



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ  
ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА У  
НОВОМ САДУ



Томислав Ковач

**Робустан метод за тополошку анализу  
графа уравнотежених и  
неуравнотежених  
електродистрибутивних мрежа**

**ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА**

Нови Сад, 2021

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА<sup>1</sup>

Врста рада:	Докторска дисертација
Име и презиме аутора:	Томислав Ковач
Ментор (титула, име, презиме, звање, институција)	др Срђан Вукмировић, ванредни професор, Факултет техничких наука
Наслов рада:	Робустан метод за тополошку анализу графа уравнотежених и неуравнотежених електродистрибутивних мрежа
Језик публикације (писмо):	Српски (латиница)
Физички опис рада:	Унети број: Страница 129 Поглавља 9 Референци 54 Табела 21 Слика 59 Графикона 0 Прилога 0
Научна област:	Електротехничко и рачунарско инжењерство
Ужа научна област (научна дисциплина):	Примењено софтверско инжењерство
Кључне речи / предметна одредница:	Електродистрибутивна мрежа, матрица повезаности, претрага графа по ширини, техника ретких матрица, тополошка анализа
Резиме на језику рада:	<p>Потреба да се минимализује време отказа услуге дистрибуције електричне енергије мотивисала је чешћу употребу композитне прекидачке и привремене опреме у електродистрибутивној мрежи. То је довело до појаве комплекснијих тополошких случајева које су постојећа решења за тополошку анализу имали потешкоће да процесирају. У овом раду предложено је једно свеобухватно решење за тополошку анализу уравнотежених и неуравнотежених електродистрибутивних мрежа. У основи решења је тополошки модел који представља математичку апстракцију електродистрибутивне мреже у виду графа, где су сви релеванти физички уређаји директно моделовани користећи чворове и гране. Граф је меморисан помоћу матричне структуре која дефинише повезаност чворова појединачним фазама, моделујућу поред статичке конективности и динамичке податке као што су тренутно стање прекидачке опреме и присутност привремене опреме. Тако унапред припремљени подаци омогућавају ефикасну тополошку анализу која врши претрагу графа по ширини. Резултат тополошке анализе је широки скуп тополошких информација (формирање острва, слојевите структуре мреже, стања енергизације, активне фазности, итд.) које се могу директно применити на физичку опрему. Предложено решење верификовано је на различитим примерима стварних и тестних електродистрибутивних мрежа. Робусност решења демонстрирана је на тополошким случајевима с којим су постојећа решења имала проблема при процесирању.</p>

<sup>1</sup> Аутор докторске дисертације потписао је и приложио следеће Обрасце:

5б – Изјава о ауторству;

5в – Изјава о истоветности штапане и електронске верзије и о личним подацима;

5г – Изјава о коришћењу.

Ове Изјаве се чувају на факултету у штапаном и електронском облику и не кориче се са тезом.

Датум прихватања теме од стране надлежног већа:	9. мај 2021.
Датум одбране: (Попуњава одговарајућа служба)	
Чланови комисије: (титула, име, презиме, звање, институција)	<p>Председник: др Александар Ердџан, редовни професор, Факултет техничких наука, Нови Сад</p> <p>Члан: др Душко Бекут, редовни професор, Факултет техничких наука, Нови Сад</p> <p>Члан: др Јелица Протић, редовни професор, Електротехнички факултет, Београд</p> <p>Члан: др Дарко Чапко, ванредни професор, Факултет техничких наука, Нови Сад</p> <p>Члан: др Милан Гаврић, доцент, Факултет техничких наука, Нови Сад</p> <p>Члан, ментор: др Срђан Вукмировић, ванредни професор, Факултет техничких наука, Нови Сад</p>
Напомена:	

KEY WORD DOCUMENTATION<sup>2</sup>

Document type:	Doctoral dissertation
Author:	Tomislav Kovač
Supervisor (title, first name, last name, position, institution)	PhD Srđan Vukmirović, Associate Professor, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad
Thesis title:	A robust method for topology analysis of unbalanced and balanced distribution power networks
Language of text (script):	Serbian language (latin)
Physical description:	Number of: Pages 129 Chapters 9 References 54 Tables 21 Illustrations 59 Graphs 0 Appendices 0
Scientific field:	Electrical and Computer Engineering
Scientific subfield (scientific discipline):	Applied software engineering
Subject, Key words:	Adjacency matrix, breadth-first search, distribution network, sparse matrix, topology analysis
Abstract in English language:	A need to minimize the duration of outage in the distribution network has motivated the more frequent use of composite switching equipment and temporary equipment. This has led to the creation of complex topological cases that existing solutions have a problem to process. A comprehensive solution for topological analysis of balanced and unbalanced distribution networks is proposed in this paper. The solution is based on a topological model that represents a mathematical abstraction of the distribution network in the form of a graph, where all relevant physical devices are directly modeled using buses and branches. The graph is memorized using a matrix structure that defines the logical connection between buses per single phase, taking into account static connectivity, current state of switching equipment and the presence of temporary equipment. The network data prepared in this way enable an efficient topological analysis that searches the graph per layers. The result of topological analysis is a wide set of topological data (islands, layered network structure, energization states, active phases, loop detection etc.) that can be directly applied to real physical equipment. The proposed solution was verified on various examples of real and test distribution networks. The robustness of the solution is demonstrated on topological cases which existing have a problem to process.
Accepted on Scientific Board on:	9th May 2021.
Defended: (Filled by the faculty service)	

<sup>2</sup> The author of doctoral dissertation has signed the following Statements:

56 – Statement on the authority,

5B – Statement that the printed and e-version of doctoral dissertation are identical and about personal data,

5r – Statement on copyright licenses.

The paper and e-versions of Statements are held at the faculty and are not included into the printed thesis.

<p>Thesis Defend Board: (title, first name, last name, position, institution)</p>	<p>President: PhD Aleksandar Erdeljan, Full Professor, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad</p> <p>Member: PhD Duško Bekut, Full Professor, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad</p> <p>Member: PhD Jelica Protić, Full Professor, Faculty of Electrical Engineering, Belgrade</p> <p>Member: PhD Darko Čapko, Associate Professor, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad</p> <p>Member: PhD Milan Gavrić, Assistant Professor, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad</p> <p>Member, Mentor: PhD Srđan Vukmirović, Associate Professor, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad</p>
<p>Note:</p>	

*Zahvaljujem se svojoj porodici na podršci i razumevanju koje su mi tokom ovog naučnog istraživanja nesebično pružili. Takođe, želim se zahvaliti mom mentoru profesoru Srđanu Vukmiroviću i profesorima Dušku Bekutu i Andriji Sariću na znanju i iskustvu koje su mi pružili u dosadašnjem obrazovanju i tokom izrade ovog naučnog istraživanja.*

---

*Posvećeno supruzi Nataši, ćerki Sari i sinu Luki*

*U Novom Sadu, 4. septembra 2021. godine*

*Tomislav Kovač*

## SADRŽAJ

1. Uvod.....	12
1.1 Opis problema istraživanja.....	14
1.2 Pregled aktuelnog stanja u oblasti istraživanja .....	15
1.3 Obrazloženje o potrebama istraživanja .....	17
1.4 Cilj istraživanja sa naglaskom na rezultate koji se očekuju .....	18
2. Elektrodistributivna mreža – opis, sistem za upravljanje i topološki model .....	19
2.1 Elektroenergetski sistem .....	19
2.2 Elektrodistributivna mreža .....	22
2.2.1 Fizička oprema u elektrodistributivnoj mreži.....	23
2.2.2 Privremeni elementi u elektrodistributivnoj mreži .....	25
2.3 Sistem za upravljanje elektrodistributivnom mrežom (DMS) .....	26
2.4 Graf elektrodistributivne mreže .....	28
2.4.1 Teorija grafova.....	28
2.4.2 Graf elektrodistributivne mreže .....	31
2.5 CIM – model za elektrodistributivne mreže.....	32
2.5.1 CIM struktura klasa .....	32
2.5.2 Model konektivnosti .....	36
2.5.3 Topološki model .....	37
2.5.4 Kritika topološkog modela iz CIM-a i moguća unapređenja.....	38
3. Modelovanje elemenata elektrodistributivne mreže pomoću čvor-grana modela .....	40
3.1 Topološki (čvor-grana) model.....	40
3.2 Prelazak iz čvor-prekidač modela u čvor-grana model .....	43
3.3 Modelovanje elektrodistributivne mreže.....	45



---

3.3.1	Matrica incidencije .....	45
3.3.2	Matrica povezanosti .....	46
3.3.3	Upoređivanje matrice incidencije i matrice povezanosti .....	47
3.3.4	Karakteristike matrice povezanosti za graf elektrodistributivne mreže.....	49
3.4	Retka matrica i tehnike za njeno memorisanje.....	50
3.4.1	Ulančana šema memorisanja za retke matrice .....	51
3.4.2	Memorijsko zauzeće ulančane šeme memorisanja .....	54
3.4.2.1	Poređenje sa standardnom šemom memorisanja za matrice .....	54
3.4.2.2	Poređenje sa redoslednom šemom memorisanja za retke matrice .....	55
3.4.3	Procesiranje izmena retke matrice .....	55
3.4.3.1	Dodavanje novog elementa u matricu .....	56
3.4.3.2	Dodavanje novog reda u matricu.....	57
3.4.4	Vremenska kompleksnost operacija .....	57
3.5	Matrični model .....	59
3.5.1	Matrični model uravnoteženih elektrodistributivnih mreža.....	59
3.5.2	Matrični model neuravnoteženih elektrodistributivnih mreža.....	60
3.5.3	Promena stanja prekidačke opreme .....	63
3.5.4	Dodavanje novih elemenata u matrični model .....	64
3.5.5	Uklanjanje elementa iz matričnog modela .....	65
3.5.6	Modelovanje privremenih elemenata.....	65
4.	Topološka analiza .....	69
4.1	Arhitektura rešenja za topološku analizu .....	69
4.2	Pretraga grafa .....	70
4.3	Kreiranje slojevite strukture grafa.....	71
4.3.1	Atributi za horizontalnu pretragu po slojevima .....	71
4.3.2	Atributi za vertikalnu pretragu po slojevima .....	73
4.4	Detekcija petlji u grafu .....	76
4.4.1	Upetljanost ostrva .....	76
4.4.2	Pseudo petlje .....	77
4.5	Bojenje grafa .....	78
4.5.1	Bojenje grafa po ostrvima.....	78
4.5.2	Bojenje aktivne faznosti .....	79
4.5.3	Bojenje energizovanosti.....	82
4.6	Procesiranje promene topologije grafa.....	84
4.7	Funkcije za iscertavanje putanje u grafu.....	84

---

4.7.1	Iscrtavanje putanje ka dole .....	85
4.7.2	Iscrtavanje putanje ka gore .....	86
4.7.3	Iscrtavanje putanje ka nekom elementu .....	86
4.7.4	Iscrtavanje putanje ka svim pravcima.....	87
4.7.5	Iscrtavanje putanje po slojevima .....	88
4.7.6	Iscrtavanje petlji.....	89
5.	Korišćenje rezultata topološke analize na primeru implementacije FLISR funkcija ...	91
5.1	Kvarovi u elektrodistributivnoj mreži .....	91
5.2	Detekcija kvara.....	93
5.3	Automatsko otklanjanje privremenih kvarova .....	94
5.4	Lokacija kvara .....	95
5.4.1	Lociranje kvara pomoću merača kvara .....	95
5.4.2	Lociranje kvara pomoću indikatora kvara .....	95
5.5	Lokalizacija kvara .....	97
5.6	Izolacija kvara .....	98
5.7	Restauracija usluge.....	99
6.	Testiranje i rezultati .....	101
6.1	Ekspiriment 1 – Verifikovanje tačnosti rešenja koristeći podatke stvarnih elektrodistributivnih mreža .....	102
6.2	Ekspiriment 2 – Verifikovanje tačnosti i robustnosti rešenja koristeći testnu mrežu koja sadrži problematične topološke slučajeve .....	104
6.3	Ekspiriment 3 – Verifikovanje performantnosti rešenja koristeći testne mreže koje su programski generisane .....	110
6.3.1	Testne mreže sa jednakim ukupnim brojem čvorova .....	110
6.3.2	Testne mreže sa različitim ukupnim brojem čvorova.....	111
7.	Zaključak .....	114
8.	Literatura.....	116
9.	Biografija .....	121

## SPISAK SLIKA

Slika 1 – Primer elektroenergetskog sistema .....	21
Slika 2 – Primer elektrodistributivne mreže.....	22
Slika 3 – Primer neusmerenog grafa .....	28
Slika 4 – Primer prostog puta u neusmerenom grafu .....	29
Slika 5 – Primer usmerenog stabla.....	30
Slika 6 – Primer energizovanog i neenergizovanog ostrva.....	31
Slika 7 – Modelovanje klasa u CIM-u na primeru prekidača .....	33
Slika 8 – Povezivanje komponenti CIM-a .....	36
Slika 9 – Formiranje topoloških čvorova u CIM modelu .....	37
Slika 10 – Formiranje topoloških ostrva u CIM modelu .....	38
Slika 11 – Hijerarhija klasa koje modeluju topološke elemente .....	41
Slika 12 – Modelovanje poveznih čvorova i linijskih segmenata u čvor-grana modelu .....	43
Slika 13 – Modelovanje prekidača u čvor-grana modelu.....	43
Slika 14 – Modelovanje potrošača u čvor-grana modelu.....	44
Slika 15 – Modelovanje dvonamotajnog transformatora u čvor-grana modelu.....	45
Slika 16 – Generisanje matrica incidencije iz grafa.....	46
Slika 17 – Generisanje matrice povezanosti iz grafa .....	47
Slika 18 – Primer matrice i njene odgovarajuće ulančane šeme memorisanja .....	53
Slika 19 – Dodavanje novog elementa pomoću ulančane šeme memorisanja.....	56
Slika 20 – Dodavanje novog reda pomoću ulančane šeme memorisanja .....	57
Slika 21 – Graf uravnotežene mreže i njegov matrični model.....	60
Slika 22 – Graf neuravnotežene mreže i njegov matrični model .....	61
Slika 23 – Primer izmene matričnog modela nakon promene stanja prekidača .....	63

Slika 24 – Primer dodavanja novog elementa u matični model .....	64
Slika 25 – Primer uklanjanja elementa iz matičnog modela.....	65
Slika 26 – Dodavanje privremene spojnice u matični model .....	66
Slika 27 – Dodavanja privremenog prekida u matični model .....	67
Slika 28 – Dodavanje privremenog generatora u matični model.....	68
Slika 29 – Arhitektura rešenja za topološku analizu .....	70
Slika 30 – Algoritam za pretragu grafa po širini.....	71
Slika 31 – Atributi za horizontalnu pretragu uravnoteženog grafa po slojevima .....	72
Slika 32 – Atributi za horizontalnu pretragu neuravnoteženog grafa po slojevima.....	73
Slika 33 – Primer trivijalne neuravnotežene mreže .....	74
Slika 34 – Dvosmerno usmerene grane.....	75
Slika 35 – Primer petlje u grafu .....	76
Slika 36 – Petlja obrazovana između dva korenska čvora .....	77
Slika 37 – Primer pseudo petlje .....	77
Slika 38 – Bojenje grafa po ostrvima.....	78
Slika 39 – Pseudo petlja obrazovana između dva korenska čvora.....	79
Slika 40 – Primer neuravnoteženog grafa za određivanje aktivne faznosti .....	80
Slika 41 – Bojenje aktivne faznosti.....	81
Slika 42 – Primer aktivne faznosti kod monofazne grane.....	82
Slika 43 – Bojenje energizacije u grafu .....	83
Slika 44 – Iscrtavanje putanje ka dole.....	85
Slika 45 – Iscrtavanje putanje ka gore .....	86
Slika 46 – Iscrtavanje putanje ka nekom elementu .....	87
Slika 47 – Iscrtavanje putanje ka svim pravcima.....	87
Slika 48 – Iscrtavanje putanje po slojevima a) Unapred b) Unazad .....	88
Slika 49 – Iscrtavanje petlje .....	89
Slika 50 – Postupak iscrtavanja elemenata grafa koji se nalaze u petlji .....	89
Slika 51 – Primer lociranja kvara korišćenjem indikatora kvara .....	96
Slika 52 – Primer lokaliziranja kvara .....	98
Slika 53 – Primer izolovanja kvara .....	98
Slika 54 – Primer restauracije usluge korišćenjem alternativnog izvora .....	99
Slika 55 – Model konektivnosti testne neuravnotežene elektrodistributivne mreže.....	105
Slika 56 – Topološki model testne neuravnotežene elektrodistributivne mreže.....	106
Slika 57 – Stanje energizacije testne neuravnotežene elektrodistributivne mreže.....	107
Slika 58 – Ostrva u testnoj neuravnoteženoj elektrodistributivnoj mreži .....	108

Slika 59 – Aktivna faznost testne neuravnotežene elektrodistributivne mreže.....109

## SPISAK TABELA

Tabela 1 – CIM paketi klasa .....	35
Tabela 2 – Poređenje broja memorijskih lokacija za topološke modele uravnoteženih i neuravnoteženih mreža.....	42
Tabela 3 – Memorijska kompleksnost za matricu incidencije i matricu povezanosti.....	47
Tabela 4 – Vremenska kompleksnost za matricu incidencije i matricu povezanosti.....	48
Tabela 5 – Ulančana šema memorisanja: opis skalara i vektora.....	52
Tabela 6 – Poređenje vremenske kompleksnost standardne i ulančane šeme memorisanja matrice povezanosti.....	58
Tabela 7 – Mapiranje čvorova na indekse redova matrice za uravnotežene mreže .....	60
Tabela 8 – Mapiranje čvorova na indekse redova matrice za neuravnotežene mreže .....	62
Tabela 9 – Određivanje ulaznih i izlaznih čvorova za grane .....	74
Tabela 10 – Određivanje ulaznih i izlaznih grana za čvorove .....	75
Tabela 11 – Računanje aktivne faznosti za čvorove .....	80
Tabela 12 – Računanje aktivne faznosti za grane .....	81
Tabela 13 – Stanja energizacije i njihova značenja .....	83
Tabela 14 – Broj objekata za slučajeve iz stvarnih elektrodistributivnih mreža.....	102
Tabela 15 – Topološki podaci za slučajeve iz stvarnih elektrodistributivnih mreža .....	103
Tabela 16 – Rezultati performansi za slučajeve iz stvarnih elektrodistributivnih mreža ..	103
Tabela 17 – Rezultati performansi za testnu neuravnoteženu elektrodistributivnu mrežu	109
Tabela 18 – Uticaj broja ostrva i broja čvorova u ostrvu na vreme izvršavanja.....	110
Tabela 19 – Uticaj broja ostrva i broja čvorova u ostrvu na memorijsko zauzeće .....	111
Tabela 20 – Vremena izvršavanja topološke analize za neuravnotežene mreže.....	111
Tabela 21 – Vremena izvršavanja topološke analize za uravnotežene mreže .....	111

## SPISAK SKRAĆENICA

<b>Skraćenica</b>	<b>Značenje skraćenice</b>
CIM	<i>Common Information Model</i> – Standardizovan model koji omogućava čuvanje podataka o elementima elektroenergetskog sistema.
DMS	<i>Distribution Management System</i> – Sistem za upravljanje elektro-distributivnom mrežom.
EMS	<i>Energy Management System</i> – Sistem za upravljanje transportnom električnom mrežom.
FIFO	<i>First in, First out</i> – Metod za organizovanje i čuvanje podataka u memoriji koji podatke procesira dajući prvenstvo starijim podacima.
FLISR	<i>Fault location, isolation and service restoration</i> – Proračuni za lokaciju kvara, izolaciju kvara i restauraciju usluge.
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i> - Sistem za merenje, praćenje i kontrolu industrijskih sistema.
RDF	<i>Resource Description Framework</i> – Skup pravila koji definiše način na koji se mogu čuvati informacije o određenim resursima i kako se mogu organizovati te informacije. U opisu se koristi RDF trojka: subjekat (resurs), predikat (osobina resursa ili veza tog resursa i nekog drugog resursa) i objekat (drugi resurs).
XML	<i>eXtensible Markup Language</i> – Standardni skup pravila za definisanje formata podataka u elektronskoj formi.

## SPISAK TERMINA

Naziv termina	Značenje termina
Čvor-grana model	eng. <i>Bus-branch model</i> – model elektrodistributivne mreže u kome su svi relevantni elementi predstavljeni pomoću čvorova i grana.
Čvor-prekidač model	eng. <i>Node-switch model</i> – model elektrodistributivne mreže u kome su direktno predstavljeni svi najvažniji elementi elektrodistributivne mreže.
Dekorater (dizajn obrazac)	eng. <i>Decorator design pattern</i> – softverski obrazac za dizajn koji omogućava da se ponašanje objektu doda naknadno dinamički bez uticaja na ostale objekte iz iste klase.
Fider	eng. <i>Feeder</i> – skup opreme koja se koristi da se iz transformatora distribuira električna energija ka krajnjim potrošačima.
Grana	eng. <i>Branch</i> – matematička apstrakcija opreme elektrodistributivne mreže pomoću koje se oprema predstavlja pomoću grane u grafu.



---

Indikator kvara	eng. <i>Fault indicator</i> – tip opreme koji omogućava detektovanje lokacije kvara čime se omogućava smanjenje vremena koje je potrebno da se kvar ukloni.
Matrica incidencije	eng. <i>Incidence matrix</i> – matrica koja definiše graf opisujući susednosti između čvorova i grana
Matrica povezanosti	eng. <i>Adjacency matrix</i> – matrica koja definiše graf opisujući susednost između čvorova.
Merač kvara	eng. <i>Fault recorder</i> – tip opreme koji omogućava merenje vrednosti amplitude struje kvara.
Osigurač	eng. <i>Cutout fuse</i> – tip prekidačke opreme koji ima sposobnost da detektuje visoke struje u mreži i da se tada otvori kako bi se izolovanjem zaštitio ostatak mreže od kvara.
Ostrvo	eng. <i>Island</i> – topološki pojam koji predstavlja skup elemenata u elektrodistributivnoj mreži koji su u trenutku posmatranja električno povezani.
Prekidač strujnog kola	eng. <i>Circuit breaker</i> – tip prekidačke opreme čiji osnovni zadatak detektovati kvar u elektrodistributivnoj mreži i zaštititi ostatak mreže od kvara.
Posetilac (dizajn obrazac)	eng. <i>Visitor design pattern</i> – softverski obrazac za dizajn koji omogućava razdvajanje algoritma od strukture objekta na kojoj se algoritam izvršava.
Sabirnica	eng. <i>Busbar</i> – oprema u elektrodistributivnoj mreži koja omogućava povezivanje većeg broja druge opreme, na primer vodova.
Oprema za prekid	eng. <i>Cut</i> – tip opreme koji omogućava privremeno kompletno ili parcijalno prekidanje voda.
Prekidač snage	eng. <i>Load breaker</i> – tip prekidačke opreme koji ima manipulativnu ulogu u prekidu i u uspostavljanju električne veze između dva elementa elektrodistributivne mreže.
Rastavljač	eng. <i>Disconnecter</i> – tip prekidačke opreme koji omogućava vizuelni prekid za strujno kolo koje je već prethodno prekinuto.

Spojnica

eng. *Jumper* – tip opreme koji omogućava privremeno povezivanje dva elementa u mreži.

## 1. Uvod

Savremeno društvo se esencijalno oslanja na korišćenje električne energije. Naučna otkrića vezana za električne uređaje revolucionarno su uticala na industrijsku proizvodnju i poboljšanje kvaliteta života čoveka. Električni uređaji potpuno su izmenili život običnog čoveka, promenivši način na koji radi, putuje, komunicira, živi u svom domu, uči, leči se, druži i zabavlja se.

Ekspanziju električnih uređaja nije uspela da dovoljno isprati gradnja proizvodnih kapaciteta. Evidentan je deficit između proizvodnje električne energije i potreba kranjih potrošača. Ovaj deficit na tržištu električne energije regulisan je visokim cenama električne energije koja se koristi da se potrošači demotivišu da prekomerno koriste električnu energiju. Jedna od posledica toga je da se za zagrevanje domaćinstava i danas najviše koriste fosilna goriva (ugalj, nafta i gas).

Uporedo sa razvojem društva sazrevala je i svest o potrebi očuvanja životne sredine i traženju dugoročno održivih rešenja. Razvijena društva je počela da brine ograničenost fosilnih izvora energije i negativan uticaj koji takvi izvori energije imaju na životnu sredinu. To je potaklo dugoročno okretanje ka obnovljivim izvorima energije (solarne elektrane, vetrogeneratori, geotermalna postrojenja, hidroelektrane, postrojenja na biomasu itd.). Prelazak na nove izvore zahtevao je decenije ulaganja u nova proizvodna postrojenja. To potvrđuje i podatak da je udeo obnovljivih izvora energije u Evropskoj uniji bio 2015. godine 17%, 2020. godine 21%, a da je predviđanje da bi 2030. godine mogao dostići 34%. Restruktuirani elektroenergetski sistem omogućio je da se na tržište električne energije uključe i privatne kompanije koje su subvencijama motivisane da ulažu u proizvodne kapacitete zasnovane na obnovljivim izvorima energije. Povećanje broja obnovljivih izvora je, pre svega zbog prirode tih izvora (na primer: sunce i vetar), učinilo da upravljanje elektroenergetskim sistemom bude znatno kompleksnije.

Deficit električne energije i briga o životnoj sredini bila je motivacija da razvijene zemlje daju mnogo veći značaj efikasnijem korišćenju proizvedene električne energije. Uvedeni razredi energetske efikasnosti omogućili su bolju informisanost krajnjih potrošača kako bi se oni

odlučivali za efikasnije proizvode. U mnogim zemljama je čak i subvencionisana kupovina proizvoda veće energetske efikasnosti. Evropska unija je postavila cilj zemljama članicama unije da u periodu od 2020. do 2030. godine smanje ukupnu potrošnju energije za 9%. Značajan doprinos smanjenju zagađenja životne sredine moglo bi biti uvođenje električnih automobila, koji su se pokazali kao efikasniji, jeftiniji za održavanje i bolji za životnu sredinu od automobila na benzin i gas. Sa druge strane, masovno punjenje električnih automobila sasvim sigurno će pružiti nove izazove za elektroenergetski sistem.

Zavisnost savremenog društva od korišćenja električne energije dovela je do toga da bilo kakav prekid u isporuci električne energije parališe sve grane privrede i svakodnevni život prosečnog čoveka. Najčešći razlog prekida su otkazi prouzrokovani vremenskim nepogodama, kvarovima na fizičkoj opremi elektroenergetskog sistema i ljudskim faktorom. Statistički gledano, visoki procenat otkaza moguće je predvideti koristeći odgovarajuće simulacione alate kao podršku u odlučivanju. Koliki će uticaj otkaz imati na krajnje potrošače zavisi od broja potrošača koji je ostao bez usluge i dužine vremena u kome su potrošači bez usluge. Zbog toga je bitno ukoliko se desi nepredviđen otkaz, da se otkaz u što kraćem roku lokalizuje i reši. Zlonamerno prouzrokovani otkazi predstavljaju posebnu bezbedonosnu pretnju po sigurnost, zbog čega se elektroenergetski sistem smatra kritičnom infrastrukturom jedne zemlje.

Kompanijama koje učestvuju u proizvodnji, prenosu i distribuciji električne energije postavljeni su jasni zahtevi: da se isporuči što više električne energije, da isporuka bude što više pouzdana i bezbedna, da cena električne energije bude što niža i da sve to bude prihvatljivo za životnu sredinu. Da bi se ispunili ovi zahtevi neophodno je ulaganje u razvoj i korišćenje kvalitetnije i efikasnije opreme za proizvodnju, prenos, distribuciju i potrošnju električne energije i ulaganje u programska rešenja koja bi efikasnije i pouzdanije upravljala elektroenergetskom mrežom.

Za monitoring i upravljanje elektrodistributivnom mrežom koristi se veći broj softverskih aplikacija koje su najčešće integrisane u sistem za upravljanje elektrodistributivnom mrežom (eng. *Distribution Management System*, ili skraćeno DMS). Ovaj sistem omogućava da operator ima kompletan uvid stanja elektrodistributivnog sistema i da ima podršku pri donošenju odluka kako bi se izabrala najbolja rešenja i kako bi se predupredile moguće greške. Napredna programska rešenja za DMS omogućavaju:

- Augmentovano praćenje trenutnog stanja elektrodistributivne mreže,
- Proračun optimalne konfiguracije mreže sa aspekta potrošnje i ograničenja fizičke opreme,
- Podršku pri planiranju i izvođenju radova u mreži,
- Predviđanje potrošnje na osnovu vremenske prognoze i prethodnih trendova,

- Automatsku detekciju, lokaciju i izolaciju kvara i određivanje optimalne strategije za restauraciju usluge napajanja itd.

Sve ove funkcionalnosti vrše zahtevne proračune na osnovu ulaznih podataka čija se vrednost menja u realnom vremenu. Ne analizira se samo trenutno stanje, već i moguće varijante budućih stanja. Kako bi funkcije bile performantne, za proračune se koristi pojednostavljen model koji predstavlja matematičku apstrakciju elektrodistributivne mreže. Za formiranje matematičkog modela zadužena je funkcija topološke analize. Zadatak topološke analize je da opiše na koji način su elementi elektrodistributivne mreže međusobno logički povezani uvažavajući trenutna stanja fizičke opreme u elektrodistributivnoj mreži. Zbog toga je topološka analiza jedna od ključnih funkcija za analizu stanja elektrodistributivne mreže. Ova doktorska disertacija istražuje probleme sa kojima se susreće topološka analiza pri procesiranju uravnoteženih i neuravnoteženih mreža i u njoj je ponuđeno jedno sveobuhvatno rešenje. Delovi naučnog istraživanja objavljeni su u međunarodnom naučnom časopisu [1], međunarodnim naučnim konferencijama [2][3] i naučnom časopisu [4].

## 1.1 Opis problema istraživanja

Istraživanje se bavi problemom kako modelovati elemente elektrodistributivne mreže da bi se dobio matematički graf i kako vršiti topološku analizu grafa da bi metod mogao da kvalitetno procesira topološke scenarije koji se mogu naći u uravnoteženim i neuravnoteženim elektrodistributivnim mrežama (na primer: manipulacija pojedinačnom fazom kompozitne prekidačke opreme, upetljana ostrva, prividno upetljana ostrva, dvosmerno usmerene grane, spojnice koje povezuju opremu različite faznosti itd.). Ukoliko bi se prilikom upravljanja elektrodistributivnom mrežom podržalo i dozvolilo kreiranje kompleksnijih topoloških scenarija, to bi pružilo veće mogućnosti prilikom otklanjanja kvarova i obavljanja radova u mreži, čime bi se smanjilo vreme u kome usluga isporuke električne energije nije dostupna krajnjim potrošačima. Veoma bitan deo tog istraživanja je kako kreirati kvalitetno rešenje koje će moći podržavati procesiranje i uravnoteženih i neuravnoteženih elektrodistributivnih mreža. Predloženo rešenje moralo bi biti efikasno, kako bi funkcije koje koriste topološke podatke mogle pravovremeno reagovati na promenu stanja prekidačke opreme. Takođe, potrebno je sagledati kako rezultati topološke analize utiču na mogućnosti naprednih funkcija koje se koriste za upravljanje elektrodistributivnom mrežom.

## 1.2 Pregled aktuelnog stanja u oblasti istraživanja

Raznovrsni algoritmi su do sada predloženi za implementaciju topološke analize i oni se generalno mogu svrstati u dve kategorije: 1) numerički algoritmi i 2) algoritmi koji koriste grafove.

Numerički algoritmi [5]-[10] su generalno bazirani na matricama povezanosti (eng. *Adjacency matrix*) i matricama incidencije (eng. *Incidence matrix*). Metoda u [5] koristi matricu povezanosti i Gausove eliminacije kako bi otkrila čvorove koji su galvanski povezani. Naučno istraživanje objavljeno u [6] upoređuje kako različiti načini čuvanja podataka i kako promena redosleda čvorova utiče na različite numeričke algoritme (full matrix multiplication, row-sweep, and row-sum). Metoda [7] koristi parcijalnu multiplikaciju matrice povezanosti kako bi se smanjio ukupan broj multiplikacija koji je potreban da bi se dobila informacija o kompletnoj povezanosti elemenata u mreži. Metode iz [5]-[7] zahtevaju ponovno računanje topologije čitave elektrodistributivne mreže u slučaju da se promeni stanje prekidačke opreme. Algoritam opisan u [8] prati promene topologije mreže manipulišući elementima matrice povezanosti. Ovaj algoritam karakteriše veliko zauzeće memorije, dok veće promene topologije zahtevaju promenu redosleda redova i kolona u matrici povezanosti i njeno refaktorisanje. Referenca [9] predlaže grafovsko-algebarski model koji je zasnovan na spektralnoj analizi kako bi se detektovala ostrva koja nastaju i nestaju. Metoda u [10] koristi trougaonu faktorizaciju (eng. *Triangular factorization*) da bi se identifikovale grane čiji ispad (kvar) u mreži uzrokuje stvaranje i nestajanje ostrva u mreži (eng. *Islanding*). Rezultat metoda opisanih u [9] i [10] je ograničen samo na detekciju topoloških ostrva.

Algoritmi koji koriste jedinice za merenje faza nisu dovoljno dobri da bi se sa njima mogle pouzdano pratiti topološke promene (one ne mogu garantovati 100% tačnost, kako je napisano u [11] i [12]) zbog još uvek malog procenta telemetrisane opreme u elektrodistributivnim mrežama.

Uopšteno, glavni nedostatak svih numeričkih algoritama je odsustvo slojevite strukture mreže, koja je neophodna za rad naprednih energetske funkcije kao što su metode zamene u napred i zamene u nazad (eng. *Forward/backward sweeping*) koje koriste za retko upetljane elektrodistributivne mreže.

Algoritmi koji se teorijski bave grafovima opisani u radovima [13]-[20] pružaju mogućnost istravanja putanje (eng. *Tracing*) prvenstveno koristeći algoritme pretrage grafa u širinu (eng. *Breadth-first search* - BFS) i pretrage grafa u dubinu (eng. *Depth-first search* - DFS). Ovi radovi za pretragu najčešće koriste čvor-prekidač model (eng. *Node-breaker model*), što zahteva procesiranje stanja svakog prekidača prilikom pretrage mreže. Fleksibilna metoda za praćenje topologije za neuravnotežene mreže koja je bazirana na dizajn obrascu posetioca (eng. *Visitor design pattern*) je demonstrirana na scenarijima sa kompozitnim prekidačima i spojnicama (eng. *Jumper*) koji spajaju različite faze u [13]. Autori u radu [14] koriste dizajn obrazac dekoratera (eng. *Decorator design pattern*) da bi radvojila topološke attribute od atributa koji predstavljaju fizičke

karakteristike čvorova. U [15] je opisan metod za modelovanje mreže koji je baziran na Common Information Model-u i topološka analiza koja koristi DFS algoritam. Metode u [14] i [15] ne razmatraju podelu mreže po slojevima ili korišćenje privremene opreme u mreži. Referenca [16] koristi matricu incidencije i metodu pretrage po radijusu (eng. *Radius search method*) kako bi procesirala promene topologije nakon promena stanja prekidača. Performanse bi mogle biti bolje da je matrica povezanosti korišćena za početnu pretragu grafa, dok bi se memorijsko zauzeće značajno moglo optimizovati korišćenjem tehnike retkih matrica. Metoda u [17] koristi algoritam pretrage grafa po širini da bi se izračunala topologija mreže uvodeći koncept objekata sa više priključaka čime bi se kreirala statička relacija između prekidača u mreži. Metoda pretrage po dubini iz [18] koristi tehniku koja ima red za skladištenje čvorova kako bi se dobila strukturu stabla koja kreće od izvora napajanja kao korenskog čvora stabla. Obe ove metode iz [17] i [18] imaju vremenski zahtevno procesiranje topologije, dok korišćenje privremene opreme uopšte nije razmatrano. U [19] je predloženo rešenje koje koristi pretragu grafa po dubini kako bi se obišla sva ostrva u elektrodistributivnoj mreži. I u ovom rešenju izostala je slojevita mrežna struktura, dok se topologija mora ispočetka računati nakon svake promene stanja prekidačke opreme. U [20] je predloženo rešenje koje iz CIM modela kreira listu povezanosti čvorova koja se koristi za pretragu grafa sa BFS i DFS algoritmima. Metoda ne razmatra modelovanje privremenih elemenata, namenjena je isključivo za uravnotežene mreže i limitirana je po pitanju mogućnosti korišćenja rezultata topološke analize.

Pored problema kojim se bavi ova disertacija, postoje niz tema istraživanja koje su vrlo blisko povezane sa temom topološke analize, kao što su npr. particionisanje modela mreže [21][22], optimizacija konfiguracije mreže [23], distribuirano procesiranje topologije [24] i razmena topoloških podataka [25].

### 1.3 Obrazloženje o potrebama istraživanja

Prihvatanjem da se podrže kompleksniji scenariji za procesiranje topologije omogućeno je da se prilikom otklanjanja kvara u mreži i radova u mreži smanji vreme u kojem su potrošači bez usluge napajanja. Današnje kompanije za distribuciju električne energije u ugovorima svojim potrošačima garantuju kvalitetnu distribuciju električne energije. Ova garancija kvaliteta kvantifikovana je brojem sati koje godišnje potrošači neće imati dostupnu uslugu. Novi zahtevi koji su postavljeni pred elektrodistributivne kompanije potakli su instaliranje kompozitne prekidačke opreme u neuravnoteženim distributivnim mrežama i generalno češću upotrebu privremene opreme u mreži. Ova oprema trebalo bi da pomogne da se što pre efikasno izoluje deo mreže koji je u kvaru i vrati napajanje svim zdravim delovima mreže koji su zbog kvara ostali bez usluge napajanja. Međutim, korišćenje navedene opreme dovelo je do pojave topoloških scenarija koji su počeli stvarati probleme postojećim algoritmima za procesiranje topologije elektrodistributivne mreže.

Sagledavši postojeće radove koji se bave problemom topološke analize mreže može se istaći da trenutno ne postoji rešenje koje istovremeno pokriva i uravnotežene i neuravnotežene elektrodistributivne mreže. Imati dva potpuno raznorodna rešenja za elektrodistributivne mreže negativno utiče na troškove održavanja, jer se u tom slučaju moraju paraleleno održavati i unapređivati funkcionalnosti različitih rešenja.

Većina postojećih rešenja ne uvažavaju zahteve da bi skup topoloških podataka trebalo da odgovori na potrebe naprednih funkcija za monitoring i upravljanje elektrodistributivnom mrežom, već nude samo okrnjen skup topoloških informacija o elektrodistributivnoj mreži. Bogatstvo generisanih topoloških podataka direktno pozitivno utiče na mogućnosti ostalih funkcija koje se koriste za upravljanje elektrodistributivnom mrežom.



## 1.4 Cilj istraživanja sa naglaskom na rezultate koji se očekuju

Potrebno je istražiti sa kojim topološkim scenarijima postojeća rešenja za topološku analizu imaju problema prilikom procesiranja topologije uravnoteženih i neuravnoteženih elektrodistributivnih mreža i predložiti sveobuhvatno rešenja koje će biti robusno pri procesiranju takvih topoloških scenarija. Takođe, potrebno je sagledati kako topološke informacije utiču na mogućnosti funkcija jednog savremenog softvera za upravljanje elektrodistributivnom mrežom, kako bi se formirao skup topoloških informacija koje bi predloženo rešenje za topološku analizu trebalo da ponudi kao rezultat svog procesiranja. Topološka analiza mora biti efikasna, kako bi rezultati promene topologije mogli biti pravovremeno primenjeni od strane ostalih funkcija (na primer: funkcije za lokaciju kvara, izolaciju kvara i restauraciju usluge, proračun tokova snaga itd.) koje za svoje proračune koriste topološke informacije. Zbog toga je u okviru istraživanja potrebno izmeriti vreme izvršenja topološke analize koristeći različite veličine testnih elektrodistributivnih mreža.

Očekivani rezultati istraživanja (hipoteze):

1. Moguće je razviti jedno sveobuhvatno rešenje koje će moći procesirati i uravnotežene i neuravnotežene elektrodistributivne mreže.
2. Rešenje je robusno prilikom procesiranja topologije uravnoteženih i neuravnoteženih elektrodistributivnih mreža. Robusnost rešenja može se verifikovati na primerima topoloških scenarija sa kojim postojeća rešenja imaju problema prilikom procesiranja topologije.
3. Veličina skupa rezultata topološke analize pozitivno utiče na mogućnosti funkcija za upravljanje elektrodistributivnom mrežom koje te topološke podatke koriste. Kroz konkretne primere je moguće pokazati kako su određeni topološki podaci (koji nisu mandatorni) pozitivno uticali na mogućnost funkcija.

## **2. Elektrodistributivna mreža – opis, sistem za upravljanje i topološki model**

U ovom poglavlju biće opisan elektroenergetski sistem sa naglaskom na podsistem distribucije. Tokom opisa biće prožeto objašnjenje mnoštvo termina čije poznavanje je neophodno za razumevanje same teme ove doktorske disertacije. Takođe, biće opisani najznačajniji elementi elektrodistributivne mreže za koje ćemo u okviru ove doktorske disertacije praviti topološki model i zbog toga je namera da prosečnom čitaocu bude jasna uloga i značaj koji ti elementi u elektroenergetskom sistemu imaju. Nakon toga, dat je opis sistema za upravljanje distributivnom mrežom (DMS) kao i njegovih najznačajnijih funkcionalnosti. Opisana je zavisnost tih funkcionalnosti od matematičkog modela elektrodistributivne mreže u vidu grafa. Posle toga su opisane karakteristike grafova elektrodistributivnih mreža, uz objašnjenje osnovnih termina iz teorije grafova. Na kraju poglavlja biće opisano kako se po CIM standardu modeluju elementi grafa elektrodistributivne mreže i koje su prednost i mane takvog načina modelovanja konektivnosti i topologije.

### **2.1 Elektroenergetski sistem**

Energija je sposobnost nekog tela da vrši rad. Ona može biti u različitim formama: hemijska, svetlosna, toplotna, električna, nuklearna, mehanička itd. Najznačajnija forma energije današnjice je električna energija. Postoji mnogo razloga zašto je tako: može se dobiti iz praktično bilo koje druge forme energije, ekonomično prenositi na velike razdaljine, raspodeliti velikom broju korisnika, praktična je za korišćenje i lako se iz nje može dobiti neka druga upotrebna forma energije. Otkrića vezana za električnu energiju nemerljivo su uticala na razvoj savremenog

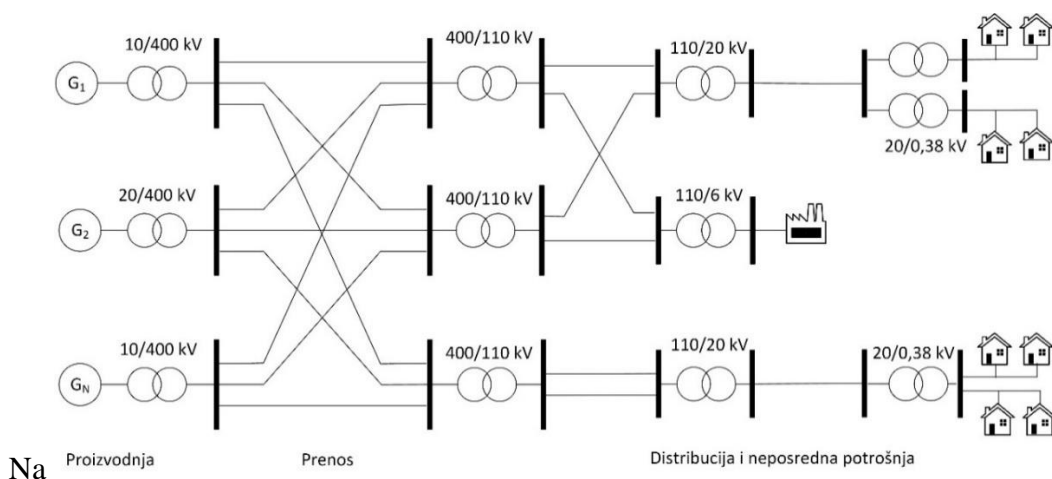
društva. Savremeno društvo se toliko oslanja na njeno korišćenje da se ne može zamisliti niti jedna grana industrije ili život savremenog čoveka bez električne energije-

*Elektroenergetski sistem* predstavlja mrežu električnih uređaja koji su povezani sa ciljem da omoguće proizvodnju, prenos i korišćenje električne energije. Osnovni zadatak elektroenergetskog sistema je kvalitetna i pouzdana usluga snabdevanja potrošača električnom energijom.

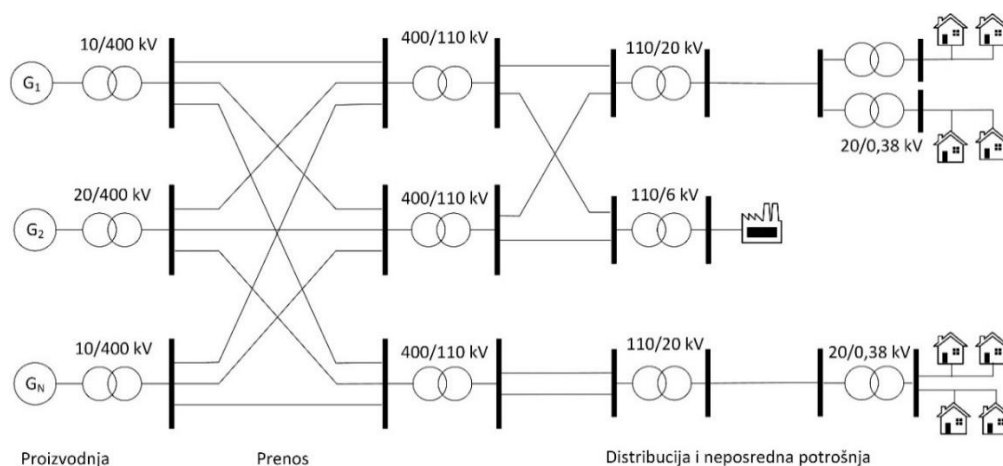
Važna karakteristika elektroenergetskog sistema je *uravnoteženost*. Trofazni elektroenergetski sistem je uravnotežen ako su svi njegovi elementi uravnoteženi. Da bi se neki trofazni elemenat smatrao uravnoteženim potrebno je da priključenjem u trofazni elektroenergetski sistem ne remeti simetriju režima sistema [26]. Uravnoteženi elektroenergetski sistemi su tipični za Evropu, dok su neuravnoteženi elektroenergetski sistemi tipični za Ameriku.

Tradicionalni elektroenergetski sistem može se podeliti na četiri podsistema:

- *Podsistem proizvodnje* – čine elektrane koje vrše transformaciju različitih oblika energije (toplote, kinetičke, potencijalne, hemijske, nuklearne itd.) u električnu energiju.
- *Podsistem prenosa* – prenos električne energije od mesta proizvodnje do potrošačkih područja.
- *Podsistem distribucije* – distribucija proizvedene električne energije do priključaka krajnjih potrošača
- *Podsistem neposredne potrošnje* – transformacija električne energije u oblike energije koje čovek koristi – toplotna energija, mehanička energija, osvetljenje itd.



Slika 1 ilustrovan je primer jednog elektroenergetskog sistema i njegovih podsistema.



Slika 1 – Primer elektroenergetskog sistema

Podela na podsistema se danas smatra tradicionalnom, jer u savremenom svetu ne postoje više tako striktno granice između podsistema, pa tako, na primer, izvori energije (generatori) mogu biti instalirani i u distributivnom delu elektroenergetskog sistema.

Električna energija se proizvodi s visinom napona najčešće od 10 kV do 20 kV, čija vrednost zapravo predstavlja kompromis između cene proizvodnje i zahteva da cena generatora mora biti prihvatljiva.

Proizvodni sistemi najčešće su udaljeni od potrošačkih područja i zbog toga postoji potreba za prenosom električne energije. Jedan od razloga udaljenosti je što su izvori energije koji su pogodni za transformaciju u električnu energiju (npr. reke) udaljeni od naselja potrošača. Drugi razlog je taj što su elektrane (na naftu, gas, uglj, nuklearne itd.) veliki zagađivači vazduha te ne mogu biti locirane u blizini naselja, kako ne bi negativno uticale na zagađenje sredine u kojoj ljudi žive.

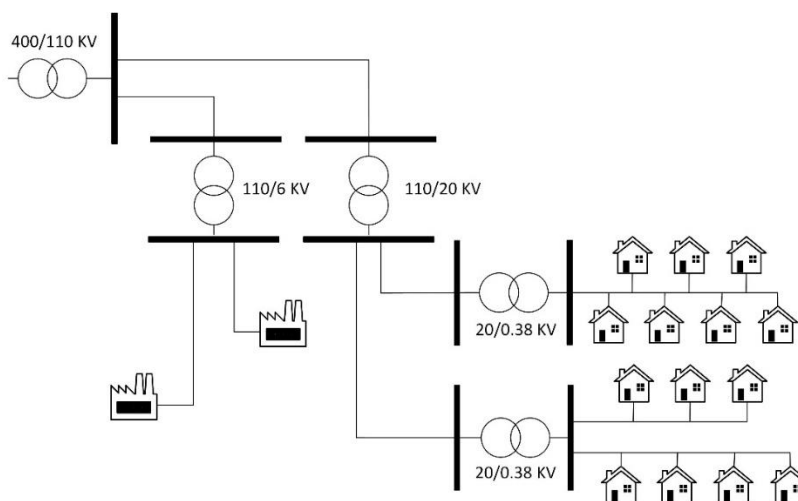
Kako bi se smanjili gubici pri prenosu, električnoj energiji se pomoću transformatora podiže napon proizvodnje (10kV – 20kV) na napon prenosa (110kV – 400kV). Optimalna visina napona prenosa određuje se u odnosu na razdaljinu i snagu električne energije koja se prenosi. Razdaljina i snaga električne energije povećavaju gubitke električne energije pri prenosu, dok veće vrednosti napona smanjuju gubitke, ali zahtevaju veća ulaganja u infrastrukturu.

Prenosna mreža ima *upetljanu topološku strukturu* zbog pouzdanosti prenosa i ekonomičnosti proizvodnje. Pouzdanost prenosa postiže se redundantnim prenosnim putevima. Oni obezbeđuju da se i u slučaju ispada nekog elementa u prenosnoj mreži spreči ostajanje potrošača bez napajanja. Ekonomičnost proizvodnje se postiže neposrednim povezivanjem što većeg broja elektrana sa što većim brojem potrošačkih područja. Time se smanjuju potrebne minimalne rezerve proizvodnje električne energije. Interna povezanost elektroenergetskih sistema

jedne države danas se generalizuje na interkonektivne sisteme koji povezuju prenosne mreže različitih država, što omogućava uvoz-izvoz električne energije između tih država.

## 2.2 Elektrodistributivna mreža

Elektrodistributivna mreža predstavlja deo elektroenergetskog sistema čiji osnovni zadatak je preuzetu električnu energiju iz (sub)prenosne mreže distribuirati do priključaka krajnjih potrošača. Elektrodistributivnu mrežu odlikuje velika prostorna rasprostranjenost i velika količina fizičke opreme koja se koristi da bi se električna energija distribuirala svim potrošačima. Distribucija električne energije zasnovana je na konceptu *fidera* koji se granaju u vidu stabla (tip grafa) na niže nivoe, sve dok ne dođu do individualnih potrošača. To je urađeno zato da ne bi moralo da se svaki individualni potrošač direktno povezuje sa prenosnom mrežom. Primer je dat na Slika 2.



Slika 2 – Primer elektrodistributivne mreže

Kako elektrodistributivne mreže prolaze kroz naseljena mesta, zbog bezbednosti i praktičnosti se u elektrodistributivnim mrežama koriste niže vrednosti napona (10kv – 110kV) od onih u prenosnoj mreži. Napon se tako spušta koristeći jedan ili više nivoa transformatora sve do priključaka neposrednih potrošača.

Distributivne mreže najčešće imaju *radijalnu* topološku strukturu, što znači da se električna energija potrošaču distribuira pomoću samo jednog puta iz izvora napajanja sa (sub)prenosne mreže. To znači da će svaka pojava kvara gotovo izvesno uzrokovati prestanak isporuke električne energije određenom broju potrošača. Data je prednost nižim investicionim troškovima u infrastrukturu na uštrb ispunjenja klasične (N-1) sigurnosti. Sa radijalnom topološkom strukturom smanjeni su i troškovi ulaganja u relejnu zaštitu [27].

Iako nije karakteristično, petlje se mogu trajno ili privremeno pojaviti u elektrodistributivnoj mreži. Primer trajne petlje je upetljena niskonaponska gradska mreža koja se napaja iz više distributivnih transformatora. Privremena petlja može da se javi ukoliko je potrebno bez prekida napajanja potrošača prebaciti deo potrošnje između dva sredjenaponska voda.

Blizina različitih fidera često se koristi za izgradnju dodatnih puteva za distribuciju električne energije koji se prvenstveno koriste kao alternativa u slučaju da se desi kvar na opremi koja služi kao osnovni put distribucije električne energije. Alternativni pravci distribucije električne energije su veoma važni pošto kvarovi mogu biti česti u elektrodistributivnoj mreži. Uzrok čestih kvarova trebalo bi pronaći u velikoj količini opreme koja se koristi u elektrodistributivnoj mreži i u smanjenom kvalitetu opreme u odnosu na opremu iz prenosne mreže [31].

### **2.2.1 Fizička oprema u elektrodistributivnoj mreži**

U ovom poglavlju biće ukratko opisani najvažniji elementi koja se koristi u elektrodistributivnoj mreži. Kako ćemo svaki od tih elemenata u nekom od narednih poglavlja modelovati matematičkom apstrakcijom, neophodno je da čitalac doktorske disertacije pre toga ima barem osnovno razumevanje koja je uloga tih elemenata i kako se oni koriste.

*Trofazni vodovi* su elementi koji distribuiraju električnu energiju. Koriste se i nadzemni (vazdušni) i podzemni (kablovski) vodovi u zavisnosti od visine napona koji se koristi za distribuciju i terena na kom se vod nalazi.

*Sabirnica* (eng. *Busbar*) omogućava povezivanje više vodova. Najčešće se konstruišu kao šine na koje se vodovi priključuju preko zavrtnja. Sabirnice se na mrežu priključuju preko prekidačke opreme.

*Prekidačka oprema* omogućava povezivanje elemenata u elektroenergetskoj mreži. Pored osnovne manipulativne uloge, veoma značajna uloga koja prekidačka oprema ima je zaštitna uloga. Prekidačkom opremom se može upravljati lokalno - na licu mesta ili telemetrisano - preko različitih SCADA (eng. *Supervisory Control and Data Acquisition*) protokola. Normalno uklopno stanje je unapred definisano početno stanje koje prekidačka oprema ima u elektroenergetskoj mreži. Normalno uklopno stanje se menja isključivo u slučaju pojave kvara u mreži ili eventualne rekonfiguracije mreže radi ekonomičnijeg snabdevanja potrošača.

Tipovi prekidačke opreme:

- *Prekidač strujnog kola* (eng. *Circuit breaker*) je tip prekidačke opreme čiji osnovni zadatak detektovati kvar u elektrodistributivnoj mreži i izolovati ostatak mreže od kvara. Kada se kvar otkloni, ovaj tip prekidača može bezbedno ponovo uspostaviti strujno kolo.
- *Prekidač snage* (eng. *Load breaker*) je tip prekidačke opreme koji ima manipulativnu ulogu u prekidu i u uspostavljanju električne veze između dva elementa elektrodistributivne mreže. Za razliku od prekidača strujnog kvara, nema zaštitnu ulogu.
- *Rastavljač* (eng. *Disconnecter*) je tip prekidačke opreme koji omogućava vizuelni prekid za strujno kolo koje je već prethodno prekinuto. Njegov položaj polova jasno vizuelno ukazuje na stanje prekidača, što pruža sigurnost radnicima koji rade popravku ili zamenu opreme da oprema kojom rukuju nije u pogonu. Rastavljači se ne smeju koristiti za prekid ili uspostavljanje radne struje elementa, jer manipulacija rastavljačem u tom slučaju najčešće izaziva oštećenje rastavljača.
- *Osigurač* (eng. *Cutout fuse*) predstavlja tip prekidačke opreme koji ima sposobnost da detektuje visoke struje u mreži i da se tada otvori kako bi se izolovanjem zaštitio ostatak mreže od kvara. Osigurači nisu praktični za privremene kvarove, jer ne umeju ponovo sami energizovati deo mreže koji je bio u privremeno u kvaru.
- *Prekidač sa automatskim ponovnim uključenjem* – reklozer (eng. *Recloser*) je poseban tip prekidača koji pored detekcije i automatske izolacije kvara (otvaranjem prekidača) imaju mogućnost i restauraciju napajanja (zatvaranjem prekidača) ukoliko je kvar u međuvremenu otklonjen. Privremeni kvarovi u mreži su veoma česti tako da su prekidači kvarova sa mogućnošću ponovnog zatvaranja veoma korisna oprema koja doprinosi pouzdanosti isporuke električne energije. Najčešći primer privremenog kvara su oluje koje dovode do toga da grana padne na vod i napravi kratak spoj koji može oštetiti opremu u elektroenergetskoj mreži. Međutim, ovaj problem je najčešće privremen, jer grana nakon što je izazvala kratak spoj padne na zemlju i ne predstavlja više smetnju u funkcionisanju električne mreže.

*Transformatori* su elementi koji transformišu električnu energiju jednog napona u električnog energije drugog napona uz minimalne gubitke. Osnovne funkcije transformatora su podizanje napona proizvodnje na napon prenosa i spuštanje napona prenosa na napon potrošnje.

*Indikator kvara* (eng. *Fault indicator*) – omogućava detektovanje lokacije kvara čime se omogućava smanjenje vremena koje je potrebno da se kvar otkloni.

*Merači kvarova* (eng. *Fault recorder*) beleže vrednost amplitude struje kvara.

*Distribuirani izvor energije* (eng. *Distributed energy resource*) – izvori električne energije koji su priključeni na elektrodistributivnu mrežu.

### 2.2.2 Privremeni elementi u elektrodistributivnoj mreži

Rukovođeni ciljem da se minimizuje period koji potrošači zbog kvara ostanu bez napajanja, ponekad je pored korišćenja postojeće permanentne mrežne infrastrukture (najčešće prekidačke opreme) potrebno koristiti i opremu koja je privremeno postavljena u mreži. U nastavku su opisani najčešće korišćeni privremeni elementi.

- *Privremeni generatori* predstavljaju privremene mobilne objekte koji su postavljeni na kamione i koji imaju mogućnost snabdeti određeni broj potrošača koji je ostao bez napajanja zbog kvara u mreži.
- *Privremeno uzemljenje* omogućava privremeno povezivanje jedne ili više faza nekog elementa u elektrodistributivnoj mreži sa zemljom. Predstavlja dodatnu zaštitu za korisnike električnih uređaja ili radnike koji vrše popravke.
- *Oprema za privremen prekid* (eng. *Cut*) omogućava kompletno ili parcijalno prekidanje voda.
- *Privremeni prekidač* takođe omogućava kompletno ili parcijalno prekidanje voda s time što se nakon postavljanja u mrežu može otvarati i zatvarati poput standardne prekidačke opreme.
- *Privremena spojnica* (eng. *Jumper*) omogućava povezivanje dva elementa u elektrodistributivnoj mreži. Faznost spojnice mora biti podskup preseka faznosti elemenata koje spojnica povezuje. Praktično jeste moguće povezati opremu koja ima dve raznorodne faze, ali za tako nešto često je potrebno mimoići softverske validacije.



## 2.3 Sistem za upravljanje elektrodistributivnom mrežom (DMS)

Sistem za upravljanje elektrodistributivnom mrežom (eng. *Distribution Management System* – DMS) omogućava programsku podršku za kontrolu i upravljanje elektrodistributivnom mrežom. Ovaj sistem se sastoji iz mnoštva korisnih aplikacija koje pružaju podršku ljudima u odlučivanju, kako bi distribucija električne energije bila pouzdana, kvalitetna, efikasna i bezbedna. Ovakva programska podrška može pomoći čoveku da izabere najbolja rešenja i da preventivno upozori ukoliko uoči da neka odluka može biti problematična. Iako savremena DMS rešenja pružaju određeni vid autonomije u praćenju stanja mreže i reagovanju na uočene događaje, ipak čovek mora biti svo vreme prisutan kako bi se izbegle eventualne greške softvera. Postojeća DMS rešenja razlikuju se po svojoj naprednosti, performansama, pouzdanosti i autonomnosti. U [28] je opisano koji su sve izazovi pri odabiru odgovarajućeg DMS rešenja i na koje sve detalje bi trebalo posebno obratiti pažnju.

U osnovi svakog DMS rešenja je model elektrodistributivne mreže koji se sastoji iz statičkih i dinamičkih podataka. Statički podaci modela omogućavaju definisanje svih relevantnih entiteta u elektrodistributivnoj mreži, njihovu međusobnu povezanost i čuvanje raznih postavki. Dinamički podaci modela omogućavaju čuvanje poslednjih stanja rasklopne opreme, merenja i komunikacionih uređaja. Dinamički podaci mogu biti telemetrisani, manuelno uneti i kalkulirani podaci. Svaka promena stanja beleži se u bazu podataka što omogućava rad proračuna koji koriste istorijske podatke. Upravljanje fizičkom opremom iz daljine omogućava SCADA (eng. *Supervisory Control and Data Acquisition*) tako što u realnom vremenu obezbeđuje akviziciju stanja udaljene opreme i mogućnost slanja komandi na daljinu.

Za efikasno upravljanje elektrodistributivnom mrežom koristi se mnoštvo različitih proračuna [31], od kojih će biti spomenuti neki važniji:

- *Topološka analiza* – opisuje logičku povezanost između elemenata elektrodistributivne mreže uvažavajući trenutno stanje prekidačke opreme i prisutnost privremene opreme u elektrodistributivnoj mreži.
- *Tokovi snaga* – proračun stanja elektrodistributivne mreže. Pod stanjem mreže podrazumeva da se za elemente elektrodistributivne mreže odrede kompleksni naponi, struje, aktivne i reaktivne snage, padovi napona i gubici.
- *Estimacija stanja* – proračun promenljivih stanja mreže, verifikacija i korekcija merenja i verifikacija topologije mreže.
- *Analiza gubitaka* – proračun gubitaka aktivne i reaktivne snage u elektrodistributivnoj mreži.

- *Rekonfiguracija* – određivanje optimalne konfiguracije elektrodistributivne mreže manipulacijom stanja rasklopne opreme sa ciljem postizanja veće ekonomičnosti, kvaliteta, pouzdanosti i sigurnost.
- *Kratki spojevi* – proračun vrednosti promenljivih stanja elektrodistributivne mreže sa kratkim spojem.
- *Volt-Var kontrola i optimizacija* – određuje optimalnu strategiju za upravljanje regulatorima napona i bankama distributivnih kompenzatora sa ciljem smanjenja gubitaka, opterećenja sistema, naponskih prilika itd.
- *Relejna zaštita* – izbor, konfigurisanje i koordinacija relejne zaštite.
- *Funkcije za lokaciju kvara, izolaciju kvara i restauraciju usluge* (eng. *Fault Location, Isolation, and Service Restoration – FLISR*) – procenjuje mesto u mreži gde se nalazi kvar, izvršava set akcija kako bi se izolovao deo mreže koji je zahvaćen kvarom i kako bi se vratila usluga delu mreže koji je ostao bez usluge a nije zahvaćen kvarom.
- *Analiza pouzdanosti* – određivanje indeksa pouzdanosti elektrodistributivne mreže sa ciljem smanjenja intenziteta kvara, vremena popravke i vremena obnove napajanja.
- *Upravljanje radovima u mreži* – omogućava efikasno planiranje i izvršavanje radova u mreži vodeći računa o bezbednosti radnika koji izvode radove i o ispravnosti svake akcije.

Prethodno navedene funkcionalnosti predstavljaju različite zahtevne proračune koji vrše analizu trenutnog stanja elektrodistributivne mreže i brojnih varijanti mogućih stanja. Pri tome se podaci koji se koriste za proračune menjaju u realnom vremenu, što zahteva simultane korekcije izvršenih proračuna. Zbog toga statički i dinamički podaci koji predstavljaju model elektrodistributivne mreže moraju biti posebno pripremljeni kako bi proračuni mogli biti efikasni. Zadatak topološke analize je napraviti matematičku apstrakciju modela elektrodistributivne mreže u vidu grafa, gde se svi elementi mreže modeluju pomoću čvorova i grana. Matematički model elektrodistributivne mreže pogodan je za izvršenje zahtevnih proračuna, jer sa jedne strane čini važne topološke informacije za izvršenja proračuna lako dostupnim, dok sa druge strane abstrahuje informacije koje nisu važne za samo izvršenje proračuna.

## 2.4 Graf elektrodistributivne mreže

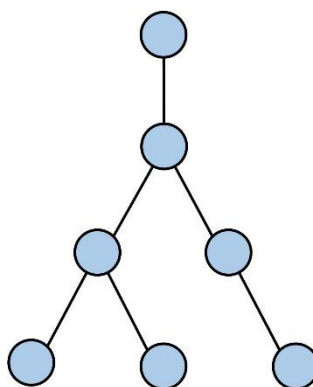
U ovom poglavlju biće objašnjeni najvažniji termini iz teorije grafova čije poznavanje je neophodno za razumevanje teme ove doktorske disertacije, kao i neke osnovne osobine koje imaju grafovi elektrodistributivnih mreža.

### 2.4.1 Teorija grafova

Graf je struktura koja omogućava analizu složenih problema iz različitih naučnih disciplina. Problem se formuliše kreiranjem odgovarajućeg matematičkog modela koji reprezentuje pogled na problem sa određenog aspekta. Taj aspekt problema se modeluje definišući entitete i relacije između tih entiteta. Entiteti se modeluju *čvorovima*, dok se relacije između entiteta modeluju *granama*. Na primer, čvorovi mogu predstavljati ljude, a grane mogu povezivati ljude koji su prijatelji.

*Teorija grafova* [29][30] je matematička disciplina koja se bavi izučavanjem grafova. Pored teorijske matematike, grafovi se često koriste i u drugim naukama, poput računarstva, elektrotehnike, fizike, hemije, biologije, sociologije, psihologije itd. U nastavku će biti definisani osnovni pojmovi u teoriji grafova. Radi lakšeg razumevanja, podrazumevaće se da je graf konačan.

Grafovi se najčešće prikazuju u formi *dijagrama*, slikovitim prikazom gde se čvorovi predstavljaju tačkama, a grane linijama koje povezuju tačno određene tačke. Veličina tačaka i dužina linija može a ne mora biti od važnosti, u zavisnosti od tipa dijagrama. Iako je dijagram najbolji način da se vizuelno predstavi graf, on svakako nije pogodan za matematičke operacije i čuvanje u memoriji.



Slika 3 – Primer neusmerenog grafa

Grana u grafu je *usmerena* ukoliko se za granu zna koji je početni čvor i koji je krajnji čvor. Ukoliko je svedeno koji od čvorova na krajevima grane je početni čvor a koji je krajnji, grana je neusmerena. U zavisnosti od toga da li su grane u grafu usmerene, graf može biti *neusmeren*, *usmeren* ili *mešoviti*.

Graf se definiše kao uređena trojka skupa čvorova  $V(G)=\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ , skupa grana  $E(G) = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$  i funkcija incidencije  $\psi_g$  koja svakoj grani definiše par čvorova koji se nalaze na njenim krajevima. Kod neusmerenih grafova nije bitan redosled u kom se navodi par čvorova, za razliku od usmerenih grafova gde je redosled bitan.

Svaka grana u grafu ima dva kraja, na kojima se nalazi par čvorova koje ona povezuje. Jedan čvor može biti povezan sa više različitih grana. U usmerenom grafu razlikuju se *ulazne* i *izlazne grane* čvora.

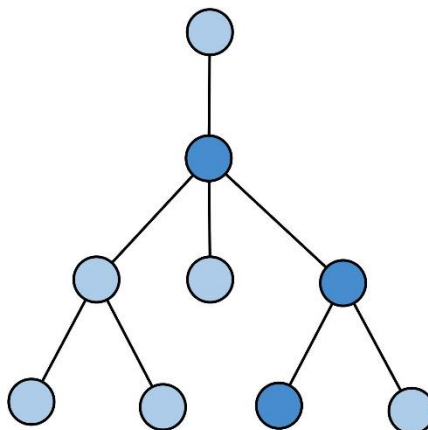
Dva čvora su *susedna* ako postoji zajednička grana koja ih povezuje. U usmerenom grafu, relacija susednosti čvorova nije simetrična. Ukoliko postoji grana čiji je početni čvor  $v_i$  i krajnji čvor  $v_j$ , onda kažemo da je  $v_j$  susedan čvoru  $v_i$ . Čvor i grana su međusobno *incidentni* ako se čvor nalazi na bar jednom od krajeva te grane. Dve grane su *susedne* ako postoji zajednički čvor koji ih povezuje.

*Stepen čvora* predstavlja ukupan broj grana koje taj čvor povezuje. Za čvor se kaže da je *izolovan* ukoliko ne postoji u grafu grana na čijem kraju se nalazi taj čvor. Kod usmerenih grafova mogu se posebno definisati *ulazni stepen čvora* koji predstavlja broj grana koje se završavaju u tom čvoru i *izlazni stepen čvora* koji predstavlja broj grana koje počinju iz tog čvora.

Svakoj grani u grafu može da se pridruži neka osobina kvantifikovana brojem - *težina*. Graf u kome grane imaju težine naziva se *težinski graf*. *Mreža* je usmereni težinski graf. Dobar primer za mrežu može biti kompjuterska mreža koja povezuje računare unutar neke institucije.

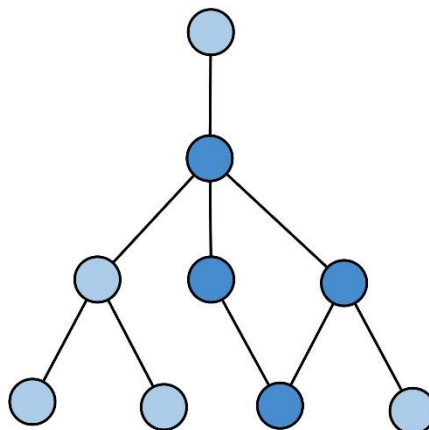
Dve ili više grana je paralelno ako povezuju iste čvorove na svojim krajevima. Ukoliko grana povezuje čvor sa samim sobom, tj. na oba kraja grane nalazi se isti čvor, takva grana naziva se *petljom*.

Put predstavlja niz grana u grafu koje povezuju dva čvora sa pravilom da svaka grana počinje iz čvora u kome se prethodna grana završila. *Prost put* je put koji ne prolazi više puta kroz isti čvor.



Slika 4 – Primer prostog puta u neusmerenom grafu

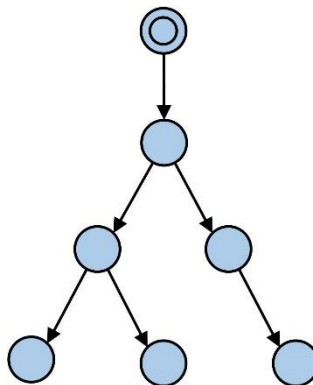
Ukoliko se prost put završava i počinje u istom čvoru, takav put naziva *ciklusom* (ili konturom). Ukoliko čvorove koji obrazuju ciklus poredamo u kružnu sekvencu, onda su susedni čvorovi koji su navedeni zaredom u sekvenci. Ukoliko graf ima bar jedan ciklus, za takav graf se kaže da je *cikličan*. U suprotnom je *acikličan*.



Slika 4 – Primer ciklusa u neusmerenom grafu

Čvorovi su *povezani* u grafu ako postoji put koji ih povezuje. Graf u kome su svi čvorovi povezani naziva se *povezani graf*.

*Stablo* je vrsta povezanog grafa koja nema cikluse. Stablo može imati jedan početni čvor koji se tada naziva *korenom* stabla ili *korenski čvor*. Kod usmerenih korenskih stabla, grane su orijentisane od čvorova nižih nivoa ka čvorovima viših nivoa. Na Slika 5 prikazan je primer usmerenog stabla sa izdvojenim korenskim čvorom (krug sa malim krugom u sredini).



Slika 5 – Primer usmerenog stabla

## 2.4.2 Graf elektrodistributivne mreže

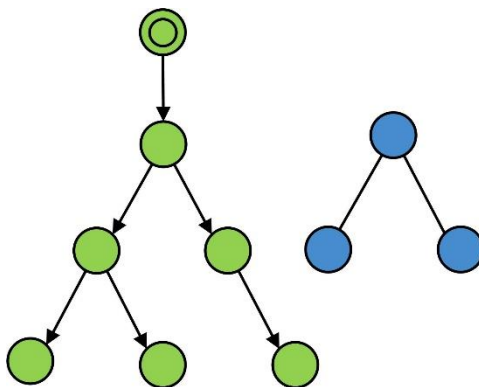
Graf je vrlo pogodan način da se prikaže i modeluje oprema elektrodistributivne mreže i međusobna povezanost opreme. Na primer, konektivnost opreme u elektrodistributivnoj mreži može da se modeluje pomoću neusmerenog grafa, dok distribucija električne energije može da se modeluje pomoću usmerenog grafa. Elementi elektrodistributivne mreže mogu da se modeluju na više različitih načina u grafu. Uobičajno je da se čvorovima modeluju sabirnice, a da se granama modeluju vodovi. Prekidačka oprema i transformatori mogu da se modeluje na više načina. O modelovanju opreme elektrodistributivne mreže biće više reči u poglavlju 3.

Graf elektrodistributivne mreže karakterišu velike dimenzije, pa tako broj čvorova i grana može biti izražen i u milionima (napomena: zavisi od veličine mreže i načina modelovanja). Nasuprot tome, interkonekcija čvorova u grafu je izuzetno niska, jer je svaki čvor najčešće povezan sa jedan do pet drugih čvorova.

Sa aspekta logičke povezanosti opreme u elektrodistributivnoj mreži, graf može imati promenljivu topološku strukturu koja zavisi trenutnog stanja rasklopne opreme i korišćenja privremene opreme u mreži.

Za korenski čvor najčešće se biraju neke od sabirnica transformatorskih stanica VN/SN1/SN2. Zbog toga graf elektrodistributivne mreže može da ima više čvorova.

Za delove elektrodistributivne mreže koji su povezani se kaže da pripadaju istom *ostrvu*. Ostrva koja sadrže korenski čvor su *energizovana ostrva*. Ostrva koja ne sadrže korenski čvor nisu energizovana i za njih se kaže da su izolovana.



Slika 6 – Primer energizovanog i neenergizovanog ostrva

Za razliku od grafa prenosne energetske mreže, za graf elektrodistributivne mreže nije tipično da ima cikluse, ali može da ih ima. Ciklusi mogu da budu planirani pri projektovanju elektrodistributivne mreže ili privremeni, kao rezultat manipulacije prekidačkom opremom. U terminologiji srpskog govornog područja za cikluse u elektrodistributivnoj mreži se najčešće koristi termin *petlja* (eng. *Loop*) i taj termin će biti korišćen na dalje u ovom radu.

## 2.5 CIM – model za elektrodistributivne mreže

Kako bi se informacije o elektroenergetskom mreži mogle razmenjivati između različitih kompanija koje se bave upravljanjem elektroenergetskom mrežom, kao i kompanija koje razvijaju softver za tu namenu, bilo je potrebno na neki način standardizovati podatke o elektroenergetskoj mreži. Electric Power Research Institute (EPRI) je razvio *Common Information Model* (CIM) otvoreni standard [32][33] za definisanje komponenti elektroenergetskog sistema i njihovu međusobnu povezanost. CIM je definisao modelovanje za skoro sve najvažnije entitete u elektroenergetskoj mreži. Opisane su klase sa svojim atributima i relacije između klasa. Format koji se koristi za predstavljanje podataka je *eXtensible Markup Language* (XML) [34] u kombinaciji sa *Resource Description Framework* (RDF) [35][36]. CIM je u početku bio orijentisan modelovanju entiteta iz podsistema proizvodnje i prenosa. Kada je prepoznato da bi CIM model mogao biti koristan i u podsistemu distribucije, CIM model je proširivan (opisano u [37] i [38]) kako bi podržao specifičnosti koje su karakteristične za elektrodistributivne mreže. Danas je CIM opšteprihvaćen od strane kompanija koje se bave prenosom (EMS) i distribucijom (DMS) električne energije, što pruža mogućnost razmene podataka između aplikacija istih ili različitih kompanija.

CIM standard koristi vrlo detaljan pristup za predstavljanje podataka elektroenergetske mreže, koji se u literaturi najčešće navodi pod imenom *čvor-prekidač* (eng. *Node-breaker*) model. Ovaj model obezbeđuje sve neophodne informacije koje su potrebne za rukovođenje električnim sistemom i namenjen je, pre svega, za nadzor i upravljanje elektroenergetskom mrežom. Pored čvor-prekidač modela postoji i *čvor-grana* (eng. *Bus-branch*) model, koji se pretežno koristi kao matematička apstrakcija za energetske proračune, a generiše se iz čvor-prekidač modela.

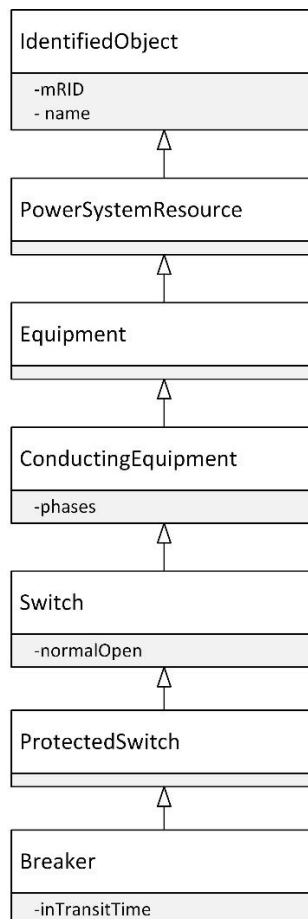
### 2.5.1 CIM struktura klasa

CIM je objektno-orijentisan model, što znači da klasa predstavlja specifičan tip objekata koji imaju zajedničke atribute. Objekat predstavlja instancu neke klase sa zasebnim vrednostima svojih atributa.

Međusobno povezanost klasa definisana je kroz sledeće relacije:

- Generalizacija (nasleđivanje) – relacija između bazne klase i izvedene (više specifične) klase. Izvedena klasa sadrži sve atribute bazne klase, a može dodatno sadržati i sopstvene atribute.
- Asocijacija – logička povezanost dve klase koja se implementira kroz atribute klase (krajevi asocijacije).
- Agregacija – specijalni slučaj asocijacije koji definiše odnos celina-deo, gde objekat klase celine sadrži objekat klase dela i objekat klase dela je sadržan od objekta klase celine.
- Kompozicija – poseban tip agregacije gde je deo fundamentalno vezan za celinu i ne može da postoji zasebno bez celine.

Hijerarhija klasa biće pokazana na primeru (Slika 7) modelovanja klase prekidača koji je preuzet iz [39]. U ovom interesantnom primeru se može videti većina važnih klasa iz CIM-a i za klase iz primera biće opisana njihova namena.



Slika 7 – Modelovanje klasa u CIM-u na primeru prekidača



Objašnjenje klasa koje su korišćene u primeru:

- *IdentifiedObject* – bazna klasa za većinu drugih klasa. Od značajnih atributa sadrži *name* koji čuva ime objekta i *mRID* koji na jedinstveni način identifikuje objekte koji su izvedeni iz ove bazne klase.
- *PowerSystemResource* – bilo koji resurs koji se nalazi unutar elektroenergetskog sistema. Može biti fizički uređaj poput transformatora ili logička organizacija entiteta poput geografskog regiona u kom se oprema nalazi.
- *Equipment* – fizički uređaj unutar elektroenergetskog sistema. Fizički uređaj može biti električni ili mehanički.
- *ConductingEquipment* – fizički uređaj koji učestvuje u prenosu ili distribuciji električne energije. Sadrži atribut *phases* koji čuva informaciju o kataloškoj faznosti opreme.
- *Switch* – modeluje prekidačku opremu. Sadrži atribut *normalOpen* koji definiše da li je prekidačka oprema otvorena ili zatvorena u normalnom uklopnom stanju.
- *ProtectedSwitch* – prekidačka oprema koja može biti upravljana od strane zaštitne opreme.
- *Breaker* – mehanički uređaj koji ima sposobnost uspostavljanja, provođenja i prekida struje kako u normalnim tako i u posebnim uslovima. Od interesantnih atributa sadrži atribut *inTransitTime* koji definiše koliko vremena je potrebno da prekidač promeni svoje stanje (na primer: iz otvorenog stanja u zatvoreno stanje).

Postojeće klase mogu se dodatno proširiti prema potrebi izvođenjem novih klasa. Na primer, ukoliko bismo hteli dodati neki novi atribut za prekidačku opremu, bilo bi potrebno izvesti novog potomka klase *Switch*.

CIM klase su grupisane po paketima, u zavisnosti od uloge koje imaju u električnoj mreži. U Tabeli 1 pobrojani su CIM paketi koji su najviše značajni sa aspekta teme ovog naučnog istraživanja i dat je kratak opis svakog od paketa.

Tabela 1 – CIM paketi klasa

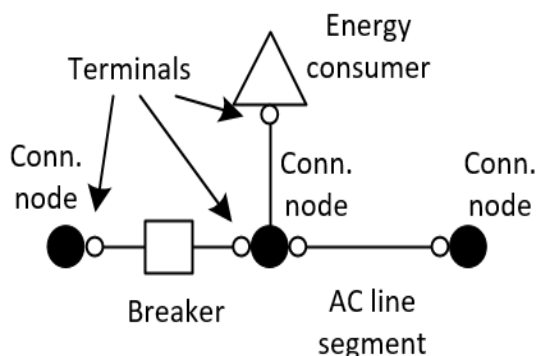
Paket	Opis paketa
Domain	Definicija primitivnih tipova podataka, jedinice merenja, dozvoljenih vrednosti merenja, dozvoljene vrednosti enumeracija i dužina veličina. Npr.: <i>Float, String, Voltage</i> itd.
Core	Bazne klase. Npr.: <i>IdentifiedObject, PowerSystemResource, Equipment, ConductingEquipment, EquipmentContainer, Terminal, VoltageLevel, Substation...</i>
Wires	Klase koje definišu opremu koja je povezana na elektroenergetsku mrežu i neke pomoćne klase. Npr.: <i>ACLLineSegment, BusbarSection, Breaker, Disconnecter, Jumper, TapChanger, TransformerWinding, PowerTransformer, Ground</i> itd.
Topology	Klase koje definišu topološku povezanost opreme uzimajući u obzir stanje prekidačke opreme. Npr.: <i>ConnectivityNode, TopogicalNode, TopologicalIsland</i> itd.
Measurement	Klase koje definišu različite tipove merenja, bilo da su ona merena na samoj komponenti (kao što je temperatura) ili na krajeve neke komponente (kao što je visina napona). Npr.: <i>Measurement, Accumulator, Analog, Discrete, Control, SetPoint</i> itd.
SCADA	Klase koje modeluju komunikacione entitete relevantne za akviziciju i komandovanje telemetrisanim tačkama. Npr.: <i>RemotePoint, RemoteUnit, CommunicationLink</i> itd.
Outage	Klase koje definišu stanje prekidačke opreme u trenutku posmatranja, rasporede za promene mrežne konfiguracije itd. Npr.: <i>SwitchState, SwitchingOperation, OutageSchedule, ClearanceTag,</i>
Protection	Klase koje definišu parametre zaštitne opreme koja se nalazi na prekidačkoj opremi. Mogu definisati određene limite opreme, očekivana kašnjenja itd. Npr.: <i>ProtectionEquipment, RecloseSequence, CurrentRelay</i> itd.
OperationalLimits	Klase modeluju operacione limite koji su pridruženi opremi. Npr.: <i>CurrentLimit, VoltageLimit...</i>
LoadModel	Klase koje opisuju model potrošnje za potrošače. Npr.: <i>Load, CustomerLoad, LoadArea, DayType,</i> itd.

Generation	Klase koje opisuju proizvodnju (različite tipove generatora i parametre proizvodnje) i dinamičke veličine u proizvodnji. Npr.: <i>GeneratingUnit</i> , <i>NuclearGeneratingUnit</i> , <i>HydroPowerPlant</i> , <i>CombustionTurbine</i> itd.
------------	--

## 2.5.2 Model konektivnosti

Oprema za prenos i distribuciju električne energije se ne povezuje direktno, već se za tu namenu koriste *terminali* i *povezni čvorovi* (eng. *Connectivity node*). Oprema može imati više krajeva i na svakom od tih krajeva nalazi se po jedan terminal, entitet koji se koristi da bi se ta komponenta priključila u mrežu. Terminali se međusobno povezuju preko poveznih čvorova, koji predstavljaju mesto priključka čija impedansa je jednaka nuli. Povezni čvorovi ne predstavljaju neku stvarnu opremu iz elektrodistributivne mreže, već su dodati isključivo radi modelovanja.

Na Sliku 8 pikazan je primer povezivanja prekidača (kvadrat), naizmeničnog voda (linija) i potrošača (trougao) u električnu mrežu. Na krajevima svakog elementa nalazi se terminal (kružić), dok su elementi međusobno povezani preko poveznih čvorova (krug).



Slika 8 – Povezivanje komponenti CIM-a

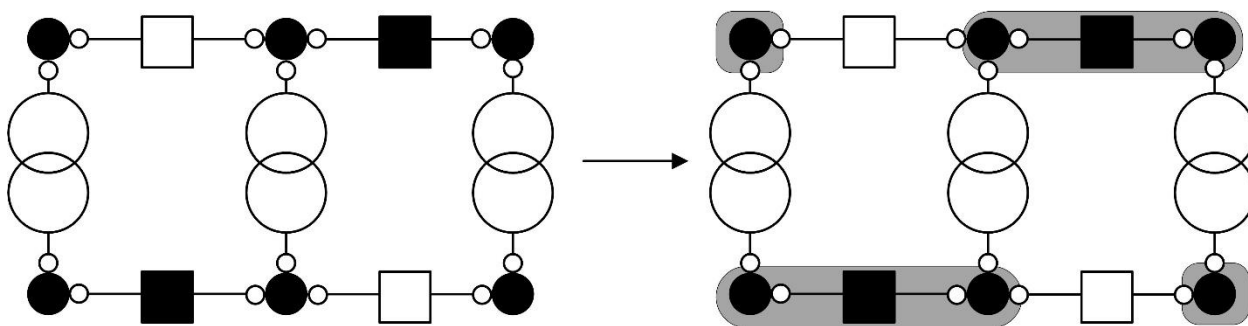
Koliko su zapravo u CIM modelu važni elementi terminal i povezni čvor najbolje govori činjenica da je konektivnost elektrodistributivne mreže u potpunosti opisana pomoću asocijacija: *ConductingEquipment-Terminal* i *Terminal-ConnectivityNode* [32].

Iako nekome može delovati da su terminali redundantni objekti u CIM modelu, terminali se mogu koristiti za pozicioniranje merenja (npr. struje ili napona) koja se vrše na tačkama koje povezuju dve različite komponente. Interesantan primer dat je u radu [39]. Prekidač ima dva kraja na kojima se nalazi dva terminala. Ukoliko se prekidač otvori, merenja priključena na terminale će biti različita. Ukoliko bismo merenje mogli postaviti samo na prekidač, ne bismo imali mogućnost znati na kom delu prekidača je izvršeno merenje.

### 2.5.3 Topološki model

CIM standard definiše 2 topološka termina u svom topološkom paketu: topološki čvor (eng. *Topology node*) i topološko ostrvo (eng. *Topology island*).

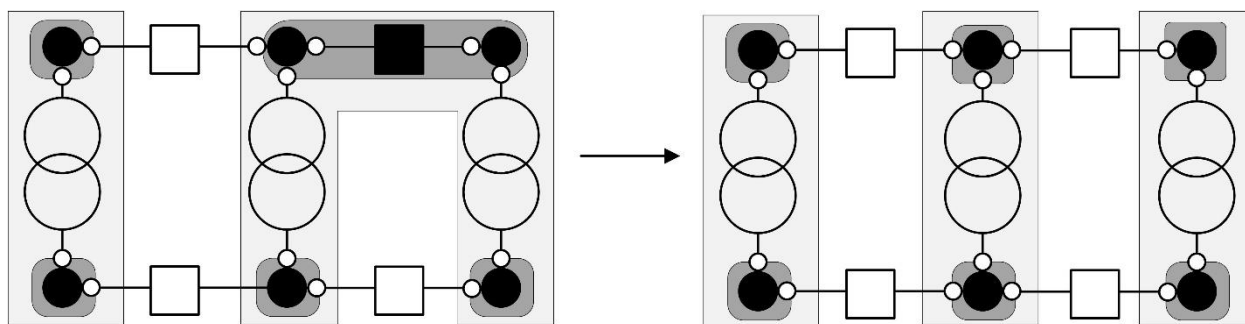
*Topološki čvor* predstavlja skup povezanih čvorova koji su povezani preko prekidačke opreme čije stanje je zatvoreno. Prema tome, može se kombinovati više čvorova konektivnosti kako bi se formirao jedan topološki čvor, u zavisnosti od trenutnog stanja prekidačke opreme u mreži. Na Slika 9 dat je jednostavan primer kako se kombinovanjem povezanih čvorova (krugovi) koji su vezani preko zatvorene prekidačke opreme (popunjeni kvadrati) kreiraju topološki čvorovi (pravougaonici sa zaobljenim ivicama).



Slika 9 – Formiranje topoloških čvorova u CIM modelu

Bitno je napomenuti da topološki čvorovi ne moraju biti obavezni elementi u CIM xml dokumentima. Da li će topološki čvorovi biti prisutni zavisi od izabranog CIM profila. U slučaju da neki CIM dokumenti ne sadrže topološke čvorove bilo bi potrebno generisati topološke čvorove nakon učitavanja elemenata iz CIM dokumenata. Proces generisanja topoloških čvorova opisan je u [40].

*Topološko ostrvo* je električno povezani podskup mreže koji se sastoji iz barem jednog topološkog čvora. Broj topoloških ostrva se menja zajedno sa promenom stanja prekidačke opreme u mreži. Kako se topološki čvorovi (pravougaonici sa zaobljenim temenima) i topološka ostrva (svetliji pravougaoni oblici) menjaju sa promenom stanja prekidača dat je u primeru na Slika 10. U zavisnosti od toga da li su povezana sa korenskim čvorom ili nisu, topološka ostrva mogu biti energizovana i neenergizovana.



Slika 10 – Formiranje topoloških ostrva u CIM modelu

Za razliku od modela konektivnosti iz CIM-a za koji se može reći da je jedan opšteprihvaćen format za čuvanje informacije o elementima elektrodistributivne mreže i njihovoj međusobnoj povezanosti, za topološki model se ne može reći da je isti slučaj. Predloženi model pokazao se dosta nepraktičnim za potrebe matematičkih proračuna koji vrše analizu stanja elektrodistributivne mreže. Zbog toga su razni autori stvarali nova rešenja topološkog modela kako bi pronašli pogodan model za svoje proračune.

#### 2.5.4 Kritika topološkog modela iz CIM-a i moguća unapređenja

CIM model je razvijen prvenstveno kao model za razmenu podataka o elektroenergetskoj mreži između kompanija koja se bave upravljanjem elektroenergetskim sistemima. Način na koji su modelovani topološki podaci nije praktičan za internu predstavu tih podataka unutar aplikacija koje vrše proračune stanja elektroenergetskog sistema. Zbog toga je topološki model CIM-a potrebno unaprediti kako bi topološki entiteti bili pogodni za efikasnu i sveobuhvatnu topološku analizu.

Više naučnih istraživanja (na primer: [41]) je prepoznalo potrebu za uvođenjem topološke grane u topološki model iz CIM-a kako bi se dobila forma grafa koji se sastoji isključivo od čvorova i grana. Sem toga, topološka grana omogućila bi da se uvede direktna referenca ka fizičkoj opremi (koja se modeluje tom granom) i merenjima koja su pridružena toj opremi.

Predstava elektrodistributivne mreže u formi grafa je poznata u literaturi kao čvor-grana (eng. *Bus-branch*) model. Čvor-grana model definiše logičku povezanost između elemenata elektroenergetske mreže na osnovu trenutnog stanja prekidačke opreme i prisustva privremene opreme u mreži. Mnogi simulacioni alati koriste čvor-grana model za svoje proračune, jer im ovaj model omogućava odgovarajući nivo informacija za njihov efikasan rad.

Topološki model iz CIM-a je redukovao ukupan broj topoloških čvorova tako što je spajao povezne čvorove koji su povezani posredstvom prekidačke opreme zatvorenog stanja. Redukcija broja topoloških čvorova ima pozitivni uticaj na performanse analize grafa elektrodistributivne

mreže, zato što proces analize direktno zavisi od broja elemenata koje je potrebno procesirati. Sa druge strane, ova redukcija ima i negativnu stranu.

Autori u [42] su uvideli da je uvođenje poveznog čvora i terminala kao dodatnih fiktivnih elemenata problematično sa strane povećanja potrebne memorije za čuvanje elektrodistributivne mreže i dostizanja prihvatljive brzine procesiranja konektivnosti u elektrodistributivnoj mreži. U radu je predložen novi tip kontejnera za opremu nazvan polje (eng. *Bay*) koji bi omogućio grupisanje mrežne opreme (na primer: prekidača, osigurača, strujnog i naponskog transformator itd.) sa ciljem da se redukuje broj elemenata koji je potrebno procesirati prilikom topološke analize. Prednost pored poboljšanja performansi bila bi i smanjena količina informacija koju bi bilo potrebno razmeniti da se opiše topologija elektrodistributivne mreže. Međutim, za razliku od redukcije fiktivnih elemenata, redukcija stvarnih fizičkih elemenata može da ima i negativnu stranu. Na primer, veliki broj energetske funkcije koriste mehanizam za određivanje putanje do neke određene opreme u mreži. Tako, na primer, funkcija za automatsku izolaciju kvara mora pronaći prvi prekidač koji se nalazi uzvodno od elementa na koji je kvar imao uticaj. Da bi takve funkcije bile efikasne, neophodno je da topološki model sadrži direktnu predstavu svakog fizičkog elementa mreže. Ovaj zaključak će biti detaljno obrazložen u poglavlju 5.

Na važnost očuvanja informacija o elementima elektrodistributivne mreže prilikom tranzicije iz čvor-prekidač modela u čvor-grana model su ukazali i autori u radovima [1], [43] i [46]. Time se dobija direktna veza između elemenata čvor-prekidač modela koji se koristi za nadzor i kontrolu elektrodistributivne mreže i elemenata čvor-grana modela koji se koriste za energetske proračune koji se izvršavaju u pozadini kako bi se dobile neophodne informacije za kontrolu i upravljanje.

## 3. Modelovanje elemenata elektrodistributivne mreže pomoću čvor-grana modela

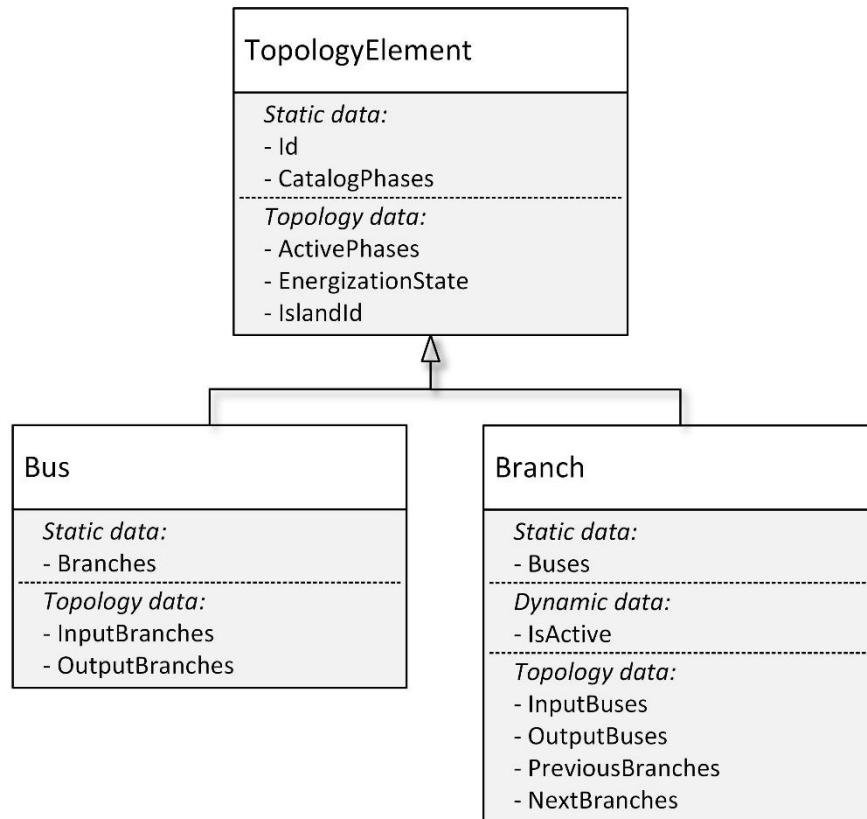
U ovom radu biće predložen topološki model za elemente elektrodistributivne mreže koji je u potpunosti baziran na strukturi grafa, tj. forme čvor-grana modela. Sva oprema koja se nalazi u elektrodistributivnoj mreži biće modelovana koristeći isključivo čvorove i grane kao gradivne jedinice. Prilikom modelovanja vodiće se računa da se što više očuvaju elementi iz modela konektivnosti kako bi bile efikasne funkcije koje za svoje proračune koriste čvor-grana model. Na taj način topološki rezultati koji se izračunaju za čvorove i grane mogu direktno da se primene na sve elemente iz čvor-prekidač modela koristeći sačuvanu vezu između elemenata čvor-grana modela i elemenata čvor-prekidač modela.

### 3.1 Topološki (čvor-grana) model

Elementi topološkog modela su čvorovi i grane, pomoću kojih je modelovana sva relevantna fizička oprema elektrodistributivne mreže. Vrednost elemenata topološkog modela sastoji se iz statičkog dela podataka (konektivnost opreme i kataloške karakteristike), dinamičkog dela podataka (stanje rasklopne opreme) i topološkog dela podataka (rezultati topološke analize).

Hijerarhija klasa koje učestvuju u modelovanju topoloških elemenata data je na Slika 11. Bazna klasa za topološke elemente je *TopologyElement* i ona modeluje attribute koji su zajednički za sve topološke elemente. Od statičkih podataka ova klasa sadrži atribut *Id* koji jednoznačno identifikuje topološki element i atribut *CatalogPhases* koji definiše katalošku faznost opreme. Od topoloških podataka, atribut *ActivePhases* definiše koje od kataloških faza elementa su napojene, atribut *EnergizationState* opisuje stanje elementa (energizovan, delimično energizovan,

nije energizovan, ...) i atribut *IslandId* definiše kom ostrvu element pripada. Iz bazne klase *TopologyElement* izvedene su klase koje modeluju čvorove i grane, pomoću kojih se modeluje sva fizička oprema u elektrodistributivnoj mreži.



Slika 11 – Hijerarhija klase koje modeluju topološke elemente

Čvorovi iz grafa su modelovani pomoću klase *Bus*. Statički atribut *Branches* definiše grane koje su susedne čvoru, opisujući konektivnost između čvorova i grana. Od atributa koji se računaju u toku topološke analize klasa čvora sadrži:

- *InputBranches* – grane koje napajaju čvor,
- *OutputBranches* - grane koje se napajaju iz čvora.

Grane iz grafa modelovane su klasom *Branch*. Statički atribut *Buses* definiše čvorove koji se nalaze na kraju grane. Dinamički atribut *IsActive* definiše da li grana u određenom trenutku posmatranja povezuje čvorove koji se nalaze na njenim krajevima. Na primer, grana može biti neaktivna ukoliko je otvoren prekidač koji povezuje dva povezna čvora. Sledeći atributi se popunjavaju kao rezultat topološke analize:

- *InputBuses* – čvor na kraju grane koji je bliži korenskom čvoru i napaja tu granu,
- *OutputBuses* – čvor koji je dalji od korenskog čvora i napaja se iz te grane,
- *PreviousBranches* – grana koja je skenirana pre te grane i
- *NextBranches* –grana koja je skenirana nakon te grane.



Iste klase se koriste za topološke modele uravnoteženih i neuravnoteženih elektrodistributivnih mreža. Ono po čemu se razlikuju je način instanciranja objekata tih klasa, gde je omogućeno da koriste različiti broj memorijskih lokacija za memorisanje određenog atributa. Kod uravnoteženih elektrodistributivnih mreža sve dinamičke i topološke informacije se pamte objedinjeno za sve faze, dok neuravnoteženih mreža potrebno svaku od tih informacija čuvati posebno za svaku fazu (objašnjeno u poglavlju 4).

U Tabela 2 dato je poređenje broja memorijskih lokacija koje se koriste za memorisanje atributa čvorova i grana kod uravnoteženih i neuravnoteženih elektrodistributivnih mreža. Jedna memorijska lokacija obeležena je sa [A], [B], [C] ili [ABC] u zavisnosti od toga na koju fazu ili faze se podatak odnosi.

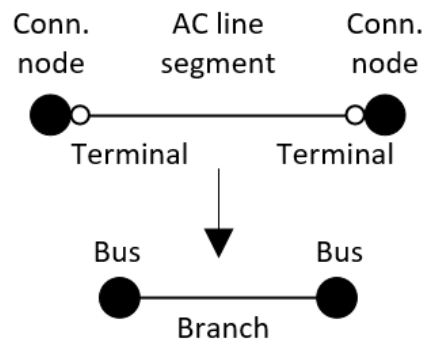
Tabela 2 – Poređenje broja memorijskih lokacija za topološke modele uravnoteženih i neuravnoteženih mreža

	Neuravnotežene mreže	Uravnotežene mreže
<b>TopologyElement</b>		
<i>IslandId</i>	[A][B][C]	[ABC]
<i>ActivePhases</i>	[ABC]	[ABC]
<i>EnergizationState</i>	[ABC]	[ABC]
<b>Bus</b>		
<i>InputBranches</i>	[A][B][C] x $N_{in}^*$	[ABC] x $N_{in}^*$
<i>OutputBranches</i>	[A][B][C] x $N_{out}^*$	[ABC] x $N_{out}^*$
<b>Branch</b>		
<i>IsActive</i>	[A][B][C]	[ABC]
<i>InputBuses</i>	[A][B][C]	[ABC]
<i>OutputBuses</i>	[A][B][C]	[ABC]
<i>PreviousBranches</i>	[A][B][C]	[ABC]
<i>NextBranches</i>	[A][B][C]	[ABC]

\*Napomena: Čvor najčešće ima jednu ulaznu i više izlaznih grana. Prikazan broj memorijskih lokacija multiplicira se sa brojem ulaznih/izlaznih grana.

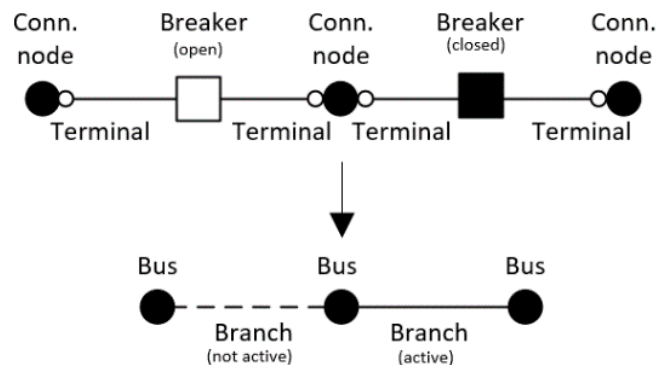
### 3.2 Prelazak iz čvor-prekidač modela u čvor-grana model

Povezni čvorovi (eng. *Connectivity node*) su modelovani u čvor-grana modelu kao čvorovi, dok su naizmenični linijski segmenti (eng. *AC line segment*) i jednosmerni linijski segmenti (*DC line segment*) modelovani kao grane. Terminali (beli kružići na slici) nisu u modelu prikazani zasebnim elementima, već pomoću atributa grana i čvorova, koji definišu njihovu međusobnu povezanost. Klasa *Branch* sadrži atribut *Buses*, dok klasa *Bus* sadrži atribut *Branches*. Na Slika 12 je dat primer koji pokazuje kako se povezni čvorovi (popunjeni krugovi) i linijski segmenti (linija) modeluju čvorovima (popunjen krug) i granama (linija).



Slika 12 – Modelovanje povezanih čvorova i linijskih segmenata u čvor-grana modelu

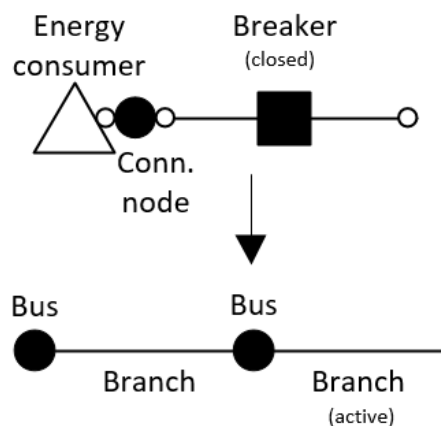
Prekidačka oprema koju čine prekidači strujnog kola (*Breaker* klasa u CIM modelu), prekidači snage (*LoadBreakerSwitch*), rastavljači (*Disconnecter*), rastavljači uzemljenja (*GroundDisconnecter*), osigurač (*Fuse*), spojnice (*Jumper*) itd., se modeluju kao grane. Stanje prekidačke opreme se modeluje korišćenjem atributa grane koji definiše da li je grana aktivna ili pasivna. Na Slika 13 je dat primer modelovanja prekidača u čvor-grana modelu. Prekidač u otvorenom stanju (prazan kvadrat) se modeluje sa neaktivnom granom (isprekidana linija), dok se prekidač u zatvorenom stanju (pun kvadrat) modeluje sa aktivnom granom (neisprekidana linija).



Slika 13 – Modelovanje prekidača u čvor-grana modelu

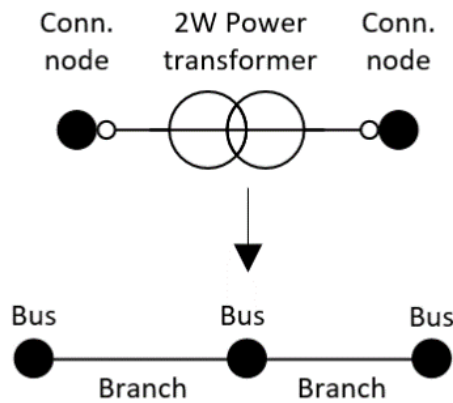
Modelovanje otvorenog stanja prekidačke opreme sa (neaktivnom) granom omogućava da se prilikom početne pretrage grafa elektrodistributivne mreže mogu pronaći elementi elektrodistributivne mreže koji se nalaze nizvodno od otvorene prekidačke opreme. To je važno za elemente grafa koji u normalnom uklopnom stanju elektrodistributivne mreže nisu električno (posredno) povezani ni sa jednim korenskim čvorom, jer u tom slučaju pretraga koja kreće od korenskih čvorova ne može doći do takvih elemenata a da prethodno ne pređe preko nekog otvorenog prekidača. Na taj način se omogućava detektovanje i procesiranje ostrva koja su izolovana u normalnom rasklopnom stanju mreže. Da je otvoreno stanje prekidačke opreme modelovano na drugačiji način (odsustvom grana između dva čvora koja prekidačka opreme povezuje), ova izolovana ostrva bila bi nevidljiva prilikom početne pretrage. U tom slučaju bilo bi potrebno pretraživati sve elemente u šemi kako bi se pronašli oni elementi grafa koji nisu pronađeni u toku početne pretrage grafe elektrodistributivne mreže.

Izvori električne energije (*EnergySource*), potrošači (*EnergyConsumer*), kompenzatori (*ShuntCompensator*), sabirnice (*BusbarSection*) i uzemljenje (*Grounding*) se modeluju kao grane na čije slobodne krajeve se dodaju novi fiktivni čvorovi. Slika 14 ilustruje modelovanje potrošača u čvor-grana modelu. Potrošač je modelovan levom granom sa slike na čiji levi kraj je dodat novi fiktivni čvor. Sa namerom da slike budu jasnije, labele od terminala su izostavljene sa slike.



Slika 14 – Modelovanje potrošača u čvor-grana modelu

Dvonamotajni transformator se modeluje sa dve grane između kojih se uvodi novi fiktivni čvor koji će povezati namotaje transformatora (Slika 15). U slučaju da u elektrodistributivnoj mreži postoje tronamotajni transformatori, oni se konvertuju u 3 dvonamotajna transformatora. Postupak konvertovanja je opisan u [47].



Slika 15 – Modelovanje dvonamotajnog transformatora u čvor-grana modelu

### 3.3 Modelovanje elektrodistributivne mreže

Pošto smo predstavili elektrodistributivnu mrežu u formi grafa koji se sastoji isključivo od čvorova i grana, sledeći korak je odabrati strukturu podataka pomoću koje ćemo u memoriji čuvati podatke o grafu. Iako se za ovu namenu mogu koristiti razne strukture podataka, u radovima koji se bave topološkom analizom se generalno najčešće koriste *matrica incidencije* i *matrica povezanosti*. Za početak ćemo sagledati ove dve najčešće reprezentacije grafa kako bismo mogli da odaberemo strukturu podataka koja nam je najpogodnija.

#### 3.3.1 Matrica incidencije

Matrica incidencije (eng. *Incidence matrix*) definiše graf opisujući incidentnost između čvorova i grana. Čvorovi matrice predstavljaju redove, dok kolone matrice predstavljaju grane. Elementi matrice određuju da li su određeni čvor i grana incidentni.

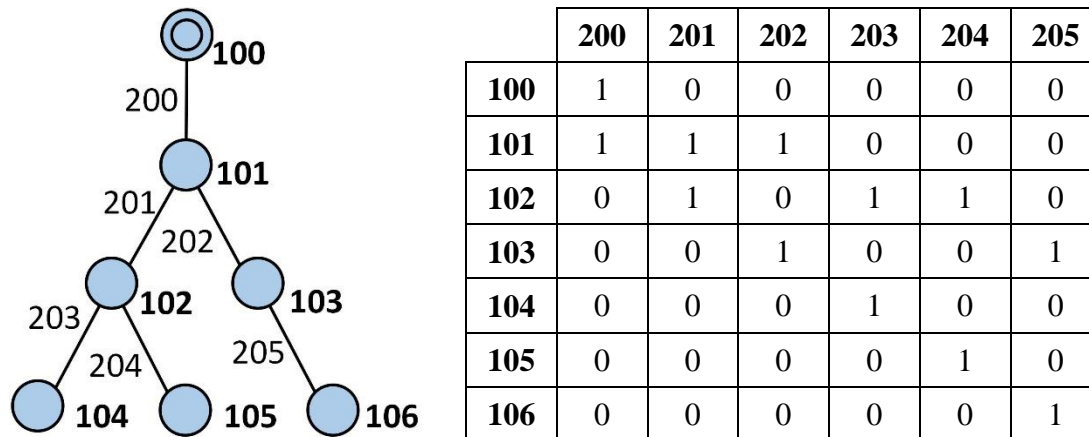
#### Definicija

Neka je matrica incidencije  $B$  grafa  $G$ , koji sadrži  $M$  čvorova ( $v_1, v_2, \dots, v_M$ ) i  $N$  grana ( $e_1, e_2, \dots, e_N$ ). Neka je  $i$  indeks nekog reda i  $j$  indeks neke kolone u matrici  $B$ . Tada su elementi  $b_{ij}$  matrice incidencije definisani su na sledeći način:

- $n$  – koliko puta su povezani čvor  $v_i$  i grana  $e_j$ .
- $0$  – ako čvor  $v_i$  i grana  $e_j$  nisu direktno povezani

**Primer**

Primer neusmerenog grafa i njegove odgovarajuće matrice incidencije prikazan je na Slika 17.



Slika 16 – Generisanje matrice incidencije iz grafa

**3.3.2 Matrica povezanosti**

Matrica povezanosti (eng. *Adjacency matrix*) je predstava grafa u vidu kvadratne matrice koja jednoznačno definiše izgled grafa opisujući koji čvorovi su susedni u grafu. Redovi i kolone u matrici predstavljaju čvorove u grafu, a elementi matrice definišu da li postoje grane koje direktno povezuju te čvorove. Dva čvora su susedni čvorovi ako imaju zajedničku granu koja ih povezuje.

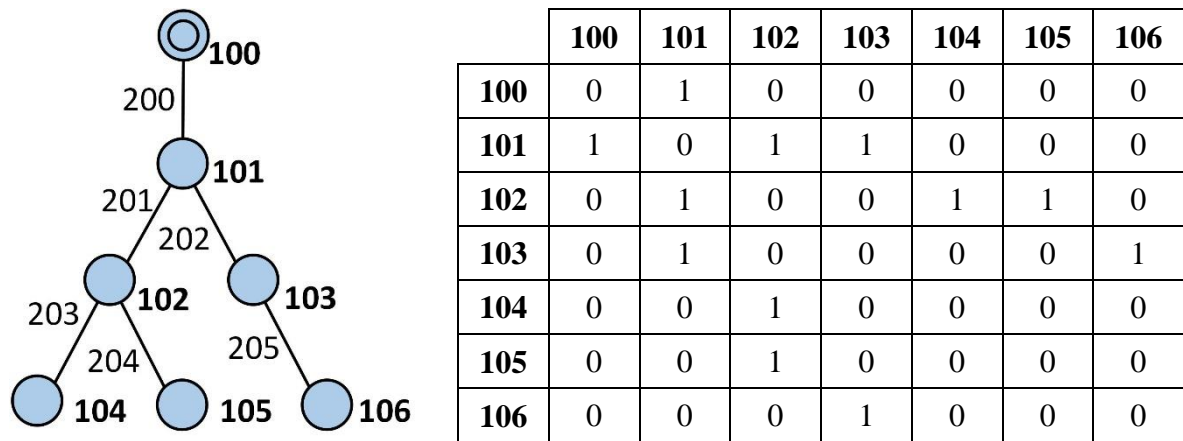
**Definicija**

Neka je matrica povezanosti  $A$  grafa  $G$ , koji sadrži  $M$  čvorova ( $v_1, v_2, \dots, v_M$ ) i  $N$  grana ( $e_1, e_2, \dots, e_N$ ). Neka je  $i$  indeks nekog reda i  $j$  indeks neke kolone u matrici  $A$ . Elementi  $a_{ij}$  matrice povezanosti definisani su na sledeći način:

- $n$  – broj grana koje direktno povezuju čvor  $v_i$  i čvor  $v_j$
- $0$  – ako čvor  $v_i$  i čvor  $v_j$  nisu direktno povezani nijednom granom

**Primer**

Primer kako se generiše matrica povezanosti za neusmereni graf prikazan je na Slika 17.



Slika 17 – Generisanje matrice povezanosti iz grafa

U nastavku ćemo sagledati kakve mogućnosti nam pružaju matrica incidencije i matrica povezanosti sa aspekta potreba izvršavanja topološke analize za elektrodistributivnu mrežu.

### 3.3.3 Upoređivanje matrice incidencije i matrice povezanosti

Za matricu incidencije i matricu povezanosti može se reći da koriste približno jednaku količinu memorije koja je potrebna za čuvanje podataka iz elektrodistributivne mreže. Poređenje memorijske kompleksnosti za ova dva tipa matrice je data u Tabela 3, gde je M ukupan broj čvorova i N ukupan broj grana u elektrodistributivnoj mreži.

Tabela 3 – Memorijska kompleksnost za matricu incidencije i matricu povezanosti

Matrica incidencije	Matrica povezanosti
$O(M \cdot N)$	$O(M^2)$

S obzirom da je broj čvorova i grana istog reda veličine, može se reći da je memorijska kompleksnost približno ista.

Tabela 4 prikazuje vremensku kompleksnost za najčešće operacije koje se vrše nad matricom incidencije i matricom povezanosti.

Tabela 4 – Vremenska kompleksnost za matricu incidencije i matricu povezanosti

Vremenska kompleksnost operacije	Matrica incidencije	Matrica povezanosti
Generisanje matrice iz grafa	$O(M \cdot N)$	$O(M^2)$
Izmena nekog elementa u matrici	$O(1)$	$O(1)$
Pretraga susednih čvorova od nekog čvora	$O(M \cdot N)$	$O(M)$
Provera da li su dva čvora susedna	$O(N)$	$O(1)$
Pretraga grana koje su incidentne nekom čvoru	$O(N)$	-
Provera da li je čvor incidentan grani	$O(1)$	-
Računanje stepena čvora	$O(N)$	$O(M)$

Kako je broj čvorova i grana u elektrodistributivnoj mreži sa aspekta kompleksnosti uporediv, može se zaključiti da su obe matrice podjednako performantne po pitanju generisanja matrice iz grafa, mogućnost osvežavanje matrice nakon promene topologije i računanja stepena čvorova. Matrica povezanosti nudi znatno efikasniju pretragu susednih čvorova i proveru da li su dva čvora susedna. Sa druge strane, matrica incidencije ima prednost u slučaju kada se pretražuju incidentne grane nekog čvora, jer matrica povezanosti ne sadrži tu informaciju. Dakle, može se zaključiti da svaka matrica ima neke svoje prednosti, a da se pogodnija matrica bira pre svega na osnovu konkretnog problema koji se rešava.

Sa aspekta topološke analize elektrodistributivne mreže najčešća (pa zbog toga i najbitnija operacija) je pretraga susednih čvorova. Upravo to je prevaga da se u modelovanju krene od matrice povezanosti kao osnove za čuvanje podataka. U nastavku ćemo detaljnije sagledati karakteristike matrice povezanosti za graf elektrodistributivne mreže.

### 3.3.4 Karakteristike matrice povezanosti za graf elektrodistributivne mreže

Matrice povezanosti grafova elektrodistributivnih mreža karakterišu velike dimenzije, što je posledica toga što grafovi elektrodistributivnih mreža sadrže veliki broj čvorova. Dimenzije matrice za elektrodistributivnu mrežu ističu prvi ogroman nedostatak matrice povezanosti – da je u tom standardnoj formi gotovo nemoguće čuvati i obrađivati podatke o elementima elektrodistributivne mreže koristeći savremenu tehnologiju.

Za graf elektrodistributivne mreže nije tipično da ima grana koje počinju i završavaju se u istom čvoru i zbog toga najčešće svi elementi koji se nalaze na dijagonali matrice povezanosti imaju nultu vrednost.

Za neusmerene grafove (kakav je i graf konektivnosti elektrodistributivne mreže) matrica povezanosti je simetrična u odnosu na svoju dijagonalu. Razlog tome je što se svaka veza između dva čvora predstavlja sa dva elementa matrice: jedan elemenat opisuje povezanost prvog čvora sa drugim, a drugi elemenat opisuje povezanost drugog čvora sa prvim. Može se reći da se jedna neusmerena grana koja povezuje dva čvora u grafu opisuje tako što se ralaže na dve usmerene grane.

Dva čvora su najčešće povezani preko jedne grane, tako da su uobičajne vrednosti elemenata matrice: 0 – ako čvorovi nisu susedni i 1 – ako čvorovi jesu susedni.

Matrica povezanosti elektrodistributivne mreže ima veliki broj elemenata čija vrednost je jednaka nuli, što je posledica velikog broja čvorova u elektrodistributivnoj mreži i relativno niskog stepena interkonektivnosti između tih čvorova. Uzrok male interkonektivnosti leži u strukturi elektrodistributivne mreže koja se zbog ekonomičnosti formira u vidu stabla, pa ne postoji direktna veza niti međusobno između individualnih potrošača niti između individualnih potrošača i prenosne mreže. Čvorovi su u elektrodistributivnoj mreži najčešće povezani sa 1-5 susednih čvorova.

Kako matrica povezanosti elektrodistributivne mreže ima izuzetno mali procenat elemenata koji imaju vrednost različitu od nule, ona spada u grupu retkih matrica (eng. *Sparse matrix*). Za retke matrice se mogu koristiti posebne tehnike koje prilikom memorisanja i operacija nad elementima matrice koriste prednosti retke strukture matrice.



### 3.4 Retka matrica i tehnike za njeno memorisanje

Retka matrica [44][45] predstavlja matricu koja ima izuzetno mali broj elemenata različitih od nule u odnosu na ukupan broj elemenata. Kako matrice mogu imati veoma različite dimenzije, ne postoji tačno definisan procenat nultih elemenata koji matrica mora da ima da bi se smatrala retkom. Osobina retkosti matrice izuzetno je važna za matrice koje imaju velike dimenzije, jer takve matrice najčešće nije moguće čuvati u memoriji i procesirati na standardan način. Zbog toga su razvijene posebne metode koje pri procesiranju i memorisanju koriste osobinu retkosti. Ove metode su u stručnoj literaturi poznate pod nazivom *tehnike retkih matrica*.

Iako postoji veliki broj različitih tehnika koje se koriste za memorisanje i procesiranje retkih matrica, sve ove tehnike imaju dve zajedničke karakteristike:

- Ne moraju da se čuvaju svi elementi iz matrice, već je dovoljno čuvati samo elemente koji su različiti od nule.
- Izvršavanje funkcija nad elementima retko matrice se ne vrši na standardan način, jer je zbog retkosti matrice moguće smanjiti ukupan broj operacija ili operacije pojednostaviti.

*Na primer: ukoliko želimo sabrati sve elemente jednog reda matrice, dovoljno je sabrati elemente koji su različiti od nule, jer sabiranje sa nulom ne utiče na rezultat.*

Razlog postojanja većeg broja tehnika može se objasniti činjenicom da ne postoji neka generalno najbolja tehnika za rad sa retkim matricama, već je za određeni problem koji se modeluje retkom matricom potrebno odabrati tehniku koja će biti najpogodnija za rešenje baš tog problema. Odluku bi, pre svega, trebalo doneti analizom sledećih zahteva:

- Da li je matrica simetrična u odnosu na dijagonalu?
- Kako će se pristupati elementima matrice?
  - Da li će se elementima matrice pristupati od prvog do poslednjeg elementa?
  - Da li će se pristupati elementima određenog reda/kolone matrice?
  - Da li će se pristupati direktno određenom elementu matrice?
- Da li je u toku rada potrebno omogućiti promene nad matricom?
  - Da li je potrebno menjati dimenzije matrice?
  - Da li je potrebno menjati vrednosti elemenata u matrici?

Za rešavanje problema u ovoj doktorskoj disertaciji koristiće se tehnika retkih matrica koja je u literaturi poznata pod nazivom *ulančana šema memorisanja*. U nastavku će biti opisana ova tehnika i biće dato objašnjenje zašto je baš ona prepoznata kao najpogodnija za ovo naučno istraživanje. Razumevanje kako ova tehnika funkcioniše preduslov je za razumevanje opredeljenja pri modelovanju koja su doneta u nastavku ovog poglavlja.

### 3.4.1 Ulančana šema memorisanja za retke matrice

Ulančana šema memorisanja predstavlja tehniku za retke matrice koja omogućava čuvanje u proizvoljnom redosledu elemenata matrice koji imaju vrednost različitu od nule. Kao i kod ostalih tehnika, elementi koji imaju vrednost nule se ne čuvaju. Za ovu tehniku karakteristično je ulančavanje elemenata matrice, tj. da jedan element čuva informaciju pozicije u memoriji gde se naredni element nalazi. Postoji više izvedbi ulančane šeme memorisanja (na primer: [44] i [45]). Kako nijedna od tih varijanti nije u potpunosti odgovarala potrebama topološke analize koja se razmatra u ovoj doktorskoj disertaciji, u toku naučnog istraživanja razvijena je nova varijanta ove tehnike.

Elementima matrice se pristupa po redovima. Čuva se pozicija prvog elementa svakog reda, te iteracija kroz elemente reda može svaki put početi od proizvoljnog reda. Iteracija kroz elemente nekog reda počinje od prvog elementa tog reda koji čuva poziciju drugog elementa u redu. Drugi čuva gde se nalazi treći, i tako do poslednjeg elementa u redu koji ima informaciju da nema više elemenata u tom redu. Upravo taj ulančani način pristupa elementima gde svaki element čuva poziciju narednog elementa u redu karakteriše ovu tehniku retkih matrica i zbog toga je i sadržan u samom nazivu tehnike. Može se primetiti da ovaj način ulančavanja elemenata podseća na implementaciju liste u programiranju, gde svaki član liste ima pokazivač na narednog člana, a poslednji član liste pokazuje na *null*.

Ulančana šema memorisanja koristi sledeće skalare i vektore za jednoznačno definisanje strukture matrice:

M	Red matrice (ukupan broj redova/kolona u matrici). Redovi i kolone u matrici se numerišu počevši od indeksa 0 do indeksa M-1.
N	Ukupan broj elemenata u matrici čija vrednost je različita od nule.
COUNT(m); m = {0, 1, ..., M - 1}	Za svaki red čuva informaciju koliko elemenata ima u tom redu.
IFIR(m) m = {0, 1, ..., M - 1}	Za svaki red čuva indeks prvog elementa reda u vektoru elemenata matrice.
VALUES(n) n = {0, 1, ... N - 1}	Čuva elemente matrice koji imaju vrednost različitu od nule. Elementi su poređani u proizvoljnom redosledu, nezavisno od toga u kom redu ili koloni se element matrice nalazi.
ICOL(n) n = {0, 1, ..., N - 1}	Za svaki element matrice čuva indeks njegove kolone. Sa vektorom vrednosti povezan je tako što se informacije vezane za određeni element nalaze na istom indeksu u vektoru.
INIR(n) n = {0, 1, ..., N - 1}	Za svaki element čuva indeks u vektoru elemenata matrice na kom se nalazi naredni element iz istog reda. Sa vektorom vrednosti povezan je tako što se informacije vezane određeni element nalaze na istom indeksu u vektorima.

Tabela 5 – Ulančana šema memorisanja: opis skalara i vektora

Rekonstrukcija matrice iz ulančane šeme memorisanja

U redu m se nalazi ukupno COUNT[m] elemenata. Informacije o prvom elementu m-tog reda se nalazi na indeksu n = IFIR[m] vektora vrednosti VALUES. Vrednost elementa je VALUES[n]. Isti indeks n se koristi da se pronađe kolona u kojoj se element nalazi i pozicija narednog elementa u redu m. Element se nalazi u ICOL[n] koloni. Naredni element u redu nalazi se na indeksu INIR[n] u vektoru VALUES. Ukoliko INIR[n] ima nevalidnu vrednost (-), to znači da nema više elemenata u tom redu.

**Primer**

Na Sliku 18 prikazan je primer slabo popunjene simetrične matrice.

0	4	0	0	5
0	0	0	1	0
0	0	0	2	0
0	5	0	0	3
0	0	0	7	0

M	=	5							
N	=	7							
COUNT	=	<table border="1"><tr><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td><td>1</td></tr></table>	2	1	1	2	1		
2	1	1	2	1					
IFIR	=	<table border="1"><tr><td>2</td><td>1</td><td>0</td><td>5</td><td>4</td></tr></table>	2	1	0	5	4		
2	1	0	5	4					
VALUES	=	<table border="1"><tr><td>2</td><td>1</td><td>4</td><td>5</td><td>7</td><td>5</td><td>3</td></tr></table>	2	1	4	5	7	5	3
2	1	4	5	7	5	3			
ICOL	=	<table border="1"><tr><td>3</td><td>3</td><td>1</td><td>4</td><td>3</td><td>1</td><td>4</td></tr></table>	3	3	1	4	3	1	4
3	3	1	4	3	1	4			
INIR	=	<table border="1"><tr><td>-</td><td>-</td><td>3</td><td>-</td><td>-</td><td>6</td><td>-</td></tr></table>	-	-	3	-	-	6	-
-	-	3	-	-	6	-			

Slika 18 – Primer matrice i njene odgovarajuće ulančane šeme memorisanja

Rekonstrukcija matrice:

- Matrica ima 5 redova i kolona ( $M=5$ ). Matrica sadrži 7 elemenata koji imaju vrednost različitu od nule ( $N=7$ ).

*Napomena: indeksi redova, kolona i vektora su numerisani od vrednosti 0. Nevalidna vrednost označena je sa -.*

- U 0. redu ima 2 elementa ( $COUNT[0] = 2$ ). Prvi element 0. reda nalazi se na indeksu 2 ( $IFIR[0] = 2$ ) u matrici VALUES. Prvi element ima vrednost 4 ( $VALUES[2] = 4$ ). Element se nalazi u koloni 1 ( $ICOL[2] = 1$ ). Naredni (drugi) element u 0. redu se nalazi na indeksu 3 ( $INIR[2] = 3$ ) u vektoru VALUES. Element ima vrednost 5 ( $VAL[3] = 5$ ) i nalazi se u koloni 4 ( $ICOL[3]=4$ ).
- U 1. redu ima 1 element ( $COUNT[1] = 1$ ). Taj element 1. reda nalazi se na indeksu 1 ( $IFIR[1] = 1$ ) u matrici VALUES. Element ima vrednost 1 ( $VALUES[1] = 1$ ). Element se nalazi u koloni 3 ( $ICOL[1]=3$ ).
- U 2. redu ima 1 element ( $COUNT[2] = 1$ ). Taj element 1. reda nalazi se na indeksu 0 ( $IFIR[2] = 0$ ) u matrici VALUES. Element ima vrednost 2 ( $VALUES[0] = 2$ ). Element se nalazi u koloni 3 ( $ICOL[0]=3$ ).
- U 3. redu ima 2 elementa ( $COUNT[3] = 2$ ). Prvi element 3. reda nalazi se na indeksu 5 ( $IFIR[3] = 5$ ) u matrici VALUES. Prvi element ima vrednost 5 ( $VALUES[5] = 5$ ). Element se nalazi u koloni 1 ( $ICOL[5]=1$ ). Naredni (drugi) element u 3. redu se nalazi na indeksu 6 ( $INIR[3] = 6$ ) u vektoru VALUES. Element ima vrednost 3 ( $VALUES[6] = 3$ ) i nalazi se u koloni 4 ( $ICOL[6]=4$ ).

- U 4. redu ima 1 element ( $\text{COUNT}[4] = 1$ ). Element se nalazi na indeksu 4 ( $\text{IFIR}[4] = 4$ ) u matrici VALUES. Prvi element ima vrednost 7 ( $\text{VALUES}[4] = 7$ ). Element se nalazi u koloni 3 ( $\text{ICOL}[4] = 3$ ).

### 3.4.2 Memorijsko zauzeće ulančane šeme memorisanja

Koristeći ulančanu šemu za matricu dimenzija M i koja ima N elemenata različitih od nule potrebno je:  $2+2M+3N$  memorijskih lokacija.

#### 3.4.2.1 Poređenje sa standardnom šemom memorisanja za matrice

Odnos memorijskog prostora potrebnog za ulančanu šemu u odnosu na memorijski prostor potreban za standardno memorisanje matrice:

$$r = \frac{2 + 2M + 3N}{M^2}$$

Na osnovu relacije se može zaključiti da je ušteda memorijskog prostora raste sa povećanjem dimenzija elektrodistributivne mreže.

#### Primer

Neka elektrodistributivna mreža ima 1.000 čvorova i 990 grana. Tada je odnos memorijskog zauzeća između ulančane šeme memorisanja i standardnog memorisanja matrice:

$$M = 1.000, N = 2 \times 990 = 1.980$$
$$r = \frac{2 + 2 * 1.000 + 3 * 1.980}{1.000^2} \approx 0.8\%$$

To znači da je u ovom primeru za ulančanu šemu memorisanja bilo potrebno svega 0.8% u odnosu na memorijski prostor koji je potreban za standardno memorisanje matrice istih dimenzija.

Može se zaključiti da ulančana šema memorisanja za retke matrice može rešiti problem ogromnih memorijskih zahteva koje ima standardna šema memorisanja za matricu povezanosti elektrodistributivne mreže.

### 3.4.2.2 Poređenje sa redoslednom šemom memorisanja za retke matrice

Redosledna šema memorisanja omogućava čuvanje elemenata matrice isključivo prateći njihov redosled u matrici. Za memorisanje koristi skalare  $M$  i  $N$  i vektore kumulativne sume broj elemenata po redu  $CUM(m)$ , vrednosti  $VALUE(n)$ , kolona  $ICOL(n)$ , gde je  $m = \{0, \dots, M-1\}$  i  $n = \{0, \dots, N-1\}$ . U odnosu na redoslednu šemu memorisanja, ulančana šema memorisanja koristi dva vektora ulančavanja IFIR i INIR više.

Možemo izračunati za koliko je u procentima veće zauzeće memorije ulančane šeme u odnosu na redoslednu šemu.

$$r = \frac{\frac{2 + 2M + 3N}{M^2}}{\frac{2 + M + 2N}{M^2}} - 100\% = \frac{2 + 2M + 3N}{2 + M + 2N} - 1$$

$$r = \frac{M + N}{2 + M + 2N} + \frac{2 + M + 2N}{2 + M + 2N} - 1$$

$$r = \frac{M + N}{2 + M + 2N}$$

#### Primer

Neka elektrodistributivna mreža ima 1.000 čvorova i 990 grana. Tada je odnos memorijskog zauzeća između ulančane šeme memorisanja i redosledne šeme memorisanja:

$$M = 1.000, N = 2 \times 990 = 1.980$$

$$r = \frac{1.000 + 990}{2 + 1.000 + 2 \times 990} \approx 67\%$$

To znači da je u ovom primeru za ulančanu šemu memorisanja bilo potrebno 67% više memorijskih lokacija u odnosu na memorijski prostor koji je potreban za memorisanje matrice korišćenjem redosledne šeme memorisanja.

Sa dva dodatna vektora ulančavanja (IFIR i INIR) je plaćena cena fleksibilnosti da se elementi mogu memorisati i da se elementima može pristupiti u proizvoljnom redosledu. Ta fleksibilnost dolazi do izražaja pri pretrazi grafa elektrodistributivne mreže, osvežavanju matrice nakon promene topologije i pri dodavanju nove opreme u elektrodistributivnu mrežu.

### 3.4.3 Procesiranje izmena retke matrice

Kako se elementi čuvaju u redosledu koji ne zavisi od njihove pozicije u redu ili koloni, ulančana šema memorisanja retkih matrica omogućava veliku fleksibilnost pri promeni strukture matrice u poređenju sa redoslednom šemom memorisanja retkih matrica.

### 3.4.3.1 Dodavanje novog elementa u matricu

Prilikom dodavanja novog elementa u matricu nije potrebno vršiti pomeranja postojećih elemenata, jer su elementi u matrici sačuvani u proizvoljnom redu. Da bi se novi element dodao u matricu potrebno je izvršiti par jednostavnih korekcija skalara i vektora koji se koriste za memorisanje retke matrice.

Postupak korekcije:

- Skalar N se uvećava za jedan, jer je dodat novi element u matricu.
- Vektor COUNT se inkrementuje na poziciji koja odgovara indeksu reda u koji se element dodaje, jer se uvećao broj elemenata u tom redu.
- Vrednost elementa se dodaje na prvu slobodnu poziciju u vektoru VALUES.
- Na istu poziciju se u vektoru ICOL dodaje vrednost koja definiše indeks kolone novog elementa.
- Na istu poziciju u vektoru INIR se dodaje pozicija iz vektora VALUES gde se nalazi naredni element u istom redu. Ukoliko je novododati element poslednji, onda se za vrednost stavlja nevalidna vrednost (-) kako bi se označilo da je to poslednji element u redu.
- Ukoliko je element prvi u redu, osveži se vektor IFIR kako bi čuvao indeks novog elementa kao prvog elementa iz tog reda.
- Ukoliko novododati element nije prvi u redu, potrebno je promeniti vrednost vektora INIR na poziciji na kojoj se nalazi prethodni element iz tog reda, kako bi taj prethodni element imao informaciju o narednom elementu u redu.

#### Primer

U matricu sa Slika 18 dodaje se novi element sa vrednošću 8 u red 4 i kolonu 0. Slika 19 prikazuje postupak korekcije skalara i vektora. Memorijske lokacije (6 lokacija) koje su izmenjene dodavanjem novog elementa su prikazane podebljanim fontom sa plavom bojom.

0	<b>4</b>	0	0	<b>5</b>
0	0	0	<b>1</b>	0
0	0	0	<b>2</b>	0
0	<b>5</b>	0	0	<b>3</b>
<b>8</b>	0	0	<b>7</b>	0

$$M = 5$$

$$N = \mathbf{8}$$

$$\text{COUNT} = \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline 2 & 1 & 1 & 2 & \mathbf{2} \\ \hline \end{array}$$

$$\text{IFIR} = \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline 2 & 1 & 0 & 5 & \mathbf{7} \\ \hline \end{array}$$

$$\text{VALUES} = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline 2 & 1 & 4 & 5 & 7 & 5 & 3 & \mathbf{8} \\ \hline \end{array}$$

$$\text{ICOL} = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline 3 & 3 & 1 & 4 & 3 & 1 & 4 & \mathbf{0} \\ \hline \end{array}$$

$$\text{INIR} = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline - & - & 3 & - & - & 6 & - & \mathbf{4} \\ \hline \end{array}$$

Slika 19 – Dodavanje novog elementa pomoću ulančane šeme memorisanja

### 3.4.3.2 Dodavanje novog reda u matricu

U toku rada moguće je veoma efikasno menjati dimenzije matrice, tj. dodavati nove redove. Novi redovi se uvek dodaju na kraj.

Postupak korekcije:

- Skalar M se uvećava za jedan, jer je povećan ukupan broj redova.
- Na prvoj slobodnoj poziciji vektora COUNT se postavlja nula, pošto još uvek nema elemenata u novododatom redu.
- Na istoj slobodnoj poziciji se u vektoru IFIR postavlja vrednost nevalidnog indeksa (-), pošto još uvek nema elemenata u novododatom redu.

#### Primer

U matricu sa Slika 18 dodaje se novi prazan red. Slika 20 prikazuje postupak korekcije skalara i vektora. Memorijske lokacije (3 lokacije) koje su izmenjene dodavanjem novog reda su prikazane podebljanim fontom sa plavom bojom.

0	<b>4</b>	0	0	<b>5</b>	<b>0</b>
0	0	0	<b>1</b>	0	<b>0</b>
0	0	0	<b>2</b>	0	<b>0</b>
0	<b>5</b>	0	0	<b>3</b>	<b>0</b>
0	0	0	<b>7</b>	0	<b>0</b>

M	=	<b>6</b>							
N	=	7							
COUNT	=	<table border="1" style="display: inline-table;"><tr><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td><td>1</td><td><b>0</b></td></tr></table>	2	1	1	2	1	<b>0</b>	
2	1	1	2	1	<b>0</b>				
IFIR	=	<table border="1" style="display: inline-table;"><tr><td>2</td><td>1</td><td>0</td><td>5</td><td>4</td><td><b>-</b></td></tr></table>	2	1	0	5	4	<b>-</b>	
2	1	0	5	4	<b>-</b>				
VALUES	=	<table border="1" style="display: inline-table;"><tr><td>2</td><td>1</td><td>4</td><td>5</td><td>7</td><td>5</td><td>3</td></tr></table>	2	1	4	5	7	5	3
2	1	4	5	7	5	3			
ICOL	=	<table border="1" style="display: inline-table;"><tr><td>3</td><td>3</td><td>1</td><td>4</td><td>3</td><td>1</td><td>4</td></tr></table>	3	3	1	4	3	1	4
3	3	1	4	3	1	4			
INIR	=	<table border="1" style="display: inline-table;"><tr><td>-</td><td>-</td><td>3</td><td>-</td><td>-</td><td>6</td><td>-</td></tr></table>	-	-	3	-	-	6	-
-	-	3	-	-	6	-			

Slika 20 – Dodavanje novog reda pomoću ulančane šeme memorisanja

Interesantno je navesti da dodavanje nove kolone u matricu ne menja izgled skalara i vektora koji se koriste za ulančanu šemu memorisanja.

### 3.4.4 Vremenska kompleksnost operacija

U ovom poglavlju biće sagledano kako specifičan način memorisanja koji ulančana šema koristi za retku matricu utiče na performantnost operacije koje se vrše nad matricom povezanosti. U Tabela 6 upoređena je vremenska kompleksnost najvažnijih operacija za standardan način memorisanja i za ulančanu šemu memorisanja za matricu povezanosti koja je retka.



Tabela 6 – Poređenje vremenske kompleksnost standardne i ulančane šeme memorisanja matrice povezanosti

Vremenska kompleksnost operacije	Standardno memorisanje	Ulančana šema memorisanja
Generisanje matrice iz grafa	$O(M^2)$	$O(N)$
Izmena nekog elementa u matrici	$O(1)$	$O(1)$
Pretraga susednih čvorova od nekog čvora	$O(M)$	$O(1)$
Provera da li su dva čvora susedna	$O(1)$	$O(1)$
Računanje stepena čvora	$O(M)$	$O(1)$

Za retke matrice velikih dimenzija znatno je ubrzano generisanje matrice kod ulančane šeme memorisanja. Izmena elemenata matrice je jednostavnija kod standardnog načina memorisanja gde se može na osnovu indeksa reda i kolone direktno izmeniti element u matrici. Kod ulančane šeme memorisanja (iako je ista vremenska kompleksnost) potrebno je relativno mali broj korekcija vektora i to je cena koju mora platiti ulančana šema zato što memoriše samo elemente koji imaju vrednost različitu od nule.

Ulančana šema memorisanja za matricu povezanosti je omogućila smanjenje vremenske kompleksnosti najvažnije operacije pretrage susednih čvorova. Kako se pretraga suseda nekog čvora svodi na pronalaženje svih elemenata u redu tog čvora koji imaju vrednost različitu od nule, ulančana šema memorisanja retkih matrica tu koristi svoju prednost svoje strukture. Kako ulančana šema memorisanja čuva samo elemente različite od nule, ona (za razliku od postupka kod standardnog načina memorisanja) ne mora da proverava vrednosti svakog od elemenata u redu. Isti slučaj je zaključak i za računanje stepena čvorova.

Matrica povezanosti u kombinaciji sa ulančanom šemom memorisanja pružila je mogućnost efikasnog čuvanja i dobavljanja informacija o konektivnosti elektrodistributivne mreže. Ono što je ostao kao nedostatak sa aspekta topološke analize je to što sačuvane informacije ne sadrže više detalja, na primer koja grana povezuje susedne čvorove i da li je ta grana aktivna u trenutku posmatranja. U narednom poglavlju biće predložen novi model zasnovan na ideji matrice povezanosti i ulančane šeme njenog memorisanja, koji će pokušati da unapredi strukturu matrice povezanosti kako bi se rešili prethodno navedeni nedostaci.

### 3.5 Matrični model

U prethodnim poglavljima smo videli da je moguće koristiti različite reprezentacije za predstavljanje čvor-grana modela. Različite reprezentacije su detaljno analizirane kako bi se odabrala forma koja bi bila najbolje rešenje sa aspekta topološke analize elektrodistributivne mreže. Kako postojeće forme nisu u potpunosti bile pogodne za kreiranje jednog sveobuhvatnog rešenja za topološku analizu, predložena je nova forma koja je u toku ovog naučnog istraživanja nazvana *matrični model*. Ovaj naziv će se koristiti na dalje u ovom radu kad god bude navođena forma u kojoj je modelovana i memorisana matematička apstrakcija elektrodistributivne mreže.

Matrični model sadrži sve podatke koji su potrebni da se jednoznačno definiše konektivnost i topologija jedne elektrodistributivne mreže. Ova model je razvijen na osnovnoj ideji strukture matrice povezanosti. Za razliku od matrice povezanosti koja opisuje susednost čvorova tako što elementi matrice definišu broj grana koje povezuje određena dva čvora, u matričnom modelu se za vrednost elementa matrice (umesto broja) koristi entitet povezanosti koji nosi sve neophodne informacije da se opiše veza između dva čvora. Glavna informacija koju nosi entitet je identifikator grane koja povezuje dva susedna čvora. Grana ima atribut *IsActive* koji je tipa boolean-a i definiše da li grana aktivna tj. da li u trenutku posmatranja postoji veza između čvorova koji se nalaze na krajevima grane. Za čuvanje elemenata ove retke matrice koristi se ulančana šema memorisanja, čija efikasnost je analizirana u prethodnim poglavljima.

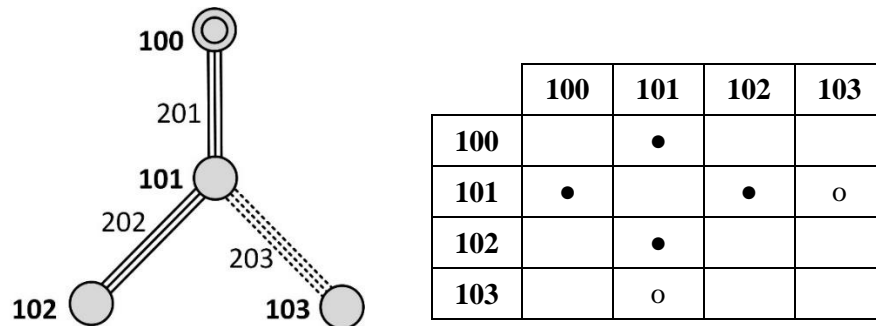
Ideja matričnog modela realizovana je u dve varijante - za uravnotežene i za neuravnotežene elektrodistributivne mreže. Implementacija za obe varijante je zajednička samo se inicijalizuje na različite načine kako bi se optimizovalo korišćenje memorije za svaki tip elektrodistributivne mreže. Ipak, zbog lakšeg razumevanja čitalaca svaka varijanta će biti opisana zasebno uz odgovarajuće primere.

#### 3.5.1 Matrični model uravnoteženih elektrodistributivnih mreža

U varijanti matričnog modela za uravnotežene mreže, jedan red (kolona) iz matrice odgovara jednom čvoru. Elementi matrice opisuju povezanost dva čvora u čijim redovima i kolonama se nalaze. Pojednostavljeno posmatrano, element matrice opisuje granu koja povezuje čvorove koji se nalaze na njenim krajevima. Svakom čvoru iz grafa je dodeljen po jedan indeks reda (kolone). Indeks nultog reda (i kolone) je rezervisan za modelovanje uzemljenja, dok se ostali indeksi dodeljuju od čvora sa najmanjim identifikatorom ka najvećem.

Primer trivijalnog grafa uravnotežene elektrodistributivne mreže prikazan je na levom delu Slika 21. Sa tri pune linije su prikazane trofazne grane koje povezuju dva čvora, dok su sa tri isprekidane linije prikazane trofazne grane koje trenutno ne povezuju čvorove (prekidačka oprema

je otvorenom stanju). Odgovarajući matrični model prikazan je na desnom delu Slika 21. Elementi matrice su pojednostavljeno prikazani sa punim kružićem (●) u slučaju da je grana koja povezuje dva čvora aktivna i praznim kružićem (o) u slučaju da grana nije aktivna (prekidačka oprema koja je modelovana granom je otvorena u momentu posmatranja).



Slika 21 – Graf uravnotežene mreže i njegov matrični model

Neophodno je obezbediti vezu između indeksa red (ili kolone) i identifikatora čvora kako bi se znalo koji red (kolona) odgovara kom čvoru. Primer mapiranja za graf sa Slika 21 dat je u Tabela 7.

Tabela 7 – Mapiranja čvorova na indekse redova matrice za uravnotežene mreže

<b>Ključ (id + faznost)</b>	<b>Vrednost (indeks)</b>
100 : ABC	1
101 : ABC	2
102 : ABC	3

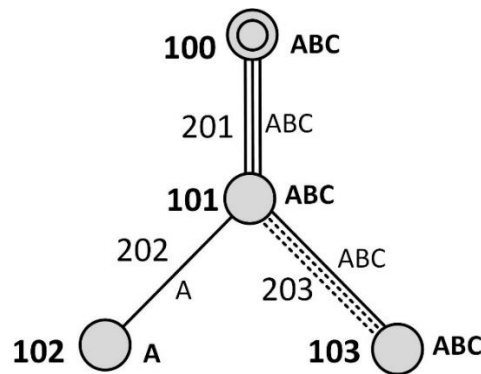
### 3.5.2 Matrični model neuravnoteženih elektrodistributivnih mreža

Matrični model za neuravnotežene elektrodistributivne mreže je dizajniran na taj način da omogući informacije o susednosti čvorova zasebno za svaku pojedinačnu fazu. Ideja je bila prihvatiti činjenicu da svaka faza može u neuravnoteženoj elektrodistributivnoj mreži imati nezavisnu putanju u odnosu na druge faze. Bitno je da model podrži takve topološke slučajeve, jer u suprotnom oni u nekim svojim specifičnijim slučajevima mogu biti izuzetno nezgodni pa čak i nerešivi za mnoge postojeće metode koje se bave topološkom analizom. Prema tome, graf trofazne elektrodistributivne mreže razložen je po fazama kako bi se topološkoj analizi omogućilo da može nezavisno procesirati graf po pojedinačnim fazama.

Red (ili kolona) matrice predstavlja jednu fazu (npr. A, B, C ili N) nekog čvora iz grafa elektrodistributivne mreže, dok element matrice opisuje povezanost dva čvora preko određene

faze. Svakom čvoru iz grafa se dodeljuje uzastopni indeksi redova (kolona), gde broj dodeljenih indeksa odgovara faznosti čvora koji se modeluje. Tako na primer, monofazni čvorovi dobijaju na korišćenje jedan indeks, dvofazni dva, a trofazni tri indeksa. Kao i kod varijante matričnog modela za uravnotežene mreže, nulti indeks je rezervisan za modelovanje zemlje (uzemljenja).

Primer trivijalnog grafa neuravnotežene elektrodistributivne mreže prikazan je na gornjem delu Slika 22. Na grafu su punom linijom prikazane aktivne faze grane, dok su isprekidanom linijom prikazane faze grane koje nisu aktivne (otvorena je određena faza prekidača koji je modelovan granom). Odgovarajući matrični model prikazan je na donjem delu Slika 22. Elementi matrice su pojednostavljeno prikazani sa punim kružićem (●) u slučaju da je grane aktivna u fazi koja povezuje dva čvora i praznim kružićem (○) u slučaju da grana u posmatranoj fazi nije aktivna.



		100			101			102	103		
		A	B	C	A	B	C	A	A	B	C
100	A				●						
	B					●					
	C						●				
101	A	●						●	○		
	B		●							○	
	C			●							●
102	A				●						
103	A				○						
	B					○					
	C						●				

Slika 22 – Graf neuravnotežene mreže i njegov matrični model

Realizovano je mapiranje koje omogućava da se na osnovu identifikatora čvora i neke njegove faze pronađe odgovarajući indeks reda (kolone) u matrici. Primer je dat u Tabela 8.

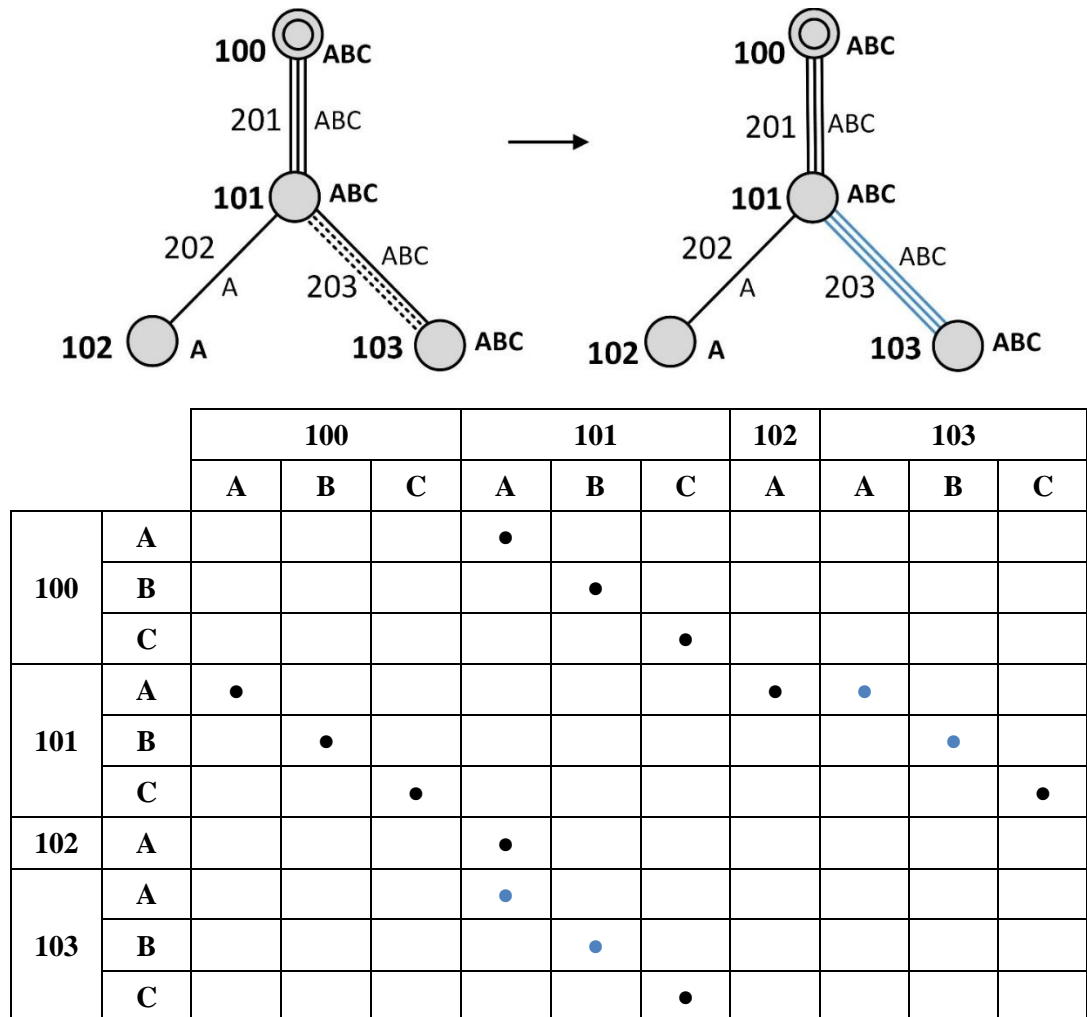
Tabela 8 – Mapiranje čvorova na indekse redova matrice za neuravnotežene mreže

<b>Ključ (id : faznost)</b>	<b>Vrednost (indeks)</b>
100 : A	1
100 : B	2
100 : C	3
101 : A	4
101 : B	5
101 : C	6
102 : A	7
103 : A	8
103 : B	9
103 : C	10

### 3.5.3 Promena stanja prekidačke opreme

Matrični model dizajniran je tako da je model veoma jednostavno osvežiti ukoliko se desi promena stanja prekidačke opreme. U tom slučaju dovoljno je pronaći odgovarajuću granu i osvežiti njeno polje *IsActive* na novu vrednost za faze na koje je uticala promena.

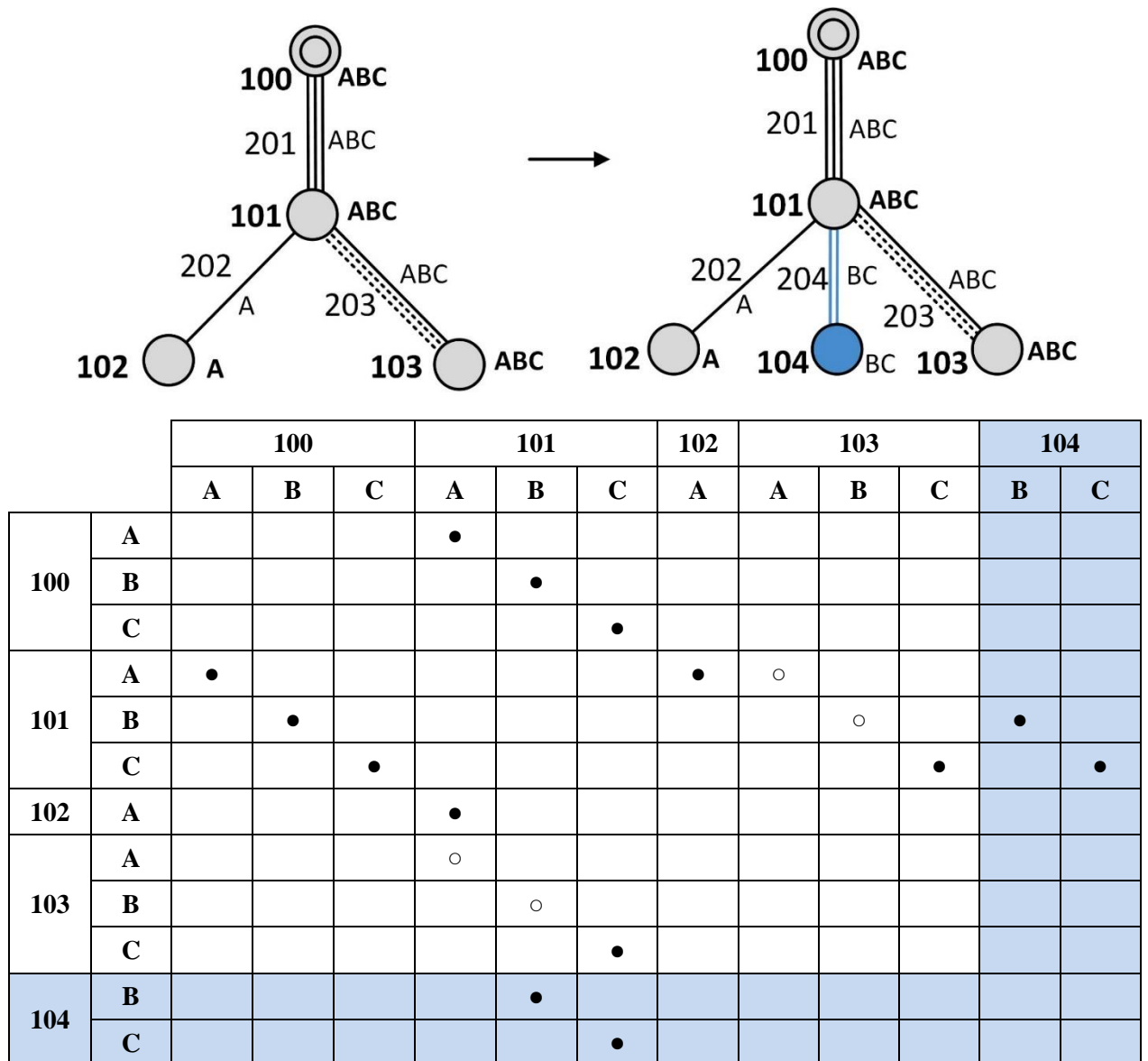
Primer je dat na Slika 23 za neuravnotežene mreže. Zatvoren je prekidač modelovan granom 203 koji je bio otvoren u A i B fazi. U ovom konkretnom slučaju bilo je dovoljno promeniti 4 memorijske lokacije koje određuju da je grana od sada aktivna u A i B fazi (2 smeru \* 2 faze).



Slika 23 – Primer izmene matričnog modela nakon promene stanja prekidača

### 3.5.4 Dodavanje novih elemenata u matrični model

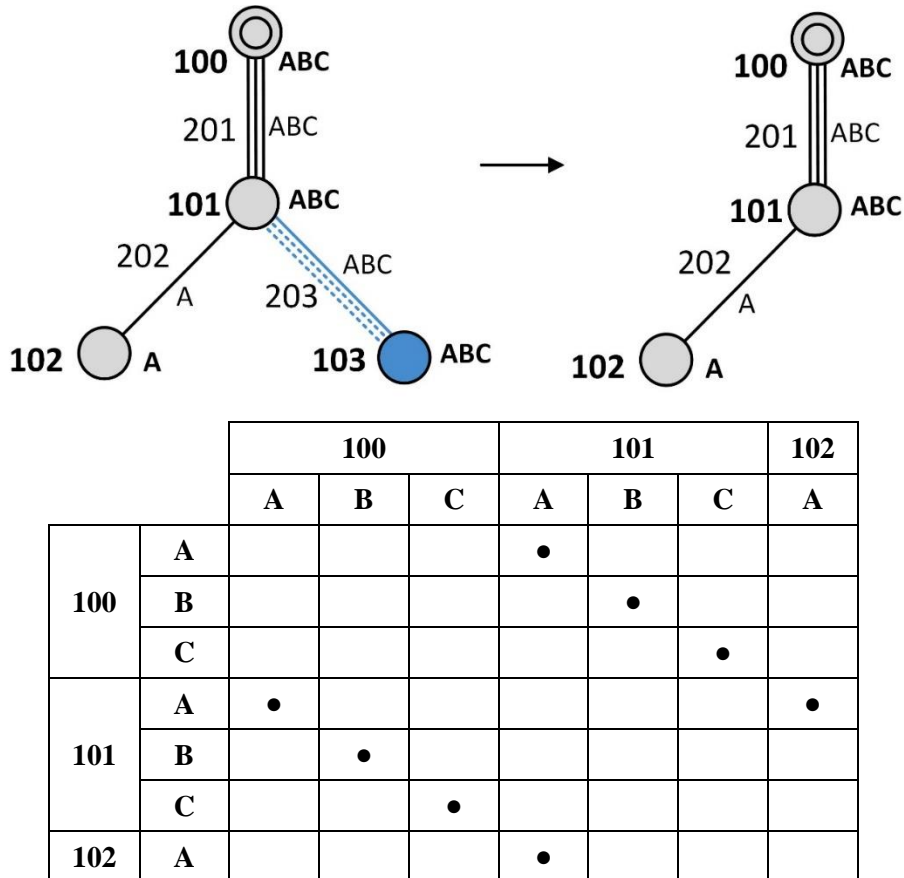
Ulančana šema memorisanja koja se koristi za čuvanje matričnog modela omogućava fleksibilnost pri dodavanju/uklanjanju elemenata iz grafa elektrodistributivne mreže. Primer sa trivijalnom neuravnoteženom mrežom je dat na Slika 24. Za konkretan slučaj bilo je potrebno dodati novi red u matricu i 4 nova elementa. Postupak za dodavanje novih elemenata i redova u retku matricu opisan je u poglavljima 3.4.3.1 i 3.4.3.2.



Slika 24 – Primer dodavanja novog elementa u matrični model

### 3.5.5 Uklanjanje elementa iz matričnog modela

Ulančana šema, koja se koristi za memorisanje matrice, omogućava jednostavno uklanjanje elemenata (grana i čvorova) iz matričnog modela. Primer uklanjanja elementa sa trivijalne neuravnotežene mreže je dat na slici Slika 25.



Slika 25 – Primer uklanjanja elementa iz matričnog modela

### 3.5.6 Modelovanje privremenih elemenata

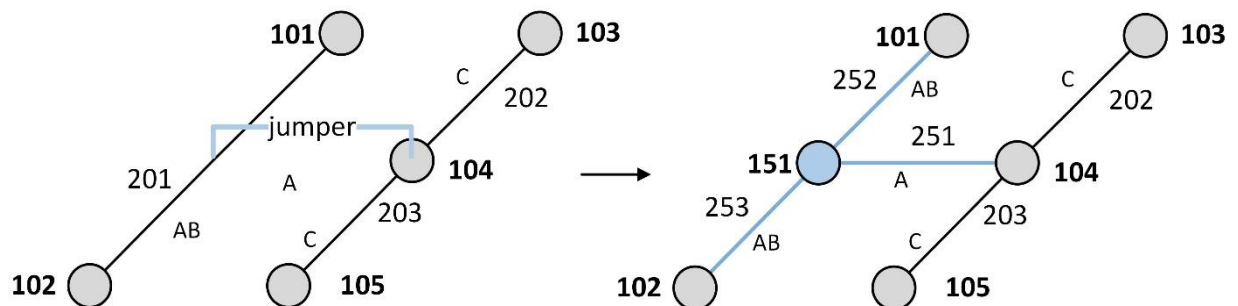
Privremeni elementi omogućavaju da se u toku rada kratkoročno promeni konektivnost elektrodistributivne mreže. Iako se promene konektivnosti mreže vrše na nivou čvor-prekidač modela, njih je lako primeniti na čvor-grana model, jer je je u potpunosti očuvana veza između elemenata čvor-prekidač modela i elemenata iz čvor-grana modela. Pored čvorova i grana koji se koriste za modelovanje privremenih elemenata, ponekad je potrebno dodati i po koji fiktivan čvor ili fiktivnu granu. Ovi fiktivni topološki elementi omogućavaju da se sačuva forma grafa koja nalaže da dva čvora ne mogu biti direktno povezana (potrebna je grana između ta dva čvora) i da dve grane ne mogu biti direktno povezane (potreban je čvor između te dve grane). Za modelovanje privremenih elemenata od velikoj značaja je fleksibilnost matričnog modela koja omogućava jednostavno dodavanje novih elemenata u model i uklanjanje postojećih elemenata iz matričnog modela.



### a) Privremena spojnica

Privremena spojnica (eng. *Temporary Jumper*) se modeluje granom. Ukoliko spojnica povezuje elemente u elektrodistributivnoj mreži koji su modelovani čvorovima, tada se spojnica može direktno dodati u čvor-grana model. Ukoliko je potrebno spojnicom povezati elementat koji je modelovan granom, u tom slučaju je prethodno neophodno dodati jedan fiktivan čvor u čvor-grana model.

Slika 26 prikazuje interesantan primer u kome je deo mreže nacrtan na desnoj strani grafa (elementi: 103, 202, 104, 203, 105) ostao bez napajanja i potrebno je privremeno obezbediti napajanje tom delu mreže. Jedini element elektrodistributivne mreže koji se nalazi u blizini i sa kog je moguće dobiti priključak je grana 201. Ono što je specifično da ta grana 201 ima katalošku faznost AB, a kataloška faznost dela mreže koji je ostao bez napajanja je C. Operator elektrodistributivne mreže je uvideo da postoji mogućnost da se pomoću privremene spojnice sa A faze dvofazne grane 201 dopremi usluga ka monofaznom čvoru 104 čija kataloška faznost je bila C.



		101		102		103	104	105	151
		A	B	A	B	C	C	C	A
101	A			○					●
	B				○				
102	A	○							●
	B		○						
103	C						●		
104	C					●		●	●
105	C						●		
151	A	●		●			●		

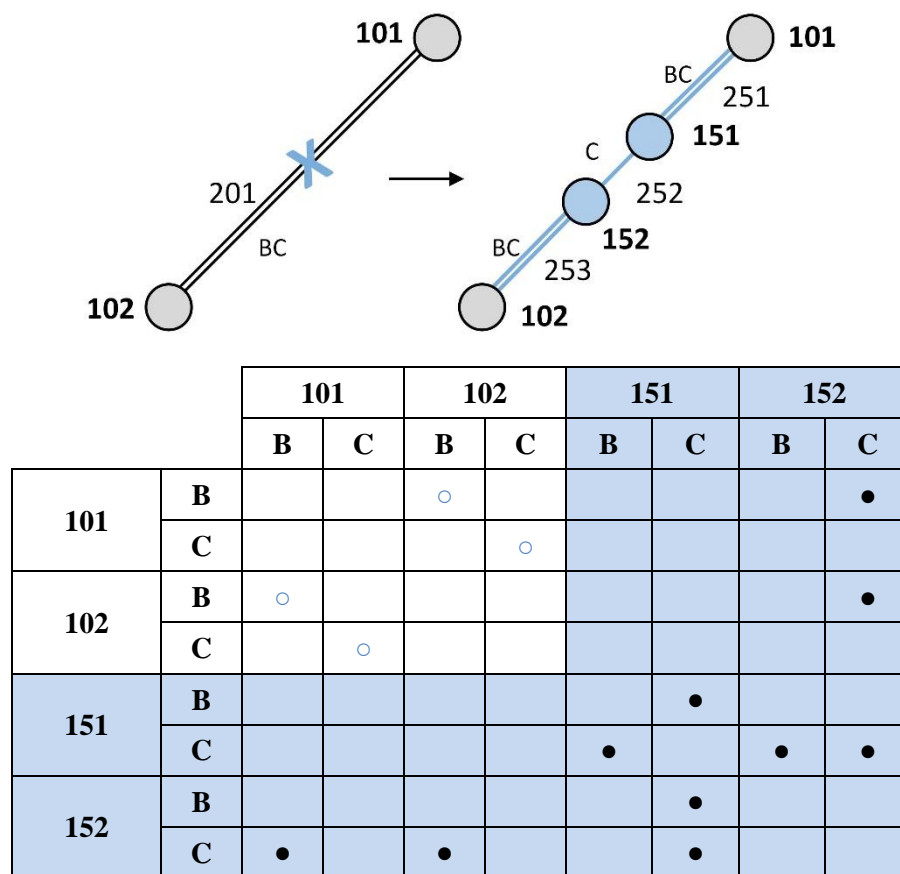
Slika 26 – Dodavanje privremene spojnice u matični model

Kako spojnica na oba svoja kraja mora imati po jedan čvor, bilo je potrebno za početak umetnuti jedan dvofazni fiktivan čvor 151 koji će podeliti granu 201 na dva dela. Zatim je spojnica modelovana monofaznom granom 251 i jedan kraj spojnice je priključen na A fazu fiktivnog

dvofaznog čvora 151, a drugi kraj spojnice na C fazu monofaznog čvora 104. U tabeli koja prikazuje izgled matričnog modela su sa plavom bojom označene izmene koje je bilo potrebno napraviti da se podrži jedan ovakav neobičan slučaj. Ako zamislimo da elektrodistributivna mreža iz primera ima hiljade čvorova (redova i kolona), onda se može zaključiti da su promene matričnog modela zanemarljivo male u odnosu na dimenzije samog modela.

### b) Privremeni prekid

Privremeni prekid se modeluje podelom grane na dva dela između kojih se dodaje grana čije stanje simulira delimičan ili potpun prekid. Slika 27 prikazuje primer privremenog delimičnog prekida, gde je vod modelovan granom 201 kataloške faznosti BC privremeno prekinut u B fazi.



Slika 27 – Dodavanje privremenog prekida u matrični model

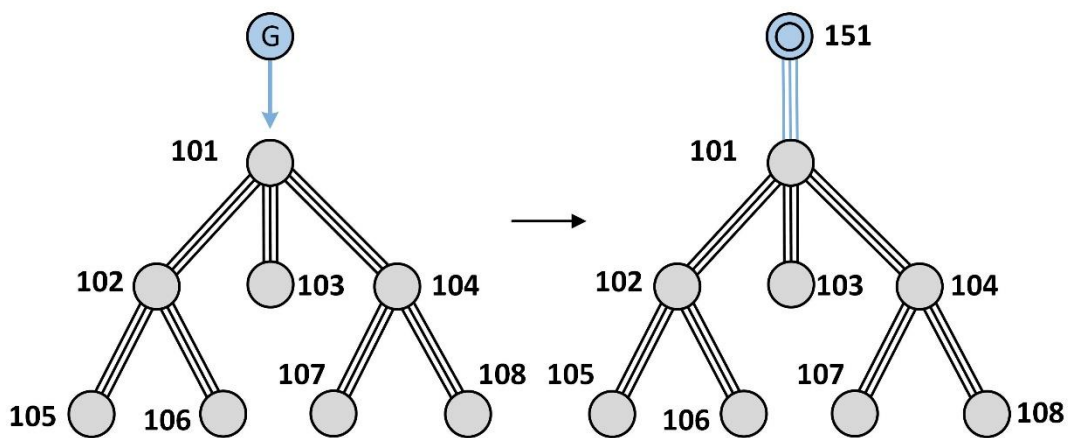
Grana 201 podeljena je na dve nove grane 251 i 253 koje su iste kataloške faznosti (BC) kao i grana 201. Na krajeve novih grana dodati su novi fiktivni čvorovi 151 i 152. Delimičan prekid je modelovan dodatnom granom 252 koja spaja fiktivne čvorove 151 i 152 u fazi C, pošto je grana 201 prekinuta samo u B fazi.

### c) Privremena prekidačka oprema

Privremena prekidačka oprema se modeluje na identičan način kao i privremeni prekid, sem što u toku korišćenja može da se menja stanje prekidačke opreme.

### d) Privremeni generator

Privremeni generator se modeluje kao korenski čvor koji se pomoću dodatne grane povezuje na neki postojeći čvor iz grafa elektrodistributivne mreže. Na Slika 28 dat je primer dodavanja privremenog generatora koji može da radi u režimu ostrva u graf uravnotežene elektrodistributivne mreže. Generator je modelovan novim korenskim čvorom 151 koji je u graf priključen na čvor 101 preko dodatne grane.



	101	102	103	104	105	106	107	108	151
101		•	•	•					•
102	•				•	•			
103	•								
104	•						•	•	
105		•							
106		•							
107				•					
108				•					
151	•								

Slika 28 – Dodavanje privremenog generatora u matični model

## 4. Topološka analiza

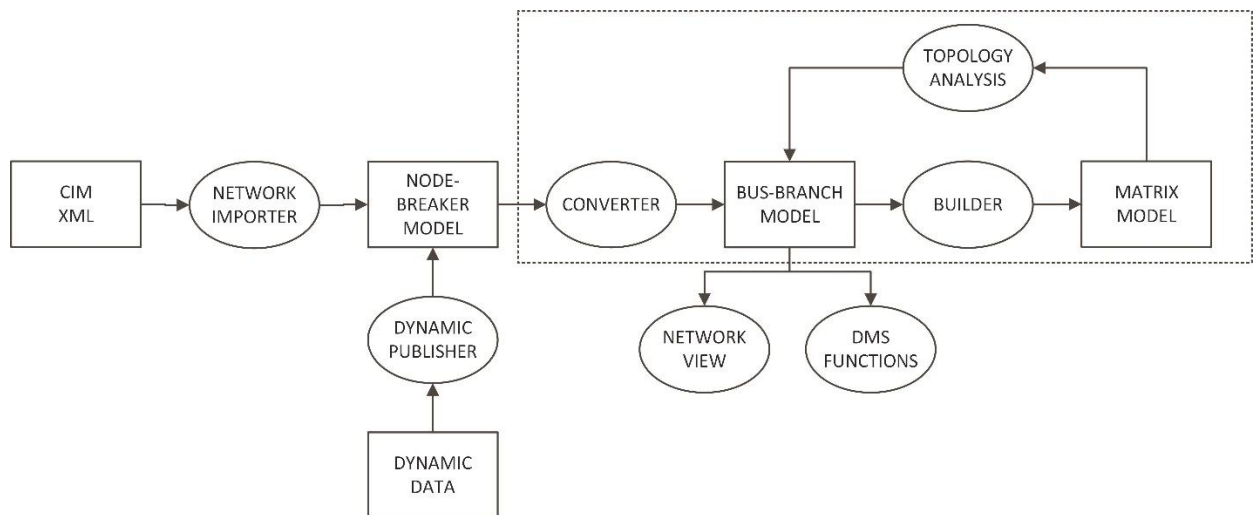
Nakon što je sva relevantna fizička oprema elektrodistributivne mreže modelovana pomoću čvorova i grana, dobijen je model u vidu grafa koji je pogodan za efikasnu analizu topologije. U ovom poglavlju biće opisano kako se radi analiza grafa elektrodistributivne mreže da bi se odredili topološki podaci. Na početku poglavlja biće opisana arhitektura kompletnog rešenja za topološku analizu. Nakon toga će biti detaljno objašnjeno šta predstavljaju određeni topološki podaci koji se računaju i na koji način se računaju. Na kraju poglavlja biće opisane topološke funkcije za iscrtavanje putanje.

### 4.1 Arhitektura rešenja za topološku analizu

Najvažnije komponente predloženog rešenja za modelovanje elektrodistributivne mreže i njenu topološku analizu prikazane su na Slika 29 i ilustrovano je kako te komponente međusobno sarađuju. Programsko rešenje razvijeno je pomoću C# programskog jezika i .NET Framework okruženja.

Čvor-prekidač model formira se na osnovu sadržaja CIM datoteka (u kojima je opisana konektivnost i kataloške karakteristike opreme) i na osnovu praćenja stanja rasklopne (telemetrisane i lokalne) opreme. Kako ovaj model nije pogodan za efikasno izvršenje proračuna za analizu stanja elektrodistributivne mreže, vrši se matematička apstrakcija opreme elektrodistributivne mreže, gde se svi relevantni fizički uređaji modeluju pomoću čvorova i grana kako bi se dobila forma grafa tj. čvor-grana model. Postupak konverzije čvor-prekidač modela u čvor-grana model opisan je u poglavlju 3.2. Čvor-grana model se sastoji iz statičkih (karakteristike, konektivnost), dinamičkih (stanje opreme) i topoloških podataka (rezultat topološke analize). U poglavlju 3.1 su navedeni svi važniji atributi čvor-grana modela i opisana je njihova osnovna

namena. Na osnovu statičkih i dinamičkih podataka iz čvor-grana modela kreira se matrični model, koji definiše susednost čvorova uvažavajući stanje rasklopne opreme i prisustvo privremene opreme. Iako se isti matrični model koristi i za uravnotežene i za neuravnotežene elektrodistributivne mreže, za popunjavanje matričnog modela koriste se različite strategije. U slučaju uravnoteženih mreža susednost se definiše za sve faze objedinjeno, dok se kod neuravnoteženih mreža susednost definiše za svaku od faza pojedinačno. U poglavlju 3.5 je opisan je matrični model i strategije koje se koriste prilikom modelovanja susednosti čvorova.



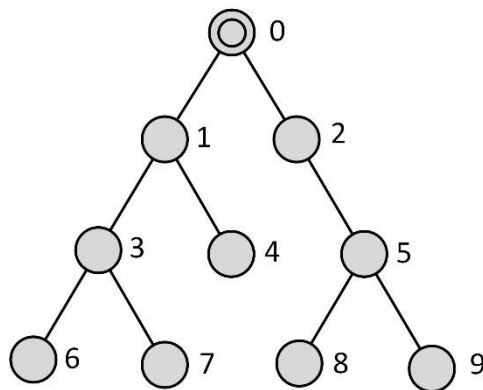
Slika 29 – Arhitektura rešenja za topološku analizu

Topološka analiza procesira graf elektrodistributivne mreže na osnovu podataka iz matričnog modela kako bi se opisala logička povezanost između elemenata elektrodistributivne mreže. Analiza grafa se sastoji iz pretrage grafa, kreiranja slojevite strukture grafa, identifikacije ostrva, detekcije petlji i upetljenih ostrva, određivanja aktivne faznosti, stanja energizovanosti itd. Rezultati topološke analize upisuju se u topološke podatke čvor-grana modela, odakle se ti podaci koriste za iscrtavanja mrežnih prikaza i kao ulazni podaci za razne proračune koje koriste funkcije za upravljanje elektrodistributivnom mrežom.

## 4.2 Pretraga grafa

Za analizu grafa elektrodistributivne mreže koristi se algoritam pretrage grafa po širini (eng. *Breadth-first search*). Ova pretraga podrazumeva da se čvorovi procesiraju po slojevima u smeru od najvišeg sloja ka najnižem sloju. Procesiranje počinje od korenskog čvora i prvo se obilaze susedni čvorovi u trenutnom sloju, pre nego što se pređe sa obradom čvorova iz narednog sloja. U radialnim mrežama broj čvorova je za jedan veći od broja grana, dok je u upetljenim mrežama broj čvorova jednak ili manji broju grana.

Na Slika 30 dat je primer grafa u kome je numerisan redosled čvorova (podebljan font) i grana (standardan font) po kome se elementi grafa obrađuju.



Slika 30 – Algoritam za pretragu grafa po širini

Iako pretraga koristi u potpunosti zajedničku implementaciju za uravnotežene i neuravnotežene elektrodistributivne mreže, pomoću posebnih podešenja moguće je prilagoditi pretragu tipu mreže koji se pretražuje. Najveća razlika je u tome što se graf uravnotežene elektrodistributivne mreže pretražuje objedinjeno po svim fazama, dok se kod neuravnotežene elektrodistributivne mreže posebno pretražuje svaka pojedinačna faza.

### 4.3 Kreiranje slojevite strukture grafa

Većina energetske funkcije za svoje proračune zahtevaju da graf elektrodistributivne mreže bude strukturiran po slojevima. Kreiranje slojeva vrši se za svako ostrvo posebno. Za uravnotežene elektrodistributivne mreže, graf se može strukturirati po slojevima za sve faze zajedno, dok je kod neuravnoteženih elektrodistributivnih mreža potrebno kreirati zasebno slojeve po svakoj pojedinačnoj fazi zbog nezavisnosti putanja između različitih faza. Strukturiranje slojeva implementirano je preko dva različita tipa atributa:

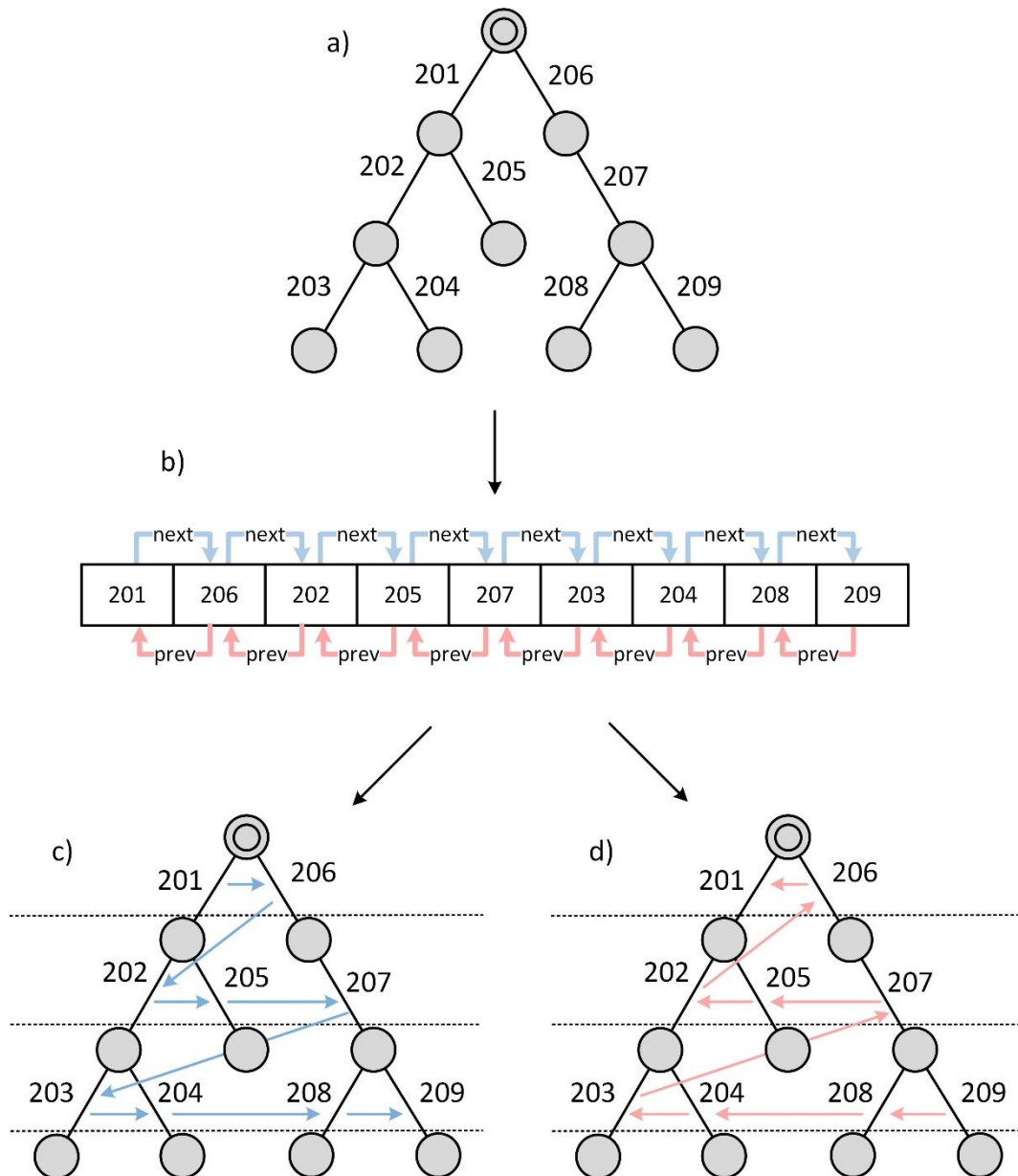
- Atributi za horizontalnu pretragu po slojevima
- Atributi za vertikalnu pretragu po slojevima

#### 4.3.1 Atributi za horizontalnu pretragu po slojevima

Za svaku granu čuva identifikator grane koja joj prethodi (atribut *PreviousBranches*) i identifikator grane koja sledi nakon te grane (atribut *NextBranches*). U slučaju da je grana prva u sloju tada atribut *PreviousBranches* čuva identifikator poslednje grane prehodnog sloja. Takođe, ako je grana poslednja u sloju u tom slučaju atribut *NextBranches* ima vrednost identifikatora prve

grane narednog sloja. Prva grana najvišeg sloja nema prethodnu granu, tj. njen atribut *PreviousBranches* ima vrednost 0, dok poslednja grana najnižeg sloja nema sledeću granu, tj. atribut *NextBranches* ima vrednost 0. Formiranjem dvostruko spregnute liste između grana koje se nalaze u istom ostrvu, omogućeno je dobavljanje grana po slojevima grafa ostrva u oba smeru.

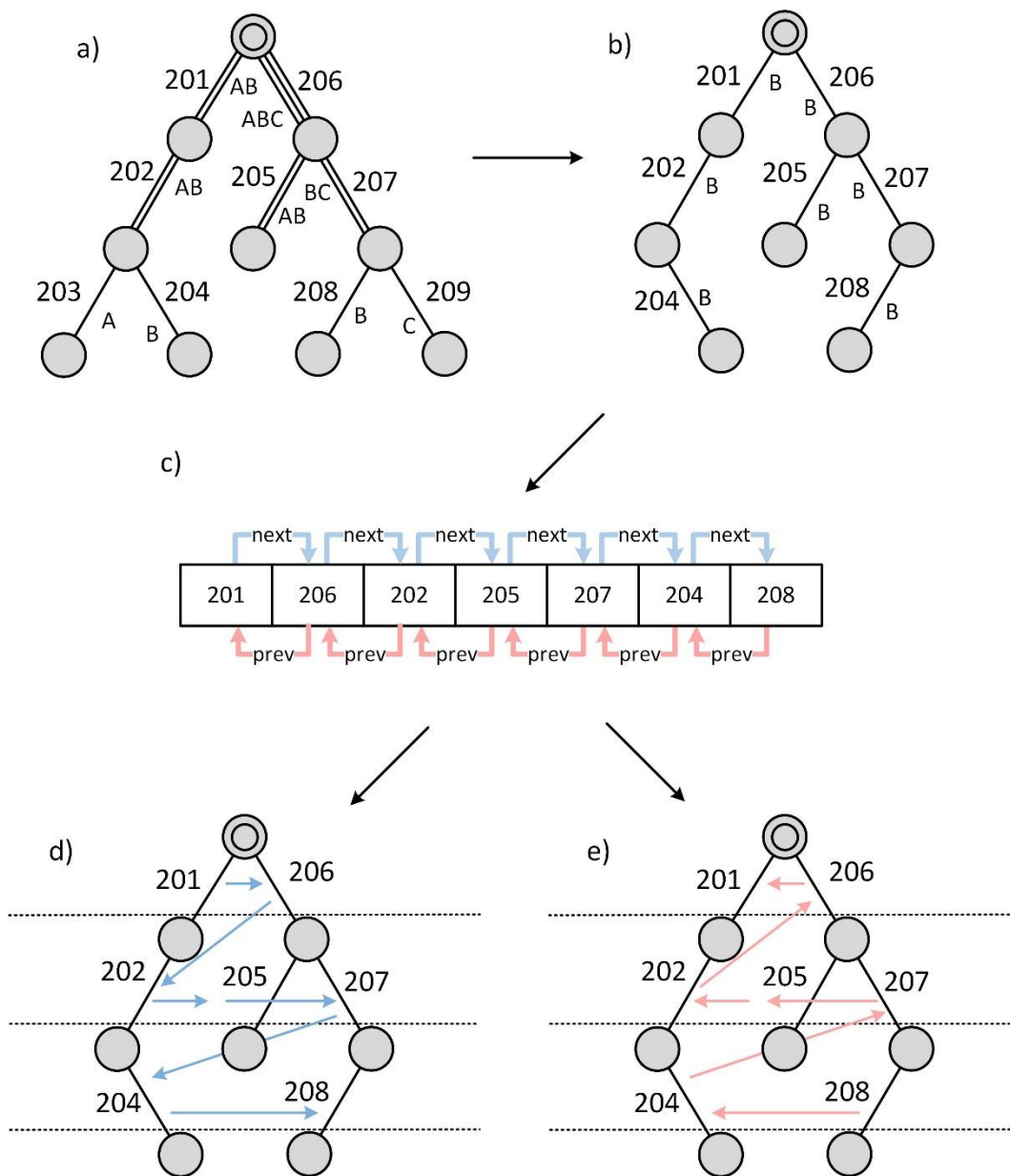
Na Slika 31 dat je primer uravnoteženog grafa (Slika 31-a) za koji je kreirana spregnuta lista grana (Slika 31-b) kako bi se dobila slojevita struktura grafa i omogućilo pretraga po slojevima u smeru od korenskog čvora (Slika 31-c) i u smeru ka korenskom čvoru (Slika 31-d).



Slika 31 – Atributi za horizontalnu pretragu uravnoteženog grafa po slojevima

Što se tiče uravnoteženih grafova, svaka grana ima jednu prethodnu i jednu sledeću granu. Međutim, kod neuravnotežene grafova, grane u različitim fazama mogu imati različite prethodne i naredne grane. Zbog toga je potrebno čuvati informaciju o prethodnoj i sledećoj grani zasebno za svaku fazu.

Primer kreiranja slojevite strukture za neuravnotežene grafove dat je na Slika 32. Za trivijalnu neuravnoteženu elektrodistributivnu mrežu (Slika 32-a) biće pokazano za B fazu (Slika 32-b) kako izgledaju atributi koji omogućavaju dobavljanje naredne grane (Slika 32-c) i prethodne grane (Slika 32-d).



Slika 32 – Atributi za horizontalnu pretragu neuravnoteženog grafa po slojevima

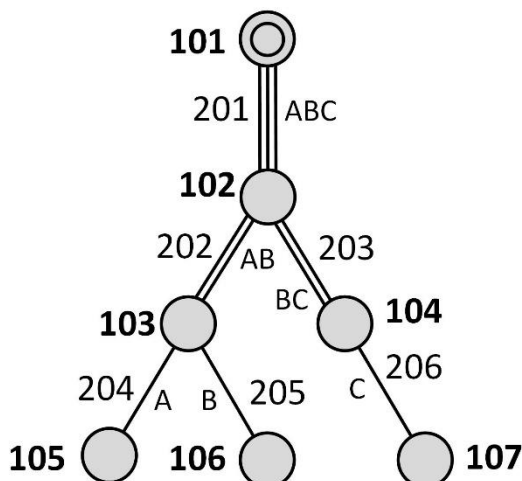
### 4.3.2 Atributi za vertikalnu pretragu po slojevima

Grane imaju po dva čvora na svojim krajevima. Prilikom topološke analize se za svaku granu određuje smer, odnosno koji kraj grana je bliži izvoru napajanja, obeležavanjem ulaznog i izlaznog čvora na grani. Ulazni čvor (atribut *InputBuses*) predstavlja čvor grane koji je bliži korenskom čvoru, dok je izlazni čvor (atribut *OutputBuses*) udaljeniji. Kako se ostrvo procesira po slojevima, čvorovi koji su bliži korenskom čvoru će se posetiti u toku analize pre u odnosu na čvorove koji



su dalji u odnosu na korenski čvor. Ukoliko su oba čvora podjednako daleka od korenskog čvora (slučaj petlje), ulazni čvor će u tom slučaju biti čvor koji je prvi posećen.

U neuravnoteženim elektrodistributivnim mrežama može u nekim posebnim topološkim slučajevima da se desi da ulazni i izlazni čvor nisu isti za sve faznosti grane, tako da je potrebno ulazni i izlazni čvor beležiti pojedinačno po svakoj fazi. Na Slika 33 dat je primer trivijalne neuravnotežene elektrodistributivne mreže na čijem primeru će biti pokazano određivanje ulaznih i izlaznih čvorova za grane. Rezultati su prikazani u Tabela 10.



Slika 33 – Primer trivijalne neuravnotežene mreže

Tabela 9 – Određivanje ulaznih i izlaznih čvorova za grane

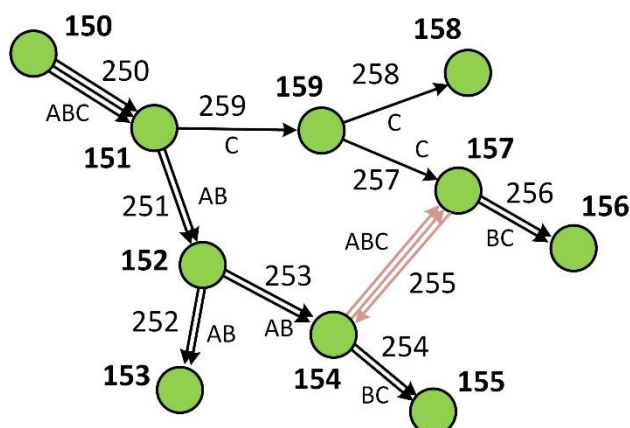
Grana	Ulazni čvor			Izlazni čvor		
	A	B	C	A	B	C
201	101	101	101	102	102	102
202	102	102	-	103	103	-
203	-	102	102	-	104	104
204	103	-	-	105	-	-
205	-	103	-	-	106	-
206	-	-	104	-	-	107

U zavisnosti od uloge koju čvor ima u grafu elektrodistributivne mreže, čvor može biti povezan sa jednom ili više grana. Ukoliko neka grana spaja čvor sa čvorem iz višeg sloja, ta grana se upisuje u listu ulaznih grana (atribut *InputBranches*), dok se grane koje čvor spajaju sa čvorovima iz nižeg sloja upisuju u listu izlaznih grana (atribut *OutputBranches*). Određivanje ulaznih i izlaznih grana za čvorove prikazano je u Tabela 10.

Tabela 10 – Određivanje ulaznih i izlaznih grana za čvorove

Čvor	Ulazne grane			Izlazne grane		
	A	B	C	A	B	C
101	-	-	-	201	201	201
102	201	201	201	202	202, 203	203
103	202	202	-	204	205	-
104	-	203	203	-	-	206
105	204	-	-	-	-	-
106	-	205	-	-	-	-
107	-	-	206	-	-	-

U izuzetno retkim situacijama može se dogoditi da je smer napajanja u grani drugačiji za različite faze (primer je dat na Slika 34). Većina postojećih algoritama nisu u mogućnosti procesirati ovakve slučajeve, jer nisu dizajnirani da podrže da u različitim fazama graf ima potpuno nezavisne putanje.



Slika 34 – Dvosmerno usmerene grane

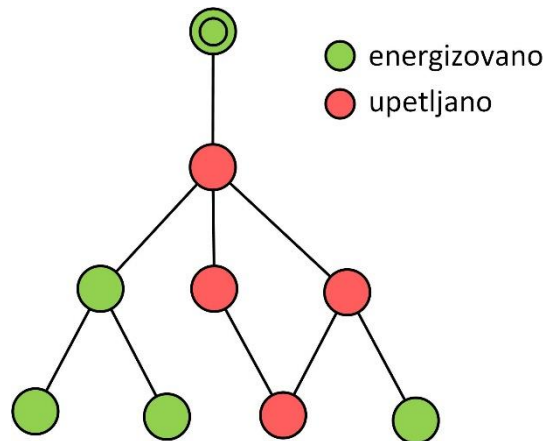
Na Slika 34 je narandžastom bojom izdvojena grana 255 koja ima dvosmerno napajanje. U fazi A i B ima ulazni čvor 154 i izlazni čvor 157, a u fazi C je ulazni čvor 157 dok je izlazni čvor 154.

Generisanjem ulaznog i izlaznog čvora za svaku granu i ulaznih i izlaznih grana za svaki čvor dobija se efikasno sredstvo za vertikalno kretanje kroz mrežu. To je posebno značajno za funkcije iscertavanja putanje (eng. *Tracing*) koje omogućavaju traženje elemenata u grafu elektrodistributivne mreže koji se nalaze uzvodno ili nizvodno od nekog elementa. Ove funkcije opisane su u poglavlju 4.7.

## 4.4 Detekcija petlji u grafu

Petlja predstavlja poseban tip topologije u kome postoji čvor u grafu koji ima dve ili više ulazne grane. Da bi se moglo detektovati postojanje petlje u grafu, potrebno je prilikom pretrage grafa voditi evidenciju o čvorovima koji su posećeni. Ukoliko se prilikom pretrage naiđe na čvor koji je već posećen, to je indikator da u tom delu grafa postoji petlja. Informacija o postojanju petlje u grafu izuzetno je važna za operatore, tako da se najčešće elementi elektrodistributivne mreže koji se nalaze unutar petlje vizuelno prikazuju drugačijom bojom.

Za obeležavanje elemenata koji čine petlju implementiran je algoritam iscrtavanja putanje posebne namene koji je u ovom radu nazvan *Iscrtavanje petlje*. Detaljan opis algoritma dat je u poglavlju 4.7.6. Za namenu obeležavanja da je neki element grafa u petlji postoji u baznom topološkom modelu atribut *InLoop* koji se u tom slučaju postavlja na *true*.



Slika 35 – Primer petlje u grafu

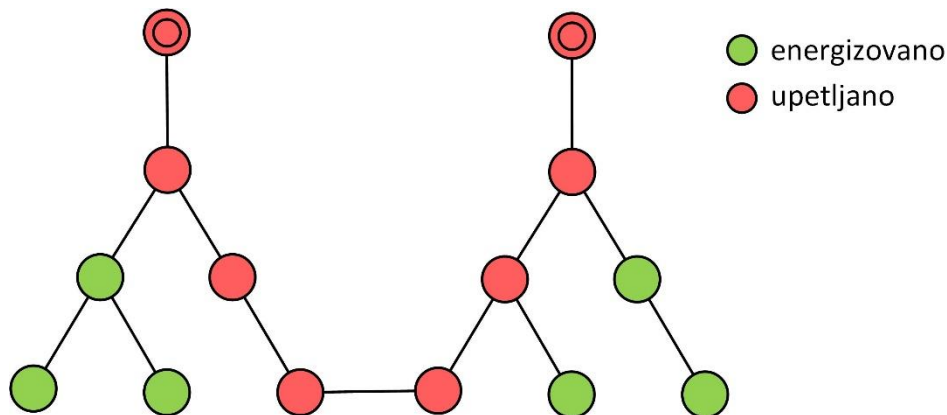
Najčešće se petlje obrazuju unutar jednog ostrva. Međutim, neretko se dešava da se petlja obrazuje između elemenata koji u normalnom uklopnom stanju mreže pripadaju različitim ostrvima.

### 4.4.1 Upetljanost ostrva

Detekcija da su dva ostrva međusobno upetljana se vrši tako što se prilikom pretrage svakom elementu dodeljuje identifikator ostrva kome pripada. Ukoliko je u toku pretrage element već ima dodeljen identifikator drugog ostrva, to je dovoljno da se zaključi da su ostrva upetljana. U ovom slučaju (koji nije čest) potrebno je prekinuti dalju pretragu i ponoviti pretragu na drugačiji način. Jedno od ostrva se proizvoljno proglašava za ostrvo nosioca (predstavnik) i njegov identifikator će se na dalje koristiti za pretragu. Ponovljena pretraga kreće istovremeno od dva korenska čvora i dalje se obavlja na isti način kao u slučajevima kada ostrva nisu upetljana. Svi elementi koji se

posete u toku ove pretrage biće obeleženi indetifikatorom ostrvrva nosioca, tj. smatraće se da svi pripadaju istom topološkom ostrvu.

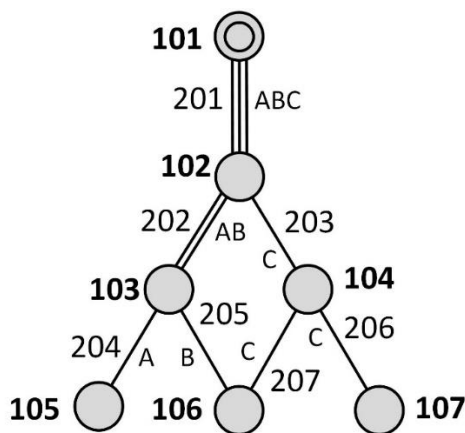
U slučaju da se petlja formirala između dva korenska čvora, u tom slučaju je potrebno markirati sve elemente koji se nalaze na putanji od čvora na kome je detektovana petlja do ta dva korenska čvora. Primer je dat na Slika 36.



Slika 36 – Petlja obrazovana između dva korenska čvora

#### 4.4.2 Pseudo petlje

U neuravnoteženim mrežama u retkim slučajevima može da se desi obrazovanje pseudo petlje, vrste topologije kada jedan čvor ima dve ili više ulaznih grana pri čemu u svakoj fazi ima samo jednu ulaznu granu. Nije uobičajno obeležavati postojanje pseudo petlje, sem što pojedina DMS rešenja nude to kao informaciju upozorenja, kako bi operator bio svestan topologije koju će sa odabranim akcijama napraviti. Jednostavan primer pseudo petlje dat je na Slika 37. Iako na prvi pogled liči da ovaj graf sadrži petlju (102-202-103-205-106-207-104-203-102), sa slike se može jasno uočiti da svaki čvor u određenoj fazi ima samo po jednu ulaznu granu.



Slika 37 – Primer pseudo petlje

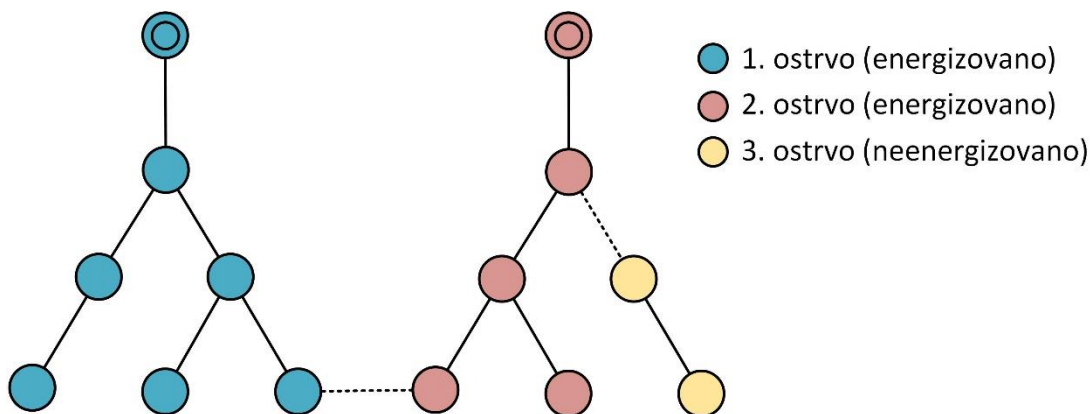
Pseudo petlje predstavljaju pre svega izazov za implementaciju topološke analize i mnogi predloženi metodi imaju ozbiljnih problema kada procesiraju deo mreže koje sadrži pseudo petlju. Da bi neki algoritam lako proceirao pseudo petlje mora biti dizajniran tako da lako rešava slučajeve u kojima različite faze u grafu imaju totalno nezavisne putanje.

## 4.5 Bojenje grafa

Bitni topološki rezultati za operatore elektrodistributivne mreže su dinamički atributi koji omogućavaju vizuelni uvid u trenutno stanje elektrodistributivne mreže. Ovi atributi se koriste da bi se obojili simboli elemenata koji se nalaze na prikazima elektrodistributivne mreže. Pored toga, možda još više značajno je to što većina energetske funkcije za svoje proračune zahteva takve topološke podatke. Iako se ovi topološki podaci generisani za grane i čvorove, oni se lako mogu primeniti i na stvarnu opremu elektrodistributivne mreže koja je modelovana pomoću čvorova i grana. Za to se koristi asocijacija koja je implementirana između čvor-grana modela i čvor-prekidač modela.

### 4.5.1 Bojenje grafa po ostrvima

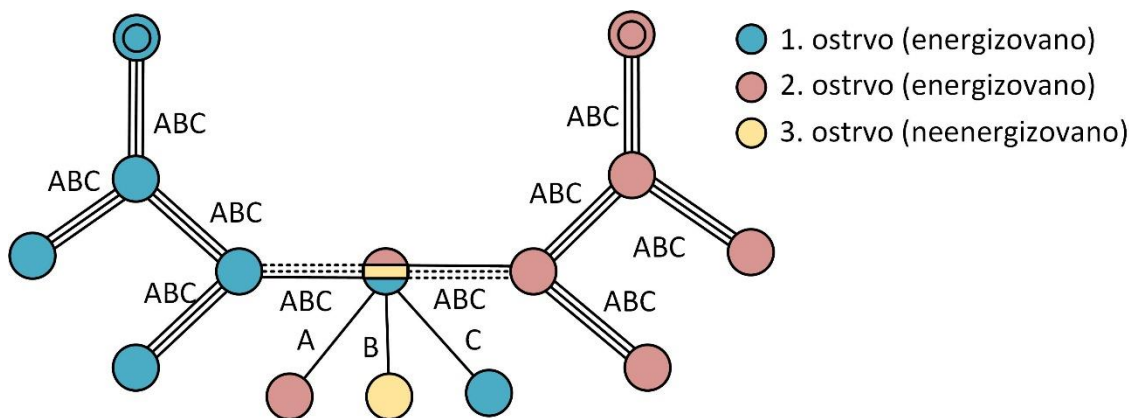
Prilikom pretrage mreže, za svaki čvor i za svaku granu se beleži identifikator ostrva kome čvor ili grana pripadaju. Na Slika 38 dat je primer sa 3 ostrva koja su međusobno izolovana otvorenim prekidačima. Čvorovi su na slici obojeni sa tri različite boje, u zavisnosti od toga kom ostrvu pripadaju.



Slika 38 – Bojenje grafa po ostrvima

Bojenje grafa po ostrvima je implementirano posebno za svaku fazu, jer postoji mogućnost da element u različitim fazama pripada različitim ostrvima. Te situacije su izuzetno retke,

međutim one se moraju podržati kako bi rezultati topološke analize u svakom mogućem slučaju bili tačni. Na Slika 39 prikazan je primer gde dve faze (A i C) trofaznog elementa elektrodistributivne mreže su napojene od strane dva različita izvora napajanja, dok je preostala treća faza (B) nenapojena.



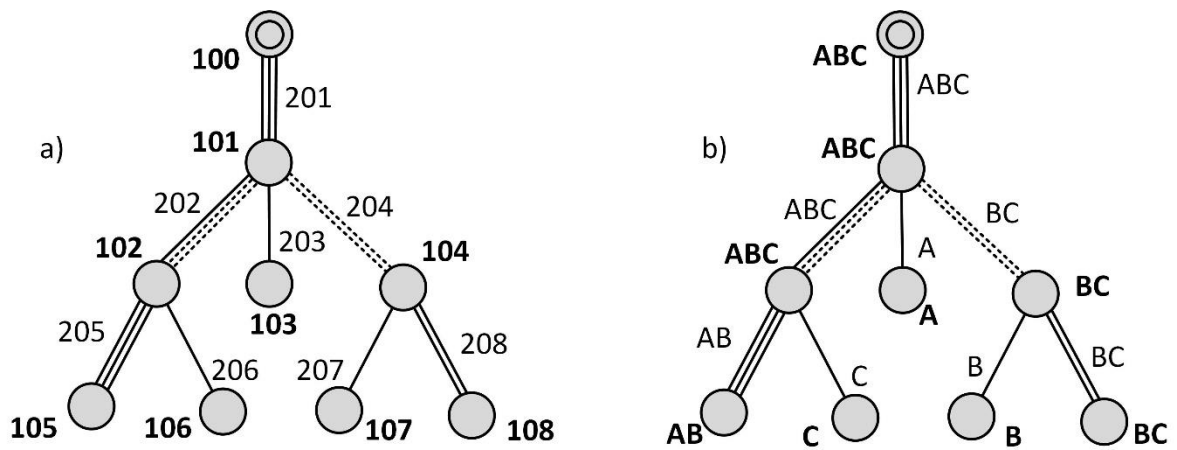
Slika 39 – Pseudo petlja obrazovana između dva korenska čvora

Bez obzira što je logički gledano jedan element elektrodistributivne mreže napojen iz dva različita izvora, petlja u ovom slučaju ne postoji, jer čvor ima u svakoj od te dve faze samo jednu ulaznu granu. Prva ulazna grana indirektno povezuje čvor sa prvim korenskim čvorom u fazi A, dok druga ulazna grana indirektno povezuje čvor sa drugim korenskim čvorom u fazi B.

#### 4.5.2 Bojenje aktivne faznosti

Statička faznost elementa je definisana mašinskom konstrukcijom samog elementa i dobavlja se iz kataloga opreme. Katalogi opreme omogućavaju da se grupiše oprema koja ima iste karakteristike. Pored kataloške faznosti, postoji i topološka faznost elemenata koja će u ovom radu biti nazvana **aktivna faznost**. Aktivna faznost nekog elementa predstavlja podatak koje od faza elementa su energizovane. Aktivna faznost se računa za svaki čvor i za svaku granu u toku pretrage grafa.

Na Slika 40 dat je trivijalan graf neuravnotežene elektrodistributivne mreže na čijem primeru će biti opisano računanje aktivne faznosti čvorova i grana. Radi preglednosti su na levom delu slike (Slika 40-a) prikazani identifikatori čvorova i grana, a na desnoj strani slike (Slika 40-b) je prikazana kataloška faznost čvorova i grana. Na slici su prikazana 2 standardna prekidača 203 (zatvoren) i 204 (otvoren) i kompozitni prekidač 202 (otvoren u fazama B i C). Pretpostavićemo da je trofazni korenski čvor energizovan u svim fazama i na osnovu aktivne faznosti korenskog čvor mogu se izračunati aktivne faznosti ostalih elemenata grafa.



Slika 40 – Primer neuravnoteženog grafa za određivanje aktivne faznosti

Aktivnu faznost čvora (Tabela 11) određuje aktivna faznost napojne grane i kataloška faznost čvora.

Tabela 11 – Računanje aktivne faznosti za čvorove

Čvor	Aktivna faznost ulazne grane	Kataloška faznost čvora	Aktivna faznost čvora
100	ABC*	ABC	ABC
101	ABC	ABC	ABC
102	A	ABC	A
103	A	A	A
104	-	BC	-
105	A	ABC	A
106	A	C	-
107	-	B	-
108	-	BC	-

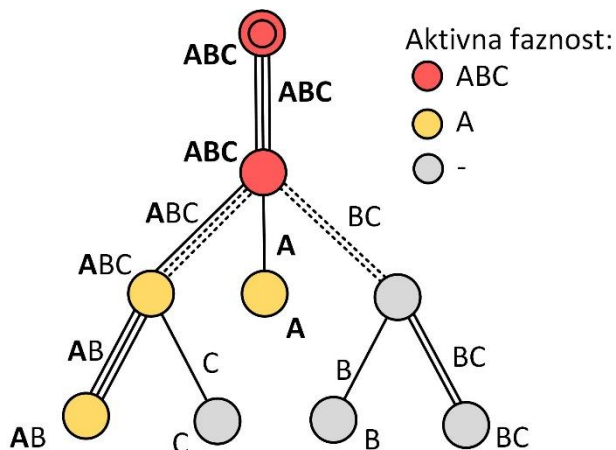
\* Napomena: ulazna grana za korenski čvor deo je prenosne mreže.

Aktivnu faznost grane (Tabela 12) određuje aktivna faznost ulaznog čvora, aktivnost grane (da li povezuje čvorove koji su na njenim krajevima) i kataloška faznost grane.

Tabela 12 – Računanje aktivne faznosti za grane

Grana	Aktivna faznost ulaznog čvora	Kataloška faznost grane	Aktivnost grane	Aktivna faznost grane
201	ABC	ABC	ABC	ABC
202	ABC	ABC	A	A
203	ABC	A	A	A
204	ABC	BC	-	-
205	A	ABC	ABC	A
206	A	C	C	-
207	-	B	B	-
208	-	BC	BC	-

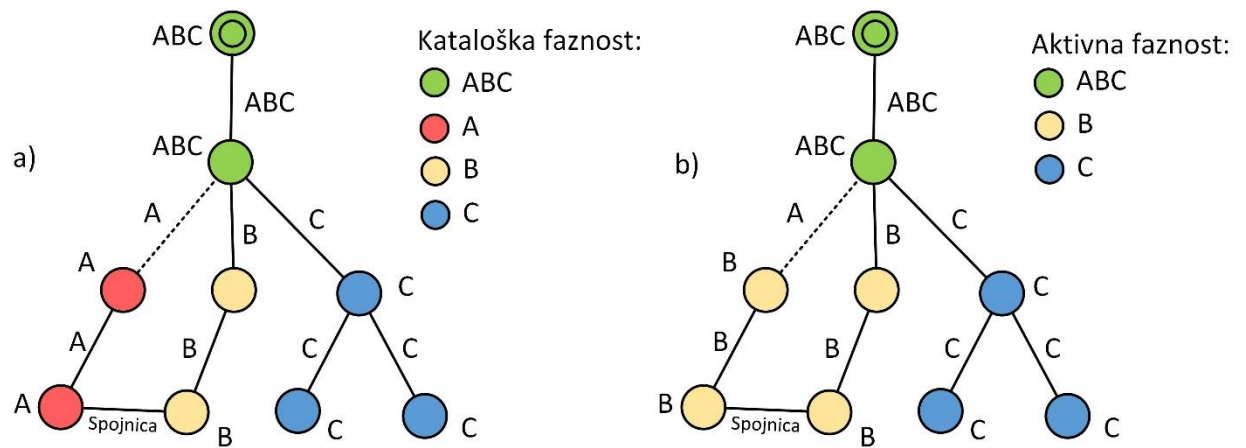
Nakon što je određena aktivna faznost svih elemenata, graf se može obojiti kako bi operator imao uvid u to koje faze su energizovane, a koje nisu (Slika 41). Na slici su kataloške faznosti elemenata u grafu su prikazane standardnim fontom, a aktivna faznost podebljanim fontom.



Slika 41 – Bojenje aktivne faznosti

Iako na prvi pogled deluje da je aktivna faznost uvek podskup kataloške faznosti elementa, to u uopštenom slučaju za neuravnotežene elektrodistributivne mreže ne mora biti tačno. Takvi slučajevi jesu retki, ali se događaju pa se samim tim i moraju podržati. Na primer, zamislimo malo selo od par kuća koji uslugu dobija preko monofaznog voda (grane) faznosti A. Ukoliko se dogodi kvar, a ne postoji mogućnost da se usluga restaurira napajanjem faznosti A, nema nikakvih problema da se usluga selu restaurira preko neke druge faze, na primer faze B. Ukoliko obradimo topologiju za dati slučaj dobićemo da je kataloška faznost grane bila A, a aktivna faznost grane da je B. Primer je ilustrovan na Slika 42, gde je na prvom delu slike (Slika 42-a) graf obojen po kataloškoj faznosti, a na drugom delu slike (Slika 42-b) graf je obojen po aktivnoj faznosti.













Slika 42 – Primer aktivne faznosti kod monofazne grane

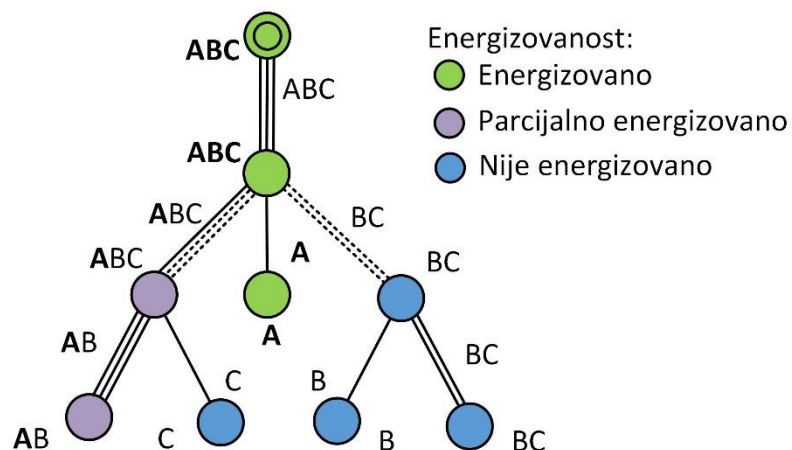
### 4.5.3 Bojenje energizovanosti

Ovaj tip bojenja grafa elektrodistributivne mreže predstavlja za operatore najznačajniju vizuelnu informaciju o trenutnom stanju elektrodistributivne mreže i zbog toga se boje energizacije koriste prilikom iscrtavanja simbola elemenata na osnovnom prikazu elektrodistributivne mreže. Bojenje energizacije je izuzetno značajno za operatore kako bi im se skrenula pažnja kada neki deo elektrodistributivne mreže ostane bez izvora napajanja, postane upetljan ili bude pod uticajem nekog kvara u mreži. Tabela 13 prikazuje moguća stanja energizacije sa detaljnim objašnjenjem svakog stanja.

Tabela 13 – Stanja energizacije i njihova značenja

Stanje energizacije	Opis stanja	Boja
Nije energizovano	Elementat nije napojen niti u jednoj svojoj kataloškoj fazi.	
Parcijalno energizovano	Elementat je u nekim svojim kataloškim fazama napojen, a u nekima nije.	
Energizovano	Elementat je napojen u svim svojim kataloškim fazama.	
Uzemljeno	Elementat nije napojen niti u jednoj svojoj kataloškoj fazi i pored toga je uzemljen.	
Upetljano	Elementat je napojen u svim svojim kataloškim fazama i nalazi se u okviru petlje.	
Promenjene faze	Elementat je napojen fazama koje ne odgovaraju kataloškoj faznosti elementa.	
Dvosmerno usmerenje	Elementat je u nekim fazama napojen iz jednog smera, a u ostalim fazama iz drugog smera.	
Nepoznato	Sva ostala stanja energizacije koje predstavljaju kombinaciju nekih od prethodno opisanih stanja.	

Na Slika 43 prikazana je obojenja energizacija za primer neuravnoteženog grafa sa Slika 40. Podebljanim fontom su prikazane aktivne faze, dok su običnim fontom prikazane faze koje nisu aktivne.



Slika 43 – Bojenje energizacije u grafu

## 4.6 Procesiranje promene topologije grafa

Promena stanja prekidačke opreme i korišćenje privremene opreme dovodi do promene topologije grafa elektrodistributivne mreže. Što se tiče matičnog modela, kao što je već u poglavlju 3.4.3, potrebno je osvežiti isključivo određene elemente matrice. Nakon poravnavanja matičnog modela sa aktuelnim stanjem topologije u elektrodistributivnoj mreži, dovoljno je ponovo pretražiti deo grafa koji je zahvaćen promenom. Ponovnu pretragu je lako napraviti, jer su svi statički i dinamički podaci već uključeni u matičnom modelu.

Ukoliko ima više promena koje je potrebno procesirati, prvo se poravnava matični model sa promenama stanja prekidačke i privremene opreme, a zatim se vrši topološka analiza za sva ostrva koja su zahvaćena promenom.

## 4.7 Funkcije za iscrtavanje putanje u grafu

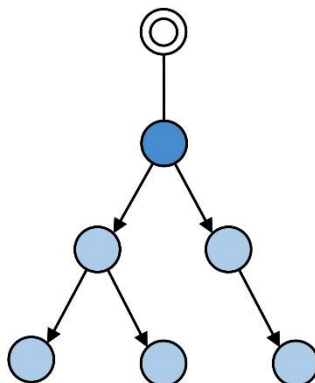
Funkcije za iscrtavanje putanje u grafu pretražuju elektrodistributivnu mrežu u odabranom smeru sa ciljem da se pronađu elementi koji se nalaze na odabranoj putanji. Ideja je koristiti čvor-grana model i njegove topološke atribute (ulazne/izlazne grane od čvora, ulazni/izlazni čvor od grane i prethodna/naredna grana od grane) kako bi se kretali kroz slojevitu strukturu grafa elektrodistributivne mreže. Pronađeni čvorovi i grane se koriste da bi se dobavili elementi mreže iz čvor-prekidač modela (povezni čvorovi, sekcije, prekidači, rastavljači, indikatori kvara, ...) koji su u grafu modelovani sa čvorovima i granama.

Dodatne opcije za iscrtavanje putanje:

- Definisane tipa elemenata od interesa – da se traže samo elementi određenog tipa (na primer: pronaći rastavljače na određenoj putanji)
- Kriterijum za zaustavljanje iscrtavanja – da se pretraga u datom pravcu zaustavi kada nađe element određenog tipa (na primer: zaustavi pretragu kada naiđeš na transformator).

### 4.7.1 Iscrtavanje putanje ka dole

Funkcija za iscrtavanje putanje ka dole pronalazi elemente koji se u grafu nalaze nizvodno od odabranog elementa u odnosu na korenski čvor. Jednostavan primer prikazan je na Slika 44. Čvor koji je određen da bude početno mesto za pretragu je obojen plavom bojom, dok elementi koji su otkriveni u togu pretrage obojeni svetlo plavom bojom na slici.

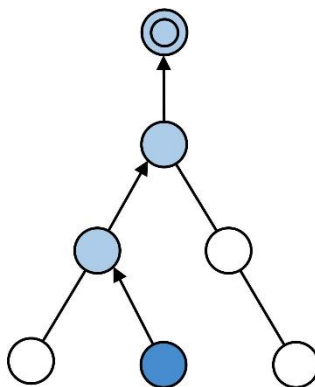


Slika 44 – Iscrtavanje putanje ka dole

Za iscrtavanje putanje ka dole koriste se topološki atributi: izlazne grane od čvora i izlazni čvor od grane. Za početak iscrtavanja potrebno je izabrati element od koga će početi iscrtavanje. To može biti grana ili čvor. Ukoliko je grana izabrana za početak iscrtavanja, ona se dodaje u red za procesiranje. Ukoliko je čvor izabran za početak iscrtavanja, u red za procesiranje se dodaju njegove izlazne grane. Grane koje se nalaze u listi za procesiranje se obrađuju poštujući redosled po kom su dodate (FIFO). Za granu koja se trenutno procesira se dobavljaju elementi iz čvor-prekidač modela i ukoliko ima elemenata koji su interesantni, njihovi identifikatore je potrebno sačuvati u listi pronađenih elemenata. Ukoliko neki element zadovolji kriterijum za zaustavljanje iscrtavanja (npr. zaustavi iscrtavanje kada naiđeš na transformator), dalja pretraga se za datu granu obustavlja. U suprotnom, donji čvor trenutno procesirane grane se proverava i interesantni elementi iz čvor-prekidač modela koji su modelovani sa donjim čvorom se dodaju u listu pronađenih elemenata. I u ovom slučaju proverava se da li neki od pronađenih elemenata zadovoljava kriterijum za stopiranje iscrtavanja i ukoliko je to tačno, dalje iscrtavanje se obustavlja za dati čvor. Ukoliko na čvoru nije pronađen kriterijum za zaustavljanje iscrtavanja, donje grane od tog čvora se dodaju u red za procesiranje. Nakon što je procesiranje jedne grane završeno, grana se uklanja iz reda za procesiranje, a za procesiranje se uzima naredna grana iz reda. Iscrtavanje putanje se završava kada u redu nema više grana za procesiranje.

### 4.7.2 Iscrtavanje putanje ka gore

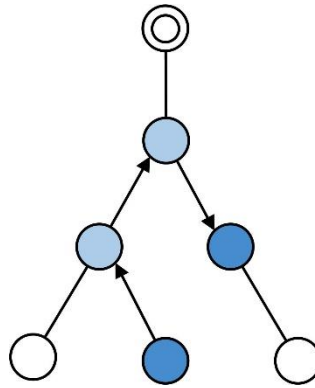
Ova funkcija pretražuje elemente koji se nalaze uzvodno od izabranog elementa u smeru ka korenskom čvoru ostrva (Slika 45). Procedura pretrage je slična proceduri koja se koristi za iscrtavanje ka dole, samo što se u ovom slučaju koriste topološki atributi: ulazne grane i ulazni čvorovi. Iscrtavanje se obavlja dokle se ne dođe do korenskog čvora ostrva ili dok se ne ispuni neki od kriterijuma za zaustavljanje iscrtavanja.



Slika 45 – Iscrtavanje putanje ka gore

### 4.7.3 Iscrtavanje putanje ka nekom elementu

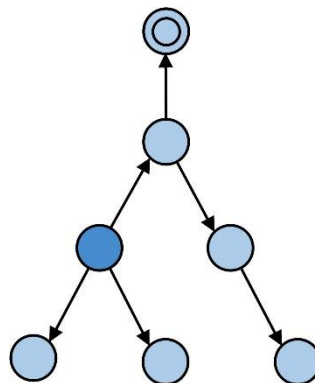
Ova topološka funkcija pretražuje elemente elektrodistributivne mreže koji se nalaze između dva izabrana elementa u okviru istog ostrva (Slika 46). Jedan element se bira za početak iscrtavanja, a drugi za kraj iscrtavanja. Za implementaciju se koristi funkcija za iscrtavanje ka gore za oba izabrana elementa kako bi se se pronašao prvi zajednički čvor na putanji – sredina iscrtavanja. Iscrtavanje ka gore kreće istovremeno iz dva pravca (dva čvora) i napreduje jedan po jedan čvor dokle god jedno iscrtavanje ne pronađe čvor koje je drugo iscrtavanje prethodno već pronašlo. Krajnji rezultat se dobija tako što se prvo dodaju elementi koji se nalaze od početnog čvora pretrage do čvora koji predstavlja sredinu iscrtavanja uključujući i taj čvor, a zatim se u invertovanom redosledu dodaju elementi od kranjeg elementa iscrtavanja do čvora koji predstavlja sredinu iscrtavanja.



Slika 46 – Iscrtavanje putanje ka nekom elementu

#### 4.7.4 Iscrtavanje putanje ka svim pravcima

Funkcija za iscrtavanje putanje ka svim pravcima omogućava da se dobave svi elementi određenog tipa koji se nalaze u istom ostrvu. Najčešće se koristi sa prethodno predefinisanim kriterijuma zaustavljanja iscrtavanja. Na primer, da se za određenu sekciju u mreži pronađu susedni prekidači u svim pravcima. Za pretragu se koriste topološki atributi: ulazni čvor, izlazni čvor, ulazne grane i izlazne grane. Na Slika 47 dat je primer u kome je funkcija za iscrtavanje putanje ka svim pravcima izvršena iz početnog elementa koji se nalazi na sredini ostrva.



Slika 47 – Iscrtavanje putanje ka svim pravcima

### 4.7.5 Iscrtavanje putanje po slojevima

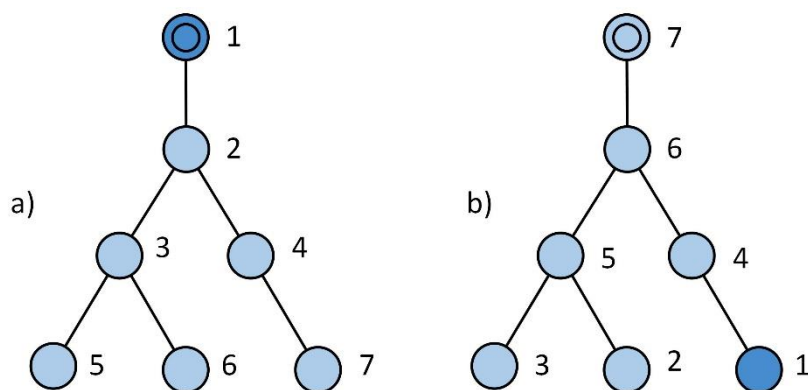
Funkcija za iscrtavanje putanje po slojevima omogućava dobavljanje elemenata redom po slojevima u kojima se ti elementi nalaze u grafu. Postoje dva smera iscrtavanja:

a) **Iscrtavanje unapred**

Iscrtavanje započinje od korenskog čvora ostrva i koristi identifikatore narednih grana (topološki atribut generisan za svaku granu) da bi se dobavili svi elementi iz istog sloja pre nego što se krene sa obradom elemenata koji se nalaze u narednom sloju. Iscrtavanje traje dok se ne dođe do poslednje grane u grafu ili dok se ne ispuni kriterijum za zaustavljanje iscrtavanja. Primer je dat na Slika 48-a.

b) **Iscrtavanje unazad**

Iscrtavanje započinje od poslednje grane ostrva (koja je tako definisana u toku pretrage grafa) i koristi identifikatore ka prethodnim granama (topološki atribut) kako bi se dobavili elementi iz istog sloja pre nego što se krene sa obradom elemenata koji se nalaze u narednom višem sloju. Iscrtavanje traje dok se ne dođe do korenskog čvora grafa ili dok se ne ispuni kriterijum za zastavljanje iscrtavanja. Primer je dat na Slika 48-b.

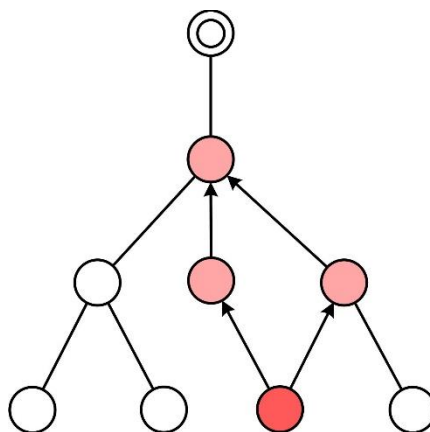


Slika 48 – Iscrtavanje putanje po slojevima

a) Unapred b) Unazad

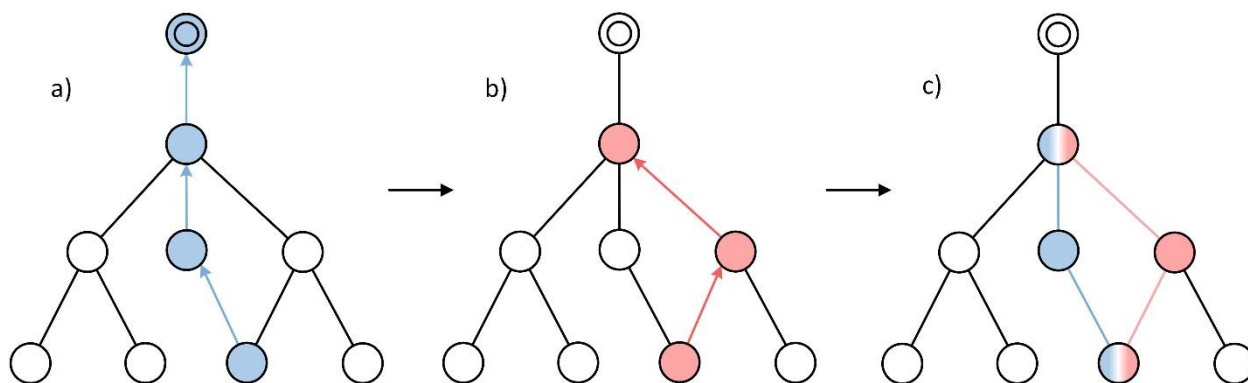
### 4.7.6 Iscrtavanje petlji

Funkcija za iscrtavanje petlji omogućava da se dobave svi elementi elektrodistributivne mreže koji se nalaze u petlji na osnovu zadatog najnižeg čvora u petlji. Najniži čvor u petlji ima najmanje dve ulazne grane koje predstavljaju početak dve potpuno nezavisne putanje ka korenskom čvoru (Slika 49). Te dve nezavisne putanje se seku u određenom čvoru – najvišem čvoru petlje. Petlju čine elementi grafa koji se nalaze uzvodno od najnižeg čvora petlje a nizvodno od najvišeg čvora petlje.



Slika 49 – Iscrtavanje petlje

Da bi se se mogla iscrtati putanja kroz sve elemente grafa koji čine petlju, potrebno je na početku odrediti najviši čvor petlje. Postupak počinje time što se prvo pronađu svi uzvodni elementi grafa u odnosu na prvu ulaznu granu najnižeg čvora petlje i ti elementi se sačuvaju u neku listu poštujući redosled po kome su elementi pronađeni (Slika 50-a).



Slika 50 – Postupak iscrtavanja elemenata grafa koji se nalaze u petlji

Zatim se pretraga ponavlja za drugu ulaznu granu (Slika 50-b) ali se ovoga puta uzvodni elementi čuvaju u drugu listu i pretraga se ne vrši do korenskog čvora već dok se ne nađe na čvor koji se nalazi u listi uzvodnih elemenata prve ulazne grane. Taj čvor predstavlja najviši čvor petlje. Nakon toga potrebno je izbrisati sve elemente iz liste uzvodnih elemenata prve ulazne grane koji



se nalaze nakon najvišeg čvora petlje. Kranji rezultat iscrtavanja predstavlja unija elemenata grafa koji se nalaze u listi uzvodnih elemenata grafa prve i druge ulazne grane (Slika 50-c).

Prethodno opisane funkcije za iscrtavanje putanje mogu se smatrati efikasnim alatom koji omogućavaju da se dobave svi elementi grafa u željenom pravcu i smeru. Operatori elektrodistributivne mreže u svojim analizama koriste funkcije za iscrtavanje putanje kako bi markirali opremu koja se nalazi na određenoj putanji. Takođe, mnoge energetske funkcije poput analize toka snaga, upravljanje incidentima, upravljanje radovima i upravljanje kvarovima, koriste funkcije za iscrtavanje putanje za svoje proračune.

## 5. Korišćenje rezultata topološke analize na primeru implementacije FLISR funkcija

U ovom poglavlju bavićemo se temom koji je značaj topoloških podataka sa aspekta drugih proračuna koji se izvršavaju u okviru DMS rešenja. Takođe, na koji način se topološki podaci koriste i koliko mogućnosti proračuna zavise od tih topoloških podataka. Prethodno navedeno biće do detalja demonstrirano na primeru implementacije FLISR funkcija. Funkcije za lokaciju kvara, izolaciju kvara i restauraciju usluge (eng. *Fault Location, Isolation, and Service Restoration – FLISR*) otkrivaju deo mreže koji je u kvaru i izvršavaju akcije nad prekidačima kako bi izolovali kvarom zahvaćeni deo mreže i povratili napajanje delu mreže koji je ostao bez njega, a nije direktno zahvaćen kvarom.

### 5.1 Kvarovi u elektrodistributivnoj mreži

Pouzdanost i kvalitet usluge se smatraju najznačajnijim zahtevima za upravljanje elektrodistributivnom mrežom. Za razliku od prenosnih mreža koji su upetljane i koriste više nezavisnih putanja da bi pružile uslugu, struktura elektrodistributivne mreže je radijalna, tako da ispad neke opreme u elektrodistributivnoj mreži može značiti gubitak usluge svim potrošačima koji se nalaze nizvodno od kvara. U tom slučaju, potrebno je iskoristiti međusobnu povezanost elektrodistributivnih fidera kako bi se vratila usluga potrošačima koji su bez nje ostali. To se čini preko prekidača koji povezuju susedne fidere (u literaturi se često navode kao “*tie breaker*“-i).

Otklanjanje kvara u elektrodistributivnoj mreži je na tradicionalni način bili potpuno prepušteno radnicima na terenu i takve operacije trajale su satima. To je podrazumevalo vreme koje je potrebno: da potrošači prijave da imaju problem, radnici da odu na mesto gde je problem

prijavljen, pretraga dužinom fidera kako bi se našle sekcije koje su u kvaru, manuelne operacije nad prekidačima kako bi se izolovale sekcije u kvaru i vratila usluga potrošačima kojima je to moguće i na kraju vreme koje je potrebno da se otkloni kvar. Ako se izuzmu potrošači koji ne mogu biti usluženi dokle god se kvar ne popravi, možemo primetiti da je sam kvar negativno uticao i na potrošače za koje je tokom popravke kvara postojao alternativni izvor napajanja.

Moderne kompanije koje se bave distribucijom električne energije garantuju potrošačima pouzdanost usluge kroz penale koje su u obavezi da plate ukoliko je garantovani kvalitet iz ugovora narušen. Potrošački ugovori definišu dozvoljene vrednosti za fluktuacije napona, fluktuacije frekvencije, maksimalni period po danu koliko usluga sme biti nedostupna i ukupni period vremena u godini koliko usluga sme biti nedostupna. Zbog toga je u interesu elektrodistributivnih kompanija je da vreme kada su potrošačima usluga nije dostupna bude što je moguće kraće, što može biti postignuto kroz automatizaciju procesa reakcije na pojavu kvara koristeći napredne funkcije za lokaciju kvara, izolaciju kvara i restauraciju usluge. Ove funkcije omogućavaju da se bez manuelne intervencije značajno smanji vreme koje je potrebno da se kvar izoluje i da se vrati usluga potrošačima gde je to moguće, pre nego što se sam kvar otkloni.

Savremene (eng. *State-of-the-art*) FLISR funkcije koriste centralizovanu i distribuiranu arhitekturu da bi ostvarile zacrtane ciljeve. Oba pristupa imaju svoje prednosti i mane.

Centralizovano orijentisane FLISR funkcije (kao što su [48] i [49]) koriste prednosti toga što imaju kompletnu sliku elektrodistributivne mreže, što im omogućava da prilikom biranja najbolje opcije za rekonfiguraciju mreže imaju: a) uvid u statičku i topološku konfiguraciju mreže, b) sve neophodne informacije o instaliranim statusima i merenjima i c) propisana ograničenja za mrežnu opremu. Sa druge strane, nedostatkom centralizovanog pristupa može se smatrati dodatno vreme koje se utroši na komunikaciju između softvera za upravljanjem elektrodistributivnom mrežom i telemetrisanih uređaja. Rezultati topološke analize su esencijalni izvor informacija za implementaciju FLISR funkcija čije mogućnosti i performanse direktno zavise od kvaliteta topoloških rezultata.

Distribuirani pristup (na primer: [50]-[52]) koristi kontrolere instalirane na prekidačkoj opremi koji međusobno razmenjuju podatke kako bi se odredio neophodan skup operacija nad prekidačkom opremom koji je potrebno izvršiti da bi se obezbedila restauracija usluge klijentima. Ovaj pristup odlikuje efikasnost i jednostavnost rešavanja problema koristeći lokalne topološke informacije. Algoritmi koji se baziraju na distribuiranoj arhitekturi obično ne podržavaju kompleksnije rekonfiguracije mreže i scenarije kada je više kvarova istovremeno prisutno u mreži.

O savremenim trendovima, problemima sa kojima se susreću FLISR servisi i koji su koraci potrebni da se učine da se zaobiđu trenutno postojeće mane je kvalitetno diskutovano u radu [53].

Gotovo da nema niti jednog rada koji se bavi analizom o tome koliko su topološke informacije bitne za implementaciju FLISR funkcija. U nastavku u okviru ovog poglavlja biće ukratko opisana svaka pojedinačne FLISR funkcija: koja je namena funkcije, predložen (pojednostavljen) opis implementacije funkcije i koji su topološki podaci neophodni za njene proračune. Topološki podaci biće naglašeni sa ukošenim fontom kako bi čitaocu bila skrenuta pažnja svaki put kada su topološki podaci potrebni za FLISR proračun.

## 5.2 Detekcija kvara

Zaštitna oprema (prekidač, reklozer, osigurač itd.) omogućava detekciju kvara i izolaciju dela mreže koji je pod uticajem kvara. FLISR funkcije identifikuju kvar prilikom kreiranja novog *neenergizovanog ostrva* koje je rezultat otvaranja prekidača, reklozera ili osigurača. Novo neenergizovano ostrvo se kreira kao rezultat topološke analize. Nakon što je kvar detektovan, neophodno je izvršiti *funkcije za iscrtavanje ka dole* kako bi se otkrili svi instalirani uređaji u mreži (uključujući i potrošače) koji su pod uticajem kvara. Otkriveni uređaji korišće se u narednim funkcijama. Rezultat funkcije za iscrtavanje putanje ka dole su elementi elementi na koje je kvar imao uticaj i ti elementi mogu se ravnati po različitim kategorijama u zavisnosti od tipa opreme.

Trebalo bi naglasiti da je detektovanje novog neenergizovanog ostrva u elektrodistributivnoj mreži samo potreban ali ne i dovoljan uslov za početak procesa otklanjanja kvara. Postoji više slučajeva u kojima otklanjanje kvara neće biti pokrenuto:

- Ako je kreiranje neenergizovanog ostrva prouzrokovano manuelnim (namernim) otvaranjem rasklopne opreme.
- Ako neenergizovano ostrvo ne sadrži potrošače. U zavisnosti od načina konfiguracije funkcije za detekciju, postoji mogućnost da se parcijalno energizovani potrošači ne posmatraju kao problematični. Za svakog potrošača koji se nalazi nizvodno od uređaja na kome je detektovan kvar potrebno je proveriti *energizaciju* (topološki atribut).
- Ako se prekidač više puta otvorio. U tom slučaju obzir će biti uzeto samo poslednje otvaranje prekidača.
- Ako je neenergizovano ostrvo detektovano u olujnom režimu (eng. *Storm mode*), procesiranje kvara može se preventivno odložiti, jer postoji velika verovatnoća da će biti još problema u tom delu elektrodistributivne mreže.
- Ako je neenergizovano ostrvo detektovano u režimu automatske rekonfiguracije mreže (vid optimizacije).

- Ako je već u toku obrada nekog drugog kvara koje se nalazi u istoj podstanici ili istom fideru.

Mnogi algoritmi za detekciju kvara se baziraju samo na indikatorima kvara, što može biti problem jer mnoge elektrodistributivne mreže nemaju dovoljan broj instaliranih indikatora kvara.

### 5.3 Automatsko otklanjanje privremenih kvarova

U okviru FLISR skupa funkcija postoji zasebna funkcija koja ima zadatak da pokuša da otkloni privremene kvarove u elektrodistributivnoj mreži. Privremeni kvarovi u mreži su česti i predstavljaju kratkotrajnu obustavu usluge napajanja najčešće unutar vremenskog perioda do jednog minuta. Uobičajni uzročnici privremenih kvarova su drveća, oluje i gromovi.

Kada prekidači sa relejnom zaštitom detektuju kvar, oni se otvaraju kako bi se sprečilo širenje kvara kroz mrežu. Ukoliko je kvar samo privremen, moguće je zatvoriti prekidače koji su reagovali na pojavu kvara. Ako funkcija uspešno zatvori prekidač, to znači da je vraćena usluga napajanja svim potrošačima koji se nalaze nizvodno od prekidača koji je reagovao na pojavu kvara. Ovo zatvaranje prekidača može biti hardverski (sposobnost ugrađena u samom uređaju na terenu) ili softverski (programski napisana sekvenca za zatvaranje prekidača). U oba slučaja bitno je da izvršavanje sekvence komandi nad prekidačima bude pod nadzorom kako bi se taj mehanizam mogao integrisati u sistem FLISR funkcija za detekciju kvarova i restauraciju usluge.

*Na primer, prilikom velikih oluja može da se desi da se odlomi grana i padne na vod uzrokovajući kratak spoj. Relejna oprema detektovaće kratak spoj i izolavaće kvar iz mreže. Međutim, kratak spoj najčešće spži granu i ona nakon toga padne na zemlju i više nema nikakav uticaj na dalju operabilnost opreme elektroenergetskog sistema.*

Najčešće se uređaji za otklanjanje kvarova konfiguriraju tako da imaju više pokušaja da probaju da otklone kvar pre nego što kvar proglaše trajnim. Nakon poslednje izvršene sekvence uređaj bi trebalo da postavi određeni signal za zaključavanje reklozera (eng. *Recloser lockout*) kako bi označio da su svi pokušaji završeni. Nakon detekcije da je funkcija za otklanjanje privremenih kvarova neuspešno završila, nastavlja se za izvršenje preostalih FLISR funkcija kako bi se nastavilo procesiranje kvara.

Signale za zaključavanje reklozera je potrebno pratiti na uređaju koji je odreagovao na kvar kao i na svim nizvodnim uređajima u mreži. Nizvodni recloser lockout signali su već dobavljeni u toku inicijalne pretrage opreme koja je zahvaćena kvarom koristeći funkciju za iscertavanje putanje ka dole.

## 5.4 Lokacija kvara

Funkcija za određivanje lokacije kvara ima zadatak izdvojiti skup sekcija koje bi mogle sadržati kvar. Za svoje proračune, ova funkcija koristi informacije od uređaja koji je reagovao na kvar i njemu nizvodnih indikatora kvarova (eng. *Fault indicator*) i merača kvarova (eng. *Fault recorder*). Indikatori kvara imaju diskretan signal koji pokazuje da li je struja kvara prošla kroz uređaj. Oni mogu biti zasebni uređaji ili njihova funkcionalnost može biti deo nekog drugog uređaja, najčešće prekidača. Merači kvarova imaju analogni signal koji beleži vrednost amplitude struje kvara.

Za proračun lokacije kvara pretežno se koriste dve metode koje su nazvane po uređajima čiji podaci se koriste za proračune:

- Metoda koja koristi indikatore kvara
- Metoda koja koristi merače kvara

Bez obzira na to koja od metoda se koristi za proračun, kandidati za lokaciju kvara su sekcije koje se nalaze nizvodno od prekidačke opreme koja je reagovala na kvar. Te sekcije su već dobavljene u toku inicijalne pretrage opreme an koju je uticao kvar pomoću *funkcije za iscertavanje putanje ka dole*.

### 5.4.1 Lociranje kvara pomoću merača kvara

Metoda koja koristi merače kvara simulira kvar na svakoj sekciji kandidata i upoređuje proračunate vrednosti struje kvara sa vrednostima koje su izmerili merači struje kvara koji se nalaze na uređajima nizvodno od prekidačke opreme koja je reagovala na kvar. Za svaku od sekcija kandidata određuje se verovatnoća da se na toj sekciji desio kvar. U zavisnosti od rasporeda instalirane opreme, ali i samog mesta gde se desio kvar, ova metoda kao rezultat može ponuditi tačnu sekciju ili više sekcija na kojima je najveća verovatnoća da se kvar dogodio.

### 5.4.2 Lociranje kvara pomoću indikatora kvara

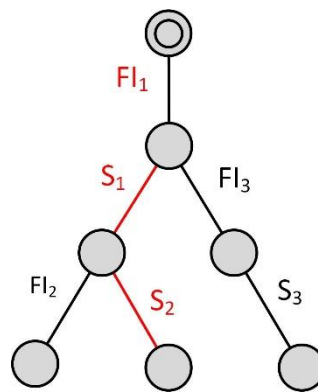
Ova metoda koristi indikatore kvarova koji se nalaze nizvodno od prekidačke opreme koja je reagovala na kvar. Kao lokacija kvara određuju se sekcije koje se nalaze nizvodno od indikatora kvarova koji su detektovali pojavu kvara, a uzvodno od indikatora kvarova koji nisu detektovali kvar.

Mnoga predložena rešenja za lociranje kvara koriste *iscrtavanje putanje po slojevima unapred* kako bi se elektrodistributivni graf pretražio po slojevima i kreirao uvezani lanac indikatora kvara (na primer:  $FI_1 \rightarrow FI_2 \rightarrow FI_3$ ). Ovaj postupak se može smatrati nedovoljno dobrim,

jer u uopštenom slučaju indikator kvara ne mora biti uzvodno od indikatora kvara koji za njim u lancu sledi (na primer:  $FI_1$  predak,  $FI_2$  i  $FI_3$  potomci). U slučaju da više od jednog potomka detektuje kvar, proračun funkcije za lokaciju kvara ne bi bio tačan.

Indikatore kvara koji se u elektrodistributivnoj mreži nalaze instalirani nizvodno od prekidačkog uređaja koji je reagovao na kvar moguće je dobiti preko rezultata inicijalne pretrage opreme zahvaćene kvarom preko *funkcije za iscrtavanje putanje ka dole*. Instalirani indikatori kvara koji su detektovali kvar se smeštaju u listu i zatim se vrši prolazak kroz listu i uklanjanje svih roditeljskih indikatora iz liste. Roditeljski indikatori za neki indikator kvara se pronalaze koristeći *funkciju za iscrtavanje putanje ga gore* za elemente koji su tipa indikatori kvara sa opcijom zaustavljanje pretrage prilikom nailaska na prvi uzvodni indikator kvara. U listi indikatora kvara ostali su samo indikatori koji su detektovali kvar, a koji nemaju potomaka indikatora koji su detektovali kvar. Za lokaciju kvara biće određene sekcije koje se nalaze ispod indikatora kvara koji su preostali u listi i njihovih potomaka indikatora koji nisu detektovali kvar. Ove sekcije pronalaze se pomoću *funkcije za iscrtavanje putanje ka dole* za elemente koji su tipa sekcija sa opcijom da se pretraga zaustavi nakon nailaska na indikator kvara.

Na Slika 51 dat je primer lociranja kvara pomoću indikatora kvara. Prikazana su 3 indikatora kvara, od kojih je  $FI_1$  detektovao pojavu kvara, a  $FI_2$  i  $FI_3$  nisu. Za lokaciju kvara biće zabeležene sekcije  $S_1$  i  $S_2$ , jer se nalaze ispod  $FI_1$ , a nisu ispod  $FI_2$  i  $FI_3$ .



Slika 51 – Primer lociranja kvara korišćenjem indikatora kvara

Na tačnost metode za lokaciju kvara koja koristi indikatore kvara očito utiče broj instaliranih indikatora kvara u elektrodistributivnoj mreži. U radu [54] su se autori bavili ovim problemom. Optimalan broj indikatora kvara određen je koristeći troškove prekida usluge i troškove instaliranja novih indikatora kvara.

Ukoliko je funkcija za lokaciju uspela da detektuje opremu na kojoj se desio kvar sledeći korak koji je potrebno uraditi je izolacija kvara. Ukoliko je funkcija za lokaciju izdvojila više sekcija kao moguće kandidate, biće pokrenuta funkcija za lokalizaciju kvara kako bi probalo da se smanji skup sekcija koje su zahvaćene kvarom.

## 5.5 Lokalizacija kvara

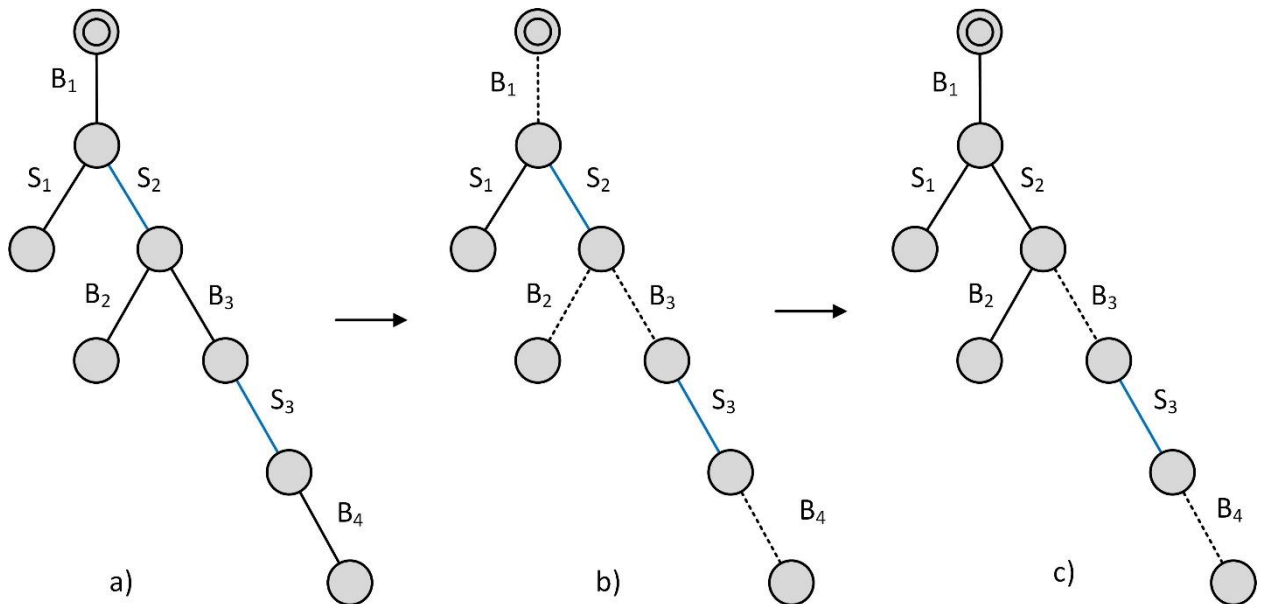
Funkcija za lokalizaciju kvara redukuje skup sekcija koje su izdvojene kao kandidati za lokaciju kvara tako što proverava koje sekcije prouzrokuju otvaranje zaštitne prekidačke opreme. Ova funkcija je izuzetno bitna za elektrodistributivne mreže koje imaju mali broj instaliranih indikatora kvarova i merača kvarova.

Skup sekcija nad kojima se vrši lokalizacija kvara se dele u podskupove otvaranjem svih prekidača koji se nalaze nizvodno od prekidača koji je reagovao na pojavu kvara. Nizvodni prekidači se dobavljaju korišćenjem *funkcije za iscertavanje putanje ka dole*.

Nakon što su svi potrebni prekidači otvoreni, vrši se zatvaranje jednog po jednog prekidača počevši od prekidača koji je detektovao kvar. Nakon svake operacije zatvaranja, funkcija čeka predefinisani period vremena u kome bi zaštitna oprema trebalo da reaguje u slučaju da je sa poslednjom operacijom energizovana sekcija na kojoj se nalazi kvar. Ukoliko se na sekciji ne nalazi kvar, stavljanje u pogon sekcije neće uzrokovati reakciju zaštitne opreme i sekcija se može izbrisati iz liste u kojoj se nalaze sekcije koje su kandidati za lokaciju kvara. Ukoliko se operacijom zatvaranja nekog prekidača ponovo uzrokuje reakciju zaštitne prekidačke opreme, za lokaciju kvara se proglašava deo mreže koji je energizovan tom operacijom. Nakon što je kvar lokalizovan, mogu se zatvoriti svi prekidači iz početnog skupa prekidača izuzev prekidača koji je ponovo uzrokovao reakciju zaštitne prekidačke opreme i njegovih prvih prekidača potomaka. Prekidači potomci mogu se pronaći korišćenjem *funkcije za iscertavanje putanje ka dole* od prekidača koji je pronađen kao problematičan sa opcijama da se traži samo prekidački uređaji i da se pretraga zaustavi u datom pravcu kada naiđe na prvi prekidački uređaj.

Na Slika 52 prikazan je primer za lokalizaciju kvara. Funkcija za lokaciju je izdvojila sekcije  $S_2$  i  $S_3$  kao moguće lokacije kvara (Slika 52-a), jer je na prekidaču  $B_1$  postojao indikator kvara koji je kvar detektovao, a nizvodno od indikatora nije bilo drugih instaliranih indikatora kvara. Pokrenuta je funkcija za lokalizaciju koja je na samom početku otvorila sve prekidače (Slika 52-b). Zatvaranjem redom prekidača, ustanovljeno je da prekidač  $B_3$  uzrokuje reagovanje zaštitne opreme, što znači da se kvar nalazi na sekciji  $S_3$ . Problematici prekidač  $B_3$  i njegov prvi potomak prekidač  $B_4$  se ostavljaju otvorenim, a svi ostali prekidači se mogu zatvoriti (Slika 52-c).



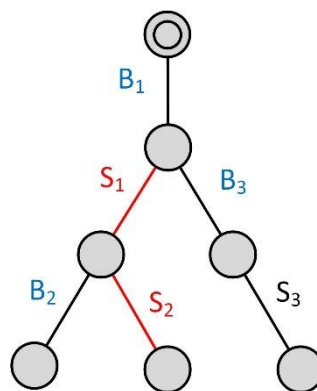


Slika 52 – Primer lokaliziranja kvara

## 5.6 Izolacija kvara

Funkcija za izolaciju kvara ima zadatak da izoluje deo mreže u kome se kvar nalazi od preostalog zdravog dela fidera. Za tu namenu potrebno je da se otvore prvi prekidači koji se nalaze iznad i ispod sekcija koje se nalaze na lokaciji kvara. Ovi prekidači se nalaze pomoću *funkcije za iscrtavanje putanje ka gore* i *funkcije za iscrtavanje putanje ka dole* sa opcijom da se pretražuje samo telemetrisana prekidačka oprema i da se pretraga zaustavi u datom pravcu kada se naiđe na prvu prekidačku opremu.

Na Slika 53 dat je primer izolovanja kvara u kome je potrebno otvoriti prekidače  $B_1$ ,  $B_2$  i  $B_3$  da bi se izolovale sekcije  $S_1$  i  $S_2$  koje na kojima je kvar lociran.



Slika 53 – Primer izolovanja kvara

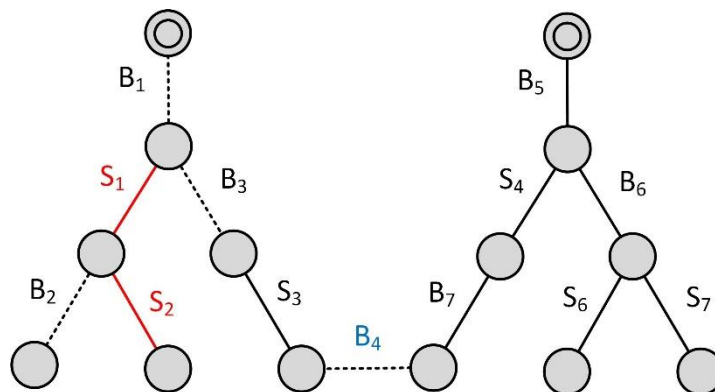
Često se kao dodatna opcija koristi da se u pretrazi uzmu u obzir samo elementi koji imaju vizuelnu izolaciju (što je omogućeno definisanjem tipova elemenata), kako bi se garantovala bezbednost radnika koji će izaći na teren i raditi na popravci samog kvara.

## 5.7 Restauracija usluge

Nakon što je izolovan problematičan deo mreže, funkcija za restauraciju usluge (eng. *Service restoration*) može povratiti uslugu napajanja delu fidera koji nije direktno pod kvarom, a ostao je bez usluge zbog kvara. Ukoliko postoje dostupni kapaciteti usluga će biti vraćena preko drugih redundantnih pravaca.

Sekcije koje se nalaze iznad prekidača koji je izolovao deo mreže pod kvarom najčešće su energizovane već u toku izvršavanja funkcije za lokalizaciju kvara. Ukoliko to eventualno nije slučaj, ovaj deo mreže energizuje se jednostavnim zatvaranjem prvog otvorenog uzvodnog prekidača koji se može naći pomoću *funkcije za iscrtavanje putanje ka gore*. Sekcije koje nisu zahvaćene kvarom, a koje se nalaze nizvodno od sekcija koje su u kvaru, moraju se energizovati koristeći alternativne puteve, koji su najčešće dostupni preko prekidača koji povezuju fidere (eng. *Tie breakers*) koji su u normalno uklopnom stanju otvoreni. Prekidači koji povezuju susedne fidere mogu se dobiti korišćenjem *funkcije za iscrtavanje putanje ka svim pravcima* sa opcijom da se pretražuju samo otvoreni prekidači i da se pretraga u svakom pravcu zaustavi kada naiđe na otvoreni prekidač.

Na Slika 54 dat je primer kako usluga napajanja za sekciju  $S_3$  može biti restaurirana ako se zatvori prekidač  $B_4$  koji povezuje dva susedna fidera.



Slika 54 – Primer restauracije usluge korišćenjem alternativnog izvora

Alternativni izvor napajanja mora biti energizovan i imati dovoljan kapacitet da pruži uslugu potrošačima koji su ostali bez napajanja. *Identifikator ostrva* i *stanje energizacije* prekidača dostupna su kao topološki atributi grana koje modeluju povezujuće prekidače. Analiza toka snaga

mora biti izvršena kako bi se proverilo da neće doći do propisanih prekoračenja na opremi elektrodistributivne mreže (vodovi, transformatori, prekidači, ...) kao i da će se zadržati kvalitet usluge. Analiza toka snaga koristi za svoje proračune *funkciju za iscrtavanje putanje po slojevima* kako bi se proračuni vršili redom po slojevima ostrva. Ukoliko ima više dostupnih prekidača poveznika, potrebno je pronaći najbolju varijantu za rekonfiguraciju tog dela elektrodistributivne mreže.

Takođe, u nekim ređim slučajevima dešava se da nijedan alternativni izvor ne može preuzeti sve potrošače, pa je u tim slučajevima potrebno podeliti ostrvo na dva ili više delova. Prilikom vraćanja usluge vodi se računa o prioritetu potrošača (npr. bolnice su najčešće najveći prioritet). Informacija o potrošačima je dobavljena prilikom inicijalnog *iscrtavanja na dole* opreme koja je zahvaćena problemom..

U ovom poglavlju opisana je jedna od mogućih implementacija funkcija za lokaciju kvara, izolaciju kvara i restauraciju usluge sa ciljem da se pokaže kako ove funkcije koriste rezultate topološke analize za svoje proračune. Omogućavajući automatski oporavak usluge od kvarova i smanjenju vremena prekida usluge, mogu se primetiti značajni merljivi benefiti iz bogatog skupa topoloških rezultata. Mnogi topološki algoritmi ističu svoje performanse i mogućnosti da procesiraju veliki broj raznovrsnih scenarija koji se mogu naći u elektrodistributivnoj mreži, dok istovremeno nude veoma siromašan skup topoloških rezultata, na primer da samo identifikuju ostrva u elektrodistributivnoj mreži. Ovakvi algoritmi za topološku analizu mogu se smatrati nekompletnima jer ne uvažavaju realne potrebe modernih funkcija za monitoring i kontrolu elektrodistributivne mreže. Zaključujemo da mogućnosti proračuna DMS rešenja zavise od kvaliteta skupa topoloških rezultata.

## 6. Testiranje i rezultati

Da bi se verificovala tačnost predloženog metoda, planirano je korišćenje statičkih podataka delova stvarnih elektrodistributivnih mreža koji su interesantni za topološku analizu. Kako su ovi podaci strogo poverljivi, oni se najčešće ne smeju direktno prikazivati u dokumentima naučnih istraživanja koja se objavljuju javno. Zbog toga će testiranje biti izvršeno i na dodatno osmišljenim scenarijima kako bi se sam postupak testiranja i rezultati testiranja mogli valjano dokumentovati. Ovi posebno generisani scenariji proširiće mogućnosti testiranja, jer će omogućiti da se algoritam testira sa različitim veličinama elektrodistributivnih mreža, kao i da se više interesantnih slučajeva nađe u okviru nekog scenarija.

Testiranje će biti izvršeno kroz 3 eksperimenta:

- Eksperiment 1 – verifikacija ispravnosti predloženog rešenja korišćenjem statičkih podataka delova stvarnih elektrodistributivnih mreža.
- Eksperiment 2 – verifikacija ispravnosti i robusnosti predloženog rešenja koristeći manuelno dizajniranu testnu mrežu koja sadrži topološke slučajeve koji su se pokazali kao problematični za postojeće metode topološke analize.
- Eksperiment 3 – verifikacija performansi predloženog rešenja koristeći različite veličine testnih mreža koje su programski generisane.

Konfiguracija mašine koja je korišćena za testiranje:

- Procesor: i5-7300HQ CPU @2.50GHz
- RAM: 32 GB

## 6.1 Eksperiment 1 – Verifikovanje tačnosti rešenja koristeći podatke stvarnih elektrodistributivnih mreža

Da bi se verifikovala ispravnost predloženog rešenja korišćeni su podaci stvarnih uravnoteženih i neuravnoteženih elektrodistributivnih mreža. Zbog poverljivosti takvih podataka u ovo radu neće biti navedeni nazivi elektrodistributivnih mreža nad kojima je vršeno testiranje predloženog rešenja, niti bilo kakvo navođenje podataka koje bi indirektno čitaocu moglo da ukaže o kojoj elektrodistributivnoj mreži se radi. Iz tog razloga, za potrebe dokumentovanja rezultata testiranja odabrani su isključivo delovi različitih elektrodistributivnih mreža kako bi se tim malim uzorkom reprezentovala raznolikost statičkih podataka iz stvarnih elektrodistributivnih mreža.

U ovom eksperimentu vršeno je testiranje predloženog rešenja pomoću tri testna slučaja koji su importovani iz CIM datoteka. Tabela 14 prikazuje osnovne informacije o svakom od tih slučajeva, gde je po redovima navedeno koliko je bilo ukupno CIM objekata kao i broj objekata za neke od interesantnijih tipova objekata. Brojnost je data samo za tipove objekata koji su značajniji sa aspekta teme eksperimenta: povezni čvorovi, vodovi, prekidačka oprema (prekidači strujnog kola, prekidački snage, rastavljači, rastavljači uzemljenja, osigurači itd.), transformatori (transformator snage, strujni transformator, potencijalni transformator itd.), kompenzatori i indikatori kvara.

Tabela 14 – Broj objekata za slučajeve iz stvarnih elektrodistributivnih mreža

	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
CIM objekti	920	1498	7463
Povezni čvorovi	57	133	227
Vodovi	35	13	139
Prekidačka oprema	20	203	49
Transformatori	12	5	12
Indikatori kvara	1	0	26
Kompenzatori	3	0	0

Iz prethodne tabele se može primetiti da su sva tri scenarija veoma različita po broju i tipu objekata koje scenariji sadrže. Pored toga, još veća razlika je u nivou detalja koji se koriste da bi se definisali najrelevantniji elementi elektrodistributivne mreže. Zbog prethodno navedenog, nemoguće je na osnovu samo ukupnog broja CIM objekata predvideti dimenzije topološkog čvor-grana modela. Međutim, neke grube dimenzije čvor-grana modela mogu se predvideti na osnovu

broja povezanih čvorova, vodova, prekidačke opreme i transformatora. U Tabela 15 je za svaki od scenarija prikazan ukupan broj generisanih čvorova i grana.

Tabela 15 – Topološki podaci za slučajeve iz stvarnih elektrodistributivnih mreža

	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
Broj čvorova	74	138	239
Broj grana	85	226	238

Veličina odabranih scenarija bila je pogodna da se proveriti tačnost svakog podatka koji je izračunat od strane topološke analize. Eksperimentom je potvrđena tačnost rešenja prilikom procesiranja scenarija izdvojenih iz stvarnih elektrodistributivnih mreža.

Prilikom merenja performansi predloženog rešenja, vremena su pojedinačno merena za 1. fazu učitavanja podataka iz CIM modela, 2. fazu generisanja matičnog modela na osnovu učitanih podataka i 3. fazu topološku analizu koja je kao osnovu koristila matični model. Rezultati su prikazani u Tabela 16.

Tabela 16 – Rezultati performansi za slučajeve iz stvarnih elektrodistributivnih mreža

	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
Učitavanje statičkog model	103 ms	140 ms	686 ms
Generisanje matičnog modela	10 ms	9 ms	11 ms
Inicijalna topološka analiza	<1 ms	<1 ms	<1 ms

Testni slučajevi jesu relevantni po pitanju reprezentativnosti opreme, ali nisu od neke važnosti za testiranje performansi jer su par dimenzija manji po pitanju količine podataka značajno manje u odnosu na veličine stvarnih elektrodistributivnih mreža. Na scenarijima koji su ovako maleni ne može se izvući neki zaključak o tome da li je predloženo rešenje za topološku analizu dovoljno efikasno, jer prilikom malih obrada rešenje ima određeno kratko vreme koje koristi za pripremu podataka i to vreme pripreme ne zavisi nužno od veličine scenarija koji se testira. Ono što se ipak može videti iz ovih podataka je da je učitavanje statičkog modela iz CIM datoteka veoma vremenski zahtevno u poređenju sa ostalim fazama koje uključuju generisanje matičnog model i inicijalnu topološku analizu.

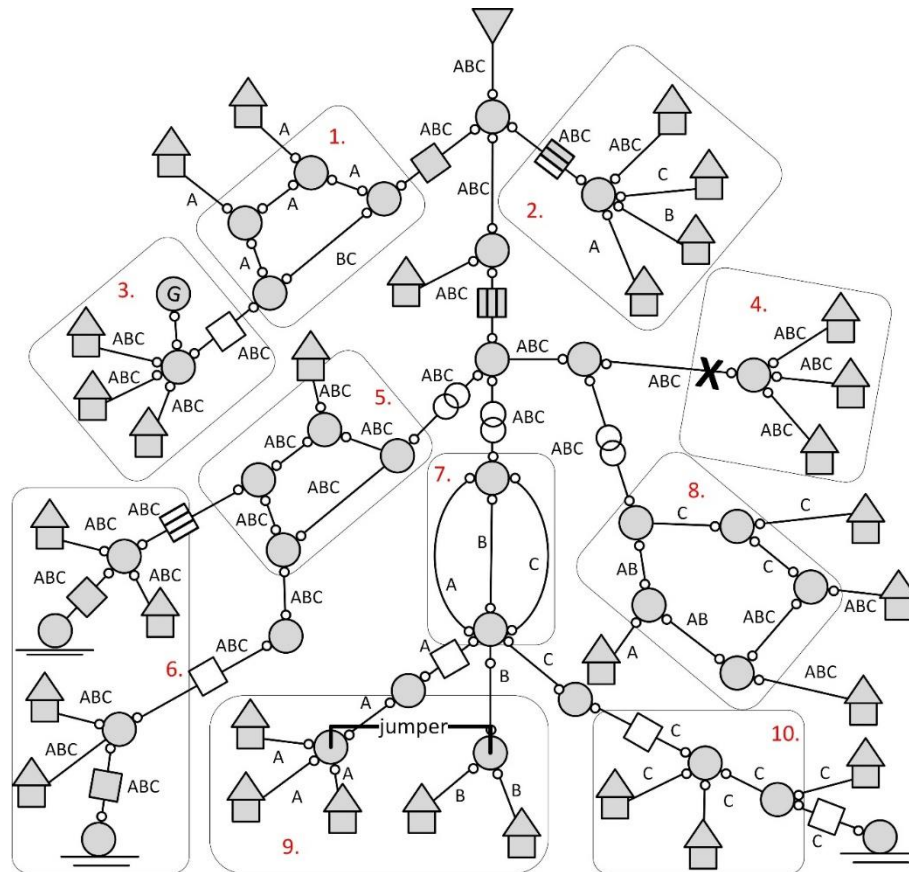
## 6.2 Eksperiment 2 – Verifikovanje tačnosti i robustnosti rešenja koristeći testnu mrežu koja sadrži problematične topološke slučajeve

Za potrebe verifikovanja robustnosti predloženog rešenja napravljena je posebna testna šema elektrodistributivne mreže u kojoj su umetnuti topološki slučajevi koji predstavljaju izazov za procesiranje postojećim metodama za topološku analizu. Mnoge metode ne samo da imaju probleme prilikom procesiranja ovakvih topoloških slučajeva, nego neke kompleksnije topološke slučajeve nisu uopšte u mogućnosti da reše. Prilikom dizajniranja šeme vođeno je računa da svaki topološki slučaj bude lako uočljiv čitaocu i da bude jednostavan za analizu. Pošto ima veći broj topoloških slučajeva koje je bilo interesantno pokazati, topološki slučajevi su prikazani što bliže jedan pored drugog kako šema ne bi bila prevelika za prikaz. Iz tog razloga, čitalac može primetiti da ova šema nema izgled tipične neuravnotežene elektrodistributivne mreže i njena namena je isključivo za potrebe demonstracije procesiranja interesantnih topoloških slučajeva.

Testna šema neuravnotežene elektrodistributivne mreže prikazana je na Slika 55 u formi čvor-prekidač modela. Ova testna mreža sadrži 1 permanentni izvor napajanja, 31 povezni čvoror, 21 naizmeničnih vodova, 11 instanci prekidačke opreme (8 klasičnih prekidača i 3 kompozitna prekidača), 3 transformatora snage, 30 potrošača, 3 tipa privremene opreme (generator, spojnica i prekid) i uzemljenje.

Na testnoj šemi su obeleženi i numerisani interesantni topološki slučajevi:

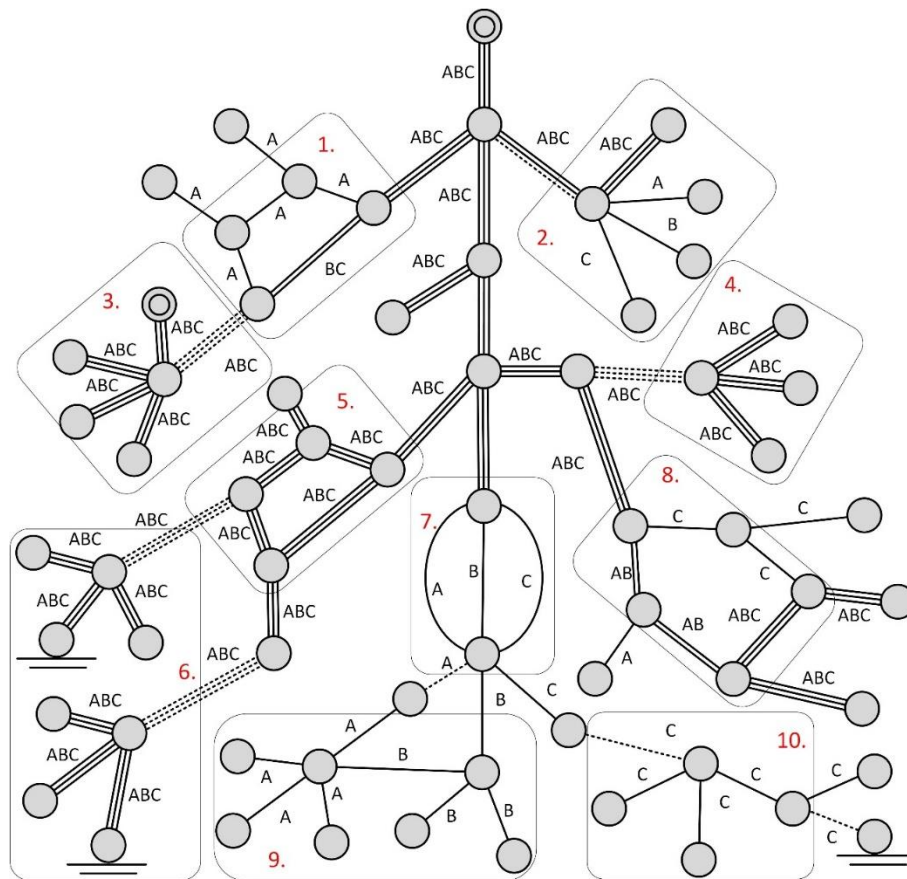
1. Prividna petlja,
2. Manipulacija pojedinačnom fazom kompozitnog prekidača,
3. Privremeni generator,
4. Privremeni prekid,
5. Petlja,
6. Uzemljeni deo mreže,
7. Prividno paralelne grane,
8. Dvosmerno usmerene grane,
9. Spojnica koja spaja opremu različite kataloške faznosti (aktivna faznost i kataloška faznost opreme će se razlikovati) i
10. Izolovano ostrvo.



Slika 55 – Model konektivnosti testne neuravnotežene elektrodistributivne mreže

Kako forma čvor-prekidač modela (koja je ilustrovana na Slika 55) nije pogodna za proračune DMS funkcija, izvršene su funkcije koje su napravile matematičku apstrakciju za svaki od fizičkih uređaja iz elektrodistributivne mreže. Svi relevantni fizički uređaji modelovani su pomoću čvorova i grana pri tome uvažavajući trenutno stanje prekidačke opreme i prisutnost privremene opreme u elektrodistributivnoj mreži. Dobijeni čvor-grana model ilustrovan je na Slika 56. Prilikom modelovanja generisano je 64 čvorova i 71 grana. Kako su svi relevantni fizički uređaji direktno modelovani u čvor-grana modelu, nisu izgubljene važne informacije o fizičkim uređajima prilikom prelaska iz čvor-prekidač u čvor-grana model.

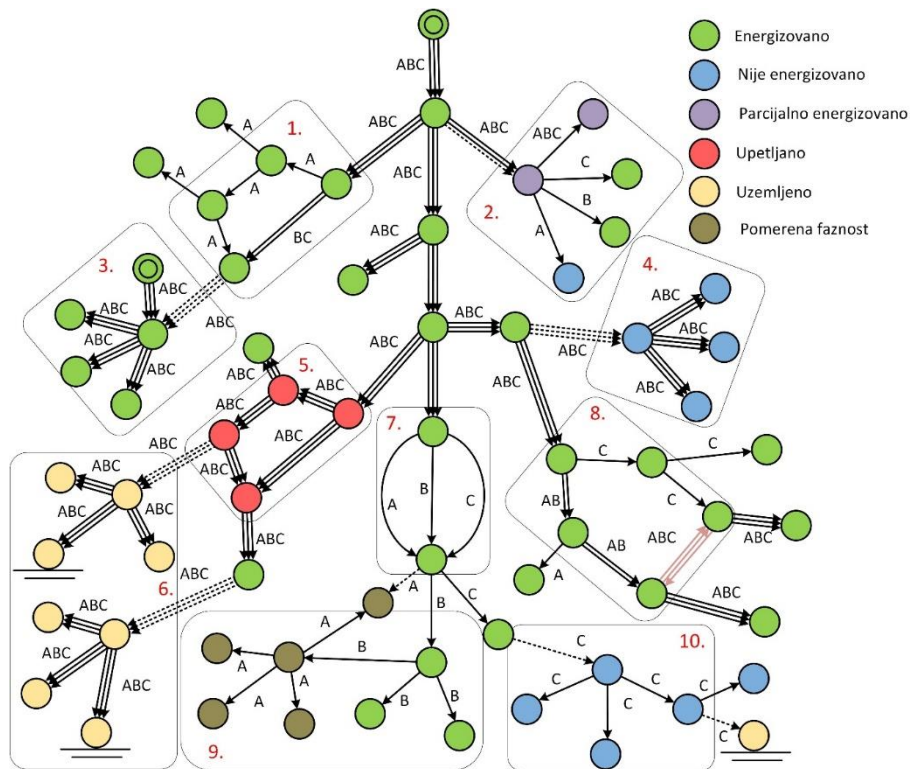




Slika 56 – Topološki model testne neuravnotežene elektrodistributivne mreže

Kako ovaj model sadrži statičke podatke (koji uređaji postoje i njihova konektivnost) i uvažava dinamičke podatke (stanje prekidačke opreme i prisustnost privremene opreme) on na jednoznačan način definiše topologiju elektrodistributivne mreže. U njemu su sadržane sve neophodne informacije koje su potrebne za topološku analizu grafa. Funkcije koje se bave pretragom grafa ne moraju voditi računa o stanju prekidačke i privremene opreme, jer je njihovo stanje već predstavljeno preko susednosti čvorova i grana. Na primer, ukoliko su dva čvora povezana posredstvom otvorenog prekidača, grana koja modeluje prekidač će biti neaktivna i na taj način će ukazati da trenutno ne postoji posredna veza između dva razmatrana čvora.

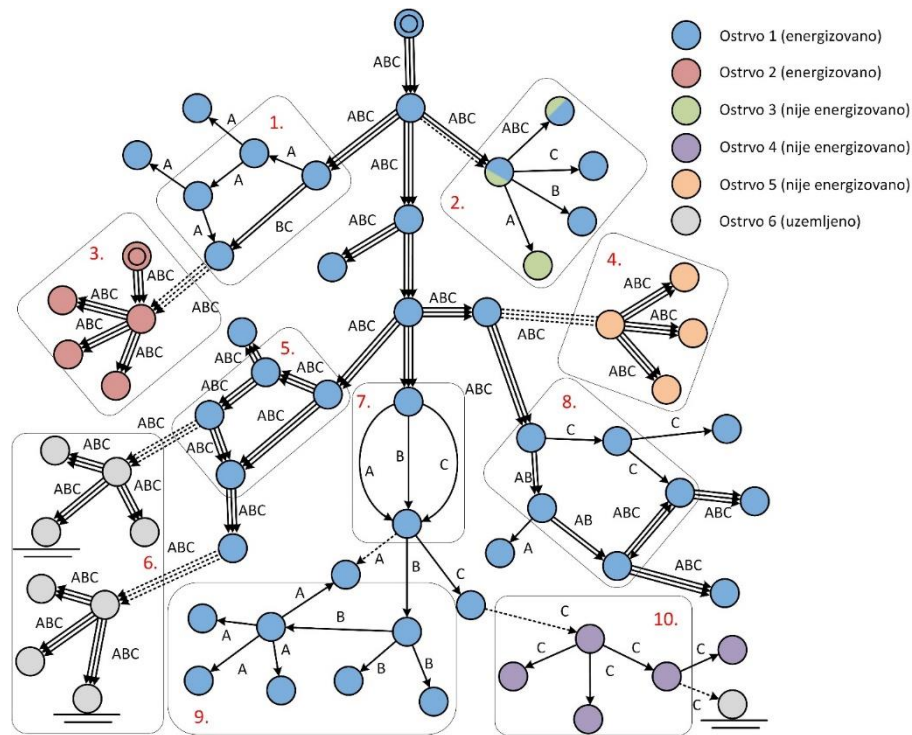
Slika 57 prikazuje izračunato stanje energizacije (boje) i ulazne i izlazne grane (strelice) za svaki čvor iz testnog grafa.



Slika 57 – Stanje energizacije testne neuravnotežene elektrodistributivne mreže

Interesantni za analizu su *Slučaj 1*, *Slučaj 5*, *Slučaj 7* i *Slučaj 8*. U *Slučaju 1* na prvi pogled deluje da postoji petlja u ovom delu mreže, ipak čvor koji se nalazi u donjem uglu za svaku svoju fazu ima samo jednu ulaznu granu. U *Slučaju 5* postoji obrazovana petlja u grafu, jer čvor koji se nalazi u donjem uglu ima dve ulazne grane za svaku fazu. Konture petlje markirane su čvorovima koji su na slici obojeni crvenom bojom i granama koje povezuju te čvorove. U *Slučaju 7* na prvi pogled deluje da su dva čvora povezani sa više paralelnih grana. Međutim, kako se radi o 3 monofazne grane čvor koji se nalazi u gornjem uglu ima za svaku fazu jednu izlaznu granu, dok čvor koji se nalazi u donjem uglu ima za svaku fazu jednu ulaznu granu. Dakle, u pitanju je pseudo petlja. U *Slučaju 8* je nakon procesiranja u donjem desnom uglu identifikovana (na slici je izdvojena rozom bojom) grana koja je dvosmerno usmerena, tj. ulazni i izlazni čvor grane se razlikuju po fazama.

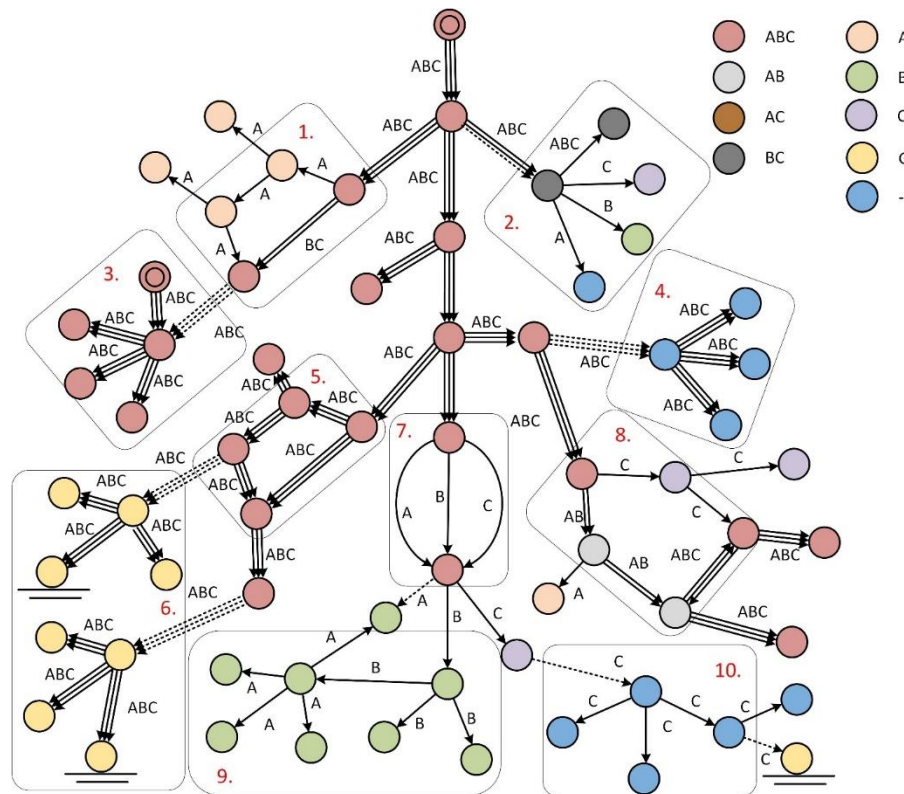
Slika 58 prikazuje detektovana ostrva u testnom grafu, gde je svako ostrvo obojeno posebnom bojom.



Slika 58 – Ostrva u testnoj neuravnoteženoj elektrodistributivnoj mreži

Broj energizovanih ostrva direktno zavisi od broja korenskih čvorova, od kojih kreće pretraga energizovanih ostrva. U *Slučaju 3* detektovano je energizovano ostrvo (*Ostrvo 2*) čiji izvor napajanja je privremeni generator, što pokazuje i smer grana u tom ostrvu. Kako topološki model čuva informacije o elementima koji su povezani posredstvom otvorenog prekidača, topološka analiza nije imala problema da detektuje izolovana ostrva (*Slučaj 2*, *Slučaj 4*, *Slučaj 6* i *Slučaj 10*). U *Slučaju 2* interesantno je to što dva čvora u fazi A pripadaju *Ostrvu 3*, a u fazi B i C pripadaju *Ostrvu 1*. U *Slučaju 4* i *Slučaju 10* detektovana su izolovana ostrva koja nisu energizovana. *Ostrvo 4* rezultat je normalnog uklopnog stanja prekidačke opreme, dok je *Ostrvo 5* nastalo zbog korišćenja privremenog prekida. U *Slučaju 6* je detekovatno izolovano ostrvo (*Ostrvo 6*) koje je uzemljeno. Iako deluje da elementi iz gornjeg dela nisu povezani sa elementima iz donjeg dela, svi ti elementi zajedno formiraju jedno ostrvo, jer su povezani preko zemlje.

Slika 59 prikazuje izračunatu aktivnu faznost za testnu šemu. Kataloška faznost napisana je pored svake grane, dok je aktivna faznost na slici prikazana pomoću boja čvorova gde je različitom bojom označena svaka od kombinacija aktivne faznosti. Da bi slika bila što preglednija nisu prikazani kataloška faznost čvorova i aktivna faznost grana.



Slika 59 – Aktivna faznost testne neuravnotežene elektrodistributivne mreže

Interesantni za analizu su *Slučaj 2* i *Slučaj 9*. U *Slučaju 2* kompozitni prekidač je reagovao i izolovao kvar u fazi A. Zbog toga je za trofazne elemente koji se nalaze nizvodno od prekidača izračunata aktivna faza BC. Monofazni elementi kataloške faznosti A su ostali bez usluge, dok kvar nije uticao na monofazne elemente faznosti B i C. U *Slučaju 9* detektovana je spojnica koja je privremeno vratila uslugu elementima koji su ostali bez usluge zbog kvara. Ono što je interesantno je to što je kataloška faznost potrošačkog područja koje je ostalo bez napajanja bila A, a da je pomoću spojnice potrošačko područje privremeno dobilo napajanje čija faznost je B. Aktivna faznost u ovom slučaju nije bila podskup kataloške faznosti.

Iako testna mreža po veličini ne može da se poredi sa veličinom prosečne elektrodistributivne mreže, važno je sagledati kako prethodni izazovni topološki slučajevi utiču na performanse predložene metode za topološku analizu. Vremena izvršavanja data su u Tabela 17 posebno za svaku fazu procesiranja.

Tabela 17 – Rezultati performansi za testnu neuravnoteženu elektrodistributivnu mrežu

Učitavanje statičkog modela	27 ms
Generisanje matičnog modela	9 ms
Inicijalna topološka analiza	5 ms

Dobijeni rezultati ukazuju da predloženi metod bez problema savladava testirane topološke slučajeve i da ukoliko se desi neki od tih slučajeva njegovo procesiranje neće značajno uticati na ukupno vreme izvršavanja topološke analize za određenu elektrodistributivnu mrežu.

### 6.3 Eksperiment 3 – Verifikovanje performantnosti rešenja koristeći testne mreže koje su programski generisane

U okviru ovog eksperimenta biće testirano kako veličina elektrodistributivne mreže utiče na vreme koje je potrebno da se izvrši topološka analiza i kolika količina memorije je potrebna za rad topološke analize. Za potrebe ovog eksperimenta napisan je program koji verno generiše testnu mrežu na osnovu zadatog broja ostrva i broja čvorova u ostrvu. Kako bi svako ostrvo zaista bilo posebno za procesiranje, broj čvorova koji su susedni u ostrvu je određivan slučajnim putem.

#### 6.3.1 Testne mreže sa jednakim ukupnim brojem čvorova

U prvom delu eksperimenta analizirano je kako broj čvorova u ostrvu utiče na vreme izvršavanja i memorijsko zauzeće, ako poredimo testne mreže koje imaju jednak ukupan broj čvorova i različiti broj ostrva. Vremena izvršenja merena su na primerima različitih uravnoteženih mreža koje sve imaju 100.000 čvorova. Rezultati merenja prikazani su u Tabela 18.

Tabela 18 – Uticaj broja ostrva i broja čvorova u ostrvu na vreme izvršavanja

Broj ostrva	Broj čvorova u ostrvu	Generisanje matičnog modela	Inicijalna topološka analiza	Topološka analiza promene
100	1.000	78,1 ms	218,6 ms	< 5 ms
200	500	78,2 ms	218,7 ms	< 5 ms
500	200	78,1 ms	218,7 ms	< 5 ms
1.000	100	78,1 ms	218,6 ms	< 5 ms

Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da se vremena izvršavanja ne razlikuju značajno za testne mreže koje imaju isti ukupan broj čvorova, a različit broj ostrva.

Za iste testne slučajeve izmereno je memorijsko zauzeće koje program koristi pri radu i rezultati su prikazani u Tabela 19.

Tabela 19 – Uticaj broja ostrva i broja čvorova u ostrvu na memorijsko zauzeće

Broj ostrva	Broj čvorova u ostrvu	Memorijsko zauzeće
100	1 000	138,0 MB
200	500	137,1 MB
500	200	135,9 MB
1.000	100	133,8 MB

Dobijeni rezultati ukazuju da memorijsko zauzeće blago raste sa povećanjem broja čvorova u ostrvu. S obzirom da se broj ostrva u prvom i u poslednjem slučaju razlikuje za čitav red veličine, može se zaključiti da rast memorijskog zauzeća od par procenata nije značajan.

### 6.3.2 Testne mreže sa različitim ukupnim brojem čvorova

U ovom delu eksperimenta analizirano je kako povećanje ukupnog broja čvorova utiče na vreme izvršavanja topološke analize i kako povećanje dimenzija testne mreže utiče na memoriju koja je potrebna za rad programa. Pošto je u prethodnom poglavlju pokazano u slučajevima kad je jednaki broj čvorova da promena broja ostrva i broja čvorova u ostrvu ne utiče primetno na performanse, sva merenja vršena su sa jednakim brojem čvorova po ostrvu (100), a kroz slučajeve je menjan broj ostrva (1 – 10.000).

Vremena izvršavanja topološke analize za testne mreže koje imaju različiti ukupni broj čvorova prikazana su u Tabela 20 za neuravnotežene mreže i u Tabela 21 za uravnotežene mreže.

Tabela 20 – Vremena izvršavanja topološke analize za neuravnotežene mreže

Ukupan broj čvorova	Generisanje matričnog modela	Inicijalna topološka analiza	Topološka analiza promene
100	<5 ms	<5 ms	<5 ms
1.000	<5 ms	<5 ms	<5 ms
10.000	15 ms	31 ms	<5 ms
100.000	156 ms	421 ms	<5 ms
1.000.000	1 187 ms	5 326 ms	<5 ms

Tabela 21 – Vremena izvršavanja topološke analize za uravnotežene mreže

Ukupan broj čvorova	Generisanje matričnog modela	Inicijalna topološka analiza	Topološka analiza promene
100	<5 ms	<5 ms	<5 ms
1.000	<5 ms	<5 ms	<5 ms
10.000	<5 ms	15 ms	<5 ms
100.000	78 ms	218 ms	<5 ms
1.000.000	671 ms	2 265 ms	<5 ms

Za oba tipa testnih mreža može se primetiti da vremena izvršavanja za generisanje matričnog modela i inicijalna topološka analiza približno linearno rastu sa porastom ukupnog broja čvorova. Takvi rezultati su očekivani jer generisanje matričnog modela direktno zavisi od broja elemenata koji je potrebno modelovati, a topološka analiza direktno zavisi od veličine grafa koji je potrebno pretražiti. Povećanje ukupnog broja čvorova nije uticalo na vreme izvršavanja topološke analize promene, jer je prilikom promene stanja prekidača ili korišćenja privremene opreme dovoljno pretražiti samo ostrvo na koje je uticala promena. Kako je u svim testnim slučajevima jedno ostrvo u svim scenarijima sadržalo jednaki broj elemenata, vreme izvršavanja topološke analize nije se menjalo sa promenom veličine testne šeme.

Ukoliko se uporede vremena izvršavanja za generisanje matričnog model i za topološku analizu koja su izmerena za neuravnotežene (Tabela 20) i za uravnotežene (Tabela 21) testne mreže, može se zaključiti da je procesiranje uravnotežene testne mreže bilo u proseku oko 50% brže u odnosu na neuravnotežene testne mreže. Iako se za oba tipa testnih mreža koriste isti matrični model i isti algoritam za topološku analizu, ključna razlika je u načinu na koji se oni koriste:

1. Topološki modeli čvorova i grana kod neuravnoteženih elektrodistributivnih mreža čuvaju veći deo topoloških informacija pojedinačno za svaku fazu, dok kod elektrodistributivnih uravnoteženih mreža topološke informacije se čuvaju za sve faze objedinjeno. U Tabela 2 dato je poređenje broja memorijskih lokacija koje se koriste za memorisanje atributa čvorova i grana kod uravnoteženih i neuravnoteženih elektrodistributivnih mreža.
2. Element u matričnom modelu kod uravnoteženih mreža čuva podatke o povezanosti dva čvora za sve faze, dok kod neuravnoteženih mreža element u matričnom modelu čuva podatke kakva je povezanost dva čvora u određenoj fazi.
3. Topološka analiza prilikom pretrage grafa po širini za neuravnoteženu mrežu pretražuje graf za svaku fazu pojedinačno, dok kod uravnoteženih mreža se graf pretražuje u jednom prolazu za sve faze.

Iako topološki slučajevi uravnoteženih elektrodistributivnih mreža predstavljaju podskup topoloških slučajeva neuravnoteženih elektrodistributivnih mreža, dobijeni rezultati testiranja pokazuju da je uravnotežene elektrodistributivne mreže bolje procesirati na način koji koristi njene posebnosti kao prednosti i time štedi vreme procesiranja i memoriju potrebnu za izvršavanje programa. Neke metode topološke analize koje podržavaju i uravnotežene i neuravnotežene elektrodistributivne mreže greše po tom pitanju i uravnotežene mreže procesiraju kao da su neuravnotežene, što nije optimalno. Druge metode uvidevši to imaju dva različita rešenja za uravnotežene i neuravnotežene elektrodistributivne mreže, što nije dobro sa aspekta troškova implementacije, održavanja i prilagođavanja za potrebe projekata takvih programskih rešenja. Sa tog aspekta najbolje je imati jedno rešenje, koje je osmišljeno tako da podrži specifičnosti topoloških slučajeva kod neuravnoteženih elektrodistributivnih mreža, a da pri tome zadrži efikasnost pri procesiranju uravnoteženih elektrodistributivnih mreža.



## 7. Zaključak

Disertacija opisuje jedno sveobuhvatno rešenje za topološku analizu uravnoteženih i neuravnoteženih elektrodistributivnih mreža. U osnovi rešenja je topološki model koji predstavlja matematičku apstrakciju elektrodistributivne mreže gde su relevantni fizički uređaji modelovani pomoću čvorova i grana kako bi se dobila forma grafa. Graf je definisan pomoću matricne strukture koja određuje povezanost čvorova u grafu uvažavajući i trenutno stanje prekidačke opreme i prisutnost privremene opreme. Stanje prekidačke opreme definisano je preko aktivnosti grane, što omogućava jednostavnu korekciju topološkog modela prilikom promene stanja prekidačke opreme. Topološka analiza vrši se pretragom grafa po širini kako bi se dobila slojevita struktura grafa. Kako sva relevantna fizička oprema elektrodistributivne mreže ima svoje predstavnike u grafu, dobijeni topološki rezultati direktno se mogu preslikati na fizičku opremu elektrodistributivne mreže. Matričan model memorisan je ulančanom tehnikom za retke matrice, koja je obezbedila smanjenje zauzeća memorije, broja operacija i omogućila fleksibilnost pri dodavanju i uklanjanju elemenata iz grafa.

Potreba za istraživanjem bila je motivisana problemom sa kojim su se suočavali postojeći metodi za topološku analizu prilikom procesiranja kompleksnijih topoloških slučajeva (na primer: manipulacija pojedinačnim fazama kompleksne prekidačke opreme, prividne i stvarne petlje, upetljana ostrva, dvosmerno usmerene grane, spojnice koje povezuju opremu različite kataloške faznosti itd.). Ako se u toku faze dizajna topološke analize ne predvide ovakvi topološki slučajevi, naknadno je veoma teško omogućiti njihovo procesiranje. Prihvatanjem da se dozvoli manipulacija prekidačkom i privremenom opremom u elektrodistributivnoj mreži koja bi dovela do kreiranja kompleksnijih topoloških slučajeva, otvara se veći broj mogućnosti za privremeno rekonfigurisanje elektrodistributivne mreže prilikom radova ili oporavaka od kvarova. Time se može skratiti vreme u kome je potrošačima uskraćena usluga distribucije električne energije. To je posebno značajno za elektrodistribucije razvijenih zemalja koje potrošačima kroz ugovore

garantuju sigurnost distribucije električne energije specificirajući koji period vremena u toku meseca mogu ostati bez usluge. Robusnost predloženog rešenja je verifikovana na primerima topoloških slučajeva koji su identifikovani da prave probleme postojećim metodama za topološku analizu.

Objedinjeno rešenje za topološku analizu uravnoteženih i neuravnoteženih elektrodistributivnih mreža ima prednosti u odnosu na pojedinačna razdvojena rešenja sa aspekta troškova implementacije rešenja, održavanja postojećih funkcionalnosti, proširivanja novim funkcionalnostima i prilagođavanju programskog rešenja potrebama pojedinačnih projekata. Ipak, to ne znači da bi uravnotežene elektrodistributivne mreže trebalo procesirati na identičan način kao neuravnotežene, jer bi time moglo značajno da se smanji njihova efikasnosti po pitanju vremena procesiranja i memorijskog zauzeća. Zbog toga je bilo izazovno dizajnirati fleksibilno softversko rešenje koje će obezbediti da se graf u slučaju uravnoteženih elektrodistributivnih mreža može pretraživati istovremeno za sve faze, dok u slučaju neuravnoteženih elektrodistributivnih mreža se graf pretražuje za svaku fazu pojedinačno. Time se uvažavaju specifičnosti topoloških slučajeva kod neuravnoteženih elektrodistributivnih mreža, a sa druge strane zadržava efikasnost pri procesiranju uravnoteženih elektrodistributivnih mreža.

Efikasnost topološke analize omogućena je: a) matičnom strukturom koja se jednostavno koriguje pri promeni stanja prekidačke opreme i dodavanju/uklanjanju opreme elektrodistributivne mreže; b) pri promeni topologije nije potrebno pretražiti ceo graf elektrodistributivne mreže, već samo deo grafa na koji je uticala promena i c) prilikom pretrage grafa su svi neophodni statički i dinamički podaci unapred pripremljeni u matičnom modelu, pa se u toku pretrage procesira isključivo matematička apstrakcija fizičke opreme. Koliko je bitna efikasnost pri procesiranju promene topologije trebalo bi sagledati sa aspekta da su rezultati topološke analize neophodan izvor topoloških informacija za proračune mnogih DMS funkcija čije izvršenje može da počne tek pošto su topološki rezultati izračunati. Efikasnost rešenja demonstrirana je na uravnoteženim i neuravnoteženim elektrodistributivnim mrežama različitim veličinama od 100 do 1.000.000 čvorova.

Kvalitet skupa topoloških rezultata koji se generišu kao rezultat topološke analize pozitivno utiče na mogućnosti i efikasnost naprednih funkcija DMS-a koje te topološke rezultate koriste. Zbog toga nisu dovoljno dobra rešenja koja nude samo određen okrnjen skup topoloških rezultata. Kako se može koristiti predloženi skup topoloških rezultata pokazano je na primeru funkcija za lokaciju kvara, izolaciju kvara i restauraciju usluge.

Dalji pravac na temu istraživanja moglo bi biti partitionisanje grafa elektrodistributivne mreže i implementacija distribuiranog rešenja gde bi jedinice obrade vršile samostalno procesiranje i po potrebi između sebe razmenjivale podatke od interesa.

---

## 8. Literatura

- [1] Kovač T, Bekut D, Sarić A. Topological analysis of unbalanced distribution networks with single-phase switching equipment and temporary elements. *International Transaction of Electrical Energy Systems*, Dec 2017; e2455. DOI:10.1002/etep.2455
- [2] Kovač T. Translating CIM model to bus-branch model, 2019 27th Telecommunications Forum (TELFOR), Belgrade, Serbia, Nov. 2019, pp. 1-4. DOI: 10.1109/TELFOR48224.2019.8971261
- [3] Kovač T. Application of topology analysis results for fault location, isolation and service restoration, 2020 19th International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH), East Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, Mar. 2020, pp. 1-5. DOI: 10.1109/INFOTEH48170.2020.9066325
- [4] Kovač T. Topološka analiza mreže korišćenjem tehnike retkih matrica, *Zbornik radova Fakulteta Tehničkih Nauka*, 11/2013; pp. 2050-2053.
- [5] Yao Y, Zhou G, Li H, Wang D. A network topology method by solving logic equations. *International Conference on Sustainable Power Generation and Supply (SUPERGEN) 2009*; 1-6. DOI: 10.1109/SUPERGEN.2009.5348294
- [6] Goderya F, Metwally AA, Mansour O. Fast detection and identification of islands in power networks. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* 1980; PAS-99:217-221. DOI: 10.1109/TPAS.1980.319631
- [7] Yao Y, Wang D, Wu Z. Determination of network topology by matrix partial multiplication. *International Conference on Mechatronics, Electronic, Industrial and Control Engineering (MEIC) 2014*; 853-856. DOI: 10.2991/meic-14.2014.387
- [8] Prais M, Bose A. A topology processor that tracks network modifications over time. *IEEE Transactions on Power Systems* 1988; 3:992-998. DOI: 10.1109/59.14552

- 
- [9] Jia Y, Xu Z. A graph-algebraic approach for detecting islands in power system. 4th IEEE/PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT EUROPE) 2013; 1-5. DOI: 10.1109/ISGTEurope.2013.6695326
- [10] Theodoro EAR, Benedito RAS, Alberto LFC. A fast method for islanding analysis in power system grids. IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS) 2011; 1856-1859. DOI: 10.1109/ISCAS.2011.5937948
- [11] Cavraro, G, Arghandeh, R, Poolla K, Von Meier A. Data-driven approach for distribution network topology detection. 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting 2015; 1-5 DOI: 10.1109/PESGM.2015.7286490
- [12] Sharon Y, Annaswamy AM, Motto AL, Chakraborty A. Topology identification in distribution network with limited measurements. 2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT); 1-6. DOI: 10.1109/ISGT.2012.6175638
- [13] Dzafic I, Henselmeyer S, Lecek N, Schwietzke T, Ablakovic D. Object oriented topology tracing for large scale three phase distribution networks. 3rd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe) 2012; 1-7. DOI: 10.1109/ISGTEurope.2012.6465851
- [14] Selvan MP, Swarup KS. Dynamic topology processing in a radial distribution system. IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution 2006; 153(2): 155- 163 DOI: 10.1049/ip-gtd:20050182
- [15] Lijun Q, Meng L, Lei W, Ying W. Implementation of CIM-based high-speed power network topology analysis. 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT) 2011; 1056-1060. DOI: 10.1109/DRPT.2011.5994051
- [16] Ma J, Yan X, Zhang Y, Lin Y, Wang Z, Thorp JS. A novel plant-station and inter-plant-station topology analysis method. International Transaction on Electrical Energy Systems 2016; 26:586–608. DOI: 10.1002/etep.2096
- [17] He Y, Yu DC, Deng Y, Lei J. An efficient topology processor for distribution systems. IEEE Power Engineering Society (PES) Winter Meeting 2001; 2:824-829. DOI: 10.1109/PESW.2001.916971
- [18] Li L, Zhizhong G, Chengmin W. A new topology structure and load flow solution for radial distribution networks. Power System Technology International Conference (PowerCon) 2002; 3:1064-1067. DOI: 10.1109/ICPST.2002.1047563
- [19] Deng Q, Zhou H, Chen Y. Topology analysis and modeling for smart distribution network based on complicated equipments. International Conference on Electrical and Control Engineering (ICECE) 2010; 4494-4497. DOI: 10.1109/iCECE.2010.1094

- 
- [20] Wang L, Guo, L, Li S, Xie J, Li L, Hong Y, Wang Y. Power Network Topology Modelling Method Based on CIM. In *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, Vol. 1622, No. 1, p. 012036. IOP Publishing. DOI: 10.1088/1742-6596/1622/1/012036
- [21] Čapko D, Erdeljan A, Popović M, Švenda G. An optimal relationship-based partitioning of large datasets. In *East European Conference on Advances in Databases and Information Systems 2010 Sep 20* (pp. 547-550). Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-642-15576-5\_42
- [22] Erdeljan A, Čapko D, Vukmirović S, Bojanić D, Čongradac V. Distributed PSO algorithm for data model partitioning in power distribution systems. *Journal of applied research and technology*. 2014;12(5):947-57. DOI: 10.1016/S1665-6423(14)70601-7
- [23] Heidarifar M, Ghasemi H. A network topology optimization model based on substation and node-breaker modeling. *IEEE Transactions on Power Systems* 2016; 31:247-255. DOI: 10.1109/TPWRS.2015.2399473
- [24] Zhu Z, Xu B, Brunner C, Guise L, Han G. Distributed topology processing solution for distributed controls in distribution automation systems. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2017; 11(3): 776-84. DOI: 10.1049/iet-gtd.2016.0421
- [25] Pradeep Y, Seshuraju P, Khaparde SA, Joshi RK. CIM-based connectivity model for bus-branch topology extraction and exchange. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2011; 2(2): 244-53. DOI: 10.1109/TSG.2011.2109016
- [26] Strezoski V. *Osnovi elektroenergetike*. Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad (2014).
- [27] Strezoski V. *Osnovni proračuni elektroenergetskih sistema (Tom I i Tom II)*. Srbija: Novi Sad, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2017.
- [28] *Voices of Experience | Advanced Distribution Management Systems*. Prepared for the U.S. Department of Energy by the National Renewable Energy Laboratory. Feb 2015.
- [29] Bondy J.A., and Murty USR. *Graph theory with applications*. Vol. 290. London: Macmillan, 1976.
- [30] Balakrishnan R, Ranganathan K. *A textbook of graph theory*. Springer Science & Business Media; 2012 Sep 20.
- [31] Popović D, Bekut D, Treskanica V. *Specijalizovani DMS algoritmi*. DMS Group. 2004.
- [32] IEC 61970 Energy management system application program interface (EMS-API) - Part 301: Common Information Model (CIM) Base, IEC, Edition 1.0, November 2003
- [33] IEC 61968 Application integration at electric utilities - System interfaces for distribution management - Part 11: Common Information Model (CIM), IEC Draft
- [34] Bray T, Paoli J, Sperberg-McQueen CM, Maler E, Yergeau F, Cowan J. *Extensible markup language (XML) 1.0*.

- 
- [35] Lassila O, Swick RR. Resource description framework (RDF) model and syntax specification.
- [36] Manola F, Miller E, McBride B. RDF primer. W3C recommendation. 2004 Feb 10;10(1-107):6.
- [37] Neumann S. CIM extensions for electrical distribution. in Proc. IEEE Power Eng. Soc. Winter Meeting, Columbus, OH, 2001. DOI: 10.1109/TPWRS.2003.814857
- [38] Wu J, Schulz N. Overview of CIM-oriented database design and data exchanging in power system applications, in Proc. 37th Annu. North American Power Symp., 2005, pp. 16–20. DOI: 10.1109/NAPS.2005.1560495
- [39] McMorran A. An introduction to IEC 61970 301&61968-11: The Common Information Model. Glasgow: University of Strathclyde; 2007; 42 p.
- [40] McMorran, Alan W., et al. Translating CIM XML power system data to a proprietary format for system simulation. *IEEE Transactions on Power Systems* 19.1 (2004): 229-235. DOI: 10.1109/TPWRS.2003.820691
- [41] Pradeep, Yemula, et al. CIM-based connectivity model for bus-branch topology extraction and exchange. *IEEE Transactions on Smart Grid* 2.2 (2011): 244-253. DOI: 10.1109/TSG.2011.2109016
- [42] Popovic D, Varga E, Perlic Z. Extension of the common information model with a catalog of topologies. *IEEE Transactions on Power Systems* 2007; 22:770-777. DOI: 10.1109/TPWRS.2007.895171
- [43] Moseley, John D, Nitika V. Mago. Methods of converting CIM power system models into bus-branch formats utilizing topology processing algorithms and minimal schema modifications to IEC 61968/70. 2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting. IEEE, 2013. DOI: 10.1109/PESMG.2013.6672142
- [44] Strezoski V. Analiza elektroenergetskih sistema. Fakultet Tehničkih Nauka u Novom Sadu, Novi Sad, Srbija. 2006.
- [45] Levi V, Bekut D: Primena računarskih metoda u elektroenergetici, 1997, I izdanje
- [46] Moseley, John D., et al. Lessons and experiences in the implementation of a consolidated transmission modeling data system at ERCOT. *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal* 1 (2014): 12-20. DOI:10.1109/JPETS.2014.2363405
- [47] Oommen, Mathew P, Jeffrey L. Kohler. Effect of three-winding transformer models on the analysis and protection of mine power systems. *IEEE Transactions on Industry applications* 35.3 (1999): 670-674. DOI: 10.1109/28.767019
- [48] Guo R, Vankayala V, Qu C, Crozier E, Allen S, Adeleye K, Dabic V, Found P, Shah N. Fault location, isolation and service restoration -- optimizing field operations for

- 
- utilities. In Rural Electric Power Conference (REPC), 2016 IEEE 2016 May 15 (pp. 33-41). IEEE. DOI: 10.1109/REPC.2016.14
- [49] Ling W, Liu D. A distributed fault localization, isolation and supply restoration algorithm based on local topology. *International Transactions on Electrical Energy Systems*. 2015 Jul 1;25(7):1113-29. DOI:10.1002/etep.1859
- [50] Le D, Bui D, Ngo C, Le A. FLISR Approach for Smart Distribution Networks Using E-Terra Software - A Case Study. 2018 *Energies*, 11(12), 3333.
- [51] Parikh P, Voloh I, Mahony M. Fault location, isolation, and service restoration (FLISR) technique using IEC 61850 GOOSE. In *Power and Energy Society General Meeting (PES)*, 2013 IEEE 2013 Jul 21 (pp. 1-6). IEEE. DOI: 10.1109/PESMG.2013.6672862
- [52] Koch-Ciobotaru C, Monadi M, Luna A, Rodriguez P. Distributed FLISR algorithm for smart grid self-reconfiguration based on IEC61850. In *Renewable Energy Research and Application (ICRERA)*, 2014 International Conference on 2014 Oct 19 (pp. 418-423). IEEE. DOI: 10.1109/ICRERA.2014.7016420
- [53] Uluski RW. Using distribution automation for a self-healing grid. *Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)*, 2012 IEEE PES 2012 May 7 (pp. 1-5). IEEE. DOI:10.1109/TDC.2012.6281582
- [54] Shahsavari A, Fereidunian A, Ameli A, Mazhari SM, Lesani H. A healer reinforcement approach to smart grids by improving fault location function in FLISR. In *Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, 2013 13th International Conference on 2013 Nov 1 (pp. 114-119). IEEE. DOI: 10.1109/EEEIC-2.2013.6737893

## 9. Biografija



Tomislav Kovač je rođen 1. novembra 1989. godine u Subotici. Osnovnu školu “Sveti Sava“ iz Subotice završio je 2004. godine sa odličnim uspehom. Gimnaziju “Svetozar Marković” iz Subotice završio je 2008. godine sa odličnim uspehom. U toku pohađanja osnovne i srednje škole bio je redovan učesnik takmičenja gde je više puta osvajao najviša priznanja na opštinskim i okružnim takmičenjima iz matematike, hemije i srpskog jezika. Tokom školovanja igrao je za rukometni klub Spartak iz Subotice. Diplomске studije završio je 2012. godine na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu, na studijskom programu Računarstvo i automatika sa prosečnom ocenom 9.36. Master studije završio je 2013. godine na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu na studijskom programu Računarstvo i automatika sa prosečnom ocenom 9.43. Po završetku master studija upisao je doktorske studije na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu na studijskom programu Energetika, elektronika i telekomunikacije. Ispite na doktorskim studijama je položio sa prosečnom ocenom 10.00. Autor je jednog rada u međunarodnom časopisu [1] i dva rada [2][3] u istaknutim međunarodnim konferencijama, gde su dokumentovana naučna istraživanja koja su relevantna za temu doktorske disertacije.

Po završetku master studija, 2013. godine, zaposlen je u kompaniji “Schneider Electric DMS NS” na poziciji razvojnog inženjera. Softverski arhitekta za SCADA servise postaje 2019. godine. Od 2021. godine je angažovan kao poslovni analitičar za SCADA servise. Na Fakultetu tehničkih nauka bio je izabran za zvanje asistenta-mastera u 2 mandata od 2014. do 2020. godine na katedri za Primenjeno softversko inženjerstvo sa nepunim radnim vremenom. Bio je zadužen za vođenje nastave iz predmeta Osnovi računarskih mreža 1, Osnovni računarskih mreža 2 i Napredni industrijski komunikacioni protokoli. Dobitnik je “Godišnje nagrade i plakete za izvanredan



doprinos u formiranju novih predmeta na katedri i nesebičnu pomoć u podizanju znanja drugih asistenata i stručnih saradnika“, koju mu je dodelio Fakultet tehničkih nauka 2015. godine.

Oženjen je suprugom Natašom sa kojom ima ćerku Saru (2019. godišće) i sina Luku (2020. godišće). Živi i radi u Novom Sadu.

## План третмана података

<b>Назив пројекта/истраживања</b>
<b>Робустан метод за тополошку анализу графа уравнотежених и неуравнотежених електродистрибутивних мрежа</b>
<b>Назив институције/институција у оквиру којих се спроводи истраживање</b>
а) Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука б) в)
<b>Назив програма у оквиру ког се реализује истраживање</b>
<b>Истраживање се врши у оквиру израде докторске дисертације на студијском програму Енергетика, Електроника и телекомуникације.</b>
<b>1. Опис података</b>
<i>1.1 Врста студије</i> <i>Укратко описати тип студије у оквиру које се подаци прикупљају</i> <b><u>Докторска дисертација</u></b> _____ _____
<b>1.2 Врсте података</b> а) <b>квантитативни</b> б) <b>квалитативни</b>
<b>1.3. Начин прикупљања података</b> а) анкете, упитници, тестови б) клиничке процене, медицински записи, електронски здравствени записи в) генотипови: навести врсту _____ г) административни подаци: навести врсту _____ д) узорци ткива: навести врсту _____ ђ) снимци, фотографије: навести врсту _____ е) текст, навести врсту _____ ж) мапа, навести врсту _____

з) остало: описати Рачунарски експерименти

1.3 Формат података, употребљене скале, количина података

1.3.1 Употребљени софтвер и формат датотеке:

- a) Excel фајл, датотека \_\_\_\_\_
- b) SPSS фајл, датотека \_\_\_\_\_
- c) PDF фајл, датотека \_\_\_\_\_
- d) Текст фајл, датотека \_\_\_\_\_
- e) JPG фајл, датотека \_\_\_\_\_
- f) Остало, датотека .xml

1.3.2. Број записа (код квантитативних података)

- a) број варијабли велики број
- б) број мерења (испитаника, процена, снимака и сл.) велики број

1.3.3. Поновљена мерења

- a) да
- б) не

Уколико је одговор да, одговорити на следећа питања:

- a) временски размак измедју поновљених мера је променљив
- б) варијабле које се више пута мере односе се на време извршења и заузеће меморије
- в) нове верзије фајлова који садрже поновљена мерења су именоване као \_\_\_\_\_

Напомене: \_\_\_\_\_

*Да ли формати и софтвер омогућавају дељење и дугорочну валидност података?*

- a) да
- б) не

*Ако је одговор не, образложити* \_\_\_\_\_

---

## 2. Прикупљање података

### 2.1 Методологија за прикупљање/генерисање података

#### 2.1.1. У оквиру ког истраживачког нацрта су подаци прикупљени?

а) експеримент, навести тип **рачунарски експеримент** \_\_\_\_\_

б) корелационо истраживање, навести тип \_\_\_\_\_

ц) анализа текста, навести тип \_\_\_\_\_ **анализа доступне литературе** \_\_\_\_\_

д) остало, навести шта \_\_\_\_\_

*2.1.2 Навести врсте мерних инструмената или стандарде података специфичних за одређену научну дисциплину (ако постоје).*

---

---

### 2.2 Квалитет података и стандарди

#### 2.2.1. Третман недостајућих података

а) Да ли матрица садржи недостајуће податке? Да **Не**

Ако је одговор да, одговорити на следећа питања:

а) Колики је број недостајућих података? \_\_\_\_\_

б) Да ли се кориснику матрице препоручује замена недостајућих података? Да Не

в) Ако је одговор да, навести сугестије за третман замене недостајућих података

---

#### 2.2.2. На који начин је контролисан квалитет података? Описати

**Квалитет података је контролисан поређењем експерименталних и теоријских података.**

---

2.2.3. На који начин је извршена контрола уноса података у матрицу?

**Контрола уноса података је изведена на основу експертног знања.**

---

### 3. Третман података и пратећа документација

#### 3.1. Третман и чување података

3.1.1. Подаци ће бити депоновани у Универзитет у Новом Саду репозиторијум.

3.1.2. URL адреса <https://www.cris.uns.ac.rs/searchDissertations.jsf>

3.1.3. DOI \_\_\_\_\_

3.1.4. Да ли ће подаци бити у отвореном приступу?

а) **Да**

б) Да, али после ембарга који ће трајати до \_\_\_\_\_

в) **Не**

Ако је одговор не, навести разлог \_\_\_\_\_

3.1.5. Подаци неће бити депоновани у репозиторијум, али ће бити чувани.

Образложење

---

---

#### 3.2 Метаподаци и документација података

3.2.1. Који стандард за метаподатке ће бити примењен? **Стандард који примењује**

**Репозиторијум докторских дисертација Универзитета у Новом Саду**

3.2.1. Навести метаподатке на основу којих су подаци депоновани у репозиторијум.

---

---

*Ако је потребно, навести методе које се користе за преузимање података, аналитичке и процедуралне информације, њихово кодирање, детаљне описе варијабли, записа итд.*

---

---

---

---

### 3.3 Стратегија и стандарди за чување података

3.3.1. До ког периода ће подаци бити чувани у репозиторијуму? \_\_\_\_\_

3.3.2. Да ли ће подаци бити депоновани под шифром? **Да** **Не**

3.3.3. Да ли ће шифра бити доступна одређеном кругу истраживача? **Да** **Не**

3.3.4. Да ли се подаци морају уклонити из отвореног приступа после извесног времена?

**Да** **Не**

Образложити

---

---

## 4. Безбедност података и заштита поверљивих информација

Овај одељак **МОРА** бити попуњен ако ваши подаци укључују личне податке који се односе на учеснике у истраживању. За друга истраживања треба такође размотрити заштиту и сигурност података.

### 4.1 Формални стандарди за сигурност информација/података

Истраживачи који спроводе испитивања с људима морају да се придржавају Закона о заштити података о личности ([https://www.paragraf.rs/propisi/zakon\\_o\\_zastiti\\_podataka\\_o\\_licnosti.html](https://www.paragraf.rs/propisi/zakon_o_zastiti_podataka_o_licnosti.html)) и одговарајућег институционалног кодекса о академском интегритету.

4.1.2. Да ли је истраживање одобрено од стране етичке комисије? Да **Не**

Ако је одговор Да, навести датум и назив етичке комисије која је одобрила истраживање

---

4.1.2. Да ли подаци укључују личне податке учесника у истраживању? Да **Не**

Ако је одговор да, наведите на који начин сте осигурали поверљивост и сигурност информација везаних за испитанике:

- а) Подаци нису у отвореном приступу
  - б) Подаци су анонимизирани
  - ц) Остало, навести шта
- 
- 

## 5. Доступност података

5.1. Подаци ће бити

**а) јавно доступни**

б) доступни само уском кругу истраживача у одређеној научној области

ц) затворени

Ако су подаци доступни само уском кругу истраживача, навести под којим условима могу да их користе:

---

---

Ако су подаци доступни само уском кругу истраживача, навести на који начин могу приступити подацима:

---

---

5.4. Навести лиценцу под којом ће прикупљени подаци бити архивирани.

Ауторство - некомерцијално

---

## 6. Улоге и одговорност

6.1. Навести име и презиме и мејл адресу власника (аутора) података

**Томислав Ковач, tomlav.kovac@uns.ac.rs**

---

6.2. Навести име и презиме и мејл адресу особе која одржава матрицу с подацима

**Томислав Ковач, tomlav.kovac@uns.ac.rs**

---

6.3. Навести име и презиме и мејл адресу особе која омогућује приступ подацима другим истраживачима

**Томислав Ковач, tomlav.kovac@uns.ac.rs**

---