru (n) se opisuje intervalnim brojem $\bar{L}(n)=[L_L(n), L_R(n)]$ [25, 26]. U terminima RDM aritmetike ova neizvesnost se opisuje na sledeći način:

$$\bar{L}(n)=L_L(n)+\alpha_{L(n)} \cdot (L_R(n) - L_L(n)), \alpha_{L(n)} \in [0,1] \quad (17)$$

Koeficijent korelacije (r) između intervalnih opterećenja se može odrediti na način predložen u [28, 29]. Na sličan način se opisuje i neizvesnost proizvodnje iz obnovljivih izvora (generatora). Neizvesnost proizvodnje iz obnovljivog izvora u čvoru (n) se u terminima RDM aritmetike opisuje na sledeći način:

$$\bar{RG}(n)=RG_L(n)+\alpha_{RG(n)} \cdot (RG_R(n) - RG_L(n)), \alpha_{RG(n)} \in [0,1] \quad (18)$$

Koeficijent korelacije između intervalnih proizvodnji generatora takođe može biti određen na način predložen u [28, 29]. U ovome radu je podrazumevano da ne postoji korelacija između intervalnih opterećenja i intervalne proizvodnje u periodu ostrvskog rada.

Potrebno je ponovo naglasiti da sve napred navedene zavisnosti (korelacije) među neizvesnim ulaznim parametrima moraju biti uzete u obzir da bi se obezbedilo da rezultati dobijeni operacijama nad intervalnim brojevima ne budu previše konzervativni, odnosno da se ne dobiju previše skupa rešenja.

4. Procedura za planiranje otpornih mreža zasnova na riziku

4.1 Dobijanje skupa planova otporne mreže

U prisustvu neizvesnosti ulaznih parametara, opisane u poglavlju 3.2, više različitih planova otporne distributivne mreže se može kreirati. Ovi planovi se kreiraju primenjujući sledeće korake:

- 1) Odrediti skup validnih kombinacija α_ω -vrednosti i α_{Trp} -vrednosti koristeći relaciju zavisnosti (10) i dobijeni koeficijent korelacije za razmatrane intervalne veličine. Prema tome, za svaku vrednost α_ω se definiše skup vrednosti α_{Trp} .
- 2) Odrediti skup validnih kombinacija α_ω -vrednosti i α_ϕ -vrednosti koristeći relaciju zavisnosti (10) i dobijeni koeficijent korelacije za razmatrane intervalne veličine. U ovome radu se smatra da postoji perfektna negativna

korelacija [20] između intervalne maksimalne brzine vetra i intervalne godišnje frekvencije pojavljivanja oluje. Shodno tome, za svaku vrednost α_ω se definiše samo jedna vrednost α_ϕ .

- 3) Za svaku vrednost α_ω , kompletan skup vrednosti α_v , (npr. $\alpha_v \in [0, 0.1, 0.2, \dots, 1]$) se razmatra, kao što je prikazano u poglavlju 3.2. Za svaku vrednost α_v se razmatra kompletan skup $\alpha_{\lambda(\delta)}$ -vrednosti kao i kompletan skup α_{Tst} -vrednosti, kao što je definisano u poglavlju 3.2.
- 4) Odrediti skup validnih kombinacija $\alpha_{L(n)}$ -vrednosti za svaki par opterećenja u mreži korišćenjem relacije (10) i koeficijenta korelacije među njima. U ovom radu se smatra da postoji perfektna pozitivna korelacija između intervalnih opterećenja u svim čvorovima mreže. Prema tome, u izrazu (17) će se razmatrati samo jedan parametar α (α_L) za sva opterećenja u mreži, odnosno $\alpha_{L(n)}$ u (17) se može zameniti sa α_L .
- 5) Odrediti skup validnih kombinacija $\alpha_{RG(n)}$ -vrednosti za svaki par obnovljivih generatora u mreži korišćenjem relacije (10) i koeficijenta korelacije među njima. U ovom radu se smatra da postoji perfektna pozitivna korelacija između intervalne proizvodnje istog tipa (npr. vetrogeneratori) u svim čvorovima mreže.
- 6) Izabrati jednu vrednost α_ω , $\alpha_\omega \in [0, 1]$. Za izabranu vrednost α_ω definisati skup validnih kombinacija α -vrednosti za intervalne veličine razmatrane u koracima 1) i 2). Odnosno, za izabranu vrednost α_ω definisati skup validnih kombinacija α_{Ttp} -vrednosti i α_ϕ -vrednosti.
- 7) Izabrati jednu kombinaciju α -vrednosti iz skupova definisanih u koraku 6). Znači, za izabrano α_ω treba izabrati vrednost α_{Ttp} i vrednost α_ϕ . Odrediti tačnu vrednost razmatranih parametara za izabranu kombinaciju α -vrednosti koristeći njihovu formulaciju u terminima intervalne RDM aritmetike definisanu u poglavlju 3.2.
- 8) Izabrati jednu kombinaciju $\alpha_{L(n)}$ -vrednosti i $\alpha_{RG(n)}$ -vrednosti iz skupova definisanih u koracima 4) i 5). Odrediti tačnu vrednost opterećenja i proizvodnje za izabranu kombinaciju α -vrednosti koristeći njihovu formulaciju u terminima intervalne RDM aritmetike definisanu u poglavlju 3.2.
- 9) Za α_ω definisanu u koraku 6) izabrati jednu kombinaciju α_v , α_{Tst} i $\alpha_{\lambda(\delta)}$. Odrediti tačnu vrednost razmatranih parametara za izabranu kombinaciju α -vrednosti koristeći njihovu formulaciju u terminima intervalne RDM aritmetike.
- 10) Za tačne (crisp) vrednosti intervalnih parametara dobijene kroz korake 7) - 9) definisati najbolji plan otporne mreže. Ovaj plan se određuje korišćenjem MILP modela koji je detaljno prikazan u [31]. MILP model razmatra ojačavanje stubova i linija, alokaciju novih rasklonih uređaja (sekcionalizera i reklozera) i kreiranje ostrva u mreži koristeći ugrađene rasklopne uređaje, postojeće obnovljive izvore i novougrađene klasične generatore (dizel ili gasne generatore). Cilj je da se nađe optimalan balans između troškova prekida korisnika sistema, troškova popravki elemenata mreže i investicionih i operativnih troškova proširenja (ojačavanja) mreže za razmatrani skup tačnih vrednosti intervalnih (neizvesnih) ulaznih parametara. Troškovi koji se razmatraju u MILP modelu su detaljno opisani u [31].
- 11) Ponavljati korak 9) i 10) dok ne budu iscrpljene sve kombinacije α -vrednosti definisane u koraku 9)
- 12) Ponavljati korake 8)-11) dok ne budu iscrpljene sve kombinacije α -vrednosti definisane u koraku 8).
- 13) Ponavljati korake 7)-12) dok ne budu iscrpljene sve kombinacije α -vrednosti definisane u koraku 7).
- 14) Ponavljati korake 6)-13) dok sve α -vrednosti za intervalnu maksimalnu brzinu vetra, definisane u 6), ne budu iscrpljene.

Primenjujući korake 1)-14), dobija se N različitih planova otporne distributivne mreže. Treba primetiti da predložena procedura omogućava dobijanje (izračunavanje) planova korišćenjem koncepta paralelnog izračunavanja, čime se značajno smanjuje računarsku kompleksnost predloženog pristupa. Najbolji plan iz dobijenog skupa se dobija na način predložen u narednom poglavlju.

4.2 Izbor najboljeg plana otporne mreže

Najbolji plan otporne mreže se bira primenom kriterijuma minimalnog rizika (Minimax kriterijum). Ovaj kriterijum favorizuje odluke koje imaju mali gubitak u odnosu na odluke koje mogu imati značajan gubitak koji se može pojaviti sa jako malom verovatnoćom [16]. Na osnovu ovoga kriterijuma, najbolji plan otporne mreže ($d(RP_{opt})$) se određuje na sledeći način:

$$d(RP_{opt}) = \min_p [\max_\alpha (CRP_\alpha(p) - CRP_\alpha^{opt})], \quad p=1, \dots, N, \alpha \in M, \quad (19)$$

gde je N broj razmatranih planova, M je skup mogućih posledica (stanja prirode), $CRP_\alpha(p)$ je ukupan očekivani trošak za plan p i stanje prirode α i CRP_α^{opt} je minimalan ukupni očekivani trošak za stanje prirode α u svim razmatranim planovima. Stanje prirode odgovara jednoj mogućoj (validnoj) kombinaciji α -vrednosti razmatranih neizvesnih ulaznih parametara (kombinaciji definisanoj u koracima 7)-9) u poglavlju 4.1). Ukupan očekivani trošak plana otporne mreže ($CRP_\alpha(p)$) je opisan u [31]. Pošto su sve promenljive odluke (binarne promenljive), definisane u MILP modelu prikazanom u [31], poznate za jedan plan otporne mreže p , izračunavanje $CRP_\alpha(p)$ za bilo koje stanje prirode je jednostavno. Ono se vrši na taj način da se, za skup poznatih binarnih promenljivih, urade izračunavanja definisana MILP modelom. Treba naglasiti da se u jednom planu otporne mreže, zbog postojanja neizvesnosti potrošnje i proizvodnje, mogu pojaviti narušavanja operativnih ograničenja (naponskih i

termičkih) u kreiranim ostrvima za neka od stanja prirode. U takvim slučajevima će se primeniti odsecanje opterećenja u ostrvu a trošak prekida odsečenog opterećenja postaje deo ukupnog troška $CRP_a(p)$. U analizama rizika se termin $(CRP_a(p) - CRP_a^{opt})$ iz izraza (19) naziva žaljenje [16]. Prema tome, može se reći da napred definisani kriterijum minimizira žaljenje, odnosno on obezbeđuje da će žaljenje zbog izabrane odluke biti najmanje moguće bez obzira koja od mogućih budućnosti će da se desi.

LITERATURA

- [1] Jufria FH, Widiputrab V, Jungb J, 2019, “State-of-the-art review on power grid resilience to extreme weather events: Definitions, frameworks, quantitative assessment methodologies, and enhancement strategies.”, *Appl Energy*; 239, 1049–1065.
- [2] Tabatabaei NM, Ravadanegh SN, Bizon N, 2019, “Power systems resilience: modeling, analysis and practice.”, Springer Nature: Cham (Switzerland);
- [3] Wang Y, Chen C, Wang J, Baldick R, 2016, “Research on resilience of power systems under natural disasters - a review.”, *IEEE Trans Power Syst.*, 31, 1604–1613.
- [4] Wang Z, Wang J, 2015, “Self-healing resilient distribution systems based on sectionalization into microgrids.”, *IEEE Trans Power Syst.*, 30, 3139 – 3149.
- [5] Panteli M, Mancarella P, 2015, “Influence of extreme weather and climate change on the resilience of power systems: impacts and possible mitigation strategies.”, *Electr Power Syst Res.*, 127, 259–70.
- [6] Arab A, Khodaei A, Khator SK, Ding K, Emesih VA, Han Z, 2015, “Stochastic pre-hurricane restoration planning for electric power systems infrastructure.”, *IEEE Trans Smart Grid.*, 6, 1046 – 1054.
- [7] Gao H, Chen Y, Xu Y, Liu Ch, 2016, “Resilience-oriented critical load restoration using microgrids in distribution systems”, *IEEE Trans Smart Grid.*, 7, 2837 – 2848.
- [8] Yuan W, Wang J, Qiu F, Chen C, Kang C, Zeng B, 2016, “Robust optimization-based resilient distribution network planning against natural disasters”, *IEEE Trans Smart Grid.*, 7, 2817- 2826.
- [9] Yamangil E, Bent R, Backhaus S, 2015, “Resilient upgrade of electrical distribution grids”, In: *Proceedings of the Twenty-Ninth AAAI Conference on Artificial Intelligence*, Austin, Texas, 1233–40.
- [10] Ma S, Su L, Wang Z, Qiu F, Guo G, 2018, “Resilience enhancement of distribution grids against extreme weather events”, *IEEE Trans Power Syst.*, 33, 4842 –4853.
- [11] Ma S, Li S, Wang Z, Qiu F, 2019, “Resilience-oriented design of distribution systems”, *IEEE Trans Power Syst.*, 34, 2880 - 2891.
- [12] Vaccaro A, Canizares CA, Villacci D, 2010, “An affine arithmetic-based methodology for reliable power flow analysis in the presence of data uncertainty”, *IEEE Trans Power Syst.*, 25, 624-632.
- [13] Piegat A, Landowski M, 2017, “Is an interval the right result of arithmetic operations on intervals?”, *Int J Appl Math Comput Sci.*, 27, 575–590.
- [14] Zhang P, Li W, 2010, “Boundary Analysis of Distribution Reliability and Economic Assessment”, *IEEE Trans. Power Syst.*, 25, 714-721.
- [15] Bertsimas D, Sim M, 2004, “The price of robustness”, *Oper Res.*, 52, 35–53.
- [16] Anderson G, Entriken R, Nitu P, 1999, “Risk assessment and financial management”, New York: IEEE Press.
- [17] Ouyang M, Osorio LD, 2014, “Multi-dimensional hurricane resilience assessment of electric power systems”, *Struct Saf.*, 48, 15- 24.
- [18] Panteli M, Trakas DN, Mancarella P, Hatziaargyriou DN, 2017, “Power systems resilience assessment: hardening and smart operational enhancement strategies”, *Proc IEEE.*, 105, 1202 – 1213.
- [19] Bender AM, Knutson RT, Tuleya ER, Sirutis JJ, Vecchi AG, Garner TS, Held MI, 2010, “Modeled impact of anthropogenic warming on the frequency of intense atlantic hurricanes”, *Science.*, 327, 454 – 458.
- [20] Fu G, Wilkinson S, Dawson JR, Fowler JH, Kilsby Ch, Panteli M, Mancarella P, 2018, “Integrated approach to assess the resilience of future electricity infrastructure networks to climate hazards”, *IEEE Syst J.*, 12, 3169 –3180.
- [21] Brown R, 2009, “Cost-benefit analysis of the deployment of utility infrastructure upgrades and storm hardening programs”, *Quanta Technology*, Raleigh, NC,.
- [22] Alvehag K, Soder L, 2011, “A reliability model for distribution systems incorporating seasonal variations in severe weather”, *IEEE Trans Power Del.*, 26, 910 – 919.
- [23] Li Y, Zio E, 2012, “Uncertainty analysis of the adequacy assessment model of a distributed generation system”, *Renew Energy.*, 41, 235–244.
- [24] Popovic D, Popovic Z, 2004, “A risk management procedure for supply restoration in distribution networks”, *IEEE Trans Power Syst.*, 19, 221–229.
- [25] Pirmia M, Cañizares C, Bhattacharya K, Vaccaro A, 2014, “A Novel affine arithmetic method to solve optimal power flow problems with uncertainties”, *IEEE Trans Power Syst.*, 29, 2775–2783.

- [26] Marin M, Milano F, Defour D, 2017, "Midpoint-radius interval-based method to deal with uncertainty in power flow analysis", *Electr. Power Syst. Res.*, 147, 81–87.
- [27] Ferson S, Kreinovich V, 2006, "Modeling correlation and dependence among intervals", In: *Proceedings of the Second International Workshop on Reliable Engineering Computing*, Savannah, Georgia, 115-126.
- [28] Rankovic A, Maksimovic BM, Saric AT, Lukic U, 2015, "ANN-based correlation of measurements in micro-grid state estimation", *Int Trans Electr Energy Syst.*, 25, 2181-2202.
- [29] Torres PJF, Ekonomou L, Karampelas P, 2016, "The correlation between renewable generation and electricity demand: A case study of Portugal", In: Karampelas P, Ekonomou L, editors, *Electricity Distribution*, Berlin: Springer, 119-151.
- [30] Abdullahi MS, Li Y, Stewart MG, 2015, "Evaluating system reliability and targeted hardening strategies of power distribution systems subjected to hurricanes", *Reliab Eng Syst Safe.*, 144, 319–333.
- [31] Kovacki N., Popovic Z., 2020, "Planiranje razvoja distributivnih mreža otpornih na ekstremene vremenske nepogode: Matematički model i rezultati", *Zbornik radova sa dvanaestog savetovanja o elektrodistributivnim mrežama CIREC Srbija*, 24.-28. Septembar 2020, Kopaonik