

**PLANIRANJE RAZVOJA DISTRIBUTIVNIH MREŽA OTPORNIH NA EKSTREMNE VREMENSKE NEPOGODE: MATEMATIČKI MODEL I REZULTATI****RESILIENT DISTRIBUTION NETWORK PLANNING AGAINST THE SEVERE WEATHER CONDITIONS: MATHEMATICAL MODEL AND RESULTS**

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

**KRATAK SADRŽAJ**

U ovom radu je prikazan matematički model za planiranje razvoja distributivnih mreža otpornih na ekstremne vremenske nepogode (oluje). Predloženim matematičkim modelom određuje se skup nadzemnih vodova koje treba fizički pojačati, uvažavajući i mogućnost prelaska sa nadzemnih na kablovske vodove (mrežu), kako bi se smanjila verovatnoća njihovog ispada tokom ekstremnih oluja, broj i lokacija reklozera koje treba ugraditi u distributivnoj mreži, kako bi se smanjila mogućnost propagacije kvara, kao i broj i lokacija rastavljača i mobilnih generatora koje treba postaviti u distributivnoj mreži, a koji se koriste za kreiranje ostrva i privremeno napajanje potrošača nakon oluja. Kao kriterijumska funkcija postavljena je minimizacija troškova koji obuhvataju: investicione i operativne troškove ugrađenih/pojačanih elemenata i opreme, troškove prekida napajanja korisnika distributivne mreže zbog štete prouzrokovane olujama i troškove popravki elemenata distributivne mreže i restauracije napajanja nakon oluja. Predloženi matematički model je veoma kompleksan i za njegovo rešavanje je razvijen hibridni algoritam na bazi simuliranog kaljenja i mešovito-celobrojnog linearnog programiranja. Predloženi pristup je testiran na primeru IEEE test mreže koja sadrži 33 čvora, a dobijeni rezultati su prikazani i komentarisani u radu.

**Ključne reči:** Otprnost (žilavost), ojačavanje, restauracija napajanja, simulirano kaljenje, mešovito-celobrojno linearno programiranje,

**SUMMARY**

This paper presents mathematical model for resilient distribution network planning against the severe weather conditions (storms). The proposed mathematical model determines the set of overhead lines to be hardened, including transition from overhead to underground lines (network), in order to withstand the extreme weather conditions, the number and location of interrupting devices (reclosers) in order to decrease the probability of failure propagation as well as the number and location sectionalizing devices (disconnectors) and mobile generators to be installed in the network to enable creation of islands, which are created during the supply restoration process after the storms. The objective function is set to minimize the costs which encompass: costs of new/hardened elements and equipment, cost of non-supplied energy due to interruptions during the storms, and cost of repairs and supply restoration after the storms. The proposed mathematical model is computationally complex, and thus this paper proposes hybrid algorithm based on simulated annealing and mixed-integer linear programming to obtain the solution in the tractable time. The proposed approach is verified on IEEE 33-bus test system and the results are presented and discussed in the paper.

**Key words:** Resilience, hardening, supply restoration, simulated annealing, mixed-integer linear programming

Kontakt informacije o autorima – Neven Kovački, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, [kovackin@uns.ac.rs](mailto:kovackin@uns.ac.rs) ( [neven.kovacki@gmail.com](mailto:neven.kovacki@gmail.com) )

## 1. UVOD

Opšta procedura za planiranje razvoja distributivnih mreža otpornih na ekstremne vremenske nepogode (oluje) predložena je u [1]. Navedenom procedurom najpre se određuje skup različitih planova otporne distributivne mreže, a zatim se primenom kriterijuma minimalnog rizika među navedenim planovima određuje plan koji minimizuje rizik od pojave velikih (značajnih) troškova zbog štete prouzrokovane ekstremnim olujama. Pri tome svaki od navedenih planova otporne mreže obuhvata: 1) skup nadzemnih vodova, tj. skup nadzemnih stubova i grana koje je potrebno fizički pojačati, uključujući i mogućnost prelaska na kablovske vodove, kako bi se smanjila verovatnoća njihovog ispada tokom ekstremnih oluja, 2) broj i lokaciju reklozera koje je potrebno ugraditi u distributivnoj mreži kako bi se smanjila mogućnost propagacije kvara i 3) broj i lokaciju rastavljača i mobilnih (rezervnih) generatora koje je potrebno ugraditi u distributivnoj mreži, a koji se koriste za formiranje ostrva nakon oluja, čime se ubrzava proces restauracije napajanja.

U ovom radu je prikazan matematički model za planiranje otpornih distributivnih mreža čijim se rešavanjem određuju gore opisani planovi otporne mreže. U prikazanom matematičkom modelu je uvažena neizvesnost ulaznih veličina kao što su godišnja frekvencija pojavljivanja oluje i druge, tako što su one predstavljene intervalnim brojevima u terminima RDM aritmetike [1]. Prikazani matematički model sadrži veliki broj promenljivih i samim tim je veoma kompleksan za rešavanje, čak i u slučaju malih distributivnih mreža. Zbog toga, u nastavku ovog rada je prikazan hibridni algoritam za njegovo rešavanje na bazi simuliranog kaljenja i mešovito-celobrojnog linearnog programiranja. Na kraju, procedura za planiranje otpornih distributivnih mreža predložena u [1], kao i matematički model prikazan u ovom radu verifikovani su na primeru IEEE mreže koja sadrži 33 čvora, a dobijeni rezultati su prikazani i komentarisani.

## 2. OPTIMIZACIONI MODEL

### 2.1. Nomenklatura

$\phi_a$  – godišnja frekvencija pojavljivanja oluje,

$\lambda_a(v_{av}(\omega), a, b, f)$  – lomljivost (verovatnoća kvara) nadzemne grane  $a$  tipa  $b$  na izvodu  $f$  pri brzini vetra  $v_{av}(\omega)$ ,

$\lambda_a(v_{av}(\omega), n, h, f)$  – lomljivost nadzemnog stuba tipa  $h$  u čvoru  $n$  na izvodu  $f$  pri brzini vetra  $v_{av}(\omega)$ ,

$A(f)$  – skup grana ( $a$ ) na izvodu  $f$ ,

$AB(n, a, f)$  – skup grana koje pripadaju putanji koja povezuje čvor  $n$  i granu  $a$  na izvodu  $f$ ,

$ABS(n, f)$  – skup grana koje pripadaju putanji koja povezuje čvor  $n$  na izvodu  $f$  sa napojnom transformatorskom stanicom (sa koje se napaja dati izvod),

$AS(n, i, f)$  – skup grana koje pripadaju putanji koja povezuje čvorove  $n$  i  $i$  na izvodu  $f$ ,

$CINST(n, g, f)$  – troškovi instalacije mobilnog generatora  $g$  u čvoru  $n$  na izvodu  $f$ ,

$CG(g), COP(g)$  – redom nabavna cena i troškovi rada ( $\$/h$ ) mobilnog generatora  $g$ ,

$CTrpPl_h$  – koeficijent koji opisuje odnos troškova popravki i dužine trajanja popravki nadzemnog stuba tipa  $h$ ,

$CTrpLn_b$  – koeficijent koji opisuje odnos troškova popravki i dužine trajanja popravki nadzemne grane tipa  $b$ ,

$CS(a, f)$  – ukupna cena nabavke, ugradnje i održavanja rastavljača u grani  $a$  na izvodu  $f$ ,

$CR(a, f)$  – ukupna cena nabavke, ugradnje i održavanja reklozera u grani  $a$  na izvodu  $f$ ,

$CRN(n, f)$  – cena proizvedene električne energije za obnovljivi distribuirani generator priključen u čvoru  $n$  na izvodu  $f$  ( $\$/kWh$ ),

$C(n, f)$  – cena neisporučene električne energije za potrošač koji je priključen u čvoru  $n$  na izvodu  $f$  ( $\$/kWh$ ),

$ChardP(i, h, f)$  – cena fizičkog pojačanja, tj. zamene nadzemnog stuba u čvoru  $i$  na izvodu  $f$  novim stubom tipa  $h$ ; za postojeći tip stuba (u slučaju da nema fizičkog pojačanja) ova cena je 0 (nula),

$ChardL(a, b, f)$  – cena fizičkog pojačanja, tj. zamene nadzemne grane  $a$  na izvodu  $f$  novom granom tipa  $b$ ; za postojeći tip grane (u slučaju da nema fizičkog pojačanja) ova cena je 0 (nula),

$Chard(a, cable, f)$  – cena zamene postojeće nadzemne grane  $a$  na izvodu  $f$  kablovskom granom,

$Css(i, f)$  – troškovi zamene postojeće stubne transformatorske stanice na nadzemnom stubu u čvoru  $i$  na izvodu  $f$  montažno betonskom transformatorskom stanicom, uključujući troškove priključenja potrošača,

$F(n, f)$  – skup grana za koje je čvor  $n$  na izvodu  $f$  gornji (početni) čvor,

$HP(i, f)$  – skup tipova nadzemnih stubova koji se razmatraju kao mogućnosti za fizičko pojačanje stuba u čvoru  $i$  na izvodu  $f$ , uključujući postojeći tip stuba u čvoru  $i$ ,

$HL(a, f)$  – skup tipova nadzemnih grana koji se razmatraju kao mogućnosti za fizičko pojačanje grane  $a$  na izvodu  $f$ , uključujući postojeći tip grane  $a$ ,

$l_a$  – dužina grane  $a$ ,

$L_a(n, f)$  – potrošnja u čvoru  $n$  na izvodu  $f$  (kW),

$NF, NN(f)$  – redom skup izvoda u distributivnoj mreži i skup potrošačkih čvorova na izvodu  $f$ ,

$NFE(f)$  – skup krajeva izvoda  $f$ ,  
 $NRG(f)$  – skup čvorova na izvodu  $f$  u kojima su priključeni obnovljivi distribuirani generatori,  
 $NG$  – skup mobilnih generatora koji se koriste za kreiranje ostrva u distributivnoj mreži nakon oluja,  
 $NBS(n,f)$  – skup nadzemnih stubova preko kojih potrošač priključen u čvoru  $n$  na izvodu  $f$  dobija napajanje iz napojne transformatorske stanice,  
 $NP(f)$  – skup nadzemnih stubova na izvodu  $f$ ,  
 $NP^U(n,f)$  – skup nadzemnih stubova preko kojih se napaja čvora  $n$  na izvodu  $f$  pre pojave oluja,  
 $NP^D(n,f)$  – skup nadzemnih stubova koji se napajaju preko čvora  $n$  na izvodu  $f$  pre pojave oluja,  
 $NREC_{max}(f)$  – maksimalni dozvoljeni broj reklozera koji mogu biti postavljeni na red tako da se može obezbediti koordinacija relejne zaštite na izvodu  $f$ ,  
 $RG_\alpha(n,f)$  – proizvodnja obnovljivog distribuiranog generatora priključenog u čvoru  $n$  na izvodu  $f$  (kW),  
 $SS(n,i,f)$  – skup nadzemnih stubova koje pripadaju putanji koja povezuje čvorove  $n$  i  $i$  na izvodu  $f$ ,  
 $SFE(p,f)$  – skup nadzemnih stubova na izvodu  $f$  na kojima se može ugraditi reklozer, a koji se nalaze na putanji  $p$  koja povezuje početak izvoda i jedan od krajeva izvoda,  
 $T$  – period planiranja (na primer 20 godina),  
 $T(n,f)$  – skup grana za koje je čvor  $n$  na izvodu  $f$  donji (krajnji) čvor,  
 $Tst_\alpha$  – dužina trajanja oluje, tj. perioda bez popravki,  
 $Trp_\alpha$  – dužina trajanja popravki elemenata distributivne mreže nakon oluja,  
 $wload(n,f)$  – binarna promenljiva koja ima vrednost 1 ako je potrošač priključen u čvoru  $n$  na izvodu  $f$  napojen u ostrvskom režimu nakon oluja, u protivnom ima vrednost 0,  
 $wdg(n,g,f)$  – binarna promenljiva koja ima vrednost 1 ako je mobilni generator  $g$  instaliran u čvoru  $n$  na izvodu  $f$ , u protivnom ima vrednost 0,  
 $whp(i,h,f)$  – binarna promenljiva koja ima vrednost 1 ako je za fizičko pojačanje nadzemnog stuba u čvoru  $i$  na izvodu  $f$  odabran tip stuba  $h$ , u protivnom ima vrednost 0,  
 $whl(a,b,f)$  – binarna promenljiva koja ima vrednost 1 ako je za pojačanje nadzemne grane  $a$  na izvodu  $f$  odabran tip grane  $b$ , u protivnom ima vrednost 0,  
 $wh(a,cable,f)$  – binarna promenljiva koja ima vrednost 1 ako je grana  $a$  na izvodu  $f$  zamenjena kablovskom granom, u protivnom ima vrednost 0,  
 $wrec(a,f)$  – binarna promenljiva koja ima vrednost 0 ako je na nadzemnoj grani  $a$  na izvodu  $f$  ugrađen reklozer, u protivnom ima vrednost 1,  
 $w'(a,f)$ ,  $w(a,f)$  – binarne promenljive koje imaju vrednost 0 ako je na prvom, odnosno drugom kraju grane  $a$  na izvodu  $f$  ugrađen rastavljač, u protivnom imaju vrednost 1,  
 $wrdg(n,f)$  – binarna promenljiva koja ima vrednost 1 ako obnovljivi distribuirani generator priključen u čvoru  $n$  na izvodu  $f$  u ostrvskom režimu rada nakon oluja, u protivnom ima vrednost 0,  
 $x(a,f)$ ,  $x'(a,f)$  – jačina struje u grani  $a$  na izvodu  $f$  redom u direktnom (od gornjeg čvora ka donjem) i inverznom (od donjeg čvora ka gornjem) smeru.

## 2.2. Kriterijumska funkcija

$$\min CRP_\alpha = \sum_{t=1}^T \phi_\alpha \cdot \frac{\left[ CL_\alpha^{storm}(t) + CRG_\alpha^{storm}(t) + CL_\alpha^{sr}(t) + CRG_\alpha^{sr}(t) + CInstG_\alpha(t) + Crp_\alpha(t) \right]}{(1+d)^t} + \\
+ CInvSwGn_\alpha + CInvHard_\alpha \quad (1)$$

U izrazu (1) se pretpostavlja da su svi neinvesticioni troškovi isti za sve godine u razmatranom periodu planiranja  $T$ , tj. planiranje otpornih distributivnih mreža se analizira kao statički problem. U nastavku su opisane pojedine komponente iz izraza (1).

$$CL_\alpha^{storm}(t) = \sum_{f \in NF} \sum_{n \in NN(f)} C(n,f) \cdot L_\alpha(n,f) \cdot Tst_\alpha \cdot (1 - A(n,f)) \quad (2)$$

$$CRG_\alpha^{storm}(t) = \sum_{f \in NF} \sum_{n \in NRG(f)} CRN(n,f) \cdot RG_\alpha(n,f) \cdot Tst_\alpha \cdot (1 - A(n,f)) \quad (3)$$

Izrazi (2) i (3) predstavljaju redom troškove neisporučene električne energije usled prekida napajanja potrošača i troškove neproizvedene električne energije iz obnovljivih distribuiranih generatora u periodu trajanja oluje ( $Tst_\alpha$ ). Promenljive  $A_\alpha(n,f)$  predstavljaju verovatnoću da čvor  $n$  na izvodu  $f$  neće ostati bez napajanja zbog kvarova koji su prouzrokovani olujama i definisane su izrazima (22) u daljem tekstu.

$$CL_\alpha^{sr}(t) = \sum_{f \in NF} \left\{ \sum_{n \in NN(f)} C(n,f) \cdot L_\alpha(n,f) \cdot TrsL_\alpha(n,f) + \sum_{n \in NN(f)} C(n,f) \cdot L_\alpha(n,f) \cdot TrsIsL_\alpha(n,f) \right\} \quad (4)$$

$$CRG_{\alpha}^{sr}(t) = \sum_{f \in NF} \left\{ \sum_{n \in NRG(f)} CRN(n, f) \cdot RG_{\alpha}(n, f) \cdot TrsRN_{\alpha}(n, f) + \sum_{n \in NRG(f)} CRN(n, f) \cdot wrdg(n, f) \cdot RG_{\alpha}(n, f) \cdot TrsIslRN_{\alpha}(n, f) \right\} \quad (5)$$

Izrazi (4) i (5) predstavljaju redom troškove neisporučene električne energije i troškova neproizvedene električne energije iz obnovljivih distribuiranih generatora u periodu restauracije napajanja, tj. za vreme trajanja popravki elemenata distributivne mreže oštećenih tokom oluja.

Prvi sabirak u izrazu (4) predstavlja troškove neisporučene električne energije za potrošače kojima se restauracija napajanja obezbeđuje iz napojne transformatorske stanice. Ovim potrošačima se može restaurirati napajanje tek kada se izvrši popravka svih elemenata koji se nalaze na putanji između njih i napojne transformatorske stanice. U skladu sa tim, vreme potrebno za restauraciju napajanja  $TrsL_{\alpha}(n, f)$  određeno je izrazom (35) u daljem tekstu. Drugi sabirak u izrazu (4) predstavlja troškove neisporučene električne energije za potrošače kojima se restauracija napajanja obezbeđuje kreiranjem ostrva u distributivnoj mreži. Ovim potrošačima se može restaurirati napajanje tek kada se izvrši popravka svih elemenata u ostrvu kome pripadaju. Vreme potrebno za restauraciju napajanja u ovom slučaju  $TrsIslL_{\alpha}(n, f)$  određeno je izrazom (29).

Smisao prvog i drugog sabirka u izrazu (5) isti je kao u slučaju izraza (4), a vremena potrebna za restauraciju napajanja  $TrsRN_{\alpha}(n, f)$  i  $TrsIslRN_{\alpha}(n, f)$  određena su redom izrazima (36) i (30).

$$CInstG_{\alpha}(t) = \sum_{f \in NF} \left\{ \sum_{n \in NP(f)} \sum_{g \in NG} wdg(n, g, f) \cdot \{CINST(n, g, f) + TrsG_{\alpha}(n, f) \cdot COP(g)\} \right\} \quad (6)$$

Izraz (6) predstavlja troškove instalacije (prvi sabirak) i goriva (drugi sabirak) mobilnih generatora koji se koriste za kreiranje ostrva nakon oluja. U izrazu (6) je pretpostavljeno da se mobilni generatori priključeni u čvoru  $n$  koriste sve dok ne izvrši popravka svih elemenata koji se nalaze na putanji između čvora  $n$  i napojne transformatorske stanice. U skladu sa tim, vreme rada mobilnih generatora  $TrsG_{\alpha}(n, f)$  određeno je izrazom (37).

$$CTrp_{\alpha}(t) = CTrpPl_{\alpha}(t) + CTrpLn_{\alpha}(t) \quad (7)$$

$$CTrpPl_{\alpha}(t) = \sum_{f \in NF} \left\{ \sum_{i \in NP(f)} [1 - \prod_{a \in T(i, f)} wh(a, cable, f) \cdot \prod_{a \in F(i, f)} wh(a, cable, f)] \cdot \sum_{h \in HP(i, f)} CTrpPl_h \cdot Trp_{\alpha} \cdot \lambda_{\alpha}(v_{\alpha_v}(\omega), i, h, f) \cdot whp(i, h, f) \right\} \quad (8)$$

$$CTrpLn_{\alpha}(t) = \sum_{f \in NF} \left\{ \sum_{a \in A(f)} \sum_{b \in HL(a, f)} CTrpLn_b \cdot l_a \cdot Trp_{\alpha} \cdot \lambda_{\alpha}(v_{\alpha_v}(\omega), a, b, f) \cdot whl(a, b, f) \right\} \quad (9)$$

Izrazi (7) predstavlja troškove popravki elemenata distributivne mreže oštećenih tokom oluja, a koji obuhvataju troškove popravki nadzemnih stubova (izraz (8)) i grana (izraz (9)). Troškovi popravki elemenata distributivne mreže obuhvataju troškove opreme i ekipa koje sprovode radove i pretpostavlja se da su oni proporcionalni dužini trajanja popravki, što je uvaženo pomoću koeficijenata  $CTrpPl_h$  i  $CTrpLn_b$ .

Na ovom mestu treba naglasiti da su troškovi (2)-(9) isti za sve godine u razmatranom period planiranja. Oni čine ukupne troškove restauracije distributivne mreže nakon oluja.

$$CInvSwGn_{\alpha} = \sum_{f \in NF} \left\{ \sum_{a \in A(f)} (1 - wrec(a, f)) \cdot CR(a, f) + (1 - w(a, f)) \cdot wrec(a, f) \cdot CS(a, f) + (1 - w'(a, f)) \cdot CS(a, f) + \sum_{i \in NP(f)} \sum_{g \in NG(f)} wdg(i, g, f) \cdot CG(g) \right\}, \quad (10)$$

Izraz (10) obuhvata ukupne troškove ugradnje reklozera (prvi sabirak) i rastavljača (drugi i treći sabirak), kao i troškove nabavke mobilnih generatora (četvrti sabirak).

$$CInvHard_{\alpha} = \sum_{f \in NF} \left\{ \sum_{\substack{a \in A(f) \\ b \in HL(a, f)}} whl(a, b, f) \cdot ChardL(a, b, f) + wh(a, cable, f) \cdot Chard(a, cable, f) + \sum_{\substack{i \in NP(f) \\ h \in HP(i, f)}} whp(i, h, f) \cdot ChardP(i, h, f) + \sum_{i \in NP(f)} C_{ss}(i, f) \cdot \prod_{a \in T(i, f)} wh(a, cable, f) \cdot \prod_{a \in F(i, f)} wh(a, cable, f) \right\} \quad (11)$$

Izraz (11) predstavlja troškove fizičkog pojačanja nadzemnih vodova. Pri tome se prva dva sabirka odnose na troškove fizičkog pojačanja nadzemnih grana ( $a$ ) izborom jedne od unapred definisanih mogućnosti za pojačanje  $b \in HL(a, f)$  (prvi sabirak) ili prelaskom sa nadzemnih na kablovske grane (drugi sabirak). Treći sabirak u izrazu

(11) predstavlja troškove fizičkog pojačanja nadzemnih stubova (*i*) izborom jedne od unapred definisanih mogućnosti za pojačanje  $h \in \text{HP}(i,f)$ , dok četvrti sabirak predstavlja troškove zamene stubnih transformatorskih stanica montažno betonskim u slučaju prelaska sa nadzemnih vodova na kablovske.

### 2.3. Ograničenja vezana za kreiranje ostrva u distributivnoj mreži

$$\sum_{a \in \text{T}(n,f)} (x(a,f) - x'(a,f)) - \sum_{a \in \text{F}(n,f)} (x(a,f) - x'(a,f)) = \text{wload}(n,f) \cdot k_1 \cdot L_\alpha(n,f) - k_1 \cdot g(n,f) - k_1 \cdot \text{rg}(n,f) \quad (12)$$

$$n \in \text{NP}(f), \text{T}(n,f) \cap \text{F}(n,f) \in \text{A}(f), f \in \text{NF}, k_1 = 1/\sqrt{3} \cdot V_{\text{rated}}$$

Ograničenja (12) predstavljaju bilanse proizvodnje i potrošnje u čvorovima distributivne mreže (*n*) za date vrednosti potrošnje ( $L_\alpha(n,f)$ ), proizvodnje mobilnih generatora ( $g(n,f)$ ) i proizvodnje obnovljivih distribuiranih generatora ( $\text{rg}(n,f)$ ).

$$x(a,f) - \text{ww}(a,f) \cdot x_{\text{max}}(a,f) \leq 0, \quad x'(a,f) - \text{ww}(a,f) \cdot x_{\text{max}}(a,f) \leq 0 \quad (13)$$

$$\text{ww}(a,f) = \text{wrec}(a,f) \cdot w'(a,f) \cdot w(a,f), \quad a \in \text{A}(f) \quad (14)$$

$$g(n,f) - \sum_{g \in \text{NG}} \text{wdg}(n,g,f) \cdot \text{Dgmax}(g,f) \leq 0 \quad (15)$$

$$\sum_{g \in \text{NG}} \text{wdg}(n,g,f) \leq 1, \quad n \in \text{NP}(f) \quad (16)$$

$$\text{rg}(n,f) - \text{wrdg}(n,f) \cdot \text{RG}_\alpha(n,f) \leq 0, \quad n \in \text{NRG}(f) \quad (17)$$

Ograničenja (13) obezbeđuju da jačine struja u granama distributivne mreže ( $x(a,f)$ ,  $x'(a,f)$ ) ne prelaze maksimalne dozvoljene vrednosti ( $x_{\text{max}}(a,f)$ ). Ograničenja (14) određuju status (otvorena/zatvorena) grane *a* na izvodu *f* na osnovu statusa reklozera i rastavljača koji su na njoj ugrađeni. U ovom radu se pretpostavlja da se svi ugrađeni reklozera i rastavljači koriste, tj. da se otvaraju tokom kreiranja ostrva. Ograničenja (15) obezbeđuju da proizvodnja mobilnih generatora ( $g(n,f)$ ) ne prelazi maksimalnu dozvoljenu snagu ( $\text{Dgmax}(g,f)$ ). Ograničenja (16) obezbeđuju da u svakom čvoru distributivne mreže (*n*) može biti priključen samo jedan mobilni generator (*g*). Ograničenja (17) obezbeđuju da proizvodnja obnovljivih distribuiranih generatora ( $\text{rg}(n,f)$ ) ne prelazi maksimalno dozvoljenu proizvodnju ( $\text{RG}_\alpha(n,f)$ ). Takođe, ograničenja (17) daju indicaciju ( $\text{wrdg}(n,f)$ ) da li se obnovljivi distribuirani generator priključen u čvoru *n* koristi u osrtvskom radu.

$$V_{l,f} \geq V_{m,f} + Z_{a,f} \cdot (x(a,f) - x'(a,f)) - (1 - \text{ww}(a,f)) \cdot V^{\text{min}} \quad (18)$$

$$V_{l,f} \leq V_{m,f} + Z_{a,f} \cdot (x(a,f) - x'(a,f)) + (1 - \text{ww}(a,f)) \cdot V^{\text{min}} \quad (19)$$

$$V^{\text{max}} \geq V_{l(m)} \geq V^{\text{min}}, \quad l, m \in \text{NP}(f), f \in \text{NF}, a \in \text{F}(l,f) \cap \text{T}(m,f) \quad (20)$$

$$Z_{a,f} = (R_{a,f} \cdot \cos \varphi + X_{a,f} \cdot \sin \varphi) \quad ([2]) \quad (21)$$

Ograničenja (18)-(21) obezbeđuju da su naponi u čvorovima distributivne mreže ( $V_l$ ) unutar prihvatljivih granica ( $V^{\text{max}}$ ,  $V^{\text{min}}$ ).

### 2.4. Ograničenja vezana za fizičko pojačanje nadzemnih vodova i ugradnju reklozera

$$A_\alpha(n,f) = \{ [1 - \Pi_\alpha(n,f)] \cdot [1 - \Gamma_\alpha(a,n,f)] \} \cdot \left\{ \prod_{i \in \text{NP}^U(n,f)} (1 - \Pi_\alpha(i,f)) \cdot (1 - \Gamma_\alpha(a,i,f)) \right\} \cdot \left\{ \prod_{i \in \text{NP}^D(n,f)} \left[ \left[ 1 - \Pi_\alpha(i,f) \cdot \prod_{a \in \text{SS}(n,i,f)} \text{wrec}(a,f) \right] \cdot \left[ 1 - \Gamma_\alpha(a,i,f) \cdot \prod_{a \in \text{SS}(n,i,f)} \text{wrec}(a,f) \right] \right] \right\}, \quad (22)$$

$$\forall n \in (\text{NN}(f) \cup \text{NRG}(f))$$

$$\sum_{a \in \text{SFE}(p,f)} (1 - \text{wrec}(a,f)) \leq \text{NREC}_{\text{max}}(f), \quad p \in \text{NFE}(f) \quad (23)$$

$$\Pi_\alpha(n,f) = \left\{ 1 - \prod_{a \in \text{T}(n,f)} \text{wh}(a, \text{cable}, f) \cdot \prod_{a \in \text{F}(n,f)} \text{wh}(a, \text{cable}, f) \right\} \cdot \sum_{h \in \text{HP}(n,f)} \lambda_\alpha(v_{\alpha_v}(\omega), n, h, f) \cdot \text{whp}(n, h, f) \quad (24)$$

$$\Pi_\alpha(i,f) \equiv \Pi_\alpha(n,f) \text{ for } n = i \quad (25)$$

$$\sum_{h \in \text{HP}(i,f)} \text{whp}(i, h, f) = 1, \quad \forall i \in \text{NP}(f) \quad (26)$$

$$\Gamma_{\alpha}(a, i(n), f) = \sum_{\substack{a \in T(i(n), f) \\ b \in HL(a, f)}} \lambda_{\alpha}(v_{\alpha_v}(\omega), a, b, f) \cdot whl(a, b, f) \quad (27)$$

$$\sum_{b \in HL(a, f)} whl(a, b, f) = 1, \forall a \in A(f) \quad (28)$$

Izraz (22) predstavlja verovatnoću da potrošač priključen u čvoru  $n$  na izvodu  $f$  neće ostati bez napajanja zbog kvarova na izvodu  $f$  koji su prouzrokovani olujama. Uticaj reklozera na verovatnoću ispada potrošača uvažen je u izrazu (22) pomoću člana  $\prod_{a \in SS(n, i, f)} wrec(a, f)$ . Naime, ako postoji reklozer na bilo kom nadzemnom stubu iz skupa  $SS(n, i, f)$ , tada kvar na nadzemnom stubu u čvoru  $i$  nema uticaja na verovatnoću ispada potrošača priključenih u čvoru  $n$ , tj. nema propagacije kvara iz čvora  $i$ . Ograničenja (23) obezbeđuju da je broj reklozera postavljenih na red ne bude veći od maksimalno dozvoljenog broja ( $NREC_{\max}(f)$ ), uvažavajući mogućnosti za koordinaciju relejne zaštite. Različite mogućnosti ( $h$ ) za fizičko pojačanje nadzemnog stuba u čvoru  $i$  njihov uticaj na verovatnoću kvara na datom stubu uvaženi su ograničenjima (24)-(26). Ukoliko su sve nadzemne grane koje se stižu u čvoru  $n$  zamenjene kablovskim grana, tada je nadzemni stub u datom čvoru uklonjen i samim tim nema uticaja na verovatnoću ispada drugih elemenata, što je uvaženo prvim članom u izrazu (24). Takođe, različite mogućnosti za fizičko pojačanje nadzemne grane ( $a$ ) i njihovi uticaj na verovatnoću kvara na datoj grani uvaženi su ograničenjima (27)-(28).

## 2.5. Ograničenja vezana za dužinu trajanja restauracije napajanja nakon oluja

$$TrsIslL_{\alpha}(n, f) = wload(n, f) \cdot \beta \cdot (TrpLn_{\alpha}(n, f) + TrpPl_{\alpha}(n, f)), n \in NN(f), f \in NF \quad (29)$$

$$TrsIslRN_{\alpha}(n, f) = wrdg(n, f) \cdot \beta \cdot (TrpLn_{\alpha}(n, f) + TrpPl_{\alpha}(n, f)), n \in NRG(f), f \in NF \quad (30)$$

$$TrpLn_{\alpha}(n, f) = \sum_{a \in A(f)} \left\{ \left\{ \prod_{a \in AB(n, a, f)} ww(a, f) \right\} \cdot www(a, f) \cdot \sum_{b \in HL(a, f)} Trp_{\alpha} \cdot \lambda_{\alpha}(v_{\alpha_v}(\omega), a, b, f) \cdot whl(a, b, f) \right\}, \quad (31)$$

$$\forall f \in NF \wedge \forall n \in NP(f)$$

$$www(a, f) = \begin{cases} w(a, f) \cdot wrec(a, f) & \text{— ako je gornji kraj grane (a) bliži razamtaranom cvoru (n)} \\ w'(a, f) & \text{— ako je donji kraj grane (a) bliži razmatranom cvoru (n)} \end{cases} \quad (32)$$

$$TrpPl_{\alpha}(n, f) = \sum_{i \in NP(f)} \prod_{a \in AS(n, i, f)} ww(a, f) \cdot E_{\alpha}(i, f) \quad (33)$$

$$E_{\alpha}(i, f) = \left\{ 1 - \prod_{a \in T(i, f)} wh(a, cable, f) \cdot \prod_{a \in F(i, f)} wh(a, cable, f) \right\} \cdot \sum_{h \in HP(i, f)} Trp_{\alpha} \cdot \lambda_{\alpha}(v_{\alpha_v}(\omega), i, h, f) \cdot whp(i, h, f) \quad (34)$$

$$\forall f \in NF \wedge \forall n \in (NN(f) \cup NRG(f))$$

Izraz (29) predstavlja dužinu trajanja restauracije napajanja za potrošače kojima se nakon oluja napajanje obezbeđuje kreiranjem ostrva u distributivnoj mreži. U ovom slučaju restauracija napajanja se može obezbediti tek kada se izvrši popravka svih nadzemnih stubova i grana u ostrvu u kome se dati potrošači nalaze, što je opisano izrazima (31) i (33). Naime, izrazi (31) i (33) predstavljaju redom ukupno trajanje popravki svih nadzemnih grana i nadzemnih stubova u ostrvu kome se nalazi čvor  $n$ .

Parametrom  $\beta$  u ograničenjima (32) i (33) uvažava se broj ekipa koje su angažovane na sprovođenju popravki na datom izvodu. Ovaj parametar ima vrednost (1) ako postoji samo jedna ekipa na terenu, a smanjuje se ako se broj ekipa povećava. Vrednost ovog parametra procenjuje se na osnovu inženjerskog iskustva.

$$TrsL_{\alpha}(n, f) = (1 - wload(n, f)) \cdot \beta \cdot [TrpLnB_{\alpha}(n, f) + TrpPlB_{\alpha}(n, f)], n \in NN(f), f \in NF \quad (35)$$

$$TrsRN_{\alpha}(n, f) = (1 - wrdg(n, f)) \cdot \beta \cdot [TrpLnB_{\alpha}(n, f) + TrpPlB_{\alpha}(n, f)], n \in NRG(f), f \in NF \quad (36)$$

$$TrsG_{\alpha}(n, f) = \sum_{g \in NG} wdg(n, g, f) \cdot \beta \cdot [TrpLnB_{\alpha}(n, f) + TrpPlB_{\alpha}(n, f)], n \in NP(f), f \in NF \quad (37)$$

$$TrpLnB_{\alpha}(n, f) = \sum_{a \in ABS(n, f)} \sum_{b \in HL(a, f)} Trp_{\alpha} \cdot \lambda_{\alpha}(v_{\alpha_v}(\omega), a, b, f) \cdot whl(a, b, f), \quad \forall f \in NF \wedge \forall n \in NP(f) \quad (38)$$

$$TrpPlB_{\alpha}(n, f) = \sum_{i \in NBS(n, f)} E_{\alpha}(i, f), \quad \forall f \in NF \wedge \forall n \in NP(f), i \neq n, \quad (39)$$

Izraz (35) predstavlja dužine trajanja restauracije napajanja za potrošače kojima se nakon oluja napajanje obezbeđuje iz napojne transformatorske stanice. U ovom slučaju restauracija napajanja se može obezbediti tek kada se izvrši popravka svih nadzemnih stubova i grana koji se nalaze na putanji između potrošača i napojne transformatorske stanice, što je opisano izrazima (38) i (39). Naime, izrazi (38) i (39) predstavljaju redom

intervalne vrednosti dužine trajanja popravki svih nadzemnih grana i nadzemnih stubova koje se nalaze na putanji između čvora  $n$  i napojne transformatorske stanice. Po analogiji sa izrazom (35), izraz (36) predstavlja dužinu trajanja restauracije napajanja za distribuirane obnovljive generatore kojima se nakon oluja napajanje obezbeđuje iz napojne transformatorske stanice.

### 3. ALGORITAM ZA REŠAVANJE

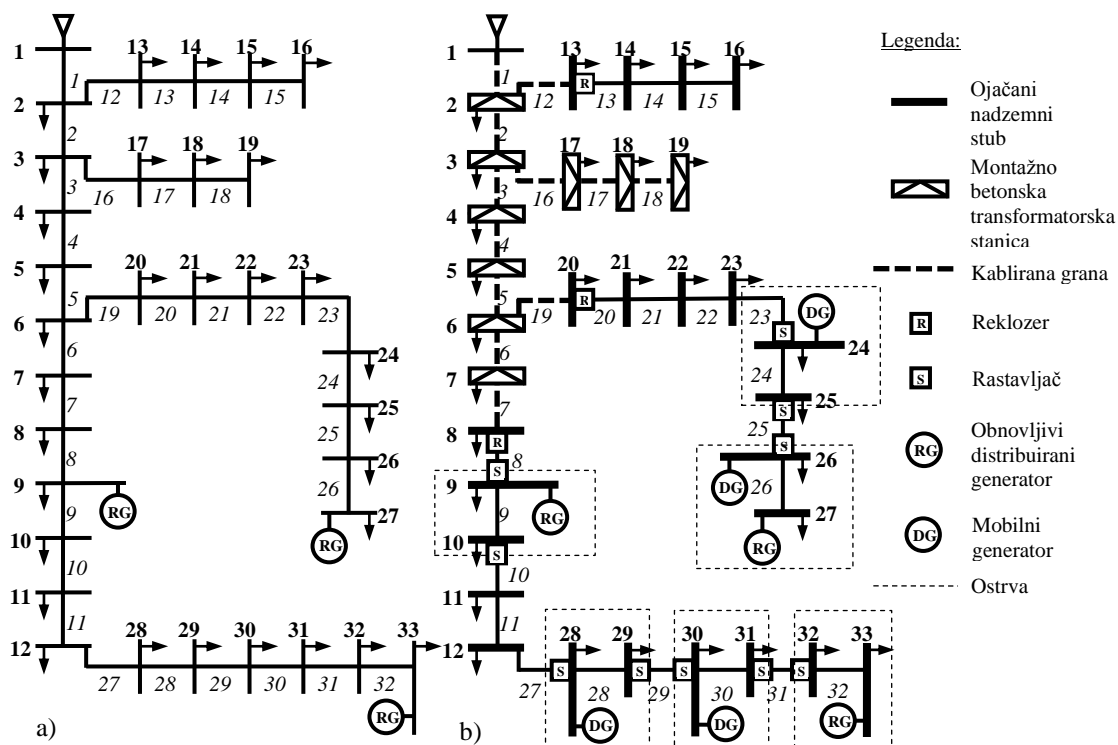
U matematičkom modelu koji je prikazan u prethodnom poglavlju ograničenja (22) sadrže proizvode binarnih promenljivih koje opisuju izbor varijanti za fizičko pojačanje nadzemnih stubova i grana. Ova ograničenja se mogu linearizovati uvođenjem dodatnih binarnih promenljivih i linearnih relacija kako je prikazano u [3]. Međutim, navedenim postupkom linearizacije uvodi se veoma veliki broj dodatnih binarnih promenljivih i zbog toga prikazani matematički model postaje veoma kompleksan za rešavanje. Kako se omogućilo efikasno rešavanje prikazanog matematičkog modela, u ovom radu je izvršena njegova dekompozicija na niz podproblema. U svakom od ovih podproblema specificiran je jedan scenario fizičkog pojačanja nadzemnih stubova i grana. Na taj način dobijen je relaksirani matematički model koji ne sadrži proizvode binarnih promenljivih i koji se može efikasno rešiti metodama mešovito-celobrojnog linearnog programiranja. Opisani postupak za kreiranje podproblema sprovodi se u okviru procedure simuliranog kaljenja [4], čime je dobijen hibridni algoritam za rešavanje prikazanog matematičkog modela.

Predloženi algoritam sastoji se od sledećih koraka:

- 1) Odrediti početno rešenje ( $s_0$ ), tj. početni plan otporne distributivne mreže, na primer scenario po kome u postojećoj distributivnoj mreži nema dodatnih/pojačanih elemenata i opreme.
- 2) Odrediti početnu temperaturu  $T_1=T_{\max}$  za algoritam simuliranog kaljenja kako je prikazano u [4]. Postaviti brojač iteracija na vrednost  $k=1$ .
- 3) Izabrati jedan nadzemni stub ( $i$ ) i jednu nadzemnu granu ( $a$ ) na izvodu  $f$  distributivne mreže; ako su iscrpljene sve mogućnosti, preći na korak 7). Za izabrani nadzemni stub  $i$  izabrati na slučajan način jednu od mogućnosti za fizičko pojačanje iz skupa  $HP(i,f)$ . Za izabranu nadzemnu granu  $a$  izabrati na slučajan način jednu od mogućnosti za fizičko pojačanje uključujući tipove iz skupa  $HL(a,f)$  kao i zamenu date grane kablovskom granom.
- 4) Za scenario fizičkog pojačanja nadzemnih stubova i grana određen u prethodnom koraku rešiti optimizacioni model prikazan u prethodnoj glavi metodom mešovito-celobrojnog linearnog programiranja, čime su dobijeni odgovarajući optimalan broj i lokacija reklozera i rastavljača, kao i broj i lokacija mobilnih generatora. Na ovaj način određeno je susedno rešenje  $s'$ .
- 5) Naka su  $f(s')$  vrednost funkcije cilja, tj. ukupni troškovi susednog rešenja  $s'$ ,  $f(s)$  ukupni troškovi tekućeg rešenja  $s$  i  $\Delta E$  razlika ovih troškova. Ako je  $\Delta E > 0$ , tj. ako je susedno rešenje bolje od trenutnog, tada susedno rešenje postaje tekuće, u protivnom primenjuje se sledeća provera:
  - Ako je  $e^{-\Delta E/T_k} > \text{random}[0,1]$ , susedno rešenje postaje trenutno
  - If  $e^{-\Delta E/T_k} < \text{random}[0,1]$ , susedno rešenje se odbacuje.
- 6) Vratiti se na korak 3).
- 7) Odrediti novu temperature  $T_{k+1} = \varepsilon \cdot T_k$ , gde je  $\varepsilon$  konstanta iz intervala (0.5-0.99) [4]. Ako je dostignuta minimalna vrednost temperature ( $T_{\min}$ ) ili ako u poslednje tri iteracije ( $k$ ) nije pronađeno nijedno novo susedno rešenje preći na korak 8), u protivnom ažurirati brojač iteracija  $k=k+1$  i vratiti se na korak 3).
- 8) Kraj.

### 4. REZULTATI

Procedura za planiranje otpornih distributivnih predložena u [1] testirana je na primeru IEEE mreže koja sadrži 33 čvora, a koja je prikazana na slici 1a. Parametri navedene distributivne mreže preuzeti su iz [5] i [6]. Razmatra se period planiranja od 20 godina, pri čemu je stopa svođenja 10%. Godišnja frekvencija pojavljivanja oluje predstavljena je intervalom  $\bar{\varphi}=[\varphi_L,\varphi_R]=[0.15, 0.5]$ , dok je maksimalna brzina vetra tokom oluje predstavljena intervalom  $\bar{\omega}=[\omega_L,\omega_R]=[40, 60]$  [m/s]. Brzina vetra koja se postiže tokom oluje pri maksimalnoj brzini vetra  $\omega_\alpha$  kreće se u intervalu  $\bar{v}(\omega)=[20 \text{ m/s}, \omega_\alpha]$ . Dužina trajanja oluje, tj. perioda bez popravki za tri karakteristične vrednosti maksimalne brzine vetra iznosi:  $\bar{T}_{st}(\omega=40 \text{ m/s})=[8, 20]$  [h],



SLIKA 1. A) TEST DISTRIBUTIVNA MREŽA, B) OPTIMALAN PLAN OTPORNE MREŽE

$\bar{T}_{st}(\omega=50 \text{ m/s})=[10, 25] \text{ [h]}$  i  $\bar{T}_{st}(\omega=60 \text{ m/s})=[12, 32] \text{ [h]}$ . Koristeći ove vrednosti i primenom interpolacije dobijene su vrednosti  $\bar{T}_{st}(v_a(\omega))$  za svako  $v_a(\omega)$ . Potrošnja u čvorovima distributivne mreže ( $n$ ) predstavljena je intervalima  $\bar{L}(n)=[L_L(n), L_R(n)]=[0.8L_{\max}(n), 1.2L_{\max}(n)]$  gde je  $L_{\max}(n)$  vršno opterećenje u čvoru  $n$  dato u [6]. Takođe, u razmatranoj distributivnoj mreži postoje tri obnovljiva distribuirana generatora koji su priključeni u čvorovima 9, 27 i 33, kako je prikazano na slici 1a. Proizvodnje ovih generatora predstavljene su intervalima:  $RG(n=9)=[20, 360] \text{ [kW]}$ ,  $RG(n=27)=[20, 300] \text{ [kW]}$  i  $RG(n=33)=[40, 360] \text{ [kW]}$ .

Dalje, razmatraju se tri tipa nadzemnih stubova: postojeći stubovi i dva tipa ojačanih stubova označenih sa A i B. Troškovi zamene postojećeg nadzemnog stuba novim stubom tipa A iznose 2000\$ a za tip B iznose 4000\$. Dužina trajanja popravki svih razmatranih nadzemnih stubova predstavljena je intervalom  $\bar{T}_{rp}=[T_{rp_L}, T_{rp_R}]=[2, 5] \text{ [h]}$ . S druge strane, postojeće nadzemne grane mogu biti zamenjene kablovskim granama po ceni od 75000 \$/km. Dužina trajanja popravki nadzemnih grana predstavljena je intervalom  $\bar{T}_{rp}=[T_{rp_L}, T_{rp_R}]=[2, 3] \text{ [h]}$ . Troškovi zamene postojeće stubne transformatorske stanice montažno betonskom transformatorskom stanicom iznose 15000 \$.

Podaci o krhkosti nadzemnih stubova i grana preuzeti su iz [7]. Takođe, u radu se razmatraju dva tipa mobilnih generatora označenih sa G1 i G2 čije su maksimalne snage redom 400 kW i 300 kW, cene nabavke 12000 \$ i 10000 \$, a troškovi instalacije 300 \$ i 200 \$. Troškovi rada mobilnih generatora iznose 5 \$/h. Cena ugradnje rastavljača iznosi 1000 \$, a cena ugradnje reklozera iznosi 8000 \$. Maksimalni dozvoljeni broj reklozera koji mogu postavljati na red je 2. Takođe, smatra se da u postojećoj mreži nema prekidačkih uređaja i da je jedna ekipa angažovana na popravci kvarova nakon oluja. Cena neporučene električne energije iznosi 8 \$/kWh a cena proizvedene električne energije iz obnovljivih izvora iznosi 1 \$/kWh.

U okviru procedure za planiranje otpornih mreža prikazanoj u [1] usvojeni su sledeće  $\alpha$ -vrednosti neizvesnih ulaznih veličina:  $(\alpha_\omega, \alpha_v) \in \{0, 0.33, 0.66, 1\}$  i  $(\alpha_{T_{rp}}, \alpha_{T_{st}}, \alpha_L, \alpha_{RG}) \in \{0, 0.5, 1\}$ . Za koeficijent korelacije između maksimalne brzine vetra  $\bar{\omega}$  i dužine trajanja popravki  $\bar{T}_{rp}(\delta)$  usvojena je vrednost 0.9 i usvojeno je da su krive lomljivosti poznate, tj. razmatrana je jedna vrednost  $\alpha_{\lambda(\delta)}$  za svako  $\alpha_v$ . U skladu sa tim broj validnih kombinacija  $\alpha$ -vrednosti iznosi:  $4(\alpha_\omega) \times 1(\alpha_\phi) \times 3(\alpha_{T_{rp}}) \times 4(\alpha_v) \times 3(\alpha_{T_{st}}) \times 1(\alpha_{\lambda(\delta)}) \times 3(\alpha_L) \times 3(\alpha_{RG})=1296$ . Za navedene kombinacije parametara rešen je matematički model prikazan u poglavlju 2 i na taj način je dobijeno 548 različitih planova otporne mreže. Detaljni rezultati za karakteristična tri plana označenih sa P1, P2 i P3 prikazani su u Tabeli 1. Od svih dobijenih planova plan P1 podrazumeva najmanje investicione troškove, plan P3 podrazumeva najveće investicione troškove, dok je plan P2 optimalan po kriterijumu minimalnog rizika. Radi poređenja, u Tabeli 1 su prikazani rezultati za plan P0 po kome u mreži nema dodatih/pojačanih elemenata i opreme. Rezultati prikazani u Tabeli 1 pokazuju da sa porastom investicionih troškova opadaju troškovi restauracije distributivne mreže nakon oluja. Optimalan plan P2 prikazan je na slici 1b).



TABELA 1 - REZULTATI PRORAČUNA

Plan	Ojačani stubovi		Kablirane grane	Reklozeri (indeks grane i indeks čvora u zagradi)	Rastavljači (indeks grane i indeks čvora u zagradi)	Mobilni generatori (indeks čvora i tip generatora u zagradi)	Invest. troškovi [\$]	Ukupni intervalni troškovi restauracije [\$]	Maksimalno žaljenje [\$]
	Tip A	Tip B							
P0	-	-	-	-	-	-	0	[2625821, 5282174]	2990983
P1	-	2-33	-	-	22(23), 24(23), 27(28), 29(30)	23 (G1), 25(G1), 28(G2), 30(G1)	178000	[1357130, 2845148]	669230
P2	-	8-16, 20-33	1-7, 12, 16-19	8(8), 13(13), 20(20)	8(9), 10(10), 23(24), 25(25), 25(26), 27(28), 29(29), 29(30), 31(31), 31(32)	24 (G1), 26(G2), 28(G1), 30(G2)	1125500	[528837, 1448133]	308750
P3	-	11-12, 20-33	1-10, 12-19	11(11), 20(20)	22(23), 24(25), 29(29), 29(30)	21 (G2), 24(G2), 25(G1), 29(G1), 30(G1)	1605500	[397386, 1061456]	566278
P4	-	9-12, 20-33	1-8, 12-19	9(9), 20(20)	22(23), 24(24), 24(25) 27(28), 31(31), 31(32)	23 (G2), 25(G1), 31(G1), 32(G2)	1429500	[196162, 2235907]	1030907

Na ovom mestu treba naglasiti da su navedeni rezultati dobijeni uzimajući u obzir zavisnosti (korelacije) koje postoje među neizvesnim ulaznim parametrima. Među ovim zavisnostima posebno je značajna perfektna negativna korelacija između intervalne maksimalne brzine vetra  $\bar{\omega}$  i intervalne godišnje frekvencije pojavljivanja oluje  $\bar{\phi}$  [8]. Ovaj tip korelacije podrazumeva da nisu validne kombinacije ulaznih parametara u kojima su maksimalna brzina vetra i godišnja frekvencija pojavljivanja oluje istovremeno imaju maksimalne ili minimalne vrednosti. Kako bi se istakla važnost navedene korelacije, navedeni proračuni su ponovljeni za slučaj kada je ona zamenarena. Na taj način su analizirane sledeće  $\alpha_\phi$ -vrednosti  $\alpha_\phi \in \{0, 0.33, 0.66, 1\}$ , tj. izvršeno je  $4(\alpha_\phi) \times 1296 = 5184$  proračuna umesto 1296, kako je gore navedeno. Na ovaj način je dobijeno 2012 različitih planova otporne mreže. Po kriterijuma minimalnog rizika u ovom slučaju je dobijen plan otporne mreže koji je prikazan u Tabeli 1 kao plan P4. Na ovom mestu je potrebno primetiti da plan P4 podrazumeva veće investicione troškove nego plan P2. Razlog za to je što su veoma nepovoljna stanja prirode tretirana kao moguća, tj. pretpostavljeno je da se oluje sa najvećim maksimalnim brzinama vetra mogu javljati sa najvećom godišnjom frekvencijom, što je u suprotnosti sa dobijenim statističkim podacima [8]. Navedeni rezultati pokazuju značaj uvažavanja zavisnosti među neizvesnim veličinama u planiranju otpornih distributivnih mreža. Oni pokazuju da uvažavanje navedenih zavisnosti smanjuje računarsku složenost problema (broj proračuna) i što je važnije obezbeđuje da dobijeni rezultati ne budu previše konzervativni, odnosno da se ne dobiju previše skupa rešenja.

## 5. ZAKLJUČAK

U ovom radu je prikazan pristup zasnovan na upravljanju rizikom za planiranje distributivnih mreža otpornih na ekstremne vremenske nepogode (oluje). Predloženim pristupom dobija se plan otporne distributivne mreže kojim se minimizira rizik od pojave velikih (značajnih) troškova zbog štete od ekstremnih oluja u razmatranom periodu planiranja. Ovo je omogućeno primenom intervalne RDM aritmetike za modelovanje neizvesnih ulaznih veličina kao i zavisnosti (korelacija) koje postoje među njima, razvojem hibridnog algoritma za rešavanje problema planiranja otpornih mreža i primenom kriterijuma minimalnog rizika za izbor najboljeg plana otporne mreže. Dobijeni rezultati pokazuju da se predloženim pristupom smanjuje računarska složenost problema planiranja otpornih mreža, kao i da dobijaju rezultati (plan otporne mreže) nisu previše konzervativni, odnosno da se ne dobiju previše skupa rešenja.

## LITERATURA

- [1] Popović Ž, Kovački N, 2020, "Planiranje razvoja distributivnih mreža otpornih na ekstremne vremenske nepogode: Formulacija problema", Zbornik radova sa dvanaestog savetovanja o elektrodistributivnim mrežama CIRED Srbija, 24.-28. Septembar 2020, Kopaonik

- [2] Gonen T, 2014, "Electric power distribution system engineering", treće izdanje, New York: Taylor & Francis Group
- [3] Liberti L, Cafieri S, Tarissan F, 2009, "Reformulations in mathematical programming: A computational approach", Abraham A, Hassanien AE, Siarry P, Engelbrecht A, "Foundations of computational intelligence, vol. 3", Berlin:Springer, 153-34.
- [4] Monticelli AJ, Romero R, Asada EN, 2008, "Fundamentals of simulated annealing" , Lee YK, El-Sharkawi AM, "Modern heuristic optimization techniques: Theory and applications to power systems", New Jersey: John Wiley & Sons, 123-47.
- [5] Popović Ž, Knežević S, Brbaklić B, 2018, "Optimal reliability improvement strategy in radial distribution networks with island operation of distributed generation", IET Gener. Transm. Distrib, 12, 78 – 87.
- [6] Singh D, Misra RK, Singh D, 2007, "Effect of load models in distributed generation planning", IEEE Trans Power Syst, 22, 2204-12.
- [7] 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.
- [8] 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.