



## VIŠE-PERIODNO PLANIRANJE REKONFIGURACIJE UZ UVAŽAVANJE AUTOMATIZACIJE U DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA

### MULTI-PERIOD RECONFIGURATION PLANNING CONSIDERING DISTRIBUTION NETWORK AUTOMATION

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

#### KRATAK SADRŽAJ

U ovom radu je prikazan pristup za više-periodno planiranje rekonfiguracije distributivnih mreža u kojima postoje daljinski kontrolisani i nadzirani rasklopni uređaji (automatizovani rasklopni uređaji). Predloženi pristup koristi model zasnovan na mešovitom celobrojnom linearnom programiranju koji eksplicitno razmatra uticaj automatizovanih uređaja na trajanje prekida napajanja (trošak usled prekida napajanja). On omogućuje dobijanje skupa neinferiornih rešenja (planova rekonfiguracije) u svakom razmatranom periodu. Ovi planovi se zatim koriste u okviru algoritma dinamičkog programiranja za generisanje i ocenu skupa više-periodnih planova rekonfiguracije primenjujući rekurziju (zaključivanje) unazad. Na ovaj način predloženi pristup rešava (prevazilazi) dva nedostatka dekompozicionih modela za rekonfiguraciju mreže: i) suviše kratak horizont planiranja i ii) suviše malo generisanih i ocenjenih više-periodnih planova. Prikazani rezultati pokazuju da predloženi pristup ima potencijal da unapredi proces planiranja rekonfiguracije distributivnih mreža sa automatizovanim rasklopnim uređajima.

**Ključne reči:** automatizovan rasklopni uređaj, rekonfiguracija distributivne mreže, dinamičko programiranje, više perioda, više kriterijuma, mešovito celobrojno linearno programiranje

#### SUMMARY

This paper presents an approach for multi-period reconfiguration planning of distribution networks where remotely controlled and supervised switches (automated switches) are installed. The proposed approach employs a multi-objective mixed integer linear programming model that explicitly considers the influence of the automated switches on the interruption duration (interruption cost). It enables obtaining a set of noninferior solutions (reconfiguration plans) in each period. These plans are then used within the dynamic programming framework to identify and evaluate a number of high-quality multi-period reconfiguration plans by employing the backward induction. In this way, the proposed approach overcomes two shortcomings of the decomposition network reconfiguration planning methods: i) too short a planning horizon and ii) too few generated and evaluated alternatives. The presented results show the potential of the proposed approach to improve the multi-period reconfiguration planning process in distribution networks with automated switches.

**Keywords:** automated switches, distribution network reconfiguration, dynamic programming, multi-period, multi-objective, mixed-integer linear programming

Željko Popović, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, [zpopovic@uns.ac.rs](mailto:zpopovic@uns.ac.rs)  
Neven Kovački, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, [kovackin@uns.ac.rs](mailto:kovackin@uns.ac.rs)

## NOMENKLATURA

### Promenljive

$ENSR(a, f)$  – neisporučena električna energija u procesu restauracije kod kvara grane ( $a$ ) na izvodu ( $f$ ),  
 $ENSISL(i)$  – neisporučena električna energija korisniku u čvoru ( $i$ ) u procesu lokalizacije i izolacije kvara,  
 $w_a$  – binarna promenljiva, ima vrednost 1 ako je rasklopni uređaj u grani ( $a$ ) zatvoren a vrednost 0 u suprotnom,  
 $ww_a, wfy(\cdot), wfy(\cdot), wwy(\cdot), wwx(\cdot), wwz(\cdot), was_b, wfas_a$  – pomoćne binarne promenljive,  
 $p_a, p_{a'}, q_a, q_{a'}$  – redom tokovi aktivnih i reaktivnih snaga snage u orijentisanim granama ( $a$ ) i ( $a'$ ),  
 $V_{l(m)}^{Re}, V_{l(m)}^{Im}$  – promenljive koje opisuju realnu i imaginarnu komponentu napona u čvoru  $l(m)$ ,  
 $p_a^f, p_{a'}^f, \Delta p(\cdot), \Delta PP(\cdot), \Delta P(\cdot), \Delta y(\cdot), \Delta YY(\cdot), \Delta Y(\cdot), \Delta Z(\cdot), x_a^{DG}, x_{a'}^{DG}$  – pomoćne kontinualne promenljive.

### Parametri

$C_{INT_i}, C_{INT_{min}}$  – trošak prekida u čvoru ( $i$ ) i najmanji trošak prekida u mreži [USD/kWh],  
 $Csw_a$  – trošak manipulacija rasklopnim uređajem u grani ( $a$ ),  
 $KDG_n$  – fiktivnoopterećenje DG u čvoru ( $n$ ) koje se može napajati samo iz napojne TS,  
 $K_{LOSS_{a,ns}}, K_{LOSS_{a,ns}}$  – koeficijent gubitaka za aktivnu i reaktivnu snagu,  
 $L_a, \lambda_a$  – dužina grane ( $a$ ) i intezitet otkaza ( $a$ ) u jednom periodu [broj kvarova/km/period],  
 $NSP$  – broj linernih segmenata korišćenih kod linearizacije ograničenja kapaciteta grana,  
 $NSV$  – broj linernih segmenata korišćenih kod linearizacije naponskih ograničenja,  
 $n_s, n_{dg}, n_{TOT}$  – broj napojnih TS u mreži, broj DG u mreži i ukupan broj čvorova u mreži,  
 $PL_n, PG_n$  – potrošnja i proizvodnja aktivne snage u čvoru ( $n$ ),  
 $R_a, X_a, S_{a,max}$  – otpornost, reaktansa i maksimalni kapacitet grane ( $a$ ),  
 $\Delta t$  – dužina jednog perioda,  
 $V_{min}, V_{max}, V_{nom}$  – minimalno dozvoljeni, maksimalno dozvoljeni i nazivni napon u mreži,  
 $vsegm_{ns}$  – dužina segmenta  $ns$  korišćenog u linearizaciji minimalnih naponskih ograničenja,  
 $vsegm_{ns}$  – dužina segmenta  $ns$  korišćenog u linearizaciji maksimalnih naponskih ograničenja,  
 $pse_{ns}$  – dužina segmenta  $ns$  korišćenog u linearizaciji ograničenja kapaciteta grana,  
 $QL_n, QG_n$  – potrošnja i proizvodnja reaktivne snage u čvoru ( $n$ ),  
 $X_{max}^f$  – velika konstanta.

### Skupovi

$A, FN$  – skup svih grana i skup svih izvoda (fidera) u mreži,  
 $ASSC(a,f,sf)$  – skup grana, opremeljenih automatizovanim uređajima (SA), lociranih između grane ( $a$ ) i vrha susednog izvoda ( $sf$ ), koji pripadaju jednoj i samo jednoj petlji koja sadrži granu ( $a$ ),  
 $AS(a,f,sf,k(a,f,sf),sf)$  – skup grana, opremeljenih automatizovanim uređajima (SA), lociranih između grane ( $a$ ) i vrha susednog izvoda ( $sf$ ), koje pripadaju petljik( $a,f,sf$ ),  
 $ASF(a,f)$  – skup grana, opremeljenih automatizovanim uređajima (SA), lociranih između grane ( $a$ ) i vrha izvoda ( $f$ ), kome grana ( $a$ ) pripada u početnoj konfiguraciji,  
 $ASD(as',a,f,sf,k(a,f,sf))$  – skup grana, opremeljenih sa SA, lociranih nizvodno od grane sa automatizovanim uređajem ( $as'$ ), koje pripadaju petlji  $k(a,f,sf)$ ,  
 $ASDF(as',a,f)$  – skup grana, opremeljenih sa SA, lociranih između grane sa automatizovanim uređajem ( $as'$ ) i početka izvoda ( $f$ ), kome grana ( $a$ ) pripada u početnoj konfiguraciji,  
 $A1(a, f, as', k(a,f,sf))$  – skup grana u petljik( $a,f,sf$ ), lociranih između grane ( $a$ ) na izvodu ( $f$ ) i grane opremljene automatizovanim uređajem ( $as'$ ) koja se nalazi nizvodno od ( $a$ ). Grana sa automatizovanim uređajem ( $as'$ ) nije uključena u skup,  
 $A2(a,f,as',as'',k(a,f,sf))$  – skup grana u petlji  $k(a,f,sf)$  koje povezuju granu ( $a$ ) na izvodu ( $f$ ) sa granom ( $as'$ ), koja se nalazinizvodno od ( $a$ ), i sa granom ( $as''$ ) koja se nalazi nizvodno od ( $as'$ ). Grane ( $as'$ ) i ( $as''$ ) su opremljene sa SA. Grana ( $as''$ ) nije uključena u skup,  
 $AGM(i,a,k(i,f,sf))$  – skup grana bez automatizovanih uređaja, lociranih između čvora ( $i$ ) i grane ( $a$ ), u petljik( $i,f,sf$ ),  
 $AGAS(i,a,k(i,f,sf))$  – skup grana sa automatizovanim uređajima, lociranih između čvora ( $i$ ) i grane ( $a$ ), u petljik( $i,f,sf$ ),  
 $F_n, T_n$  – skup orijentisanih grana za koje je čvor nizvodni čvor i za koje je čvorn terminalni čvor,  
 $k(i,f,sf)$  – petlja koja sadrži elemnt ( $i$ ) i koja sadrži sve grane koje se nalaze između početka izvoda ( $f$ ) i početka njemu susednog izvoda ( $sf$ ),  
 $NC, NO, N_{DG}, N_{TOT}$  – skup zatvornih rasklopnih uređaj, skup otvorenih rasklopnih uređaja, skup čvorova sa DG, skup svih čvorova u mreži,  
 $NK(i,f,sf)$  – skup petlji koje se mogu formirati između izvoda ( $f$ ) i njemu susednog izvoda ( $sf$ ) a koje sadrže čvor ( $i$ ),  
 $SF(f)$  – skup izvoda koji su susedi izvodu ( $f$ ). Skup  $SF(f)$  sadrži sve izvode na koje se mogu prebaciti opterećenja sa izvoda ( $f$ ),  
 $SK(a,f,sf)$  – skup petlji, između početka izvoda ( $f$ ) i početka njemu susednog izvoda ( $sf$ ), koji sadrže granu ( $a$ ).

## 1. UVOD

Planiranje rekonfiguracije distributivnih mreža je težak kombinatorni optimizacioni problem sa dugom istorijom razvoja različitih pristupa za dobijanje što kvalitetnijih rešenja [1]-[3]. Jedna od osnovnih karakteristika do sada predloženih pristupa je da li oni razmatraju jedan period planiranja ili više perioda planiranja. Više-periodni problemi rekonfiguracije su značajno kompleksniji ali daju konzistentnija i efektivnija rešenja. Više-periodni problemi rekonfiguracije su formulisani kao kompletno dinački problemi [4]-[6] i kao dekomponovani problemi [7]-[14].

Kompletno dinački problemi su više-periodni problemi rekonfiguracije formulisani u okviru jednog algoritma. Oni su najčešće bazirani na metaheurističkim algoritmima [4]-[6]. Međutim, zbog izuzetne kompleksnosti kompletno dinamičkih modela, koja se bitno povećava usled rasta veličine problema (broja promenljivih i ograničenja) i usled postojanja interakcija (zavisnosti) između razmatranih perioda [15], metaheuristički algoritmi su limitirani na rešavanje više-periodnih problema manjih dimezija (dan unapred (24 časa) i kraći periodi planiranja). S druge strane, dekompozicioni modeli imaju za cilj smanjenje računarske kompleksnosti kompletno dinamičkih modela podelom više-periodnog problema u niz statičkih problema rekonfiguracije i time omogućavaju razmatranje problema realnih dimenzija [7]-[14]. Ovi modeli nalaze rešenje čiji kvalitet veoma zavisi od efektivnosti korišćenih statičkih modela kao i od broja i kvaliteta više-periodnih problema koji su identifikovani (generisani) i evaluirani u okviru dekompozicionog modela.

Pristup predložen u [7] deli jednu godinu u više perioda sa različitim nivoima opterećenja i određuje optimalan plan rekonfiguracije za svaki od razmatranih perioda nezavisno čime se dobija najbolji godišnji plan rekonfiguracije. Ovaj pristup koristi binarni algoritam roja čestica za određivanje statičkog plana rekonfiguracije koji minimizira trošak gubitaka, troškove usled prekida i trošak manipulacija. U [8] je prikazan metod za određivanje godišnjeg plana rekonfiguracije koji razmatra trošak manipulacija, trošak gubitaka i trošak usled prekida. Algoritam harmonijskog pretraživanja se koristi za dobijanje optimalnog statičkog plana rekonfiguracije za svaki razmatrani nivo opterećenja u toku godine. Zatim se definišu efektivne konfiguracije koje se dalje koriste u okviru algoritma dinamičkog programiranja za pronalaženje najboljeg godišnjeg plana rekonfiguracije. Genetski algoritam je predložen u [9] za određivanje statičkog plana rekonfiguracije koji minimizira trošak gubitaka i trošak manipulacija u razmatranom periodu. Heurističkim pristupom se razmatrani 24-časovni period deli u nekoliko perioda i primenom predloženog genetskog algoritma se dobija najbolji plan rekonfiguracije u svakom periodu a time i najbolji dnevni plan rekonfiguracije. U [10] se koriste diskretni genetski algoritam (DGA) i tehnika izmene grana za optimizaciju troška gubitaka i troška manipulacija u 24-časovnom periodu. Predloženi pristup deli 24 časa u nekoliko podperioda koji se iterativno generišu primenom DGA algoritma. Za svaki podperiod se definiše optimalna konfiguracija korišćenjem algoritma izmene grana i time se dobija najbolji dnevni plan rekonfiguracije. U [11] se optimizuju gubici energije uz uvažavanje varijabilnosti potrošnje i proizvodnje iz obnovljivih izvora (DG). Algoritam za klasterovanje zasnovan na fazi logici se koristi za dobijanje reprezentativnih nivoa potrošnje i proizvodnje. Za svaki od dobijenih nivoa nezavisno se rešava statički problem rekonfiguracije i na taj način se dobija najbolji više-etapni plan rekonfiguracije. U [12] se rekonfiguracija mreže koristi u cilju unapređenja raspoloživog kapaciteta (hosting capacity) u distributivnim mrežama uvažavajući neizvesnost u potrošnji i proizvodnji iz obnovljivih izvora. Predloženi pristup koristi heurističku proceduru, zasnovanu na sličnosti satnih vrednosti napona u čvorovima mreže da podeli razmatarni period u mali broj perioda. Hibridni algoritam roja čestica se zatim koristi za rešavanje definisanih statičkih problema i na taj način se dobija više-periodni plan rekonfiguracije. U [13] se koristi rekonfiguracija u cilju minimizacije odsecanja (smanjenja) proizvodnje iz obnovljivih resursa u toku jednog dana (24 časa). Predloženim pristupom se identifikuju periodi u kojima se javlja odsecanje (smanjenje) proizvodnje u početnoj konfiguraciji mreže a zatim se rešava statički problem za svaki od tih perioda sa ciljem smanjenja odsecanja proizvodnje. Na ovaj način se dobija najbolji više-periodni plan rekonfiguracije. Pristup zasnovan na Lagranžovoj relaksaciji i heurističkoj pretrazi je predložen u [14] za određivanje dnevnog (24-časovnog) plana rekonfiguracije kojim se minimizira trošak gubitaka i zadovoljavaju ograničenja maksimalnog broja manipulacija u razmatranom periodu.

U predloženim pristupima za više-periodno planiranje rekonfiguracije nije razmatran uticaj automatizovanih rasklopnih uređaja (daljinski kontrolisanih i nadgledanih uređaja) na trajanje prekida, odnosno na trošak usled prekida. Međutim, unapređenje pouzdanosti napajanja je danas jedna od najvažnijih ciljeva operatora distributivnih sistema a automatizacija mreže je jedan od najefektivnijih strategija za unapređenje pouzdanosti u distributivnim sistemima [16]. Takođe, u predloženim pristupima, čak i u slučaju neautomatizovanih mreža, nije na adekvatan način određivano trajanje prekida napajanja korisnika sistema jer nije uzimano u obzir trajanje prekida u napajanju korisnika koji se nalaze „uzvodno“ od mesta kvara, odnosno između mesta kvara i početka izvoda. Konačno, predloženim pristupima se identifikuje (generiše) i ocenjuje samo vrlo mali broj više-periodnih planova u razmatranom periodu. Pošto ne uspevaju da identifikuju veliki broj drugih više-periodnih planova, predloženi pristupi će najverovatnije nalaziti manje kvalitetna rešenja.

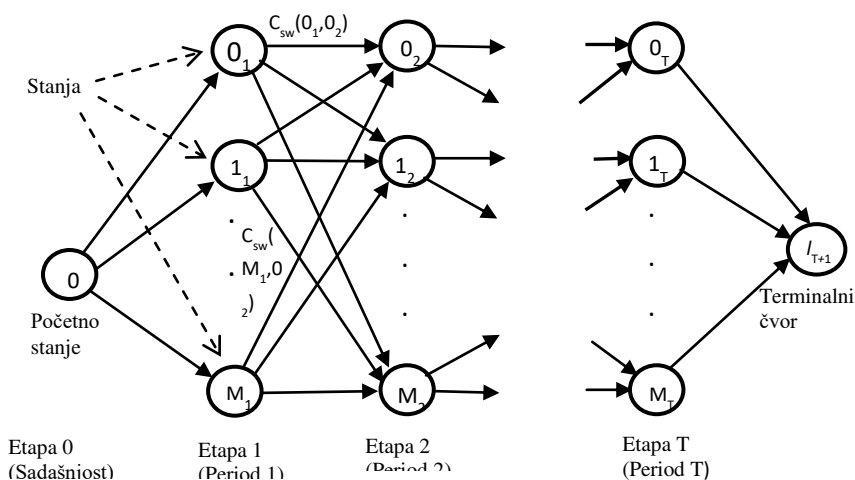
U ovome radu je problem više-periodnog planiranja rekonfiguracije predstavljen težinskim grafom. Čvorovi u grafu predstavljaju različite statičke konfiguracije mreže (stanja) u različitim periodima (etapama). Grane (lukovi),

koje povezuju čvorove, predstavljaju interakcije koje postoje između etapa (perioda). Njima je pridružen trošak manipulacija kojima se omogućuje prelazak iz konfiguracije mreže (stanja) u jednom periodu (etapi) u konfiguraciju mreže u sledećem periodu (etapi). Na ovaj način se više-periodni problem dekomponuje u niz sekvenci statičkih problema i cilj postaje da se nađe put u usmerenom grafu sa najmanjom težinom (troškom), odnosno da se nađe „najkraći“ put. Za rešavanje ovog grafovskog problema je predložen algoritam dinamičkog programiranja zasnovan na rekurziji unazad. Statičke konfiguracije mreže (stanja) se dobijaju primenom algoritma više-kriterijumskog mešovitog celobrojnog lineranog programiranja (MOMILP) uz korišćenje metode ograničenja u kriterijumskoj funkciji [17]. Predloženi MOMILP algoritam razmatra trošak manipulacija, trošak prekida i trošak gubitaka uvažavajući uticaj automatizovanih uređaja na trajanje prekida u napajanju korisnika sistema (trošak prekida). Njegovim rešavanjem se dobija skup neinferiornih rešenja (konfiguracija mreže) u svakom pojedinačnom periodu. Skup neinferiornih rešenja dobijenih u svim razmatranim periodima predstavlja skup stanja (čvorova) koji se razmatra u svakoj etapi. Time se omogućava identifikacija (generisanje) velikog broja više-periodnih planova i obezbeđuje dobijanje vrlo kvalitetnog više-periodnog plana rekonfiguracije. Ovde treba naglasiti da se neizvesnost budućih potrošnji i proizvodnji iz obnovljivih izvora uspešno razmatrala korišćenjem odgovarajućih determinističkih modela kojim se generiše skup potencijalnih rešenja koja se zatim ocenjuju korišćenjem alata za ocenu rizika da bi se dobilo najmanje rizično rešenje [16],[18],[19]. Prema tome, jedan efikasan deterministički pristup, kao što je pristup prikaza u ovom radu, je esencijalan za dobijanje rešenja koje minimizira rizik od značajnih troškova u prisustvu neizvesnosti.

Najvažniji doprinos ovog rada je alat za određivanje najboljeg više-periodnog plana rekonfiguracije u distributivnim mrežama u kojima postoje automatizovani rasklopni uređaji. Predloženi alat, za razliku od do sada predloženih pristupa, uvažava uticaj automatizovanih uređaja na trajanje prekida i time omogućuje korektno određivanje troška prekida u mreži. On takođe omogućava preciznije određivanje troškova prekida u mrežama koje nisu automatizovane. Važan doprinos ovog rada je i više-kriterijumski MILP model, koji eksplicitno uvažava uticaj automatizovanih uređaja u statičkim problemima rekonfiguracije. Više-kriterijumska formulacija je neophodna da bi se prevazišao problem prekratkog horizonta planiranja u statičkim modelima. Naime, trajanje jednog perioda (npr., jedan sat) je suviše kratko za korektno poređenje troška manipulacija i ušteda (dobiti) usled, na primer, smanjenja troška gubitaka ili troška prekida koji se mogu ostvariti u toku jednog perioda. Zbog toga se ovi troškovi ne bi trebali jednovremeno razmatrati u okviru objektivne funkcije u statičkim problemima rekonfiguracije. Predloženi više-periodni pristup, umesto samo jednog rešenja, generiše skup neinferiornih rešenja u svakom pojedinačnom periodu i time omogućuje generisanje velikog broja kvalitetnih više-periodnih planova u okviru predloženog modela dinamičkog programiranja. Na ovaj način se prevazilazi još jedan nedostatak do sada predloženih dekompozicionih pristupa a to je suviše malo identifikovanih (generisanih) varijanti (više-periodnih planova) [20].

## 2. PRISTUP ZA VIŠE-PERIODNO PLANIRANJE REKONFIGURACIJE

Više-periodni problem planiranja rekonfiguracije mreže je predstavljen težinskim grafom na slici 1. Svaki čvor na slici 1 predstavlja jednu statičku konfiguraciju mreže (stanje) dok svaki period predstavlja jednu etapu. U svakoj statičkoj konfiguraciji mreže su poznati statusi svih rasklopnih uređaja u mreži. To znači da su poznati trošak gubitaka i trošak usled prekida za razmatranu statičku konfiguraciju. Trošak prelaska iz stanja ( $i$ ) u etapi ( $t$ ) u stanje ( $l$ ) u etap ( $t+1$ ) je jednak trošku manipulacija koje se trebaju izvršiti u mreži da se pređe u stanje ( $l$ ) u etapi ( $t+1$ ).



Slika 1. Grafovski predstavu problema više-periodne rekonfiguracije

Svaki put u grafu koji počinje u početnom stanju (čvoru) i završava se u krajem (terminalnom) čvoru definiše jedan više-periodni plan. Kako trošak više-periodnog plana rekonfiguracije sumira sve troškove u svakoj etapi (periodu), ukupni trošak predstavlja „dužinu“ puta od početnog do krajnjeg čvora. Prema tome, najbolji više-periodni plan rekonfiguracije odgovara „najkraćem“ putu u grafu. Ovaj put se dobija primenom algoritma dinamičkog programiranja zasnovanog na rekurziji unazad koja je predstavljena relacijama (1)-(3).

$$TC^*(i_t) = \min_{(stanja\ l\ u\ etapit+1)} (C_{loss}(i_t) + C_{ens}(i_t) + C_{sw}(i_t, l_{t+1})) + TC^*(l_{t+1}) \quad (1)$$

$$(i, l) \in \{0, 1, 2, \dots, M\}, t \in \{0, 1, 2, \dots, T\}$$

$$TC^*(l_{T+1}) = 0 \quad (2)$$

$$C_{sw}(i_T, l_{T+1}) = 0 \quad (3)$$

U (1)-(3), T je broj razmatranih perioda (etapa), M je broj razmatranih statičkih konfiguracija mreže i  $TC^*(i_t)$  je optimalna vrednost ukupnog troška u stanju (konfiguraciji) (i) u etapi (t). Treba primetiti da je sadašnja (početna) konfiguracija mreže (stanje (čvor) označeno sa 0 na slici 1) takođe razmatrana da bi se omogućilo razmatranje i alternatife „ne raditi ništa“.

Skup čvorova (stanja) u grafu se dobija rešavanjem više-kriterijumskog statičkog problema rekonfiguracije u svakom od razmatranih perioda, odnosno generisanjem skupa neinferiornih rešenja u svakom periodu. Više-kriterijumski problem rekonfiguracije sa ograničenjima u prostoru kriterijumske funkcije [17] je definisan na sledeći način:

$$\min C_{loss}$$

sa ograničenjima:

$$a) C_{sw} \leq \overline{CS}, \quad \overline{CS} = [CS_{min}, CS_{max}] = CS_{min} + \alpha_{sw} \cdot (CS_{max} - CS_{min}), \alpha_{sw} \in [0, 1] \quad (4)$$

$$b) C_{ens} \leq \overline{CE}, \quad \overline{CE} = [CE_{min}, CE_{max}] = CE_{min} + \alpha_{ens} \cdot (CE_{max} - CE_{min}), \alpha_{ens} \in [0, 1]$$

c) Skup ostalih ograničenja prikazanih u poglavlju 3

U modelu (4),  $C_{loss}$  je trošak gubitaka,  $C_{sw}$  je trošak manipulacija i  $C_{ens}$  trošak prekida. Ovi troškovi su detaljnije opisani u poglavlju 3. Trošak prekida i trošak manipulacija su opisani intervalnim brojevima, kao što je prikazano u (4), da bi se omogućilo dobijanje skupa neinferiornih rešenja. Varirajući vrednosti  $\alpha_{sw}$  i  $\alpha_{ens}$  u (4) generiše se skup neinferiornih rešenja (statičkih konfiguracija). Donje i gornje granice ( $CS_{min}$ ,  $CS_{max}$ ) za trošak manipulacija i troška prekida ( $CE_{min}$ ,  $CE_{max}$ ) se dobijaju na sledeći način. Minimalni trošak prekida ( $CE_{min}$ ) se dobija rešavanjem (4) uz kriterijumsku funkciju definisanu kao  $\min C_{ens}$  i uz uvažavanje samo ograničenja pod c). Maksimalan trošak prekida se dobija na sledeći način:  $CE_{max} = \max\{CE(CS_{min}), CE(CL_{min})\}$ . Ovde je  $CE(CL_{min})$  trošak prekida koji se dobija kod konfiguracije mreže u kojoj je trošak gubitaka minimalan ( $CL_{min}$ ). Takva konfiguracija se dobija rešavanjem (4) i uvažavanjem samo ograničenja pod c).  $CE(CS_{min})$  je trošak prekida koji postoji u početnoj konfiguraciji mreže u kojoj je trošak manipulacija ( $CS_{min}$ ) jednak nuli. Vrednost  $CS_{max}$  se dobija na sledeći način:  $CS_{max} = \max\{CS(CE_{min}), CS(CL_{min})\}$ . Ovde je  $CS(CE_{min})$  trošak manipulacija za prelazak u konfiguraciju mreže sa minimalnim troškom.  $CS(CL_{min})$  je trošak manipulacija za prelazak u konfiguraciju sa minimalnim troškom gubitaka.

Parametarsko variranje vrednosti  $\alpha_{sw}$  i  $\alpha_{ens}$  u (4) omogućuje dobijanje skupa neinferiornih rešenja (konfiguracija mreže) u svakom od razmatranih perioda. Uvažavajući neinferiorna rešenja dobijena u svakom od razmatranih perioda dobija se skup neinferiornih rešenja koji predstavlja stanja (čvorove) koji se razmatraju u svakoj etapi prikazanoj u grafu na slici 1. Optimizacioni problem (4) je modelovan u terminima više-kriterijumskog mešovito celobrojnog linearnog programiranja (MOMILP) uz eksplicitno uvažavanje uticaja automatizovanih rasklopnih uređaja na trajanje prekida napajanja. Predloženi MOMILP model je prikazan u poglavlju 3.

### 3. VIŠE-KRITERIJUMSKI MILP MODEL ZA STATIČKKU REKONFIGURACIJU DISTRIBUTIVNIH MREŽA SA UVAŽENIM AUTOMATIZOVANIM RASKLOPNIM UREĐAJIMA

a) *Kriterijumska funkcija:*

$$\min C_{loss} = \sum_{a \in A} R_a \cdot \Delta t \cdot \frac{1}{V_{nom}^2} (\sum_{ns=1}^{NSP} (p_{a,ns} + p'_{a,ns}) \cdot K_{LOSSp_{a,ns}} + \sum_{ns=1}^{NSP} (q_{a,ns} + q'_{a,ns}) \cdot K_{LOSSq_{a,ns}}) \quad (5)$$

a') *Ograničenja u prostoru kriterijumske funkcije:*

$$\sum_{a \in ENC} (1 - w_a) \cdot C_{swa} + \sum_{a \in NO} w_a \cdot C_{swa} \leq CS_{min} + \alpha_{sw} \cdot (CS_{max} - CS_{min}), \alpha_{sw} \in [0, 1] \quad (6)$$

$$\sum_{a \in A} C_{INT_{min}} \cdot L_a \cdot \lambda_a \cdot ENSR(a, f) + \sum_{i \in N_{TOT}} C_{INT_i} \cdot ENSISL(i) \leq CE_{min} + \alpha_{ens} (CE_{max} - CE_{min}), \alpha_{ens} \in [0, 1] \quad (7)$$

Izrazom (5) definisani su troškovi gubitaka ( $C_{loss}$ ). Oni su modelovani koristeći aproksimaciju kvadratne funkcije funkcijom koja je linearna po delovima, a koja se sastoji od NSP linearnih segmenata [22]. Ograničenja (6) i (7) predstavljaju ograničenja u prostoru kriterijumske funkcije, kako je opisano u poglavlju 2. Izrazom (6) definisani su troškovi manipulacija ( $C_{sw}$ ), koji variraju između minimalne ( $CS_{min}$ ) i maksimalne ( $CS_{max}$ ) vrednosti, kako je opisano u poglavlju 2. Izrazom (7) definisani su troškovi prekida ( $C_{ens}$ ), koji variraju na isti način kao i troškovi manipulacija.

b) *Bilans aktivnih i reaktivnih snaga u čvorovima distributivne mreže:*

$$\sum_{(a,a') \in T_n} (p_a + p_{a'}) - \sum_{(a,a') \in F_n} (p_a + p_{a'}) = P_{loss}(a) + PL_n - PG_n \quad (8)$$

$$\sum_{(a,a') \in T_n} (q_a + q_{a'}) - \sum_{(a,a') \in F_n} (q_a + q_{a'}) = Q_{loss}(a) + QL_n - QG_n \quad (9)$$

$$P_{loss}(a) = R_a \cdot \frac{1}{V_{nom}^2} (\sum_{ns=1}^{NSP} (p_{a,ns} + p_{a',ns}) \cdot K_{LOSSP_{a,ns}} + \sum_{ns=1}^{NSP} (q_{a,ns} + q_{a',ns}) \cdot K_{LOSSQ_{a,ns}}), (a, a') \in T_n \quad (10)$$

$$Q_{loss}(a) = X_a \cdot \frac{1}{V_{nom}^2} (\sum_{ns=1}^{NSP} (p_{a,ns} + p_{a',ns}) \cdot K_{LOSSP_{a,ns}} + \sum_{ns=1}^{NSP} (q_{a,ns} + q_{a',ns}) \cdot K_{LOSSQ_{a,ns}}), (a, a') \in T_n \quad (11)$$

$n \in N_{TOT}$

c) *Termička ograničenja:*

Termička (12)-(16) i naponska (17)-(24) ograničenja su linearizovana koristeći poligonski region formiran od grupe linearnih segmenata [23]–[26].

$$q_a = \sum_{ns=1}^{NSP} q_{a,ns}, \quad q_{a'} = \sum_{ns=1}^{NSP} q_{a',ns}, \quad p_a = \sum_{ns=1}^{NSP} p_{a,ns}, \quad p_{a'} = \sum_{ns=1}^{NSP} p_{a',ns} \quad (12)$$

$$q_a \leq w_a \cdot S_{a,max}, \quad q_{a'} \leq w_{a'} \cdot S_{a,max} \quad (13)$$

$$p_a + \sum_{ns=1}^{NSP} p_{seg_{ns}} \cdot (q_{a,ns} + q_{a',ns}) \leq w_a \cdot S_{a,max}, \quad p_{a'} + \sum_{ns=1}^{NSP} p_{seg_{ns}} \cdot (q_{a,ns} + q_{a',ns}) \leq w_{a'} \cdot S_{a,max} \quad (14)$$

$$p_{seg_{ns}} = (P_{ns} - P_{ns+1}) / (Q_{ns+1} - Q_{ns}), \quad ns=1, \dots, NSP, \quad (15)$$

$$p_{a,ns} \leq P_{ns} - P_{ns+1}, \quad q_{a,ns} \leq Q_{ns+1} - Q_{ns}, \quad P_1 = S_{max}, \quad Q_1 = 0, \quad (16)$$

d) *Naponska ograničenja:*

$$V_l^{Re} \geq V_n^{Re} + [R_a \cdot (p_a - p_{a'}) - X_a \cdot (q_a - q_{a'})] / V_{nom} - w_a \cdot V^{min} \quad (17)$$

$$V_l^{Re} \leq V_n^{Re} + [R_a \cdot (p_a - p_{a'}) - X_a \cdot (q_a - q_{a'})] / V_{nom} + w_a \cdot V^{min} \quad (18)$$

$$V_l^{Im} \geq V_n^{Im} + [X_a \cdot (p_a - p_{a'}) + R_a \cdot (q_a - q_{a'})] / V_{nom} - w_a \cdot V^{min} \quad (19)$$

$$V_l^{Im} \leq V_n^{Im} + [X_a \cdot (p_a - p_{a'}) + R_a \cdot (q_a - q_{a'})] / V_{nom} + w_a \cdot V^{min} \quad (20)$$

$$V_l^{Im} = \sum_{ns=1}^{NSV} V_{l,ns}^{Im}, \quad V_l^{Re} + \sum_{ns=1}^{NSV} v_{segmn}_{ns} \cdot V_{l,ns}^{Im} \geq V^{min}, \quad V_l^{Re} + \sum_{ns=1}^{NSV} v_{segmx}_{ns} \cdot V_{l,ns}^{Im} \leq V^{max}, \quad m, l \in N_{TOT} \quad (21)$$

$$v_{segmn}_{ns} \cdot w_{ns} \leq v_{segmn}_{ns} \leq v_{segmn}_{ns} \cdot w_{ns-1}, \quad ns=1, \dots, NSV, \quad w_0 = 1 \quad (22)$$

$$v_{segmx}_{ns} = (V_{ns+1}^{Re} - V_{ns}^{Re}) / (V_{ns}^{Im} - V_{ns+1}^{Im}), \quad V_1^{Re} = V^{max}, \quad ns=1, \dots, NSV \quad (23)$$

$$v_{segmn}_{ns} = (V_{ns}^{Im} - V_{ns+1}^{Im}) / (V_{ns}^{Re} - V_{ns+1}^{Re}), \quad V_1^{Re} = V^{min}, \quad ns=1, \dots, NSV \quad (24)$$

e) *Neisporučena električna energija usled kvarova:*

Ukupno trajanje prekida napajanja potrošača može se podeliti na dve komponente: 1) trajanje restauracije napajanja i 2) trajanje lokalizacije i izolacije kvara. Prva komponenta je uvažena izrazima (25)-(41), a druga izrazima (42)-(43). Takođe, pretpostavlja se da je plan automatizacije distributivne mreže, tj. broj i lokacija automatizovanih rasklopnih uređaja u distributivnoj mreži, određen tako da je omogućen transfer potrošača na susedne izvode bez narušavanja pogonskih ograničenja tokom popravke kvarova [21].

e1) *Neisporučena električna energija tokom restauracije napajanja:*

$$\sum_{(a,a') \in T_n} (p_a^f + p_{a'}^f) - \sum_{(a,a') \in F_n} (p_a^f + p_{a'}^f) = KREL_n \cdot PL_n + KREL_n \cdot PG_n, \quad n \in N_{TOT} \quad (25)$$

Jednačina (25) predstavlja bilans snaga u fiktivnoj distributivnoj mreži sa fiktivnim potrošačima i fiktivnim distribuiranim generatorima. Ovde  $KREL_n$  predstavlja odnos između  $C_{INT_n}$  i  $C_{INT_{min}}$ . Fiktivni tokovi snaga se koriste za proračun neisporučene električne energije usled kvarova, pri čemu se uvažavaju cene neisporučene električne energije koja mogu biti različite za pojedine potrošače u distributivnoj mreži.

$$ww_a - w_a \leq 0 \quad (26)$$

$$\Delta p(a, f, as', as'') = \left[ \prod_{a \in A2(a, f, as', as'', k(a, f, sf))} ww_a \right] \cdot (1 - ww_{a=as''}) \cdot (p_{a=as'}^f + p_{a'=as''}^f), \quad (27)$$

$$\forall [as'' \in ASD(as', a, f, sf, k(a, f, sf)) \wedge as' \in AS(a, f, sf, k(a, f, sf))]$$

$$\forall [(as'' \in ASDF(as', a, f)) \wedge as' \in ASF(a, f)]$$

$$f \in FN, \quad sf \in SF(f), \quad k(a, f, sf) \in SK(a, f, sf)$$

Jednačina (27) uvažava svaki par automatizovanih rasklopnih uređaja koji se nalaze ispod (nizvodno od) grane ( $a$ ) na izvodu ( $f$ ). Pri tome se automatizovani rasklopni uređaj ( $as'$ ) nalazi ispod grane ( $a$ ), dok se ( $as''$ ) nalazi ispod ( $as'$ ). Rasklopni uređaji ( $as'$ ) i ( $as''$ ) pripadaju petlji  $k(a, f, sf)$ , koja sadrži granu ( $a$ ), kao i sve grane koje se nalaze između početka izvoda ( $f$ ) i početka susednog izvoda ( $sf$ ). Dakle, jednačina (27) se definiše za svaku petlju koja sadrži granu ( $a$ ). Ova jednačina opisuje sledeće: ako je rasklopni uređaj ( $as''$ ) otvoren ( $ww_{a=as''} = 0$ ), svi potrošači između ( $as'$ ) i ( $as''$ ) se prebacuju na susedni izvod ( $sf$ ) odmah nakon kvara na grani ( $a$ ).

$$\Delta PP(a, f) = (p_a^f + p_{a'}^f) - \sum_{as' \in ASSC(\cdot)} \Delta p(a, f, as', as''), \quad as'' \in (ASD(a', f, sf, k(a, f, sf))), \quad (28)$$

$$\Delta P(a, f, as', as'') = (p_a^f + p_{a'}^f) - \Delta p(a, f, as', as''), \quad (29)$$

$$as' \in \left[ (AS(a, f, sf, k(a, f, sf)) \cup ASF(a, f)) \setminus ASSC(a, f, sf) \right], \quad as'' \in (ASD(a', f, sf, k(a, f, sf)))$$

$$\Delta P(a, f) \geq (d_a^{as}) \cdot [w_{fxx}(a, f) \cdot \Delta PP(a, f) + \sum_{as'' \in ASD(\cdot) \wedge as' \notin ASSC(\cdot)} w_{fxx}(a, f, as', as'') \cdot \Delta P(a, f, as', as'')] \quad (30)$$

$$as' \in (AS(a, f, sf, k(a, f, sf)))$$

$$w_{fxx}(a, f) + \sum_{as'' \in ASD(\cdot) \wedge as' \notin ASSC(\cdot)} w_{fxx}(a, f, as', as'') = 1 \quad (31)$$

Jednačine (28) i (29) opisuju potrošnju koja se može biti prebačena na susedni izvod koristeći ( $as'$ ) i ( $as''$ ).

Jednačina (28) se odnosi na konfiguracije izvoda u kojima se restauracija napajanja nakon kvara postiže prebacivanjem potrošača na više susednih izvoda. Dalje, jednačinama (29) su uvaženi svi slučajevi koji nisu pokriveni sa (28). Izrazi (30) i (31) obezbeđuju da se samo jedna vrednost neisporučene električne energije  $\Delta P(\cdot)$  uvažava u proračunu. Ovde je potrebno primetiti da se za svaku granu ( $a$ ) definiše po jedan izraz (30) i (31). U (30)  $d_a^{as}$  predstavlja trajanje restauracije napajanja za potrošače koji se ne mogu prebaciti na susedne izvode pomoću rasklopnih uređaja ( $as'$ ) i ( $as''$ ). Ovaj parametar je jednak vremenu potrebnom za manipulaciju automatizovanim rasklopnim uređajem.

$$\Delta P(a, f) \geq M \cdot \{1 - \sum_{\substack{as' \in \Phi \\ as'' \in \Gamma}} [\prod_{a \in A2(a, f, as', as'', k(a, f, sf))} ww_a] \cdot ww_{a=as''}\} \cdot (p_a^f + p_a^{f'}) \quad (32)$$

$$\Phi \equiv AS(a, f, sf, k(a, f, sf)), \quad \Gamma \equiv ASD(as', a, f, sf, k(a, f, sf)) \cup ASDF(as', a, f)$$

Jednačina (32) obezbeđuje sledeće: ako ne postoji par automatizovanih rasklopnih uređaja ispod grane ( $a$ ) takvih da je ( $as'$ ) zatvoren, a ( $as''$ ) otvoren, promenljiva  $\Delta P(a, f)$  dobija veliku vrednost ( $M$ ). Na ovaj način je obezbeđeno da se troškovi neisporučene energije proračunavaju koristeći izraze koji su dati u nastavku.

$$\begin{aligned} \Delta y(a, f, as') &= \{1 - \prod_{a \in A1(a, f, as', k(a, f, sf))} ww_a\} \cdot (p_a^f + p_a^{f'}) \cdot d_a^{nos} + [\prod_{a \in A1(\cdot)} ww_a] \cdot ww_{a=as'} \cdot (p_{a=as'}^f + \\ & p_{a=as'}^{f'}) \cdot (d_a^{nos} + d_a^{as}) + [\prod_{a \in A1(\cdot)} ww_a] \cdot ww_{a=as'} \cdot \{(p_a^f + p_a^{f'}) - (p_{a=as'}^f + p_{a=as'}^{f'})\} \cdot (d_a^{nos} + d_a^{as}) + \\ & [\prod_{a \in A1(\cdot)} ww_a] \cdot \{1 - ww_{a=as'}\} \cdot (p_a^f + p_a^{f'}) \cdot d_a^{as}, \quad as' \in AS(a, f, sf, k(a, f, sf)) \cup ASF(a, f) \end{aligned} \quad (33)$$

$$\Delta YY(a, f) = \sum_{as' \in ASSC(a, f, sf)} \Delta y(a, f, as'), \quad (34)$$

$$\Delta Y(a, f) = wfy(a, f) \cdot \Delta YY(a, f) + \sum_{as' \in AS(\cdot) \wedge as' \notin ASSC(\cdot)} wfy(a, f, as') \cdot \Delta y(a, f, as') \quad (35)$$

$$wfy(a, f) + \sum_{as' \in AS(\cdot) \wedge as' \notin ASSC(\cdot)} wfy(a, f, as') = 1 \quad (36)$$

Izrazi (26)-(32) definisani su za svaku petlju koja pripada skupu  $SF(a, f, sf)$  i koja sadrži više od jednog automatizovanog rasklopnog uređaja, dok se izrazi (33)-(36) odnose se na petlje iz skupa  $SF(a, f, sf)$  koje sadrži samo jedan automatizovani rasklopni uređaj. Prvi sabirak u izrazu (33) definiše sledeće: ako postoji ručno upravljani rasklopni uređaj koji je otvoren (NOS), a nema automatizovanih rasklopnih uređaja između njega i grane sa kvarom ( $a$ ), onda je trajanje restauracije napajanja za potrošače ispod grane ( $a$ ) jednako vremenu koje je potrebno da se ručno zatvori NOS, a koje je označeno sa  $d_a^{nos}$ . Drugi sabirak u izrazu (33) definiše sledeće: ako postoji automatizovani rasklopni uređaj ( $as'$ ) ispod grane ( $a$ ) koji je zatvoren ( $ww_{a=as'}=1$ ), trajanje restauracije napajanja za potrošače ispod ( $as'$ ) će biti jednako  $d_a^{nos}$ . Za potrošače koji se nalaze između ( $as'$ ) i grane ( $a$ ), trajanje restauracije će biti jednako zbiru  $d_a^{nos}$  i vremena koje je potrebno da se zatvori automatizovani rasklopni uređaj  $d_a^{as}$ , što je definisano trećim sabirkom u (33). Četvrti sabirak u izrazu (33) definiše sledeće: ako postoji automatizovani rasklopni uređaj ( $as'$ ) ispod grane ( $a$ ) koji je otvoren ( $ww_{a=as'}=0$ ), trajanje restauracije napajanja će biti jednako  $d_a^{as}$  za potrošače koji se nalaze između grane ( $a$ ) i automatizovanog rasklopnog uređaja ( $as'$ ). Objašnjene izraza (34), (35) i (36) redom isto je kao i za izraze (29), (30) i (31).

$$\Delta Z(a, f, sf, k(a, f, sf)) = (p_a^f + p_a^{f'}) \cdot d_a^{nos} \quad (37)$$

Jednačine (37) definišu se za petlje iz skupa  $SF(a, f, sf)$  koje ne sadrže nijedan automatizovani rasklopni uređaj. Njima se obezbeđuje da je vreme restauracije potrošača koji se nalaze ispod grane ( $a$ ) jednako  $d_a^{nos}$ . Sada, neisporučena električna energija usled kvara na grani ( $a$ ) tokom restauracije napajanja računa se na sledeći način:

$$ENSR(a, f) = wwy(a, f) \cdot \Delta Y(a, f) + wwz(a, f) \cdot \Delta P(a, f) + wwz(a, f) \cdot \Delta Z(a, f) \quad (38)$$

$$wwy(a, f) + wwz(a, f) + wwz(a, f) = 1 \quad (39)$$

Jednačine (38) i (39) obezbeđuju da se samo jedna od vrednosti koje su dobijene izrazima (27)-(37) koristi kao vrednost neisporučene energije tokom restauracije napajanja.

$$ENSR(a, f) = (p_a^f + p_a^{f'}) \cdot d_a^{repair} \quad (40)$$

U slučaju da ne postoji NOS ispod grane ( $a$ ), neisporučena električna energija usled kvara na grani ( $a$ ) tokom restauracije napajanja se računa prema izrazu (40), pri čemu je  $d_a^{repair}$  vreme popravke grane ( $a$ ).

e2) *Termiča ograničenja u fiktivnoj mreži:*

$$p_a^f - ww_a \cdot X_{max}^f \leq 0, \quad p_a^{f'} - ww_a \cdot X_{max}^f \leq 0, \quad a \in A, \quad (41)$$

Izrazi (41) obezbeđuju da u fiktivnoj mreži postoje samo grane koje su zatvorene u realnoj mreži, dok sam kapacitet grana nije od interesa. Dakle,  $X_{max}^f$  je dovoljno velika konstanta.

e3) *Neisporučena električna energija tokom lokalizacije i izolacije kvarova:*

$$ENSISL(i) = (PL_i + PG_i) \cdot \lambda_a \cdot d_a^{loc} \cdot \sum_{k(i, f, sf) \in NK(i, f, sf)} \sum_{a \in k(i, f, sf)} [\prod_{a \in AGM(\cdot)} \prod_{a \in AGS(\cdot)} ww_a \cdot \prod_{a \in AGS(\cdot)} was_a], \quad i \in N_{TOT}, \quad sf \in SF(f) \quad (42)$$

$$was_a = wfas_{a=as} \cdot (1 - ww_{a=as}), \quad wfas_{a=as} - ww_{a=as} \leq 0 \quad (43)$$

Izrazi (42)-(43) definišu neisporučenu električnu energiju u svakom čvoru distributivne mreži tokom perioda lokalizacije i izolacije kvarova ( $d_a^{loc}$ ). Ovim ograničenjima je uvaženo sledeće: ako su grana ( $a$ ) i čvor ( $i$ ) povezani i ako postoji automatizovani rasklopni uređaj između grane ( $a$ ) i čvora ( $i$ ), trajanje lokalizacije i izolacije kvara na grani ( $a$ ) ne utiče na neisporučenu električnu energiju u čvoru ( $i$ ).

f) Radijalna konfiguracija distributivne mreže:

$$\sum_{a \in M_E} w_a \leq n_{TOT} - n_S \quad (44)$$

$$\sum_{(a,a') \in T_n} (x_a^{DG} + x_{a'}^{DG}) - \sum_{(a,a') \in F_n} (x_a^{DG} + x_{a'}^{DG}) = KDG_n, (n \in N_{TOT}) \quad (45)$$

$$KDG_n = 1 \quad \forall n \in N_{DG}, \quad KDG_n = 0 \quad \forall n \notin N_{DG} \quad (46)$$

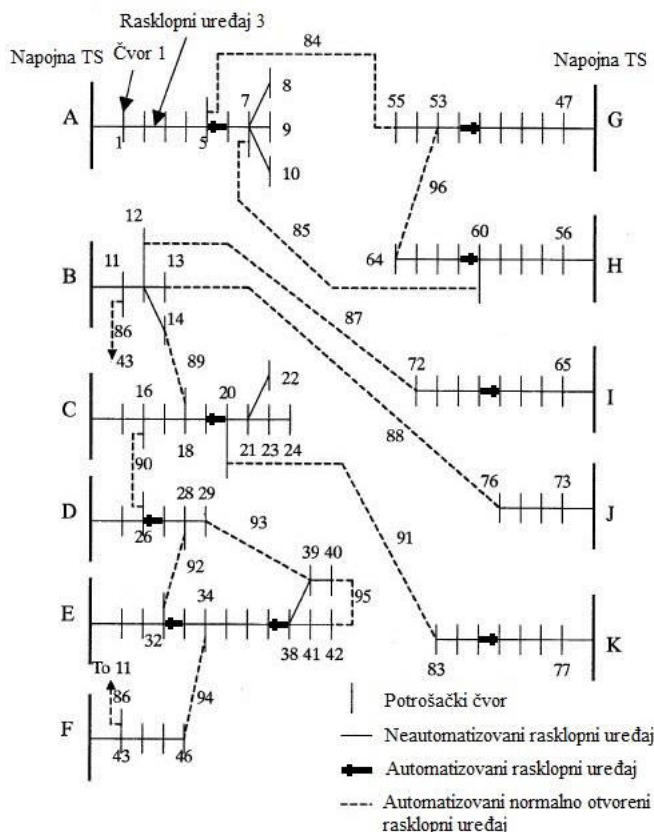
$$x_a^{DG} - n_{dg} \cdot w_a \leq 0, \quad x_{a'}^{DG} - n_{dg} \cdot w_a \leq 0 \quad (47)$$

Ograničenjima (44)-(47) obezbeđuju se radijana konfiguracija distributivne mreže, u kojoj nema distribuiranih generatora u ostrvskom režimu rada [27].

Proizvodi binarnih promenljivih kao i proizvodi binarnih i kontinualnih promenljivih koji se pojavljuju u izrazima (5)-(43) mogu se linearizovati koristeći pristup prikazan u [28]. Ovde je potrebno naglasiti i da se dekompozicioni pristup koji je predložen u [22] za rešavanje problema planiranja distributivnih mreža velikih dimenzija može primeniti i na problem koji je prikazan u ovom poglavlju, kako bi se smanjila računarska kompleksnost MILP modela (5)-(47).

#### 4. NUMERIČKI REZULTATI

Predloženi pristup je primenjen na 11.4 kV distributivnoj mreži koja je prikazana na slici 2. Prikazana mreža se sastoji od 83 čvora i 96 grana, a parametri mreže su dati u [29]. Pretpostavlja se da je minimalni dozvoljeni napon u čvorovima distributivne mreže 10.8 kV, a maksimalni dozvoljeni napon 12 kV. Takođe, pretpostavlja se da je 9 zatvorenih rasklopnih uređaja automatizovano, kako je prikazano na slici 2, dok tu ostali rasklopnih uređaji neautomatizovani (ručno upravljani). Smatra se da su svi normalno otvoreni rasklopnih uređaji automatizovani. Pretpostavlja se da potrošači pripadaju jednom od tri tipa: stambeni, komercijalni, industrijski, kako je prikazano u Tabeli 1. Za svaki od njih razmatraju se po dva dnevna dijagrama potrošnje koji su preuzeti iz [21], a koji se odnose na radne dane i vikende tokom zimske sezone. Dalje, cena prekida napajanja za stambene, komercijalne i industrijske potrošače su redom 0.5 USD/kWh, 15.55 USD/kWh i 5.39 USD/kWh [21].



Slika 2. Razmatrana distributivna mreža [29]

Tabela 1. Tipovi potrošača u čvorovima distributivne mreže

	Stambeni potrošači	Komercijalni potrošači	Industrijski potrošači
Čvorovi	1-4, 8-10, 15, 16, 23-28, 30-33, 37-40, 47-51, 54, 55, 63-72, 77-79	5-7, 11-14, 17-22, 29, 34-36, 41-46, 52, 53, 56-62, 80-83	73-76



Usvojene su i sledeće vrednosti parametara: cena gubitaka električne energije je 0.05 USD/kWh, potrebno vreme za lokalizaciju i izolaciju kvara ( $d_a^{loc}$ ) 40 minuta, potrebno vreme da se zatvori manuelni rasklopni uređaj ( $d_a^{nos}$ ) je 30 minuta, godišnja stopa trajnih kvarova za grane distributivne mreže je 0.2 kvarova po kilometru, cena manipulacije za automatizovani rasklopni uređaj je 2 USD, a za neautomatizovani je 20 USD, uključujući i trošak ekipe na terenu. Dužina grane 23, koja spaja čvorove 21 i 23 je 1 km, dok se dužine ostalih grana računaju na sledeći način: (otpornost date grana / otpornost grane 23) x 1 km. Broj segmenata koji se koriste za linearizaciju tokova snaga po granama i cenu gubitaka je NSP=10.

Tabela 2. Rezultati više-periodnog planiranja rekonfiguracije za različite periode planiranja

Period planiranja	Optimalan plan rekonfiguracije				Otvoreni rasklopni uređaji
	Trošak gubitaka [USD]	Trošak prekida [USD]	Trošak manipulacija [USD]	Ukupni trošak [USD]	
Sat	20.6	12.6	0	33.6	84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96
Dan	336.9	197.8	8	542.7	33, 38, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 95, 96
Nedelja	2256.9	1225.6	20	3502.5	(6, 33, 38, 61, 84, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 95)* (6, 33, 38, 61, 69, 84, 86, 88, 89, 90, 91, 92, 95)**
Mesec	8537.1	4762.2	60	13359.3	6, 33, 38, 54, 61, 72, 86, 88, 89, 90, 91, 92, 95

\* – radni dan; \*\* – vikend

Predložena metodologija primenjena je za 4 perioda (horizonta) planiranja: sat, dan, nedelja i mesec. Satni period planiranja odnosi se na sat sa vršnim opterećenjem tokom radnog dana, dok se dnevni period planiranja odnosi na radni dan. U svim proračunima razmatraju se periodi od jednog sata. Sledeće je takođe usvojeno:  $(\alpha_{sw}, \alpha_{ens}) \in \{0, 0.25, 0.50, 0.75, 1\}$ . Dakle, za svaki period se određuje  $5 \times 5 = 25$  konfiguracija distributivne mreže rešavanjem optimizacionog modela koji je prikazan u poglavlju 3. Na ovaj način dobijeno je 9 različitih konfiguracija za satni period planiranja, 87 konfiguracija za dnevni period planiranja i 140 različitih konfiguracija za nedeljni i mesečni period planiranja. Koristeći ove konfiguracije i proceduru dinamičkog programiranja koja je prikazana u poglavlju 2 dobijeni su optimalni više-periodni planovi rekonfiguracije za razmatrane periode planiranja. Dobijeni rezultati su prikazani u Tabeli 2. Oni pokazuju da sa povećanjem perioda planiranja broj manipulacija takođe raste. Naime, nije dobijena nijedna manipulacija za satni period planiranja, dobijene su 4 manipulacije za dnevni period planiranja, 10 manipulacija za nedeljni period planiranja i 12 manipulacija za mesečni period planiranja. Na ovom mestu je potrebno primetiti da se u slučaju satnog perioda planiranja inicijalna konfiguracija ne menja. Objašnjenje ovog rezultata je u tome što je cena manipulacija veća od uštede u troškovima gubitaka i prekida. Takođe, za nedeljni period planiranja dobijene su dve konfiguracije koje se odnose na radni dan i vikend, dok je ostale horizonte planiranja dobijena po jedna promena konfiguracije. Dobijeni rezultati pokazuju da je previše kratak period planiranja vodi do lošijih više-periodnih planova rekonfiguracije distributivne mreže.

Tabela 3. Poređenje različitih mesečnih planova

Plan	Otvoreni rasklopni uređaji	Trošak gubitaka [USD]	Trošak prekida [USD]	Trošak manipulacija [USD]	Ukupni trošak [USD]
P1	6, 33, 38, 54, 61, 72, 86, 88, 89, 90, 91, 92, 95	8537.1	4762.2	60	13359.3
P2 [14]	7, 33, 36, 62, 72, 83, 84, 86, 88, 89, 90, 92, 95	8202.7	6731.3	114	15048.0
P3	7, 13, 33, 61, 69, 84, 86, 89, 90, 91, 92, 93, 95	8037.4	6306.9	56	14400.3
P4 [8]	6, 33, 36, 61, 69, 84, 86, 88, 89, 90, 91, 92, 95	9144.2	5037.3	38	14219.2

U nastavku, 4 mesečna više-periodna plana rekonfiguracije, koji su prikazani u Tabeli 3 su analizirani i upoređeni. Plan P1 predstavlja optimalan više-periodni plan rekonfiguracije dobijen pristupom koji je predložen u ovom radu. Plan P2 je dobijen pristupom koji je predložen u [14], u kome se ne uvažava uticaj automatizovanih rasklopnih uređaja na trajanje prekida kao i trajanje prekida za potrošače koji se nalaze iznad, tj. „uzvodno“ od mesta kvara. Rezultati prikazani u Tabeli 3 pokazuju da pristup predložen u ovom radu obezbeđuje bolje rešenje nego pristup predložen u [14]. Ovde treba naglasiti da su troškovi prekida za plan P2 proračunati naknadno, uz uvažavanje uticaja automatizovanih rasklopnih uređaja. Naime, troškovi prekida su ovde proračunati za poznatu konfiguraciju (P2) koristeći jednačine (25)-(43). Prikazani rezultati pokazuju značaj uvažavanja automatizovanih rasklopnih uređaja, kao i važnost što tačnijeg proračuna troškova prekida u više-periodnom planiranju rekonfiguracije. Plan P3 je dobijen zanemarivanjem uticaja automatizovanih rasklopnih uređaja, opisanog jednačinama (25)-(43), na troškove prekida. Naime, smatra se da su u ovom slučaju svi rasklopni uređaji ručno upravljani. Troškovi prekida za plan P3, koji su prikazani u Tabeli 3, proračunati su kao i u slučaju plana P2, tj. sa naknadno uvažanim jednačinama (25)-(43). Ovde je potrebno primetiti da plan P1 ima manje ukupne troškove u odnosu na plan P3.

Ovaj rezultat pokazuje da uticaj automatizovanih rasklopnih uređaja na trajanje prekida, koji je opisan izrazima (25)-(43), mora biti uvažen u optimizacionom algoritmu kako bi se dobilo najbolje rešenje.

Na kraju, plan P4 je dobijen tako što je u svakom periodu određena po jedna statička konfiguracija distributivne mreže, kako je predloženo u [8]. Na ovaj način dobijeno je 19 različitih statičkih konfiguracija. U tom smislu, 19 različitih stanja je razmatrano u svakom periodu u algoritmu dinamičkog programiranja (videti sliku 1). Međutim, više-kriterijumskim pristupom koji je predložen u ovom radu generisano je 140 različitih statičkih konfiguracija (stanja). Na ovaj način omogućeni su generisanje i evaluacija znatno većeg broja više-periodnih planova rekonfiguracije. Kao rezultat, dobijeno je rešenje, tj. plan P1 sa manjim ukupnim troškovima u odnosu na plan P4. Ovaj rezultat pokazuje da pristupi koji generišu i ocenjuju manji broj više-periodnih planova, kao što su oni predloženi u [8]-[13], vrlo verovatno obezbeđuju manje kvalitetna rešenja.

## 5. ZAKLJUČAK

U ovom radu je predložen pristup za određivanje najboljeg više-periodnog plana rekonfiguracije u automatizovanim distributivnim mrežama. Predloženim pristupom problem više-periodnog planiranja rekonfiguracije predstavljen je u formi težinskog grafa, gde je cilj da se odredi putanja sa najmanjom težinom (tj. najkaći put). Čvorovi (stanja) u ovom grafu predstavljaju statičke konfiguracije distributivne mreže iz skupa konfiguracija mreže koji je dobijen rešavanjem predloženog više-kriterijumskog MILP modela u svakom periodu. Najkraća putanja u grafu je dobijena primenom algoritma dinamičkog programiranja zasnovanog na rekurziji unazad. Predstavljeni numerički rezultati pokazuju da predloženi pristup obezbeđuje dobijanje vrlo kvalitetnog više-periodnog plana rekonfiguracije. Oni takođe pokazuju da automatizovani rasklopnih uređaji u velikoj meri utiču na proces donošenja odluke i da je potrebno da budu uvaženi u pristupima i modelima za planiranje rekonfiguracije distributivnih mreža.

## 6. LITERATURA

- [1] Mishra S, Das D, Paul S, 2017, "A comprehensive review on power distribution network reconfiguration", *Energy Syst.*, 8, 227-284.
- [2] Usman M, Coppo M, Bignucolo F, Turri R, 2018, "Losses management strategies in active distribution networks – A review", *Electr Power Syst Res.*, 163(A), 116-132.
- [3] Alam MS, Arefifar SA, 2019, "Energy management in power distribution systems: Review, classification, limitations and challenges", *IEEE Access*, 7, 92979-93001.
- [4] Souza S, Romero R, Pereira J, Saraiva JT, 2016, "Artificial immune algorithm applied to distribution system reconfiguration with variable demand", *Int Jour of Electr Power & Energy Syst.*, 82, 561-568.
- [5] Azizivahed A, Narimani H, Fathi M, Naderi E, Safarpour HR, Narimani MR, 2018, "Multi-objective dynamic distribution feeder reconfiguration in automated distribution systems", *Energy*, 147, 896-914.
- [6] Esmaeilia S, Anvari-Moghaddamb A, Jadida S, Guerrerob JM, 2019, "Optimal simultaneous day-ahead scheduling and hourly reconfiguration of distribution systems considering responsive loads", *Int Jour of Electr Power & Energy Syst.*, 104, 537-548.
- [7] Yin SA, Lu CN, 2009, "Distribution feeder scheduling considering variable load profile and outage costs", *IEEE Trans Power Sys.*, 24(2), 652-660.
- [8] Shariatkhah MH, Haghifam MR, Salehi J, Moser A, 2012, "Duration based reconfiguration of electric distribution networks using dynamic programming and harmony search algorithm", *Int Jour of Electr Power & Energy Syst.*, 41(1), 1-10.
- [9] Ghofrani-Jahromi Z, Kazemi M, Ehsan M, 2015, "Distribution switches upgrade for loss reduction and reliability improvement", *IEEE Trans Power Del.*, 30(2), 684-692.
- [10] Nafisi H, Farahani V, Abyaneh HA, Abedi M, 2015, "Optimal daily scheduling of reconfiguration based on minimization of the cost of energy losses and switching operations in microgrids", *IET Gener Transm Distrib.*, 9(6), 513 – 522.
- [11] Tahboub AM, Pandi VR, Zeineldin HH, 2015, "Distribution system reconfiguration for annual energy loss reduction considering variable distributed generation profiles", *IEEE Trans Power Del.*, 30(4), 1677-1685.
- [12] Fu YY, Chiang HD, 2018, "Toward optimal multiperiod network reconfiguration for increasing the hosting capacity of distribution networks", *IEEE Trans Power Del.*, 33(5), 2294-2304.
- [13] Lei S, Hou Y, Qiu F, Yan J, 2018, "Identification of critical switches for integrating renewable distributed generation by dynamic network reconfiguration", *IEEE Trans on Sustainable Energy*, 9(1), 420-432.

- [14] Kovacki NV, Vidovic PM, Saric AT, 2018, “Scalable algorithm for the dynamic reconfiguration of the distribution network using the Lagrange relaxation approach”, *Int Jour of Electr Power & Energy Syst.*, 94, 188-202.
- [15] Hoffman KL, Padberg M, 2001, “Combinatorial and integer optimization”, Gass SI, Harris CM, “*Encyclopedia of Operations Research and Management Science*”, New York: Springer.
- [16] Popovic ZN, Knezevic SD, Popovic DS, 2019, “Risk-based allocation of automation devices in distribution networks with performance-based regulation of continuity of supply”, *IEEE Trans Power Sys.*, 34(1), 171-181.
- [17] Cohon JL, Marks DH, 1975, “A review and evaluation of multiobjective programming techniques”, *Water resources research*, 11(2), 208-220.
- [18] Muñoz-Delgado G, Contreras J, Arroyo JM, 2016, “Multistage generation and network expansion planning in distribution systems considering uncertainty and reliability”, *IEEE Trans Power Sys.*, 31(5), 3715-3728.
- [19] Popovic ZN, Knezevic SD, Brbaklic BS, 2020, “A Risk management procedure for island partitioning of automated radial distribution networks with distributed generators” *IEEE Trans Power Sys.*, 35(5), 3895-3905.
- [20] Willis HL, 2004, “*Power Distribution Planning Reference Book*”, Marcel Dekker Inc, New York.
- [21] Popovic ZN, Brbaklic BS, Knezevic SD, 2017, “A mixed integer linear programming based approach for optimal placement of different types of automation devices in distribution networks”, *Electr Power Syst Res.*, 148, 136-146.
- [22] Popovic ZN, KerletaVDj, Popovic DS, 2014, “Hybrid simulated annealing and mixed integer linear programming algorithm for optimal planning of radial distribution networks with distributed generation”, *Electr Power Syst Res.*, 108, 211-222.
- [23] Yang Z, Zhong H, Bose A, Zheng T, Xia Q, Kang C, 2018, “A linearized OPF model with reactive power and voltage magnitude: A pathway to improve the MW-only DC OPF”, *IEEE Trans Power Syst.*, 33(2), 1734 – 1745.
- [24] Pareek P, Verma A, 2018, “Piecewise linearization of quadratic branch flow limits by irregular polygon”, *IEEE Trans on Power Syst.*, 33(6), 7301 – 7304.
- [25] Borghetti A, 2013, “Using mixed integer programming for the volt/var optimization in distribution feeders”, *Electr Power Syst Res.*, 98, 39–50.
- [26] Borghetti A, 2012, “A mixed-integer linear programming approach for the computation of the minimum-losses radial configuration of electrical distribution networks”, *IEEE Trans Power Syst.*, 27(3), 1264-1273.
- [27] Lavorato M, Franco JF, Rider MJ, Romero R, 2012, “Imposing radiality constraints in distribution system optimization problems”, *IEEE Trans Power Syst.*, 27(1), 172-180.
- [28] 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*”, 3, Berlin: Springer.
- [29] Su CT, Lee CS, 2003, “Network reconfiguration of distribution systems using improved mixed-integer hybrid differential evolution”, *IEEE Trans Power Del.*, 18(3), 1022 – 1027.