



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ
ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА У
НОВОМ САДУ



Невен Ковачки

**ОПЕРАТИВНО ПЛАНИРАЊЕ
РЕКОНФИГУРАЦИЈЕ
ДИСТРИБУТИВНИХ МРЕЖА
ПРИМЕНОМ ВИШЕКРИТЕРИЈУМСКЕ
ОПТИМИЗАЦИЈЕ**

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Нови Сад, 2017.



КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, РБР:	
Идентификациони број, ИБР:	
Тип документације, ТД:	Монографска публикација
Тип записа, ТЗ:	Текстуални штампани материјал
Врста рада, ВР:	Докторска дисертација
Аутор, АУ:	Невен Ковачки
Ментор, МН:	Ред. проф. др Андрија Сарић
Наслов рада, НР:	Оперативно планирање реконфигурације дистрибутивних мрежа применом вишекритеријумске оптимизације
Језик публикације, ЈП:	Српски
Језик извода, ЈИ:	Српски
Земља публиковања, ЗП:	Србија
Уже географско подручје, УГП:	АП Војводина, Нови Сад
Година, ГО:	2017.
Издавач, ИЗ:	Ауторски репринт
Место и адреса, МА:	ФТН, Трг Доситеја Обрадовића 6, 21000 Нови Сад
Физички опис рада, ФО: (поглавља/страна/ цитата/табела/слика/графика/прилога)	7/88/107/9/17/0/2
Научна област, НО:	Електротехничко и рачунарско инжењерство
Научна дисциплина, НД:	Електроенергетика
Предметна одредница/Кључне речи, ПО:	Дистрибутивне мреже/ Реконфигурација/ Оперативно планирање/ Лагранжова релаксација/ Вишекритеријумска оптимизација
УДК	
Чува се, ЧУ:	Библиотека ФТН-а, Трг Доситеја Обрадовића 6, 21000 Нови Сад
Важна напомена, ВН:	
Извод, ИЗ:	У овој докторској дисертацији развијен је нови алгоритам за оперативно планирање реконфигурације дистрибутивних мрежа. Циљ овог алгоритма јесте одређивање скупа конфигурација дистрибутивних мрежа, чијим се узастопним применама оптимизује њихов рад током одређеног временског периода. У овој докторској дисертацији предложен је нови алгоритам за решавање наведеног проблема, а који је заснован на методи Лагранжове релаксације.
Датум прихватања теме, ДП:	14.09.2017.
Датум одбране, ДО:	
Чланови комисије, КО:	Председник: Ред. проф. др Владимир Стрезоски Члан: Ред. проф. др Драган Поповић Члан: Ред. проф. др Горан Швенда Члан: Доцент др Предраг Видовић Члан: Доцент др Зоран Стојановић Члан, ментор: Ред. проф. др Андрија Сарић
	Потпис ментора



KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, ANO :	
Identification number, INO :	
Document type, DT :	Monographic publication
Type of record, TR :	Textual printed document
Contents code, CC :	PhD thesis
Author, AU :	Neven Kovački
Mentor, MN :	Full Professor PhD Andrija Sarić
Title, TI :	Operation Planning of Distribution Network Reconfiguration by the Multiobjective Optimization
Language of text, LT :	Serbian
Language of abstract, LA :	Serbian
Country of publication, CP :	Serbia
Locality of publication, LP :	Autonomous Province of Vojvodina, Novi Sad
Publication year, PY :	2017.
Publisher, PB :	Authors reprint
Publication place, PP :	Faculty of Technical Sciences, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad
Physical description, PD : <small>(chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)</small>	7/88/107/9/17/0/2
Scientific field, SF :	Electrical and computer engineering
Scientific discipline, SD :	Power engineering
Subject/Key words, S/KW :	Distribution networks/ Reconfiguration/ Operation Planning/ Lagrangian Relaxation/ Multi-objective optimization
UC	
Holding data, HD :	Library of the Faculty of Technical Sciences, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad
Note, N :	
Abstract, AB :	This PhD thesis proposes a new algorithm for the operation planning of the distribution network reconfiguration. The aim of this algorithm is to determine the set of the distribution network topologies (configurations) which optimizes the distribution network operations during the given time period. In order to enable processing of the real-life distribution networks, this PhD thesis proposes a new algorithm for the operation planning of the distribution network reconfiguration which is based on the Lagrange relaxation approach.
Accepted by the Scientific Board on, ASB :	14.09.2017.
Defended on, DE :	
Defended Board, DB :	President: Full Professor PhD Vladimir Strezoski
	Member: Full Professor PhD Dragan Popović
	Member: Full Professor PhD Goran Švenda
	Member: Assistant Professor PhD Predrag Vidović
	Member: Assistant Professor PhD Zoran Stojanović
	Member, Mentor: Full Professor PhD Andrija Sarić
	Mentor's sign

Rezime

U ovoj doktorskoj disertaciji razvijen je novi algoritam za operativno planiranje rekonfiguracije distributivnih mreža. Cilj ovog algoritma jeste određivanje skupa konfiguracija distributivnih mreža, čijim se uzastopnim primenama optimizuje njihov rad tokom određenog vremenskog perioda.

U ovoj doktorskoj disertaciji je napre data opšta formulacija problema operativnog planiranja rekonfiguracije distributivnih mreža na bazi mešovito-celobrojnog nelinearnog programiranja. Pri tome je kao optimizacioni kriterijum postavljena minimizacija gubitaka aktivne snage. Kako bi se olakšalo rešavanje navedenog optimizacionog modela izvršena je njegova linearizacija, čime je dobijen mešovito-celobrojni linearni optimizacioni model.

U primenama za distributivne mreže realnih (velikih) dimenzija, formulisani optimizacioni model je veoma velikih dimenzija. Kao posledica toga, u većini praktičnih primena formulisani optimizacioni model ne može biti rešen u konačnom (prihvatljivom) vremenu, koristeći programske pakete za mešovito-celobrojno linearno programiranje. Kako bi se olakšalo rešavanje formulisanog optimizacionog problema i omogućila optimizacija distributivnih mreža realnih dimenzija, u ovoj doktorskoj disertaciji predložen je novi algoritam za njegovo rešavanje, a koji je zasnovan na metodi Lagranžove relaksacije. Predloženi algoritam izbegava direktno rešavanje formulisanog optimizacionog problema tako što najpre rešava odgovarajući Lagranžov dualni problem i zatim na osnovu njegovog rešenja dolazi do suboptimalnog rešenja polaznog problema. Efikasnost navedenog algoritma zasnovana je na tome što se Lagranžov dualni problem može dekomponovati na podprobleme koji su manjih dimenzija i znatno lakši za rešavanje nego originalni problem.

Na kraju, predloženi osnovni optimizacioni model proširen je kako bi se uvažila još dva optimizaciona kriterijuma: minimizacija troškova prekidačkih akcija i minimizacija troškova ispada potrošača.

Predloženi algoritam je verifikovan na dva test sistema: 1) na maloj test mreži koja se sastoji od 15 čvorova i 2) na realnoj distributivnoj mreži koja sadrži 1021 čvor.

Abstract

This PhD thesis proposes a new algorithm for the operation planning of the distribution network reconfiguration. The aim of this algorithm is to determine the set of the distribution network topologies (configurations) which optimizes the distribution network operations during the given time period.

First of all, this PhD thesis presents the general formulation of the operation planning of the distribution networks using mixed integer nonlinear programming. The objective function of the presented optimization model is to minimize the active power losses. Then, the presented optimization model is linearized in order to obtain the optimization model which is easier to solve.

When applied to the real-life distribution networks, the presented optimization model becomes very large. As a consequence, in the majority of practical cases it can not be solved using the solvers for the mixed integer linear programming in the acceptable computational time. In order to enable processing of the real-life distribution networks, this PhD thesis proposes a new algorithm for the operation planning of the distribution network reconfiguration which is based on the Lagrange relaxation approach. The proposed algorithm doesn't solve the presented optimization model directly. Instead, it solves the associated Lagrange dual problem. Then, it obtains the suboptimal solution of the initial problem using the solution of the Lagrange dual problem. The efficiency of the proposed algorithm lies in the fact the Lagrange dual problem can be decomposed into the set of the optimization problems which are much smaller and easier to solve than the initial ones.

Finally, the proposed optimization model is extended to the multi-objective formulation with two additional objective considered: cost of switching manipulations and the cost of customer outages.

The proposed algorithm is verified on two test systems: 15-bus test benchmark and 1021-bus real-world test system.

Sadržaj

Spisak slika	5
Spisak tabela	6
Spisak oznaka.....	7
1. Uvod	9
1.1 Predmet istraživanja.....	9
1.2 Pregled stanja u oblasti	11
1.3 Potreba za istraživanjem i ciljevi istraživanja.....	16
1.4 Pregled doktorske disertacije	17
2. Matematička formulacija problema operativnog planiranja rekonfiguracije distributivnih mreža.....	18
2.1 Opšti optimizacioni model.....	18
2.2 Linearni optimizacioni model.....	23
2.2.1 Zanemarenja u opštem optimizacionom modelu.....	23
2.2.2 Model povezanosti distributivne mreže zasnovan na putanjama koje su dodeljene čvorovima	27
2.2.3 Model povezanosti distributivne mreže zasnovan na putanjama koje su dodeljene segmentima	30
2.2.4 Izvođenje linearizovanog optimizacionog modela.....	32
3. Novi algoritam za rešavanje problema operativnog planiranja rekonfiguracije distributivnih mreža.....	35
3.1 Metoda Lagranžove relaksacije	35
3.1.1 Lagranžov dualni problem.....	35
3.1.2 Metode za rešavanje Lagranžovog dualnog problema	37
3.1.3 Primena Lagranžove relaksacije u rešavanju optimizacionih problema velikih dimenzija	42
3.2 Primena Lagranžove relaksacije u rešavanju problema operativnog planiranja rekonfiguracije distributivnih mreža	44
3.3 Rešavanje Lagranžovog dualnog problema	46
3.4 Određivanje primalnog dopustivog rešenja	49
4. Formulacija i rešavanje problema operativnog planiranja rekonfiguracije distributivnih mreža primenom višekriterijumske optimizacije.....	52
5. Primena.....	56
5.1 Opis test sistema	56
5.1.1 Mala test mreža	56
5.1.2 Realna distributivna mreža.....	56

5.2 Operativno planiranje rekonfiguracije distributivnih mreža: jednokriterijumska optimizacija	58
5.2.1 Rezultati proračuna za malu test mrežu	58
5.2.2 Rezultati proračuna za realnu distributivnu mrežu.....	62
5.3 Operativno planiranje rekonfiguracije distributivnih mreža: višekriterijumska optimizacija	63
6. Zaključak.....	67
7. Literatura	69
Prilog 1 - Rešavanje problema operativnog planiranja rekonfiguracije distributivnih mreža primenom programskog jezika AMPL	77
Prilog 2 – Transformacija Lagranžove funkcije	88

Spisak slika

- Slika 1.1 – Primer distributivne mreže pre (a) i posle (b) rekonfiguracije
- Slika 2.1 – Proračun toka aktivne snage po grani uz zanemarenje gubitaka
- Slika 2.2 – Linearizacija kvadratne funkcije P^2
- Slika 2.3 – Primer distributivne mreža sa putanjama koje su dodeljene čvorovima
- Slika 2.4 – Primer distributivne mreža sa putanjama koje su dodeljene segmentima
- Slika 3.1 – Algoritam subgradijentne metode
- Slika 3.2 – Algoritam metode preseka
- Slika 3.3 – Algoritam metode snopa
- Slika 3.4 – Blok dijagram predloženog algoritma
- Slika 5.1 – Mala test mreža
- Slika 5.2 – Dnevni dijagrami potrošnje za izvode male test mreže
- Slika 5.3 – Prikaz prekidačkih akcija za malu test mrežu
- Slika 5.4 – Gubici aktivne snage za malu test mrežu
- Slika 5.5 – Vreme rešavanja opšteg optimizacionog modela u zavisnosti od broja vremenskih intervala
- Slika 5.7 – Vreme izvršenja predloženog algoritma na realnoj distributivnoj mreži u zavisnosti od broja vremenskih intervala
- Slika 5.8 – Vreme izvršenja predloženog algoritma na realnoj distributivnoj mreži u zavisnosti od broja prekidača
- Slika P1.1 – Modifikovana mala test mreža koja je opisana u datoteci *Opsti.dat*

Spisak tabela

Tabela 5.1 – Podaci o realnoj distributivnoj mreži

Tabela 5.2 – Rezultati proračuna za malu test mrežu za različite vrednosti N_{SW}^{MAX}

Tabela 5.3 – Rezultati proračuna za malu test mrežu: ukupna potrošnja, gubici aktivne snage (bez primene rekonfiguracije), gubici aktivne snage i prekidačke akcije dobijeni predloženim algoritmom i u slučaju kada nisu uvažena ograničenja broja prekidačkih akcija

Tabela 5.4 – Poređenje rešenja opšteg optimizacionog modela sa rešenjem dobijenim koristeći predloženi algoritam

Tabela 5.5 – Rezultati dobijeni predloženim algoritmom i rešavanjem opšteg optimizacionog modela

Tabela 5.6 – Rezultati proračuna za realnu distributivnu mrežu za različite vrednosti N_{SW}^{MAX}

Tabela 5.7 – Rezultati proračuna za realnu distributivnu mrežu: ukupna potrošnja, gubici aktivne snage (bez primene rekonfiguracije), gubici aktivne snage i prekidačke akcije dobijeni predloženim algoritmom

Tabela 5.8 – Rezultati proračuna za malu test mrežu: troškovi električnih gubitaka, prikidačkih akcija i ispada potrošača i prekidačke akcije dobijeni predloženim algoritmom

Tabela 5.9 – Rezultati proračuna za realnu distributivnu mrežu: troškovi električnih gubitaka, prikidačkih akcija i ispada potrošača i prekidačke akcije dobijeni predloženim algoritmom

Spisak oznaka

Promenljive

$CLOSS$	Troškovi gubitaka električne energije
CSW	Troškovi prekidačkih akcija
CCI	Troškovi ispada potrošača
D	Dualna funkcija
g	Subgradijent dualne funkcije
L	Lagranžova funkcija
P, Q	Tok aktivne i reaktivne snage, respektivno
P_{Loss}	Gubici aktivne snage
TI	Dužina prekida napajanja
V, θ	Modul i fazni stav fazora napona, respektivno
x	Status prekidača (1 – zatvoren, 0 – otvoren)
y	Indikator promene statusa prekidača (1 – promenjen, 0 – nepromenjen)
w	Indikator da li je putanja aktivna (1 – aktivna, 0 – neaktivna)
λ	Lagranžov multiplikator

Indeksi

b	Element snopa B ($b=1,2,\dots,N_B$, gde je N_B ukupan broj elemenata u snopu) (donji indeks)
c	Segment distributivne mreže ($c=1,2,\dots,N_C$, gde je N_C ukupan broj segmenata u distributivnoj mreži) (donji indeks)
h	Vremenski interval ($h=1,2,\dots,N_H$, gde je N_H ukupan broj vremenskih intervala) (gornji indeks)
i, j	Čvorovi distributivne mreže ($i, j=1,2,\dots,N_N$, gde je N_N ukupan broj čvorova) (donji indeks)
$k=1,2,3,4$	Nejednakost koja se koristi za modelovanje ograničenja broja prekidačkih akcija (donji indeks)
l	Grana (sekcija) distributivne mreže ($l=1,2,\dots,N_L$, gde je N_L ukupan broj grana) (donji indeks)
(n)	Iteracija metode za rešavanje Lagranžovog dualnog problema (gornji indeks)
p	Putanja (donji indeks)

s Prekidač ($s = 1, 2, \dots, N_{SW}$, gde je N_{SW} ukupan broj prekidača) (donji indeks)

Parametri

C_{Loss}	Cena gubitaka električne energije
C_{SW}	Cena prekidačkih akcije
C_I	Cena neisporučene energije
G, B	Konduktansa i susceptansa grane, respektivno
L	Dužina sekcije
N_{SW}^{MAX}	Dozvoljeni broj prekidačkih akcija po jednom prekidaču
P_G, P_L	Proizvodnja i potrošnja aktivne snage, respektivno
Q_G, Q_L	Proizvodnja i potrošnja reaktivne snage, respektivno
S^{max}	Maksimalna dozvoljena snaga grane
T^{REP}	Vreme otklanjanja ispada
T^{RES}	Vreme restauracije napajanja
V^{min}, V^{max}	Minimalni i maksimalni dozvoljeni napon u čvoru, respektivno
λ	Intenzitet otkaza

Simboli

$\|\cdot\|$ Kvadratna norma vektora

Skraćenice

DMS	Distributivni menadžment sistem
SN	Srednji napon
VN	Visoki napon

1. Uvod

U ovoj glavi predstavljen je problem operativnog planiranja rekonfiguracije distributivnih mreža, koji predstavlja predmet istraživanja ove doktorske disertacije i dat je pregled stanja u ovoj oblasti. Nakon toga, objašnjena je potreba za ovim istraživanjem i predstavljeni su njegovi osnovni ciljevi. Na kraju, opisana je organizacija ove doktorske disertacije.

1.1 Predmet istraživanja

Elektrodistributivne mreže (u daljem tekstu skraćeno distributivne mreže) predstavljaju deo elektroenergetskih sistema čija je funkcija da vrše raspodelu, odnosno distribuciju električne energije od napojnih čvorova koji se nalaze u transformatorskim stanicama visoki napon (VN)/srednji napon (SN) (koje se napajaju iz prenosnih ili subprenosnih mreža) do krajnjih potrošača električne energije. Tradicionalne distributivne mreže su se sastojale isključivo od pasivnih elemenata: potrošača, nadzemnih vodova, kablova, transformatora, kondenzatorskih baterija itd. Električna energija tradicionalno se nije proizvodila u distributivnim mrežama. Zbog navedenih uslova, tokovi snaga u distributivnim mrežama bili su usmereni isključivo od napojnih čvorova prema potrošačima električne energije [1,2].

Međutim, tokom poslednjih nekoliko decenija opisani koncept distributivnih mreža značajno se menja. Naime, savremene distributivne mreže prolaze kroz niz transformacija i unapređenja, a sve u cilju uvođenja tehnologija pametnih mreža (eng. *smart grid*) [3-5]. Pre svega, ove promene obuhvataju:

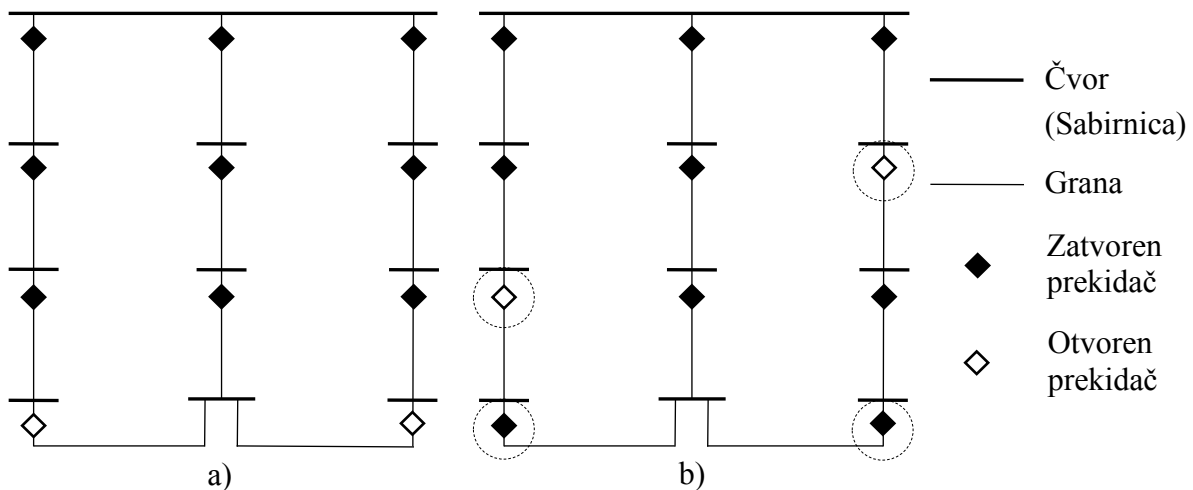
- 1) Uvođenje distribuiranih energetske resursa (distribuiranih i obnovljivih izvora električne energije i distribuiranih skladišta električne energije);
- 2) Povećanje stepena upravljive potrošnje;
- 3) Povećanje stepena automatizacije distributivnih mreža putem uvođenja daljinski kontrolisanih prekidača i drugih uređaja lokalne automatike.

Razlozi za uvođenje tehnologija pametnih mreža su višestruki. S jedne strane, uvođenje distribuiranih energetske resursa i povećanje stepena upravljive potrošnje motivisano je potrebom da se zadovolje rastuće potrebe za potrošnjom električne energije. S druge strane, povećanjem stepena automatizacije omogućuje se brzo izvršenje niza preventivnih i korektivnih akcija u upravljanju distributivnim mrežama. Kao krajnji rezultat navedenih promena, postiže se veća efikasnost rada distributivnih mreže, kao i veća pouzdanost napajanja potrošača.

Kao posledica navedenih promena, pogon savremenih distributivnih mreža postaje znatno dinamičniji u odnosu na tradicionalne distributivne mreže i samim tim podložan brojnim pogonskim izazovima, kao što su: dvosmerni tokovi snaga, problemi sa stabilnošću u prelaznim režimima, višestruki izvori u režimima sa kvarom itd. Kako bi se postiglo efikasnije upravljanje distributivnim mrežama u ovakvim uslovima, distributivne kompanije

uvode distributivni menadžment sistem (DMS) koji predstavlja integrisani softverski paket za nadzor i upravljanje distributivnom mrežom [6,7]. DMS obuhvata funkcije za nadzor elemenata, estimaciju stanja i formiranje ažurnog modela distributivne mreže, operativno planiranje rada distributivne mreže i upravljanje distributivnom mrežom u realnom vremenu. Osnovni deo DMS-a čine DMS funkcije, odnosno energetske proračuni za nadzor, analizu i optimizaciju pogona distributivne mreže [8,9].

Rekonfiguracija je jedna od najvažnijih DMS funkcija, a koja se koristi za optimizaciju rada distributivnih mreža. Rekonfiguracija distributivnih mreža predstavlja promenu topološke strukture, odnosno konfiguracije distributivnih mreža putem promene statusa (otvoren/zatvoren) rasklopnih uređaja. Rekonfiguracija je ilustrovana na primeru jednostavne distributivne mreže prikazane na slici 1.1. Na slici 1.1a) prikazana je početna konfiguracija distributivne mreže, dok je na slici 1.1b) prikazana distributivna mreža nakon rekonfiguracije, odnosno promene statusa prekidača koji su uokvireni isprekidanom linijom.



Slika 1.1 – Primer distributivne mreže pre (a) i posle (b) rekonfiguracije

Distributivne mreže najčešće se grade kao upetljane, kako bi se obezbedila mogućnost napajanja što većeg broja potrošača u slučaju kvara na nekom elementu mreže. Međutim, u većini savremenih distributivnih mreža u normalnim pogonskim uslovima se primenjuje se radijalna konfiguracija, što znači da za svaki potrošač postoji tačno jedna putanja koja ga povezuje sa napojnim čvorom. Postoje brojni tehnički razlozi za primenu radijalne konfiguracije, od kojih su najvažniji:

- 1) U radijalnim distributivnim mrežama značajno je jednostavnije realizovati relejnu zaštitu nego u upetljanim mrežama;
- 2) Primena radijalne konfiguracije smanjuje struje kratkih spojeva, a samim tim i štetu koja tom prilikom nastaje.

Radijalna konfiguracija postiže se otvaranjem određenog broja prekidača koji povezuju izvode, odnosno radijalne ogranke distributivne mreže, kao što je prikazano na slici 1.1. Prema tome, radijalna konfiguracija distributivne mreže je jedno od najvažnijih ograničenja koje treba uvažiti tokom planiranja rekonfiguracije distributivnih mreža [1,9].

Cilj rekonfiguracije distributivnih mreža jeste postizanje njihove optimalne konfiguracije. Iz navedenog proizilazi da rekonfiguracija distributivnih mreža predstavlja optimizacionu proceduru u kojoj je prvo potrebno izabrati odgovarajući optimizacioni kriterijum. U normalnim pogonskim uslovima rekonfiguracija se sprovodi u cilju unapređenja rada distributivne mreže i tada se kao optimizacioni kriterijumi koriste: 1) minimizacija gubitaka električne energije, 2) minimizacija kritičnog pada napona u čvorovima mreže, 3) optimalni balans opterećenja po izvodima i slični. Sa druge strane, u havarijskim uslovima rada distributivnih mreža rekonfiguracija se sprovodi u cilju izolovanja dela distributivne mreže u kome se desio kvar i restauracije napajanja potrošačima u ostatku distributivne mreže, pa se tada kao optimizacioni kriterijumi koriste: 1) minimizacija broja nenapojenih potrošača, 2) minimizacija neisporučene električne energije i slični.

U ovoj doktorskoj disertaciji razmatra se rekonfiguracija distributivnih mreža u normalnim pogonskim uslovima. U tradicionalnim distributivnim mrežama sa ograničenim nivoom automatizacije ova procedura sprovodi se jednom godišnje ili jednom po sezoni. S druge strane, u savremenim mrežama omogućena je primena rekonfiguracije i u realnom vremenu. Međutim, sprovođenje rekonfiguracije distributivnih mreža u realnom vremenu je značajno ograničeno brojem dozvoljenih prekidačkih akcija. Naime, previše česta promena konfiguracije distributivnih mreža može dovesti do brojnih neželjenih efekata, kao što su: skraćenje radnog veka prekidačkih uređaja, povećani rizik od kvarova u distributivnoj mreži, nestabilnost prelaznih režima nakon promene konfiguracije i drugih. Pored toga, cena prekidačkih akcija potrebnih za rekonfiguraciju distributivne mreže u nekim slučajevima može biti veća od dobiti koja se postiže samom rekonfiguracijom. Prema tome, potrebno je pronaći optimalan kratkoročni plan rekonfiguracije distributivnih mreža, kako bi se postigao pun efekat ove procedure na unapređenje efikasnosti njihovog rada. Upravo je to cilj operativnog planiranja rekonfiguracije distributivnih mreža.

Dakle, problem operativnog planiranja rekonfiguracije distributivnih mreža predstavlja određivanje skupa konfiguracija distributivnih mreža, čijim se sukcesivnim primenama optimizuje njihov rad tokom određenog vremenskog perioda. Na primer, operativno planiranje rekonfiguracije distributivnih mreža može se vršiti za dan unapred, gde se za svaki sat određuje po jedna konfiguracija distributivne mreže. S obzirom da se operativno planiranje rekonfiguracije distributivnih mreža sprovodi na dnevnoj ili satnoj osnovi, zahtevaju se brzi i efikasni algoritmi za njegovo rešavanje.

1.2 Pregled stanja u oblasti

Rekonfiguracija distributivnih mreža pripada klasi mešovito-celobrojnih nelinearnih optimizacionih problema. Naime, konfiguracija distributivne mreže određena je statusom prekidača (otvoren/zatvoren) koji se modeluju binarnim (0/1) promenljivim. Sa druge strane, režim distributivne mreže (tokovi snaga, gubici aktivne snage itd.) modeluje se nelinearnim algebarskim jednačinama u kojima figurišu kontinualne promenljive (moduli i fazni stavovi fazora napona u čvorovima distributivne mreže) [10]. Optimizacione metode koje se koriste za rešavanje navedenog problema mogu se podeliti na [11,12]:

- 1) heurističke metode [13-25],
- 2) meta-heurističke metode [26-47] i
- 3) matematički zasnovane metode [48-60].

Matematički zasnovane metode, koje u potpunosti odgovaraju prirodi navedenog problema (na primer mešovito-celobrojno nelinearno programiranje), pokazale su se nepraktičnim za primenu u realnim distributivnim mrežama. Naime, usled velike dimenzionalnosti realnih distributivnih mreža, odgovarajući optimizacioni modeli za rešavanje problema rekonfiguracije su veoma velikih dimenzija i za njihovo rešavanje su potrebni značajni računarski resursi. Vreme potrebno za rešavanje jednog ovakvog optimizacionog problema meri se satima ili danima. Pored toga, dešava se da pojedine računarske metode za rešavanje ovih problema, kao što je metoda grananja i ograničavanja (eng. *branch-and-bound*) uopšte ne konvergiraju. Zbog toga se u praktičnim primenama za rešavanje problema rekonfiguracije distributivnih mreža najčešće koriste heurističke metode, počevši od prvih radova u ovoj oblasti (na primer [13]).

Cilj heurističkih metoda jeste da se znajući fiziku određenog problema u što kraćem roku dođe do kvalitetnih praktičnih, ali suboptimalnih rešenja. Od heurističkih metoda koje se koriste za rešavanje problema rekonfiguracije distributivnih mreža najpoznatije su:

- 1) metoda najmanjih struja [13-15] i
- 2) metoda izmene grana [16-19].

Metoda najmanjih struja razvijena je za potrebe određivanja optimalne konfiguracije sa minimalnim gubicima aktivne snage. Ova metoda najpre zatvara sve prekidače u distributivnoj mreži, čime se dobija maksimalno upetljena konfiguracija distributivne mreže. Zatim se prekidači otvaraju jedan po jedan dok se ne dobije optimalna radijalna konfiguracija. Pri tome se uvek otvaraju prekidači kroz koje protiče najmanja struja [9]. Na ovaj način dobijaju se dovoljno kvalitetna (suboptimalna) rešenja problema rekonfiguracije distributivnih mreža. Međutim, ova metoda ima dva nedostatka. Prvi je u tome što je za rešavanje distributivnih mreža realnih dimenzija potrebno znatno računarsko vreme, a drugi je u tome što su za uvažavanje drugih optimizacionih kriterijuma potrebne modifikacije modela distributivne mreže [9].

U metodama izmene grana analiziraju se jednostavne promene konfiguracije distributivne mreže u vidu izmene statusa dva prekidača, čime se deo potrošača koji su se napajali sa jednog izvoda distributivne mreže prebacuju na drugi izvod. Suština ovih metoda jeste da se uticaj svake od ovih promena konfiguracije na kriterijumsku funkciju koja se optimizuje aproksimira jednostavnim relacijama. Na taj način se izbegava proračun režima distributivne mreže za svaku promenu konfiguracije, čime se značajno unapređuje efikasnost proračuna. Još jedna prednost ovih metoda jeste u tome što se one mogu lako primeniti na različite optimizacione kriterijume [19].

Pored navedenih heurističkih metoda, razvijene su i druge, koje primenjuju različite algoritme za pronalaženje optimalne konfiguracije distributivnih mreža. Na primer, u [20] je predložena metoda koja obrađuje petlju po petlju, umesto zatvaranja svih mogućih petlji kao u metodama najmanjih struja. Pri tome se za svaku petlju vrši posebno ispitivanje koji

prekidač treba otvoriti, kako bi se dobila radijalna konfiguracija distributivne mreže. Međutim, glavni nedostatak svih heurističkih metoda jeste u tome što one najčešće pretražuju samo deo skupa dopustivih (mogućih) rešenja. Zbog toga ove metode ne mogu garantovati da je dobijeno rešenje najbolje moguće, tj. ne mogu garantovati postizanje globalnog optimuma zadanog optimizacionog problema. Rešenje dobijeno heurističkim metodama najčešće predstavlja lokalni optimum zadate kriterijumske funkcije. Kako bi se unapredio kvalitet rešenja dobijenih heurističkim metodama, razvijeni su modeli za rešavanje problema rekonfiguracije distributivnih mreža koji koriste metaheurističke metode.

Meta-heurističke metode su zasnovane na stohastičkom pretraživanju, analogiji sa prirodnim procesima, kao i na modelima veštačke inteligencije. Za rešavanje problema rekonfiguracije distributivnih mreža koriste se meta-heurističke metode zasnovane na:

- 1) genetskim algoritmima (eng. *genetic algorithms*) [26-28],
- 2) simuliranom kaljenju (eng. *simulated annealing*) [29-33],
- 3) evolutivnim algoritmima (eng. *evolutionary programming*) [34-37],
- 4) veštačkim neuronskim mrežama (eng. *artificial neural networks*) [38,39],
- 5) tabu pretrazi (eng. *tabu search*) [40,41],
- 6) optimizaciji kolonijom mrava (eng. *ant colony optimization*) [42, 43],
- 7) optimizaciji rojem čestica (eng. *particle swarm optimization*) [44, 45] i
- 8) ekspertskim sistemima (eng. *expert systems*) [46, 47].

Pored navedenih heurističkih i meta-heurističkih metoda, poslednjih godina razvijene su i efikasne matematički zasnovane metode za rekonfiguraciju distributivne mreže koje koriste:

- 1) mešovito-celobrojno linearno programiranje [48, 50-53, 56],
- 2) mešovito-celobrojno kvadratno programiranje [48, 49, 53-55],
- 3) mešovito-celobrojno konveksno programiranje [57, 58] i
- 4) Bendersovu dekompoziciju [59].

Jedna od glavnih poteškoća u razvoju matematički zasnovanih metoda predstavlja tretman ograničenja radijalnosti distributivne mreže. U heurističkim i meta-heurističkim metodama ovo ograničenje se najčešće uvažava implicitno. Na primer, u metodama izmene grana svaka promena topologije putem promene statusa dva prekidača uvek dovodi do radijalne konfiguracije distributivne mreže. Međutim, u matematički zasnovanim metodama ograničenje radijalnosti distributivne mreže mora biti uvaženo eksplicitno, tj. formulisano u formi algebarskih relacija [60]. Kako bi se rešio navedeni problem, u radu [48] uveden je model povezanosti distributivne mreže zasnovan na putanjama koje su dodeljene čvorovima distributivne mreže, dok je u radovima [57, 58] usvojen pristup zasnovan na metodama teorije grafova.

U većini navedenih radova rekonfiguracija distributivne mreže formulisana je kao jednokriterijumski problem, čiji je cilj najčešće minimizacija gubitaka aktivne snage. U radu [17] kao optimizacioni kriterijum uvažen je i balans opterećenja po izvodima distributivne mreže. S druge strane, referenca [19] je jedan od prvih radova u kojima je rekonfiguracija

distributivne mreže formulisana kao problem višekriterijumske optimizacije. U ovom radu uvaženi su sledeći optimizacioni kriterijumi:

- 1) minimizacija gubitaka aktivne snage,
- 2) optimalni balans opterećenja po napojnim transformatorima VN/SN,
- 3) minimizacija kritičnog pada napona,
- 4) minimizacija učestanosti ispada potrošača i
- 5) optimalan raspored napajanja kritičnih potrošača po napojnim transformatorima VN/SN.

Pored navedenih optimizacionih kriterijuma, u rekonfiguraciji distributivnih mreža može se tretirati i minimizacija operativnih troškova rada distributivne mreže. Na primer, u radovima [61, 62] predložen je postupak za rekonfiguraciju distributivne mreže u uslovima slobodnog tržišta električne energije. U ovim radovima je kao funkcija cilja razmatrana minimizacija cene električne energije i cene prekidačkih akcija, pri čemu se pretpostavlja da u razmatranoj distributivnoj mreži postoji više izvora električne energije (tj. više napojnih čvorova), gde se cene električne energije razlikuju od izvora do izvora.

Međutim, nedostatak svih navedenih metoda jeste u tome što su one orijentisane na nalaženje optimalne konfiguracije za jedan specifikovani režim distributivne mreže. Naime, u ovim metodama se pretpostavlja da su svi parametri koji određuju režim distributivne mreže (potrošnje svih potrošača u mreži, proizvodnje distribuiranih generatora i drugi) unapred poznati i konstantni i za te parametre se traži optimalna konfiguracija distributivne mreže. Međutim, radni režimi distributivnih mreža se neprestano menjaju (na primer, usled promene potrošnje), a optimalna konfiguracija za jedan radni režim ne mora biti optimalna i za druge radne režime. U praktičnim primenama, kada je potrebno odrediti optimalnu konfiguraciju distributivne mreže tokom određenog vremenskog perioda, navedene metode primenjuju se za jedan karakterističan režim distributivne mreže. Na primer, u slučaju rekonfiguracije gde se vrši minimizacija gubitaka aktivne snage, najčešće se analizira režim distributivne mreže sa maksimalnom (vršnom) potrošnjom [63], zato što se smatra da su u tom režimu i gubici aktivne snage najveći.

Kako bi se prevazišao navedeni nedostatak, razvijene su posebne metode za rekonfiguraciju kojima se optimizuje rad distributivnih mreža tokom određenog vremenskog perioda [64-70]. U [64] predložen je postupak za određivanje optimalne konfiguracije distributivnih mreža u funkciji vremena. Navedeni postupak može se koristiti za kratkoročne (na primer dnevne) i dugoročne (na primer sezonske) proračune rekonfiguracije distributivnih mreža. Pri tome su u kratkoročnim proračunima razmatrani samo daljinski upravljani prekidači, a u dugoročnim proračunima razmatrani su i ručno upravljani prekidači. Navedeni pristup zasnovan je na ranije razvijenim heurističkim metodama [16, 18]. U [65, 66] predložen je postupak za određivanje tzv. kritičnih prekidača u distributivnim mrežama i razvijen je algoritam za rekonfiguraciju distributivne mreže na kratkoročnoj ili dugoročnoj vremenskoj osnovi u kome se manipuliše navedenim kritičnim prekidačima. U radovima [67, 68] predložene su metode za rekonfiguraciju distributivne mreže kojima se minimizuju gubici električne energije tokom zadatog vremenskog perioda. Obe metode zasnovane su na ranije

opisanom algoritmu izmene grana. S druge strane, u [69] predložena je metoda za rekonfiguraciju distributivne mreže koja minimizuje operativne troškove tokom zadanog vremenskog perioda, a koja je zasnovana na ranije opisanom algoritmu najmanjih struja. U [70] predložen je postupak za rekonfiguraciju distributivne mreže koja minimizuje cenu gubitaka električne energije i troškove prekidačkih akcija, a koji koristi genetski algoritam.

S druge strane, mnogo manje studija bavi se izradom plana rekonfiguracije distributivnih mreža, gde se tokom određenog vremenskog perioda sukcesivno primenjuju različite konfiguracije distributivne mreže [71-80]. Promene konfiguracije distributivne mreže sprovode se kao odgovor na promenjene prilike u distributivnoj mreži. Planiranje rekonfiguracije distributivnih mreža može se vršiti na kratkoročnom ili dugoročnom nivou, u zavisnosti od vremenskog perioda koji se analizira. Dugoročno planiranje rekonfiguracije najčešće se sprovodi na godišnjem nivou [71-73], dok se kratkoročno planiranje rekonfiguracije distributivnih mreže najčešće vrši za dan unapred [74-80]. Pored navedene klasifikacije, operativno planiranje rekonfiguracije distributivnih mreža može se podeliti na statičko i dinamičko planiranje, u zavisnosti od dinamike promene konfiguracije distributivne mreže [76]. U slučaju statičkog planiranja rekonfiguracije zadati optimizacioni period deli se na fiksne vremenske intervale i za svaki od ovih vremenskih intervala određuje se po jedna konfiguracija distributivne mreže. S druge strane, u slučaju dinamičkog planiranja rekonfiguracije vremenski interval između dve promene konfiguracije distributivne mreže nije zadat unapred, već se određuje u okviru samog planiranja.

U radovima [71-73] predloženi su postupci za izradu godišnjeg plana rekonfiguracije distributivne mreže primenom višekriterijumske optimizacije. U ovim radovima razmatrani su sledeći optimizacioni kriterijumi:

- 1) minimizacija gubitaka električne energije,
- 2) minimizacija trošova ispada potrošača i
- 3) minimizacija troškova prekidačkih akcija.

Za rešavanje navedenog problema u [71] koristi se meta-heuristički algoritam, zasnovan na optimizaciji rojem čestica. Sa druge strane, u [72] koristi se dvo-koračna metoda za rešavanje navedenog problema, gde se u prvom koraku određuje optimalna konfiguracija za svaki dan razmatranog vremenskog perioda, dok se u drugom koraku koristi dinamičko programiranje, kako bi se odredio optimalni plan konfiguracije za ceo vremenski period. U radu [73] navedeni problem rešavan je metodom stohastičke optimizacije, kako bi se uvažila neizvesnost potrošnje i proizvodnje distribuiranih generatora tokom razmatranog perioda optimizacije.

Radovi [75, 76] bave se određivanjem optimalnog vremenskog intervala između dve rekonfiguracije distributivne mreže u toku jednog dana. U [75] kao optimizacioni kriterijum postavljena je minimizacija ukupnih troškova gubitaka električne energije i prekidačkih akcija, dok je postavljeni optimizacioni model rešavan genetskim algoritmom. S druge strane, u [76] kao optimizacioni kriterijum postavljena je minimizacija gubitaka aktivne snage, dok je postavljeni optimizacioni model rešavan heurističkim pretraživanjem.

U [77] prikazan je optimizacioni model za operativno planiranje rada distributivnih mreža za dan unapred, kojim se optimizuju ukupni operativni troškovi. U predloženom optimizacionom modelu rekonfiguracija se sprovodi u svakom satu, pri čemu je ukupan broj prekidačkih akcija po svakom prekidaču ograničen. Formulirani optimizacioni model rešavan je genetskim algoritmom. Slično, u [78] predložen je optimizacioni model za planiranje rekonfiguracije distributivne mreže za dan unapred, koji je rešavan primenom više-agentnog sistema. U ovom pristupu se za rekonfiguraciju distributivne mreže u svakom satu zaduži po jedan radni agent, dok je za određivanje globalnog plana rekonfiguracije zadužen jedan koordinacioni agent, a koji koristi rezultate radnih agenata.

1.3 Potreba za istraživanjem i ciljevi istraživanja

Operativno planiranje rekonfiguracije distributivnih mreža pripada klasi mešovito-celobrojnih nelinearnih optimizacionih problema. Naime, u ovom problemu potrebno je odrediti skup konfiguracija distributivne mreže, pri čemu se svaka konfiguracija modeluje skupom binarnih i kontinualnih promenljivih. Binarnim (0/1) promenljivim modeluju se statusi prekidačkih uređaja (otvoren/zatvoren), dok se kontinualnim promenljivim modeluje režim distributivne mreže (na primer, fazori napona u čvorovima). Navedeni problem pripada klasi NP teških (eng. *NP Hard*) problema, što znači da vreme potrebno za nalaženje globalnog optimuma značajno raste (najčešće eksponencijalno) sa porastom dimenzija problema [81].

Pregled literature pokazuje da još uvek nije razvijen efikasan i uvek primenljiv algoritam za rešavanje navedenog problema. Naime, većina navedenih metoda za rekonfiguraciju distributivnih mreža orijentisane su na određivanje jedne optimalne konfiguracije distributivne mreže i ne mogu se primeniti na problem operativnog planiranja rekonfiguracije. S druge strane, metode prikazane u [71-76] bave se planiranjem rekonfiguracije distributivnih mreža tokom određenog vremenskog perioda, ali ne uvažavaju ograničenja za dozvoljeni broj prekidačkih akcija. Pored toga, ove metode zasnovane su na heurističkim i meta-heurističkim optimizacionim modelima, koji u principu ne mogu garantovati dostizanje globalnog optimuma.

Sa druge strane, metode slične onoj u [77] pokazale su se efikasnim samo u primenama na distributivne mreže malih dimenzija. Naime, u ovom pristupu matematički model operativnog planiranja rekonfiguracije distributivnih mreža rešava se direktno i sa porastom dimenzije mreže raste i vreme potrebno za proračun. Kao posledica toga, koristeći metod [77] za distributivne mreže realnih (velikih) dimenzija ne može se dobiti kvalitetno rešenje u konačnom (prihvatljivom vremenu). Međutim, operativno planiranje rekonfiguracije se u praktičnim primenama sprovodi na dnevnoj ili satnoj osnovi i samim tim se zahtevaju brzi i efikasni algoritmi za njegovo rešavanje.

Optimizacioni problemi velikih dimenzija u praksi često se rešavaju metodama dekompozicije, kao što su Bendersova dekompozicija (eng. *Benders decomposition*), Dancig-Volf dekompozicija (eng. *Dantzig-Wolfe decomposition*), Lagranžova relaksacija (eng. *Lagrangian relaxation*) i druge. Ideja ovih metoda jeste da se izbegne direktno rešavanje

optimizacionih problema velikih dimenzija, tako što se oni dekomponuju na podprobleme. Dobijeni podproblemi se zatim rešavaju iterativno i na taj način se dolazi do rešenja originalnih (globalnih) problema. Efikasnost ovih metoda bazira se na tome što su dobijeni problemi manjih dimenzija i značajno lakši za rešavanje od originalnih problema [82]. Pregled literature pokazuje da opisane metode dekompozicije još uvek nisu široko primenjivane na rešavanje problema operativnog planiranja rekonfiguracije distributivnih mreža. Međutim, upravo metoda Lagranžove relaksacije može biti osnova za razvoj efikasnog algoritma za rešavanje navedenog problema [83].

Globalni cilj istraživanja u ovoj doktorskoj disertaciji jeste razvoj novog algoritma za operativno planiranje rekonfiguracije distributivnih mreža koji: 1) treba da bude efikasan u obradi distributivnih mreža realnih dimenzija i 2) treba da uvaži različite optimizacione kriterijume. Radi postizanja navedenog globalnog cilja, identifikovani su sledeći individualni ciljevi:

- 1) Matematička formulacija problema operativnog planiranja rekonfiguracije distributivnih mreža u formi mešovito-celobrojno nelinearnog optimizacionog problema;
- 2) Linearizacija optimizacionog modela iz tačke 1); pri tome se očekuje da linearizovani optimizacioni model bude lakši za rešavanje od originalnog, a da se njime dobijaju približno ista (suboptimalna) rešenja kao sa originalnim modelom;
- 3) Razvoj novog algoritma za rešavanje optimizacionog modela iz tačke 2) primenom Lagranžove relaksacije;
- 4) Uvažavanje različitih optimizacionih kriterijuma u optimizacionom modelu iz tačke 2) (minimizacija troškova prekidačkih akcija i minimizacija troškova ispada potrošača).

1.4 Pregled doktorske disertacije

U drugoj glavi ove disertacije data je formulacija problema operativnog planiranja rekonfiguracije distributivnih mreža. Pri tome je kao funkcija cilja definisana minimizacija gubitaka aktivne snage. U trećoj glavi predložen je novi algoritam za rešavanje navedenog problema na bazi Lagranžove relaksacije. Proširenje navedenog optimizacionog modela sa ciljem da se uvažavaju i drugi optimizacioni kriterijumi (minimizacija troškova prekidačkih akcija i minimizacija troškova ispada potrošača) dato je u četvrtoj glavi. U petoj glavi prikazani su rezultati primene predložene metodologije na dva test sistema. Šesta glava predstavlja zaključak, dok je pregled korišćene literature dat u sedmoj glavi. Na kraju ove doktorske disertacije data su dva priloga. U prvom prilogu opisana je implementacija optimizacionog modela za operativno planiranje rekonfiguracije distributivnih mreža u programskom jeziku AMPL, dok je u drugom prilogu opisana transformacija Lagranžove funkcije koja se koristi u trećoj glavi.

2. Matematička formulacija problema operativnog planiranja rekonfiguracije distributivnih mreža

U ovoj glavi prvo je izveden opšti optimizacioni model operativnog planiranja rekonfiguracije distributivnih mreža na bazi mešovito-celobrojnog nelinearnog programiranja. Zatim je izvršena linearizacija navedenog optimizacionog modela.

2.1 Opšti optimizacioni model

Kao što je u uvodu naglašeno, problem operativnog planiranja rekonfiguracije određene distributivne mreže predstavlja određivanje skupa konfiguracija date distributivne mreže, čijim se uzastopnim primenama optimizuje njen rad tokom određenog vremenskog perioda. U cilju formulisanja optimizacionog modela koji opisuje navedeni problem, vremenski period za koji se vrši operativno planiranje rekonfiguracije podeljen je na N_H vremenskih intervala. Za svaki od razmatranih vremenskih intervala ($h = 1, 2, \dots, N_H$) određuje se po jedna konfiguracija razmatrane distributivne mreže. Radi jednostavnosti predloženog optimizacionog modela, pretpostavlja se da su razmatrani vremenski intervali jednaki.

Režim distributivne mreže u svakom vremenskom intervalu (h) modeluje se nelinearnim jednačinama koje predstavljaju bilanse aktivnih i reaktivnih snaga u čvorovima distributivne mreže, a koje se koriste i u klasičnom modelu tokova snaga [10]. Prema tome, u optimizacionom modelu za modelovanje režima distributivne mreže koriste se promenljive V_i^h i θ_i^h koje respektivno predstavljaju module i fazne stavove fazora napona u svim čvorovima distributivne mreže ($i = 1, 2, \dots, N_N$, gde je N_N broj čvorova u distributivnoj mreži)¹.

Konfiguracija distributivne mreže određena je statusima prekidača. Status prekidača (otvoren/zatvoren) koji se nalazi u grani l u vremenskom intervalu h modeluje se binarnom (0/1) promenljivom x_l^h . Radi jednostavnosti prikazanog optimizacionog modela pretpostavlja se da sve grane u distributivnoj mreži sadrže prekidače. U tom kontekstu, u daljem tekstu grana se smatra otvorenom ako je prekidač koji ona sadrži otvoren i obratno. Takođe, indeks grane l predstavlja i indeks prekidača koji ona sadrži.

Problem operativnog planiranja distributivnih mreža u ovoj glavi definiše se kao jednokriterijumski optimizacioni problem, gde se kao funkcija cilja koristi minimizacija gubitaka aktivne snage tokom datog vremenskog perioda (P_{Loss}). Prema tome, funkcija cilja ovog optimizacionog modela ima sledeću formu:

¹ Alternativno, režim distributivne mreže može se modelovati linearnim relacijama, kao što je opisano u [84]. Međutim, radi opštosti prikazanog optimizacionog modela, režim distributivne mreže modelovan je jednačinama bilansa aktivnih i reaktivnih snaga koje se koriste i u klasičnom modelu tokova snaga.

$$\min_{x_i^h, V_i^h, \theta_i^h} \left(P_{Loss} = \sum_{h=1}^{N_H} P_{Loss}^h = \sum_{h=1}^{N_H} \sum_{l=1}^{N_L} P_{Loss,l}^h = \sum_{h=1}^{N_H} \sum_{l=1}^{N_L} (P_{ij}^h + P_{ji}^h) \right) \quad (1)$$

gde su:

P_{Loss}^h – ukupni gubici aktivne snage u vremenskom intervalu h ,

$P_{Loss,l}^h$ – gubici aktivne snage u grani l u vremenskom intervalu h i

P_{ij}^h (P_{ji}^h) – tok aktivne snage u grani l u smeru od čvora i (j) ka čvoru j (i) u vremenskom intervalu h .

Na ovom mestu treba naglasiti da su u izrazu (1) sa i i j označeni čvorovi koji se nalaze na krajevima grane l . Ovaj način označavanja koristi se i u narednim izrazima.

U datom optimizacionom modelu važe sledeća ograničenja:

1. Zavisnost tokova snaga (P_{ij}^h, Q_{ij}^h) u granama distributivne mreže $l=1,2,\dots,N_L$ od promenljivih odlučivanja (x_i^h, V_i^h, θ_i^h) u svim vremenskim intervalima $h=1,2,\dots,N_H$:

$$P_{ij}^h = x_i^h \{G_l (V_i^h)^2 - V_i^h V_j^h [G_l \cos(\theta_i^h - \theta_j^h) + B_l \sin(\theta_i^h - \theta_j^h)]\}; \quad (2a)$$

$$Q_{ij}^h = x_i^h \{-B_l (V_i^h)^2 + V_i^h V_j^h [B_l \cos(\theta_i^h - \theta_j^h) - G_l \sin(\theta_i^h - \theta_j^h)]\}, \quad (2b)$$

gde su G_l i B_l redom konduktansa i susceptansa grane l ;

2. Bilansi aktivnih i reaktivnih snaga u čvorovima distributivne mreže $i=1,2,\dots,N_N$ u svim vremenskim intervalima $h=1,2,\dots,N_H$:

$$P_{G,i}^h - P_{L,i}^h - \sum_{j \in \Omega_i} P_{ij}^h = 0; \quad (3a)$$

$$Q_{G,i}^h - Q_{L,i}^h - \sum_{j \in \Omega_i} Q_{ij}^h = 0, \quad (3b)$$

gde su:

$P_{G,i}^h, P_{L,i}^h$ – proizvodnja i potrošnja aktivne snage u čvoru i u vremenskom intervalu h ,

$Q_{G,i}^h, Q_{L,i}^h$ – proizvodnja i potrošnja reaktivne snage u čvoru i u vremenskom intervalu h i

Ω_i – skup čvorova j koji su direktno povezani sa čvorom i ;

3. Specificirani moduo i fazni stav napona u napojnom čvoru ($i=0$) u svim vremenskim intervalima $h=1,2,\dots,N_H$:

$$V_0^h = V_S^h; \quad (4a)$$

$$\theta_0^h = 0, \quad (4b)$$

gde je V_S^h specificirana vrednost modula fazora napona napojnog čvora u vremenskom intervalu h ;

4. Ograničenje modula napona u čvorovima distributivne mreže $i=1,2,\dots,N_N$ u svim vremenskim intervalima $h=1,2,\dots,N_H$:

$$V_i^{\min} \leq V_i^h \leq V_i^{\max} \quad (5)$$

gde su V_i^{\min} i V_i^{\max} minimalni i maksimalni dozvoljeni napon u čvoru i , respektivno;

5. Ograničenje tokova snaga u granama distributivne mreže $l=1,2,\dots,N_L$ u svim vremenskim intervalima $h=1,2,\dots,N_H$:

$$(P_{ij}^h)^2 + (Q_{ij}^h)^2 \leq (S_l^{\max})^2, \quad (6)$$

gde je S_l^{\max} maksimalna dozvoljena snaga grane l ;

6. Radijalna konfiguracija razmatrane distributivne mreže u svim vremenskim intervalima $h=1,2,\dots,N_H$:

$$\sum_{l=1}^{N_L} x_l^h = N_N - N_{SP}, \quad (7)$$

gde je N_{SP} broj napojnih čvorova u distributivnoj mreži;

7. Dozvoljeni broj prekidačkih akcija (otvaranje/zatvaranje) za svaki prekidač $l=1,2,\dots,N_L$:

$$\sum_{h=1}^{N_H} |x_l^h - x_l^{h-1}| \leq N_{SW}^{MAX}, \quad (8)$$

gde su:

N_{SW}^{MAX} – dozvoljeni broj prekidačkih akcija po prekidaču,

x_l^0 – inicijalni statusi prekidača.

Za objašnjenje jednačina (2) treba dodati sledeće: ako je grana distributivne mreže (l) zatvorena ($x_l^h = 1$), tada su tokovi aktivne i reaktivne snage u toj grani (P_{ij}^h, Q_{ij}^h) određeni fazorima napona na njenim krajevima ($V_i^h, \theta_i^h, V_j^h, \theta_j^h$), što je identično kao u klasičnom modelu tokova snaga [10]; s druge strane, ako je data grana otvorena ($x_l^h = 0$), tada u njoj nema tokova aktivne i reaktivne snage ($P_{ij}^h = 0, Q_{ij}^h = 0$), bez obzira na vrednosti fazora napona na njenim krajevima.

Ograničenja (3) predstavljaju bilanse aktivnih i reaktivnih snaga u čvorovima distributivne mreže, što je identično kao u klasičnom modelu tokova snaga. U ovoj doktorskoj disertaciji se pretpostavlja da su proizvodnje i potrošnje aktivnih i reaktivnih snaga ($P_{G,i}^h, P_{L,i}^h, Q_{G,i}^h$ i $Q_{L,i}^h$ respektivno) u jednačinama (3) konstantne i unapred poznate. U praktičnim primenama ove vrednosti se dobijaju kao rezultati prognoze potrošnje [85, 86] i prognoze proizvodnje distribuiranih generatora [87-89].

Kako bi se specificirale naponske prilike u distributivnoj mreži, u klasičnom modelu tokova snaga se specificira fazor napona u jednom od čvorova distributivne mreže, koji se obično naziva balansni (eng. *slack*) čvor. U slučaju distributivnih mreža za balansni čvor najčešće se bira napojni čvor. Zbog toga, u prikazanom optimizacionom modelu pomoću ograničenja (4) specificira se fazor napona u napojnom čvoru.

Radijalna konfiguracija distributivne mreže u prikazanom optimizacionom modelu obezbeđena je sledećim ograničenjima:

- 1) bilansnim jednačinama (3) koje obezbeđuju da su svi potrošači napojeni, tj. da je svaki čvor distributivne mreže (direktno ili indirektno) povezan sa napojnim čvorom i
- 2) jednačinama (7) koje obezbeđuju da u distributivnoj mreži nema petlji.

Radi pojednostavljenja prikazanog optimizacionog modela, pretpostavlja se da u distributivnoj mreži postoji samo jedan napojni čvor sa indeksom $i = 0$, tj. u daljem tekstu se podrazumeva $N_{sp} = 1$. Međutim, ako u mreži postoje distribuirani generatori većih instalisanih snaga, tada može doći do ostrvskog režima pojedinih generatora i bliskih potrošačkih područja i navedena ograničenja nisu dovoljna da obezbede radijalnu konfiguraciju distributivne mreže. Ostrvski rad distributivne mreže povlači veliki broj tehničkih i pogonskih izazova (na primer, potrebu za regulacijom aktivnih snaga i učestanosti) i zato se u praktičnim primenama najčešće izbegava. Kako bi se onemogućio ostrvski rad distributivne mreže, u prikazanom optimizacionom modelu potrebno je uvesti dodatna ograničenja, kako je prikazano u [60] (jednačine (9)-(12)). Radi pojednostavljenja prikazanog optimizacionog modela, pretpostavlja se da u razmatranoj distributivnoj mreži postoje distribuirani generatori malih snaga, koji ne mogu da napajaju potrošače u ostrvskom režimu. Zbog toga, kao rešenje prikazanog optimizacionog modela ne može se dobiti konfiguracija distributivne mreže sa distribuiranim generatorima u ostrvskom režimu.

Ograničenjima (8) obezbeđuje se da ukupan broj prekidačkih akcija za svaki od razmatranih prekidača ne prelazi maksimalno dozvoljeni broj prekidačkih akcija (N_{sw}^{MAX}). Parametar N_{sw}^{MAX} određuje se u zavisnosti od tipa i očekivanog veka trajanja prekidača. Na primer, u radu [77] koristi se $N_{sw}^{MAX} = 6$ za period od jednog dana za prekidač čiji je očekivani vek trajanja 15 godina, pri čemu su 4 prekidačke akcije planirane za rekonfiguraciju distributivne mreže u normalnim pogonskim uslovima, dok su dve prekidačke akcije namenjene za rekonfiguraciju distributivne mreže u havarijskim pogonskim uslovima, tj. za slučaj da je potrebno izolovati kvar u distributivnoj mreži, ili restaurisati napajanje nakon kvara. Radi jednostavnosti, pretpostavlja se da je parametar N_{sw}^{MAX} isti za sve razmatrane prekidače.

Ograničenja (8) sadrže operator apsolutne vrednosti i zbog toga se ne mogu direktno obrađivati u većini programskih paketa za mešovito-celobrojno programiranje. Međutim, ova ograničenja mogu se reformulisati, odnosno ekvivalentirati linearnim ograničenjima uvođenjem binarnih promenljivih y_i^h koje su definisane na sledeći način:

$$y_l^h = \begin{cases} 1 & \text{– Ako grana } l \text{ menja status u vremenskom intervalu } h, \\ 0 & \text{– Ako grana } l \text{ ne menja status u vremenskom intervalu } h. \end{cases} \quad (9)$$

Ako su statusi grane l u dva uzastopna vremenska intervala različiti ($x_l^h \neq x_l^{h-1}$), tada data grana menja status ($y_l^h = 1$) i obrnuto. Opisana veza između promenljivih x_l^h i y_l^h modeluje se pomoću sledeće četiri nejednakosti ($k = 1, 2, 3, 4$) [90]:

$$k = 1: \quad y_l^h \leq x_l^h + x_l^{h-1}; \quad (10a)$$

$$k = 2: \quad y_l^h \geq x_l^{h-1} - x_l^h; \quad (10b)$$

$$k = 3: \quad y_l^h \geq x_l^h - x_l^{h-1}; \quad (10c)$$

$$k = 4: \quad y_l^h \leq 2 - x_l^h - x_l^{h-1}. \quad (10d)$$

Koristeći (9) i (10), ograničenja (8) zapisuju se u kompaktnoj linearnoj formi na sledeći način:

$$\sum_{h=1}^{N_h} y_l^h - N_{SW}^{MAX} \leq 0; \quad (11a)$$

$$A_{k1}x_l^h + A_{k2}x_l^{h-1} + A_{k3}y_l^h + A_{k4} \leq 0, \quad k = 1, 2, 3, 4, \quad (11b)$$

gde se koeficijenti A_{k1} , A_{k2} , A_{k3} i A_{k4} dobijaju iz nejednakosti (10a-d).

Izrazima (1)-(7), (11) definisan je mešovito-celobrojni nelinearni optimizacioni model za operativno planiranje rekonfiguracije distributivnih mreža. Promenljive odlučivanja u navedenom optimizacionom modelu su: moduli i fazni stavovi fazora napona (V_i^h i θ_i^h respektivno), statusi grana (x_l^h) i indikatori promene statusa grana (y_l^h). Navedeni optimizacioni model može se rešavati programskim paketima za mešovito celobrojno-nelinearno programiranje, na primer programskim paketom KNITRO, kako je prikazano u Prilogu 1. Međutim, najveći nedostatak navedenog optimizacionog modela je njegova velika dimenzionalnost. Naime, u slučaju primene na realne distributivne mreža sa više stotina čvorova i za realan broj vremenskih intervala (na primer 24 u slučaju operativnog planiranja rekonfiguracije za dan unapred), opisani optimizacioni model sadrži više hiljada kontinualnih i binarnih promenljivih. Za optimizacioni model ovih dimenzija primenom programskih paketa za mešovito-celobrojno nelinearno programiranje ne može se dobiti rešenje u prihvatljivom vremenu.

Kako bi se olakšalo rešavanje ovakvih optimizacionih modela, oni se najčešće svode na mešovito-celobrojno linearne [48], mešovito-celobrojno kvadratne [53] ili mešovito-celobrojno konveksne [57] optimizacione modele. U ovoj glavi izvršena je linearizacija navedenog optimizacionog modela, kako bi se dobio mešovito-celobrojni linearni optimizacioni model.

2.2 Linearni optimizacioni model

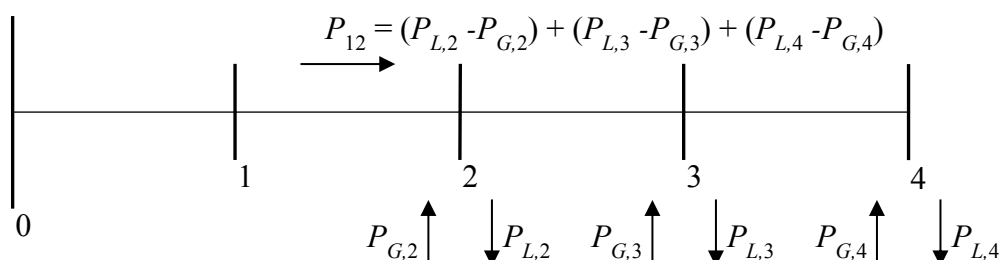
U ovom poglavlju najpre su prikazana zanemarenja koja se uvode u cilju linearizacije optimizacionog modela opisanog u poglavlju 2.1. Zatim su predstavljeni modeli povezanosti distributivne mreže, koji su zasnovani na putanjama koje su dodeljene čvorovima, odnosno segmentima distributivne mreže. Navedeni modeli povezanosti distributivne mreže su iskorišćeni za razvoj linearizovanog optimizacionog modela za operativno planiranje rekonfiguracije distributivnih mreža koji je predstavljen na kraju ove glave.

2.2.1 Zanemarenja u opštem optimizacionom modelu

Linearizacija optimizacionog modela predstavljenog u poglavlju 2.1 zasnovana je na sledeća četiri zanemarenja [17, 48]:

Prvo zanemarenje

Pretpostavlja se da je tok aktivne snage u proizvoljnoj grani distributivne mreže jednak sumi potrošnje aktivnih snaga svih potrošača koji se napajaju preko date grane. Ovo zanemarenje ilustrovano je na primeru jednostavne distributivne mreže prikazane na slici 2.1. U datom primeru tok aktivne snage P_{12} jednak je sumi potrošnje aktivne snage u čvorovima $i = 2,3,4$. Na ovaj način se zanemaruju gubici aktivne snage u bilansnim jednačina (3). Ovo zanemarenje je opravdano s obzirom da su gubici aktivne snage znatno manji od potrošnje aktivne snage. Analogna pretpostavka važi i za tokove reaktivnih snaga.



Slika 2.1 – Proračun toka aktivne snage po grani uz zanemarenje gubitaka

Kao rezultat navedenog zanemarenja, za tokove snaga (P_l^h i Q_l^h) važe sledeće relacije:

$$P_l^h = P_{ij}^h = -P_{ji}^h; \quad (12a)$$

$$Q_l^h = Q_{ij}^h = -Q_{ji}^h. \quad (12b)$$

Drugo zanemarenje

Gubici aktivne snage u grani l aproksimiraju se sledećom relacijom:

$$P_{Loss,l}^h = R_l \frac{(P_l^h)^2 + (Q_l^h)^2}{(V_l^h)^2}, \quad (13)$$

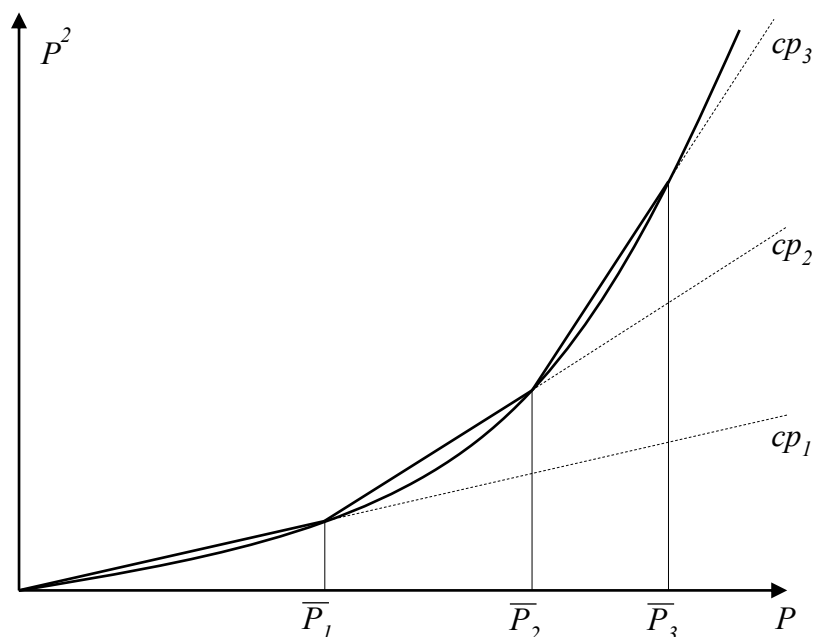
gde je R_l otpornost grane l .

Pored navedene aproksimacije, pretpostavlja se da su moduli napona u jednačinama (13) jednaki $V_i^h = 1$ r.j. Koristeći ovu pretpostavku, krajnji izraz za gubitke aktivne snage u grani l je:

$$P_{Loss,l}^h = R_l((P_l^h)^2 + (Q_l^h)^2). \quad (14)$$

Treće zanemarenje

Kvadratna funkcija $(P_l^h)^2$ aproksimira se funkcijom koja je linearna po delovima, kako je prikazano na slici 2.2.



Slika 2.2 – Linearizacija kvadratne funkcije P^2

U opštem slučaju kvadratna funkcija $(P_l^h)^2$ aproksimira se funkcijom koja se sastoji od N_{TP} linearnih odsečaka (na primeru sa slike 2.2 je $N_{TP} = 3$). Na osnovu ove aproksimacije promenljive P_l^h i $(P_l^h)^2$ zapisuju se na sledeći način:

$$P_l^h = \sum_{t=1}^{N_{TP}} P_{lt}^h; \quad (15a)$$

$$(P_l^h)^2 = \sum_{t=1}^{N_{TP}} cp_{lt}^h P_{lt}^h. \quad (15b)$$

Za linearne odsečke P_{lt}^h važe sledeća ograničenja:

$$\begin{aligned} 0 &\leq P_{l1}^h \leq \bar{P}_{l1}^h; \\ 0 &\leq P_{l2}^h \leq (\bar{P}_{l2}^h - \bar{P}_{l1}^h); \\ &\vdots \\ 0 &\leq P_{lN_{TP}}^h \leq (\bar{P}_{lN_{TP}}^h - \bar{P}_{l(N_{TP}-1)}^h), \end{aligned} \quad (16)$$

pri čemu su granične tačke linearnih odsečaka \bar{P}_{lt}^h konstantne i zadate unapred.

Koeficijenti cp_{lt}^h u relacijama (15b) računaju se na sledeći način:

$$\begin{aligned} cp_{l1}^h &= \frac{(\bar{P}_{l1}^h)^2}{\bar{P}_{l1}^h}; \\ cp_{l2}^h &= \frac{(\bar{P}_{l2}^h)^2 - (\bar{P}_{l1}^h)^2}{\bar{P}_{l2}^h - \bar{P}_{l1}^h}; \\ &\vdots \\ cp_{lN_{TP}}^h &= \frac{(\bar{P}_{lN_{TP}}^h)^2 - (\bar{P}_{l(N_{TP}-1)}^h)^2}{\bar{P}_{lN_{TP}}^h - \bar{P}_{l(N_{TP}-1)}^h}. \end{aligned} \quad (17)$$

Analogna aproksimacija koristi se za tokove reaktivnih snaga:

$$Q_i^h = \sum_{t=1}^{N_{TQ}} Q_{it}^h; \quad (18a)$$

$$(Q_i^h)^2 = \sum_{t=1}^{N_{TQ}} cq_{it}^h Q_{it}^h, \quad (18b)$$

pri čemu za linearne odsečke Q_{it}^h važe sledeća ograničenja:

$$\begin{aligned} 0 &\leq Q_{i1}^h \leq \bar{Q}_{i1}^h; \\ 0 &\leq Q_{i2}^h \leq (\bar{Q}_{i2}^h - \bar{Q}_{i1}^h); \\ &\vdots \\ 0 &\leq Q_{iN_{TQ}}^h \leq (\bar{Q}_{iN_{TQ}}^h - \bar{Q}_{i(N_{TQ}-1)}^h), \end{aligned} \quad (19)$$

dok se koeficijenti cq_{it}^h računaju na sledeći način:

$$\begin{aligned} cq_{i1}^h &= \frac{(\bar{Q}_{i1}^h)^2}{\bar{Q}_{i1}^h}; \\ cq_{i2}^h &= \frac{(\bar{Q}_{i2}^h)^2 - (\bar{Q}_{i1}^h)^2}{\bar{Q}_{i2}^h - \bar{Q}_{i1}^h}; \\ &\vdots \\ cq_{iN_{TQ}}^h &= \frac{(\bar{Q}_{iN_{TQ}}^h)^2 - (\bar{Q}_{i(N_{TQ}-1)}^h)^2}{\bar{Q}_{iN_{TQ}}^h - \bar{Q}_{i(N_{TQ}-1)}^h}. \end{aligned} \quad (20)$$

Četvrto zanemarenje

Pad napona na proizvoljnoj grani distributivne mreže (l) aproksimira se relacijom:

$$(V_i^h)^2 - (V_j^h)^2 = 2(R_l P_l^h + X_l Q_l^h). \quad (21)$$

Kao rezultat uvedenih zanemarenja, opšti optimizacioni model za operativno planiranje rekonfiguracije distributivnih mreža predstavljen u poglavlju 2.1 dobija sledeću formu:

$$\min_{x_l^h, y_l^h, P_{lt}^h, Q_{lt}^h} \left(P_{Loss} = \sum_{h=1}^{N_H} P_{Loss}^h = \sum_{h=1}^{N_H} \sum_{l=1}^{N_L} R_l ((P_l^h)^2 + (Q_l^h)^2) = \sum_{h=1}^{N_H} \sum_{l=1}^{N_L} R_l \left(\sum_{t=1}^{N_{TP}} c p_{lt}^h P_{lt}^h + \sum_{t=1}^{N_{TQ}} c q_{lt}^h Q_{lt}^h \right) \right) \quad (22)$$

sa ograničenjima:

1. Jednakosti (15a) i (18a) kojima su opisane veze između promenljivih P_l^h i Q_l^h i promenljivih odlučivanja P_{lt}^h i Q_{lt}^h ;
2. Jednakosti (12) kojima su opisane veze između promenljivih P_l^h i Q_l^h i promenljivih P_{ij}^h i Q_{ij}^h ;
3. Ograničenja za P_{lt}^h i Q_{lt}^h (16) i (19);
4. Bilans aktivnih i reaktivnih snaga u čvorovima distributivne mreže (3);
5. Specificirani fazor napona u napojnom čvoru (4);
6. Izrazi za napone u čvorovima distributivne mreže:

$$x_l^h ((V_i^h)^2 - (V_j^h)^2) = 2(R_l P_l^h + X_l Q_l^h); \quad (23)$$

7. Ograničenje modula napona u čvorovima distributivne mreže (5);
8. Ograničenje tokova snaga po granama distributivne mreže:

$$\sum_{t=1}^{N_{TP}} c p_{lt}^h P_{lt}^h + \sum_{t=1}^{N_{TQ}} c q_{lt}^h Q_{lt}^h \leq x_l^h (S_l^{\max})^2; \quad (24)$$

9. Radikalna konfiguracija distributivne mreže (7);
10. Dozvoljeni broj prekidačkih akcija za svaki prekidač (11).

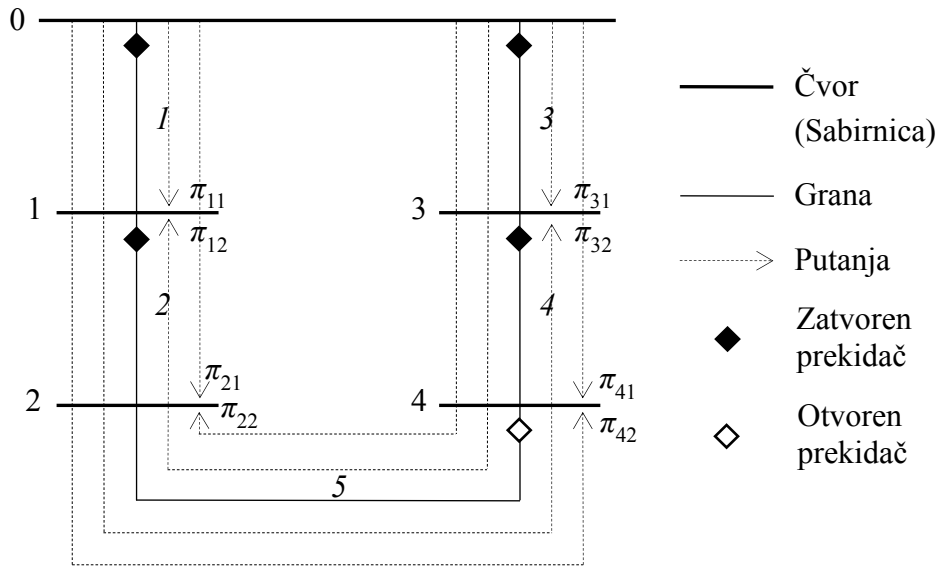
Kao posledica uvedenih zanemarenja, promenljive odlučivanja više nisu moduli i fazni stavovi fazora napona (V_i^h i θ_i^h respektivno) kao u opštem optimizacionom modelu opisanom u poglavlju 2.1, već tokovi snaga po granama P_l^h i Q_l^h , odnosno odgovarajući linearni odsecci P_{lt}^h i Q_{lt}^h .

Na ovom mestu treba naglasiti da statusi prekidača (x_l^h) figurišu kao promenljive u ograničenjima (23) i (24). Smisao jednačine (23) je u sledećem: ako je određena grana (l) zatvorena ($x_l^h = 1$), tada je pad napona duž ove grane određen jednačinom (21); s druge strane, ako je data grana otvorena ($x_l^h = 0$), ona nema uticaja na vrednosti napona na njenim krajevima (u tom slučaju obe strane jednakosti (23) biće jednake nuli). Takođe, ako je određena grana (l) otvorena ($x_l^h = 0$), tokovi snaga u njoj moraju biti jednaki nuli (tj. $P_l^h = Q_l^h = 0$), što je obezbeđeno ograničenjima (24).

Predstavljeni optimizacioni model je nelinearan (ograničenja (23) su nelinearna) i neefikasan za primenu u distributivnim mrežama realnih dimenzija, zbog istih razloga kao i opšti optimizacioni model predstavljen u poglavlju 2.1. Kako bi se dobio linearni optimizacioni model, u ovoj doktorskoj disertaciji koriste se modeli povezanosti distributivne mreže zasnovani na putanjama koje su dodeljene čvorovima, odnosno segmentima distributivne mreže.

2.2.2 Model povezanosti distributivne mreže zasnovan na putanjama koje su dodeljene čvorovima

Model povezanosti distributivne mreže zasnovan na putanjama koje su dodeljene čvorovima distributivne mreže predložen je u [48], sa ciljem da omogući da se ograničenje radikalnosti distributivne mreže izrazi u formi algebarskih relacija i na taj način tretira u različitim optimizacionim modelima. Kao ilustracija navedenog pristupa, u [48] je prikazana primena navedenog modela povezanosti u rekonfiguraciji distributivne mreže. Navedeni model povezanosti objašnjen je na primeru male distributivne mreže prikazane na slici 2.3, koja se sastoji od $N_N = 5$ čvorova i $N_L = 5$ grana. Čvorovi su indeksirani brojevima $i = 0, 1, 2, 3, 4$ koji su prikazani običnim fontom, dok su grane indeksirane brojevima $l = 1, 2, 3, 4, 5$ koji su prikazani kurzivom. Čvor sa indeksom $i = 0$ predstavlja napojni čvor.



Slika 2.3 – Primer distributivne mreže sa putanjama koje su dodeljene čvorovima

Model povezanosti distributivne mreže zasnovan na putanjama koje su dodeljene čvorovima podrazumeva da se svakom čvoru distributivne mreže i dodeli skup putanja:

$$\Omega_{P,i} = \{\pi_{i1}, \dots, \pi_{ip}, \dots\}, \quad (25)$$

gde svaka putanja π_{ip} predstavlja skup grana preko kojih se dati čvor napaja. U primeru sa slike 2.3, čvor $i = 1$ može biti napajan preko dve putanje koje su obeležene sa π_{11} i π_{12} i koje obuhvataju sledeće skupove grana: $\pi_{11} = \{1\}$ i $\pi_{12} = \{2, 3, 4, 5\}$.

U zavisnosti od konfiguracije distributivne mreže putanje mogu biti aktivne ili neaktivne. Na primeru sa slike, putanja π_{11} je aktivna, zato što su prekidači u svim granama koje pripadaju ovoj putanji zatvoreni. S druge strane, putanja π_{12} je neaktivna, zato što je prekidač u grani $l = 5$ otvoren ($x_5 = 0$). Status određene putanje π_{ip} (neaktivna/aktivna) predstavlja se binarnom (0/1) promenljivom w_{ip}^h koja je definisana na sledeći način:

$$w_{ip}^h = \begin{cases} 1 & \text{– Ako je putanja } p \text{ čvora } i \text{ aktivna u vremenskom intervalu } h, \\ 0 & \text{– Ako je putanja } p \text{ čvora } i \text{ neaktivna u vremenskom intervalu } h. \end{cases} \quad (26)$$

U opštem slučaju, proizvoljna putanja π_{ip} je aktivna u određenom vremenskom intervalu h ($w_{ip}^h = 1$) ako su sve grane koje pripadaju datoj putanji ($l \in \pi_{ip}$) u datom vremenskom intervalu zatvorene ($x_l^h = 1$). S druge strane, navedena putanja je neaktivna u vremenskom intervalu h ($w_{ip}^h = 0$) ako je bar jedna grana (l) koja pripada datoj putanji u datom vremenskom intervalu otvorena ($x_l^h = 0$). Navedena veza između statusa putanja (w_{ip}^h) i statusa grana koje one sadrže (x_l^h) predstavlja se sledećom relacijom:

$$w_{ip}^h = \prod_{l \in \pi_{ip}} x_l^h \quad (27)$$

Relacija (27) je nelinearna, zato što sadrži proizvod binarnih promenljivih x_l^h . Međutim, u [91] je pokazano da se ova relacija može predstaviti pomoću sledećeg skupa linearnih relacija:

$$w_{ip}^h \leq x_l^h, \quad \forall l \in \pi_{ip}; \quad (28a)$$

$$w_{ip}^h \geq \sum_{l \in \pi_{ip}} x_l^h - |\pi_{ip}| + 1 \quad (28b)$$

pri čemu $|\pi_{ip}|$ predstavlja kardinalni broj skupa π_{ip} , odnosno broj grana na putanji π_{ip} .

Opisani koncept putanja koje su dodeljene čvorovima distributivne mreže omogućuje da se ograničenje radialnosti distributivne mreže izrazi pomoću sledeća dva skupa algebarskih relacija [48]:

1. Svaki čvor distributivne mreže (i) ima tačno jednu aktivnu putanju:

$$\sum_{p \in \Omega_{p,i}} w_{ip}^h = 1. \quad (29)$$

2. Ako je putanja π_{ip} aktivna, tada sve putanje π_{im} koje se sadrže na datoj putanji takođe moraju biti aktivne:

$$w_{im}^h \leq w_{ip}^h, \quad \forall \pi_{im} \subset \pi_{ip}. \quad (30)$$

U paragrafu 2.2.1 uvedena je pretpostavka da su tokovi aktivne i reaktivne snage u grani l (P_l^h i Q_l^h respektivno) jednaki sumi potrošnje aktivne i reaktivne snage svih potrošača koji se napajaju preko grane l . Zbog toga se bilansne jednačine (3) zamenjuju sledećim relacijama:

$$P_l^h = \sum_{\pi_{ip} \in \Omega_{p,l}} w_{ip}^h (P_{L,i}^h - P_{G,i}^h); \quad (31a)$$

$$Q_l^h = \sum_{\pi_{ip} \in \Omega_{p,l}} w_{ip}^h (Q_{L,i}^h - Q_{G,i}^h). \quad (31b)$$

U relacijama (31) sa $\Omega_{P,l}$ označen je skup svih putanja koje sadrže granu l . Na primeru sa slike 2.3, za granu $l=2$ ovaj skup sadrži putanje $\Omega_{P,2} = \{\pi_{12}, \pi_{22}, \pi_{32}, \pi_{42}\}$.

Ukupan pad napona od napojnog čvora ($i=0$) do proizvoljnog čvora distributivne mreže (i) duž putanje π_{ip} aproksimira se relacijom:

$$(V_0^h)^2 - (V_i^h)^2 = 2 \sum_{l \in \pi_{ip}} (R_l P_l^h + X_l Q_l^h). \quad (32)$$

Ograničenje ($V_i^h \geq V_i^{\min}$) predstavlja se sledećim skupom relacija:

$$(V_0^h)^2 - 2 \sum_{l \in \pi_{ip}} (R_l P_l^h + X_l Q_l^h) \geq (V_i^{\min})^2 - (1 - w_{ip}^h), \quad \forall \pi_{ip} \in \Omega_{P,i}. \quad (33)$$

Član $(1 - w_{ip}^h)$ na desnoj strani ograničenja (33) obezbeđuje da ograničenje za pad napona važi samo za putanju π_{ip} čvora i koja je aktivna ($w_{ip}^h = 1$). Slično, ograničenje $V_i^h \leq V_i^{\max}$ može se predstaviti sledećim relacijama:

$$(V_0^h)^2 - 2 \sum_{l \in \pi_{ip}} (R_l P_l^h + X_l Q_l^h) \leq (V_i^{\max})^2 + (1 - w_{ip}^h), \quad \forall \pi_{ip} \in \Omega_{P,i}. \quad (34)$$

Na osnovu prethodno navedenog, operativno planiranje rekonfiguracije distributivnih mreža može se predstaviti kao mešovito-celobrojni linearni optimizacioni problem u sledećoj formi:

$$\min_{x_l^h, y_l^h, w_{ip}^h, P_{lt}^h, Q_{lt}^h} \left(P_{Loss} = \sum_{h=1}^{N_H} P_{Loss}^h = \sum_{h=1}^{N_H} \sum_{l=1}^{N_L} R_l \left(\sum_{t=1}^{N_{TP}} c p_{lt}^h P_{lt}^h + \sum_{t=1}^{N_{TQ}} c q_{lt}^h Q_{lt}^h \right) \right) \quad (35)$$

sa ograničenjima:

1. Jednakosti (15a) i (18a) kojima su opisane veze između promenljivih P_l^h i Q_l^h i promenljivih odlučivanja P_{lt}^h i Q_{lt}^h ;
2. Ograničenja za P_{lt}^h i Q_{lt}^h (16) i (19);
3. Zavisnost tokova snaga P_l^h i Q_l^h od statusa putanja w_{ip}^h (31);
4. Relacije (28) kojima su povezani statusi putanja w_{ip}^h i statusi prekidača x_l^h ;
5. Specificirani fazor napona u napojnom čvoru (4);
6. Ograničenje modula napona u čvorovima distributivne mreže (33)-(34);
7. Ograničenje tokova snaga po granama distributivne mreže:

$$\sum_{t=1}^{N_{TP}} c p_{lt}^h P_{lt}^h + \sum_{t=1}^{N_{TQ}} c q_{lt}^h Q_{lt}^h \leq (S_l^{\max})^2; \quad (36)$$

8. Radijalna konfiguracija distributivne mreže (29);
9. Dozvoljeni broj prekidačkih akcija za svaki prekidač (11).

Promenljive odlučivanja u prikazanom optimizacionom modelu su: tokovi snaga (P_{lt}^h , Q_{lt}^h), statusi grana (x_l^h), indikatori promene statusa grana (y_l^h) i statusi putanja (w_{ip}^h). Na

ovom mestu treba primetiti da ograničenja (30) nisu uključena u prikazani optimizacioni model, zato što su redundantna sa ograničenjima (28).

Prikazani optimizacioni model može se rešavati programskim paketima za mešovito-celobrojno linearno programiranje (na primer programskim paketom CPLEX). Međutim, nedostatak navedenog optimizacionog modela je njegova velika dimenzionalnost. Naime, svakom čvoru distributivne mreže dodeljen je skup putanja, pri čemu je status putanje predstavljen jednom binarnom promenljivom (w_{ip}^h). U slučaju primene na realne distributivne mreže sa više stotina čvorova i za realan broj vremenskih intervala, prikazani optimizacioni model sadrži više hiljada binarnih promenljivih što ga čini veoma teškim za rešavanje. Kako bi se smanjila dimenzionalnost ovog modela, u [83] je uveden model povezanosti distributivne mreže koji je zasnovan na putanjama koje su dodeljene segmentima distributivne mreže.

2.2.3 Model povezanosti distributivne mreže zasnovan na putanjama koje su dodeljene segmentima

Na početku ove glave uvedena je pretpostavka da svaka grana razmatrane distributivne mreže sadrži prekidački uređaj. Međutim, u većini savremenih distributivnih mreža najčešće je manji broj grana opremljen prekidačima. Pored toga, najveći broj prekidača u distributivnim mrežama su ručno upravljani, dok je manji broj prekidača daljinski upravljani. Međutim, u kratkoročnim (na primer dnevnim ili satnim) rekonfiguracijama distributivnih mreža najčešće se manipuliše samo daljinski upravljanim prekidačima [77]. Ova pretpostavka usvaja se i u problemu operativnog planiranja rekonfiguracije distributivnih mreža koji se razmatra u ovoj doktorskoj disertaciji. Dakle, u daljem tekstu se pod pojmom prekidača podrazumevaju samo daljinski upravljani prekidači.

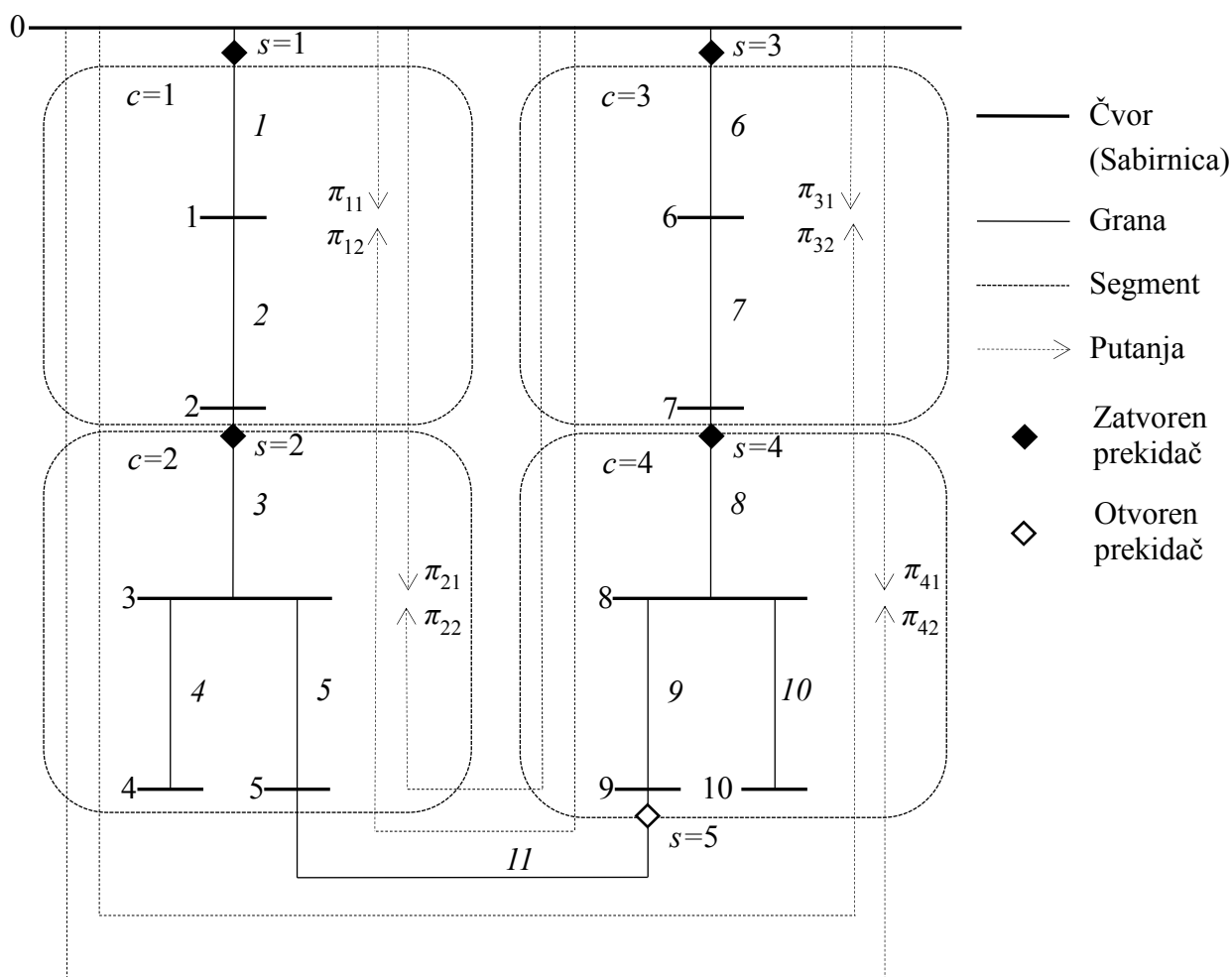
Razmatranje ograničenog broja prekidača omogućuje uvođenje modela povezanosti distributivne mreže zasnovanog na putanjama koje su dodeljene segmentima distributivne mreže. Naime, proizvoljna distributivna mreža može se podeliti na segmente koji predstavljaju delove distributivne mreže koji su razdvojeni prekidačima. Ova podela ilustrovana je na primeru distributivne mreže na slici 2.4, a koja se sastoji od $N_N = 10$ čvorova i $N_L = 11$ grana. Prikazana distributivna mreža sadrži pet prekidača koji su označeni sa $s = 1, 2, 3, 4, 5$ i može se podeliti na četiri segmenta koji su obeleženi tačkastim linijama i označeni indeksima $c = 1, 2, 3, 4$.

Skupovi čvorova koji pripadaju segmentu c obeležavaju se sa $\Omega_{N,c}$. Svi čvorovi distributivne mreže koji pripadaju istom segmentu uvek se napajaju duž iste putanje. Zbog zoga, putanje se mogu dodeliti segmentima, umesto svakom čvoru posebno. Prema tome, svakom segmentu distributivne mreže c dodeljen je skup putanja:

$$\Omega_{P,c} = \{\pi_{c1}, \dots, \pi_{cp}, \dots\}, \quad (37)$$

gde svaka putanja π_{cp} predstavlja skup prekidača preko kojih se dati segment napaja. U primeru sa slike 2.4, segment $c = 1$ može biti napajan preko dve putanje koje su obeležene sa π_{11} i π_{12} i koje obuhvataju sledeće skupove prekidača: $\pi_{11} = \{1\}$ i $\pi_{12} = \{2,3,4,5\}$.

U zavisnosti od konfiguracije distributivne mreže, putanje π_{cp} mogu biti aktivne ili neaktivne. Na primeru sa slike 2.4, putanja π_{11} je aktivna, dok je putanja π_{12} neaktivna. Status putanje π_{cp} (neaktivna/aktivna) predstavlja se binarnom (0/1) promenljivom w_{cp}^h , koja se definiše slično kao promenljiva w_{ip}^h izrazom (26). Za navedeni primer, promenljive w_{cp}^h imaju sledeće vrednosti: $w_{11}^h = 1$ i $w_{12}^h = 0$.



Slika 2.4 – Primer distributivne mreže sa putanjama koje su dodeljene segmentima

U opštem slučaju, proizvoljna putanja π_{cp} je aktivna u određenom vremenskom intervalu h ($w_{cp}^h = 1$) ako su svi prekidači (s) koji pripadaju datoj putanji u datom vremenskom intervalu zatvoreni ($x_s^h = 1$). S druge strane, navedena putanja je neaktivna u datom vremenskom intervalu ($w_{cp}^h = 0$) ako je bar jedan prekidač (s) koji pripada datoj

putanji u datom vremenskom interval otvoren ($x_s^h = 0$). Navedena veza između statusa putanja (w_{cp}^h) i statusa prekidača koje one sadrže (x_s^h) predstavlja se sledećom relacijom:

$$w_{cp}^h = \prod_{s \in \pi_{cp}} x_s^h. \quad (38)$$

Relacija (38) je nelinearna, zato što sadrži proizvod binarnih promenljivih x_s^h . Međutim, kao i u slučaju relacije (27), relacija (38) može se predstaviti pomoću skupa linearnih relacija:

$$w_{cp}^h \leq x_s^h, \quad \forall s \in \pi_{cp}; \quad (39a)$$

$$w_{cp}^h \geq \sum_{s \in \pi_{cp}} x_s^h - |\pi_{cp}| + 1. \quad (39b)$$

Opisani model povezanosti distributivnih mreža omogućuje da se ograničenje radikalnosti distributivnih mreža izrazi u formi algebarskih relacija na sledeći način [83]:

1) Svaki segment (c) ima tačno jednu aktivnu putanju:

$$\sum_{p \in \Omega_{p,c}} w_{cp}^h = 1. \quad (40)$$

2) Ako je putanja π_{cp} aktivna, tada sve putanje π_{cm} koje se sadrže na datoj putanji takođe moraju biti aktivne:

$$w_{cm}^h \leq w_{cp}^h, \quad \forall \pi_{cm} \subset \pi_{cp}. \quad (41)$$

2.2.4 Izvođenje linearizovanog optimizacionog modela

U ovom paragrafu izveden je linearni optimizacioni model za operativno planiranje rekonfiguracije distributivnih mreža koji će se obrađivati u narednim glavama ove doktorske disertacije. Ograničenja modula napona u čvorovima distributivne mreže, kao i bilansne relacije u paragrafu 2.2.2 izraženi su pomoću promenljivih w_{ip}^h (relacije (31), (33) i (34)). Ista ograničenja u ovom paragrafu izražena su pomoću promenljivih w_{cp}^h .

Neka čvor i distributivne mreže pripada segmentu c i neka se segment c napaja preko putanje π_{cp} . Ukupan pad napona od napojnog čvora ($i = 0$) do čvora i aproksimira se relacijom:

$$(V_0^h)^2 - (V_i^h)^2 = 2 \sum_{l \in \Omega_{L,i,\pi_{cp}}} (R_l P_l^h + X_l Q_l^h), \quad (42)$$

gde $\Omega_{L,i,\pi_{cp}}$ predstavlja skup grana preko kojih se čvor i napaja duž putanje π_{cp} . Na primeru sa slike 2.4, za čvor $i = 4$ u segmentu $c = 2$ koji se napaja preko putanje π_{21} skup $\Omega_{L,4,\pi_{21}}$ sadrži sledeće grane $\Omega_{L,4,\pi_{21}} = \{1,2,3,4\}$. Sa druge strane, u slučaju da se segment $c = 2$ napaja preko putanje π_{22} , skup $\Omega_{L,4,\pi_{22}}$ sadrži grane $\Omega_{L,4,\pi_{22}} = \{4,5,6,7,8,9,11\}$.

Ograničenje ($V_i^h \geq V_i^{\min}$) predstavlja se sledećim skupom relacija:

$$(V_0^h)^2 - 2 \sum_{l \in \Omega_{L,i,\pi_{cp}}} (R_l P_l^h + X_l Q_l^h) \geq (V_i^{\min})^2 - (1 - w_{cp}^h), \forall \pi_{cp} \in \Omega_{P,c}, i \in \Omega_{N,c}. \quad (43)$$

Kao i u slučaju ograničenja (33), član $(1 - w_{cp}^h)$ na desnoj strani ograničenja (43) obezbeđuje da dato ograničenje važi samo za putanju π_{cp} segmenta c ($\pi_{cp} \in \Omega_{P,c}$) koja je aktivna ($w_{cp}^h = 1$). Analogno, ograničenje $V_i^h \leq V_i^{\max}$ predstavlja se sledećim relacijama:

$$(V_0^h)^2 - 2 \sum_{l \in \Omega_{L,i,\pi_{cp}}} (R_l P_l^h + X_l Q_l^h) \leq (V_i^{\max})^2 + (1 - w_{cp}^h), \forall \pi_{cp} \in \Omega_{P,c}, i \in \Omega_{N,c}. \quad (44)$$

Koristeći model povezanosti distributivne mreže zasnovan na putanjama koje su dodeljene segmentima relacija (31a) zapisuje se na sledeći način:

$$P_l^h = \sum_{i=1}^{N_N} \sum_{\substack{\pi_{cp} \in \Omega_{P,c} \\ i \in \Omega_{N,c}}} I(l,i,\pi_{cp}) w_{cp}^h (P_{L,i}^h - P_{G,i}^h) \quad (45)$$

gde je $I(l,i,\pi_{cp})$ binarni indikator definisan na sledeći način:

$$I(l,i,\pi_{cp}) = \begin{cases} 1, & l \in \Omega_{L,i,\pi_{cp}} \\ 0, & l \notin \Omega_{L,i,\pi_{cp}} \end{cases}. \quad (46)$$

Analogno, tok reaktivne snage u grani izražava se na sledeći način:

$$Q_l^h = \sum_{i=1}^{N_N} \sum_{\substack{\pi_{cp} \in \Omega_{P,c} \\ i \in \Omega_{N,c}}} I(l,i,\pi_{cp}) w_{cp}^h (Q_{L,i}^h - Q_{G,i}^h). \quad (47)$$

Koristeći relacije (43)-(47), operativno planiranje rekonfiguracije distributivnih mreža može se predstaviti kao mešovito-celobrojni linearni optimizacioni problem u sledećoj formi:

$$\min_{x_s^h, y_s^h, w_{cp}^h, P_{lt}^h, Q_{lt}^h} \left(P_{Loss} = \sum_{h=1}^{N_H} P_{Loss}^h = \sum_{h=1}^{N_H} \sum_{l=1}^{N_L} R_l \left(\sum_{t=1}^{N_{TP}} c P_{lt}^h P_{lt}^h + \sum_{t=1}^{N_{TQ}} c Q_{lt}^h Q_{lt}^h \right) \right) \quad (48)$$

sa ograničenjima:

1. Jednakosti (15a) i (18a) kojima su opisane veze između promenljivih P_l^h i Q_l^h i promenljivih odlučivanja P_{lt}^h i Q_{lt}^h ;
2. Ograničenja za P_{lt}^h i Q_{lt}^h (16) i (19);
3. Zavisnost tokova snaga P_l^h i Q_l^h od statusa putanja w_{cp}^h (45)-(47);
4. Relacije (39) kojima su povezani statusi putanja w_{cp}^h i statusi prekidača x_s^h ;
5. Specificirani fazor napona u napojnom čvoru (4);
6. Ograničenje modula napona u čvorovima distributivne mreže (44)-(45);
7. Ograničenje tokova snaga po granama distributivne mreže

$$\sum_{t=1}^{N_{TP}} c P_{lt}^h P_{lt}^h + \sum_{t=1}^{N_{TQ}} c Q_{lt}^h Q_{lt}^h \leq (S_l^{\max})^2; \quad (49)$$

8. Radijalna konfiguracija distributivne mreže (40);

9. Dozvoljeni broj prekidačkih akcija za svaki prekidač s :

$$\sum_{h=1}^{N_H} y_s^h - N_{SW}^{MAX} \leq 0; \quad (50a)$$

$$A_{k1}x_s^h + A_{k2}x_s^{h-1} + A_{k3}y_s^h + A_{k4} \leq 0, \quad k = 1,2,3,4. \quad (50b)$$

3. Novi algoritam za rešavanje problema operativnog planiranja rekonfiguracije distributivnih mreža

U ovoj glavi predstavljen je novi algoritam za rešavanje problema operativnog planiranja rekonfiguracije distributivnih mreža, koji je zasnovan na metodi Lagranžove relaksacije. Najpre je objašnjena metoda Lagranžove relaksacije i njena primena u rešavanju navedenog problema. Zatim su objašnjeni algoritmi za rešavanje Lagranžovog dualnog problema i određivanje primalnog dopustivog rešenja.

3.1 Metoda Lagranžove relaksacije

Metoda Lagranžove relaksacije [92-95] ima veliku primenu u rešavanju optimizacionih problema velikih dimenzija. Na primer, u oblasti elektroenergetike ova metoda se često koristi u rešavanje problema izbora agregata u pogonu (eng. *unit commitment*) [96-99]. Metodom Lagranžove relaksacije izbegava se direktno rešavanje optimizacionih problema velikih dimenzija, tako što se umesto njih rešava odgovarajući Lagranžov dualni problem. Zatim se na osnovu rešenja Lagranžovog dualnog problema dolazi do rešenja polaznog problema. U navedenim primenama se pokazuje da je Lagranžov dualni problem značajno lakši za rešavanje od polaznog problema i na tome se zasniva efikasnost ove metode.

U nastavku prvo je objašnjena formulacija Lagranžovog dualnog problema i prikazane su metode za njegovo rešavanje. Zatim je objašnjena primena metode Lagranžove relaksacije za rešavanje optimizacionih problema velikih dimenzija.

3.1.1 Lagranžov dualni problem

Radi opštosti izlaganja, polazi se od optimizacionog problema u sledećoj formi:

$$\min_{\mathbf{x}} F(\mathbf{x}) \quad (51a)$$

sa ograničenjima:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{b}; \quad (51b)$$

$$\mathbf{x} \in X, \quad (51c)$$

gde su:

\mathbf{x} – promenljive odlučivanja ($\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_K]^T$);

$F(\mathbf{x})$ – kriterijumska funkcija;

$\mathbf{f}(\mathbf{x})$ – funkcije kojima su opisana ograničenja ($\mathbf{f}(\mathbf{x}) = [f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_m(\mathbf{x})]^T$);

\mathbf{b} – koeficijenti ograničenja ($\mathbf{b} = [b_1, b_2, \dots, b_m]^T$);

X – zadati skup dopustivih rešenja.

Optimizacioni problem (51) u daljem tekstu naziva se primalni, odnosno polazni problem. Za ovako definisani primalni problem, odgovarajući dualni problem može se

definisati na više načina. U literaturi se koriste različite formulacije dualnih problema među kojima su: Lagranžov dualni problem (eng. *Lagrangian dual problem*), konjugovani dualni problem (eng. *conjugate dual problem*), surogat dualni problem (eng. *surrogate dual problem*), kombinovani Lagranžov i surogat dualni problem (eng. *compound dual problem*) i drugi [92, 93]. Od navedenih formulacija dualnog problema, Lagranžov dualni problem našao je najveću primenu u rešavanju praktičnih optimizacionih problema. Prvi korak u definisanju Lagranžovog dualnog problema sastoji se u relaksaciji ograničenja, tako što se ona pridružuju kriterijumskoj funkciji preko skupa Lagranžovih multiplikatora $\lambda = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m]^T$. Na ovaj način dobija se Lagranžova funkcija:

$$L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}) = F(\mathbf{x}) + \boldsymbol{\lambda}^T (\mathbf{f}(\mathbf{x}) - \mathbf{b}). \quad (52)$$

Dualna funkcija $D(\boldsymbol{\lambda})$ definiše se kao rešenje relaksiranog optimizacionog problema:

$$D(\boldsymbol{\lambda}) = \min_{\mathbf{x} \in X} L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}) = \min_{\mathbf{x} \in X} (F(\mathbf{x}) + \boldsymbol{\lambda}^T (\mathbf{f}(\mathbf{x}) - \mathbf{b})). \quad (53)$$

Konačno, Lagranžov dualni problem se definiše na sledeći način:

$$\max_{\lambda \geq 0} D(\boldsymbol{\lambda}). \quad (54)$$

Lagranžov dualni problem u daljem tekstu skraćeno se naziva dualni problem, a Lagranžovi multiplikatori ($\boldsymbol{\lambda}$) nazivaju se dualne promenljive. Sledeće dve teoreme pokazuju vezu između rešenja primalnog i dualnog problema [92]:

Teorema 1 (Teorema slabe dualnosti): Neka je \mathbf{x} dopustivo rešenje primalnog problema (51), a $\boldsymbol{\lambda}$ dopustivo rešenje dualnog problema (54). Za vrednosti kriterijumskih funkcija $F(\mathbf{x})$ i $D(\boldsymbol{\lambda})$ važi:

$$D(\boldsymbol{\lambda}) \leq F(\mathbf{x}). \quad (55)$$

Kao posledica navedene teoreme, optimalna vrednost dualnog problema ne prevazilazi optimalnu vrednost primalnog problema, odnosno optimalna vrednost dualnog problema predstavlja donje ograničenje (eng. *lower bound*) za optimalno rešenje primalnog problema.

Teorema 2 (Teorema stroge dualnosti): Ako je $\mathbf{x}^* \in X$ rešenje relaksiranog problema (53) za dati vektor Lagranžovih multiplikatora $\boldsymbol{\lambda}^* \geq 0$ i ako su zadovoljena sledeća ograničenja:

$$f_i(\mathbf{x}^*) \leq b_i, \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad (56a)$$

$$\lambda_i^* (f_i(\mathbf{x}^*) - b_i) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (56b)$$

tada \mathbf{x}^* predstavlja rešenje primalnog problema i optimalne vrednosti primalnog i dualnog problema su jednake.

Međutim, teorema stroge dualnosti često nije zadovoljena u praktičnim optimizacionim problemima. Na primer, pokazuje se da u slučaju celobrojnih optimizacionih problema ($\mathbf{x} \in X \subseteq Z^K$), ograničenja $f_i(\mathbf{x}^*) \leq b_i$ ne moraju biti aktivna za $\lambda_i^* > 0$ [92]. U tom

slučaju postoji razlika između optimalnih rešenja primalnog i dualnog problema, a koja se u literaturi naziva dualna praznina (eng. *duality gap*).

Na osnovu definicije (53) jasno je da je dualna funkcija $D(\lambda)$ nediferencijabilna. Međutim, može se pokazati da je dualna funkcija $D(\lambda)$ konkavna [92]. S obzirom da je dualna funkcija nediferencijabilna, za nju se može definisati subgradijent na sledeći način: $g(\lambda)$ predstavlja subgradijent funkcije $D(\lambda)$ u tački $\lambda \geq 0$, ako za sve $\mu \geq 0$ važi:

$$D(\mu) \leq D(\lambda) + g(\lambda)^T (\mu - \lambda). \quad (57)$$

Sledeća teorema daje jednostavan algoritam za proračun subgradijenta $g(\lambda)$ dualne funkcije za bilo koje $\lambda \geq 0$.

Teorema 3: Ako je x rešenje relaksiranog optimizacionog problema (53) za $\lambda \geq 0$, tada se subgradijent $g(\lambda)$ dualne funkcije $D(\lambda)$ računa na sledeći način:

$$g(\lambda) = f(x) - b. \quad (58)$$

3.1.2 Metode za rešavanje Lagranžovog dualnog problema

Dualni problem (54) u praktičnim primenama najčešće se rešava iterativnim metodama, gde se u svakoj iteraciji (n) određuje nova aproksimacija dualnih promenljivih $\lambda^{(n)}$. Najpoznatije metode za rešavanje dualnog problema su [92-100]:

- 1) Subgradijentna metoda,
- 2) Metoda preseka i
- 3) Metoda snopa.

U daljem tekstu su ukratko opisane navedene metode.

Subgradijentna metoda

Subgradijentna metoda (eng. *subgradient method*) je najjednostavnija od svih navedenih metoda i podrazumeva da se u svakoj iteraciji (n) nova aproksimacija vektora dualnih promenljivih $\lambda^{(n+1)}$ računa pomoću subgradijenta dualne funkcije $g(\lambda^{(n)})$ na sledeći način:

$$\lambda^{(n+1)} = \lambda^{(n)} + s^{(n)} \frac{g(\lambda^{(n)})}{\|g(\lambda^{(n)})\|}. \quad (59)$$

Korak iteracije $s^{(n)}$ u izrazu (59) može se zadati na različite načine. Na primer, u [97] se koristi jednostavna formula:

$$s^{(n)} = \frac{1}{\alpha + \beta n}, \quad (60)$$

gde su α i β unapred zadati parametri. U praktičnim primenama parametri α i β se određuju empirijski, u zavisnosti od problema koji se rešava i potrebnog broja iteracija.

Algoritam subgradijentne metode predstavljen je blok dijagramom na slici 3.1 i sastoji se od sledećih koraka:

Korak 1 – Inicijalizacija

U ovom koraku potrebno je odrediti početnu aproksimaciju vektora dualnih promenljivih, na primer $\lambda^{(1)} = 0$. Takođe, brojač iteracija se inicijalizuje na $n = 1$.

Korak 2 – Proračun $D(\lambda^{(n)})$ i $g(\lambda^{(n)})$

U tekućoj iteraciji (n) računaju se nova vrednost dualne funkcije $D(\lambda^{(n)})$ rešavanjem relaksiranog optimizacionog problema (53) za $\lambda = \lambda^{(n)}$, kao i subgradijent $g(\lambda^{(n)})$ pomoću izraza (58).

Korak 3 – Kriterijum konvergencije

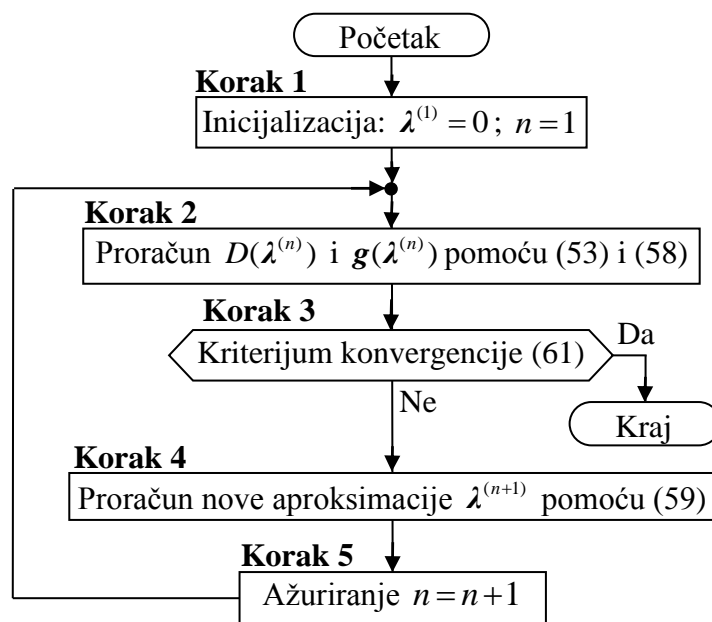
Ako je ispunjen kriterijum konvergencije:

$$\|g(\lambda^{(n)})\| \leq 0, \quad (61)$$

proračun je završen i $\lambda^{(n)}$ je rešenje dualnog problema (54).

Korak 4 – Proračun nove aproksimacije $\lambda^{(n+1)}$ pomoću (59)

Korak 5 – Ažuriranje brojača iteracija ($n = n + 1$) i povratak na Korak 2



Slika 3.1 – Algoritam subgradijentne metode

Subgradijentna metoda je jednostavna za implementaciju. Međutim, ova metoda najčešće veoma sporo konvergira, zato što subgradijent ($g(\lambda)$) ne mora uvek da bude pravac u kome dualna funkcija ($D(\lambda)$) raste. Kao posledica toga često se dobija oscilatorno ponašanje iterativnog procesa. U nekim primenama subgradijentna metoda završava se nakon unapred zadatog broja iteracija [98].

Metoda preseka

Metoda preseka (eng. *cutting plane method*) zasnovana je na činjenici da se dualni problem (54) može predstaviti kao linearni optimizacioni problem u sledećoj formi:

$$\max_{\lambda} \mu, \quad (62a)$$

sa ograničenjima:

$$\mu \leq F(\mathbf{x}) + \boldsymbol{\lambda}^T (\mathbf{f}(\mathbf{x}) - \mathbf{b}), \quad \forall \mathbf{x} \in X; \quad (62b)$$

$$\boldsymbol{\lambda} \geq \mathbf{0}. \quad (62c)$$

Optimizacioni problem (62) ne može se rešavati direktno, zato što je broj ograničenja (62b) jednak kardinalnosti skupa X . Međutim, ispitivanjem dovoljnog broja primalnih rešenja $\mathbf{x} \in \bar{X} \subset X$, tj. preseka (62b) (eng. *cutting planes*), moguće je aproksimirati dualnu funkciju $D(\boldsymbol{\lambda})$ i na tome se zasniva ova metoda.

Algoritam metode preseka predstavljen je blok dijagramom na slici 3.2 i sastoji se od sledećih koraka:

Korak 1 – Inicijalizacija

U ovom koraku potrebno je odrediti jedno dopustivo primalno rešenje $\mathbf{x}^{(0)}$. Skup \bar{X} i brojač iteracija n inicijalizuju se na sledeći način: $\bar{X} = \{\mathbf{x}^{(0)}\}$ i $n = 1$.

Korak 2 – Rešavanje optimizacionog problema:

$$\max_{\boldsymbol{\lambda}} \mu, \quad (63a)$$

sa ograničenjima:

$$\mu \leq F(\mathbf{x}) + \boldsymbol{\lambda}^T (\mathbf{f}(\mathbf{x}) - \mathbf{b}), \quad \forall \mathbf{x} \in \bar{X}; \quad (63b)$$

$$\boldsymbol{\lambda} \geq \mathbf{0}. \quad (63c)$$

Rešavanjem optimizacionog problema (63) dobijaju se nova aproksimacija vektora dualnih promenljivih $\boldsymbol{\lambda}^{(n)}$, kao i nova aproksimacija dualne funkcije $\mu^{(n)}$.

Korak 3 – Proračun $D(\boldsymbol{\lambda}^{(n)})$ i $\mathbf{x}^{(n)}$

Vrednost dualne funkcije $D(\boldsymbol{\lambda}^{(n)})$ računa se rešavanjem relaksiranog optimizacionog problema (53) za $\boldsymbol{\lambda} = \boldsymbol{\lambda}^{(n)}$. Rešavanjem navedenog optimizacionog problema dobija se i nova aproksimacija rešenja primalnog problema $\mathbf{x}^{(n)}$.

Korak 4 Kriterijum konvergencije

Ako su ispunjeni kriterijumi:

$$(\boldsymbol{\lambda}^{(n)})^T (\mathbf{f}(\mathbf{x}^{(n)}) - \mathbf{b}) = \mathbf{0}, \quad (64a)$$

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}^{(n)}) \leq \mathbf{b}, \quad (64b)$$

proračun je završen, pri čemu $\mathbf{x}^{(n)}$ predstavlja optimalno rešenje primalnog problema, dok $\boldsymbol{\lambda}^{(n)}$ predstavlja optimalno rešenje dualnog problema. U ovom slučaju optimalne vrednosti primalnog i dualnog problema su jednake.

Sa druge strane, ako je ispunjen kriterijum:

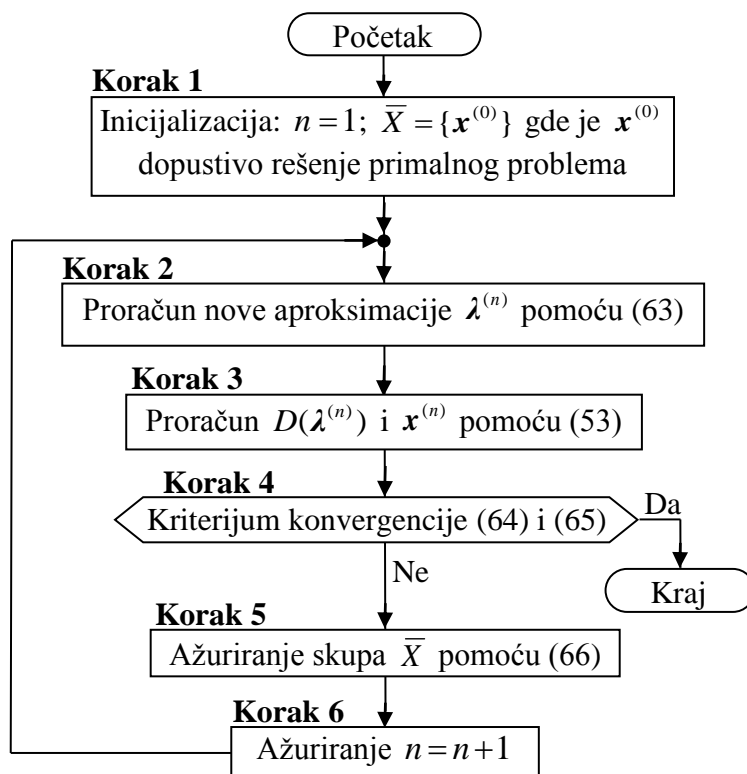
$$\mu^{(n)} \leq D(\boldsymbol{\lambda}^{(n)}), \quad (65)$$

proračun je takođe završen, pri čemu $\boldsymbol{\lambda}^{(n)}$ predstavlja optimalno rešenje dualnog problema. U ovom slučaju postoji razlika između optimalnih vrednosti primalnog i dualnog problema.

Korak 5 Ažuriranje skupa \bar{X} :

$$\bar{X} = \bar{X} \cup \{\mathbf{x}^{(n)}\}. \quad (66)$$

Korak 6 Ažuriranje brojača iteracija ($n = n + 1$) i povratak na **Korak 2**.



Slika 3.2 – Algoritam metode preseka

U praktičnim primenama pokazuje se da metoda preseka skoro uvek konvergira. Međutim, za to je često potreban veliki broj iteracija. S obzirom da dimenzija optimizacionog problema (63) koji se rešava u svakoj iteraciji raste sa brojem iteracija, ova metoda zahteva značajne računarske resurse.

Metoda snopa

Metode snopa (eng. *bundle methods*) predstavljaju široku klasu iterativnih metoda za rešavanje nediferencijabilnih optimizacionih problema, kakav je i dualni problem (54). Ideja ovih metoda je da se informacije prikupljene tokom iterativnog procesa sakupe u skup koji se naziva snop (eng. *bundle*) $B = \{(\lambda_b, D(\lambda_b), \mathbf{g}(\lambda_b)), b = 1, 2, \dots, N_B\}$. Informacije sakupljene u snopu B koriste se u svakoj iteraciji (n) ove metode za proračun nove aproksimacije vektora dualnih promenljivih $\lambda^{(n)}$. Radi stabilizacije iterativnog procesa nova aproksimacija $\lambda^{(n)}$ određuje se u okolini trenutnog rešenja $\bar{\lambda}$, koje se ažurira tokom proračuna. Naime, u svakoj iteraciji (n) na osnovu određenog kriterijuma odlučuje se da li će nova aproksimacija biti proglašena za trenutno rešenje ($\bar{\lambda} = \lambda^{(n)}$), ili će biti dodata u snop, kako bi se dobila bolja aproksimacija u narednoj iteraciji. Dakle, snop B se ažurira tokom iterativnog procesa, tj. u njega se dodaju nove trojke $(\lambda^{(n)}, D(\lambda^{(n)}), \mathbf{g}(\lambda^{(n)}))$, ili izbacuju postojeće.

Metode snopa opisane su blok dijagramom na slici 3.3, koji se sastoji od sledećih koraka:

Korak 1 – Inicijalizacija

U ovom koraku potrebno je inicijalizovati trenutno rešenje, na primer $\bar{\lambda} = 0$. Snop B inicijalizuje se na sledeći način $B = \{(\bar{\lambda}, D(\bar{\lambda}), g(\bar{\lambda}))\}$, pri čemu se dualna funkcija $D(\bar{\lambda})$ računa rešavanjem relaksiranog optimizacionog problema (53) za $\lambda = \bar{\lambda}$, dok se subgradijent $g(\bar{\lambda})$ računa pomoću izraza (58). Takođe, brojač iteracija inicijalizuje se na $n = 1$.

Korak 2 – Određivanje nove aproksimacije $\lambda^{(n)}$.

Korak 3 – Proračun $D(\lambda^{(n)})$ i $g(\lambda^{(n)})$.

Nova vrednost dualne funkcije $D(\lambda^{(n)})$ računa se rešavanjem relaksiranog optimizacionog problema (53) za $\lambda = \lambda^{(n)}$, dok se subgradijent $g(\lambda^{(n)})$ računa pomoću izraza (58).

Koraci 4, 5 – Ako je postignut dovoljan porast dualne funkcije, potrebno je ažurirati trenutno rešenje: $\bar{\lambda} = \lambda^{(n)}$.

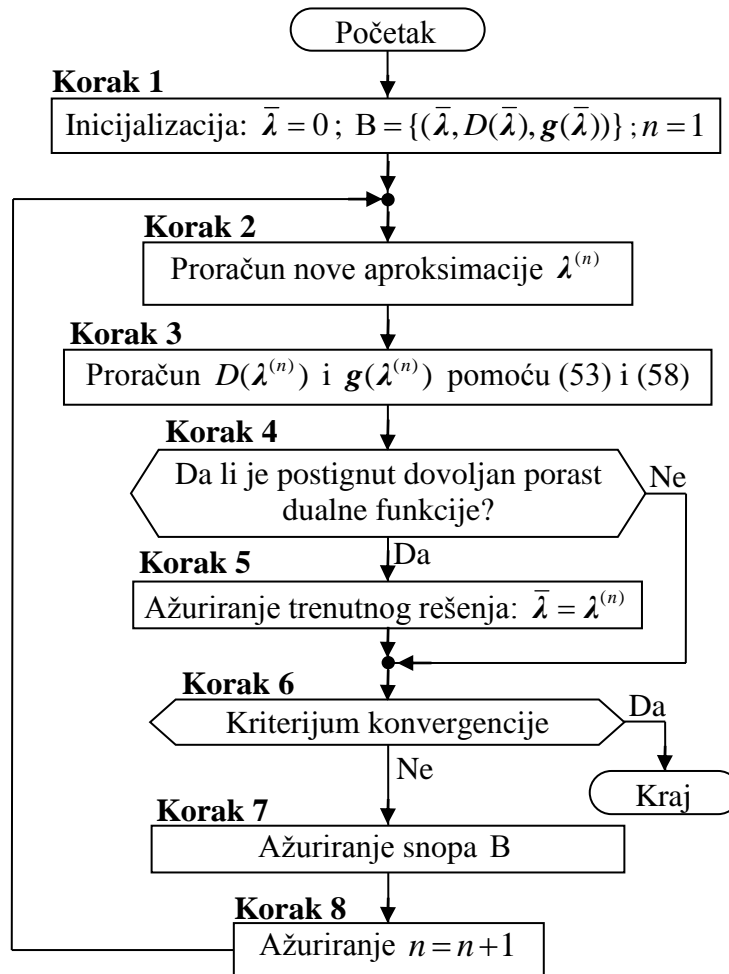
Korak 6 – Kriterijum konvergencije

Kriterijum konvergencije može se zadati na različite načine. Na primer, ako je razlika između trenutnog rešenja $\bar{\lambda}$ i nove aproksimacije $\lambda^{(n)}$ dovoljno mala. Ako je zadati kriterijum konvergencije ispunjen, proračun je završen i $\bar{\lambda}$ predstavlja rešenje dualnog problema.

Korak 7 – Ažuriranje snopa B.

Korak 8 – Ažuriranje brojača iteracija ($n = n + 1$) i povratak na **Korak 2**.

Na ovom mestu treba naglasiti da je predstavljeni algoritam metode snopa veoma generalan. Naime, predstavljeni algoritam pokazuje da se i metoda preseka može tretirati kao metoda snopa. U ovoj doktorskoj disertaciji za rešavanje dualnog problema iskorišćena je metoda snopa, koja je razvijena u [100] za potrebe rešavanja problema mrežnog programiranja. Navedena metoda korišćena je i u [99] za rešavanje problema izbora agregata u pogonu. Detaljan prikaz ove metode dat je u poglavlju 3.3.



Slika 3.3 – Algoritam metode snopa

3.1.3 Primena Lagranžove relaksacije u rešavanju optimizacionih problema velikih dimenzija

Neka se razmatra sledeći optimizacioni problem:

$$\min_{x_1, x_2, \dots, x_K} \sum_{k=1}^K F_k(x_k) \quad (67a)$$

sa ograničenjima:

$$f_k(x_k) \leq b_k, \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (67b)$$

$$\sum_{k=1}^K h_k(x_k) \leq c \quad (67c)$$

gde su:

x_1, x_2, \dots, x_K – promenljive odlučivanja ($x_k = [x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{kp}]^T, k = 1, 2, \dots, K$)

$f_k(x_k), h_k(x_k)$ – funkcije kojima su opisana ograničenja

$$(f_k(x_k) = [f_{k1}(x_k), f_{k2}(x_k), \dots, f_{kM}(x_k)]^T, h_k(x_k) = [h_{k1}(x_k), h_{k2}(x_k), \dots, h_{kR}(x_k)]^T)$$

b_k, c – koeficijenti ograničenja ($b_k = [b_{k1}, b_{k2}, \dots, b_{kM}]^T, c = [c_1, c_2, \dots, c_R]^T$)

Ograničenja (67c) predstavljaju vezna ograničenja (eng. *coupling/side constraints*) u optimizacionom problemu (67). Naime, kada bi se ograničenja (67c) eliminisala iz navedenog optimizacionog problema, dobijeni problem bi bio separabilan, tj. mogao bi se dekomponovati na $k = 1, 2, \dots, K$ nezavisnih problema tipa:

$$\min_{\mathbf{x}_k} F_k(\mathbf{x}_k) \quad (68a)$$

sa ograničenjima:

$$\mathbf{f}_k(\mathbf{x}_k) \leq \mathbf{b}_k. \quad (68b)$$

Praktični optimizacioni problemi se veoma često mogu svesti na formu (67). Na primer, u slučaju problema izbora agregata u pogonu, promenljivim \mathbf{x}_k bi se modelovale različite proizvodne jedinice ($k = 1, 2, \dots, K$), ograničenjima (67b) bi se modelovala ograničenja koja se odnose na svaku proizvodnu jedinicu posebno, dok bi se veznim ograničenjima (67c) modelovala ograničenja koja se odnose na ceo sistem (na primer bilans proizvodnje i potrošnje električne energije). Optimizacioni problem tipa (67) u praktičnim primenama najčešće je veoma velikih dimenzija, zato što sadrži veliki broj promenljivih odlučivanja ($\mathbf{x}_k, k = 1, 2, \dots, K$) i veliki broj ograničenja (67b) i (67c). Zbog toga ove probleme veoma je teško rešavati direktno.

U slučaju optimizacionih problema tipa (67), metoda Lagranžove relaksacije se primenjuje tako što se relaksiraju samo vezna ograničenja (67c). Na ovaj način dobija se dualni problem:

$$\max_{\lambda \geq 0} D(\lambda), \quad (69)$$

pri čemu dualna funkcija $D(\lambda)$ predstavlja rešenje relaksiranog optimizacionog problema:

$$\begin{aligned} D(\lambda) &= \min_{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_K} \left\{ \sum_{k=1}^K F_k(\mathbf{x}_k) + \lambda^T \left(\sum_{k=1}^K \mathbf{h}_k(\mathbf{x}_k) - \mathbf{c} \right) \right\} \\ &= \min_{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_K} \left\{ \sum_{k=1}^K (F_k(\mathbf{x}_k) + \lambda^T \mathbf{h}_k(\mathbf{x}_k)) \right\} - \lambda^T \mathbf{c} \end{aligned} \quad (70a)$$

sa ograničenjima:

$$\mathbf{f}_k(\mathbf{x}_k) \leq \mathbf{b}_k. \quad (70b)$$

S obzirom da je drugi član ($\lambda^T \mathbf{c}$) u izrazu (70a) konstantan, optimizacioni problem (70) može se dekomponovati na $k = 1, 2, \dots, K$ nezavisnih problema tipa:

$$\min_{\mathbf{x}_k} (F_k(\mathbf{x}_k) + \lambda^T \mathbf{h}_k(\mathbf{x}_k)) \quad (71a)$$

sa ograničenjima

$$\mathbf{f}_k(\mathbf{x}_k) \leq \mathbf{b}_k. \quad (71b)$$

Dakle, kao rezultat relaksacije veznih ograničenja (67c) dobija se dualna funkcija $D(\lambda)$ za čiji je proračun potrebno rešiti K nezavisnih problema (71) koji su značajno

manjih dimenzija i lakši za rešavanje nego polazni problem (67). Zbog toga je rešavanje dualnog problema (69) značajno lakše nego rešavanje polaznog problema (67).

Neka je sa λ^* označeno optimalno rešenje dualnog problema (69). Kao rezultat rešavanja relaksiranog optimizacionog problema (70) za $\lambda = \lambda^*$ dobija se rešenje primalnog problema $(\mathbf{x}_1^*, \mathbf{x}_2^*, \dots, \mathbf{x}_K^*)$. Međutim, navedeno primalno rešenje ne mora biti dopustivo. Naime, u paragrafu 3.1.1 je objašnjeno da teorema stroge dualnosti ne mora uvek da bude zadovoljena i zato postoji razlika između optimalnih rešenja primalnog i dualnog problema koja se naziva praznina dualnosti (eng. *duality gap*). U razmatranom slučaju, najčešće se dobija primalno rešenje $(\mathbf{x}_1^*, \mathbf{x}_2^*, \dots, \mathbf{x}_K^*)$ u kome nisu zadovoljena vezna ograničenja (67c). Prema tome, rešavanjem dualnog problema (69) ne može se direktno dobiti optimalno rešenje polaznog problema (67).

Kako bi se rešenje dualnog problema (69) iskoristilo za rešavanje polaznog problema (67), u praktičnim primenama se najčešće koriste dva pristupa. Prvi pristup podrazumeva da se rešavanje dualnog problema uključi u proceduru grananja i ograničavanja (eng. *branch and bound*) za rešavanje polaznog problema (67), tako što se rešenje dualnog problema koristi kao donja granica za rešenje polaznog problema [96]. Prema drugom pristupu primalno dopustivo rešenje dobija se heurističkim pretraživanjem u okolini primalnog rešenja $(\mathbf{x}_1^*, \mathbf{x}_2^*, \dots, \mathbf{x}_K^*)$. S obzirom da je razlika između rešenja primalnog i dualnog problema veoma mala, pokazuje se da se drugim pristupom mogu dobiti kvalitetna (suboptimalna) rešenja primalnog problema [97-99].

U ovom istraživanju usvojen je drugi od dva navedena pristupa. Dakle, optimizacioni problem velikih dimenzija rešava se metodom Lagranžove relaksacije u dva koraka koji podrazumevaju:

1. rešavanje Lagranžovog dualnog problema i
2. heurističku pretraga kojom se na osnovu rešanja Lagranžovog dualnog problema dobija dopustivo rešenje polaznog problema.

3.2 Primena Lagranžove relaksacije u rešavanju problema operativnog planiranja rekonfiguracije distributivnih mreža

U ovom poglavlju objašnjeno je kako se metoda Lagranžove relaksacije, opisana u prethodnom poglavlju, primenjuje u rešavanju problema operativnog planiranja rekonfiguracije distributivnih mreža. Pri tome se polazi od optimizacionog problema formulisanog u paragrafu 2.2.4, a koji se u daljem tekstu naziva primalni, odnosno polazni problem. Ograničenja razmatranog primalnog problema mogu se podeliti u dve grupe. Prvu grupu čine ograničenja 1)–8) koja se odnose na režim i konfiguraciju distributivne mreže u pojedinim vremenskim intervalima. Drugu grupu čine ograničenja 9) (ograničenja broja prekidačkih akcija), koja se odnose na ceo analizirani vremenski period i zato predstavljaju vezna ograničenja u razmatranom primalnom problemu.

Kao što je objašnjeno u paragrafu 3.1.3, metoda Lagranžove rekalsacije primenjuje se u dva koraka: najpre se rešava odgovarajući Lagranžov dualni problem, a zatim se određuje primalno dopustivo rešenje. Prvi korak u definisanju Lagranžovog dualnog problema jeste relaksacija veznih ograničanja (50) koja se dodaju funkciji cilja (48) preko Lagranžovih multiplikatora λ_{sk}^h and λ_s . Na ovaj način dobija se Lagranžova funkcija:

$$L(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{w}, \mathbf{P}, \mathbf{Q}, \boldsymbol{\lambda}) = \sum_{h=1}^{N_H} P_{Loss}^h + \sum_{s=1}^{N_{SW}} \sum_{h=1}^{N_H} \sum_{k=1}^4 \lambda_{sk}^h (A_{k1} x_s^h + A_{k2} x_s^{h-1} + A_{k3} y_s^h + A_{k4}) + \sum_{s=1}^{N_{SW}} \lambda_s \left(\sum_{h=1}^{N_H} y_s^h - N_{SW}^{MAX} \right) \quad (72)$$

gde su P_{Loss}^h definisani u (48), \mathbf{x} , \mathbf{y} , \mathbf{w} , \mathbf{P} i \mathbf{Q} predstavljaju vektore primalnih promenljivih x_s^h , y_s^h , w_{cp}^h , P_{lt}^h i Q_{lt}^h , dok $\boldsymbol{\lambda}$ predstavlja vektor Lagranžovih multiplikatora λ_{sk}^h i λ_s .

Lagranžova funkcija (72) može se preformulisati na sledeći način (za detaljno izvođenje videti Prilog 2):

$$L(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{w}, \mathbf{P}, \mathbf{Q}, \boldsymbol{\lambda}) = \sum_{h=1}^{N_H} \left[P_{Loss}^h + \sum_{s=1}^{N_{SW}} x_s^h \left(\sum_{k=1}^4 \lambda_{sk}^h A_{k1} + \sum_{k=1}^4 \lambda_{sk}^{h+1} A_{k2} \right) + \sum_{s=1}^{N_{SW}} y_s^h \left(\sum_{k=1}^4 \lambda_{sk}^h A_{k3} + \lambda_s \right) \right] + \left(\sum_{s=1}^{N_{SW}} \sum_{k=1}^4 \lambda_{sk}^1 A_{k2} x_s^0 + \sum_{h=1}^{N_H} \sum_{s=1}^{N_{SW}} \sum_{k=1}^4 \lambda_{sk}^h A_{k4} - N_{SW}^{MAX} \sum_{s=1}^{N_{SW}} \lambda_s \right). \quad (73)$$

Za razmatrani primalni problem, Lagranžov dualni problem ima sledeću formu:

$$\max_{\lambda \geq 0} D(\boldsymbol{\lambda}), \quad (74)$$

gde je dualna funkcija $D(\boldsymbol{\lambda})$ definisana kao rešenje relaksiranog problema:

$$D(\boldsymbol{\lambda}) = \min_{\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{w}, \mathbf{P}, \mathbf{Q}} L(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{w}, \mathbf{P}, \mathbf{Q}, \boldsymbol{\lambda}) \quad (75)$$

sa ograničenjima 1)–8) primalnog problema.

Proračun Lagranžove dualne funkcije $D(\boldsymbol{\lambda})$ podrazumeva rešavanje relaksiranog optimizacionog problema (75) u kome figurišu primalne promenljive \mathbf{x} , \mathbf{y} , \mathbf{w} , \mathbf{P} i \mathbf{Q} . Međutim, drugi član u izrazu za Lagranžovu funkciju (73) je konstantan i ne učestvuje u optimizaciji, zato što sadrži parametre (A_k i N_{SW}^{MAX}), statuse prekidača u početnom stanju (x_s^0) i Lagranžove multiplikatore ($\lambda_{sk}^h, \lambda_s$) koji su konstantni u problemu (75). Zbog toga relaksirani optimizacioni problem (75) može se dekomponovati na N_H nezavisnih problema (po jedan za svaki vremenski interval h), a koji imaju sledeću formu:

$$\min_{\mathbf{x}^h, \mathbf{y}^h, \mathbf{w}^h, \mathbf{P}^h, \mathbf{Q}^h} \left(P_{Loss}^h + \sum_{s=1}^{N_{SW}} x_s^h \left(\sum_{k=1}^4 \lambda_{sk}^h A_{k1} + \sum_{k=1}^4 \lambda_{sk}^{h+1} A_{k2} \right) + \sum_{s=1}^{N_{SW}} y_s^h \left(\sum_{k=1}^4 \lambda_{sk}^h A_{k3} + \lambda_s \right) \right), \quad (76)$$

pri ograničenjima 1)–8) primalnog problema.

U izrazu (76) vektori \mathbf{x}^h , \mathbf{y}^h , \mathbf{w}^h , \mathbf{P}^h i \mathbf{Q}^h predstavljaju vektore primalnih promenljivih x_s^h , y_s^h , w_{cp}^h , P_{lt}^h i Q_{lt}^h koje se odnose na dati vremenski interval h . Dakle, kao rezultat relaksacije ograničenja broja prekidačkih akcija (50) dobija se dualna funkcija $D(\boldsymbol{\lambda})$, za čiji je proračun potrebno rešiti N_H nezavisnih problema (76) koji su značajno manjih dimenzija i lakši za rešavanje nego polazni problem. Zbog toga je rešavanje dualnog problema (74) značajno lakše nego rešavanje polaznog problema.

Algoritam za rešavanje problema operativnog planiranja rekonfiguracije distributivnih mreža na bazi Lagranžove relaksacije prikazan je blok dijagramom na slici 3.4. **Koraci 1-8** se odnose na rešavanje Lagranžovog dualnog problema, dok se **Koraci 9-14** odnose na određivanje primalnog dopustivog rešenja. Ovi koraci detaljno su opisani u naredna dva poglavlja.

3.3 Rešavanje Lagranžovog dualnog problema

Za rešavanje Lagranžovog dualnog problema (74) u ovoj doktorskoj disertaciji izabrana je metoda snopa koja je razvijena u [100], a koja se pokazala veoma efikasnom u praktičnim primenama [83, 99]. Navedena metoda obuhvata sledeće korake:

Korak 1 – Inicijalizacija

Kao što je objašnjeno u paragrafu 3.1.2, trenutno rešenje $\bar{\boldsymbol{\lambda}}$ inicijalizuje se na $\bar{\boldsymbol{\lambda}} = 0$, snop B inicijalizuje se trojkom $B = \{(\bar{\boldsymbol{\lambda}}, D(\bar{\boldsymbol{\lambda}}), \mathbf{g}(\bar{\boldsymbol{\lambda}}))\}$, a brojač iteracija se inicijalizuje na $n = 1$.

Korak 2 – Proračun nove aproksimacije $\boldsymbol{\lambda}^{(n)}$

U tekućoj iteraciji (n) nova aproksimacija $\boldsymbol{\lambda}^{(n)}$ računa se rešavanjem sledećeg optimizacionog problema:

$$\max_{d, \boldsymbol{\lambda}^{(n)}} \left\{ d - \frac{1}{2\tau} \|\boldsymbol{\lambda}^{(n)} - \bar{\boldsymbol{\lambda}}\|^2 \right\} \quad (77a)$$

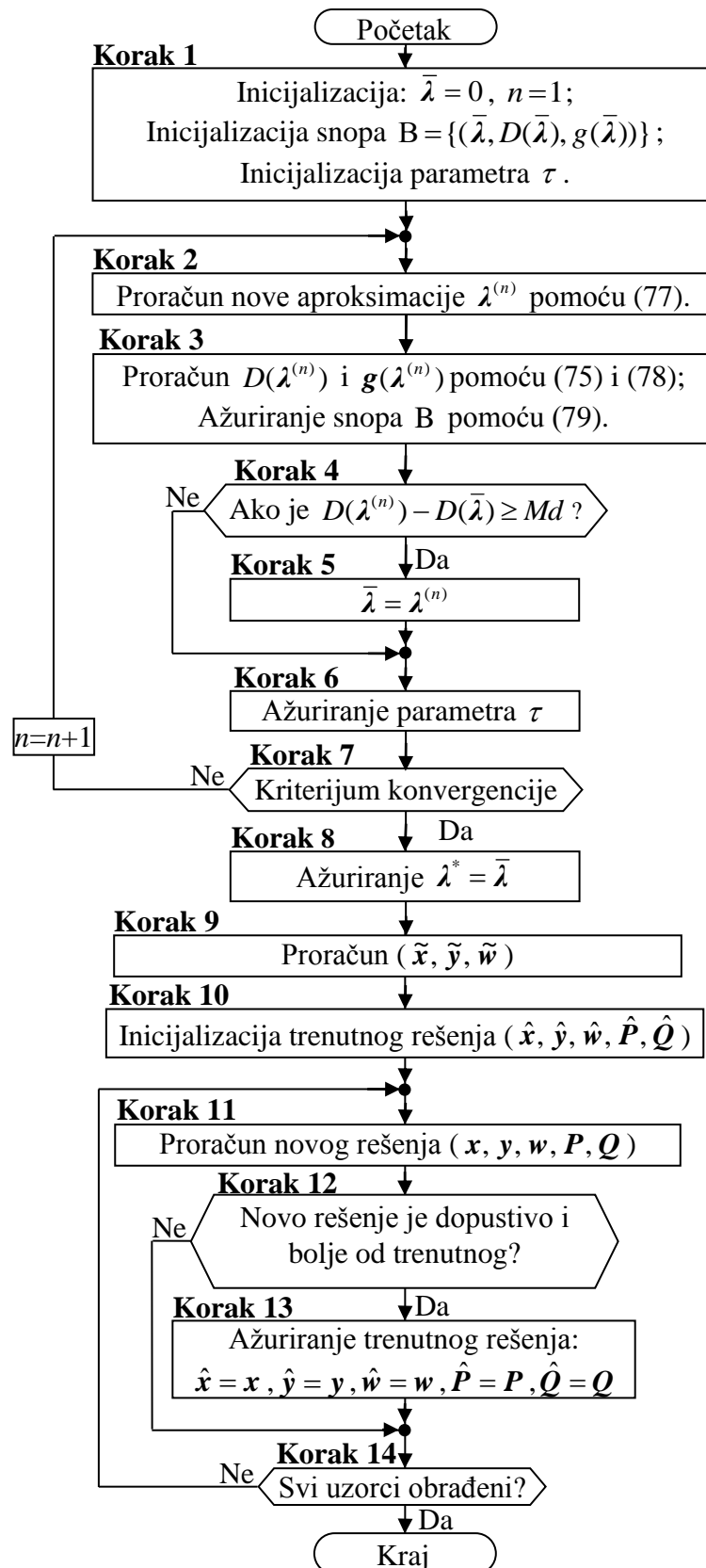
sa ograničenjima:

$$d \leq \delta_b + \mathbf{g}(\boldsymbol{\lambda}_b)(\boldsymbol{\lambda}^{(n)} - \bar{\boldsymbol{\lambda}}), \quad b = 1, \dots, N_B, \quad (77b)$$

gde je:

$$\delta_b = D(\boldsymbol{\lambda}_b) + \mathbf{g}(\boldsymbol{\lambda}_b)(\boldsymbol{\lambda}^{(n)} - \bar{\boldsymbol{\lambda}}) - D(\bar{\boldsymbol{\lambda}}). \quad (77c)$$

Prvi član funkcije cilja (77a) (promenljiva d) predstavlja aproksimaciju dualne funkcije $D(\boldsymbol{\lambda})$ dobijenu pomoću informacija sakupljenih u snopu B. Drugi član funkcije cilja (77a) predstavlja stabilizacioni član, zato što penališe rešenja koja su daleko od trenutnog rešenja ($\bar{\boldsymbol{\lambda}}$). Parametar τ naziva se koeficijent regiona (eng. *trust-region parameter*). Promenljiva δ_b definisana izrazom (77c) naziva se greška linearizacije (eng. *linearization error*).



Slika 3.4 – Blok dijagram predloženog algoritma

Korak 3 – Proračun $D(\lambda^{(n)})$ i $g(\lambda^{(n)})$ i ažuriranje snopa B

Dualna funkcija $D(\lambda^{(n)})$ računa se rešavanjem relaksiranog optimizacionog problema (75) za $\lambda = \lambda^{(n)}$, odnosno rešavanjem N_H optimizacionih problema (76). Rešavanjem relaksiranog optimizacionog problema (75) može se proračunati i subgradijent $g(\lambda^{(n)})$. Naime, kao što je opisano u paragrafu 3.1.1 (Teorema 3), elementi subgradijenta $g(\lambda)$ računaju se na sledeći način:

$$g(\lambda_{sk}^h) = A_{k1}x_s^h + A_{k2}x_s^{h-1} + A_{k3}y_s^h + A_{k4} \leq 0, \quad k = 1,2,3,4; \quad (78a)$$

$$g(\lambda_s) = \sum_{h=1}^{N_H} y_s^h - N_{SW}^{MAX} \quad (78b)$$

gde su x_s^h i y_s^h rešenja relaksiranog optimizacionog problema (75) za date vrednosti Lagranžovih multiplikatora λ_{sk}^h i λ_s .

Snop B ažurira se na sledeći način:

$$B = B \cup \{(\lambda^{(n)}, D(\lambda^{(n)}), g(\lambda^{(n)}))\}. \quad (79)$$

Korak 4, 5 – Ažuriranje trenutnog rešenja

Ako je postignuto povećanje dualne funkcije ($D(\lambda^{(n)}) - D(\bar{\lambda})$) dovoljno veliko u poređenju sa očekivanim porastom d , tj. ako je ispunjeno:

$$D(\lambda^{(n)}) - D(\bar{\lambda}) \geq Md, \quad (80)$$

gde je M unapred zadati parameter ($M \in (0,1)$), tada se trenutno rešenje $\bar{\lambda}$ pomera u novu tačku: $\bar{\lambda} = \lambda^{(n)}$.

Korak 6 – Ažuriranje parametra τ

Kako bi se omogućila stabilna konvergencija iterativnog procesa koeficijent regiona τ ažurira se iz iteracije u iteraciju na sledeći način: ako je ispunjen uslov (80) koeficijent regiona se uvećava; u protivnom, ako je greška linearizacije $\delta^{(n)}$ u tekućoj iteraciji velika (na primer, veća od prosečne greške linearizacije iz prethodnih iteracija), tada se koeficijent regiona smanjuje, kako bi se u narednoj iteraciji dobila nova aproksimacija vektora λ koja će biti bliža trenutnom rešenju $\bar{\lambda}$.

Korak 7 – Kriterijum konvergencije

Ako je ispunjen kriterijum:

$$\max(\bar{\lambda} - \lambda^{(n)}) \leq \xi_1; \quad (81a)$$

$$D(\bar{\lambda}) - D(\lambda^{(n)}) \leq \xi_2 \quad (81b)$$

gde su ξ i ξ_2 unapred specificirani parametri, proračun je završen, u protivnom, treba ažurirati brojač iteracija ($n = n + 1$) i vratiti se na **Korak 2**.

Korak 8 – Trenutno rešenje ($\bar{\lambda}$) postavlja se za rešenje Lagranžovog dualnog problema (λ^*).

3.4 Određivanje primalnog dopustivog rešenja

Rešavanjem Lagranžovog dualnog problema, koje je opisano u prethodnom poglavlju, dobija se primalno rešenje $(\mathbf{x}^*, \mathbf{y}^*, \mathbf{w}^*, \mathbf{P}^*, \mathbf{Q}^*)$, koje predstavlja rešenje relaksiranog optimizacionog problema (75) za $\lambda = \lambda^*$. Međutim, ovo rešenje najčešće nije dopustivo, zato što ne mora da zadovoljava vezna ograničenje primalnog problema, odnosno ograničenje broja prekidačkih akcija (50). Kako bi se odredilo dopustivo rešenje primalnog problema u ovoj doktorskoj disertaciji koristi se stohastičko pretraživanje slično kao u radovima [99, 101].

Prvi korak u određivanju primalnog dopustivog rešenja sastoji se u rešavanju sledećeg optimizacionog problema:

$$\min_{\tilde{x}_s^h, \tilde{y}_s^h, \tilde{w}_{cp}^h, P_{lt}^h, Q_{lt}^h} \left(P_{Loss} = \sum_{h=1}^{N_H} P_{Loss}^h = \sum_{h=1}^{N_H} \sum_{l=1}^{N_L} R_l \left(\sum_{t=1}^{N_{TP}} cP_{lt}^h P_{lt}^h + \sum_{t=1}^{N_{TQ}} cQ_{lt}^h Q_{lt}^h \right) \right) \quad (82a)$$

pri ograničenjima:

1. Jednakosti (15a) i (18a) kojima su opisane veze između promenljivih P_l^h i Q_l^h i promenljivih odlučivanja P_{lt}^h i Q_{lt}^h ,
2. Ograničenja za P_{lt}^h i Q_{lt}^h (16) i (19),
3. Veza promenljivih P_l^h , Q_l^h i \tilde{w}_{cp}^h (izvedene iz (45)-(47)):

$$P_l^h = \sum_{i=1}^{N_N} \sum_{\substack{\pi_{cp} \in \Omega_{P,c} \\ i \in \Omega_{N,c}}} I(l, i, \pi_{cp}) \tilde{w}_{cp}^h (P_{L,i}^h - P_{G,i}^h) \quad (82b)$$

$$Q_l^h = \sum_{i=1}^{N_N} \sum_{\substack{\pi_{cp} \in \Omega_{P,c} \\ i \in \Omega_{N,c}}} I(l, i, \pi_{cp}) \tilde{w}_{cp}^h (Q_{L,i}^h - Q_{G,i}^h) \quad (82c)$$

4. Relacije kojima su povezane promenljive \tilde{w}_{cp}^h i \tilde{x}_s^h (izvedene iz (39)):

$$\tilde{w}_{cp}^h \leq \tilde{x}_s^h, \quad \forall s \in \pi_{cp} \quad (82d)$$

$$\tilde{w}_{cp}^h \geq \sum_{s \in \pi_{cp}} \tilde{x}_s^h - |\pi_{cp}| + 1 \quad (82e)$$

5. Specificirani fazor napona u napojnom čvoru (4),
6. Ograničenje modula napona (izvedeno iz (44)-(45)):

$$(V_0^h)^2 - 2 \sum_{l \in \Omega_{L,i,\pi_{cp}}} (R_l P_l^h + X_l Q_l^h) \geq (V_i^{\min})^2 - (1 - \tilde{w}_{cp}^h), \quad \forall \pi_{cp} \in \Omega_{P,c}, i \in \Omega_{N,c} \quad (82f)$$

$$(V_0^h)^2 - 2 \sum_{l \in \Omega_{L,i,\pi_{cp}}} (R_l P_l^h + X_l Q_l^h) \geq (V_i^{\min})^2 - (1 - \tilde{w}_{cp}^h), \quad \forall \pi_{cp} \in \Omega_{P,c}, i \in \Omega_{N,c} \quad (82g)$$

7. Ograničenje tokova snaga po granama distributivne mreže (50),
8. Radijalna konfiguracija distributivne mreže (izvedeno iz (41))

$$\sum_{p \in \Omega_{p,c}} \tilde{w}_{cp} = 1 \quad (82h)$$

9. Dozvoljeni broj prekidačkih akcija za svaki prekidač (izvedeno iz (50)):

$$\sum_{h=1}^{N_H} \tilde{y}_s^h - N_{SW}^{MAX} \leq 0 \quad (82i)$$

$$A_{k1} \tilde{x}_s^h + A_{k2} \tilde{x}_s^{h-1} + A_{k3} \tilde{y}_s^h + A_{k4} \leq 0, \quad k = 1, 2, 3, 4 \quad (82j)$$

10. Skup dozvoljenih rešenja $(\tilde{\mathbf{x}}, \tilde{\mathbf{y}}, \tilde{\mathbf{w}})$:

$$(\tilde{\mathbf{x}}, \tilde{\mathbf{y}}, \tilde{\mathbf{w}}) \in \text{conv} \{(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{w}) \in F\} \quad (82k)$$

gde $\text{conv} \{(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{w}) \in F\}$ predstavlja skup konveksnih kombinacija primalnih rešenja koja zadovoljavaju ograničenja radijalnosti distributivne mreže (41), ograničenja broja prekidačkih akcija (50) i ograničenja (40) kojima su opisane veze između promenljivih w_{cp}^h i x_s^h .

Optimizacioni problem (82) predstavlja konveksnu relaksaciju primalnog problema. Radovi [99, 101] pokazuju da se rešenje problema (82) može odrediti pomoću metode snopa, koja je prikazana u prethodnom poglavlju. Naime, u svakoj iteraciji prikazane metode snopa mogu se odrediti koeficijenti α_b takvi da važi:

$$\sum_{b=1}^{N_B} \alpha_b = 1, \quad (83)$$

pri čemu rešenje

$$\tilde{\mathbf{x}} = \sum_{b=1}^{N_B} \alpha_b \mathbf{x}_b; \quad (84a)$$

$$\tilde{\mathbf{y}} = \sum_{b=1}^{N_B} \alpha_b \mathbf{y}_b; \quad (84b)$$

$$\tilde{\mathbf{w}} = \sum_{b=1}^{N_B} \alpha_b \mathbf{w}_b; \quad (84c)$$

$$\mathbf{P} = \sum_{b=1}^{N_B} \alpha_b \mathbf{P}_b; \quad (84d)$$

$$\mathbf{Q} = \sum_{b=1}^{N_B} \alpha_b \mathbf{Q}_b, \quad (84e)$$

konvergira ka optimalnom rešenju problema (82).

Rešenje optimizacionog problema (82) podrazumeva vrednosti \tilde{x}_s^h , \tilde{y}_s^h i \tilde{w}_{cp}^h u intervalu $[0, 1]$. Vrednost \tilde{x}_s^h može se interpretirati kao verovatnoća da prekidač s treba da bude zatvoren u vremenskom intervalu h . Vrednosti \tilde{y}_s^h i \tilde{w}_{cp}^h interpretiraju se analogno. Ova činjenica može se iskoristiti za razvoj stohastičkog pretraživanja, kojim se dolazi do traženog primalnog dopustivog rešenja.

Heuristička pretraga sastoji se od serije uzoraka, gde se u svakom uzorku generiše po jedno primalno rešenje (x, y, w, P, P, Q) , koristeći polazno rešenje $(x^*, y^*, w^*, P^*, Q^*)$ i verovatnoće $(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{w})$. Zatim se proverava dopustivost datog primalnog rešenja. Najbolje primalno rešenje dobijeno opisanim uzorkovanjem uzima se kao krajnje rešenje. Opisani algoritam obuhvata sledeće korake (videti sliku 3.4):

Korak 9 – Proračun $(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{w})$.

Verovatnoće $(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{w})$ računaju se primenom izraza (84), pri čemu se uzimaju elementi snopa B iz poslednje iteracije metode snopa koja je prikazana u prethodnom poglavlju.

Korak 10 – Inicijalizacija trenutnog rešenja $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{w}, \hat{P}, \hat{Q})$.

Trenutno rešenje $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{w}, \hat{P}, \hat{Q})$ može se odrediti na različite načine. Na primer, može se uzeti rešenje u kome su konfiguracije distributivne mreže u svim vremenskim intervalima iste kao početna konfiguracija.

Korak 11 – Proračun novog rešenja (x, y, w, P, Q) .

U svakom uzorku generiše se novo primalno rešenje (x, y, w, P, Q) na sledeći način:

- 1) Za prekidače (s) za koje nisu zadovoljena ograničenja broja prekidačkih akcija (50) u polaznom rešenju $(x^*, y^*, w^*, P^*, Q^*)$, statusi (x_s^h) se dobijaju slučajnim uzorkovanjem za verovatnoću \tilde{x}_s^h za sve vremenske intervale (h); na ovaj način se dobija vektor x ;
- 2) Vektor y računa se koristeći x i relacije (50b);
- 3) Vektor w računa se koristeći x i relacije (39);
- 4) Vektori P i Q računaju se koristeći w i relacije (45) – (47).

Korak 12, 13 – Ažuriranje primalnog dopustivog rešenja.

Ako je novo rešenje (x, y, w, P, Q) određeno u **Koraku 11** dopustivo i bolje od trenutnog rešenja $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{w}, \hat{P}, \hat{Q})$, tada se novo rešenje proglašava za trenutno. Dopustivost novog rešenja analizira se proverom svih ograničenja primalnog problema.

Korak 14 – Kriterijum završetka.

Numerički rezultati pokazuju da je 1000 uzoraka opisanih **Koracima 11-13** dovoljno za dobijanje kvalitetnog primalnog dopustivog rešenja.

4. Formulacija i rešavanje problema operativnog planiranja rekonfiguracije distributivnih mreža primenom višekriterijumske optimizacije

U ovoj glavi prikazano je proširenje optimizacionog modela za operativno planiranje rekonfiguracije distributivnih mreža, prikazanog u prethodne dve glave ove doktorske disertacije, sa ciljem da se uvažavaju različiti optimizacioni kriterijumi.

U prethodne dve glave ove doktorske disertacije kao jedini optimizacioni kriterijum u rekonfiguraciji distributivnih mreža razmatrana je minimizacija gubitaka aktivne snage. Ovakav vid rekonfiguracije je od posebnog značaja u slučaju gradskih visokopterećenih distributivnih mreža koje karakteriše visoka potencijalna upetljanost [9]. Međutim, u praktičnim primenama prilikom planiranja rekonfiguracije distributivnih mreža kao optimizacioni kriterijum razmatra se i minimizacija cene prekidačkih akcija potrebnih za rekonfiguraciju [71-73]. Naime, cena pojedinih prekidačkih akcija može biti veća od dobiti koja se postiže samom rekonfiguracijom u smislu smanjenja gubitaka aktivne snage. Zbog toga ova dva optimizaciona kriterijuma su međusobno suprotstavljena.

S druge strane, cilj rekonfiguracije distributivnih mreža može biti i optimizacija pouzdanosti napajanja potrošača, na primer u slučaju vangradskih distributivnih mreža. Naime, ove distributivne mreže pokrivaju široka geografska područja i karakteriše ih velika dužina izvoda, mala potencijalna upetljanost i slaba opterećenost. Pored toga, vangradske distributivne mreže obično se grade od nadzemnih vodova koji imaju veći intenzitet otkaza, nego gradske mreže koje su najčešće kablovske. Kod ovakvih distributivnih mreža od primarnog interesa je obezbediti konfiguraciju distributivne mreže sa najvećom pouzdanošću napajanja potrošača, dok su gubici aktivne snage u drugom planu [9]. Rekonfiguracija distributivnih mreža sa ciljem da se optimizuje pouzdanost napajanja potrošača razmatrana je u radovima [19, 71, 72]. Pri tome je u [19] minimizovana učestanost ispada potrošača, dok su u [71,72] minimizovani troškovi ispada potrošača koji predstavljaju cenu neisporučene energije usled ispada u distributivnoj mreži.

Kako bi se uvažili navedeni optimizacioni kriterijumi u ovoj glavi se razmatra rekonfiguracija distributivne mreže koja minimizuje ukupne troškove (TC) tokom analiziranog vremenskog perioda, a koji se računaju na sledeći način:

$$TC = \sum_{h=1}^{N_H} TC^h = \sum_{h=1}^{N_H} (CLOSS^h + CSW^h + CCI^h) \quad (85)$$

gde su:

$CLOSS^h$ – troškovi gubitaka električne energije u vremenskom intervalu h ,

CSW^h – troškovi prekidačkih akcija u vremenskom intervalu h i

CCI^h – troškovi ispada potrošača u vremenskom intervalu h .

Troškovi gubitaka električne energije u vremenskom intervalu h računaju se na sledeći način:

$$CLOSS^h = C_{Loss} T^h P_{Loss}^h, \quad (86)$$

gde su:

- C_{Loss} – cena gubitaka električne energije,
- T^h – dužina vremenskog intervala h i
- P_{Loss}^h – gubici aktivne snage u vremenskom intervalu h , definisani izrazom (48).

Troškovi prekidačkih akcija u vremenskom intervalu h računaju se na sledeći način:

$$CSW^h = \sum_{s=1}^{N_{SW}} C_{SW,s} Y_s^h, \quad (87)$$

gde je $C_{SW,s}$ cena prekidačke akcije prekidača s .

Troškovi ispada potrošača u vremenskom intervalu h računaju se na sledeći način:

$$CCI^h = \sum_{l=1}^{N_L} \lambda_l^h L_l \left(\sum_{j=1}^{N_M} C_{I,j} P_{L,j}^h TI_{lj}^h \right), \quad (88)$$

gde su:

- λ_l^h – intenzitet ispada grane l , tj. broj ispada grane l po jedinici dužine u vremenskom intervalu h ,
- L_l – dužina grane l ,
- $C_{I,j}$ – cena neisporučene energije u čvoru j ,
- $P_{L,j}^h$ – aktivna snaga potrošnje u čvoru j u vremenskom intervalu h i
- TI_{lj}^h – dužina prekida napajanja potrošača u čvoru j u slučaju ispada grane l u vremenskom intervalu h .

Intenzitet ispada grane l (λ_l^h) u izrazu (88) računa se na sledeći način:

$$\lambda_l^h = \frac{T^h}{8760} \lambda_l, \quad (89)$$

gde je λ_l godišnji intenzitet ispada grane l (izražen u broju ispada po jedinici dužine).

Dužina prekida napajanja (TI_{lj}^h) zavisi od konfiguracije distributivne mreže, tj. od promenljivih w_{cp}^h . Kako bi se pojednostavio ovaj model uvode se sledeće pretpostavke:

- 1) Kada se dogodi ispad grane l , prvi prekidač iznad prema napojnom čvoru reaguje i svi potrošači koji se napajaju preko njega ostaju bez napajanja;
- 2) Prekidač koji reaguje u slučaju kvara i izoluje deo mreže sa kvarom je jedan od prekidača koji se razmatraju u optimizacionom modelu ($s = 1, 2, \dots, N_{SW}$);

- 3) Svi potrošači koji se nalaze u segmentu u kome se nalazi grana na kojoj se desio ispad ne mogu biti restaurisani dok se kvar ne otkloni;
- 4) Ostatku potrošača može se restaurisati napajanje preko susednih izvoda (radijalnih ogranaka), pri čemu je vreme restauracije unapred poznato (T^{RES}),
- 5) Vreme potrebno da se otkloni ispad grane l (T_l^{REP}) je poznato unapred i
- 6) Oklanjanje kvara i restaurisanje ispalih potrošača mogu se sprovesti unutar jednog vremenskog intervala ($T^{RES} \leq T^h$, $T_l^{REP} \leq T^h$).

Neka grana l pripada segmentu e i čvor j pripada segmentu f . Zbog gore navedenih pretpostavki, dužina ispada potrošača u čvoru j usled ispada grane l (TI_{lj}^h) računa se na sledeći način:

$$TI_{lj}^h = \begin{cases} T_l^{REP}, & e = f \\ T^{RES} \sum_{m \in \Omega_{p,e-f}} w_{fm}^h, & e \neq f \end{cases} \quad (90)$$

gde je $\Omega_{p,e-f}$ skup putanja dodeljenih segmentu f koje sadrže segment e .

Objašnjenje izraza (90) je u sledećem:

- 1) Prvi slučaj ($e = f$): ako grana l i čvor j pripadaju istom segmentu ($e = f$), tada je $TI_{lj}^h = T_l^{REP}$, zbog Pretpostavke 3);
- 2) Drugi slučaj ($e \neq f$): ako postoji aktivna putanja dodeljena segmentu f koja sadrži segment e , potrošači u segmentu f ostaće bez napajanja i dužina ispada potrošača biće $TI_{lj}^h = T^{RES}$ (zbog Pretpostavke 4); u protivnom, potrošači u segmentu f neće ostati bez napajanja i tada je $TI_{lj}^h = 0$.

Koristeći relacije (85)-(90), operativno planiranje rekonfiguracije distributivnih mreža može se predstaviti kao višekriterijumski optimizacioni problem u sledećoj formi:

$$\min_{x_s^h, y_s^h, w_{cp}^h, P_{li}^h, Q_{li}^h} \left(TC = \sum_{h=1}^{N_H} (CLOSS^h + CSW^h + CCI^h) \right) \quad (91)$$

sa ograničenjima:

- 1) Jednakosti (15a) i (18a) kojima su opisane veze između promenljivih P_{li}^h i Q_{li}^h i promenljivih odlučivanja P_{li}^h i Q_{li}^h ,
- 2) Ograničenja za P_{li}^h i Q_{li}^h (16) i (19),
- 3) Zavisnost tokova snaga P_{li}^h i Q_{li}^h od statusa putanja w_{cp}^h (45)-(47),
- 4) Relacije (39) kojima su povezani statusi putanja w_{cp}^h i statusi prekidača x_s^h ,
- 5) Specificirani fazor napona u napojnom čvoru (4),
- 6) Ograničenje modula napona u čvorovima distributivne mreže (44)-(45),
- 7) Ograničenje tokova snaga po granama distributivne mreže (49),

- 8) Radijalna konfiguracija distributivne mreže (40),
- 9) Relacije (90) kojima je opisana veza između dužine trajanja ispada TI_{ij}^h i statusa putanja w_{cp}^h ,
- 10) Dozvoljeni broj prekidačkih akcija za svaki prekidač (50).

Predstavljeni optimizacioni model može se rešavati metodom Lagranžove relaksacije koja je opisana u trećoj glavi ove doktorske disertacije na isti način kao i optimizacioni model koji je predstavljen u poglavlju 2.4. Naime, ograničenja broja prekidačkih akcija predstavljaju vezna ograničenja, dok se sva ostala ograničenja odnose na režim i konfiguraciju distributivne mreže u jednom vremenskom intervalu. Relaksacijom veznih ograničenja dobija se Lagranžov dualni problem, koji se može rešiti metodom snopa, koja je opisana u poglavlju 3.3. Nakon rešavanja Lagranžovog dualnog problema potrebno je izvršiti heurističku pretragu opisanu u poglavlju 3.4, kako bi se dobilo primalno dopustivo rešenje.

5. Primena

U ovoj glavi prikazana je primena predložene metodologije za operativno planiranje rekonfiguracije distributivnih mreža na dva test sistema. Za prvi test sistem izabrana je mala test mreža koja se sastoji od 15 čvorova, dok je za drugi test sistem izabrana realna distributivna mreža koja se sastoji od 1021 čvora. U daljem tekstu prvo je dat opis navedenih test sistema. Zatim su prikazani rezultati predložene metodologije za slučaj kada se razmatra jednokriterijumska optimizacija, odnosno samo minimizacija gubitaka aktivne snage. Na kraju, dati su rezultati predložene metodologije za slučaj kada se razmatra višekriterijumska optimizacija, odnosno minimizacija ukupnih troškova električnih gubitaka, prekidačkih akcija i ispada potrošača.

5.1 Opis test sistema

5.1.1 Mala test mreža

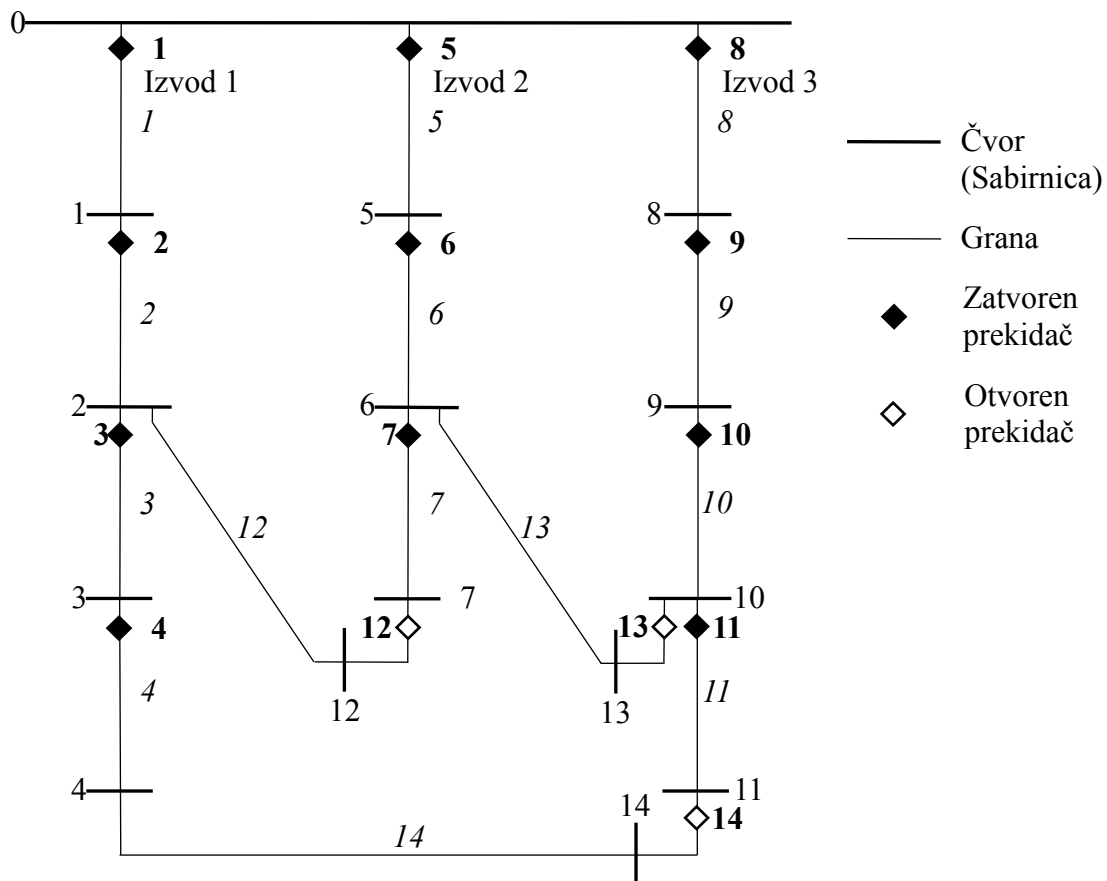
Mala test mreža prikazana je na slici 5.1 i sastoji se od tri SN izvoda koji sadrže $N_N = 15$ čvorova i $N_L = 14$ grana. Čvorovi su indeksirani brojevima $i = 0, 1, \dots, 14$, koji su prikazani običnim fontom, dok su grane indeksirane brojevima $l = 1, 2, \dots, 14$, koji su prikazani kurzivom. Čvor sa indeksom $i = 0$ predstavlja napojni čvor, dok su svi ostali čvorovi potrošački (tipa PQ). Sve grane u navedenoj distributivnoj mreži opremljene su prekidačima. Na slici 5.1 prekidači su indeksirani brojevima $s = 1, 2, \dots, 14$, koji su označeni podebljanim fontom.

Potrošnje aktivne i reaktivne snage u čvorovima male test mreže opisane su dnevnim dijagramima potrošnje koji su prikazani na slici 5.2, pri čemu se pretpostavlja da svi potrošači koji pripadaju istom izvodu imaju jednake potrošnje. Vršno opterećenje svih potrošača je 1 MVA. Sve grane male test mreže imaju iste karakteristike:

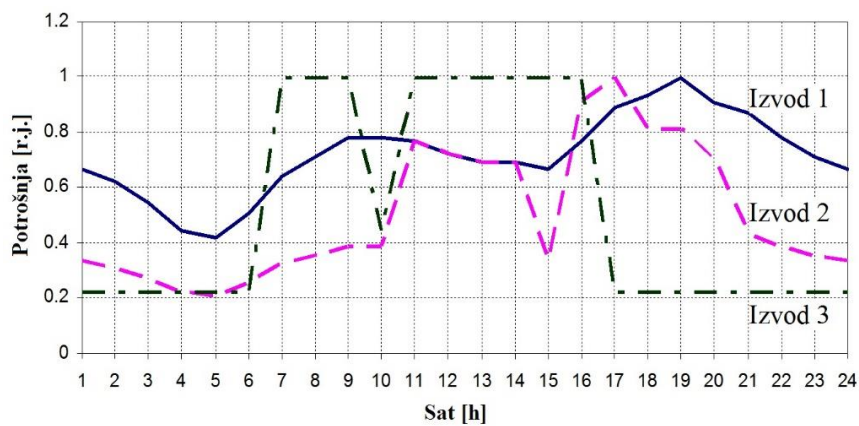
- | | |
|----------------------|----------------------|
| 1) dužina | 4,5 km |
| 2) podužna otpornost | 0,224 Ω / km |
| 3) podužna reaktansa | 0,109 Ω / km. |

5.1.2 Realna distributivna mreža

Realna distributivna mreža predstavlja tipičnu severnoameričku distributivnu mrežu i sastoji se od osam 25 kV izvoda koji sadrže ukupno 1021 čvor i 1020 grana. Navedena distributivna mreža opremljena je sa 52 daljinski kontrolisanih prekidača, od kojih je obično 40 zatvoreno, a 12 otvoreno. Sa stanovišta operativnog planiranja rekonfiguracije distributivnih mreža ovo je veliki broj prekidača, koji su izabrani kako bi se testirale performanse predloženog algoritma. Kao i u slučaju male test mreže, čvor sa indeksom $i = 0$ predstavlja napojni čvor, dok su svi ostali čvorovi potrošački (tipa PQ). U distributivnoj mreži postoje stambeni, komercijalni, industrijski i kombinovani tipovi potrošača. Podaci o realnoj distributivnoj mreži prikazani su u tabeli 5.1.



Slika 5.1 – Mala test mreža



Slika 5.2 – Dnevni dijagrami potrošnje za izvode male test mreže

Tabela 5.1 – Podaci o realnoj distributivnoj mreži

Broj izvoda (radijalnih ogranaka)	8
Vršno opterećenje po izvodima [MW]	0.07
Minimalna potrošnja [MW]	0.423
Maksimalna potrošnja [MW]	4.028
Prosečna potrošnja [MW]	2.274
Ukupna dužina sekcija [km]	101.7

5.2 Operativno planiranje rekonfiguracije distributivnih mreža: jednokriterijumska optimizacija

5.2.1 Rezultati proračuna za malu test mrežu

Predloženi algoritam prvo je testiran za slučaj kada je potrebno odrediti optimalni plan rekonfiguracije distributivne mreže za period od jednog dana, pri čemu je predviđeno da se rekonfiguracija distributivne mreže sprovodi u svakom satu. Dakle, u ovom slučaju je analizirani vremenski period podeljen na $N_H = 24$ sata. Potrošnje aktivne i reaktivne snage u svakom satu ($P_{L,i}^h$ i $Q_{L,i}^h$ respektivno) određene su sa dnevnog dijagrama potrošnje, prikazanog na slici 5.2 tako što je uzimana vrednost potrošnje iz sredine svakog sata.

U Tabeli 5.2 prikazani su rezultati proračuna za različite vrednosti dozvoljenog broja prekidačkih akcija (N_{SW}^{MAX}), koji uključuju rešenje Lagranžovog dualnog problema i primalno dopustivo rešenje. Navedeni rezultati pokazuju da se ove vrednosti veoma malo razlikuju: najveća (najmanja) razlika je 0.94 % (0.29 %) za $N_{SW}^{MAX} = 1(4)$. S obzirom da rešenje Lagranžovog dualnog problema predstavlja donju granicu za optimalno rešenje polaznog problema, prikazani rezultati pokazuju da predloženi algoritam obezbeđuje rešenja koja su blizu globalnog optimuma.

Kao što se očekivalo, rezultati u tabeli 5.2 pokazuju da gubici aktivne snage opadaju sa povećanjem vrednosti N_{SW}^{MAX} . Takođe, rešenja Lagranžovog dualnog problema zavise od vrednosti parametra N_{SW}^{MAX} , iako je ograničenje broja prekidačkih akcija relaksirano u Lagranžovom dualnom problem. Ovaj rezultat takođe je očekivan, s obzirom da parametar N_{SW}^{MAX} figuriše u Lagranžovoj funkciji (relacije (72) i (73) u poglavlju 3.2).

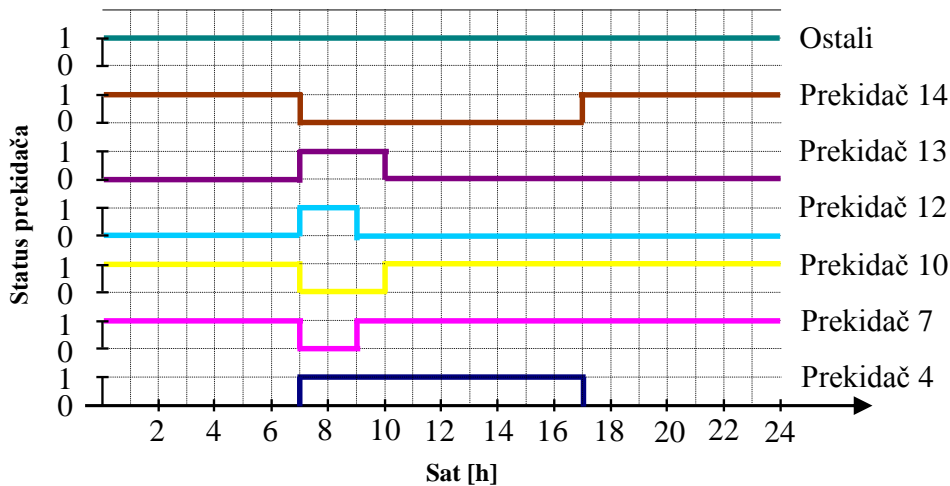
Tabela 5.2 – Rezultati proračuna za malu test mrežu za različite vrednosti N_{SW}^{MAX}

N_{SW}^{MAX}	1	2	3	4	5
Rešenje Lagranžovog dualnog problema [kW]	6124	6021	5972	5947	5947
Primalno dopustivo rešenje [kW]	6182	6045	5998	5985	5985

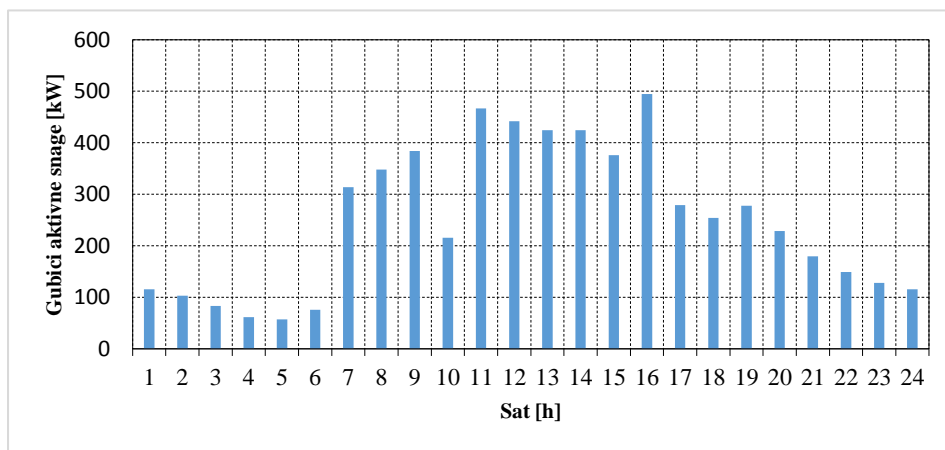
Detaljni rezultati proračuna za $N_{SW}^{MAX} = 3$ prikazani su u tabeli 5.3, slici 5.3 i slici 5.4. U tabeli 5.3 su prvo prikazani potrošnja aktivne snage (kolona (2)) i gubici aktivne snage (kolona (3)) za slučaj kada nije sprovedena rekonfiguracija distributivne mreže. Zatim su prikazani gubici aktivne snage (kolona (4)) za slučaj kada je u svakom satu sprovedena rekonfiguracija distributivne mreže određena predloženim algoritmom, kao i prekidačke akcije kojima je izvršena ova rekonfiguracija (kolona (5)). Prikazani rezultati pokazuju da su primenom predloženog plana rekonfiguracije smanjeni gubici aktivne snage u svakom satu razmatranog vremenskog perioda.

Tabela 5.3 – Rezultati proračuna za malu test mrežu: ukupna potrošnja, gubici aktivne snage (bez primene rekonfiguracije), gubici aktivne snage i prekidačke akcije dobijeni predloženim algoritmom i u slučaju kada nisu uvažena ograničenja broja prekidačkih akcija

Sat h	Ukupna potrošnja [kW]	P_{Loss}^h (bez primene rekonfiguracije) [kW]	P_{Loss}^h (predloženi algoritam) [kW]	Prekidačke akcije (O–otvaranje; Z–zatvaranje)	
				Predloženi algoritam	Bez uvažanih ograničenja
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1	4554.0	133.007	115.415	4(O), 14(Z)	4(O), 14(Z)
2	4305.0	116.567	103.040	Bez akcija	Bez akcija
3	3876.0	91.052	83.475	Bez akcija	Bez akcija
4	3326.0	63.589	61.715	Bez akcija	Bez akcija
5	3205.0	58.319	57.422	Bez akcija	Bez akcija
6	3693.0	81.318	75.856	Bez akcija	Bez akcija
7	7542.0	367.602	313.922	4(Z), 7(O), 10(O), 12(Z), 13(Z), 14(O)	4(Z), 10(O), 13(Z), 14(O)
8	7909.0	393.360	347.975	Bez akcija	7(O), 12(Z)
9	8279.0	422.045	384.148	7(Z), 12(O)	7(Z), 12(O)
10	6067.0	215.414	215.414	10(Z), 13(O)	10(Z), 13(O)
11	9369.0	466.714	466.714	Bez akcija	Bez akcija
12	9054.0	441.739	441.739	Bez akcija	Bez akcija
13	8823.0	424.483	424.483	Bez akcija	Bez akcija
14	8823.0	424.483	424.483	Bez akcija	Bez akcija
15	7670.0	376.180	376.180	Bez akcija	10(O), 13(Z)
16	9801.0	494.393	494.393	Bez akcija	7(O), 12(Z)
17	7440.0	324.164	279.156	4(O), 14(Z)	4(O), 7(Z), 10(Z), 12(O), 13(O), 14(Z)
18	7049.0	306.155	254.139	Bez akcija	Bez akcija
19	7317.0	341.258	277.486	Bez akcija	Bez akcija
20	6643.0	277.002	228.556	Bez akcija	Bez akcija
21	5651.0	221.425	179.713	Bez akcija	Bez akcija
22	5163.0	178.873	149.161	Bez akcija	Bez akcija
23	4793.0	150.188	128.155	Bez akcija	Bez akcija
24	4554.0	133.007	115.415	Bez akcija	Bez akcija



Slika 5.3 – Prikaz prekidačkih akcija za malu test mrežu

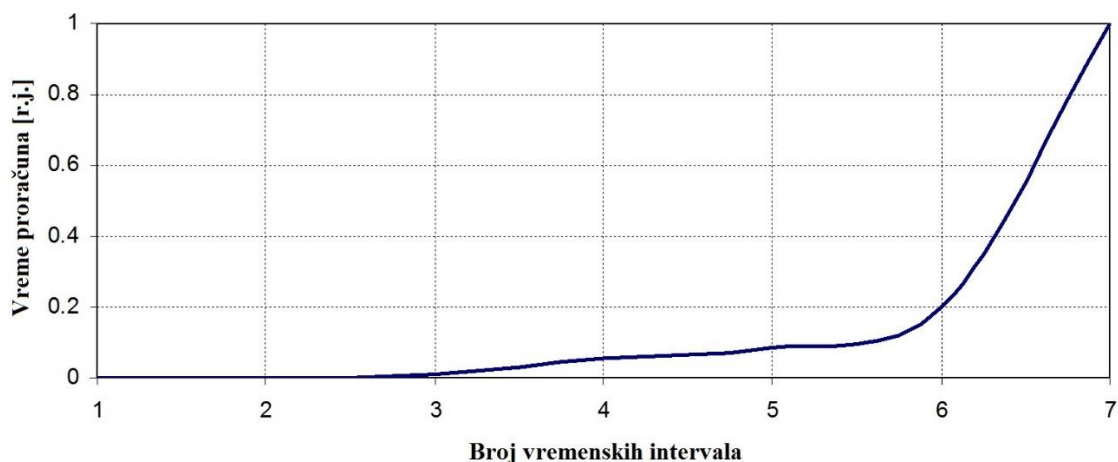


Slika 5.4 – Gubici aktivne snage za malu test mrežu

Rezultati u tabeli 5.3 pokazuju da predloženi plan rekonfiguracije distributivne mreže podrazumeva po 3 prekidačke akcije za prekidače sa indeksima 4 i 14 i po 2 prekidačke akcije za prekidače sa indeksima 7, 10, 12 i 13. Kao što je bilo očekivano, broj prekidačkih akcija za svaki prekidač je manji od $N_{sw}^{MAX} = 3$. Radi poređenja, u poslednjoj koloni (6) tabele 5.3 prikazane su prekidačke akcije za rekonfiguraciju distributivne mreže za slučaj kada nije uvaženo ograničenje broja prekidačkih akcija. Prekidačke akcije dobijene predloženim algoritmom (kolona (5)) prikazane su grafički na slici 5.3, dok su gubici aktivne snage (kolona (4)) prikazani na slici 5.4.

U cilju verifikacije predloženog algoritma, problem operativnog planiranja rekonfiguracije distributivnih mreža rešen je koristeći opšti optimizacioni model koji je predstavljen u poglavlju 2.1 i rezultati su upoređeni sa rezultatima dobijenim predloženim algoritmom. Pri tome je opšti optimizacioni model rešavan pomoću referentnog programskog paketa za mešovito-celobrojno nelinearno programiranje, kako je prikazano u Prilogu 1. Opšti optimizacioni model je prvo testiran za različit broj vremenskih intervala (N_H) i vremena proračuna su predstavljena na slici 5.5 u relativnim jedinicama. Najduže vreme

proračuna je bilo 3 sata i 26 minuta, koje je dobijeno za $N_H = 7$. Testovi za $N_H > 7$ se nisu završavali u roku od 5 sati.



Slika 5.5 – Vreme rešavanja opšteg optimizacionog modela u zavisnosti od broja vremenskih intervala

Rezultati dobijeni rešavanjem opšteg optimizacionog modela i predloženim algoritmom za $N_H = 7$ i $N_{SW}^{MAX} = 1$ upoređeni su u tabelama 5.4 i 5.5. Ovi rezultati pokazuju da je rešenje dobijeno predloženim algoritmom identično sa rešenjem opšteg optimizacionog modela. S obzirom da je predloženim algoritmom rešavan linearizovani optimizacioni model za operativno planiranje rekonfiguracije distributivnih mreža predstavljen u poglavlju 2.2, navedeni rezultati pokazuju da su rešavanjem linearizovanog optimizacionog modela dobijeni isti rezultati kao rešavanjem opšteg optimizacionog modela.

Tabela 5.4 – Poređenje rešenja opšteg optimizacionog modela sa rešenjem dobijenim koristeći predloženi algoritam

Opšti optimizacioni model		Predloženi algoritam	
Optimalno rešenje [kW]	857.775	Rešenje Lagranžovog dualnog problema [kW]	834.312
		Primalno dopustivo rešenje [kW]	857.775

Tabela 5.5 – Rezultati dobijeni predloženim algoritmom i rešavanjem opšteg optimizacionog modela

Sat h	P_{Loss}^h [kW]	Prekidačke akcije (O–otvaranje; Z–zatvaranje)
1	133.0077	Bez akcija
2	116.5672	Bez akcija
3	91.05185	Bez akcija
4	63.58958	Bez akcija
5	58.31878	Bez akcija
6	81.31801	Bez akcija
7	313.9225	12(Z), 7(O), 13(Z), 10(O)

5.2.2 Rezultati proračuna za realnu distributivnu mrežu

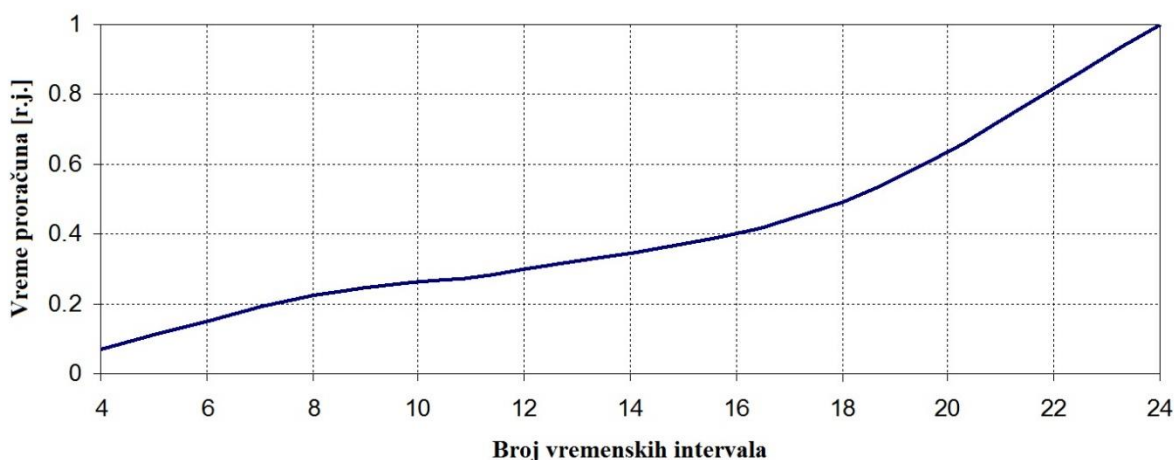
Kao i u slučaju male test mreže, predloženi algoritam testiran je za slučaj operativnog planiranja rekonfiguracije razmatrane distributivne mreže za period od jednog dana, gde se rekonfiguracija sprovodi u svakom satu. U Tabeli 5.6 su prikazani rezultati proračuna za različite vrednosti dozvoljenog broja prekidačkih akcija (N_{SW}^{MAX}). Kao i u slučaju male test mreže, navedeni rezultati pokazuju da se rešenje Lagranžovog dualnog problema i primalno dopustivo rešenje veoma malo razlikuju: u svim navedenim slučajevima ova razlika je manja od 0.5 %. S obzirom da rešenje Lagranžovog dualnog problema predstavlja donju granicu za optimalno rešenje polaznog problema, rezultati u tabeli 5.6 pokazuju da predloženi algoritam obezbeđuje rešenja koja su blizu globalnog optimuma.

Detaljni rezultati proračuna za $N_{SW}^{MAX} = 2$ prikazani su u tabeli 5.7. Prikazani rezultati pokazuju da su primenom predloženog plana rekonfiguracije smanjeni gubici aktivne snage u svakom satu razmatranog vremenskog perioda.

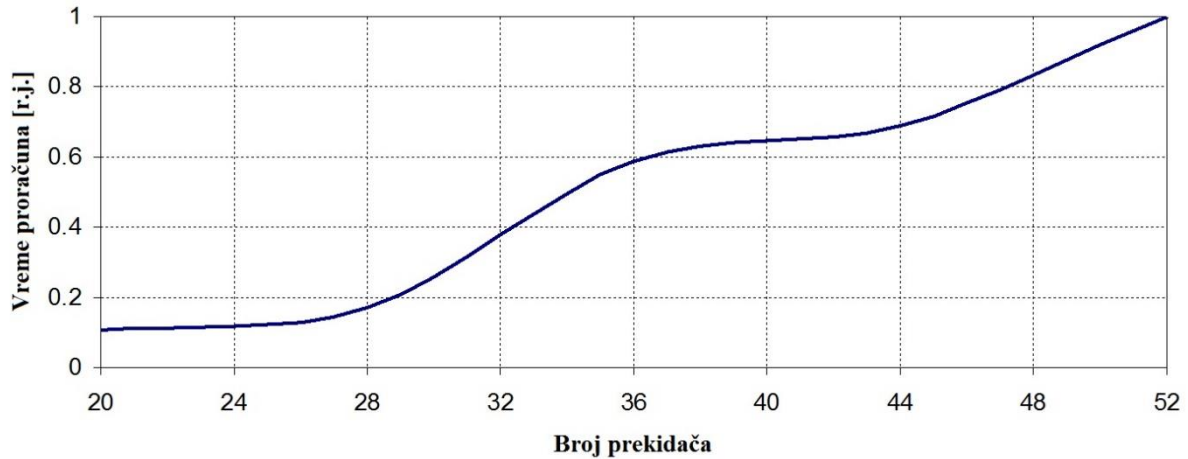
Tabela 5.6 – Rezultati proračuna za realnu distributivnu mrežu za različite vrednosti N_{SW}^{MAX}

N_{SW}^{MAX}	1	2	3	4	5
Rešenje Lagranžovog dualnog problema [MW]	52.69	52.13	51.82	51.74	51.74
Primalno dopustivo rešenje [MW]	52.88	52.26	51.87	51.78	51.78

U cilju testiranja performansi predloženog algoritma, analizirana su vremena proračuna na realnoj distributivnoj mreži za različit broj prekidača i različit broj vremenskih intervala. Dobijeni rezultati prikazani su na slikama 5.7 i 5.8 (vremena proračuna su prikazana u relativnim jedinicama). U osnovnom slučaju, gde su razmatrana 24 vremenska intervala i 52 prekidača, vreme proračuna je bilo 28 minuta. Rezultati na slikama 5.7 i 5.8 pokazuju da vreme proračuna predloženog algoritma ne raste značajno sa porastom dimenzija optimizacionog modela.



Slika 5.7 – Vreme izvršenja predloženog algoritma na realnoj distributivnoj mreži u zavisnosti od broja vremenskih intervala



Slika 5.8 – Vreme izvršenja predloženog algoritma na realnoj distributivnoj mreži u zavisnosti od broja prekidača

5.3 Operativno planiranje rekonfiguracije distributivnih mreža: višekriterijumska optimizacija

Kao i u prethodnom poglavlju, predloženi algoritam testiran je za slučaj operativnog planiranja rekonfiguracije razmatrane distributivne mreže za period od jednog dana, gde se rekonfiguracija sprovodi u svakom satu. U proračunu su uzeti sledeći parametri (opisani u četvrtoj glavi ove doktorske disertacije):

- | | |
|--|----------------------------|
| 1) Cena gubitaka električne energije (C_{Loss}): | \$6.5625 cents/kWh; |
| 2) Cena neisporučene energije (C_I): | \$4/kWh; |
| 3) Cena prekidačkih akcija (C_{SW}): | \$1 po prekidačkoj akciji; |
| 4) Intenzitet otkaza (λ^h): | 0.0001 ispada/km; |
| 5) Vreme otklanje kvara (T^{REP}): | 1 h; |
| 6) Vreme restauracije (T^{RES}): | 0.25 h. |

Rezultati proračuna za malu test mrežu prikazani su u tabeli 5.8, a za realnu distributivnu mrežu prikazani su u tabeli 5.9. Poređenje rezultata dobijenih za malu test mrežu (tabele 5.3 i 5.8) i za realnu distributivnu mrežu (tabele 5.7 i 5.9) pokazuje da uvažavanje dodatnih optimizacionih kriterijuma smanjuje broj prekidačkih akcija kojima se vrši rekonfiguracija distributivne mreže.

Tabela 5.7 – Rezultati proračuna za realnu distributivnu mrežu: ukupna potrošnja, gubici aktivne snage (bez primene rekonfiguracije), gubici aktivne snage i prekidačke akcije dobijeni predloženim algoritmom

Sat <i>h</i>	Ukupna potrošnja [MW]	P_{Loss}^h (bez manipulacije prekidačima) [MW]	P_{Loss}^h (predloženi algoritam) [MW]	Prekidačke akcije (O–otvaranje; Z–zatvaranje)
1	28.453	0.992	0.847	73(O), 330(O), 601(O), 1010(Z), 1013(Z), 1017(Z)
2	26.856	0.865	0.748	Bez akcija
3	24.105	0.670	0.596	Bez akcija
4	20.577	0.462	0.428	330(Z), 1013(O)
5	19.800	0.423	0.393	Bez akcija
6	26.424	0.742	0.727	601(Z), 1017(O)
7	49.153	2.769	2.634	979(O), 1020(Z)
8	51.535	2.973	2.848	Bez akcija
9	53.908	3.196	3.084	Bez akcija
10	39.839	1.670	1.633	979(Z), 1020(O)
11	60.284	3.706	3.706	73(Z), 1010(O)
12	58.299	3.490	3.490	Bez akcija
13	56.845	3.341	3.341	Bez akcija
14	56.845	3.341	3.341	Bez akcija
15	49.956	2.833	2.833	Bez akcija
16	62.824	4.028	4.028	Bez akcija
17	53.881	3.445	3.234	282(O), 375(O), 781(O), 1012(Z), 1014(Z), 1018(Z)
18	47.398	2.660	2.384	781(Z), 829(O), 1018(O), 1019(Z)
19	53.484	3.412	3.094	Bez akcija
20	49.259	2.852	2.623	Bez akcija
21	43.297	2.311	2.143	829(Z), 1019(O)
22	40.166	1.977	1.854	Bez akcija
23	35.244	1.423	1.328	Bez akcija
24	28.453	0.992	0.913	Bez akcija

Tabela 5.8 – Rezultati proračuna za malu test mrežu: troškovi električnih gubitaka, prikidačkih akcija i ispada potrošača i prekidačke akcije dobijeni predloženim algoritmom

Sat <i>h</i>	Troškovi [\$]				Prekidačke akcije (O–otvaranje; Z–zatvaranje)
	Gubici	Prekidačke akcije	Ispadi potrošača	Ukupno	
1	8.725	0.000	0.617	9.342	Bez akcija
2	7.646	0.000	0.584	8.230	Bez akcija
3	5.973	0.000	0.526	6.499	Bez akcija
4	4.171	0.000	0.452	4.623	Bez akcija
5	3.825	0.000	0.436	4.261	Bez akcija
6	5.334	0.000	0.501	5.835	Bez akcija
7	20.822	2.000	1.036	23.858	10(O), 13(Z)
8	22.907	0.000	1.085	23.992	Bez akcija
9	25.200	0.000	1.135	26.335	Bez akcija
10	14.760	0.000	0.826	15.586	Bez akcija
11	30.616	2.000	1.265	33.881	10(Z), 13(O)
12	28.978	0.000	1.224	30.202	Bez akcija
13	27.846	0.000	1.193	29.039	Bez akcija
14	27.846	0.000	1.193	29.040	Bez akcija
15	24.677	0.000	1.053	25.731	Bez akcija
16	32.432	0.000	1.317	33.749	Bez akcija
17	18.312	2.000	1.017	21.329	4(O), 14(Z)
18	16.671	0.000	0.975	17.646	Bez akcija
19	18.203	0.000	1.015	19.218	Bez akcija
20	14.993	0.000	0.924	15.917	Bez akcija
21	11.789	0.000	0.799	12.588	Bez akcija
22	9.785	0.000	0.730	10.515	Bez akcija
23	8.407	0.000	0.678	9.085	Bez akcija
24	7.571	0.000	0.644	8.215	Bez akcija

Tabela 5.9 – Rezultati proračuna za realnu distributivnu mrežu: troškovi električnih gubitaka, prikidačkih akcija i ispada potrošača i prekidačke akcije dobijeni predloženim algoritmom

Sat <i>h</i>	Troškovi [\$]				Prekidačke akcije (O–otvaranje; Z–zatvaranje)
	Gubici	Prekidačke akcije	Ispadi potrošača	Ukupno	
1	57.26	4.00	13.25	74.51	330(O), 601(O), 1013(Z), 1017(Z)
2	50.60	0.000	12.53	63.13	Bez akcija
3	40.21	0.000	17.46	57.67	Bez akcija
4	28.90	0.000	20.23	49.13	Bez akcija
5	26.71	0.000	15.16	41.87	Bez akcija
6	48.06	2.000	17.04	65.10	601(Z), 1017(O)
7	174.40	4.000	25.17	203.57	979(O), 1020(Z), 1013(O), 330(Z)
8	188.88	0.00	26.34	215.22	Bez akcija
9	204.74	0.00	27.14	231.88	Bez akcija
10	109.60	2.00	14.48	126.08	979(Z), 1020(O)
11	243.16	0.00	25.57	268.73	Bez akcija
12	228.95	0.00	25.34	354.29	Bez akcija
13	219.18	0.00	26.72	245.90	Bez akcija
14	219.18	0.00	26.73	245.91	Bez akcija
15	185.87	0.00	13.93	199.80	Bez akcija
16	264.24	0.00	26.41	290.65	Bez akcija
17	212.75	4.00	23.89	240.64	282(O), 781(O), 1012(Z), 1018(Z)
18	161.94	0.00	14.93	176.87	Bez akcija
19	208.62	0.00	18.85	227.47	Bez akcija
20	176.19	0.00	16.14	192.33	Bez akcija
21	139.88	2.00	14.62	156.50	73(Z), 1010(O)
22	121.42	0.00	11.37	132.79	Bez akcija
23	87.18	0.00	14.24	101.42	Bez akcija
24	60.19	0.00	12.57	72.76	Bez akcija

6. Zaključak

U ovoj doktorskoj disertaciji predstavljene su dve formulacije problema operativnog planiranja rekonfiguracije distributivnih mreža. Prva formulacija predstavlja opšti optimizacioni model izveden na bazi mešovito-celobrojnog nelinearnog programiranja, gde je kao optimizacioni kriterijum postavljena minimizacija gubitaka aktivne snage. Navedeni optimizacioni model je velike dimenzionalnosti i samim tim je veoma težak za rešavanje. Naime, prilikom testiranja navedenog optimizacionog modela na maloj test mreži, za izvršenje proračuna bilo je potrebno značajno računarsko vreme (reda nekoliko sati). Kako bi se olakšalo rešavanje navedenog optimizacionog modela, izvršena je njegova linearizacija, čime je dobijena druga formulacija problema operativnog planiranja rekonfiguracije distributivnih mreža. Linearizacija opšteg optimizacionog modela izvršena je koristeći aproksimativne relacije za tokove snaga i padove napona u distributivnoj mreži, kao i model povezanosti distributivne mreže zasnovan na putanjama koje su dodeljene segmentima distributivne mreže. Prilikom testiranja dobijeni su isti rezultati rešavanjem oba navedena optimizaciona modela. Međutim, u primenama na distributivne mreže realnih (velikih) dimenzija, predstavljeni optimizacioni modeli su veoma velikih dimenzija i najčešće ne mogu biti rešavani direktno.

Kako bi se omogućila obrada distributivnih mreža realnih dimenzija, u ovoj doktorskoj disertaciji predložen je novi algoritam za rešavanje formulisanog problema, koji je zasnovan na metodi Lagranžove relaksacije. Ideja je da se izbegne direktno rešavanje formulisanog optimizacionog modela, tako što je rešavan odgovarajući Lagranžov dualni problem, a zatim je na osnovu rešenja Lagranžovog dualnog problema određivano rešenje polaznog problema. Pokazano je da se Lagranžov dualni problem može dekomponovati na podprobleme, koji su znatno manjih dimenzija i lakši za rešavanje nego polazni problem.

Predloženi algoritam primenjen je na dva reprezentativna test sistema, pri čemu je razmatrano operativno planiranje rekonfiguracije za vremenski period od jednog dana, gde se rekonfiguracija distributivne mreže sprovodi u svakom satu. Rezultati proračuna pokazuju da su dobijenim planom rekonfiguracije smanjeni gubici aktivne snage u svakom satu razmatranog vremenskog perioda. Takođe, numerički testovi na realnoj distributivnoj mreži pokazuju da vreme izvršenja predloženog algoritma ne raste značajno sa dimenzijom optimizacionog modela koji se rešava. Prema tome, na ovaj način dobijen je efikasan algoritam kojim se mogu obrađivati distributivne mreže realnih dimenzija.

Na kraju, predloženi optimizacioni model je proširen, kako bi se uvažila još dva optimizaciona kriterijuma: minimizacija troškova prekidačkih akcija i minimizacija troškova ispada potrošača. Dobijeni rezultati pokazuju da uvažavanje dodatnih optimizacionih kriterijuma utiče na rezultate proračuna, tako što smanjuje broj prekidačkih akcija kojima se sprovodi rekonfiguracija distributivne mreže.

Predložena metodologija otvara brojne pravce za buduća istraživanja među kojima se izdvajaju:

1. Uvažavanje neizvesnosti u formulisanom optimizacionom modelu, na primer u pogledu potrošnje i proizvodnje koje su dodeljene čvorovima distributivne mreže u pojedinim vremenskim intervalima; neizvesnost ulaznih podataka može se modelovati metodama robusne optimizacije [102].
2. Razvoj optimizacionog modela za sprovođenje rekonfiguracije distributivne mreže u realnom vremenu koji uvažava rezultate operativnog planiranja rekonfiguracije, kao i operativno stanje distributivne mreže.
3. Proširenje predložene metodologije za operativno planiranje rekonfiguracije distributivnih mreža sa ciljem da se uvažavaju i drugi resursi za optimizaciju rada distributivnih mreža (na primer, resursi za regulaciju naponsko-reaktivnih prilika).

7. Literatura

- [1] N. Rajaković, D. Tasić: *Distributivne i industrijske mreže*; Akademska misao, Beograd, 2008.
- [2] M. Nimrihter: *Elektrodistributivni sistemi*; FTN Izdavaštvo, Novi Sad 2009.
- [3] J.A. Momoh: Smart grid design for efficient and flexible power networks operation and control; *Power Systems Conference and Exposition*, 2009. PSCE '09. IEEE/PES
- [4] G.T. Heydt: The next generation of power distribution systems; *IEEE Transactions on Smart Grid*, Volume 1, Issue 3, pp. 225–235, December 2010.
- [5] F.P.Sionsansi: *Smart Grid: Integrating Renewable, Distributed & Efficient Energy*; Academic Press, 2011.
- [6] F. Pilo, G. Pisano, G. G. Soma: Advanced DMS to manage active distribution networks; *PowerTech*, 2009 IEEE Bucharest
- [7] A.P. Sakis Meliopoulos, E. Polymeneas, Z. Tan, R. Huang, D. Zhao: Advanced distribution management system; *IEEE Transactions on Smart Grid*, Volume 4, Issue 4, pp. 2109–2117, December 2013.
- [8] R.C. Dugan, R.F. Arritt, T.E. McDermott, S.M. Brahma, K. Schneider: Distribution system analysis to support the smart grid; *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1–8, July 2010.
- [9] D. Popović, D. Bekut, V. Treskanica: *Specijalizovani DMS algoritmi*; DMS Grupa, Novi Sad, 2004.
- [10] V. C. Strezoski: *Osnovni proračuni elektroenergetskih sistema*; FTN Izdavaštvo, Novi Sad, 2017.
- [11] R.J. Sarfi, M.M.A. Salama, A.Y. Chikhani: A survey of the state of the art in distribution system reconfiguration for system loss reduction; *Electric Power Systems Research*, Volume 31, Issue 1, pp. 61–70, October 1994.
- [12] S. Mishra, D. Das, S. Paul: A comprehensive review on power distribution network reconfiguration; *Energy Systems*, Volume 8, Issue 2, pp. 227–284, May 2017.
- [13] A. Merlin, H. Back: Search for a minimal-loss operating spanning tree configuration in an urban power distribution system; *Proc. 5th Power System Computation Conference (PSCC)*, Cambridge, UK, pp. 1–18, 1975.
- [14] D. Shirmohammadi, H.W. Hong: Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line losses reduction; *IEEE Transactions on Power Delivery*, Volume 4, Issue 2, pp. 1492–1498, April 1989.
- [15] V. Borozan, D. Rajicic, R. Ackovski: Improved method for loss minimization in distribution networks; *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume 10, Issue 3, pp. 1420–1425, August 1995.
- [16] S. Civanlar, J.J. Grainger, H. Yin, S.S.H. Lee: Distribution feeder reconfiguration for loss reduction; *IEEE Transactions on Power Delivery*, Volume 3, Issue 3, pp. 1217–1223, July 1988.

- [17] M. Baran, F.F. Wu: Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing; *IEEE Transactions on Power Delivery*, Volume 4, Issue 2, pp. 1401–1407, April 1989.
- [18] C.T. Huddleston, R.P. Broadwater, A. Chandrasekaran: Reconfiguration algorithms for minimizing losses in radial electric distribution systems; *Electric Power System Research*, Volume 18, Issue 1, pp. 57–66, January 1990.
- [19] I. Roytelman, V. Melnik, S.S.H. Lee, R.L. Lugtu: Multi objective feeder reconfiguration by distribution management system; *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume 11, Issue 2, pp. 661–667, May 1996.
- [20] S.K. Goswami, S.K. Basu: A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimization; *IEEE Transactions on Power Delivery*, Volume 7, Issue 3, pp. 1484–1491, July 1992.
- [21] C.C. Liu, S.J. Lee, K. Vu: Loss minimization of distribution feeders: optimality and algorithms; *IEEE Transactions on Power Delivery*, Volume 4, Issue 2, pp. 1281–1289, April 1989
- [22] K. Aoki, H. Kuwabara, T. Satoh, M. Kanezashi: An efficient algorithm for load balancing for transformers and feeders by switch operation in large scale distribution systems; *IEEE Transactions on Power Delivery*, Volume 3, Issue 4, pp. 1865–1872, October 1988.
- [23] Y.Y. Hsu, Y. Jwo-Hwu: Planning of distribution feeder reconfiguration with protective device coordination; *IEEE Transactions on Power Delivery*, Volume 8, Issue 3, pp. 1340–1347, July 1993.
- [24] G.J. Peponis, M.P. Papadopoulos, N.D. Hatziargyriou: Distribution network reconfiguration to minimize resistive line losses; *IEEE Transactions on Power Delivery*, Volume 10, Issue 3, pp. 1338–1342, July 1995.
- [25] W.M. Lin, H.C. Chin: A new approach for distribution feeder reconfiguration for loss reduction and service restoration, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Volume 13, Issue 3, pp. 870–875, July 1998.
- [26] K. Nara, A. Shiose, M. Kitagawa, T. Ishihara: Implementation of genetic algorithm for distribution system loss minimum reconfiguration; *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume 7, Issue 3, pp. 1044–1051, August 1992.
- [27] W.M. Lin, F.S. Cheng, M.T. Tsay: Distribution feeder reconfiguration with refined genetic algorithm; *IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution*, Volume 147, Issue 6, pp. 349–354, November 2000.
- [28] N. Gupta, A. Swarnkar, K.R. Niazi: Distribution network reconfiguration for power quality and reliability improvement using genetic algorithms; *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 54, pp. 664–671, January 2014.
- [29] H.D. Chiang, R. Jean-Jumeau: Optimal network reconfiguration in distribution systems, Part 1: A new formulation and solution methodology; *IEEE Transactions on Power Delivery*, Volume 5, Issue 4, pp. 1902–1909, October 1990.

- [30] H.D. Chiang, R. Jean-Jumeau: Optimal network reconfiguration in distribution systems, Part 2: Solution algorithms and numerical results; *IEEE Transactions on Power Delivery*, Volume 5, Issue 3, pp. 1568–1574, July 1990.
- [31] H.C. Chang, C.C. Kuo: Network reconfiguration in distribution systems using simulated annealing; *Electric Power Systems Research*, Volume 29, Issue 3, pp. 227–238, May 1994.
- [32] R.E. Brown: Distribution reliability assessment and reconfiguration optimization; *Transmission and Distribution Conference and Exposition*, 2001 IEEE/PES
- [33] Y.J. Jeon, J.C. Kim, J.O. Kim, J.R. Shin, K.Y. Lee: An efficient simulated annealing algorithm for network reconfiguration in large-scale distribution systems; *IEEE Transactions on Power Delivery*, Volume 17, Issue 4, pp. 1070–1078, October 2002.
- [34] Y.H. Song, G.S. Wang, A.T. Johns, P.Y. Wang: Distribution network reconfiguration for loss reduction using fuzzy controlled evolutionary programming; *IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution*, Volume 144, Issue 4, pp. 345–350, July 1997.
- [35] A.C.B. Delbem, A.C.Pd.L.F. de Carvalho, N.G. Bretas: Main chain representation for evolutionary algorithms applied to distribution system reconfiguration; *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume 20, Issue 1, pp. 425–436, February 2005.
- [36] C.T. Su, C.S. Lee: Network reconfiguration of distribution system using improved mixed integer hybrid differential evolution; *IEEE Transactions on Power Delivery*, Volume 18, Issue 3, pp. 1022–1027, July 2003.
- [37] M. Tsai, F. Hsu: Application of grey correlation analysis in evolutionary programming for distribution system feeder reconfiguration; *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume 25, Issue 2, pp. 1126–1133, May 2010.
- [38] H. Kim, Y. Ko, K.H. Jung: Artificial neural-network based feeder reconfiguration for loss reduction in distribution systems; *IEEE Transactions on Power Delivery*, Volume 8, Issue 3, pp. 1356–1366, July 1993.
- [39] H. Salazar, R. Gallego, R. Romero: Artificial neural networks and clustering techniques applied in the reconfiguration of distribution systems; *IEEE Transactions on Power Delivery*, Volume 21, Issue 3, pp. 1735–1742, July 2006.
- [40] A. Augugliaro, L. Dusonchet, E. Riva Sanseverino: Genetic, simulated annealing and tabu search algorithms: Three heuristic methods for optimal reconfiguration and compensation of distribution networks; *International Transactions on Electrical Energy Systems*, Volume 9, Issue 1, pp. 35–41, January/February 1999.
- [41] A.Y.Abdelaziz, F.M.Mohamed, S.F.Mekhamer, M.A.L.Badr: Distribution system reconfiguration using a modified tabu search algorithm; *Electric Power Systems Research*, Volume 80, Issue 8, pp. 943–953, August 2010.
- [42] C.T. Su, C.F. Chang, J.P. Chiou: Distribution network reconfiguration by ant colony search algorithm; *Electric Power Systems Research*, Volume 75, Issues 2–3, pp. 190–199, August 2005.

- [43] C.F. Chang: Reconfiguration and capacitor placement for loss reduction of distribution systems by ant colony search algorithm; *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume 23, Issue 4, pp. 1747–1755, November 2008.
- [44] S. Sivanagaraju, J.V. Rao, P.S. Raju: Discrete particle swarm optimization to network reconfiguration for loss reduction and load balancing; *Electric Power Components and Systems*, Volume 36, Issue 5, pp. 513–524, 2008.
- [45] W. Wu, M. Tsai: Application of enhanced integer coded particle swarm optimization for distribution system feeder reconfiguration; *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume 26, Issue 3, pp. 1591–1599, August 2011.
- [46] T. Taylor, D. Lubkeman: Implementation of heuristic search strategies for distribution feeder reconfiguration; *IEEE Transactions on Power Delivery*, Volume 5, Issue 1, pp. 239–246, January 1990.
- [47] G. Chang, J. Zrida, J.D. Birdwell: Knowledge-based distribution system analysis and reconfiguration; *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume 5, Issue 3, pp. 744–749, August 1990.
- [48] E.R. Ramos, A.G. Exposito, J.R. Santos, F.L. Iborra: Path-based distribution network modeling: Application to reconfiguration for loss reduction; *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume 20, Issue 2, pp. 556–564, May 2005.
- [49] E.R. Ramos, J.R. Santos, J. Reyes: A simpler and exact mathematical model for the computation of the minimal power losses tree; *Electric Power Systems Research*, Volume 80, Issue 5, pp. 562–571, May 2010.
- [50] F.L. Iborra, J.R. Santos, E.R. Ramos: Mixed-integer linear programming model for solving reconfiguration problems in large-scale distribution systems; *Electric Power Systems Research*, Volume 88, pp. 137–145, July 2012.
- [51] A. Borghetti: A mixed-integer linear programming approach for the computation of the minimum-losses radial configuration of electrical distribution networks; *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume 27, Issue 3, pp. 1264–1273, August 2012.
- [52] H. Haghghat, B. Zeng: Distribution system reconfiguration under uncertain load and renewable generation; *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume 31, Issue 4, pp. 2666–2675, July 2016.
- [53] B. Moradzadeh, K. Tomsovic: Mixed-integer programming-based reconfiguration of a distribution system with battery storage; *North American Power Symposium (NAPS)*, pp. 1–6, September 2012.
- [54] H. Ahmadi, J.R. Marti: Distribution system optimization based on a linear power-flow formulation; *IEEE Transactions on Power Delivery*, Volume 30, Issue 1, pp. 25–33, February 2015.
- [55] H. Ahmadi, J.R. Marti: Mathematical representation of radiality constraint in distribution system reconfiguration problem; *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*; Volume 64, pp. 293–299, January 2015.
- [56] J.F. Franco, M.J. Rider, M. Lavorato, R. Romero: A mixed integer LP model for the reconfiguration of radial electric distribution systems considering distributed generation; *Electric Power Systems Research*, Volume 97, pp. 51–60, April 2013.

- [57] R.A. Jabr, R. Singh, B.C. Pal: Minimum loss network reconfiguration using mixed-integer convex programming; *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume 27, Issue 2, pp. 1106–1115, May 2012.
- [58] J.A. Taylor, F.S. Hover: Convex models of distribution system reconfiguration; *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume 27, Issue 3, pp. 1407–1413, August 2012.
- [59] H. M. Khodr, J. Martinez-Crespo, M. A. Matos, J. Pereira: Distribution systems reconfiguration based on OPF using Benders decomposition; *IEEE Transactions on Power Delivery*, Volume 24, Issue 4, pp. 2166–2176, October 2009.
- [60] M. Lavorato, J.F. Franko, M.J. Rider, R. Romero: Imposing radiality constraints in distribution system optimization problems; *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume 27, Issue 1, pp. 172–180, February 2012.
- [61] O.F. Fajardo, A. Vargas: Reconfiguration of MV distribution networks with multicost and multipoint alternative supply, Part I: Economic dispatch through radialization; *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume 23, Issue 3, pp. 1393–1400, August 2008.
- [62] O.F. Fajardo, A. Vargas: Reconfiguration of MV distribution networks with multicost and multipoint alternative supply, Part II: Reconfiguration plan; *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume 23, Issue 3, pp. 1401–1407, August 2008.
- [63] E. López, H. Opazo, L. García, P. Bastard: Online reconfiguration considering variability demand: Applications to Real Networks; *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume 19, Issue 1, pp. 549–553, February 2004.
- [64] R.P. Broadwater, A.H. Khan, H.E. Shaalan, R.E. Lee: Time varying load analysis to reduce distribution losses through reconfiguration; *IEEE Transactions on Power Delivery*, Volume 8, Issue 1, pp. 294–300, January 1993.
- [65] C.S. Chen, M.Y. Cho: Determination of critical switches in distribution system; *IEEE Transactions on Power Delivery*, Volume 7, Issue 3, pp. 1443–1449, July 1992.
- [66] C.S. Chen, M.Y. Cho: Energy loss reduction by critical switches; *IEEE Transactions on Power Delivery*, Volume 8, Issue 3, pp. 1246–1253, July 1993.
- [67] R. Taleski, D. Rajicic: Distribution network reconfiguration for energy loss reduction; *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume 12, Issue 1, pp. 398–406, February 1997.
- [68] Q. Zhou, D. Shirmohammadi, W.H.E. Liu: Distribution feeder reconfiguration for operation cost reduction; *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume 12, Issue 2, pp. 730–735, May 1997.
- [69] E.A. Bueno, C. Lyra, C. Cavellucci: Distribution network reconfiguration for loss reduction with variable demands; *Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America*, 2004 IEEE/PES
- [70] A. E. Milani, M. R. Haghifam: A new probabilistic approach for distribution network reconfiguration: Applicability to real networks; *Mathematical and Computer Modelling*, Volume 57, Issues 1–2, pp. 169–179, January 2013.

- [71] S.A. Yin, C.N. Lu: Distribution feeder scheduling considering variable load profile and outage costs; *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume 24, Issue 2, pp. 652–660, May 2009.
- [72] M.H. Shariatkah, M.R. Haghifam, J. Salehi, A. Moser: Duration based reconfiguration of electric distribution networks using dynamic programming and harmony search algorithm; *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 41, Issue 1, pp. 1–10, October 2012.
- [73] A. Zidan, E.F. El-Saadany: Distribution system reconfiguration for energy loss reduction considering the variability of load and local renewable generation; *Energy*, Volume 59, pp. 698–707, September 2013.
- [74] I. Coroamă, G. Chicco, M. Gavrilaş, A. Russo: Distribution system optimisation with intra-day network reconfiguration and demand reduction procurement; *Electric Power Systems Research*, Volume 98, pp. 29–38, May 2013.
- [75] A.E. Milani, M.R. Haghifam: An evolutionary approach for optimal time interval determination in distribution network reconfiguration under variable load; *Mathematical and Computer Modeling*, Volume 57, Issues 1–2, pp. 68–77, January 2013.
- [76] A. Mazza, G. Chicco, H. Andrei, M. Rubino: Determination of the relevant periods for intraday distribution system minimum loss reconfiguration; *International Transactions on Electrical Energy Systems*, Volume 25, Issue 10, pp. 1992–2023, October 2015.
- [77] S. Golshannavaz, S. Afsharnia, F. Aminifar: Smart distribution grid: Optimal day-ahead scheduling with reconfigurable topology; *IEEE Transactions on Smart Grid*, Volume 5, Issue 5, pp. 2402–2411, September 2014.
- [78] Z. Li, X. Chen, K. Yu, B. Zhao, H. Liu: A novel approach for dynamic reconfiguration of the distribution network via multi-agent system; *Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, pp. 1305–1311, 2008.
- [79] X. Fang, Z. Cai, Z. Guo: Dynamic network reconfiguration using time interval based strategy and improved moment method; *Power Engineering Society General Meeting IEEE*, January 2005.
- [80] X. Meng, L. Zhang, P. Cong, W. Tang, X. Zhang, D. Yang: Dynamic reconfiguration of distribution network considering scheduling of DG active power outputs; *International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, October 2014.
- [81] M.R. Garey, D.S. Johnson: *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP Completeness*; W.H. Freeman and Company, 1979.
- [82] A.J. Conejo, E. Castillo, R. Minguez, R. Garcia-Bertrand: *Decomposition Techniques in Mathematical Programming - Engineering and Science Applications*; Springer, 2006.
- [83] N.V. Kovački, P.M. Vidović, A.T. Sarić: Scalable algorithm for the dynamic reconfiguration of the distribution network using the Lagrange relaxation approach; *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 94, pp. 188–202, January 2018.

- [84] V.D. Krsman, A.T. Sarić, N.V. Kovački: Including of branch resistances in linear power transmission distribution factors for fast contingency analysis; *International Transactions on Electrical Energy Systems*, Volume 22, Issue 7, pp. 961–975, October 2012.
- [85] S. Rahman, R. Bhatnagar: An expert system based algorithm for short term load forecast; *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume 3, Issue 2, pp. 392–399, May 1988.
- [86] H.S. Hippert, C.E. Pedreira, R.C. Souza: Neural networks for short-term load forecasting: a review and evaluation; *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume 16, Issue 1, pp. 44–55, February 2001.
- [87] A. Costa, A. Crespo, J. Navarro, G. Lizcano, H. Madsen, E. Feitosa: A review on the young history of the wind power short-term prediction; *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 12, Issue 6, pp. 1725–1744, August 2008.
- [88] R. Blonbou: Very short-term wind power forecasting with neural networks and adaptive Bayesian learning; *Renewable Energy*, Volume 36, Issue 3, pp. 1118–1124, March 2011.
- [89] C. Chen, S. Duan, T. Cai, B. Liu: Online 24-h solar power forecasting based on weather type classification using artificial neural network; *Solar Energy*, Volume 85, Issue 11, pp. 2856–2870, November 2011.
- [90] G.G. Brown, R.F. Dell: Formulating integer linear programs: A rogues’ gallery; *INFORMS Transactions on Education*, Volume 7, Issue 2, pp. 153–159, 2007.
- [91] A. Abraham, A.E. Hassanien, P. Siarry, A. Engelbrecht: *Foundations of Computational Intelligence Volume 3: Global Optimization*; Springer 2010.
- [92] D. Li, X. Sun: *Nonlinear Integer Programming*; Springer 2006.
- [93] M. S. Bazaraa, C. M. Shetty: *Nonlinear Programming – Theory and Algorithms*; John Wiley & Sons, Inc, 1979.
- [94] J.F. Shapiro: A survey of Lagrangean techniques for discrete optimization; *Annals of Discrete Mathematics*, Volume 5, pp. 113–138, 1979.
- [95] M.L. Fisher: The Lagrangian relaxation method for solving integer programming problems; *Management Science*, Volume 27, Issue 1, pp. 1–18, January 1981.
- [96] J.A. Muckstadt, S.A. Koenig: An application of Lagrangian relaxation to scheduling in power generation systems; *Operation Research*, Volume 25, Issue 3, pp. 387–403, May/June 1977.
- [97] F. Zhuang, F.D. Galiana: Towards a more rigorous and practical unit commitment by Lagrangian relaxation; *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume 3, Issue 2, May 1988.
- [98] N.J. Redondo, A.J. Conejo: Short-term hydro-thermal coordination by Lagrangian Relaxation: Solution of the dual problem; *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume 14, Issue 1, pp. 89–95, February 1999.
- [99] A. Borghetti, A. Frangioni, F. Lacalandra, C.A. Nucci: Lagrangian heuristics based on disaggregated bundle methods for hydrothermal unit commitment; *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume 18, Issue 1, pp. 313–323, February 2003.

- [100] A. Frangioni, G. Gallo: A bundle type dual-ascent approach to linear multicommodity min-cost flow problems; *Informs Journal on Computing*, Volume 11, Issue 4, pp. 370–393, November 1999.
- [101] S. Feltenmark, K.C. Kiwiel: Dual applications of proximal bundle methods, including Lagrangian relaxation of nonconvex problems; *SIAM Journal on Optimization*, Volume 10, Issue 3, pp. 697–721, 2000.
- [102] A. Ben-Tal, L. El Ghaoui, A. Nemirovski: *Robust Optimization*; Princeton University Press, Princeton and Oxford, 2009.
- [103] R. Fourer, D.M. Gay, B.W. Kernighan: *AMPL: A Modeling Language for Mathematical Programming, Second Edition*; Thomson/Brooks/Cole, 2003
- [104] J. Kallrath: *Modeling Languages in Mathematical Optimization*; Springer Science & Business Media, 2013
- [105] <https://neos-server.org/neos/>
- [106] R.H. Byrd, J. Nocedal, R.A. Waltz: Knitro: An integrated package for nonlinear optimization; *Large-Scale Nonlinear Optimization*, Springer, 2006.
- [107] <https://neos-server.org/neos/solvers/minco:Knitro/AMPL.html>

Prilog 1 - Rešavanje problema operativnog planiranja rekonfiguracije distributivnih mreža primenom programskog jezika AMPL

Problemi matematičke optimizacije u praktičnim primenama najčešće se rešavaju korišćenjem specijalizovanih programskih paketa. Pre poziva određenog programskog paketa potrebno je izvršiti specifikaciju konkretnog problema koji se rešava, a koja obuhvata:

- 1) Definisane matematičkog modela datog problema, tj. definisanje promenljivih odlučivanja, parametara matematičkog modela, funkcije cilja i ograničenja;
- 2) Proračun podataka, odnosno parametara matematičkog modela koji odgovaraju konkretnom problemu koji se rešava i
- 3) Formiranje funkcije cilja i ograničenja za konkretan problem koji se rešava.

Programski jezik AMPL (eng. *A Mathematical Programming Language*) je razvijen osamdesetih godina prošlog veka sa ciljem da olakša izvršenje navedenih zadataka [103]. Upotreba AMPL-a kombinuje deklarativni i imperativni stil programiranja. Naime, AMPL obuhvata deklarativni programski jezik koji služi za specifikaciju problema matematičke optimizacije. Problemi matematičkog programiranja specificirani pomoću AMPL-a mogu se koristiti kao ulaz za veliki broj programskih paketa, među kojima su CPLEX, KNITRO itd. Pored toga, AMPL obuhvata i imperativni programski jezik koji sadrži komande za obradu i prikaz rezultata proračunatih u određenom programskom, kao i za razvoj složenijih algoritama koji uključuju rešavanje problema matematičke optimizacije.

Velika prednosti AMPL-a u odnosu na slične programske jezike (na primer, GAMS) je u jednostavnosti njegove sintakse, koja je bliska algebarskoj notaciji koja se široko koristi u matematičkom programiranju [103, 104]. Pored toga, AMPL omogućuje specifikaciju široke klase problema matematičke optimizacije, kao što su: linearno programiranje, kvadratno programiranje, nelinearno programiranje, mešovito-celobrojno programiranje itd.

U ovom prilogu opisana je implementacija opšteg optimizacionog modela za operativno planiranje rekonfiguracije distributivnih mreža opisanog u poglavlju 2.1 ove doktorske disertacije u AMPL-u. Implementacija navedenog optimizacionog modela realizovana je u sledeće tri datoteke:

- 1) Datoteka *Opsti.mod* koja sadrži opis optimizacionog modela koji se rešava, tj. promenljive i parametre koji figurišu u optimizacionom modelu, funkciju cilja i ograničenja,
- 2) Datoteka *Opsti.dat* koja sadrži vrednosti parametara koje odgovaraju konkretnom problemu koji se rešava, a koji su prethodno specificirani u datoteci *Opsti.mod* i
- 3) Datoteka *Opsti.run* koja sadrži komande za izvršenje optimizacionog problema i ispis rezultata.

Navedene datoteke su date na kraju ovog priloga, a u daljem tekstu je opisana njihova realizacija. Optimizacioni model specificiran navedenim datotekama može se rešavati

koristeći NEOS server [105]. NEOS server predstavlja besplatan internet servis za rešavanje problema matematičke optimizacije koji omogućuje korišćenje više od 60 programskih paketa. Statistika pokazuje da je AMPL najčešće korišćeni format u kome se zadaju optimizacioni problemi na NEOS serveru [105]. Optimizacioni model koji se razmatra u ovom prilogu može se rešavati pomoću programskog KNITRO koji podržava rešavanje mešovito-celobrojnih nelinearnih optimizacionih problema [106]. KNITRO je jedan od programskih paketa koji su dostupani na NEOS serveru [107].

U cilju jednostavnije implementacije opšteg optimizacionog modela u AMPL-u, u njemu su napravljene dve modifikacije. Prva modifikacija odnosi se na predstavljanje fazora napona u čvorovima distributivne mreže. Naime, u poglavlju 2.1 ove doktorske disertacije fazori napona predstavljeni su pomoću modula i faznog stava V_i^h i θ_i^h . Zbog tog razloga, izrazi za tokove snaga P_{ij}^h i Q_{ij}^h (relacije (2)) sadrže trigonometrijske funkcije. Međutim, većina programskih paketa za rešavanje problema nelinearnog programiranja dostupnih na NEOS serveru ne podržava definisanje ograničenja koja sadrže trigonometrijske funkcije. Zbog toga, u ovom prilogu su fazori napona u čvorovima distributivne mreže predstavljeni realnim i imaginarnim delom ($V_{R,i}^h$ i $V_{I,i}^h$ respektivno) na sledeći način:

$$\hat{V}_i^h = V_i^h e^{j\theta_i^h} = V_{R,i}^h + jV_{I,i}^h. \quad (P1.1)$$

Primenom navedene modifikacije izrazi za tokove snaga P_{ij}^h i Q_{ij}^h postaju kvadratne funkcije u sledećoj formi:

$$P_{ij}^h = x_l^h \{G_l [(V_{R,i}^h)^2 + (V_{I,i}^h)^2 - V_{R,i}^h V_{R,j}^h - V_{I,i}^h V_{I,j}^h] + B_l [V_{R,i}^h V_{I,j}^h - V_{I,i}^h V_{R,j}^h]\}; \quad (P1.2a)$$

$$Q_{ij}^h = x_l^h \{G_l [V_{R,i}^h V_{I,j}^h - V_{I,i}^h V_{R,j}^h] - B_l [(V_{R,i}^h)^2 + (V_{I,i}^h)^2 - V_{R,i}^h V_{R,j}^h - V_{I,i}^h V_{I,j}^h]\}; \quad (P1.2b)$$

Druga modifikacija odnosi se na implementaciju bilansnih jednačina (3). Naime, u jednačinama (2) i (3) podrazumeva se da su i i j respektivno prvi i drugi čvor grane l . Kako bi se olakšala implementacija navedenih relacija u AMPL-u, uvedene su matrice incidencije M_1 i M_2 čiji su elementi ($M_1[i, l]$ i $M_2[i, l]$) definisani na sledeći način, respektivno:

$$M_1[i, l] = \begin{cases} 1 & \text{– Ako je } i \text{ prvi čvor grane } l; \\ 0 & \text{– Ako } i \text{ nije prvi čvor grane } l, \end{cases} \quad (P1.3a)$$

$$M_2[i, l] = \begin{cases} 1 & \text{– Ako je } i \text{ drugi čvor grane } l; \\ 0 & \text{– Ako } i \text{ nije drugi čvor grane } l. \end{cases} \quad (P1.3b)$$

Pomoću opisanih matrica incidencije bilansne jednačine (3) za čvor i se mogu zapisati na sledeći način:

$$P_{G,i}^h - P_{L,i}^h - \left[\sum_{l=1}^{N_l} M_1[i, l] P_{ij}^h - \sum_{l=1}^{N_l} M_2[i, l] P_{ji}^h \right] = 0; \quad (P1.4a)$$

$$Q_{G,i}^h - Q_{L,i}^h - \left[\sum_{l=1}^{N_l} M_1[i, l] Q_{ij}^h + \sum_{l=1}^{N_l} M_2[i, l] Q_{ji}^h \right] = 0, \quad (P1.4b)$$

gde su sa i i j označeni redom prvi i drugi čvor grane l .

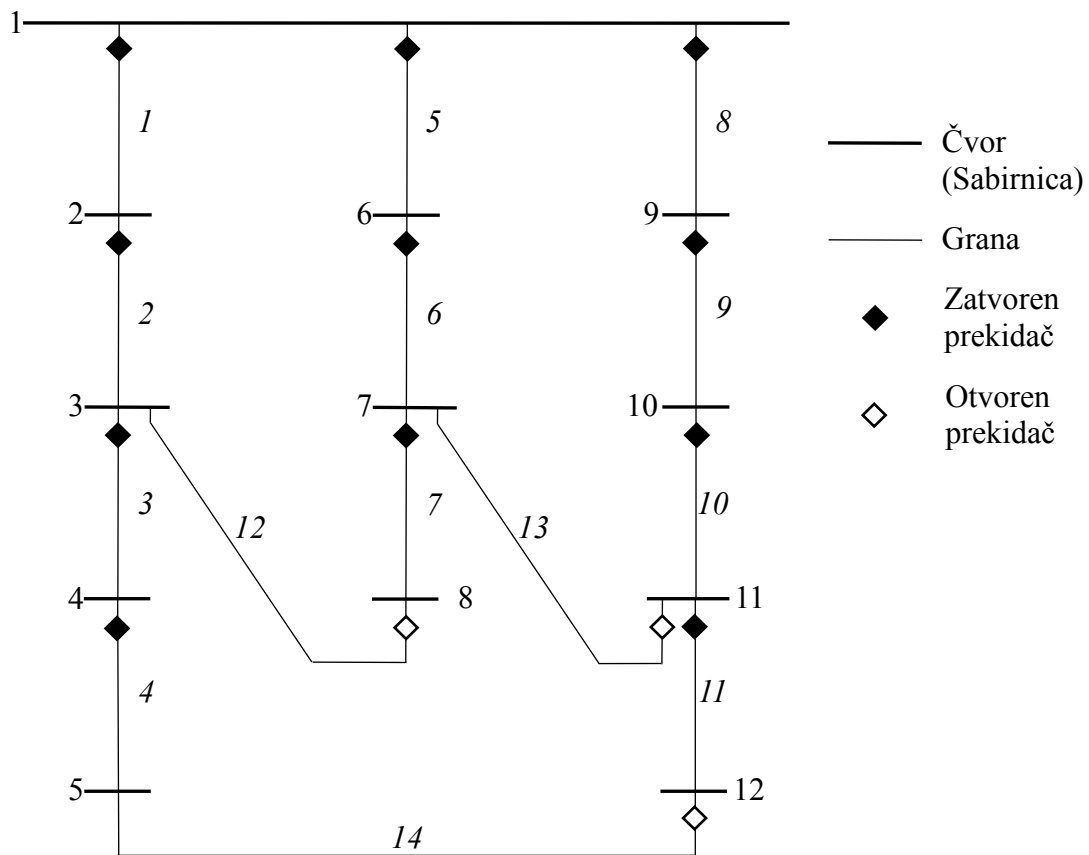
U datoteci *Opsti.mod* najpre su navedeni parametri koji se koriste u optimizacionom modelu. Specifikacija parametra vrši se pomoću službene reči *param*. Na ovom mestu treba primetiti da su u AMPL-u znakom # označeni korisnički komentari. Radi jednostavnosti, pretpostavlja se da su minimalni i dozvoljeni napon (V_i^{\min}, V_i^{\max}) isti za sve čvorove u razmatranoj distributivnoj mreži i predstavljeni su parametrima *Umin* i *Umax*. Takođe, pretpostavlja se da je maksimalna dozvoljena snaga (S_l^{\max}) ista za sve grane i predstavljena je parametrom *Smax*. AMPL omogućuje specifikaciju i niza parametara, kao što su *Node1[l]* i *Node2[l]*, koji predstavljaju redom prvi i drugi čvor svake od grana u razmatranoj distributivnoj mreži. Takođe, mogu se specificirati i dvodimenzioni nizovi parametara, kao što su *M1[n,l]* i *M2[n,l]*, kojima su predstavljene matrice incidencije \mathbf{M}_1 i \mathbf{M}_2 .

Nakon parametara, u datoteci *Opsti.mod* opisane su promenljive koje figurišu u optimizacionom modelu. Promenljive su definisane pomoću službene reči *var*, pri čemu se na kraju definicije binarnih promenljivih navodi službena reč *binary*. Kao i u slučaju parametara, moguće je definisati jednodimenzione i dvodimenzione vektore promenljivih. Na primer, promenljive x_l^h i y_l^h iz opšteg optimizacionog modela predstavljene su dvodimenzionim vektorima $x[l,h]$ i $y[l,h]$. Vektorom *P12[l,h]* predstavljeni su tokovi aktivnih snaga u grani l u smeru od prvog čvora ka drugom (P_{ij}^h), dok vektor *P21[l,h]* predstavlja tokove aktivnih snaga u grani l u smeru od drugog čvora ka prvom (P_{ji}^h). Analogno, tokovi reaktivnih snaga u granama distributivne mreže predstavljeni su vektorima *Q12[l,h]* i *Q21[l,h]*.

Funkcija cilja u datoteci *Opsti.mod* definisana je pomoću službene reči *minimize*. S druge strane, ograničenja su definisana pomoću službenih reči *subject to*, nakon kojih se zadaje ime ograničenje i skup indeksa elemenata na koje se dato ograničenje odnosi. Na primer, relacije za tokove aktivnih snaga (P1.2a) modelovane su ograničenjima čiji su nazivi *Tokovi_Aktivnih_Snaga_12* i *Tokovi_Aktivnih_Snaga_21*, dok su bilansne jednačine (P1.4a) modelovane ograničenjima čije je naziv *Bilans_Aktivnih_Snaga*.

U datoteci *Opsti.dat* date su vrednosti parametara koji su specificirani u datoteci *Opsti.mod*. Za proračun je odabrana mala test mreža koja je opisana u poglavlju 5.1. Radi jednostavnosti, mala test mreža je modifikovana, kako je prikazano na slici P1.1. Modifikovana mala test mreža sastoji se od 12 čvorova koji su indeksirani brojevima od 1 do 12. Sve grane modifikovane male test mreže sadrže prekidače, kao što je i pretpostavljeno u poglavlju 2.1. Potrošnje aktivne i reaktivne snage uzete su sa dnevnog dijagrama potrošnje prikazanog u poglavlju 5.1 i predstavljene su parametrima *Pload[n,h]* i *Qload[n,h]*. Radi uštede prostora, podaci o potrošnji dati su za prvih 7 sati razmatranog vremenskog perioda. Prema tome, broj analiziranih vremenskih intervala u predstavljenom optimizacionom modelu je $N_H = 7$ (parametar *nInt* u datoteci *Opsti.dat*).

U datoteci *Opsti.dat* date su komande za ispis optimalne vrednosti gubitaka aktivnih snaga i optimalne vrednosti promenljivih odlučivanja. Naredba za ispis zadaje se pomoću službene reči *display*.



Slika P1.1 – Modifikovana mala test mreža koja je opisana u datoteci *Opsti.dat*

```
##### Datoteka Opsti.mod #####

# Operativno planiranje rekonfiguracije distributivne mreze:
# Opsti optimizacioni model

### Parametri ###

# Broj cvorova u distributivnoj mrezi
param nNodes;

# Broj grana u distributivnoj mrezi
param nLines;

# Broj razmatranih vremenskih intervala
param nInt;

# Dozvoljeni broj prekidačkih akcija
param nSwMax;
```

```

# Konduktansa grane
param G;

# Susceptansa grane
param B;

# Maksimalna snaga grane
param Smax;

# Minimalni dozvoljeni napon
param Umin;

# Maksimalni dozvoljeni napon
param Umax;

# Indeks prvog cvora grane l
param Node1{l in 1..nLines};

# Indeks drugog cvora grane l
param Node2{l in 1..nLines};

# Matrica incidencije M1:
# Ako je n prvi cvor grane l, onda je M1[n,l] = 1,
# u protivnom M1[n,l] = 0
param M1{n in 1..nNodes, l in 1..nLines};

# Matrica incidencije M2:
# Ako je n drugi cvor grane l, onda je M2[n,l] = 1,
# u protivnom M2[n,l] = 0
param M2{n in 1..nNodes, l in 1..nLines};

# Potrošnja aktivne snage cvora n u intervalu h
param PLoad{n in 1..nNodes, h in 1..nInt};

# Potrošnja reaktivne snage cvora n u intervalu h
param QLoad{n in 1..nNodes, h in 1..nInt};

# Inicijalni status (otvoren/zatvoren) grane l
param x0{l in 1..nLines};

### Promenljive ###

# Status (otvoren/zatvoren) grane l u intervalu h
var x{l in 1..nLines, h in 0..nInt} binary;

# Indikator da li grana l u intervalu h menja status
var y{l in 1..nLines, h in 1..nInt} binary;

# Realni deo fazora napona u cvoru n u intervalu h

```

```

var Vr{n in 1..nNodes, h in 1..nInt};

# Imaginarni deo fazora napona u cvoru n u intervalu h
var Vi{n in 1..nNodes, h in 1..nInt};

# Tokovi aktivnih snaga po granama - od prvog cvora ka drugom
var P12{l in 1..nLines, h in 1..nInt};

# Tokovi aktivnih snaga po granama - od drugog cvora ka prvom
var P21{l in 1..nLines, h in 1..nInt};

# Tokovi reaktivnih snaga po granama - od prvog cvora ka drugom
var Q12{l in 1..nLines, h in 1..nInt};

# Tokovi reaktivnih snaga po granama - od drugog cvora ka prvom
var Q21{l in 1..nLines, h in 1..nInt};

### Funkcija cilja ###

minimize GubiciAktivneSnage: sum{l in 1..nLines, h in 1..nInt}
(P12[l,h] + P21[l,h]);

### Ogranicenja ###

# Izrazi za tokove aktivnih snaga P12
subject to Tokovi_Aktivnih_Snaga_12{l in 1..nLines, h in 1..nInt}:
P12[l,h] = x[l,h] * (G * (Vr[Node1[l],h] * Vr[Node1[l],h] +
Vi[Node1[l],h] * Vi[Node1[l],h] - Vr[Node1[l],h] * Vr[Node2[l],h] -
Vi[Node1[l],h] * Vi[Node2[l],h]) + B * (Vr[Node1[l],h] *
Vi[Node2[l],h] - Vi[Node1[l],h] * Vr[Node2[l],h]));

# Izrazi za tokove aktivnih snaga P21
subject to Tokovi_Aktivnih_Snaga_21{l in 1..nLines, h in 1..nInt}:
P21[l,h] = x[l,h] * (G * (Vr[Node2[l],h] * Vr[Node2[l],h] +
Vi[Node2[l],h] * Vi[Node2[l],h] - Vr[Node2[l],h] * Vr[Node1[l],h] -
Vi[Node2[l],h] * Vi[Node1[l],h]) + B * (Vr[Node2[l],h] *
Vi[Node1[l],h] - Vi[Node2[l],h] * Vr[Node1[l],h]));

# Izrazi za tokove reaktivnih snaga Q12
subject to Tokovi_Reaktivnih_Snaga_12{l in 1..nLines, h in 1..nInt}:
Q12[l,h] = x[l,h] * (-B * (Vr[Node1[l],h] * Vr[Node1[l],h] +
Vi[Node1[l],h] * Vi[Node1[l],h] - Vr[Node1[l],h] * Vr[Node2[l],h] -
Vi[Node1[l],h] * Vi[Node2[l],h]) + G * (Vr[Node1[l],h] *
Vi[Node2[l],h] - Vi[Node1[l],h] * Vr[Node2[l],h]));

# Izrazi za tokove reaktivnih snaga Q21
subject to Tokovi_Reaktivnih_Snaga_21{l in 1..nLines, h in 1..nInt}:
Q21[l,h] = x[l,h] * (-B * (Vr[Node2[l],h] * Vr[Node2[l],h] +
Vi[Node2[l],h] * Vi[Node2[l],h] - Vr[Node2[l],h] * Vr[Node1[l],h] -

```

```

Vi[Node2[l],h] * Vi[Node1[l],h) + G * (Vr[Node2[l],h] *
Vi[Node1[l],h] - Vi[Node2[l],h] * Vr[Node1[l],h]));

# Bilans aktivnih snaga u cvorovima distributivne mreze
subject to Bilans_Aktivnih_Snaga{n in 2..nNodes, h in 1..nInt}:
sum{l in 1..nLines} (M1[n,l]*P12[l,h] + M2[n,l]*P21[l,h]) = -
PLoad[n,h];

# Bilans reaktivnih snaga u cvorovima distributivne mreze
subject to Bilans_Reaktivnih_Snaga{n in 2..nNodes, h in 1..nInt}:
sum{l in 1..nLines} (M1[n,l]*Q12[l,h] + M2[n,l]*Q21[l,h]) = -
QLoad[n,h];

# Zadate vrednosti napona u napojnom (balansnom) cvoru
subject to Napon_Napojnog_Cvora_Realni_Deo{h in 1..nInt}: Vr[1,h] =
1;
subject to Napon_Napojnog_Cvora_Imaginarni_Deo{h in 1..nInt}:
Vi[1,h] = 0;

# Ogranicenja modula napona u cvorovima distributivne mreze
subject to Ogranicenje_Modula_Napona{n in 1..nNodes, h in 1..nInt}:
Umin * Umin <= Vr[n,h] * Vr[n,h] + Vi[n,h] * Vi[n,h] <= Umax * Umax;

# Ogranicenja tokova snaga u granama distributivne mreze
subject to Ogranicenje_Tokova_Snaga_1{l in 1..nLines, h in 1..nInt}:
P12[l,h] * P12[l,h] + Q12[l,h] * Q12[l,h] <= Smax * Smax;

subject to Ogranicenje_Tokova_Snaga_2{l in 1..nLines, h in 1..nInt}:
P21[l,h] * P21[l,h] + Q21[l,h] * Q21[l,h] <= Smax * Smax;

# Radijalna konfiguracija distributivne mreze u svakom intervalu
subject to Radijalna_Konfiguracija{h in 1..nInt}: sum{l in
1..nLines} x[l,h] <= nNodes - 1;

# Nejednakosti kojima su povezane promenljive x i y

subject to XY1{l in 1..nLines, h in 1..nInt}: y[l,h] <= x[l,h] +
x[l,h-1];

subject to XY2{l in 1..nLines, h in 1..nInt}: y[l,h] >= x[l,h-1] -
x[l,h];

subject to XY3{l in 1..nLines, h in 1..nInt}: y[l,h] >= x[l,h] -
x[l,h-1];

subject to XY4{l in 1..nLines, h in 1..nInt}: y[l,h] + x[l,h] +
x[l,h-1] <= 2;

#Specifikacija inicijalne konfiguracije distributivne mreze
(interval h=0)

```

```

subject to Inicijalna_Konfiguracija{l in 1..nLines}: x[l,0] = x0[l];

# Ogranicenja za maksimalni dozvoljeni broj prekidackih akcija
subject to Dozvoljeni_Broj_Prekidackih_Akcija{l in 1..nLines}: sum{h
in 1..nInt} y[l,h] <= nSwMax;

##### Datoteka Opsti.dat #####

# Operativno planiranje rekonfiguracije distributivne mreze -
parametri optimizacionog modela

# Broj cvorova
param nNodes:= 12;

# Broj grana
param nLines:= 14;

# Broj razmatranih vremenskih intervala
param nInt:= 7;

# Broj dozvoljenih prekidačkih akcija
param nSwMax:= 1;

# Konduktansa grane
param G:= 1069.5066;

# Susceptansa grane
param B:= -520.4295;

# Nominalna snaga grane
param Smax:= 100;

# Minimalni dozvoljeni napon
param Umin:= 0.8;

# Maksimalni dozvoljeni napon
param Umax:= 1.15;

# Indeks prvog cvora
param Node1:= 1 1
              2 2
              3 3
              4 4
              5 1
              6 6
              7 7
              8 1
              9 9
              10 10
              11 11

```

```
12 3
13 7
14 12;
```

```
# Indeks drugog cvora
```

```
param Node2:= 1 2
               2 3
               3 4
               4 5
               5 6
               6 7
               7 8
               8 9
               9 10
               10 11
               11 12
               12 8
               13 11
               14 5;
```

```
# Matrica incidencije M1
```

```
param M1: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14:=
1         1 0 0 0 1 0 0 1 0 0 0 0 0 0
2         0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
3         0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0
4         0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
5         0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
6         0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0
7         0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 1 0
8         0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
9         0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0
10        0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0
11        0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0
12        0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1;
```

```
# Matrica incidencije M2
```

```
param M2: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14:=
1         0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
2         1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
3         0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
4         0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
5         0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1
6         0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0
7         0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0
8         0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 1 0 0
9         0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0
10        0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0
11        0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 1 0
12        0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0;
```


Potrošnja aktivne snage u cvorovima distributivne mreže

```
param PLoad: 1      2      3      4      5      6      7:=
1      0      0      0      0      0      0      0
2      6.67  6.22  5.44  4.44  4.22  5.11  6.44
3      6.67  6.22  5.44  4.44  4.22  5.11  6.44
4      6.67  6.22  5.44  4.44  4.22  5.11  6.44
5      6.67  6.22  5.44  4.44  4.22  5.11  6.44
6      3.34  3.11  2.72  2.22  2.11  2.55  3.22
7      3.34  3.11  2.72  2.22  2.11  2.55  3.22
8      3.34  3.11  2.72  2.22  2.11  2.55  3.22
9      2.21  2.21  2.21  2.21  2.21  2.21  10.0
10     2.21  2.21  2.21  2.21  2.21  2.21  10.0
11     2.21  2.21  2.21  2.21  2.21  2.21  10.0
12     2.21  2.21  2.21  2.21  2.21  2.21  10.0;
```

Potrošnja reaktivne snage u cvorovima distributivne mreže

```
param QLoad: 1      2      3      4      5      6      7:=
1      0      0      0      0      0      0      0
2      1.334  1.244  1.088  0.888  0.844  1.022  1.288
3      1.334  1.244  1.088  0.888  0.844  1.022  1.288
4      1.334  1.244  1.088  0.888  0.844  1.022  1.288
5      1.334  1.244  1.088  0.888  0.844  1.022  1.288
6      0.668  0.622  0.544  0.444  0.422  0.510  0.644
7      0.668  0.622  0.544  0.444  0.422  0.510  0.644
8      0.668  0.622  0.544  0.444  0.422  0.510  0.644
9      0.442  0.442  0.442  0.442  0.442  0.442  2.000
10     0.442  0.442  0.442  0.442  0.442  0.442  2.000
11     0.442  0.442  0.442  0.442  0.442  0.442  2.000
12     0.442  0.442  0.442  0.442  0.442  0.442  2.000;
```

Inicijalni status (otvoren/zatvoren) grana

```
param x0:= 1 1
           2 1
           3 1
           4 1
           5 1
           6 1
           7 1
           8 1
           9 1
          10 1
          11 1
          12 0
          13 0
          14 0;
```

Datoteka Opsti.run

Operativno planiranje rekonfiguracije distributivne mreže
Komande za resavanje optimizacionog modela i ispis rezultata

```
#Resavanje optimizacionog problema  
solve;  
  
# Ispis optimalnog resenja  
display GubiciAktivneSnage;  
  
# Ispis optimalnih vrednosti promenljivih  
display x;  
display y;  
display P12;  
display P21;  
display Q12;  
display Q21;
```

Prilog 2 – Transformacija Lagranžove funkcije

Lagranžova funkcija (relacija (72)) transformiše se na sledeći način:

$$\begin{aligned}
 L(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{w}, \mathbf{P}, \mathbf{Q}, \boldsymbol{\lambda}) &= \sum_{h=1}^{N_H} P_{Loss}^h + \sum_{s=1}^{N_{SW}} \sum_{h=1}^{N_H} \sum_{k=1}^4 \lambda_{sk}^h (A_{k1} x_s^h + A_{k2} x_s^{h-1} + A_{k3} y_s^h + A_{k4}) \\
 &+ \sum_{s=1}^{N_{SW}} \lambda_s \left(\sum_{h=1}^{N_H} y_s^h - N_{SW}^{MAX} \right) = \\
 &= \sum_{h=1}^{N_H} P_{Loss}^h + \sum_{h=1}^{N_H} \sum_{s=1}^{N_{SW}} \sum_{k=1}^4 \lambda_{sk}^h A_{k1} x_s^h + \sum_{h=0}^{(N_H-1)} \sum_{s=1}^{N_{SW}} \sum_{k=1}^4 \lambda_{sk}^{h+1} A_{k2} x_s^h + \sum_{h=1}^{N_H} \sum_{s=1}^{N_{SW}} \sum_{k=1}^4 \lambda_{sk}^h A_{k3} y_s^h \\
 &+ \sum_{h=1}^{N_H} \sum_{s=1}^{N_{SW}} \sum_{k=1}^4 \lambda_{sk}^h A_{k4} + \sum_{h=1}^{N_H} \sum_{s=1}^{N_{SW}} \lambda_s y_s^h - N_{SW}^{MAX} \sum_{s=1}^{N_{SW}} \lambda_s = \\
 &= \sum_{h=1}^{N_H} \left[P_{Loss}^h + \sum_{s=1}^{N_{SW}} x_s^h \sum_{k=1}^4 \lambda_{sk}^h A_{k1} + \sum_{s=1}^{N_{SW}} x_s^h \sum_{k=1}^4 \lambda_{sk}^{h+1} A_{k2} + \sum_{s=1}^{N_{SW}} y_s^h \sum_{k=1}^4 \lambda_{sk}^h A_{k3} + \sum_{s=1}^{N_{SW}} \lambda_s y_s^h \right] + \\
 &+ \left(\sum_{s=1}^{N_{SW}} \sum_{k=1}^4 \lambda_{sk}^1 A_{k2} x_s^0 + \sum_{h=1}^{N_H} \sum_{s=1}^{N_{SW}} \sum_{k=1}^4 \lambda_{sk}^h A_{k4} - N_{SW}^{MAX} \sum_{s=1}^{N_{SW}} \lambda_s \right) = \\
 &= \sum_{h=1}^{N_H} \left[P_{Loss}^h + \sum_{s=1}^{N_{SW}} x_s^h \left(\sum_{k=1}^4 \lambda_{sk}^h A_{k1} + \sum_{k=1}^4 \lambda_{sk}^{h+1} A_{k2} \right) + \sum_{s=1}^{N_{SW}} y_s^h \left(\sum_{k=1}^4 \lambda_{sk}^h A_{k3} + \lambda_s \right) \right] + \\
 &+ \left(\sum_{s=1}^{N_{SW}} \sum_{k=1}^4 \lambda_{sk}^1 A_{k2} x_s^0 + \sum_{h=1}^{N_H} \sum_{s=1}^{N_{SW}} \sum_{k=1}^4 \lambda_{sk}^h A_{k4} - N_{SW}^{MAX} \sum_{s=1}^{N_{SW}} \lambda_s \right).
 \end{aligned}$$