

UNIVERZITET U BEOGRADU
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Srđan R. Dimitrijević

**OBNAVLJANJE POGONA
DISTRIBUTIVNIH SISTEMA U OKVIRU
RAZVOJA INTELIGENTNIH
ELEKTROENERGETSKIH MREŽA**

doktorska disertacija

Beograd, 2012

UNIVERSITY OF BELGRADE
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING

Srđan R. Dimitrijević

**SMART GRID: SERVICE RESTORATION
IN DISTRIBUTION POWER SYSTEMS**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2012

Mentor:

Dr Nikola Rajaković

Redovni profesor, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu

Članovi komisije:

Dr Nikola Rajaković

Redovni profesor, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu

Dr Ivan Škokljev

Redovni profesor, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu

Dr Rade Ćirić

Naučni saradnik, Pokrajinski sekretarijat za nauku i tehnološki razvoj u Vladi AP
Vojvodine, Novi Sad

Dr Zoran Radojević

Redovni profesor, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu

Datum odbrane:

OBNAVLJANJE POGONA DISTRIBUTIVNIH SISTEMA U OKVIRU RAZVOJA INTELIGENTNIH ELEKTROENERGETSKIH MREŽA

REZIME

Opis disertacije

Prilikom rešavanja problema obnavljanja pogona distributivnih sistema u postojećoj literaturi su uglavnom upotrebljavane ili modifikovane već poznate metode rešavanja problema iz drugih oblasti elektroenergetike. U radu je prezentovan pregled i opis postojećih načina rešavanja obnavljanja pogona

U ovoj disertaciji je razvijen i verifikovan novi način rešavanja problema obnavljanja pogona. U disertaciji se razmatra problem obnavljanja pogona distributivnih sistema i u svetlu aktuelnih i globalnih napora kojim bi se postojeće elektroenergetske mreže transformisale u inteligentne elektroenergetske mreže. Iako postoji određeni broj konvencionalnih metoda i načina rešavanja obnavljanja pogona u distributivnim sistemima ipak novi koncept inteligentnih mreža zahteva usavršavanje postojećih kao i pronalaženje novih načina rešavanja ovog problema. Efikasno rešavanje obnavljanja pogona distributivnih sistema se u predloženoj temi ostvaruje pomoću algoritma koji je zasnovan na Primovom algoritmu, odnosno njegovoj modifikaciji. Primov algoritam, uključujući navedenu modifikaciju, je matematički detaljno opisan a zatim je primenljivost modifikovanog algoritma na rešavanje obnavljanja pogona distributivnih sistema sveobuhvatno analizirana. Iz toga proističe novi način rešavanja obnavljanja pogona distributivnih sistema koji se efikasno uklapa u širi koncept inteligentne mreže. Novi način rešavanja obnavljanja pogona je sastavni deo kompletno razvijenog algoritmom koji uključuje i proračune tokova snaga, rasterećenje preopterećenih elemenata prilikom rešavanja obnavljanja pogona kao i generisanje potrebnih prekidačkih akcija. Na kraju je razvijen algoritam testiran na modelu složene distributivne mreže.

Cilj istraživanja i doprinosi

Cilj istraživanja i konkretan doprinos u predloženoj disertaciji je razvoj logike modifikovanog Primovog algoritma sa zadatkom nalaženja novog načina rešavanja obnavljanja pogona distributivnih sistema. U tom svetlu je detaljno prikazana modifikacija Primovog algoritma u kontekstu predloženog načina rešavanja obnavljanja pogona distributivnih sistema. Ključni doprinos je formiranje efikasnog, novog algoritma za obnavljanje pogona distributivnih sistema. Verifikacija ovog doprinosa je moguća samo postizanjem zadovoljavajućih performansi u postupcima realnih aplikacija na složene zadatke obnavljanja pogona i to je takođe dodatni zadatak u disertaciji. Naravno time je stvorena mogućnost za dalja istraživanja i usavršavanja postupaka obnavljanja pogona distributivnih sistema i provera primenljivosti na rešavanje drugih problema kako u oblasti elektroenergetike tako i u drugim tehničkim disciplinama.

Predloženi način rešavanja je ilustrovan za slučaj kada je primarni cilj obnavljanja pogona minimizacija neisporučene električne energije potrošačima koji su ostali bez napajanja posle identifikacije i izolacije kvara na distributivnoj mreži. Sekundarni cilj je minimizacija broja prekidačkih akcija potrebnih za realizaciju obnavljanja pogona. Takođe, predloženi način rešavanja omogućuje definisanje željenog uklopnog stanja mreže nakon realizacije obnavljanja pogona u nenapojenom području. Ovi ciljevi zajedno sa unapređenjima kod njihove realizacije zaokružuju doprinose u disertaciji.

Zaključak

U doktorskoj disertaciji je razmatran problem obnavljanja pogona u distributivnim sistemima uključujući ulogu obnavljanja pogona u inteligentnim elektroenergetskim mrežama. Predložen je novi način rešavanja obnavljanja pogona u distributivnim sistemima. Glavni doprinosi ove disertacije su:

- Povećan broj potrošača kojima je obezbeđeno obnavljanje napajanja električnom energijom posle poremećaja u distributivnom sistemu.

- Smanjenjen broja prekidačkih akcija neophodnih da se dobijeno rešenje obnavljanja napajanja električnom energijom realizuje na terenu.
- Mogućnost definisanja željene pogonske strukture oblasti pogođene kvarom. Željena pogonska struktura se definiše pre početka nalaženja rešenja obnavljanja pogona.
- Smanjenjeno prosečno vreme trajanja prekida napajanja električnom energijom u toku godine.
- Smanjeni troškovi obnavljanja pogona.
- Poboľšane performanse distributivnog sistema.

Predloženi način rešavanja može biti dobra osnova za dalja istraživanja obnavljanja pogona prilikom teških kvarova u gradskim distributivnim sistemima, kao i doprinos daljem razvoju problematike obnavljanja pogona distributivnih sistema, uključujući samostalno obnavljanje pogona sistema koje treba da bude jedna od karakteristika inteligentnih mreža.

KLJUČNE REČI

Obnavljanje pogona

Inteligentne elektroenergetske mreže

Distributivni sistemi

Primov algoritam

NAUČNA OBLAST

Elektrotehnika

UŽA NAUČNA OBLAST

Elektroenergetske mreže i sistemi

UDK BROJ

621.3

SMART GRID: SERVICE RESTORATION IN DISTRIBUTION POWER SYSTEMS

SUMMARY

Description

Methods and approaches for the solving of the service restoration problem in the existing literature are based on well known methods that are also used for the solving of other problems in electrical power systems. Review of the methods and approaches is presented in this dissertation.

New approach for the solving of the service restoration in distribution systems is developed and verified in this dissertation. The relation between the service restoration problem and transformation of conventional electrical power networks into smart grid are addressed in the dissertation. Although there is a number of known methodologies and approaches for solving the service restoration of the distribution power systems, an improvement of existing methodologies and approaches or research for new ones in order to accommodate the smart grid requirements are required. An effective service restoration approach proposed in the dissertation is based on modified Prim's algorithm. Prim's algorithm including its modification is mathematically described in details followed by comprehensive analysis of the modified Prim's algorithm implementation to the solving of the service restoration. The new approach for the solving of the service restoration problem in distribution networks that can be incorporated into smart grid concept is derived from the analysis. Proposed new approach for the solving of the service restoration problem is incorporated in the developed algorithm. The algorithm also contains other typical distribution power system analysis tools such as load flow, load transfer from elements that are overloaded during the service restoration calculations, and the filtering of the required switching actions. The developed algorithm is tested on the complex model of the distribution network.

Objectives and scope of work

The objective of the dissertation is to define a logic of modified Prim's algorithm in order to develop a new approach for the solving of the service restoration of distribution systems. In a context of the proposed new service restoration approach the modification of the Prim's algorithm is presented in details. Major contribution of the dissertation is the generation of the new effective algorithm for the service restoration of the distribution system. In addition, the objective is to verify the algorithm performance on complex service restoration tasks. The proposed approach can be implemented in further research of the service restoration problem in distribution systems including the implementation of the approach for the solving of other problems in electrical power systems analysis but also in other technical areas.

The proposed service restoration approach is illustrated with the algorithm where the primary objective is the minimisation of the unsupplied load to the de-energized consumers. Secondary objective is the minimization of the switching actions required for the implementation of the calculated service restoration solution on the network. In addition, the preferred network operational configuration of the de-energized area after the restoration can be defined by the proposed approach.

Conclusion

The service restoration problem of distribution systems in light of smart grid concept is considered in the dissertation. The new approach for the service restoration of distribution systems is proposed in the dissertation. Major contributions of the proposed algorithm in the dissertation are listed as follows:

- The power supply is provided to maximal number of de-energized consumers.
- The number of switching actions required for the implementation of the service restoration solution is decreased.
- The preferred network operational configuration of the de-energized area after the restoration can be defined.
- System Average Interruption Duration Index is decreased.
- The service restoration costs are decreased.

- The overall performance of the distribution system is improved.

The proposed approach for the solving of the service restoration problem can be a base for further research of the service restoration problem including selfhealing that is one of the major characteristics of the Smart Grid concept.

KEY WORDS

Service restoration

Smart Grid

Distribution system

Prim's algorithm

SCIENCE

Electrical engineering

SCIENCE AREA

Electrical power networks and systems

UDK No.

621.3

SADRŽAJ

1	UVOD	1
1.1	INTELIGENTNE MREŽE	2
1.2	OBNAVLJANJE POGONA DISTRIBUTIVNOG SISTEMA	7
1.2.1	<i>Proračun tokova snaga</i>	10
1.2.2	<i>Obnavljanje pogona</i>	13
2	INTELIGENTNE MREŽE	39
2.1	KARAKTERISTIKE	39
2.1.1	<i>Povećanje pouzdanosti isporuke električne energije i automatsko obnavljanje pogona elektroenergetskih sistema</i>	39
2.1.2	<i>Motivisanje i uključivanje potrošača</i>	40
2.1.3	<i>Zaštita elektroenergetskih sistema od spoljnih uticaja</i>	40
2.1.4	<i>Kvalitet električne energije koji će zadovoljiti potrebe 21. veka</i>	41
2.1.5	<i>Prihvatanje svih raspoloživih opcija za proizvodnju i akumulaciju električne energije</i>	41
2.1.6	<i>Mogućnost trgovanja električnom energijom</i>	41
2.1.7	<i>Optimizacija održavanja opreme i efikasno upravljanje</i>	42
2.2	TEHNOLOGIJA I NADogradnja postojećih elektroenergetskih sistema	42
2.2.1	<i>Komunikacija</i>	42
2.2.2	<i>Senzori i merenje</i>	43
2.2.3	<i>Savremena oprema</i>	43
2.2.4	<i>Savremene metode kontrole</i>	43
2.2.5	<i>Unapređeni interfejs i podrška u odlučivanju</i>	43
2.2.6	<i>Izgradnja novih kapaciteta elektroenergetskog sistema</i>	44
2.3	STRATEGIJA ISTRAŽIVANJA	44
2.4	STRATEGIJA RAZVOJA	45
2.5	PREDNOSTI PRIMENE TEHNOLOGIJE INTELIGENTNIH MREŽA	47
2.5.1	<i>Elektroenergetske kompanije</i>	47
2.5.2	<i>Potrošači</i>	48
2.5.3	<i>Društvo</i>	49
2.6	ULOGA OBNAVLJANJA POGONA U KONCEPTU INTELIGENTNIH MREŽA	50
3	TOPOLOGIJA DISTRIBUTIVNE MREŽE I TOKOVI SNAGA U DISTRIBUTIVNIM SISTEMIMA	52
3.1	UVODNA RAZMATRANJA	52
3.2	MODELOVANJE ELEMENATA DISTRIBUTIVNOG SISTEMA	53

3.2.1	<i>Model opterećenja</i>	53
3.2.2	<i>Model distributivnog voda</i>	54
3.2.3	<i>Model distributivnog transformatora VN/SN</i>	54
3.3	TOPOLOŠKA INTERPRETACIJA DISTRIBUTIVNOG SISTEMA	55
3.4	PRORAČUN TOKOVA SNAGA DISTRIBUTIVNOG SISTEMA	62
3.4.1	<i>Numerisanje grana</i>	62
3.4.2	<i>Numeracija čvorova</i>	64
3.4.3	<i>Metod za rešavanje radijalnih distributivnih mreža</i>	64
4	OBNAVLJANJE POGONA NAKON POREMEĆAJA U RADU URBANIH DISTRIBUTIVNIH SISTEMA	68
4.1	UVODNA RAZMATRANJA	68
4.2	POSTOJEĆI NAČINI REŠAVANJA OBNAVLJANJA POGONA	72
4.2.1	<i>Matematičke optimizacione metode</i>	73
4.2.2	<i>Iscrpne metode pretraživanja</i>	76
4.2.3	<i>Tehnike veštačke inteligencije</i>	78
4.3	FORMULACIJA PROBLEMA I MODIFIKACIJA PRIMOVOG ALGORITMA	87
4.3.1	<i>Formulacija problema</i>	88
4.3.2	<i>Primov algoritam</i>	95
4.3.3	<i>Modifikovani Primov algoritam</i>	103
4.3.4	<i>Analogije između grafa i distributivne mreže</i>	111
4.4	ALGORITAM ZA REŠAVANJE OBNAVLJANJA POGONA	112
4.4.1	<i>Način rešavanja obnavljanja pogona nenapojenog područja</i>	113
4.4.2	<i>Eliminacija preopterećenja – transfer opterećenja</i>	131
4.5	PROVERA PREDLOŽENOG NAČINA REŠAVANJA I ALGORITMA NA TEST MREŽI	143
4.5.1	<i>Provera predloženog načina rešavanja obnavljanja pogona</i>	143
4.5.2	<i>Provera algoritma za rešavanje obnavljanja pogona</i>	146
5	ZAKLJUČAK	157
6	LITERATURA	159
7	PRILOZI	174
7.1	PROVERA PREDLOŽENOG NAČINA REŠAVANJA OBNAVLJANJA POGONA	175
7.2	PROVERA ALGORITMA ZA REŠAVANJE OBNAVLJANJA POGONA	181

1 UVOD

Danas se u pogonu nalazi ogroman procenat elektroenergetskih sistema starijih od 40 godina. U vremenskom periodu u kojem su današnji elektroenergetski sistemi bili izgrađivani, postojao je veoma skroman broj senzora, minimum elektronskih komunikacijskih kapaciteta i skoro zanemarljiva mogućnosti kontrole. U poslednjih 20-25 godina [1], razvijene zemlje stalno su ulagale u upotrebu senzora, komunikacije i računarske tehnologije, što se značajno odrazilo na unapređenje performansi elektroenergetskih sistema. Zahvaljujući postignutim unapređenjima performansi, kao i sve jasnijim znacima smanjene pouzdanosti već zastarelih elektroenergetskih sistema, prepoznata je velika potreba za investicijama kojima će se nadograditi i osavremeniti postojeći elektroenergetski sistemi. Nadograđeni elektroenergetski sistemi, pored veće pouzdanosti u odnosu na postojeće sisteme, moraju biti u mogućnosti da odgovore zahtevima savremenog društva i pruže punu podršku ekonomiji 21. veka. Takvi elektroenergetski sistemi u domaćoj literaturi poznati su pod nazivom napredne mreže, inteligentne elektroenergetske mreže ili skraćeno inteligentne mreže (eng. *Smart Grid*), što je naziv koji se koristiti u ovoj disertaciji.

Uopšteno, inteligentna mreža podrazumeva upotrebu napredne računarske tehnologije, brojila, senzora, prenosnih i distributivnih mreža koje omogućavaju dvosmernu razmenu podataka i energije u realnom vremenu između kompanija (na primer elektrodistribucija) i potrošača. Na taj način, rad elektroenergetskih sistema može biti optimizovan, uključujući opštu upotrebu proizvodnje i akumulacije električne energije, prenos električne energije, distribuciju električne energije, distribuiranu proizvodnju električne energije i krajnje potrošače. Optimizacija elektroenergetskog sistema ima za cilj obezbeđivanje pouzdanosti, optimizacije ili minimizacije upotrebe energije, kontrolu uticaja na životnu sredinu, upravljanje infrastrukturom i troškovima.

Uvodni deo u poglavlju 1.1 obrađuje problematiku inteligentnih mreža, definiciju inteligentnih mreža, kao i pregled odabrane literature iz ove oblasti.

U uvodnom poglavlju 1.2 obrađene su problematike obnavljanja pogona (restauracija) distributivnih sistema i proračuna tokova snaga u distributivnim sistemima koji predstavlja pomoćni alat prilikom rešavanja obnavljanja pogona. Pregled literature iz obe oblasti, takođe je prikazan u ovom poglavlju.

1.1 Inteligentne mreže

Ne postoji jedinstvena, standardna definicija za pojam inteligentne mreže. U literaturi koja obrađuje ovu temu, postoje različita mišljenja oko toga kakve karakteristike i koje tehnologije treba da sačinjavaju jednu inteligentnu elektroenergetsku mrežu. Sasvim je prirodno što se takve razlike javljaju. Veoma je teško, između ostalog, jednom definicijom obuhvatiti sve postojeće elektroenergetske sisteme, imajući u vidu različite pristupe u izgradnji i održavanju elektroenergetskih mreža.

Danas se izraz inteligentne mreže više koristi kao marketinški izraz, nego kao tehnički izraz [2]. Ovo je, takođe, jedan od razloga još uvek nedovoljno dobre definicije i opšte prihvaćenih ciljeva inteligentne mreže, koji treba jasno da razlikuju šta je obuhvaćeno ovim pojmom, a šta ne.

- Inteligentna mreža [3] je elektroenergetska mreža koja može inteligentno integrisati akcije svih korisnika koji su na nju povezani, uključujući generatore, potrošače, ali i one koji obavljaju obe delatnosti, u cilju efikasne isporuke električne energije, vodeći računa o održivosti, ekonomičnosti i sigurnosti elektroenergetskog sistema.
- Inteligentna mreža je elektroenergetska mreža [4] koja može ekonomski efikasno integrisati ponašanje i akcije svih korisnika koji su na nju povezani, uključujući generatore, potrošače, kao i one koji obavljaju obe delatnosti, sa ciljem da obezbede održiv energetska sistem sa niskim nivoom gubitaka i visokim nivoom kvaliteta, sigurnosti isporuke i bezbednosti.
- Inteligentna mreža predstavlja modernizaciju elektroenergetskih mreža [5], sa ciljem povećanja elektroenergetske efikasnosti, povećanja udela obnovljivih izvora u proizvodnji električne energije, smanjenja emisije štetnih gasova i izgradnje održive ekonomije, koje će obezbediti razvoj sadašnjih i budućih

generacija. Modernizacija se zasniva na objedinjavanju različitih digitalnih i komunikacijskih tehnologija i usluga sa elektroenergetskom infrastrukturom. Modernizacija će obezbediti dvosmerni protok energije, informacija i kontrole, što će omogućiti inteligentnoj elektroenergetskoj mreži prošireni spektar funkcionalnosti i primene.

Iako pojam inteligentnih mreža nije jednoznačno definisan, razvijene ekonomije uveliko pripremaju, ili su već pripremile, strateški važna dokumenta ([2], [3], [4], [5] i [6]) koja će uobličiti dalji razvoj inteligentnih mreža.

U narednim redovima dat je pregled odabranih radova u kojima se obrađuje jedan deo ključnih poglavlja koncepta inteligentnih mreža. Radovima su pokrivena ili delimično dodirnuti najvažnije teme koje su do danas identifikovane, a u vezi su sa konceptom inteligentnih mreža. Pregledom pomenutih radova, može se bolje sagledati složenost koncepta inteligentnih mreža.

Distributivni elektroenergetski sistemi [7] moraju da odgovore na nove izazove koji se pred njih postavljaju, ugrađivanjem savremene i složenije opreme. Kako na ovaj način i distributivna mreža postaje pametnija i složenija, to su i alati kojima se mrežom upravlja postali važan element, pri čemu je potrebno naglasiti da alati moraju biti sastavni deo navedene distributivne mreže. Na primer, poznato je da proizvodnja električne energije [8] uz pomoć vetrogeneratora ima male pogonske troškove. S druge strane, nepredvidljivost proizvodnje električne energije u okruženju deregulisanog tržišta, može izazvati dodatne troškove na ukupne operativne troškove jednog elektroenergetskog sistema. Zbog navedenih razloga, poželjno je imati algoritam koji može izmeriti uticaj vetrogeneratora na razne delove operativnih troškova jednog elektroenergetskog sistema. Iz ugla bezbednosti elektroenergetskog sistema, navođenje dispečera na preusmeravanje tokova električne energije [9], ubacivanjem pogrešnih informacija o elektroenergetskom sistemu u SCADA (eng. *Supervisory Control And Data Acquisition*) sistem, predstavlja jedan vid napada na elektroenergetski sistem. Vrlo je bitno poznavati prirodu napada, kako bi se sistem što efikasnije branio. Potrebno je imati detalje mogućih napada na elektroenergetski sistem, koji može imati za cilj

trenutne i odložene posledice. Na osnovu navedenih detalja, potrebno je definisati način na koji je moguće odbraniti se od napada koji, na primer, može imati trenutne posledice po sistem. S prodorom distribuiranih generatora [10] u distributivnu mrežu, javlja se čitav niz problema koje treba rešavati. Jedan deo problema proističe od nepredvidljivosti generatora u smislu isporuke električne energije. Precizna kratkoročna prognoza opterećenja može u velikoj meri da pomogne u postizanju boljih performansi jedne mikro mreže. Postojeće tehnologije kojima se teži da potrošač što manje vremena ostane bez napajanja električne energije [11], uglavnom su reaktivnog tipa i preduzimaju akciju nakon kvara na mreži. Predloženim novim tehnologijama i alatima za analizu, dobijenim takvim tehnologijama, može se predvideti kvar na distributivnoj mreži, što omogućuje preventivno delovanje. Analizom oblika sinusoide, moguće je utvrditi tip i mesto eventualnog kvara i na taj način uraditi popravku pre nego što se kvar desi. Upotreba fazorskih mernih jedinica [12] može biti od velikog značaja za identifikaciju niskofrekventnih poremećaja u elektroenergetskom sistemu. Prilično pouzdano može se utvrditi obrazac pojave niskofrekventnih oscilacija koje su nastale usled pojave rezonancije sistema. Metoda sa upotrebom fazorskih mernih jedinica daje znatno bolje rezultate od postojećih metoda za pronalaženje uzroka nastanka ovakvih oscilacija. Nadogradnju postojećih elektroenergetskih sistema [13], kako bi dobili ciljanu funkcionalnost inteligentne mreže, nije moguće uraditi u jednom dahu. Glavni razlozi su obim radova koji bi trebalo da se izvede, kao i troškovi opreme koja mora da se ugradi. Postupna nadogradnja distributivnih sistema, koja je sagledana iz ugla pouzdanosti i smanjenja gubitaka, može biti jedan od pristupa rešavanju ovog problema. Kako bi se uspešno planirao razvoj elektroenergetskog sistema, neophodno je imati viziju kontrolnog centra u budućnosti [14], kojim će se obavljati nadgledanje, analiza i kontrola elektroenergetskog sistema. Potrebno je, najpre, krenuti od analize postojećih kontrolnih centara, a zatim doći do vizije kontrolnih centara u budućnosti. Za uspešno stvaranje vizije, neophodno je identifikovati ključne iskorake koji se moraju napraviti, a koji predstavljaju tehnološka i infrastrukturna unapređenja postojećih elektroenergetskih sistema. Ugradnja tehnologija [15] kojima se omogućuje povezivanje distribuiranih generatora na mrežu, distribuirane akumulacije električne energije i upravljanje potrošnjom, svakako će promeniti način na koji koristimo električnu energiju. Algoritam za upravljanje navedenim tehnologijama mogao bi se sastojati iz tri koraka.

Algoritam bi obuhvatio lokalno planiranje na osnovu proizvedenih i potrebnih količina energije na nivou jednog domaćinstva, globalno planiranje na osnovu proizvedenih i potrebnih količina električne energije, kao rezultat razmene podataka sa domaćinstvima iz prethodnog koraka i lokalno upravljanje potrošnjom. Bezbednost elektroenergetskih mreža [16] koje će u budućnosti imati primenjen koncept inteligentne mreže, zavisice od upotrebe najnovijih standardizovanih bezbednosnih protokola. Za tu svrhu, već postojeće tehnologije mogu se prilagođavati potrebama koncepta inteligentne mreže. Distributivni sistemi [17], kao sastavni deo elektroenergetskog sistema, takođe će biti deo koncepta inteligentnih mreža. Dizajn, upravljanje i kontrola distributivnih sistema moraju biti sagledani iz aspekta vizije koncepta inteligentne mreže, naprednih tehnologija i naprednih materijala. Takođe, javiće se potreba za modifikacijom tehnologija koje su tipične za prenosne sisteme, kako bi bile upotrebljene u distributivnim sistemima kao što je estimacija stanja i slično. Prvi računarski crv (eng. *computer worm*) [18], koji je ubačen u SCADA sistem, zvanično je zabeležen u avgustu 2010. godine. Crv je pokušao da inficira na hiljade računara širom sveta. Stručna literatura dosta prostora posvećuje identifikaciji takvih napada, kao i optimizaciji zaštite od njih. Napadom na elektroenergetski sistem smatra se pokušaj manipulacije estimatora stanja jednog elektroenergetskog sistema, ubacivanjem pogrešnih podataka. Definisanjem strategija napada koji može negativno da utiče na sistem, može se razviti algoritam koji pokazuje da se, sa relativno malim brojem zaštićenih merenja, sistem može uspešno braniti od ovakve vrste napada. Takođe, razvijen je algoritam koji pronalazi optimalna mesta za montažu sigurnih fazorskih mernih jedinica. Slabe tačke nekog elektroenergetskog sistema, u smislu preopterećenja sistema [19], mogu se prognozirati algoritmom koji je, zapravo, prilagođeni algoritam za analizu najgore heurističke konfiguracije mreže. Identifikaciju slabih tačaka dodatno otežava prodor novih izvora električne energije, pri čemu se misli na obnovljive izvore koji su po svojoj prirodi nepredvidljivi. Jedan od najvažnijih zaključaka jeste taj da ukoliko je mreža u normalnom pogonu dovoljno stabilna, onda je broj slabih tačaka u mreži koje mogu biti izazvane promenama tokova snaga, relativno mali. Definisanjem slabih tačaka u sistemu možemo bolje upravljati sistemom, što vodi do unapređenja kvaliteta isporučene energije. Prodorom distribuiranih generatora u distributivnim sistemima javljaju se različiti problemi koji nisu bili od velikog značaja u standardnim distributivnim

mrežama. Jedan set takvih problema vezan je za relejnu zaštitu [20], imajući u vidu da se tokovi i intenzitet struja kratkih spojeva menjaju, ukoliko se distributivna mreža posle poremećaja više ne napaja sa prenosne mreže, već nastavlja rad uz pomoć distribuiranih generatora u ostrvskom režimu. Prilagodljiva relejna zaštita može biti jedno od rešenja ove vrste problema. Telekomunikaciona infrastruktura elektroenergetskih sistema [21], takođe je obuhvaćena aktuelnim restrukturiranjem celokupnog elektroenergetskog sistema. Analiza centralizovanog i decentralizovanog koncepta telekomunikacione infrastrukture jednog elektroenergetskog sistema u smislu troškova, komunikacijskog kašnjenja i pouzdanosti, pokazuje da su troškovi približno isti, ali je prednost na strani decentralizovanog koncepta, što se tiče komunikacijskog kašnjenja i pouzdanosti. Težnja za povećanjem broja automobila sa hibridnim ili elektromotornim pogonom [22], može imati veliki uticaj na elektroenergetske sisteme u budućnosti, kako u smislu potrošnje električne energije, tako i u smislu izvora električne energije. Glavni izazov za jednu elektrodistributivnu kompaniju leži u upravljanju potrošnjom električne energije u slučajevima kada se veliki broj vozila priključi na mrežu, kako bi se baterije u vozilima ponovo napunile. Algoritam koji može rešavati ovakvu vrstu problema na javnim parkinzima, pri čemu je u razmatranje uključena cena električne energije, vreme punjenja, kao i prosečno stanje napunjenosti, može biti deo rešenja. U razmatranje je uključen i slučaj kada se vozilo ranije isključi sa mreže, u odnosu na prvobitno planirano vreme punjenja. Povećanje broja obnovljivih izvora energije [23] u formi distribuiranih generatora, predstavlja nove izazove za upravljanje elektrodistributivnim mrežama. Da bi se postigao maksimalan pozitivan efekat primene distribuiranih generatora, neophodno je optimizovati planiranje razvoja distributivne mreže, koje će uključiti koordinaciju promene konfiguracije mreže i kontrole napona u mreži, kako bi odredili maksimalnu dozvoljenu snagu distribuiranog generatora koja može da se priključi na jedan čvor u mreži. Upotreba bežičnih senzora unutar jednog domaćinstva [24] omogućuje primenu različitih aplikacija za upravljanje potrošnjom. Procena upotrebe jednog sistema može biti posmatrana u smislu smanjenja troškova za preuzetu električnu energiju. Sistem mora imati pristupačnu cenu, omogućiti izbor upotrebe lokalnih izvora energije ili energije iz elektroenergetskog sistema, kao i uvođenje potrošača u akcije vezane za uštedu električne energije. Na ovaj način se, pored smanjenja troškova, smanjuje i emisija štetnih gasova, kao i vršno opterećenje

elektroenergetskog sistema. Inteligentna brojila (eng. *smart meters*) [25], takođe, mogu biti predmet elektronskog ili fizičkog napada, čime se može ugroziti i rad celokupnog elektroenergetskog sistema. Kako bi se efikasno branili od napada, neophodno je imati algoritme koji mogu uspešno simulirati napade i efekte takvih napada. Na osnovu dobijenih rezultata upotrebom algoritama mogu se preduzeti koraci u sprečavanju ili smanjenju efekata napada. Koncept inteligentne mreže kod distributivnih sistema [26] podrazumeva savremenu opremu za merenje i lokalnu obradu podataka. Podaci dobijeni mernim uređajima i opremom mogu biti prosleđeni kao očitani podaci sa mernog mesta ili mogu biti lokalno obrađeni, a zatim prosleđeni kontrolnim centrima ili drugim delovima mreže.

Aplikacije za rešavanje obnavljanja pogona distributivnih sistema, već više decenija predstavljaju sastavni deo automatizacije distributivnih sistema. Sasvim je prirodno da će rešavanje obnavljanja pogona morati da bude sastavni deo i elektroenergetskih mreža koje će se menjati u skladu sa konceptom inteligentnih mreža.

1.2 Obnavljanje pogona distributivnog sistema

Treba razlikovati obnavljanje pogona prenosnih sistema i obnavljanje pogona distributivnih sistema. Obnavljanje pogona prenosnog elektroenergetskog sistema u vezi je sa pojavom takozvanog raspada elektroenergetskog sistema i akcijama neophodnim da se sistem vrati u normalno pogonsko stanje. Ukoliko se u daljem tekstu upotreba pojma obnavljanje pogona odnosi na prenosnu mrežu, to će biti jasno naglašeno. U disertaciji je obrađen problem obnavljanja pogona u distributivnim sistemima, za koji se u daljem tekstu koristi i skraćeni pojam pod nazivom obnavljanje pogona.

Kao što je već navedeno, obnavljanje pogona distributivnog sistema ima jednu od vrlo značajnih uloga u ostvarivanju ciljeva koje savremeni elektroenergetski sistem mora da ispuni, kako bi odgovorio zahtevima društva u 21. veku. Težište ove disertacije je, upravo, na rešavanju obnavljanja pogona distributivnog sistema, za koju je predložen nov način rešavanja.

Pre prelaska na deo disertacije koji opisuje nov način rešavanja, treba reći nekoliko reči o trenutnoj ulozi obnavljanja pogona u distributivnim mrežama, kao i o sadržaju disertacije. Takođe, obrađeni su i alati koji su neophodni kao podrška za uspešno rešavanje obnavljanja pogona, kao što je, na primer, algoritam za proračun tokova snaga.

Pre upotrebe izraza inteligentne mreže, obnavljanje pogona distributivnih sistema najčešće se vezivalo za pojmove distributivnog menadžmenta ili za automatizaciju distributivnog sistema. Automatizacija distributivnih sistema praktično je prisutna, u većoj ili manjoj meri, u svim kompanijama za distribuciju električne energije.

Uopšteno, automatizacija na nivou distributivnih sistema prvo je počela da se primenjuje, a samim tim i razvija, u pravcu automatizacije transformatorskih stanica sa visokog na srednji napon (u daljem tekstu VN/SN) i sa jednog srednjeg napona na drugi srednji napon (u daljem tekstu SN1/SN2). Savremena automatizacija podrazumeva SCADA sistem koji se nalazi na vrhu piramide, koju čini automatizacija u jednom distributivnom preduzeću.

Trenutno se dosta radi i na automatizaciji transformatorskih stanica sa srednjeg na niski napon (u daljem tekstu SN/NN), kao i na mestu preuzimanja električne energije na niskom naponu, koje je zasnovano na ugrađivanju savremenih brojila koji imaju mogućnost dvosmerne komunikacije. Sledeći korak bio bi automatizacija unutar samog domaćinstva.

Osnovna aktivnost dispečerskog odlučivanja u distributivnim sistemima u vezi je sa akcijama promene stanja prekidačke i rastavljačke opreme. Time dolazi do promene u pogonskoj konfiguraciji distributivnog sistema. Akcije se mogu izvoditi kako u normalnom pogonu distributivnog sistema, tako i u poremećenim stanjima. Ciljevi ovakvih akcija u mnogome zavise od stanja samog distributivnog sistema i problema koje treba rešiti. Upravo ovakvim prekidačkim akcijama, koje nastaju kao rezultat odluke koju donosi dispečer, obnavljanje pogona distributivnih sistema realizuje se na terenu.

Kako dispečersko upravljanje sadrži elemente odlučivanja, zbog složenosti savremenih distributivnih sistema u kojima bi takvo odlučivanje bilo znatno otežano, pristupilo se razvoju funkcija upravljanja u proširenom vremenskom domenu. Funkcije upravljanja oslonjene su na matematičke modele sistema kojim se upravlja i najčešće na SCADA sistem kojim se dobijene odluke sprovode u delo.

Kada je sistem u normalnom pogonu, akcije upravljanja (rekonfiguracija) odnose se na pripremu i analizu pogona. Na dužem vremenskom horizontu, akcije imaju za cilj da obezbede isporuku električne energije sa što manjim troškovima i u granicama tolerancije iz aspekta kvaliteta električne energije. Na kraćem vremenskom horizontu, akcije imaju za cilj pripremu sistema za redovno održavanje, kao i izbegavanje preopterećenja pojedinih delova sistema.

Kada je sistem u poremećenom stanju, glavni cilj dispečerskog upravljanja (restauracija ili drugim rečima obnavljanje pogona) jeste obezbediti napajanje električnom energijom što je moguće većeg broja potrošača koji su bez nje ostali usled poremećaja u sistemu. Pod poremećenim stanjem sistema podrazumeva se prekid isporuke energije usled kvara na pojedinim delovima distributivnog sistema. Poremećaji se mogu podeliti na teške poremećaje koji zahtevaju radikalne promene konfiguracije distributivnog sistema i lakše poremećaje koji mogu biti rešeni korektivnim akcijama na distributivnom sistemu. Lakše poremećaje moguće je efikasno eliminisati i na osnovu iskustva dispečera, dok je za efikasno eliminisanje teških poremećaja, neophodna podrška računara. Normalno, prilikom obnavljanja pogona, kao i prilikom rekonfiguracije, mora se voditi računa o tehničkim ograničenjima.

Za uspešno nalaženje rešenja obnavljanja pogona predloženog u disertaciji, moraju biti definisana dva ključna algoritma. Algoritam za proračun tokova snaga kojim se proveravaju zadata ograničenja i algoritam kojim se izvršava definisani način nalaženja rešenja obnavljanja pogona. Iako mogu predstavljati odvojene celine, predloženim načinom rešavanja oba algoritma integrisana su jedan u drugi i međusobno se dopunjuju. Kako bi se stekla bolja slika o predloženom načinu rešavanja, proračun

tokova snaga i obnavljanje pogona u disertaciji su tretirani posebno, sve do trenutka kada se opisuje predloženi načina rešavanja, gde je detaljno opisana međusobna zavisnost oba algoritma.

1.2.1 Proračun tokova snaga

Za proračun obnavljanja pogona distributivnih sistema veoma je bitna primena efikasnog algoritma za dobijanje informacija o stanju u sistemu, kao što su strujne i naponske prilike. Precizni podaci o stanju u sistemu predstavljaju osnovu za pokretanje i tok proračuna kojim se određuje obnavljanje pogona. Zbog karakteristične pogonske strukture distributivnog sistema, koja je radijalna, tokovi snaga ne zavise od električnih parametara, što je karakteristično za prenosne sisteme. Preduslov brzog i kvalitetnog proračuna tokova snaga jeste jednostavna topološka interpretacija distributivnog sistema, koja je u ovom radu bazirana na relaciji delimičnog poretka karakterističnih za stabla orijentisanih grafova. Na ovaj način se jednostavno opisuju radijalne strukture i jednostavno omogućuju strukturne promene mreže. Kratak hronološki pregled odabrane literature može pružiti bolju sliku razvoja algoritama za proračunima tokova snaga u distributivnim sistemima.

Efikasan algoritam [27] za proračune tokova snaga u distributivnim mrežama, kako radijalnih tako i slabo umreženih, neophodan je za verifikaciju rešenja koja se dobijaju prilikom istraživanja raznih metoda za pogonsko unapređenje distributivnih sistema. Metod je zasnovan na kompenzacionoj metodi i na osnovnim proračunima Kirhofovog zakona. Prethodno se umreženi deo mreže razloži na delove, tako što se u čvorovima koji čine petlju uvedu zamene ekvivalentnim Tevenenovim generatorom koji odslikava ostatak mreže. Predloženi algoritam se, posle definisanja slabo upetljenih kao radijalnih mreža, izvršava iterativnom procedurom. Kompenzaciona metoda [28] za trofazne proračune tokova snaga u distributivnim sistemima može biti efikasna i može da konvergira za vrlo kratko vreme, tako da se može koristiti za simulacije tokova snaga u slučaju promena na mreži, praktično u realnom vremenu. Predloženim algoritmom moguće je modelovanje neizbalansiranog opterećenja, kondenzatorskih baterija i distribuiranih generatora. Brza razložena Njutn-Rapsonova metoda [29] može se

upotrebiti za proračun neizbalansiranih tokova snaga u distributivnim sistemima. Zbog smanjenog broja jednačina, kao i zbog činjenice da je Jakobijanova matrica zamenjena konstantnom trougaonom matricom, proračun tokova snaga obavlja se za kraće vreme u poređenju sa algoritmima baziranim na standardnoj Gausovoj ili Njutnovoj metodi. Utvrđeno je da je predložena metoda efikasnija od metode nazad/napred (eng. *backforward sweep approach*). Transformatori i pripadajuća opterećenja [30] mogu biti ugrađeni u algoritam za proračun snaga distributivnih sistema. Takođe, karakteristike transformatora, uključujući sprege transformatora, mogu biti modelovani predloženom metodom. Na ovaj način rešava se problem osetljivosti proračuna tokova snaga u smislu konvergencije, a koji se javlja kod algoritama u kojima se transformatori detaljno modeluju kao posebni elementi. Delovi mreže na niskonaponskoj strani transformatora ne mogu se modelovati predloženim algoritmom. Upotrebom razložene Njutn-Rapsonove metode [31] u pravougaonom koordinatnom sistemu može se vršiti proračun tokova snaga u distributivnim sistemima. Jakobijanova matrica može se rastaviti kako po fazama, tako i po realnim i imaginarnim elementima mreže. Vreme proračuna se smanjuje na 17% od vremena potrebnog za proračun standardnom razloženom Njutn-Rapsonovom metodom. U predloženoj metodi nema potrebe za definisanjem komplikovane međusobno zavisne matrice, pa se čak proračun tokova snaga može uraditi i samo sa poznatim provodnostima vodova. Pojava distribuiranih generatora u distributivnim sistemima [32] zahteva odgovarajući algoritam koji bi uticaj distribuiranih generatora na mrežu uvažio prilikom proračuna tokova snaga u distributivnim sistemima. Predložen je prilagođeni kompenzacioni metod za proračun tokova snaga u distributivnim sistemima, koji uključuje trofazna nesimetrična opterećenja, distributivne linije, transformatore, kondenzatorske baterije i distribuirane generatore. Prilagođeni kompenzacioni metod je robustniji od standardne kompenzacione metode i pogodan je za analizu sporih prelaznih procesa u distributivnim mrežama. U većini algoritama za proračun tokova snaga u distributivnom sistemu, uticaj neutralnog provodnika integrisan je Kronovom metodom u fazne provodnike [33], zbog čega podaci o strujama i naponima u neutralnom provodniku nisu dostupni. Nedostatak ovih podataka može imati uticaj na rezultate analiza mreže, kao što su analize kvaliteta električne energije, bezbednosti, gubitaka i slično. Predložen je algoritam za proračun tokova snaga u trofaznom četvorožičnom sistemu, zasnovan na

takozvanom nazad/napred proračunu u kojem su posebno modelovani neutralni provodnik i uzemljenje. Distributivni transformatori sa različitim spregama i faznim pomerajima između primarnih i sekundarnih namotaja [34] mogu biti ugrađeni u algoritam, baziran na nazad/napred metodi, kojim se vrši proračun tokova snaga u distributivnoj mreži. Metoda koristi matricu admitansi distributivnih transformatora i tako rešava problem provodno izolovanog dela mreže, dobijanjem ekvivalentnog napona između faze i referentnog čvora. Navedena su ograničenja nazad/napred metode, a metoda je proširena sa standardnog jednofaznog proračuna na trofazni proračun neravnomerno opterećenog sistema. Proračun tokova snaga u slaboupetljivim mrežama [35], može biti rešavan u kombinaciji sa fazi (eng. *Fuzzy*) logikom, čime se uspešno modeluju neizvesnosti u distributivnoj mreži u smislu neraspolaganja tačnim informacijama u vezi sa aktuelnim i prognoziranim opterećenjima, uključujući i parametre mreže. Predloženom metodom se direktno i efikasno određuje matrica koja je vrlo slična Jakobijanovoj inverznoj matrici, a koja doprinosi smanjenju potrebnog računarskog vremena za proračun tokova snaga distributivnog sistema. Trofazni tokovi snaga [36] za mikro mreže sa modelovanim direktnim, inverznim i nultim komponentama sistema, mogu biti proračunati za nesimetrična opterećenja i linije, jednofazne ogranke, kao i za trožične i četvorožične sisteme. Distribuirani generatori mogu biti modelovani, uključujući sinhronne generatore, ali i elektronski priključene izvore električne energije. Generatori se mogu modelovati kao regulisani izvori konstantne snage ili konstantnog napona. Pomoću matrice radijalne konfiguracije [37], standardna nazad-napred metoda može biti upotrebljena za proračun tokova snaga u distributivnim sistemima. Upotrebom matrice radijalne konfiguracije, računarsko vreme se skraćuje u poređenju sa drugim metodama. Promena uklopnog stanja na distributivnoj mreži može biti simulirana na jednostavan način, unošenjem promena u matricu radijalne konfiguracije.

Opis za predloženi proračun tokova snaga, uključujući topološku interpretaciju distributivnog sistema, dat je u poglavlju 2 i predstavlja već primenjivane pristupe rešavanju ovog dela problema. Proračun tokova snaga baziran je na linearnom modelu konstantnih struja, što podrazumeva izvesna zanemarivanja. Podaci dobijeni modelom

konstantnih struja, odstupaju u izvesnoj meri od stvarnih vrednosti, ali su odstupanja zanemarljiva i ne utiču na narušavanje postavljenih ograničenja.

1.2.2 Obnavljanje pogona

Efikasan plan za obnavljanje pogona distributivnih sistema posle poremećaja na mreži, predstavlja jedan od ključnih elemenata za unapređenje kvaliteta usluga distributivnih kompanija, čime se direktno utiče na stepen zadovoljstva potrošača. Primarni cilj prilikom obnavljanja pogona distributivnog sistema, jeste obnoviti napajanje električnom energijom što većeg broja potrošača koji su, usled poremećaja na mreži, ostali bez napajanja. Naravno, poželjno je obnavljanje uraditi u što kraćem roku i sa što manjim troškovima.

Uopšteno, problem obnavljanja pogona distributivnih sistema predstavlja višeciljni, kombinatorni, nelinearni optimizacioni problem sa ograničenjima. U prethodne dve dekade, u stručnoj literaturi je dosta pažnje posvećeno rešavanju problema obnavljanja pogona. Iako su predložene i analizirane mnogobrojne tehnike, problem obnavljanja pogona i dalje je aktuelan. Aktuelan svetski trend za ostvarivanjem koncepta inteligentnih mreža u elektroenergetskom sistemu otvara mogućnost istraživanjima novih metoda za obnavljanje pogona, koje bi odgovorile na zahteve elektroenergetskih sistema u 21. veku.

Hronološki pregled objavljenih stručnih radova u vezi sa tehnikama nalaženja rešenja obnavljanja pogona distributivnih sistema, omogućuje bolju sliku o tome kako se razvijalo i koji su pravci daljeg razvoja rešavanja problema obnavljanja pogona u stručnoj javnosti.

Obnavljanje pogona [38] može biti posmatrano kao transfer opterećenja pomoću daljinski kontrolisanih linijskih rastavljača sa uvažavanjem raspoloživih kapaciteta transformatora i distributivnih linija. Transfer opterećenja može se razmatrati kako između napojene i nenapojene oblasti, tako i unutar napojene ili nenapojene oblasti. Transfer opterećenja pomoću daljinski kontrolisanih linijskih rastavljača [39], pri čemu

se uvažava ograničenje maksimalno dozvoljenog pada napona, takođe se može koristiti u rešavanju obnavljanja pogona. Transfer opterećenja u ovom slučaju uključuje transfer između susednih transformatorskih područja koja nisu pogođena kvarom, pri čemu se maksimalno angažuju raspoloživi kapaciteti potrebni za uspešno obnavljanja pogona. Konceptom ekspertnih sistema [40], osim obnavljanja pogona nenapojenog područja, može se obuhvatiti i minimiziranje gubitaka. Obnavljanje pogona obavlja se u dva osnovna koraka. Prvo je predviđen grupni prihvrat ispalog konzuma. Jednu grupu predstavlja više potrošačkih čvorova, a celokupni konzum može se predstaviti sa više grupa. Ukoliko bi se prihvatom neke od grupa narušila operativna ograničenja, onda se prelazi na prihvrat pojedinih čvorova iz pomenute grupe. Predloženim algoritmom obuhvaćen je transfer opterećenja preopterećenih elemenata distributivnog sistema. Baza podataka sadrži oko 180 pravila. Transfer opterećenja [41] između transformatora obično se koristi, ukoliko dođe do preopterećenja jednog transformatora i podrazumeva prekidačke akcije kojima se deo opterećenja sa preopterećenog transformatora prebacuje na transformator koji je manje opterećen. Slične prekidačke akcije izvode se ukoliko treba izvršiti balans opterećenja između transformatora, kada mreža radi u normalnom režimu. Takođe, transfer opterećenja može da se upotrebi i prilikom pronalaženja rešenja za obnavljanje pogona distributivnog sistema, sa ciljem da se oslobodi više prostora za prihvrat opterećenja iz nenapojenog područja. Koncept zasnovan na bazi znanja [42], kao i interakcije baze znanja sa analitičkim alatima, danas se koristi u mnogim algoritmima prilikom nalaženja rešenja obnavljanja pogona kod prenosnih i distributivnih sistema. Struktura je slična strukturi za monitoring i estimaciju elektroenergetskih sistema. Funkcije kao što su estimacija stanja sistema, analiza preglednosti, analiza pogrešnih podataka i modelovanje mreže koje se koriste za analizu bezbednosti mreže, mogu se prilagoditi za primenu nadgledanja obnavljanja pogona distributivnih sistema. Problem obnavljanja pogona [43] može biti rešavan graf orijentisanom kontrolom algoritma, zasnovanom na linearizovanom modelu sistema. Problem dobijanja potrebnih prekidačkih akcija za obnavljanje pogona formulisan je kao kombinatorni problem mešovitog celobrojnog programiranja. Kombinacija metode razmene grana (eng. *branch exchange*) sa elementima heuristike dovodi do optimalnog plana obnavljanja pogona. U heurističkom pristupu rešavanja problema obnavljanja pogona distributivnih sistema [44], može se primeniti metod poznat kao pretraživanje

po dubini (eng. *depth first change*) za pretraživanje stabla i balansiranje opterećenja između izvoda. Startom iz korena stabla ide se u dubinsko pretraživanje, sve dok se ne dođe do rešenja. Zatim se vraća korak po korak unazad, u potrazi za dodatnim rešenjima. Heuristička pravila u primeni predložene metode mogu imati presudnu ulogu u nalaženju optimalnog rešenja. Obnavljanje pogona distributivnih sistema [45] može se rešavati rezultatima proračuna dobijenim pre nego što se desio kvar na mreži. Za definisano uklopno stanje mreže, prethodno se proračunaju rešenja obnavljanja pogona za sve moguće kvarove na mreži. Rešenja se deponuju u bazu podataka. U slučaju kvara na mreži, iz baze podataka se izvlači već definisano rešenje i kao takvo se primenjuje na realnoj mreži. Naravno, ovakav pristup nije savršen, između ostalog zbog neusklađenosti opterećenja koja su uzeta u obzir prilikom nalaženja rešenja i trenutnih opterećenja na mreži u trenutku kvara. Posle obnavljanja pogona na navedeni način, može se pristupiti još jednom proračunu za fino podešavanje konfiguracije distributivne mreže. Upotrebom interaktivnih tehnika [46] za nalaženje rešenja obnavljanja pogona, uvažavaju se realna konfiguracija i ograničenja distributivne mreže, što smanjuje dimenzionalnost problema koji treba rešiti. Na ovaj način se brže dolazi do rešenja obnavljanja pogona, a izabrano rešenje predstavlja najbolje i najekonomičnije rešenje od više mogućih opcija. Obnavljanje pogona distributivnih sistema [47] pomoću linijskih rastavljača, takođe, predstavlja jedno od rešenja. Kako bi se unapredilo nalaženje rešenja u smislu potrebnog računarskog vremena, problem je rešen konceptom dualne efektivne gradijentne metode. Algoritam, unapređen na ovaj način, može se koristiti za nalaženje rešenja obnavljanja pogona velikih distributivnih sistema. Kako je obnavljanje pogona distributivnih sistema, sa gledišta dimenzionalnosti, veliki kombinatorni optimizacioni problem, to je potrebno značajno računarsko vreme za rešavanje problema. Problem dimenzionalnosti rešava se upotrebom nekombinatorne metode, čime se unapređuju performanse algoritma. Za analizirano područje koje je ostalo bez napajanja električnom energijom usled kvara [48], od ponuđenih rešenja za obnavljanje pogona, kao optimalno može se izabrati najpovoljnije iz aspekta procene verovatnoće. Rezultati uvažavaju pogonske osobine distributivnih mreža i sadrže prekidačke akcije koje je potrebno izvršiti kako bi se obavilo obnavljanje pogona. Takođe, upotrebljeno je pet pokazatelja verovatnoće za vrednovanje uticaja pouzdanosti elemenata sistema i pogonske prakse na mogućnosti obnavljanja pogona distributivnog

sistema. Algoritam [49] može obuhvatati, osim obnavljanja pogona distributivnih sistema, rekonfiguraciju i nesimetriju opterećenja. Jedan od važnih faktora za dobijanje optimalnog rešenja obnavljanja pogona jeste broj manipulacija prekidačkih uređaja. Predloženom metodom vrši se pretraživanje sa stalnom proverom operativnih ograničenja. Navedena heuristička pravila igraju vrlo važnu ulogu prilikom nalaženja rešenja obnavljanja pogona. Hijerarhijska struktura rešavanja problema obnavljanja pogona konceptom ekspertnih sistema [50], može omogućiti brzo usvajanje određenih preporuka, kada se u toku obnavljanja pogona javi problem. Ovakvom strukturom odvaja se izbor sledećeg cilja (strateško rezonovanje) od planiranja koje pokazuje kako taj cilj postići (taktičko rezonovanje). Strateško rezonovanje podrazumeva izbor i okviran način napajanja sledeće trafostanice iz nenapojenog područja koja će biti snabdevena električnom energijom. Taktičko rezonovanje uključuje detalje neophodne za napajanje izabrane trafostanice, kao što je, na primer, izbor prekidačkih akcija. Algoritam za obnavljanje pogona [51], pored prekidačkih akcija neophodnih da se obnavljanje pogona realizuje na realnoj mreži, definiše neophodne prekidačke akcije za rešavanje drugih problema u vezi sa distributivnim mrežama, kao što su preopterećenje transformatora, preopterećenja izvoda, neravnomerno opterećenje po fazama i održavanje mreže. Potrebno je navedene ciljeve ostvariti sa što je moguće manjim brojem prekidačkih akcija. Kao najbolje rešenje navedenih problema, ovaj kombinatorni problem rešavan je uz pomoć heurističkih pravila. Ekspertni sistemi [52] u kombinaciji sa heurističkim pravilima i metodom pretraživanja, poznatom kao najbolje prvo pretraživanje (eng. *best first change*), mogu se koristiti za nalaženje rešenja obnavljanja pogona distributivnih sistema. Predloženi algoritam rešava problem obnavljanja pogona u slučaju kvara na jednoj sekciji SN sabirnica u VN/SN trafostanici transferom opterećenja izvoda na preostale sekcije sabirnica. Pored heurističkih, upotrebljena su strukturna pravila koja odslikavaju analiziranu distributivnu mrežu i koja smanjuju broj potrebnih prekidačkih akcija. Procesna i rekurzivna tehnika, kao i najbolje prvo pretraživanje, koristi se za rešavanje ovog kombinatornog problema, dok su normalizovani dijagrami potrošnje upotrebljeni za procenu opterećenja pojedinih delova mreže. Heuristička pravila [53] koja uvažavaju stepen daljinski kontrolisane prekidačke opreme, mogu se koristiti prilikom nalaženja rešenja za obnavljanje pogona distributivnih sistema. Na ovaj način mogu se maksimalno uvažiti karakteristike,

prethodna iskustva dispečera, kao i opšte prihvaćena inženjerska praksa za analiziranu distributivnu mrežu. Fazi pristup [54] može se koristiti za procenu opterećenja izvoda koji nemaju merenja. Sa tako dobijenim vrednostima opterećenja može se pristupiti nalaženju rešenja za obnavljanje pogona distributivnih sistema predloženom heurističkom metodom. Kako bi se izvršila procena opterećenja na izvodu, modelovani su normalizovani dijagrami opterećenja za različite dane i za tipične komercijalne, poslovne potrošače i potrošače iz kategorije domaćinstva. Na ovaj način postoji mogućnost da se u slučaju kvara u bilo kom trenutku može kvalitetno proceniti očekivano opterećenje za posmatrani izvod. Ideja o odloženom (stepenastom) obnavljanju pogona opterećenja [55] potekla je od slučajeva u kojima ispravan transformator (ili transformatori) nije u stanju da prihvati celokupno opterećenje ispalog konzuma usled pojave povećanog opterećenja prilikom obnavljanja pogona. Povećano opterećenje je tipično za distributivna područja sa velikim brojem potrošača koji su kontrolisani termostatom. Kako bi se izbeglo preopterećenje transformatora i na taj način izbegle neželjene posledice, predložena je metoda koja uvažava prirodu potrošača. Metodologija za izbor najboljeg skupa strategija [56] za obnavljanje pogona distributivnih sistema, može biti jedan od pristupa u rešavanju obnavljanja pogona. Predloženom metodologijom razmatra se minimizacija broja prekidačkih akcija, minimizacija gubitaka sa uvažavanjem strujnih i naponskih ograničenja. Ukoliko nema dovoljnog kapaciteta za obnavljanje napajanja električnom energijom svih potrošača iz nenapojenog područja, pristupa se određivanju potrošača koji će i posle obnavljanja pogona ostati bez napajanja električnom energijom, na osnovu prioriteta napajanja. Obnavljanje pogona [57] smanjenjem distributivne mreže i definisanje povezujućeg drveća između napojnih čvorova i svih čvorova u umanjenoj mreži, još je jedan pristup rešavanja obnavljanja pogona distributivnih sistema. Ovakav pristup realizuje se pomoću algoritma baziranog na pretraživanju grafova. Predloženim algoritmom smanjuje se mreža u kojoj se dogodio kvar, a zatim se pronalazi rešenje za obnavljanje pogona, vodeći računa o strujnim i naponskim ograničenjima. Fazi logika [58] kojom se definišu heuristička pravila, može se koristiti za nalaženje rešenja obnavljanja pogona distributivnih sistema. Dispečeri često koriste jezičke izraze kako bi opisali stanja ili pojave u sistemu. Ovakvi izrazi po prirodni nisu precizni, ali su neophodni za definisanje heurističkih pravila. Kako bi različita stanja sistema bila uvedena pomoću

dispečerskih izraza, u proces nalaženja rešenja za obnavljanje pogona distributivnih sistema upotrebljeno je fazi rasuđivanje, koje tretira neizvesnost u smislu preciznosti podataka. Fazi rasuđivanje je analizirano sa posebnim osvrtom na definisano maksimalno opterećenje izvoda. Navedeno fazi rasuđivanje je, kao sasvim prirodna pojava, prisutno kod ljudi prilikom donošenja odluka. Algoritam za rešavanje obnavljanja pogona [59] može biti sastavni deo geografskog informacionog sistema. Prekidačke akcije koje je potrebno uraditi, mogu se predloženom metodologijom vizuelno prikazati na geografskoj podlozi. Dispečerima koji su, po pravilu, familijarni sa topologijom distributivne mreže na geografskoj podlozi, ovakav način predstavljanja rešenja obnavljanja pogona distributivnog sistema znatno olakšava donošenje konačne odluke u smislu akcija koje treba preduzeti u slučaju kvara ili drugih poremećaja na mreži. Rešavanje obnavljanja pogona napajanja distributivne kompanije [60] može se postići kombinacijom ekspertnih sistema (za razlaganje problema obnavljanja pogona na restauracione potprobleme) i metodom grananja i ograničavanja (eng. *branch and bound*) za rešavanje potproblema. Baza podataka u ovom slučaju ima znatno manji broj podataka u odnosu na uobičajeni broj za ekspertne sisteme. Smanjeni broj podataka nadoknađuje se pridruživanjem težinskih koeficijenata troškovima manipulacija prekidačkih uređaja, koristeći mešovito celobrojno programiranje. Heuristički pristup [61] koji maksimalno uvažava karakteristike velikih distributivnih sistema jedne regije, predstavlja još jedan pristup rešavanju obnavljanja pogona. Za analizirani region karakteristično je to da su izvodi na trafostanicama opterećeni neznatno ispod maksimalno dozvoljene vrednosti, kao i to da je većina prekidačke opreme zastarela i neadekvatno održavana. Iz navedenih razloga, od ključnog je značaja obezbediti obnavljanje pogona sa što je moguće manjim brojem prekidačkih akcija. Pretraživanje se vrši kombinacijom pretraživanja po širini (eng. *breadth first search*) i metode poznatom kao skraćivanje stabla (eng. *tree pruning*), kako bi se smanjilo računarsko vreme potrebno za iznalaženje rešenja. Pristup rešavanju obnavljanja pogona pomoću ekspertnih sistema [62], koji bi imao zajedničke karakteristike većine distributivnih sistema, može omogućiti primenu razvijenog algoritma na različite distributivne sisteme. Pristup podrazumeva jasno definisane ključne blokove algoritma, kao što su ciljevi sistema, priprema sistema za iznalaženje obnavljanja pogona, generisanje akcija koje treba preduzeti kako bi se obnavljanje pogona realizovalo na terenu, kao i

ograničenja o kojima algoritam mora da vodi računa. Takođe, moraju se definisati faktori kojima bi se jasno napravila razlika između svakog bloka. Tehnike veštačke inteligencije [63] često se upotrebljavaju za rešavanje problema obnavljanja pogona distributivnih sistema. Predložena su dva načina rešavanja, jedan pomoću veštačke neuralne mreže i drugi pomoću metode poznavanja dijagrama opterećenja. Oba načina rešavanja testirana su na realnoj distributivnoj mreži. Kao sastavni deo veštačkih neuralnih mreža, postoji deo algoritma za takozvani trening neuralne mreže. Trening može biti vremenski zahtevan, ali je dobra osobina to, što on može da se uradi pre nego što se pristupi rešavanju obnavljanja pogona. Kada je trening završen i kada su u bazi podataka sačuvani rezultati treninga ili takozvani kalupi, rešenje obnavljanja pogona relativno se brzo pronalazi. Problem obnavljanja pogona unutar jedne VN/SN trafostanice [64], primenom ekspertnih sistema, uključuje angažovanje svih raspoloživih kapaciteta unutar trafostanice, sa ciljem obnavljanja pogona nenapojenog područja. Obnavljanje pogona svodi se na prekidačke akcije unutar trafostanice, pri čemu je primarni cilj obezbeđivanje ponovnog napajanja električnom energijom što većeg broja sredjenaponskih izvoda. Predloženi algoritam ne obrađuje pojedinačne SN/NN potrošače. Vreme potrebno da se izvrši obnavljanje pogona [65] može se odrediti korišćenjem statističkog pristupa, pri čemu se mora voditi računa o uticajima raznih faktora. Faktori su generalno podeljeni u tri grupe (vreme, posledice i okolnosti), koje se kasnije dele u druge podgrupe. Analizom su obuhvaćeni podaci koje su prikupile ekipe sa terena. Određivanje vremena trajanja obnavljanja pogona omogućuje bolje sagledavanje uticaja pojedinih procesa na ukupno vreme trajanja obnavljanja pogona i može biti neka vrsta vodiča (u smislu skraćivanja vremena trajanja obnavljanja pogona) za buduća istraživanja. Vremensko planiranje [66] prekidačkih akcija može biti zasnovano na Petri mreža (eng. *Petri Net*) tehnici. U model Petri mreža ugrađeni su uslovi koji moraju biti ispunjeni pre nego što se akcija preduzme, kao i vreme potrebno da se akcija izvrši, što omogućuje procenu vremena trajanja obnavljanja pogona i dobijanje redosleda prekidačkih akcija. Kombinacija dva algoritma koji funkcionišu kao jedna celina [67], takođe može biti jedan od načina rešavanja obnavljanja pogona. Algoritam koristi optimizacionu tehniku mešovito celobrojnog programiranja i heuristike, pri čemu je za balansiranje opterećenja i povećanje robustnosti algoritma upotrebljena fazi logika. Činjenica da se procentualno veoma mali broj uređaja

prekidačke opreme u prosečnim distributivnim sistemima može daljinski kontrolisati, takođe je razmatrana. Predloženi algoritam prvo pokušava rešavanje problema raspoloživom prekidačkom opremom sa daljinskom kontrolom, a u slučaju da ono nije moguće, pristupa se rešavanju problema sa svom raspoloživom prekidačkom opremom. Kako je predloženi algoritam izuzetno robustan, autori predlažu njegovu primenu u realnom vremenu. Algoritam na bazi fazi [68] tehnike može se koristiti za definisanje prekidačkih akcija prilikom nalaženja rešenja obnavljanja pogona i eliminisanje nepotrebnih troškova na distributivnoj mreži. Predloženo je preduzimanje preventivnih akcija, kako bi se troškovi držali pod kontrolom. Prilikom ostvarivanja navedenih ciljeva, poseban osvrt napravljen je prema balansiranju opterećenja izvoda i balansiranju opterećenja između faza. Rešavanje obnavljanja pogona distributivnih [69] sistema može se realizovati reaktivnim tabu pretraživanjem (eng. *Reactive Tabu Search*). U poređenju sa standardnim tabu pretraživanjem (eng. *Tabu Search*), gde se parametri podešavaju pre otpočinjanja pretraživanja, sa ciljem da pretraživanje bude efikasnije, reaktivno tabu pretraživanje parametre podešava u toku procesa pretraživanja. Predloženi model je upoređen sa tehnikama standardnog tabu pretraživanja, genetskog algoritma i paralelnog simuliranog kaljenja (eng. *parallel simulated annealing*). Problem obnavljanja pogona distributivnog sistema koji sadrži prioritete potrošače [70], može biti formulisan kao ograničeni višeciljni optimizacioni problem. Metod pretraživanja, zasnovan na dodeljenom stepenu prioriteta napajanja potrošača, dizajniran je tako da obezbedi napajanje što većeg broja prioriternih potrošača. Predloženom metodom teži se ka obezbeđivanju maksimalne ukupne snage koja se isporučuje potrošačima koji su ostali bez napajanja električnom energijom posle poremećaja na mreži, kao i minimizaciji broja prekidačkih akcija. Trening simulator [71] sa integrisanim proračunom tokova snaga, proračunom struja kratkih spojeva, modelovanjem prekostrujnih releja i manipulacijama prekidačkim uređajima, može biti pogodan za obučavanje studenata. Posle obuke na simulatoru, na kojem studenti pokušavaju da reše problem obnavljanja pogona u distributivnom sistemu, isti softver se povezuje sa bazom tipičnom za ekspertne sisteme. Moguće je analizirati različite slučajeve poremećaja u distributivnim mrežama, pri čemu je zaključeno da simulator doprinosi boljem razumevanju dijagnostičkih pravila, algoritama za obnavljanje pogona distributivnih sistema, prikupljanja stečenih saznanja i mehanizama za donošenje

zaključaka. Hibridni genetski algoritam [72], koji pored minimizacije neisporučene električne snage potrošačima u nenapojenom području uzima u razmatranje smanjenje gubitaka kao i uticaj kondenzatorskih baterija u distributivnom sistemu, može biti upotrebljen za nalaženje rešenja obnavljanja pogona distributivnih sistema. Objašnjeni su problemi na koje se nailazi u standardnom genetskom algoritmu i predložene su izmene, sa ciljem da se performanse genetskog algoritma poboljšaju. Takođe, uvedene su izmene koje ubrzavaju nalaženje rešenja obnavljanja pogona distributivnih sistema. Algoritam [73] koji bi se mogao koristiti i za obnavljanje pogona distributivnih sistema, kao i za rekonfiguraciju distributivnih sistema, može predstavljati vrlo interesantno rešenje kako za smanjenje gubitaka u distributivnom sistemu tako i za obnavljanje pogona. U osnovi, distributivna mreža se posmatra kao umrežena sa svom prekidačkom opremom u zatvorenom položaju. Isključivanjem prekidačke opreme sa najvećim indeksom u svakoj petlji, može doprineti značajnom poboljšanju performansi distributivne mreže kada se proračunava rekonfiguracija distributivnog sistema. Kada je u pitanju obnavljanje pogona, bira se prekidačka oprema sa najnižim indeksom. Višestruke smetnje na distributivnoj mreži [74] mogu se uspešno rešavati Petri mrežom i predloženim pristupom koji podrazumeva rasterećenje preopterećenih transformatora ili izvoda, kao i obnavljanje pogona nenapojene oblasti posle lociranja i izolacije kvara na mreži. Petri mreža se kombinuje sa heurističkim pravilima i najboljim prvim pretraživanjem. Do rešenja za obnavljanje pogona dolazi se tako što se svi prekidači u nenapojenoj oblasti postave u položaj otvoreno, a zatim se zatvaranjem jednog po jednog prekidača dolazi do konačnog rešenja. Rešenje je moguće tražiti istovremeno za više slučajeva poremećaja. Algoritam za nalaženje rešenja obnavljanja pogona [75] može se sastojati iz dva dela. U prvom delu pronalazi se određen broj rešenja koja mogu da posluže za obnavljanje pogona distributivnih sistema. U drugom delu se, uz pomoć fazi logike, svakom rešenju dodeljuje koeficijent na osnovu četiri kriterijuma: spremnosti na eventualne buduće poremećaje i kvarove, razlike između maksimalnog i očekivanog opterećenja izvoda, broja prekidačkih akcija, kao i broja prekidačkih akcija potrebnih za transfer opterećenja. Na osnovu dodeljenih koeficijenata, bira se najpovoljnije rešenje. Uticaj vremenskih nepogoda [76] na kvarove u distributivnom sistemu može dodatno otežati obnavljanje pogona. Algoritam koji uzima u obzir sve nepredvidljive situacije u nestandardnim uslovima obnavljanja pogona, može biti od

velike koristi u ovakvim slučajevima. Na primer, jedna od najčešćih pogrešnih informacija tokom obnavljanja pogona distributivnih sistema posle oluje, jeste pogrešno definisano mesto kvara koje dovodi do bespotrebnog trošenja vremena i resursa. Kombinacija evolutivne strategije (eng. *evolutionary strategy*) i fazi logike [77] može biti upotrebljena za nalaženje rešenja obnavljanja pogona distributivnih sistema. Višeciljna formulacija problema predstavljena je kao kombinacija ciljeva koji su predstavljeni kao opšti karakteristični indeks definisan uz pomoć fazi teorije. Predloženi algoritam uvažava primenu kondenzatorskih baterija u distributivnoj mreži i za relativno kratko računarsko vreme obezbeđuje više rešenja za obnavljanje pogona, čime se pruža bitna podrška dispečeru u alarmantnim stanjima na mreži. Višekriterijumski algoritam [78] baziran na lokalnoj mreži i višeciljnoj rekonfiguraciji distributivnih sistema, može biti upotrebljen za nalaženje rešenja obnavljanja pogona distributivnih sistema. Uvođenje lokalne mreže smanjuje dimenzionalnost problema, dok se višeciljnom rekonfiguracijom distributivnog sistema određuje definisan broj visokokvalifikovanih varijanti. Varijante se, zatim, rangiraju i kao rezultat se dobija lista rangiranih varijanti za obnavljanje pogona koja uključuje i prekidačke akcije za svaku od varijanti. Kombinacija metoda baziranih na fazi logici i genetskom algoritmu [79], može se koristiti u cilju dobijanja efikasnog algoritma za rešavanje obnavljanja pogona distributivnih sistema. Fazi logikom definiše se pet mogućih ciljeva. Zatim se rešavanje optimizacionog problema prepušta delu algoritma zasnovanog na genetskom algoritmu. Korisnik ovakvog algoritma u mogućnosti je da definiše u kojoj će meri svaki od pet navedenih ciljeva učestvovati u nalaženju rešenja obnavljanja pogona. Višeslojne prekidačke akcije (ili prekidačke akcije unutar celokupnog distributivnog sistema) [80] koje uključuju i upotrebu kapacitivnih baterija, mogu znatno poboljšati performanse algoritma za iznalaženje rešenja za obnavljanje pogona. Glavni cilj ovakvih akcija jeste oslobađanje dodatnih kapaciteta izvoda koji su susedni nenapojenom području. Slične prekidačke akcije opisane su u disertaciji prilikom opisa transfera opterećenja između izvoda. Takođe, predviđeno je angažovanje kapacitivnih baterija, ukoliko se u toku procesa nalaženja obnavljanja pogona naruše naponska ograničenja. Jedan oblik [81] malih (eng. *microgrid*) distributivnih sistema predstavljaju i sistemi za napajanje električnom energijom na brodovima ratne mornarice. Zbog prirode samog broda, gde sofisticirana vojna oprema mora imati pouzdano napajanje električnom energijom, kao i

veće mogućnosti i raznovrsnosti kvarova na distributivnom sistemu, obnavljanje pogona distributivnih sistema predstavlja poseban izazov. Problem je posmatran kao jedna varijanta problema sa definisanim protocima opterećenja i rešava se mešovitim celobrojnim programiranjem. Daljinsko merenje [82] može imati veliki značaj prilikom obnavljanja pogona. Zahvaljujući dobijenim podacima, moguće je sa više preciznosti utvrditi mesto kvara u distributivnom sistemu, što predstavlja preduslov za uspešno obnavljanje pogona. Poseban značaj ovakva merenja imaju posle velikih oluja, poplava i drugih nepogoda kada postoji verovatnoća da se pogrešno proceni mesto kvara u distributivnom sistemu, što ima direktan uticaj na vreme trajanja obnavljanja pogona. Predloženim algoritmom očitavaju se samo određene merne jedinice, kako bi se što efikasnije došlo do potrebnih informacija. Višekriterijumski pristup [83] za nalaženje rešenja obnavljanja pogona distributivnih sistema može biti baziran na nedominantno razvrstanoj fazi evolutivnoj strategiji (eng. *Non-dominated Sorting Fuzzy Evolution Strategy, NS-FES*), koja koristi deo nedominantno razvrstanog genetskog algoritma (eng. *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm, NSGA*). Karakteristika nedominantno razvrstanog genetskog algoritma da razdvoji populaciju rešenja u klase dominacije, omogućuje dobijanje vrlo dobrih rezultata u kombinaciji sa višekriterijumskim pristupom. Ideja o takozvanom automatskom obnavljanju pogona (eng. *Self Healing*) distributivnih sistema [84], sastavni je deo koncepta inteligentnih mreža. Opisana vizija elektroenergetskih sistema u 21. veku vrlo je aktuelna, iako je opisana još 2001. godine. Može se reći da se u svetskoj praksi čine bitni koraci ka ostvarivanju opisane vizije. Pouzdanost [85] je jedan od parametara koji se može uzeti u obzir prilikom nalaženja rešenja za obnavljanje pogona distributivnih sistema. Predložen je dvostepeni pristup za rešavanje obnavljanja pogona. U prvom stepenu bi se obnovio pogon u delu mreže u kojem se nalazi daljinski kontrolisana oprema, a u drugom stepenu pogon se obnavlja u delu mreže gde se prekidačke akcije izvode ručno. Podelom algoritma na dva stepena, znatno se skraćuje ukupno vreme tokom kojeg potrošači ostaju bez električne energije, u poređenju sa klasičnim jednostepenim pristupom. Takođe, dvostepeni pristup ima pozitivne efekte i na pouzdanost distributivne mreže. Umesto binarnog niza tipičnog za standardni genetski algoritam [86] za rešavanje obnavljanja pogona distributivnih sistema, može se upotrebiti šema za kodiranje poznata kao celobrojna zamena (eng. *integer permutation*), pri čemu celi broj predstavlja jedan prekidač. Predstavljen je i

posebno dizajniran nulti gen koji ulazi u optimizacioni proces, ukoliko se u toku izvršavanja algoritma javi potreba za aktiviranjem ovog gena. Nulti gen se aktivira ukoliko nije moguće obezbediti obnavljanje pogona za sve potrošače koji su ostali bez napajanja energijom u nenapojenom delu distributivne mreže. Kako bi se definisalo mapiranje od zamenske liste do konačnog statusa svakog prekidača, upotrebljena je teorija grafova, tako da svako ponuđeno rešenje zadovoljava kriterijum radijalnosti. Genetski algoritam sa celobrojnom zamenom [87], pri čemu svaki hromozom predstavlja listu oznaka prekidača, može se koristiti za rešavanje obnavljanja pogona distributivnih sistema. Status prekidača je, zahvaljujući primenjenoj teoriji grafova, tako definisan da je radijalnost obezbeđena u svakom trenutku izvršavanja algoritma. Nultim genom prekidači su samo označeni, umesto da budu isključeni, što omogućuje algoritmu da napravi optimalan plan za potrošače kojima se ne može obezbediti obnavljanje napajanja električnom energijom. Vremenski povezana simulaciona tehnika [88], koja ima ugrađene podatke o vremenskim uslovima i raspoloživim resursima za obnavljanje pogona, može se koristiti za takozvanu procenu pouzdanosti “cena/vrednost” (eng. *Reliability Cost/Worth Assessment*) distributivnog sistema. Predstavljani su vremenski zavisni težinski faktori koji predstavljaju efekat vrednovanja (učestalosti) kvara pojedinih elemenata sistema u funkciji vremenskih prilika i vremena trajanja obnavljanja pogona u funkciji raspoloživih resursa za obnavljanje pogona. Zatim se težinski faktori kombinuju sa prosečnom vrednošću učestalosti kvarova, kako bi se dobili vremenski promenljive vrednosti učestalosti kvarova za svaku komponentu sistema. Na sličan način, težinski faktori kombinuju se sa prosečnim vremenom obnavljanja pogona, kako bi se dobile vremenski promenljive vrednosti trajanja obnavljanja pogona. Zaključuje se da se vrednost vremenski promenljivog trajanja obnavljanja pogona mora uzeti u obzir prilikom procene pouzdanosti cena/vrednost. Komparativna studija [89] za četiri relativno nova heuristička algoritma daje prednosti i mane pojedinih pristupa. U studiji su analizirani reaktivno tabu pretraživanje, tabu pretraživanje, tehnika paralelnog kaljenja i genetski algoritam. Reaktivno tabu pretraživanje dalo je najkvalitetnije rezultate i do njih se došlo najbrže, prilikom pronalaza rešenja za obnavljanje pogona, pa je zbog toga proglašeno kao najbolje u konkurenciji preostala tri algoritma. Upotreba ekspertnih sistema sa modelima obojene Petri mreže [90], omogućuje dobijanje efikasnog algoritma za obnavljanje pogona.

Modeli obojene Petri mreže za modelovanje elemenata distributivnih sistema kao što su specijalni linijski rastavljači, uvedeni su kako bi se dobilo adekvatno rešenje za obnavljanje pogona. Uvedena su i heuristička pravila kako bi dobijeni rezultati bili u skladu sa lokalnim pravilima, pri čemu je algoritam dizajniran tako da teži da obnovi napajanje električnom energijom što većeg broja potrošača. Veštačke inteligentne Petri mreže sa najboljim prvim pristupom za pretraživanje [91], mogu se koristiti za nalaženje rešenja obnavljanja pogona distributivnih sistema. Petri mreže se koriste za transfer opterećenja između izvoda, kada se identifikuje preopterećenje izvoda. Kako bi se ponašanje potrošača u smislu potrebnog opterećenja procenilo što preciznije, upotrebljen je dijagram opterećenja za svaku sekciju izvoda. Dijagram je rezultat druge studije potrošnje. Zaključeno je da predloženi algoritam može unaprediti obnavljanje pogona distributivnih sistema, kao i ravnomerno opterećenje izvoda, vodeći računa o karakteristikama potrošača. Reaktivnim tabu pretraživanjem [92] mogu se uspešno nalaziti rešenja za obnavljanje pogona, uvažavajući distribuirane generatore električne energije. Predloženi model predstavlja novi koncept u poređenju sa standardnim tabu pretraživanjem. Novi koncept omogućuje da jedan deo potrošača može da ostane bez napajanja električnom energijom i posle završene procedure obnavljanja pogona distributivnog sistema. Takođe, optimalni parametar za pretraživanje može se menjati u toku izvršavanja algoritma, što olakšava proračun za mrežu gde postoje distribuirani generatori u kojoj se očekuje nešto veći broj problema koje treba rešiti prilikom analiziranja distributivnog sistema. Uzročno-posledična fazi mreža [93] može se koristiti za višeciljno obnavljanje pogona distributivnih sistema. Višeciljnost u predloženom algoritmu postignuta je strategijom sume težinskih faktora koji su dodeljeni svakom cilju putem hijerarhijskog analitičkog procesa. Na taj način se višeciljna funkcija svodi na funkciju sa jednim ciljem. Takođe, u algoritam je ugrađena i heuristika, kako bi dobijeni rezultati bili u skladu sa lokanim pravilima. Obnavljanje pogona [94] bazirano na fazi upravljanju rizikom, predstavlja još jedan način obnavljanja pogona distributivnih sistema. Uvođenje fazi logike omogućuje realniji prikaz neizvesnosti poznavanja opterećenja mreže, kao i opterećenja koje treba da bude obezbeđeno nenapojenom području. Upravljanja rizikom s druge strane, doprinosi kvalitetnijim odlukama u toku pronalaženja rešenja u tako neizvesnom okruženju. Na ovaj način može se minimizovati rizik od značajnih troškova koji mogu nastati usled

primene nekvalitetnog rešenja za obnavljanje pogona. Monte Karlo (eng. Monte Carlo) tehnika u kombinaciji sa Petri mrežom [95] može se koristiti za procenu pouzdanosti distributivnih mreža koje sadrže distribuirane generatore. Pomoću Petri mreže se locirati kvar i pronaći rešenje za obnavljanje pogona distributivnih sistema. Procena se bazira na lokaciji i režimu rada distribuiranih generatora. Analiziran je slučaj kada generator isporučuje energiju samo kada se distributivna mreža napaja sa prenosnog sistema, kao i slučaj kada veza sa prenosnim sistemom ne postoji usled kvara na nekom od distributivnih elemenata. Sa gledišta pouzdanosti, distribuirani generatori neznatno negativno utiču na sistem u prvom slučaju, dok je u drugom slučaju pokazano da distribuirani generatori nisu toliko pouzdani kao klasičan način napajanja potrošnje u distributivnim sistemima. Koncept obnovljivosti pogona distributivnih sistema [96], uključujući odgovarajuće pokazatelje performansi, predstavlja način za unapređenje nalaženje rešenja obnavljanja pogona distributivnih sistema. Uvedeni su pokazatelji za neisporučenu snagu, kao i za nenapojen broj potrošača. Takođe, uveden je dijagram za svaki izvod koji omogućuje analizu transfera opterećenja. Pokazatelji služe za procenu obnovljivosti pogona distributivnog sistema, sa mogućnošću optimalnog lociranja prekidača koji imaju isključen status u umreženim distributivnim mrežama. Unapređenje obnovljivosti pogona rekonfiguracijom, u smislu optimalnog određivanja prekidačke opreme koja treba da ima isključen status, stvaraju se uslovi za nalaženje kvalitetnijeg rešenja za obnavljanje pogona u slučaju kvara na mreži. Kombinacija genetskog algoritma i tehnike tabu pretraživanja [97] može se koristiti za nalaženje optimalnog rešenja obnavljanja pogona distributivnih sistema. Ovom kombinacijom postiže se bolja konvergencija algoritma u poređenju sa klasičnim genetskim algoritmom. Rešenje obnavljanja pogona pronalazi se minimizacijom troškova u koje su, pored troškova usled tehničkih gubitaka u mreži, uključeni i drugi troškovi usled neisporučene električne energije. Metoda kontrole optimalnog nadgledanja [98] za rešavanja obnavljanja pogona distributivnih sistema može se primeniti uvođenjem sistema izolovanih događaja. U sistemu izolovanih događaja, jedan događaj se vrednuje pripadajućim kaznama i troškovima. Kazne i troškovi se određuju procenom statičke sigurnosti distributivne mreže, pomoću proračuna tokova snaga i nalaženjem snage koja treba da bude isporučena u okviru nepredviđenih troškova. Postoji mogućnost procene pouzdanosti složenih distributivnih sistema [99], uzimajući u razmatranje obnavljanje

pogona i pogonska ograničenja. Mreža je modelovana kao struktura drveta, kako bi se brzo odgovorilo na promene strukture mreže. Upotrebljeno je pretraživanje po širini, kako bi se nenapojeni čvorovi podelili u šest grupa u funkciji vremena potrebnog za obnavljanje pogona, pri čemu je celokupan algoritam podržan proračunom tokova snaga, kako bi se proveravalo narušavanje ograničenja u toku proračuna. Naravno, jedan od ključnih načina za povećanje pouzdanosti distributivnog sistema jeste skraćivanje vremena trajanja obnavljanja pogona, što vodi do zaključka da se uticaj daljinski kontrolisane prekidačke opreme, kao i procedure prilikom obnavljanja pogona, moraju uzeti u obzir prilikom iznalaženja rešenja za obnavljanje pogona. Informacije koje imaju potrošači [100], kao i informacije o potrošačima i transformatorima, mogu se koristiti za algoritam pod nazivom G mreža (eng. *G-Net*) koji predstavlja verziju Petri mreža. G mreža se u normalnim okolnostima koristi za rekonfiguraciju distributivnog sistema, dok se u slučaju preopterećenja ili kvara koristi za pronalaženje rešenja za obnavljanje pogona uz pomoć optimalnih prekidačkih akcija koje vode do optimalnog transfera i balansa opterećenja između izvoda. Automatsko obnavljanje pogona [101] jedan je od ciljeva distributivnih sistema u budućnosti, u okviru koncepta inteligentnih mreža. Prikazan je koncept automatskog obnavljanja pogona distributivnog sistema na jednom ratnom brodu ratne mornarice. Automatsko obnavljanje pogona podrazumeva preventivno i korektivno delovanje. Preventivno delovanje prepoznaje ranjivost sistema i priprema niz akcija kako bi, ukoliko dođe do poremećaja, negativne posledice bile otklonjene ili lokalizovane i tako bili sprečeni dalji kaskadni poremećaji u sistemu. Korektivne akcije mogu nastati posle preventivnih akcija, ukoliko sistem ne radi u optimalnom režimu ili posle reagovanja zaštite (obnavljanje pogona), pri čemu je cilj obezbediti optimalno funkcionisanje elemenata u distributivnom sistemu. Upravljanje rizikom uz pomoć fazi logike [102], može biti osnova za algoritam koji rešava problem obnavljanja pogona distributivnih sistema. Uvođenje fazi logike unosi u model realniju sliku neizvesnosti poznavanja opterećenja mreže i opterećenja iz nenapojene oblasti kojem treba obezbediti napajanje električnom energijom, pri čemu upravljanje rizikom doprinosi većem kvalitetu donetih odluka prilikom obnavljanja pogona u tako neizvesnom okruženju. Cilj algoritma je dobijanje optimalnog rešenja obnavljanja pogona koji obezbeđuje minimalnih troškova za neisporučenu električnu energiju. Efikasan algoritam za rešavanje obnavljanja pogona [103] može se dobiti kombinacijom

fazi višekriterijumske procene i sive povezujuće analize (eng. *Hybrid Fuzzy-Grey Method*). Fazi višekriterijumska procena uključena je u algoritam, kako bi obrađivala nedovoljno precizne ulazne podatke dispečera, pri čemu se sivom povezujućom analizom rangira svaki od mogućih planova za obnavljanje pogona. Visoke vrednosti penala koje distributivne kompanije plaćaju potrošačima zbog neisporučene električne energije [104], mogu biti dobar motiv za definisanje algoritma čiji će glavni cilj biti upravo smanjenje troškova koje kompanija plaća na ime penala. U ovakvom algoritmu procena vremena trajanja obnavljanja pogona ima vrlo važnu ulogu. Algoritam se bazira na fazi heurističkoj metodi uz upotrebu veštačke inteligencije i iskustva operatera. Rezultati pokazuju da postoje velike razlike u vremenima trajanja obnavljanja pogona za različita moguća rešenja. Genetski algoritam za minimizaciju neisporučene snage [105] može se koristiti za nalaženje rešenja za obnavljanje pogona distributivnih sistema. Predloženo rešenje sastoji se iz dva koraka. Prvi, spoljni korak, definiše radijalnu strukturu mreže. Drugi korak pronalazi rešenje obnavljanja pogona optimalnim izborom prekidačkih akcija, koji minimizuje neisporučenu energiju. Drugi korak je zapravo ugrađen u prvi korak i odgovoran je za usklađenost celokupnog algoritma. Multi-Agent [106] koncept, kao jedno od rešenja savremenih distributivnih mreža, može biti sagledan iz tri aspekta, kao što su zadatak distributivne trafostanice, decentralizovana funkcionalnost i pristup informacijama. Oblast jedne VN/SN trafostanice modelovan je tako što su distributivne trafostanice predstavljene kao kopije ciljeva distributivnih trafostanica, pri čemu su lokalne funkcije trafostanice predstavljene kao funkcije koje se izvršavaju komunikacijom između dve susedne distributivne trafostanice. Dozvolava da se izvrši funkcija, obezbeđena je različitim hijerarhijskim nivoima u skladu modelom pristupa informacijama. Koncept se može koristiti za procenu stanja distributivne mreže i za korektivne akcije u slučaju kvara. Povratno pretraživanje (eng. *Backtracking Search Method*) [107] može se upotrebiti kao osnova za nalaženje rešenja obnavljanja pogona distributivnih sistema. Uzet je u obzir fenomen dodatnog opterećenja koje se javlja kod potrošača posle obnavljanja napajanja električnom energijom. Predložen je korak po korak pristup za rešavanje problema, pri čemu je za cilj uzeta minimizacija vremena potrebnog da se obnavljanje pogona izvrši. Obnavljanje pogona, u slučaju pojave višestrukih kvarova na distributivnoj mreži [108], predloženo je na osnovu činjenice da se takvi kvarovi javljaju u realnim distributivnim

mrežama i da znatno komplikuju obnavljanje pogona. Za višestruke kvarove predloženo je obnavljanje pogona u dva osnovna koraka: pojedinačno i istovremeno. Pojedinačno obnavljanje pogona podrazumeva obnavljanje pogona jednog po jednog područja pogođenog kvarom. Istovremeno obnavljanje pogona obuhvata obnavljanje pogona područja pogođenog istovremeno sa više kvarova. Efikasnost je postignuta uvođenjem indeksa kvaliteta obnavljanja pogona i algoritmom za balansiranje opterećenja. Indeks obnavljanja pogona za jedan distributivni sistem [109], u kombinaciji sa fazi algoritmom koji identifikuje transfer opterećenja kako bi osiguralo potpuno obnavljanje pogona za bilo koji kvar u sistemu, može se koristiti kao koncept za pronalaženje rešenja obnavljanja pogona. Indeksom obnavljanja pogona unapred se proverava u kojoj meri je distributivni system sposoban da izvrši potpuno obnavljanje pogona u slučaju kvara. Predloženim algoritmom bitno se povećavaju mogućnosti i kapacitet obnavljanja pogona u distributivnom sistemu. Pouzdanost distributivnih sistema [110] sa distribuiranim generatorima električne energije može biti analizirana razmatranjem uticaja distribuiranih generatora na poboljšanje nalaženja rešenja za obnavljanje pogona distributivnih sistema. Procena pouzdanosti se nalazi pomoću Monte Karlo tehnike koja omogućuje analizu više kvarova na distribuiranim generatorima. Analiza je rađena za više mogućih slučajeva, uzimajući u obzir, pored rasporeda distribuiranih generatora, raspored prekidača pomoću kojih se može izvršiti sinhronizacija. Prikazani su slučajevi kada je obavljeno potpuno obnavljanje pogona preko susednih vodova, a koje ne bi bilo moguće bez učešća distribuiranih generatora zbog ograničenog kapaciteta tih vodova. Takođe, prikazani su i slučajevi kada se deo obnavljanja pogona vrši preko susednih vodova, a deo preko distribuiranih generatora koji ostatak potrošača napajaju u ostrvskom režimu rada. U ovom slučaju, uticaj prekidača s mogućnošću provere sinhronizacije bitan je u trenutku kada je kvar otklonjen i kada operativnu strukturu mreže treba vratiti u stanje koje je bilo pre kvara. Genetski algoritam [111] može se koristiti kao osnova za nalaženje rešenja obnavljanja pogona distributivnih sistema, pri čemu je problem obnavljanja pogona definisan kao višeciljni i višekriterijumski optimizacioni problem. Upotrebljena je šema celobrojne zamene za dobijanje naslednika, što doprinosi izbegavanju tipičnih problema u genetskom algoritmu. Uzeta je u obzir ručna i daljinski kontrolisana prekidačka oprema, kao i prioritet potrošača prilikom obnavljanja pogona. Nalaženje rešenja obnavljanja pogona, kao i vremena

potrebnog za izvođenje prekidačkih akcija [112], može biti postignuto primenom sekvencijalnog Monte Carlo pristupa. Uzete su u obzir okolnosti koje mogu uticati na izvođenje prekidačkih akcija u realnom distributivnom sistemu, a na osnovu iskustva operatera. Takođe, za očekivano vreme prekidačkih akcija može se odrediti i pripadajuća gustina verovatnoće. Heuristička metoda [113] za nalaženje rešenja obnavljanja pogona distributivnih sistema može imati za cilj smanjenje neisporučene električne snage u kombinaciji sa smanjenjem broja prekidačkih akcija. Algoritam pronalazi određen broj rešenja koja se vrednuju, dodeljivanjem određenih koeficijenata i smeštaju na listu, pri čemu najbolje rešenje ima najmanji koeficijent. Algoritam prekida potragu za novim rešenjima kada je tabela sa mogućim rešenjima popunjena. Tabela predstavlja ulazni podatak za dispečera, na osnovu koje se može napraviti najbolji plan za obnavljanje pogona distributivnih sistema. Nesimetrična opterećenja u trofaznom sistemu [114], takođe, mogu biti ugrađena u algoritam za nalaženje obnavljanja pogona distributivnih sistema. Problem predstavlja višeciljnu optimizaciju sa ograničenjima, formulisano kao problem nelinearnog celobrojnog programiranja. Trofazne jednačine za nesimetrična opterećenja ugrađene su u formulaciju problema tako da nema potrebe za dodatnim proračunavanjima. Obnavljanje pogona na niskonaponskoj distributivnoj mreži [115] koja u svom sistemu ima povezane (uglavnom obnovljive) izvore energije, sadrži specifičan pristup u poređenju sa obnavljanjem pogona na srednjenaponskim distributivnim mrežama, što je tema ove disertacije. Ukoliko nije moguće izvršiti obnavljanje pogona na srednjenaponskom nivou u određenom vremenskom periodu, predloženo je obnavljanje pogona na niskonaponskoj mreži uz pomoć raspoloživih mikrogeneratorskih električnih energija. Koncepti, pristupi rešavanju i tehnički izazovi primene multi-agent sistema [116] u sektoru elektroenergetike, analizirani su, između ostalog, i sa gledišta obnavljanja pogona distributivnih sistema. Cilj analize je ukazivanje na mogućnosti primene, kao i naglašavanje tehničkih pitanja o kojima se mora voditi računa prilikom upotrebe multi-agent sistema. Kako su multi-agent sistemi relativno novi u elektroenergetici, studijom je obuhvaćeno definisanje terminologije kako bi prezentacije budućih istraživanja bile jasne i ne bi dovodile do pogrešnih tumačenja. Prilikom primene multi-agent sistema u elektroenergetičkim sistemima [117] bitno je obratiti posebnu pažnju na prateće alate za upotrebu multi-agent sistema, odgovarajuće standarde, prateće tehnologije i metode dizajniranja. Navedene su razne

opcije koje su u ponudi na tržištu, kao i preporuke na osnovu dosadašnjeg iskustva. Takođe je obrađen i problem upotrebe opreme različitih proizvođača, kao i način na koji ovaj problem može da se reši. Visok stepen nezavisnosti u relejnoj zaštiti i obnavljanju pogona mikrogrid mreža [118] uz pomoć distribuirane veštačke inteligencije, može biti jedna od glavnih prednosti primene multi-agent sistema. Prikazani su glavni razlozi zbog kojih treba dati prednost distribuiranim aktivnostima, nasuprot centralizovanim metodologijama. Predstavljen je model realnog okruženja kako bi se definisali parametri prototipa agenta koji treba da bude deo kooperativnog mrežnog upravljačkog sistema. Cilj sistema je da efikasno upravlja poremećajima na srednjenaponskim mrežama. Za razliku od većine centralizovanih načina rešavanja obnavljanja pogona distributivnih sistema, multi-agent sistemi [119] nude distribuirani prilaz rešavanja obnavljanja pogona distributivnih sistema. Predstavljani su detalji multi-agent sistema koji rešavaju problem obnavljanja pogona distributivnih sistema. Opisan je razvoj i ponašanje agenta, uključujući komunikaciju između agenata. Prikazan je primer punog i delimičnog obnavljanja pogona. Kombinacija veštačkog imunog sistema (eng. *artificial immune systems*) i optimizacije zvane kolonija mrava (eng. *ant colony optimization*) [120] može biti upotrebljena za nalaženje rešenja obnavljanja pogona distributivnih sistema. Algoritam održava populaciju rešenja nazvanu antitela. Prostor se pretražuje hipermutacionim operatorom koji podstiče postojeća antitela da proizvode nova antitela. Tabela feromona koristi se kako bi se poboljšao proces hipermutacije. Upotrebom feromona može se ubrzati nalaženje rešenja obnavljanja pogona distributivnog sistema. Predloženi pristup uspešno rešava višekriterijumske formulacije problema u Pareto optimizacionom okviru (eng. *Pareto optimal framework*), pri čemu su istovremeno optimizovani gubici, uravnoteženost opterećenja transformatora i devijacija napona. Predloženim algoritmom dobija se više povoljnih rešenja od kojih dispečer bira jedno, na osnovu svoje procene i iskustva. Dualitet [121] između obnavljanja pogona distributivnih sistema i problema angažovanja generatora (eng. *unit commitment*) može biti upotrebljen prilikom obnavljanja pogona. Obrazložene su sličnosti dve navedene problematike, što je ilustrovano primerom. Značajno je napomenuti da se vrlo obimno istraživanje i modelovanje efikasnih rešenja za problem angažovanja generatora može iskoristiti za iznalaženja rešenja obnavljanja pogona distributivnih sistema. La Granžova relaksacija sa subgradijentnim iteracijama [122], može se koristiti za iznalaženje rešenja

obnavljanja pogona distributivnih sistema. Ovom metodom se vreme obnavljanja pogona razlaže na intervale, pri čemu se formira plan obnavljanja pogona pronalaženjem statusa svakog izvoda u svakom intervalu. La Granžovom relaksacijom se dobija efikasan proračun vremena i selekcije izvoda koji treba da se napoji električnom energijom. Subgradijentni iterativni pristup omogućuje izbor vektora La Granžovog multiplikatora u optimizacionom procesu. Predloženi metod zapravo predstavlja rešavanje takozvanog obnavljanja pogona opterećenja distributivnog sistema posle poremećaja u prenosnoj mreži, što predstavlja treći korak u obnavljanju pogona kompletnog elektroenergetskog sistema posle teških poremećaja, poznatog u domaćoj literaturi i kao raspad sistema. Prvi korak je priprema za obnavljanje pogona, a drugi korak predstavlja obnavljanje pogona prenosnog sistema. Posle obnavljanja pogona prenosne mreže, potrebno je obnoviti pogon distributivne mreže u smislu napajanja distributivnih izvoda u funkciji raspoložive snage u prenosnom sistemu. Dinamičko programiranje [123] može se koristiti prilikom pronalaženja rešenja obnavljanja pogona opterećenja distributivnih sistema, kao trećeg koraka obnavljanja pogona celokupnog elektroenergetskog sistema. Prvi korak je priprema za obnavljanje pogona, a drugi korak predstavlja obnavljanje pogona prenosnog sistema. Vreme i izbor izvoda koji bi trebalo da budu napojeni električnom energijom, predstavljeni su kao stanja u dinamičkom programiranju. Unapređeno dinamičko programiranje smanjuje broj stanja tako što grupiše izvode koji su u sličnom stanju, a zatim odabira najbolje. Primena ekspertnih sistema [124] sa uvažavanjem promenljivog opterećenja, još je jedan način za pronalaženje rešenja obnavljanja pogona distributivnih sistema. Upotrebljena je tehnika ciljnog programiranja kojom su predstavljani elementi distributivnog sistema, što olakšava efikasnije unošenje promena na tim elementima. Rezultati govore da je moguće dobiti više rešenja za obnavljanje pogona, što ujedno predstavlja i prednost ovakvog pristupa. Dispečer će na ovaj način biti u mogućnosti da izabere najbolje rešenje u skladu sa svojim poznavanjem mreže i iskustvom. Obnavljanje pogona distributivnih sistema [125] zasnovano na tehnici nedominantno sortiranog genetskog algoritma - II (eng. *nondominated sorting genetic algorithm-II*), ne zahteva, kao u slučaju konvencionalno genetskog algoritma, definisanje koeficijenata koji višekriterijumski optimizacioni problem svode na jednokriterijumski problem. Predloženim algoritmom uzet je u obzir niz karakteristika realnih distributivnih mreža,

kao što su prioritetni potrošači, daljinska i ručna kontrola prekidačke opreme i slično. Dobijeni rezultati su znatno kvalitetniji od rezultata dobijenih konvencionalnim genetskim algoritmom. Analiza multi-agent metode [126] primenjene na terenu jeste dobar način da se potvrde teorijska razmatranja ovakvog pristupa nalaženja rešenja obnavljanja pogona. Predložena je nadogradnja postojeće infrastrukture distributivne mreže, ugradnjom multi-agent tehnologije. Na ovaj način su otklonjeni nedostaci u nalaženju rešenja obnavljanja pogona iz distributivnog automatskog sistema koji je centralizovanog tipa, ugradnjom distribuiranog sistema za nalaženje rešenja obnavljanja pogona. Koncept naprednog upravljanja [127], kao sastavnog dela koncepta inteligentnih mreža, zasniva se na potpunoj kontroli lokalne automatike, prekidačke opreme i relejne zaštite, sa ciljem da se minimizuje vreme za koje potrošači ostaju bez električne energije kao i minimizacija neisporučene energije. Uvažen je i uticaj distribuiranih generatora. Obnavljanje pogona [128] može biti rešavano kombinacijom metode pretraživanja pomoću iscrpne metode (eng. *brute-force attack method*) i optimizacione tehnike nazvane binarno rojenje čestica (eng. *binary particle swarm optimization*). Prioritet je dat iscrpnoj metodi pretraživanja kojom se pronalazi rešenje za obnavljanje pogona, dok se pomoću binarnog rojenja čestica metode postiže balans opterećenja susednih izvoda. Manjkavost ovakvog pristupa jeste taj što je ograničen na mali broj potrošača kojima se može obezbediti obnavljanje napajanja električnom energijom. Upotreba distribuiranih generatora [129] u distributivnoj mreži, u konceptu inteligentne mreže, mora se uzeti u obzir prilikom obnavljanja pogona opterećenja distributivnih sistema. Pogodnom formulacijom problema i modelovanjem mreže pomoću grafa, problem se rešava pomoću modifikovanog algoritma zvanog grananje i ograničavanje (eng. *branch and bound*). Distribuirani generatori su posmatrani kao bitna podrška u toku nalaženja rešenja obnavljanja pogona distributivnih opterećenja koje sledi kao treći korak posle pripreme i obnavljanja pogona prenosne mreže. Uz pomoć distribuiranih generatora, maksimiziran je broj potrošača (kao i energija) kojima je ponovo omogućeno napajanje električnom energijom. Višekriterijumski genetski algoritam [130] sa minimizacijom broja prekidačkih akcija, pada napona i gubitaka snage može se iskoristiti kao ideja za rešavanje obnavljanja pogona distributivnih sistema. Predložen algoritam je podržan algoritmom za proračun tokova snaga koji uvažava prisustvo distribuiranih generatora. Analiza distributivnog sistema pokazuje

znatan doprinos distribuiranih generatora na smanjenje gubitaka u distributivnoj mreži. Povećana potrošnja prilikom obnavljanja napajanja potrošača [131] koji su duže vreme ostali bez električne energije, jeste fenomen o kojem treba voditi računa prilikom nalaženja rešenja za obnavljanje pogona. Pored već ranije obrađivanih scenarija, kao što su postepeno napajanje nenapojenih potrošača ili povećanja kapaciteta napojnih transformatora, predloženo je napajanje nenapojene oblasti iz više izvora. Unapređeni diferencijalni evolutivni pristup (eng. *Enhanced Differential Evolution Approach*) [132] može se upotrebiti za nalaženje rešenja obnavljanja pogona distributivnih sistema. Skaliranje promenljivih u diferencijalnom evolutivnom algoritmu kombinovano je sa algoritmom zvanim kolonija mrava (eng. *ant colony*), kako bi se dobio željeni unapređeni pristup. Modifikovana tabu metoda [133], takođe se može koristiti za rešavanje problema obnavljanja pogona distributivnih sistema. Uvođenjem virtuelnog statusa prekidačke opreme u otvoren (isključen) položaj, tabu metod se, pored tradicionalne primene za rekonfiguraciju, može koristiti i za obnavljanje pogona distributivnih sistema. Modifikacija, takođe, otklanja nedostatke standardnog tabu metoda, kao što je taj da broj prekidača koji imaju status isključen pre i posle rekonfiguracije, mora da bude isti. Fenomen povećanog opterećenja na ponovo napojenim potrošačima (eng. *Cold Load Pickup*) [134] može imati značajan uticaj na rezultate prilikom nalaženja rešenja obnavljanja pogona opterećenja distributivnih sistema, koje sledi kao treći korak posle pripreme i obnavljanja pogona prenosne mreže. Pozitivan uticaj na nalaženje rešenja u ovakvim slučajevima mogu imati distribuirani generatori. Predloženi algoritam definiše optimalnu snagu i lokaciju distribuiranih generatora u mreži, kako bi se eliminisala potreba za dodatnom snagom usled fenomena povećanog opterećenja. Predloženi pristup koristi genetski algoritam za određivanje optimalne snage i lokacije distribuiranih generatora. Algoritam sa ugrađenom hijerarhijsko procesno baziranom fazi sivom metodom [135] obezbeđuje okvir za kvantitativno rangiranje rešenja obnavljanja pogona, što omogućuje rangiranje mogućih rešenja obnavljanja pogona dobijenih različitim konvencionalnim metodama. Na ovaj način, dobijena moguća rešenja dodatno se procenjuju u smislu njihove primenljivosti u određenim alarmantnim stanjima, u kojima distributivni sistem može da se nađe i u kojima dispečer mora da donese optimalnu odluku. Metod može da služi kao dodatna alatka za izbor optimalnog rešenja obnavljanja pogona. Decentralizovan metod [136] za

nalaženje rešenja obnavljanja pogona distributivnih sistema, uz uvažavanje distribuiranih generatora, može se rešavati uz pomoć agenata. Razmatran je slučaj obnavljanja pogona kada je u mreži prisutan određen broj distribuiranih generatora, koji posle lociranja i izolacije kvara nastavljaju sa radom u ostrvskom režimu u delu mreže koji je ostao bez napajanja električnom energijom sa prenosnog sistema. U ovakvim slučajevima izbor prioriternih potrošača, kao i isključenje sa mreže manje prioriternih potrošača, javlja se kao vrlo verovatan scenario. Vrednovanje dobijenih rešenja za obnavljanje pogona distributivnih sistema [137] može se uraditi upotrebom takozvanog sivog fazi pristupa (eng. *Fuzzy-Grey approach*) koji je baziran na analitičkom hijerarhijskom procesu. Sivi fazi pristup je prilagođen tako da može da funkcioniše sa jezičkim opisima heurističkih pravila koje koriste dispečeri, kao i da vrši procenu ponuđenih rešenja za obnavljanje pogona. Predloženi algoritam predstavlja odličan alat, odnosno podršku dispečerima u donošenju odluka u toku obnavljanja pogona distributivnih sistema. Složena metoda [138] bazirana na kombinaciji algoritma za pretraživanje grafova i veštačke neuralne mreže, predstavlja još jedan način na koji se može rešavati problem obnavljanja pogona. Obe metode rade usklađeno i istovremeno jedna metodologija dopunjuje nedostatke druge i obrnuto. Da bi se ovakva usklađenost postigla, urađeno je nekoliko manjih aplikacija koje podržavaju rad celokupnog algoritma. Kako bi algoritam baziran na veštačkoj neuralnoj mreži korektno radio, neophodno je kao ulazni podatak obezbediti stepen prioriteta napajanja svakog potrošača. Obnavljanje pogona malih distributivnih sistema [139] može se rešavati pomoću algoritma zasnovanog na modifikovanoj multi-agent metodi. Svaki agent donosi usklađenu odluku o obnavljanju pogona, na osnovu dobijenih informacija. Do informacija se dolazi direktnom komunikacijom sa susednim agentima, pri čemu se sveobuhvatna informacija dobija na osnovu teoreme prosečne usklađenosti (eng. *Average-Consensus Theorem*). Na ovaj način mogu se dobiti sve informacije neophodne za obnavljanje pogona, te se mogu koristiti već postojeći algoritmi za nalaženje rešenja za obnavljanje pogona distributivnih sistema. Mogućnost daljinski kontrolisane potrošnje [140], koja je sastavni deo koncepta inteligentnih mreža, omogućuje dispečeru da direktno ili indirektno isključuje određene delove potrošnje kod potrošača. Predložen je algoritam za nalaženje rešenja obnavljanja pogona, koji uvažava mogućnost direktne daljinski kontrolisane potrošnje. Zaključuje se da mogućnost daljinskog isključenja dela

potrošnje omogućuje smanjenje broja prekidačkih akcija kojima se može izvršiti obnavljanje pogona, povećanje broja potrošača koji se mogu ponovo napojiti električnom energijom i/ili povećati ukupna snaga koja je ponovo priključena na elektroenergetski sistem. Prikazan pregled i analiza više načina rešavanja obnavljanja pogona [141] sa elementima heuristike sa osvrtom na metode koje unapređuju svoje karakteristike u toku vremena, dobar je način za procenu postojećih i inspiraciju za proučavanje novih metoda. Heuristička pravila su, takođe, poznata i kao ekspertska ili pravila zasnovana na saznanjima i karakteristikama posmatrane distributivne mreže. Zaključuje se da još uvek ima dosta prostora za proučavanja, imajući u vidu razvoj tehnika proučavanja kao i ugrađivanje novih tehnologija u postojeću elektrodistributivnu infrastrukturu. Prikazan je i kraći pregled literature koja obrađuje obnavljanje pogona distributivnih sistema.

Način rešavanja obnavljanja pogona, opisan u disertaciji, rešen je heurističkim pristupom koji je zasnovan na modifikovanom Primovom algoritmu. Prilikom iznalaženja rešenja za obnavljanje pogona, koriste se svi raspoloživi kapaciteti distributivnog sistema, uključujući i srednjenaponske sabirnice. Kriterijumska funkcija je minimizacija neisporučene snage, što ujedno predstavlja i primarni cilj proračuna. Sekundarni cilj predloženog načina rešavanja sadržan je u koeficijentima koji se dodeljuju distributivnim linijama. Usvojen sekundarni cilj u disertaciji jeste minimizacija broja prekidačkih akcija. U toku obnavljanja pogona koriste se svi raspoloživi resursi, što znači da se pogonska struktura nenapojenog područja poništava pre početka obnavljanja pogona.

Sekundarni cilj, koji predstavlja minimizaciju prekidačkih akcija prilikom nalaženja rešenja za obnavljanja pogona distributivnih sistema, jeste ugrađen u način rešavanja obnavljanja pogona, dodeljivanjem težinskih koeficijenata distributivnim vodovima, pri čemu je bitno napomenuti da su napravljeni sledeći iskoraci:

- U skladu sa modelovanjem nenapojenog područja distributivnog sistema, primenjen je način rešavanja zasnovan na *Primovom* algoritmu za nalaženje minimalnog drveta.

- Predloženi način rešavanja ilustrovan je primerom na test mreži. Ključna vrednost predloženog načina rešavanja na analiziranom primeru jeste ta što se može definisati željena pogonska struktura nenapojenog područja posle obnavljanja pogona distributivnog sistema.
- Prilikom modelovanja nenapojenog područja distributivnog sistema, deonicama su dodeljeni težinski koeficijenti u zavisnosti od toga da li deonice nisu bile opterećene pre kvara ili jesu bile opterećene pre kvara. Takođe, posebni koeficijenti dodeljeni su izvodima trafostanice koja je pogođena kvarom, kako bi se maksimalno iskoristio kapacitet susednih trafostanica prilikom obnavljanja pogona nenapojenog područja.

Zahvaljujući predloženom načinu rešavanja obnavljanja pogona, može se definisati željena pogonska struktura nenapojenog područja posle obnavljanja pogona, što ujedno predstavlja sekundarni cilj proračuna. Za željenu pogonsku strukturu nenapojenog područja, izabrana je ista pogonska struktura kao i pre kvara. Željenom pogonskom strukturu, izabranom na ovaj način, direktno se utiče na smanjenje broja prekidačkih akcija u konačnom rešenju. Ovakva pogonska struktura postiže se davanjem prednosti distributivnim linijama koje već imaju prekidačku opremu u položaju "zatvoreno", prilikom obnavljanja pogona. Predloženim načinom rešavanja, takođe je data prednost distributivnim linijama koje imaju daljinski kontrolisanu prekidačku opremu u odnosu na linije koje nemaju daljinski kontrolisanu prekidačku opremu.

Pored novog načina rešavanja obnavljanja pogona distributivnog sistema, modelovane su i funkcije rasterećenja transferom opterećenja preopterećenih elemenata u toku proračuna obnavljanja pogona, kao i funkcija filtriranja prekidačkih akcija. Na ovaj način se dobila kompletna slika mogućnosti predloženog načina rešavanja obnavljanja pogona.

U poglavlju 2 dat je pregled karakteristika i tehnologija koje treba da sadrži inteligentna mreža, uključujući strategiju istraživanja i strategiju razvoja koje je potrebno sprovesti prilikom transformacije postojećih u inteligentne mreže. Navedene su prednosti koje se

tom transformacijom postižu. Takođe, opisana je uloga obnavljanja pogona u inteligentnim elektroenergetskim mrežama.

Proračun tokova snaga (poglavlje 3) predstavlja integralni i važan deo predloženog algoritma. Iz tog razloga, neophodno je detaljno opisati način na koji su modelovani elementi distributivnog sistema, topološku interpretaciju distributivnog sistema, kao i tehniku proračuna tokova snaga u distributivnom sistemu.

Ključni deo disertacije odnosi se na predloženi način rešavanja obnavljanja pogona (poglavlje 4) distributivnog sistema posle lociranja i izolovanja grane (deonice) u kvaru. Posle kraćeg pregleda postojećih načina rešavanja obnavljanja pogona, opisana je formulacija problema, kao i neophodne modifikacije Primovog algoritma kako bi se došlo do jednostavnijeg opisa predloženog načina rešavanja obnavljanja pogona. Takođe, komentarisani su rezultati dobijeni na test mreži i to najpre rezultati testiranja predloženog načina rešavanja, a zatim i rezultati testiranja kompletnog algoritma (uključujući transfer opterećenja prilikom pojave preopterećenja, filtriranje prekidačkih akcija itd.). Predloženi način rešavanja publikovan je u časopisu koji je od međunarodnog značaja [142].

U poglavlju 5 izveden je zaključak o radu, gde su izloženi iskoraci postignuti predloženim načinom rešavanja obnavljanja pogona, u odnosu na postojeće načine rešavanja.

U poglavlju 6 dat je pregled literature koja je upotrebljena prilikom proučavanja problematike i izrade disertacije.

U poglavlju 7 prikazani su prilozi (crteži) sa topologijom distributivne test mreže, kao i rezultatima dobijenih predloženim načinom rešavanja, kao i rezultatima kompletnog algoritma.

2 INTELIGENTNE MREŽE

Iz javne debate, koja je vrlo intenzivna u stručnoj javnosti i koja je delom opisana u uvodnom delu disertacije, mogu se izdvojiti ključne karakteristike i tehnologije koje treba da sačinjavaju inteligentnu mrežu. Takođe, potrebno je definisati strategiju istraživanja [6], kao i strategiju razvoja [3] elektroenergetskih sistema koje će voditi ka ostvarivanju vizije koja se zove inteligentna elektroenergetska mreža.

2.1 Karakteristike

Osnovne karakteristike inteligentnih mreža koje su definisane još na početku nastajanja koncepta inteligentne mreže, jesu i dalje ključne, ali to ne znači da će tako ostati u narednim dekadama. U prethodnom veku se, već više puta, dolazilo do bitnih otkrića u domenu elektroenergetike koja su imala značajan uticaj na dalji razvoj elektroenergetskih sistema. Imajući u vidu navedenu činjenicu, kao i trenutne velike napore koje čovečanstvo čini kako bi se došlo do novih izvora, optimalnog transporta i potrošnje električne energije, treba očekivati da će karakteristike, čiji je pregled dat u narednim redovima, vremenom evoluirati, sa mogućnošću da neke nove karakteristike dođu u prvi plan.

2.1.1 Povećanje pouzdanosti isporuke električne energije i automatsko obnavljanje pogona elektroenergetskih sistema

U slučaju kvara, postojeći elektroenergetski sistemi reaguju tako što isključuju element elektroenergetskog sistema koji je u kvaru. Ovaj način reagovanja vodi do toga da potrošači ostaju bez energije duži period i zahteva značajniji broj radnih sati za opravku elementa koji je u kvaru. Inteligentna mreža će ograničiti vreme za koje potrošači ostaju bez električne energije tako što će trenutno odgovoriti na kvar u sistemu i alternativnim putevima preusmeriti napajanje električnom energijom. Takođe, minimizovaće se broj kvarova, stavljajući prevenciju u prvi plan, što će direktno uticati na povećanje pouzdanosti isporuke električne energije. Napredni senzori biće u mogućnosti

da identifikuju stanje mreže koje prethodi kvaru, tako da će problem moći da se izbegne pre nego što se dogodi.

2.1.2 Motivisanje i uključivanje potrošača

U postojećem sistemu potrošači dobijaju mesečne račune i imaju vrlo malo informacija o upotrebi električne energije u toku dana. Inteligentna mreža će imati ugrađena pametna brojila sa mogućnošću dvosmerne komunikacije između kompanija i potrošača. Potrošači će na taj način imati informacije o upotrebi i ceni električne energije u realnom vremenu, što će im omogućiti da sami odlučuju kada da koriste električnu energiju, kao i da li da proizvode ili skladište energiju iz distributivnog energetskog izvora. Ove odluke biće donesene na osnovu tarifnog sistema, dok će cene biti bazirane na vremenu kada se energija koristi.

2.1.3 Zaštita elektroenergetskih sistema od spoljnih uticaja

Postojeća mreža je ranjiva zato što ne može da vrši samostalni nadzor i korekciju poremećaja nastalih zbog neispravne opreme, usled čega mogu nastati velike štete u slučaju terorističkih napada ili negativnog uticaja vremenskih nepogoda. Jedan kvar na vitalnom delu mreže može prouzrokovati negativne posledice širih razmera. Inteligentna mreža će biti u mogućnosti da se zaštiti od ovakvih događaja tako što će brzo obnoviti pogon elektroenergetske mreže. Mreža će biti sposobna da se zaštiti od dve tipične grupe spoljnih uticaja, kao što su:

- Fizičko ugrožavanje elektroenergetskog sistema. Ugrađena telekomunikaciona oprema i senzorska tehnologija obezbediće signale upozorenja, ukoliko nešto nije u redu sa nekim elementom elektroenergetskog sistema.
- Elektronsko ugrožavanje elektroenergetskog sistema. Kako elektroenergetska mreža postaje umrežena i automatizovana uz pomoć računara, opasnost od napada preko računarske mreže je realna. Računarski programi i digitalne komponente, koji će se koristiti u

elektroenergetskim sistemima, moraju da predstavljaju poslednju reč tehnike, kako bi zaštitili elektroenergetski sistem.

2.1.4 Kvalitet električne energije koji će zadovoljiti potrebe 21. veka

U postojećim mrežama dosta energije se ulaže na ograničenje broja prekida napajanja električnom energijom, ali iznenadni padovi napona, kao i drugi poremećaji koji negativno utiču na kvalitet električne energije, mogu imati negativne posledice na visokotehnološko poslovanje koje zavisi od računarske opreme. Inteligentna mreža će eliminisati neželjene smetnje i prekide. Na primer, potrošači će biti u mogućnosti da biraju između standardne i vrhunske usluge. Vrhunska usluga će podrazumevati preduzimanje niza mera koje će omogućiti korekciju deformacije sinusoide i trenutni pristup rezervnom napajanju električne energije u slučaju prekida napajanja.

2.1.5 Prihvatanje svih raspoloživih opcija za proizvodnju i akumulaciju električne energije

Jedan od problema postojećih sistema jeste taj što su bazirani na centralizovanoj proizvodnji električne energije. U inteligentnoj mreži će čitav spektar novih izvora biti povezan na elektroenergetski sistem. Kako se značajniji uticaj generisanja električne energije očekuje od elektrana koje koriste vetar i sunčevu energiju, a koje zavise od vremenskih uslova, to će i oprema za akumulaciju električne energije igrati sve važniju ulogu.

2.1.6 Mogućnost trgovanja električnom energijom

Na celokupnom tržištu električne energije postoje različiti oblici trgovanja, ali je broj kupaca i prodavaca ograničen, što tržište čini nekompletnim. Inteligentne mreže će podržati povećanje broja učesnika na tržištu, tako što će omogućiti protok informacija i komunikaciju u realnom vremenu potrebnu za propisno funkcionisanje tržišta. Potrošači, trgovci, prenos, distribucija i proizvođači električne energije imaju pristup tržištu.

2.1.7 Optimizacija održavanja opreme i efikasno upravljanje

Kompanije nemaju dovoljno informacija o stanju opreme koja se nalazi u njihovim sistemima. Održavanje je periodično i zasnovano na vremenskom rasporedu. Ekipe na terenu moraju da vrše inspekcije periodično. Inteligentne mreže će omogućiti nadzor vitalnih delova opreme, bez odlaska ekipa na teren. Senzori će, takođe, nadzirati opremu sa ciljem optimalnog upravlja opremom, uključujući minimizaciju gubitaka, nedovoljno iskorišćenost kapaciteta i sl. Efikasno upravljanje će, takođe, podrazumevati davanje prioriteta opcijama koje imaju minimalni negativan uticaj na okolinu, prilikom proizvodnje i transporta električne energije.

2.2 Tehnologija i nadogradnja postojećih elektroenergetskih sistema

Kako bi jedan elektroenergetski sistem bio usklađen sa konceptom inteligentnih mreža, javlja se potreba za ugradnjom odgovarajuće tehnologije. Pod ugradnjom tehnologije podrazumeva se primena novih tehnologija i opreme koje dosad nisu upotrebljavane u elektroenergetskim sistemima i primena novih tehnologija za unapređivanje karakteristika već poznatih elemenata elektroenergetskih sistema. Takođe, neophodno je da tradicionalna izgradnja elektroenergetskog sistema bude prilagođena novim zahtevima koje postavlja koncept inteligentnih mreža, kao što su povećanje prenosnih kapaciteta, kako bi se maksimalno olakšalo trgovanje električnom energijom na deregulisanom tržištu, izmene u načinu izgradnje distributivnih mreža, kako bi one bile u mogućnosti da prihvate distribuiranu proizvodnju električne energije i slično. Dobar deo potrebne tehnologije već postoji na tržištu, tako da će biti navedene najbitnije.

2.2.1 Komunikacija

Neophodan je otvoren komunikacioni sistem koji omogućuje dvosmernu komunikaciju između dve komponente u elektroenergetskom sistemu. Ove tehnologije moraju obezbediti široku pokrivenost i upotrebu više tipova bežične komunikacije. Takođe, postojeće procedure, protokoli i standardi moraju se revidovati, kako bi se složena razmena podataka što kvalitetnije

obavljala u normalnom, ali i alarmantnom stanju elektroenergetskog sistema.

2.2.2 Senzori i merenje

Komponente za merenje, uključujući razne vrste senzora, integrišu se u komunikacionu mrežu kako bi obezbedili informacije u realnom vremenu i time omogućili daljinski nadzor, implementaciju tarifnog sistema, kao i brzi odgovor na promene. Ove tehnologije uključuju savremena brojila, senzore, fazorske merne jedinice i slično.

2.2.3 Savremena oprema

Savremena oprema predstavlja skup različitih tehnologija koje uključuju: dijagnozu, superprovodnost, opremu za akumuliranje energije i toleranciju na kvarove. Generalno, ugradnja savremene opreme podrazumeva ugradnju opreme koja dosad nije primenjivana u elektroenergetskim sistemima, ali i zamenu postojeće opreme tehnološki unapređenom opremom (na primer primena transformatora sa manjim gubicima u odnosu na standardne transformatore u upotrebi).

2.2.4 Savremene metode kontrole

Savremena kontrola sastoji se od računarskih sistema i programa koji u realnom vremenu obrađuju sve podatke poslate od naprednih brojila i senzora. Ova oprema omogućuje brzu dijagnozu i automatizovani odgovor, što su neke od najbitnijih karakteristika inteligentnih mreža.

2.2.5 Unapređeni interfejs i podrška u odlučivanju

Unapređeni interfejs i podrška u odlučivanju obezbeđuju bolju preglednost stanja sistema, kako za operatore sistema tako i za potrošače. Zajedno sa ostalim savremenim tehnologijama, unapređeni interfejs i softverska podrška u odlučivanju omogućuju bolju „vidljivost“ elektroenergetskog

sistema, što može direktno da utiče na kvalitet odluke u normalnom ili alarmantnom stanju sistema. Neki od primera jesu upotreba ekrana osetljivih na dodir, programi za estimaciju stanja ili programi koji bolje prikazuju važne informacije u sistemu.

2.2.6 Izgradnja novih kapaciteta elektroenergetskog sistema

Neophodno je prilagoditi koordinisano izgrađivanje novih prenosnih i proizvodnih kapaciteta, kako bi se optimizovao rad elektroenergetskog sistema. Ovaj problem je postojao i ranije, ali sa deregulacijom elektroenergetskih sistema i pojavom nezavisnih proizvođača i pružalaca usluge isporuke električne energije, isti problem dobija drugu dimenziju sa oprečnim zahtevima, recimo između nezavisnih proizvođača električne energije i samog koncepta inteligentnih mreža.

2.3 Strategija istraživanja

Koncept inteligentnih mreža predviđa primenu čitavog spektra novih tehnologija, kako bi postojeći elektroenergetski sistemi dostigli karakteristike inteligentnih mreža, kao što je navedeno u prethodnim poglavljima. Kako bi primena novih tehnologija bila optimizovana, neophodno je sprovesti određena istraživanja. U centar razvoja inteligentnih mreža treba postaviti krajnjeg korisnika [6] i u skladu s tom logikom, pristupiti potrebnim istraživanjima, bez obzira na to da li je korisnik domaćinstvo ili industrijski potrošač. Aktivno učešće potrošača može bitno uticati na pravce razvoja i istraživanja. Generalno, strategija istraživanja treba da obuhvati sledeće oblasti.

- **Inteligentna distributivna infrastruktura, uključujući male potrošače i dizajn mreže:** Istraživanja iz oblasti distributivnih mreža moraju obuhvatiti novu arhitekturu za projektovanje distributivnih sistema, kao i aktivno učešće korisnika električne energije. Takođe, mora se uvesti novi koncept prilikom planiranja, kako bi bila obuhvaćena distribuirana proizvodnja električne energije.
- **Inteligentno upravljanje, protok energije i prilagodljivost potrošača:** Ova oblast istraživanja treba da obuhvati sistemski pristup u inženjeringu, kako bi se proučila funkcionalna integracija distribuiranih generatora i aktivnih

potrošača. Takođe, treba istražiti nove strategije u upravljanju električnom energijom koji će obuhvatiti značajan prodor distribuirane električne energije u elektroenergetske sisteme, akumulaciju i kontrolu potrošnje električne energije. Treba istražiti i tržište na koje će i potrošači imati uticaja.

- **Imovina i upravljanje imovinom:** Upravljanje imovinom prenosnih i distributivnih mreža treba biti dodatno istražena i unapređena. Za prenosne sisteme treba proučiti novu arhitekturu, nove alate i prenos energije sa velikih udaljenosti.
- **Pogonska aktivnost inteligentnih mreža:** Prilikom istraživanja u ovoj oblasti inteligentnih mreža treba analizirati pomoćne usluge, održivo upravljanje i nizak nivo dispečinga. Treba unaprediti i tehnike prognoziranja za održivu pogonsku aktivnost i isporuku energije. Takođe, treba raditi na unapređivanju arhitekture i alata za izradu planova za upravljanje, obnavljanje pogona i odbrane, sa posebnim osvrtom na unapređenje upravljanja prenosnim sistemima. Ovoj oblasti pripadaju i istraživanja u vezi sa predstandardizacijom.
- **Unakrsni problemi koje treba rešavati u vezi sa inteligentnim mrežama i podsticaji:** Treba istražiti tehnologije i standarde za komunikaciju sa potrošačima, uključujući istraživanja u vezi sa informacijama i komunikacijom. Različiti sistemi za transport energije, kao i akumulacija energije, takođe, treba biti uključena u ovu oblast istraživanja. Treba raditi i na istraživanjima u vezi sa zakonskim podsticajima i preprekama, kao i na istraživanju pomoćnih tehnologija neophodnih za inovacije.

2.4 Strategija razvoja

Plan razvoja inteligentnih mreža ima za zadatak da pomogne svim zainteresovanim stranama da sagledaju akcije i prioritete na koje treba obratiti pažnju prilikom primene koncepta inteligentnih mreža na svoje elektroenergetske sisteme. Identifikovani su prioriteti [3] koji se moraju primeniti u prvoj dekadi razvoja. Primenom prioriternih aktivnosti, stvoriće se uslovi za dalji razvoj elektroenergetskih sistema do ostvarivanja koncepta inteligentne mreže.

- **Optimizacija pogona i upotrebe elektroenergetskog sistema.** Prioritet optimizacije pogona i upotrebe elektroenergetskog sistema odnosi se na decentralizovani, ali dobro koordinisani pogon, pogonsku bezbednost i tržišno orijentisani tretman protoka snaga u elektroenergetskim sistemima.
- **Optimizacija infrastrukture elektroenergetskog sistema.** Optimizacija infrastruktura elektroenergetskog sistema odnosi se na izgradnju nove i unapređivanje i nadogradnju postojeće infrastrukture u elektroenergetskim sistemima.
- **Integracija velikih nekontrolisanih izvora električne energije.** Ovaj segment prioriternog razvoja prvenstveno se odnosi na uticaj velikih izvora električne energije proizvedene generatorima koji koriste energiju vetra, koji mogu biti locirani na kopnu, ali i na morskim površinama. Takođe, treba uzeti u razmatranje velike izvore električne energije koji će koristiti energiju sunca, a koji se planiraju za izgradnju u budućnosti.
- **Informaciona i komunikaciona tehnologija.** Definicije zadataka i primena neophodnih standarda za rešenja u oblasti informacione i telekomunikacione tehnologije u budućim inteligentnim mrežama još su jedan od prioriteta razvoja elektroenergetskih sistema. Razvoj i primena informacione i telekomunikacione tehnologije predstavljaju preduslov za mnoge aktivnosti koje moraju da se obavljaju u inteligentnim mrežama, uključujući razmenu podataka u realnom vremenu za nadzor i kontrolu, kao i razmenu podataka za planiranje i poslovanje.
- **Aktivna distributivna mreža.** Razvoj aktivne distributivne mreže podrazumeva prelaz sa trenutne pasivne, koja zavisi od intervencije dispečera, na aktivnu ulogu distributivne mreže u elektroenergetskom sistemu. Potreba za aktivnom distributivnom mrežom javlja se zbog povećane složenosti distributivnih mreža, zahvaljujući prisustvu distribuiranih izvora električne energije, kao i zbog povećanih zahteva za obezbeđivanje sigurnosti i kvaliteta električne energije.
- **Nova tržišta, korisnici i elektroenergetska efikasnost.** Najjednostavnija definicija ove aktivnosti jeste stavljanje potrošača u prvi plan pomoću koncepta inteligentnih mreža. Potrebe, interes i dobrobit potrošača jasan su cilj ovog prioriteta razvoja.

2.5 Prednosti primene tehnologije inteligentnih mreža

Jedna od najvažnijih prednosti u visoko razvijenim društvima, jeste povećanje pouzdanosti elektroenergetskih sistema. Procenjuje se da se štete u jednom visokotehnološkom društvu, koje mogu da nastanu zbog prekida napajanja električne energije u toku jedne godine, mogu meriti u milijardama dolara. Prekidom napajanja električne energije, najviše će biti pogođeni poslovi kao što su: mobilna telefonija, prodaja karata putem telefona, sistemi rezervacija avionskih karata, proizvodnja poluprovodnika, berzanske aktivnosti itd. Povećanjem pouzdanosti i smanjenjem vremena prekida napajanja električnom energijom, istovremeno bi se smanjili gubici u navedenim oblastima.

Osim direktnog uticaja na ekonomiju i finansije, velike koristi imale bi i kompanije iz oblasti elektroenergetike, potrošači, kao i društvo u celini.

2.5.1 Elektroenergetske kompanije

Pogodnosti koje elektroenergetske kompanije mogu da dobiju realizacijom koncepta inteligentnih mreža, jesu mnogobrojne. U narednim redovima navedene su najvažnije, a to su: poboljšana telekomunikaciona infrastruktura, poboljšana usluga potrošačima, poboljšano upravljanje distribucijom električne energije, mogućnost boljeg profilisanja potrošnje, unapređeno upravljanje u toku maksimalnog opterećenja elektroenergetskog sistema, unapređeno rasterećivanje elektroenergetskog sistema u slučaju pojava preopterećenosti pojedinih delova sistema, smanjenje gubitaka, smanjen broj prekida napajanja električnom energijom, poboljšano otkrivanje neovlašćene upotrebe električne energije, poboljšano upravljanje imovinom elektroenergetskih kompanija, automatsko očitavanje utrošene električne energije, mogućnost merenja i proveravanja, razmena podataka sa potrošačima u realnom vremenu, direktna kontrola uređaja kod potrošača, promena cena u realnom vremenu, olakšano naplaćivanje i promena vrste usluga, upravljanje i popravka uređaja kod potrošača, kontrola troškova, olakšano sprovođenje programa koji su doneti na nacionalnom nivou, olakšana integracija vozila na električni pogon i mogućnost

prilagođavanja potrebama koje se mogu pojaviti u budućnosti. Kao ilustracija, navedeno je više detalja za neke od pogodnosti koje elektroenergetske kompanije dobijaju primenom koncepta inteligentnih mreža:

- **Povećana pouzdanost.** Kompanije će biti u mogućnosti da brzo procene i obezbede ponovno napajanje električnom energijom područja pogođenog kvarom, bez slanja ekipe na teren.
- **Odložene investicije.** Važna karakteristika inteligentne mreže biće upravljanje potrošnjom električne energije. Ako kompanije mogu smanjiti vršno opterećenje i redistribuirati opterećenje ravnomerno u toku dana, tada će skupi projekti, neophodni za pokrivanje vršnog opterećenja, biti odloženi.
- **Smanjenje troškova pogona i održavanja.** Inteligentne mreže će još dalje smanjiti potrebu da se ekipe šalju na teren, tako što će omogućiti kompanijama da daljinski uključuju u isključuju potrošače. Pomoću napredne senzorske tehnologije biće moguće prikupiti podatke o opremi i sprečiti kvar.
- **Povećana efikasnost u isporuci električne energije.** Tehnologije inteligentnih mreža kompanijama će omogućiti da bolje nadziru kvalitet električne energije i isprave eventualne smetnje ugradnjom određene opreme.
- **Integracija malih proizvođača električne energije.** Tehnologije inteligentnih mreža omogućiće bolju integraciju obnovljivih izvora energije u postojeće elektroenergetske sisteme. Ovakvi izvori smanjuju troškove goriva kompanijama.
- **Napredni sistemi bezbednosti.** Uključivanje digitalne tehnologije povećava opasnost od napada na sistem putem računarskih mreža. Inteligentne mreže će morati da sadrži napredne bezbednosne tehnologije za bolju odbranu od fizičkih i elektronskih napada.

2.5.2 Potrošači

Postoji čitav niz pogodnosti koje potrošači dobijaju ostvarivanjem vizije inteligentnih mreža, kao što su: poboljšana komunikacijska infrastruktura, bolja usluga, veći izbor

usluga, eliminacija grešaka prilikom očitavanja brojila, povećana pouzdanost napajanja električnom energijom, poboljšan kvalitet isporučene električne energije, smanjen broj prekida isporuke električne energije, smanjeno prosečno vreme trajanja prekida isporuke električne energije, upravljanje troškovima, automatsko obaveštavanje (promena cena, održavanje mreže i slično), veća fleksibilnost i izbor tržišta električne energije, jednostavniji pristup energiji proizvedenoj iz obnovljivih izvora električne energije, mogućnost uticaja na životnu sredinu, edukacija u vezi sa električnom energijom, mogućnost nadzora i opravke opreme od strane distributivnih kompanija, primena opreme koja je jednostavna za upotrebu, veza sa internetom, unapređenja karakteristika uređaja pomoću inovacija i dinamičke kontrole (poboljšana efikasnost, povećana produktivnost, povećan kvalitet proizvoda, poboljšano zdravlje i bezbednost, poboljšano upravljanje otpadnim materijalima. Kao ilustracija, navedeno je više detalja za neke od pogodnosti koje potrošači dobijaju primenom koncepta inteligentnih mreža:

- **Povećane mogućnosti za upravljanje potrošnjom.** Potrošači će imati pristup informacijama o potrošnji u realnom vremenu. Ovo će omogućiti potrošačima da aktivno učestvuju u energetskej efikasnosti.
- **Ušteda novca od primene tarifnog sistema.** Potrošač će moći da pristupi tekućim cenama električne energije. Ovo će im omogućiti da smanje račune, prilagođavanjem upotrebe električne energije tokom dana, u periodu u kojem je cena najpovoljnija.
- **Povećani pristup malim generatorima električne energije.** Inteligentne mreže će omogućiti potrošačima instaliranje malih generatora obnovljive energije. Oni će biti korišćeni za sopstvene potrebe ili će proizvedena energija biti prodavana distribucijama po važećim cenama na tržištu.

2.5.3 Društvo

Pogodnosti koje će društvo u celini imati primenom koncepta inteligentnih mreža, takođe su značajne i podrazumevaju: unapređenu pouzdanost elektroenergetske mreže, manju zavisnost od inostranih izvora energije što povećava društvenu bezbednost, smanjuje potrošnju resursa i povećava samoodrživost, odloženu potrebu za novim kapacitetima za proizvodnju električne energije, manje zagađenje životne

sredine i bolji kvalitet vazduha, ekonomski razvoj, olakšano usklađivanje sa dogovorima na državnom i međunarodnom nivou. Kao ilustracija, navedeno je više detalja za neke od pogodnosti koje društvo dobija primenom koncepta inteligentnih mreža:

- **Životna sredina.** Tehnologije inteligentnih mreža smanjiće emisiju štetnih gasova smanjenjem vršne potrošnje i povećanim pristupom obnovljivih izvora energije. Jedna od zajedničkih karakteristika za elektroenergetske kompanije jeste ta da kompanije pokrivaju vršnu potrošnju sa generatorskim jedinicama koje su veći zagađivači životne sredine. Takođe, realizacijom koncepta inteligentnih mreža, ostvariće se značajan uticaj na kvalitet životne sredine i to tako što će elektroenergetske mreže jednostavnije da se povezuju na obnovljive izvore električne energije, smanjiće se trošenje resursa i povećati samoodrživost sistema, smanjenjem emisije ugljen dioksida smanjiće se efekat staklene bašte i poboljšaće se kvalitet vazduha, smanjiće se otpadni materijal pomoću unapređenih uređaja kod krajnjih korisnika električne energije.
- **Ekonomija.** Inteligentne mreže će pomoći ekonomiji tako što će obezbediti električnu energiju sa većom pouzdanošću i kvalitetom, što će, takođe, omogućiti bolju upotrebu visokih tehnologija.

2.6 Uloga obnavljanja pogona u konceptu inteligentnih mreža

Iz sveobuhvatne slike inteligentnih mreža, koja se može steći opisanim karakteristikama, tehnologijama koje treba da budu primenjene, uključujući određivanje strategije istraživanja i razvoja, treba izdvojiti obnavljanje pogona kao sastavni deo koncepta inteligentnih mreža. Problem rešavanja obnavljanja pogona prisutan je od samog nastanka elektroenergetskih mreža. Naravno, ovaj problem se razvijao, uključujući metode za njegovo rešavanje, paralelno sa razvojem elektroenergetskih sistema. Na osnovu povezanosti između razvoja elektroenergetskih sistema i razvoja metoda za rešavanje obnavljanja pogona, nije teško zaključiti da problem obnavljanja pogona, kao i njegovo rešavanje, mora zauzeti svoje mesto i u ostvarivanju koncepta inteligentnih mreža. Iz tog razloga je prepoznata uloga obnavljanja pogona u definisanju karakteristika inteligentnih mreža, primeni

odgovarajućih tehnologija, uključujući strategije istraživanja i razvoja elektroenergetskih sistema.

U osnovi, obnavljanje pogona u konceptu inteligentnih mreža ima vrlo slične ciljeve kao i u postojećim elektroenergetskim sistemima (na primer smanjenje prosečne neisporučene energije na godišnjem nivou, snižavanje troškova prilikom obnavljanja pogona i slično). Novi momenat predstavlja prisustvo savremene tehnologije u inteligentnim mrežama. U tom smislu, pred problem rešavanja obnavljanja pogona postavljaju se novi izazovi na koje se mora odgovoriti.

- Rešavanje obnavljanja pogona mora da uvaži karakteristike savremene opreme koja će biti ugrađivana u distributivni sistem, što može znatno povećati efikasnost prilikom primene predloženog rešenja na terenu.
- Rešavanje obnavljanja pogona mora da uvaži karakteristike novih pristupa prilikom dizajniranja elektroenergetskih sistema (na primer ugradnja distribuiranih generatora), što problem obnavljanja pogona može učiniti znatno složenijim.

Predložen nov način rešavanja obnavljanja pogona distributivnih sistema predstavlja rezultat istraživanja rešavanja obnavljanja pogona distributivnih sistema. Ovim istraživanjem dat je doprinos rešavanju obnavljanja pogona distributivnih sistema, kao i aktuelnim naporima koji se trenutno čine u svetu ka ostvarivanju koncepta inteligentnih mreža.

3 TOPOLOGIJA DISTRIBUTIVNE MREŽE I TOKOVI SNAGA U DISTRIBUTIVNIM SISTEMIMA

3.1 Uvodna razmatranja

Proračun tokova snaga u distributivnom sistemu ima vrlo važnu ulogu prilikom proračuna obnavljanja pogona. Posle svake promene uklopnog stanja (stvarne ili potencijalne) u distributivnom sistemu, neophodno je proveriti strujne i naponske prilike. U prenosnim sistemima, ovaj problem se uspešno rešava Njutn-Rapsonovom metodom ili Stotovim algoritmom. Osnovne fizičke razlike između prenosnih i distributivnih mreža (dominantno radijalna struktura, znatno veći odnos aktivne otpornosti i reaktanse, velika razlika između najkraćih i najdužih deonica itd.), predstavljaju glavnu prepreku za primenjivost pomenutih metoda i na distributivne sisteme. Ukoliko bi bilo pokušaja da se proračun tokova snaga distributivnog sistema reši nekom od pomenutih metoda, velika verovatnoća je da bi došlo do divergencije algoritma. Pre svega zbog svoje radijalne pogonske strukture, tokovi snaga u distributivnom sistemu umnogome zavise od trenutnog uklopnog stanja, dok električni parametri mreže, praktično, nemaju uticaja. Proračuni se svode na primenu prvog i drugog Kirhofovog zakona. Poboljšanje ovako dobijenih rezultata proračuna može se postići u samo nekoliko iteracija.

Kako bi se proračun u distributivnom sistemu ubrzao, mogu se zanemariti izvesni podaci koji, sa gledišta dispečinga, nemaju bitnog uticaja na proračun tokova snaga. Uobičajeno je zanemarivanje uticaja otočnih komponenata vodova (osim u slučaju kondenzatorskih baterija), razlike u fazama napona i slično. Primenom navedenih zanemarenja, praktično se dobija nepovoljnija naponska slika nego što ona stvarno jeste, tako da se može reći da su zanemarenja uvedena na stranu sigurnosti.

Informacije o opterećenju u potrošačkim čvorovima predstavljaju veći problem sa gledišta greške koja nastaje prilikom proračuna. Kako distributivni sistemi nemaju dovoljno opreme za očitavanje podataka u realnom vremenu, to se većina podataka o potrošnji u potrošačkim čvorovima, praktično dobija iz statističkih podataka. Obradom statističkih podataka moguće je vršiti procenu stanja mreže u pogledu

opterećenosti. Procena stanja distributivnih sistema prerasla je u problematiku koja je obrađivana u literaturi, a koja svoju punu primenu upravo postiže u sprezi sa proračunom tokova snaga u distributivnom sistemu. U osnovi, procena se može vršiti na osnovu vršnih opterećenja ili na osnovu instaliranih snaga transformatora u potrošačkim čvorovima. U ovom radu kreće se od pretpostavke da su prikazana opterećenja ujedno i vršna opterećenja potrošačkih čvorova. Instalacijom savremene tehnologije inteligentnih mreža u potrošačke čvorove od interesa za proračun problematika informacija o opterećenju može se jednostavno rešiti.

3.2 Modelovanje elemenata distributivnog sistema

3.2.1 Model opterećenja

Naponska zavisnost aktivnog (P_j) i reaktivnog (Q_j) opterećenja potrošačkog transformatora SN/NN priključenog u čvoru j , može se izraziti stepenom funkcijom:

$$P_j = P_{nj} \cdot \left[\frac{V_j}{V_n} \right]^{k_{pj}} \quad (3.1)$$

$$Q_j = Q_{nj} \cdot \left[\frac{V_j}{V_n} \right]^{k_{qj}} \quad (3.2)$$

gde su P_{nj} i Q_{nj} snage potrošnje pri nominalnom naponu, a k_{pj} i k_{qj} statički koeficijenti samoregulacije napona u čvoru j .

Ukoliko se posmatra distributivni sistem u normalnom pogonu, iz aspekta gubitaka aktivne snage, onda se u većini slučajeva u literaturi koriste jednostavni modeli konstantne snage ($k_{pj} = 0$, $k_{qj} = 0$).

Model konstantne struje ($k_{pj} = 1$) najčešće se koristi za balansiranje opterećenja između izvoda i transformatora, a takođe i za dispečing u havarijskom režimu, gde je

od vitalnog značaja provera strujnih i naponskih ograničenja. Model konstantne struje koristiće se iz tog razloga i u ovom radu.

I model konstantne snage i model konstantne struje omogućuju brzo proračunavanje tokova snaga u distributivnoj mreži, dok je model konstantne impedanse ($k_{pj} = 2$) manje upotrebljavan.

3.2.2 Model distributivnog voda

Zbog matematičkog modelovanja, vod se definiše kao skup deonica međusobno povezanih prekidačkom opremom ili račvama gde se susiće dva ili više vodova. Svaka deonica zamenjuje se podužnim električnim parametrima i dužinom voda. Insistiranje na tačnom proračunu (sa uključivanjem otočnih komponenti u proračun), nema praktičnog opravdanja, jer se znatno veća greška pravi prilikom procene stanja opterećenja mreže. Uvažavajući usvojeni model potrošnje, pad napona na određenoj deonici može se računati kao:

$$\Delta V = I \cdot \sqrt{3} \cdot (r_0 \cdot \cos(\varphi) + x_0 \cdot \sin(\varphi)) \cdot l \quad (3.3)$$

gde je:

- I - moduo struje voda
- r_0 - podužna aktivna otpornost deonice voda
- x_0 - podužna reaktansa deonice voda
- $\cos(\varphi)$ - prosečni, jedinstveni faktor snage
- l - dužine deonice voda

3.2.3 Model distributivnog transformatora VN/SN

Distributivni transformator VN/SN se u postavci tokova snaga modeluje kao idealni naponski generator, čiji je napon jednak podešenom naponu na srednje naponskim (SN) sabirnicama.

3.3 Topološka interpretacija distributivnog sistema

Topološki posmatrano, u urbanim sredinama distributivne mreže se grade upetljane, što je karakteristično za prenosne sisteme, dok su u pogonu radijalne. U tom smislu, može se govoriti o mogućoj (umreženoj) i pogonskoj (radijalnoj) topologiji.

Umrežena topologija distributivne mreže srednjeg napona može se predstaviti kao neorijentisan graf $\Omega_p = (N, B)$, gde skup čvorova N odgovara sabirnicama srednjeg napona distributivnih transformatora N_t i potrošačkih N_p transformatora uz referentni čvor r :

$$N = N_t \cup N_p \cup \{r\}, \quad (3.4)$$

pri čemu je:

$$n_t = |N_t| - \text{ukupan broj distributivnih transformatora VN/SN} \quad (3.5)$$

$$n_p = |N_p| - \text{ukupan broj potrošačkih transformatora SN/NN} \quad (3.6)$$

Skup grana B čine skup grana B_t koje odgovaraju distributivnim transformatorima VN/SN modelovanim idealnim naponskim generatorima, skup grana B_p koje odgovaraju potrošačkim transformatorima SN/NN modelovanim idealnim strujnim izvorima i skup grana B_l koje odgovaraju deonicama vodova mreže modelovanim impedansama, pri čemu je:

$$B_t = (N_t \times \{r\}) \cup (\{r\} \times N_t) \quad (3.7)$$

$$B_p = (N_p \times \{r\}) \cup (\{r\} \times N_p) \quad (3.8)$$

$$B_i = B \setminus (B_i \cup B_p) \quad (3.9)$$

pri čemu je:

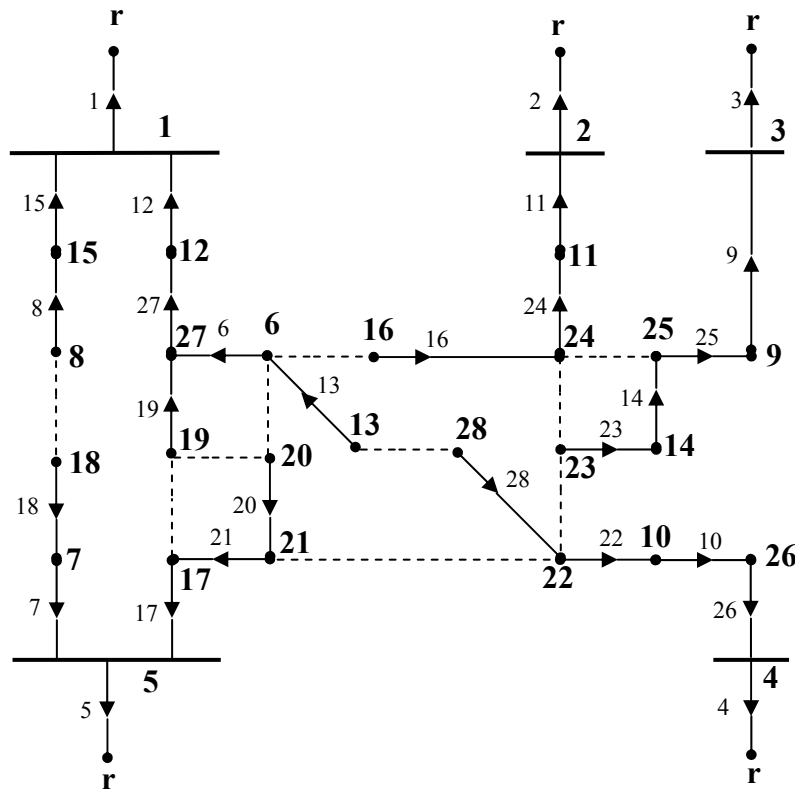
$$n_i = \frac{1}{2}|B_i| \quad - \text{ broj deonica vodova srednjeg napona} \quad (3.10)$$

Skupovi (3.4), (3.7), (3.8) i (3.9) smatraju se poznatim, što u potpunosti definiše graf Ω_p koji odgovara upetljanoj mreži.

U pogonskoj strukturi distributivnog sistema, svaki potrošački transformator SN/NN napaja se iz jednog izvoda i jednog postrojenja u kojem se nalaze distributivni transformatori VN/SN. Struktura distributivnog sistema u tom slučaju je radijalna, tako da svakom pogonskom stanju može da se pridruži jedno stablo na grafu Ω_p . Jedno takvo stablo sadrži sve grane koje odgovaraju distributivnim transformatorima koji su u pogonu i potreban broj grana koje odgovaraju deonicama vodova koje spajaju potrošačke transformatore (stablo ne sadrži grane koje predstavljaju potrošačke transformatore). Na ovaj se način mogu opisati razna pogonska stanja distributivnog sistema pomoću orijentisanih grafova $\Omega_p = (N, \vec{B})$ strukture rodoslovnih, zakorenjenih stabala.

Primer gore opisane strukture prikazan je na slici 3.1. Čvorovi koji odgovaraju sabirnicama VN/SN postrojenja pripadaju skupu $N_i = \{1,2,3,4,5\}$, a ostali, potrošački čvorovi, pripadaju skupu N_p . Čvor \mathbf{r} je praotac, koren stabla i u pogonskoj strukturi distributivnog sistema predstavlja izvor napajanja.

Predstavljanje pogonske strukture distributivnog sistema, na ovaj način, omogućuje primenu relacije delimičnog uređenja u skupu N . Nejednakost, $\mathbf{r} < x < y$ znači da se čvor x nalazi između čvora y i čvora \mathbf{r} (npr. čvor 25 se nalazi između čvora \mathbf{r} i čvora 23). Zbog postojanja međusobno neuporedivih čvorova, reč je o relaciji delimičnog, a ne potpunog uređenja (čvorovi 20 i 28 međusobno se ne mogu upoređivati na gore opisani način).



Slika 3.1. *Primer pogonske strukture distributivne mreže sa numeracijom čvorova i grana*

Upoređivanje čvorova u smislu relacije delimičnog uređenja ili provera uporedivosti dva čvora, može se uraditi funkcijom prethodnika, odnosno “očeva” π :

$$\pi(x) = y, \quad (3.11)$$

za svako $y < x$ tako da ne postoji z takvo da $y < z < x$.

Definisanjem ove funkcije za sve čvorove mreže, definisana je i odgovarajuća pogonska topologija mreže. U tabeli 1 prikazane su vrednosti funkcije π za čvorove mreže sa slike 3.1. Istom funkcijom je omogućeno da se za orijentisani graf strukture stabla, svaka grana (x, y) , takva da je $\pi(x) = y$, umesto uređenim parom, obeležava kratko sa x , a druga komponenta para se izračunava upotrebom uvedene funkcije π .

Zahvaljujući ovakvom prilazu, postoji mogućnosti da se relacije delimičnog uređenja uvedu i nad skupom grana grafa Ω_p .

Tabela 1. Tabelarni prikaz topološke strukture mreže sa slike 3.1

x	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\pi(x)$	r	r	r	r	r	27	5	15	3	26	2	1

x	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$\pi(x)$	6	25	1	24	5	7	27	21	17	10	14	11

x	25	26	27	28
$\pi(x)$	9	4	12	22

Prilikom rešavanja problema obnavljanja pogona/rekonfiguracije, često se javlja potreba za još dve funkcije koje opisuju pogonsko stanje distributivnih sistema. Prva određuje pripadnost svakog potrošačkog čvora određenom distributivnom transformatoru, a druga određuje pripadnost svakog potrošačkog čvora određenom izvodu.

Za skup potrošačkih čvorova N_s koji se napajaju iz distributivnog transformatora s važi:

$$N_s = \{x \mid s < x\}, \quad s \in N_t; \quad (3.12)$$

Slično prethodnom, za skup potrošačkih čvorova N_{x_f} koji se napajaju izvodom x_f (odnosno prvom deonicom x_f) važi:

$$N_{x_f} = \{x \mid x_f \leq x\} \quad \text{tako da je} \quad x_f \in \{x \mid \pi(x) \in N_t, x \in N_p\}, \quad (3.13)$$

odakle se može definisati i skup prvih izvoda, odnosno izvoda N_f

$$N_f = \{x \mid \pi(x) \in N_t, x \in N_p\} \quad (3.14)$$

Na ovaj način su definisane dve funkcije:

$$g_t(x) = \begin{cases} s & , x \in N_s \\ 0 & \text{inače} \end{cases} \quad (3.14)$$

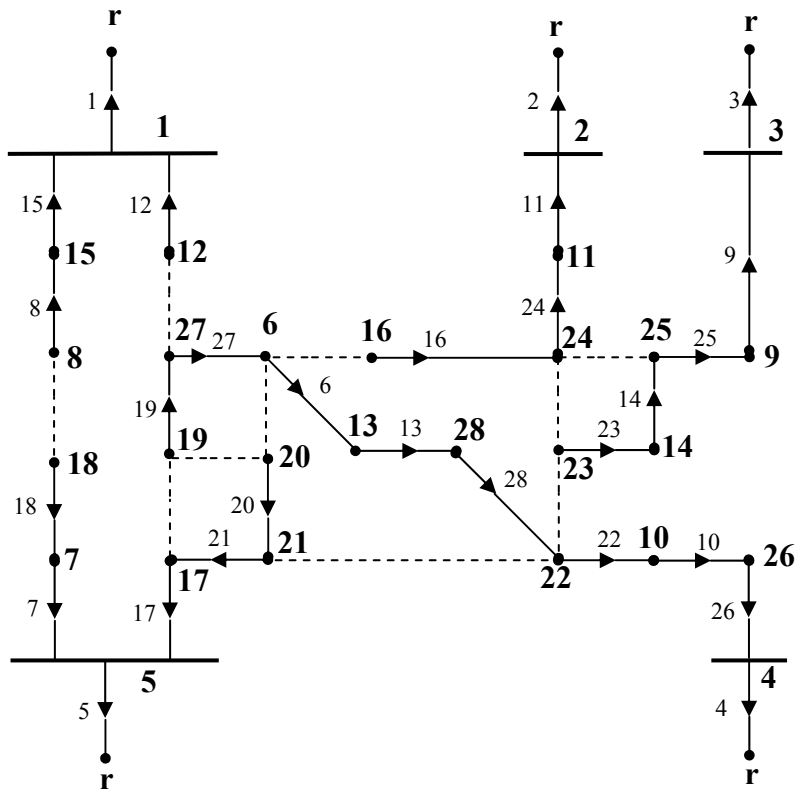
$$g_f(x) = \begin{cases} x_f & , x \in N_f \\ 0 & \text{inače} \end{cases} \quad (3.16)$$

Na primer, za mrežu na slici 3.1, $g_t(x) = 1 \quad \forall x \in N_1$, $N_1 = \{6,8,12,13,15,19,27\}$, što znači da se potrošački transformatori koji su priključeni u navedenim čvorovima, napajaju preko sabirnica 1, odnosno transformatora 1, što definiše i oblast napajanja transformatora. Slično, $g_f(x) = 12$, $\forall x \in N_{12}$, $N_{12} = \{6,12,13,19,27\}$, definiše pripadnost potrošačkog transformatora izvodu, u ovom slučaju zonu napajanja izvoda 12. Vrednosti funkcija g_f i g_t računaju se posredno, upotrebom funkcije π kojom se u tu svrhu, generiše put napajanja od specificiranog čvora do korena. Takođe se i skupovi koji definišu oblasti napajanja, mogu formirati upotrebom iste funkcije. Ukoliko potrošački transformator x nije napojen, što se konstatuje nepostojanjem veze specificiranog čvora i korena, funkcije g_f i g_t dobijaju vrednosti nula. Skup izvoda za mrežu na slici 3.1 je: $N_f = \{7,9,11,12,15,17,26\}$, imajući u vidu $\pi(x_f) \in N_t$, $x_f \in N_f$.

Prikaz određene radijalne strukture u računarski orijentisanom algoritmu koji se bazira na gornjoj interpretaciji, zahteva skromne memorijske resurse. Vektorom dimenzija $n_t + n_p + 1$ svaka pogonska radijalna struktura distributivne mreže u potpunosti se može definisati.

Pravi smisao ovakve interpretacije distributivnog sistema postiže se time što je moguće vršiti jednostavnu simulaciju topoloških promena u distributivnom sistemu, koje se koriste u distributivnom dispečingu. Prebacivanje opterećenja sa jednog izvoda na drugi, simulira se promenom funkcije π za samo one čvorove koji su locirani na putu definisanom granom koja ulazi u stablo i granom koja ga napušta. Na slici 3.2 prikazano je uklopno stanje mreže sa slike 3.1 nakon manipulacije kojom je izvršen transfer opterećenja sa izvoda 12 na izvod 26 uključenjem grane (13,28) i isključenjem grane(27,12).

Polazeći od čvora 13 sa slike 3.1, promenom uloga sina i oca za čvorove na putu 13 – 6 – 27 i deklarirajući čvor 28 prethodnikom čvora 13 ($\pi(13) = 28$), formira se struktura na slici 3.2. Olakšavajuća okolnost je da čvorovima koji su prilikom transfera opterećenja promenili napojni izvod, ali se ne nalaze na relevantnom putu, funkcija π ne menja vrednost. Čvor 19 se na slici 3.1 napaja iz izvoda 12, dok se na slici 3.2 napaja sa izvoda 26, ali je vrednost funkcije prethodnika u tom čvoru nepromenjena, $\pi(19) = 27$, što potvrđuje jednostavnost simulacije manipulacija i odgovarajućih proračuna.



Slika 3.2. Struktura sa slike 3.1 nakon manipulacija transfera opterećenja sa izvoda 12 na izvod 26 uključenjem grane (13, 28) i isključenjem grane (27, 12)

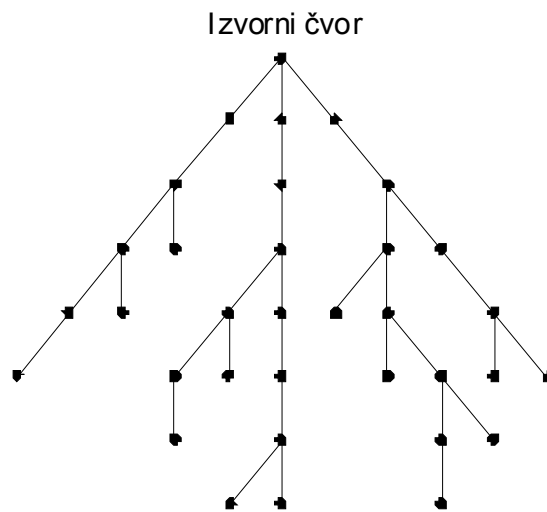
3.4 Proračun tokova snaga distributivnog sistema

Metod koji je realizovan za rešavanje radijalnih distributivnih mreža, zasnovan je na direktnoj primeni prvog i drugog Kirhofovog zakona [27]. Osim toga, pristup problemu rešavanja tokova snaga kod radijalnih distributivnih mreža orijentisan je ka granama mreže koja se rešava (vodovi, kablovi i transformatori). Kod već pomenutih metoda za proračun stanja u prenosnim mrežama, algoritam za rešavanje usmeren je ka čvorovima mreže. Kod metoda za rešavanje proračuna tokova snaga kod radijalnih distributivnih mreža koristi se efikasan način numerisanja grana i čvorova u mreži, s namerom da se ubrza postupak proračuna, odnosno smanji potrebno vreme računanja. Način na koji su numerisane grane i čvorovi biće posebno objašnjeni i analizirani.

3.4.1 Numerisanje grana

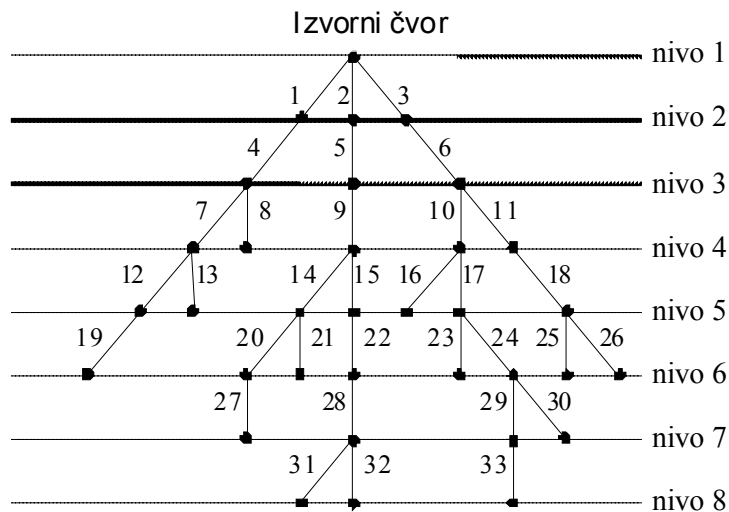
Način numerisanja grana najbolje se može pokazati na primeru jedne radijalne mreže, date na slici 3.3. Graf sa slike opisuje mrežu sa N čvorova, b ($b=N-1$) grana i jednim naponskim izvorom u izvornom čvoru, odnosno u korenu stabla grafa.

U postupku numeracije grana, najpre je potrebno obeležiti tzv. nivoe u mreži i to počevši od izvornog čvora. Nakon toga, grane se numerišu po nivoima i to od onih koji su bliži izvornom čvoru, do onih koji su udaljeniji od izvornog čvora. Numerisanje grana u sledećem nivou počinje tek pošto su sve grane u prethodnom nivou numerisane.



Slika 3.3 *Primer radijalne distributivne mreže*

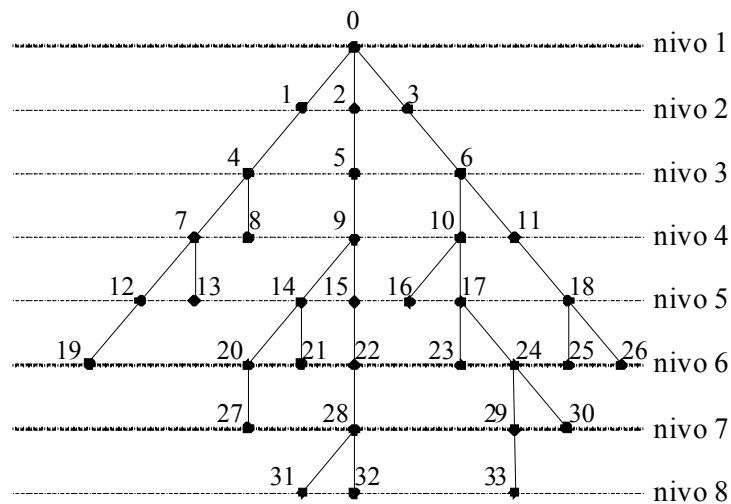
Gore opisani način numerisanja grana za mrežu sa slike 3.3 prikazan je na slici 3.4. Ako postoji potreba za izbacivanjem stare ili ubacivanjem nove grane, nema potrebe za prenumeracijom cele mreže. Dovoljno je prenumerisati mrežu ispod ubačene ili izbačene grane.



Slika 3.4 *Numerisanje grana u radijalnoj distributivnoj mreži*

3.4.2 Numeracija čvorova

Pored numeracije grana, potrebno je izvršiti i adekvatnu numeraciju čvorova. U opštem slučaju, proizvoljna grana radijalne mreže može se obeležiti sa L . Čvor grane L koji je bliži korenu stabla, može se označiti sa L_1 , a drugi čvor grane sa L_2 . Najjednostavniji i najefikasniji način numeracije čvorova može se opisati relacijom $L_2(L)=L$. Ovo praktično znači da grana L i njen drugi čvor imaju istu numeričku oznaku, odnosno označavaju se istim brojem. Na ovaj način izvršena je numeracija svih čvorova, osim izvornog čvora koji se numeriše sa 0. Na slici 3.5 prikazan je način numerisanja čvorova za mrežu sa prethodne dve slike.



Slika 3.5 Numerisanje čvorova u radijalnoj distributivnoj mreži

Potrebno je naglasiti da ovakva numeracija grana i čvorova nije neophodna. Razlog za ovakvom numeracijom jeste poboljšanje numeričkih performansi metode rešavanja, odnosno skraćivanje računarskog vremena.

3.4.3 Metod za rešavanje radijalnih distributivnih mreža

Metod za rešavanje radijalnih mreža u stvari je iterativna procedura koja se sprovodi uz usvajanje određenih pretpostavki:

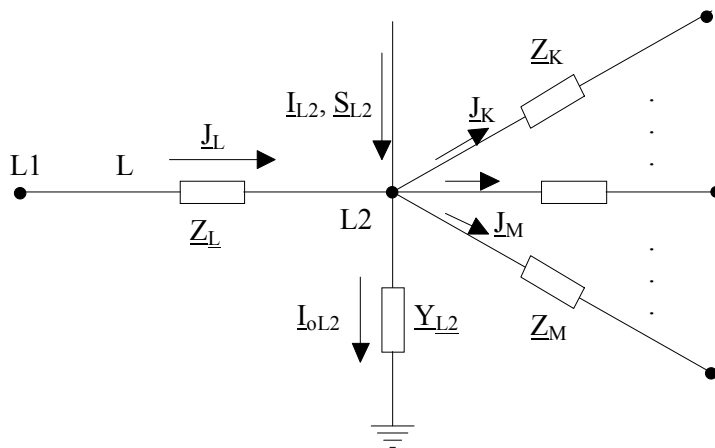
- Izvorni čvor je balansno referentni (eng. *slack*) čvor sa poznatim modulom i faznim stavom napona.

- Pretpostavlja se da su početne vrednosti modula napona u ostalim čvorovima jednake nominalnim vrednostima, dok se za fazne stavove napona uzima vrednost 0.
- Pretpostavlja se da su poznate struje injektiranja po pojedinim čvorovima.

Algoritam za rešavanje radijalnih mreža odvija se u 2 osnovna koraka.

3.4.3.1 Prolaz odozdo nagore

Cilj ovog koraka jeste nalaženje struja po pojedinim granama mreže. Radi jednostavnijeg objašnjenja ovog koraka algoritma, poslužiće šema data na slici 3.6.



Slika 3.6

Na šemi sa slike 3.6 oznake imaju sledeća značenja:

- L - proizvoljna grana radijalne mreže;
- L1, L2 - čvorovi grane L;
- \underline{Z}_L - redna impedansa grane L;
- \underline{J}_L - struja po grani L;
- \underline{S}_{L2} , \underline{I}_{L2} - snaga i struja injektiranja čvora L2, respektivno;
- \underline{Y}_{L2} - ukupna otočna admintansa u čvoru L2;

- \underline{I}_{oL2} - struja kroz admintansu \underline{Y}_{L2} ;
- $\underline{K}, \dots, \underline{M}$ - grane koje izlaze iz čvora $L2$;
- $\underline{J}_{\underline{K}}, \dots, \underline{J}_{\underline{M}}$ - struje po granama $\underline{K}, \dots, \underline{M}$.

Imajući u vidu oznake i usvojene smerove na gornjoj šemi struja po grani L može se izračunati preko jednačine:

$$\underline{J}_L = -\underline{I}_{L2} + \underline{I}_{oL2} + \sum_{\text{izlaze iz cvora } L2} \text{Struja po granama koje}; L = b, b-1, \dots, 1. \quad (3.17)$$

Uvažavanjem usvojenih modelovanja delova distributivnog sistema, o kojima je ranije bilo reči u ovom poglavlju, zanemaruje se uticaj otočnih impedansi i usvaja se $\cos(\varphi) = 1$.

$$J_L = -I_{L2} + \sum_{\text{izlaze iz cvora } L2} \text{Struja po granama koje}; L = b, b-1, \dots, 1. \quad (3.18)$$

Potrebno je naglasiti da proračun struja po granama u jednoj iteraciji polazi od grana koje su najudaljenije od izvornog čvora i kreće se ka izvornom čvoru. Otuda se ovaj korak algoritma naziva prolaz odozdo nagore.

3.4.3.2 Prolaz odozgo nadole

U ovom koraku izračunavaju se naponi čvorova mreže i to polazeći od izvornog čvora, pa sve do poslednjeg čvora u poslednjem nivou radialne mreže. Napon čvora $L2$ grane L , izračunava se na osnovu ažuriranog napona čvora $L1$ i struje kroz granu L izračunate u prethodnom koraku algoritma:

$$\underline{V}_{L2}^{(k)} = \underline{V}_{L1}^{(k)} - \underline{Z}_{L-L} \underline{J}_L^{(k)}; L = 1, 2, \dots, b \quad (3.19)$$

Gornja jednačina, u stvari, predstavlja primenu Kirhofovog zakona za granu L . Na ovaj način se izračunavaju naponi svih čvorova za tekuću iteraciju.

Kao što je već rečeno, potrošnja je modelovana modelom konstantne struje. Tako se proračun tokova snaga svodi na samo jednu iteraciju. U tom slučaju, dobija se nešto nepovoljnija naponska slika, pri čemu se čini veća greška prilikom proračuna napona u potrošačkim čvorovima. Međutim, ovo odstupanje nema značajnijeg uticaja na određivanje obnavljanja pogona distributivnog sistema (greška se čini na stranu sigurnosti).

4 OBNAVLJANJE POGONA NAKON POREMEĆAJA U RADU URBANIH DISTRIBUTIVNIH SISTEMA

4.1 Uvodna razmatranja

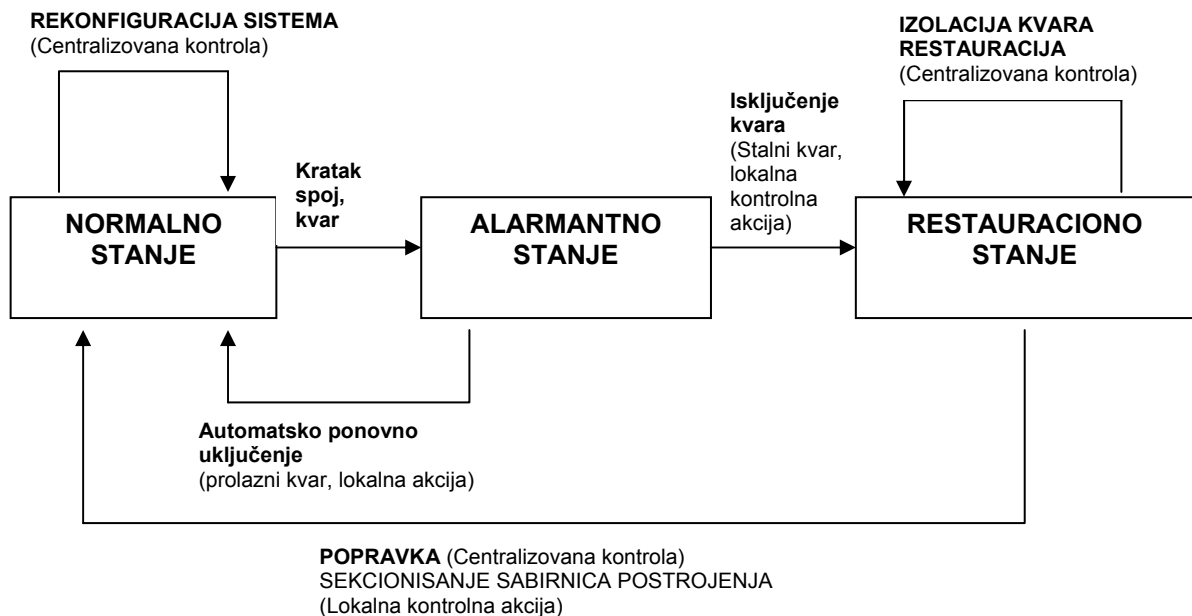
Prilikom planiranja i izgradnje distributivnih sistema, razmatra se nivo rezervi u transformaciji i vodovima određenih naponskih nivoa. Pri tom se posmatraju jednostruki kvarovi, pri čemu se teži da princip N-1 bude obezbeđen. Znači, mora se imati rezerva prilikom jednostrukog ispada nekog od elemenata u sistemu u vreme vršnog opterećenja. Može se razmatrati i ispad dva elementa sistema u vreme kada opterećenje nije vršno.

Način na koji je koncipirana određena distributivna mreža u smislu rezerve u transformaciji i vodovima, direktno utiče na način rešavanja restauracije (obnavljanja pogona) distributivnog sistema posle kvara. U osnovi, postoje dve koncepcije. Jedna se odnosi na ruralne sredine, gde su prisutne autonomne transformatorske stanice, kod kojih ispravni transformator preuzima opterećenje transformatora u kvaru. Druga se odnosi na urbane sredine, gde se ispali konzum napaja delom iz ispravnog transformatora pripadajuće trafostanice, a delom iz okolnih trafostanica, naravno, sa maksimalnom upotrebom kapaciteta distributivne mreže koja je građena kao petljasta, a radi kao radijalna. Primena prve koncepcije (autonomne trafostanice ili vodovi) u urbanim sredinama, bilo bi izuzetno skupo rešenje. Manje ulaganje u nove kapacitete ima za posledicu težnju za što boljom upotrebom postojećih, što i jeste jedan od glavnih razloga automatizacije distributivnih sistema, u okviru kojih obnavljanje pogona zauzima značajno mesto.

Ograničenja distributivnog sistema, koja igraju značajnu ulogu prilikom obnavljanja pogona, mogu se podeliti na ograničenja u isporuci električne energije i operativna ograničenja. Znači, pred sistem se postavlja zahtev za isporukom električne energije pod određenim uslovima koji podrazumevaju operativna ograničenja, kao što su strujna ograničenja, naponska ograničenja itd. Operativna ograničenja, kao što je

ograničenje maksimalne struje izvoda, mogu biti klasifikovana kao narušavanje normalnih uslova (donja granica), pri kojima sistem (ili njegov deo) može raditi još neki izvestan period i alarmantna granica, pri kojoj deluje odgovarajuća relejna zaštita.

Prelazna stanja u kojima se elektroenergetski sistem može naći [44], prikazan je na slici 4.1. Jedan deo prikazanih stanja ne zavisi od centralizovane kontrole i ne zavisi od direktnih akcija koje se pokreću iz komandnog centra. Takva kategorija stanja (“nedobrovoljna promena stanja sistema”), u kojima se može naći sistem, može nastati usled kvarova ili promena opterećenja koja su rezultat akcija lokalne automatike koja otklanja pomenute kvarove.



Slika 4.1 Prelazna stanja u kojima se sistem može naći

Jedan od ciljeva ovog rada jeste dobijanje akcija za drugu kategoriju prelaznih procesa, kojima se otklanjaju negativne posledice izazvane nedobrovoljnom promenom stanja sistema. Ove akcije se mogu sprovesti kroz distributivni kontrolni centar. Sledi pregled stanja u kojima se sistem može naći:

- *Normalno – Normalno:* Kada je sistem u normalnom stanju, a narušene su samo donje granice (na primer, preopterećenje nadzemnih vodova), pri čemu nisu ugrožene gornje operativne granice koje bi izazvale trenutno dejstvo neke od zaštita sistema, problem se rešava rekonfiguracijom sistema.

Rekonfiguracijom se postiže vraćanje sistema u stanje kada nema narušavanja donjih (normalnih) operativnih granica. Međutim, cilj rekonfiguracije obično u takvoj situaciji nije samo zadovoljavanje operativnih granica sistema, već se teži optimumu i kroz druge kriterijume, kao što je minimizacija aktivnih gubitaka i slično.

- *Normalno – Alarmantno*: Alarmantno stanje je kada je u sistemu kratak spoj i kada kroz izvod protiče ogromna struja. Sprečavanje daljeg proticanja struje kvara postiže se dejstvom lokalne automatike (relejne zaštite).
- *Alarmantno – Normalno*: Kada je kratak spoj u sistemu prolazan (privremenog karaktera), dejstvom Automatskog Ponovnog Uključenja (APU), sistem se ponovo vraća u normalno stanje.
- *Alarmantno – Restauraciono*: U slučaju trajnog kvara, prelazi se iz alarmantnog u restauraciono stanje, pri čemu se narušava ograničenje u pogledu isporuke električne energije.
- *Restauraciono – Normalno*: Otklanjanjem kvara, sistem se vraća u normalno stanje. Sistem se nalazi u restauracionom stanju sve do trenutka vraćanja sekcije pogođene kvarom u pogon, čak iako je preduzetim akcijama obezbeđeno snabdevanje električnom energijom celokupnog ispalog konzuma.
- *Restauraciono – Restauraciono*: Posle isključenja kvara, neophodno je pronaći makrolokaciju kvara u sistemu (deonicu u kvaru). Zatim se mora pristupiti snabdevanju električnom energijom što je moguće većeg konzuma koji je usled kvara bez iste i ostao. Pri tom se koriste sekcijski prekidači (rastavljači snage u SN/NN) ili linijski rastavljači.

Robustnost algoritama, kojima se vrši rešavanje problema obnavljanja pogona, veoma je značajna. Stvarno stanje distributivnih sistema vrlo često se razlikuje od planiranog, delom zbog kašnjenja u dinamici izgradnje i remonata, a delom i zbog nepredviđenih okolnosti koje se mogu desiti na samom sistemu. Prilikom rešavanja obnavljanja pogona distributivnog sistema posle poremećaja, postoje dva oprečna zahteva. S jedne strane, algoritmom se teži da se što bolje analizira određeni distributivni sistem, a s druge strane postoji, zbog efikasnosti algoritma (primene na stvarnom distributivnom sistemu), vremensko ograničenje. Zato se mora praviti kompromis između ovih zahteva. Algoritam mora efikasno rešavati problem i u slučajevima da neki podaci iz

stvarnog stanja sistema nisu dostupni (npr. opterećenja potrošačkih čvorova nisu uvek poznata). Drugim rečima, algoritam mora biti robustan.

Kako bi primenjivost računarski dobijenih rešenja obnavljanja pogona uopšte imala smisla, neophodno je poznavati način utvrđivanja kvara u specificiranom distributivnom sistemu. Po toj osnovi, distributivni sistemi mogu se podeliti na:

- Sisteme gde se način utvrđivanja sekcije u kvaru obavlja jednostavnim polovljenjem mreže, pri čemu se ovaj princip koristi sve dok se ne utvrdi mesto kvara. U ovakvim distributivnim sistemima, prednosti upotrebe raznih programskih paketa za obnavljanje pogona distributivnog sistema, dovode se u pitanje. Naime, i u ovim sistemima pomenuti programski paketi mogu imati značajnu ulogu, ali su performanse istih znatno umanjene.
- Sisteme gde se način utvrđivanja sekcije u kvaru obavlja uređajima za lociranje kvarova koji omogućuju brzo utvrđivanje sekcije u kvaru, što nam, opet, omogućuje punu primenu programskog paketa i samim tim omogućuje maksimalan učinak.

Osim mogućnosti lociranja kvara, koji praktično predstavlja osnovni ulazni podatak, algoritam za obnavljanje pogona distributivnog sistema posle poremećaja, imaće svoju punu primenu i pri tome dati najbolje rezultate, ukoliko bi broj daljinski kontrolisane prekidačke opreme bio znatno veći. Broj daljinski kontrolisane prekidačke opreme u prosečnim distributivnim kompanijama još uvek je veoma mali. To znači da bi primena rezultata dobijenih pomoću algoritma za obnavljanje pogona distributivnih sistema, u dobrom delu slučajeva podrazumevala izlazak ekipa na teren. Primena raznih algoritama za obnavljanje pogona distributivnih sistema predstavlja jedan poseban problem koji zahteva znatno više prostora i nije sastavni deo ovog rada.

Ovaj rad je namenjen distributivnim sistemima koji imaju lokatore kvarova i opremu za brzo utvrđivanje mesta kvara.

4.2 Postojeći načini rešavanja obnavljanja pogona

Obnavljanje pogona distributivnog sistema posle poremećaja, u osnovi je višekriterijumski, kombinatorni, nelinearni problem sa ograničenjima. Velika dimenzionalnost distributivnih sistema dodatno usložnjava problem.

Uopšteno, obnavljanje pogona distributivnih sistema sastoji se od određivanja ciljne konfiguracije i pravljenja liste manipulacija kojima se dolazi do ciljne konfiguracije.

Aktivnosti dispečera i pogonskih električara, kada je posmatrani distributivni sistem u poremećenom stanju, sastoje se iz:

- saznanja da se na određenom mestu u mreži nalazi trajno otvoren prekidač
- utvrđivanje makro lokacije kvara
- odvajanja što manjeg dela mreže u kojoj je kvar, od ostatka distributivnog sistema
- vraćanja napona što većem delu mreže koji nije pogođen kvarom
- vraćanje napona celom distributivnom sistemu nakon sanacije kvara

Kriterijumi kojima se funkcija obnavljanja pogona distributivnih sistema najčešće realizuje jesu:

- minimum snage potrošača koji ostaju bez napajanja
- minimum broja prekidačkih akcija
- minimum padova napona
- minimum sume kvadrata odstupanja napona od referentnih vrednosti
- maksimum strujne rezerve izvoda na srednjem naponu
- maksimum strujne rezerve VN/SN ili SN1/SN2 transformatora
- kombinacije gore navedenih kriterijuma, sa mogućnošću davanja težinskih faktora svakoj od njih

Ograničenja koja se najčešće poštuju prilikom obnavljanja pogona, a koja su nezavisna od kriterijuma optimizacije jesu:

- topološka povezanost mreže (radijalna struktura distributivnog sistema)
- strujna ograničenja

- naponska ograničenja
- ograničenja iz aspekta relejne zaštite

Bilo koja ograničenja koja se koriste prilikom rešavanja problema obnavljanja pogona distributivnih sistema posle poremećaja, mogu se podeliti kao tvrda i meka. U principu, meka ograničenja podrazumevaju izvesnu toleranciju (npr. sistem može raditi ako je nekim mekim ograničenjem narušena donja granica). Tvrda ograničenja imaju isti tretman kao i gornja granica mekih ograničenja (prilikom pisanja algoritma, narušavanje ovih ograničenja podrazumeva promenu toka algoritma). Ovakva uopštena podela ograničenja ne podrazumeva to da se jedna ista veličina u različitim algoritmima tretira kao isključivo tvrdo ili isključivo meko ograničenje. Zahvaljujući složenosti prirode distributivnih sistema, različitim matematičkim pristupima pa, na kraju, i mašte samog autora algoritma, uniformna podela specificiranih ograničenja na tvrda ili meka gubi svoj smisao.

Postojeći načini rešavanja obnavljanja pogona distributivnih sistema, koji su delom opisani u [143] i [144], uglavnom su pratili trendove za rešavanje složenih tehničkih problema u drugim tehničkim disciplinama. U narednim redovima ukratko su navedene osnovne ideje nekih od najčešće primenjivanih metoda za rešavanje optimizacionih problema kod elektroenergetskih sistema, uključujući i distributivne sisteme. Treba napomenuti da je pregled metoda čisto informativnog tipa i da se u detaljniji opis svake od navedenih metoda nije išlo zbog ograničenosti prostora u disertaciji, kao i iz želje da disertacija ostane u okvirima navedene teme, a to je novi predloženi način rešavanja obnavljanja pogona distributivnih sistema.

4.2.1 Matematičke optimizacione metode

Optimizacioni pristup zasniva se na primeni raznih optimizacionih metoda i numeričkih algoritama koji koriste proceduralne jezike (fortran, C, C++, matlab itd.). Dobra strana ovakvog pristupa jeste precizno definisanje problema rešavanja obnavljanja pogona distributivnih sistema u smislu kriterijumske funkcije i ograničenja. Takođe, nije potrebno poznavati specifičnosti razmatrane distributivne mreže. S druge strane, zbog složenosti distributivnih sistema, kao i samog problema obnavljanja pogona, nije moguće uzeti u obzir sve aspekte razmatranog distributivnog

sistema. Dodatni problem predstavlja velika dimenzionalnost distributivnih sistema, što iziskuje prilično dugo računarsko vreme.

Optimizacija predstavlja matematički model, gde je glavni cilj minimizovati neželjene elemente (troškove, gubitke, greške itd.) ili maksimizovati željene elemente (profit, kvalitet efikasnost itd.) nekog sistema koji se analizira.

Glavne prednosti matematičkih optimizacionih metoda jesu:

- Optimalnost je vrlo precizno definisana i dobijena rešenja su optimalna ili vrlo blizu optimalnom rešenju.
- Problem se može definisati tako da se iskoriste prednosti proređenih tehnika optimizacije koje su pogodne za opisivanje elektroenergetskih sistema.
- Postoji čitav spektar kvalitetnih i dobro razrađenih optimizacionih metoda koje se koriste za analizu elektroenergetskih sistema.

U narednim redovima biće ukratko opisane glavne osobine najčešće upotrebljivanih matematičkih optimizacionih metoda za analizu elektroenergetskih sistema.

4.2.1.1 Linerano i kvadratno programiranje

Linerano programiranje podrazumeva linerano definisanu ciljnu funkciju i ograničenja. U osnovi, metode linearnih programiranja svode se na dve osnovne kategorije: simpleks metodu i metoda unutrašnjih tačaka. Obe metode mogu obavljati proračune sa velikim brojem promenljivih i ograničenja, tako da nije problem vršiti simulacije sa računarskom opremom koja je lako dostupna. Glavna prednost simpleks metode jeste velika računarska efikasnost. S druge strane, jedna od glavnih mana simpleks metode jeste broj iteracija potrebnih za vršenje proračuna koji eksponencijalno raste s povećanjem dimenzionalnosti problema. Problem broja iteracija uspešno se rešava metodom unutrašnjih tačaka. Metoda unutrašnjih tačaka fokusira se na ograničenu oblast i na taj način progresivno teži optimalnom rešenju, za razliku od simpleks metode koja ispituje i najudaljenije tačke prostora koji se pretražuje. Obe metode, simpleks i metoda unutrašnjih tačaka, mogu biti definisane lineranom i kvadratnom funkcijom, kada su ograničenja linearna.

4.2.1.2 Nelinearno programiranje

Linerano programiranje podrazumeva nelinearno definisanu ciljnu funkciju ili ograničenja. Razlika između linearnog i nelinearnog programiranja može se opisati analogijom razlike između rešavanja skupa linearnih i rešavanja skupa nelinearnih jednačina. U većini slučajeva nelinearnog programiranja pristup je takav da se startuje od početne vrednosti i određivanja dovoljno kvalitetnog pravca u kojem se ciljna funkcija smanjuje, ukoliko je za ciljnu funkciju izabrana minimizacija. Razvijen je veliki broj metoda nelinearnog programiranja koje se razlikuju po definiciji i dužini koraka u procesu optimizacije. Na primer, kvazi Njutnova metoda, koja pokušava da napravi matricu približnu Hessian-ovoj matrici, može da daje vrlo dobre rezultate u smislu konvergencije sistema. Slaba tačka ove metode, upravo je formiranje navedene matrice. Ukoliko je Hessian-ova matrica već dobijena analitičkim putem, onda se može koristiti Njutnova metoda. Neke od najuspešnijih metoda koje se danas koriste, bazirane su na primeni kvadratnog programiranja za rešavanje lokalnih aproksimacija kod nelinearnih problema. Metoda unutrašnjih tačaka, koja je originalno razvijena za linearno programiranje, može se koristiti za kvadratno programiranje i nelinearno programiranje.

4.2.1.3 Celobrojno i mešovito celobrojno programiranje

Za mnoge optimizacione probleme, neke nezavisne promenljive mogu imati samo celobrojne vrednosti. Najpoznatiji slučaj jeste model prekidača koji se obično modeluje tako da ima vrednosti 1 za uključen status ili 0 za isključen status. Ovakvi problemi nazivaju se celobrojno programiranje. Ukoliko su neke promenljive kontinuirane, onda se problem naziva mešovito celobrojno programiranje. Uglavnom se koriste dve metode za rešavanje celobrojnih problema i to grananje i ograničavanje i metoda skraćivanje prostora (eng. *cutting plane method*). Moguće je rešavati celobrojne probleme koji sadrže na stotine promenljivih. Veličina i kompleksnost celobrojnog i mešovito celobrojnog programiranja zavisi od strukture problema koji treba rešiti. Takođe se koriste i metode razlaganja kojima se kontinuirani problem razloži na celobrojni ili mešovito celobrojni i kao takav, problem se dalje rešava.

4.2.1.4 Dinamičko programiranje

Dinamičko programiranje je metoda za rešavanje složenih problema, tako što se složeni problem razloži na jednostavnije potprobleme. Dinamičkim programiranjem mogu se rešavati problemi koji imaju osobinu preklapanja potproblema ili mogućnost podele problema na potprobleme. U poređenju sa iscrpnim metodama pretraživanja, dimenzionalnost i vreme proračuna kod dinamičkog programiranja znatno je manja, pod uslovom da je dinamičko programiranje primenjivo na analizirani problem. Međutim, za velike sisteme, kakvi mogu biti elektroenergetski sistemi koji treba da se analiziraju, problem dimenzionalnosti i dalje je prisutan.

Suština dinamičkog programiranja svodi se na činjenicu da se prilikom rešavanja kompleksnog problema, zapravo rešava skup potproblema, čiji se rezultati, zatim, dalje kombinuju kako bi se dobilo konačno rešenje. Kako su mnogi potproblemi suštinski isti, dinamičkim programiranjem se teži da se proračuni takvih potproblema urade samo jednom, čime se direktno utiče na smanjenje dimenzionalnosti i potrebnog računarskog vremena za analizirani kompleksni problem.

4.2.2 Iscrpne metode pretraživanja

Za diskretne probleme, za koje nije poznata efikasna metoda rešavanja, javlja se potreba za detaljnim postupnim pretraživanjem svih mogućnosti. Ovakav način pretraživanja poznat je kao iscrpna metoda pretraživanja, ali se u literaturi mogu naći i pod imenom direktna metoda pretraživanja ili pretraživanje „brutalnom silom“.

4.2.2.1 Pretraživanje po širini (horizontali) (eng. *breadth-first search*)

Pretraživanje počinje od definisanog početnog stanja, sa ciljem da se pretraživanjem pronađe ciljano stanje. Trenutno stanje koje se analizira naziva se roditelj, a stanje koje se dobije analizom roditelja, naziva se naslednik. Pretraživanje se obavlja tako što se analizom roditelja definišu svi naslednici koji se upoređuju sa ciljanim stanjem. Kada se završi sa analizom roditelja, prelazi se na analizu jednog po jednog naslednika, koji sada preuzimaju ulogu roditelja u algoritmu i iz kojeg se dobija sledeći set naslednika. Algoritam se zaustavlja kada se dobije ciljano stanje.

Pretraživanje po širini predstavlja iscrpljujuću metodu, koja za velike i kompleksne sisteme zahteva značajno računarsko vreme. S druge strane, dobijanjem svih mogućih naslednika od jednog roditelja, garantuje da će sva potencijalna rešenja biti ispitana i ako postoji način da se dođe do ciljanog stanja, isto će biti i pronađeno. Put od početnog do ciljanog stanja pronađenog ovim načinom pretraživanja, predstavlja najkraći put.

Kod veoma kompleksnih sistema pretraživanje po širini može biti veoma računarski zahtevno i ciljano stanje može ležati u možda hiljaditom setu (kolenu) naslednika, što može obesmisлити pretraživanje, ukoliko se očekuju rezultati pretraživanja u relativno kratkom roku. U ovakvim slučajevima problem se može rešavati i tako što će se definisati prihvatljiv broj setova naslednika do kojih treba vršiti pretraživanje.

4.2.2.2 Pretraživanje po dubini (vertikali) (eng. *depth-first search*)

Isto kao prilikom pretraživanja po širini, pretraživanje po dubini takođe polazi od analize roditelja, ali se odmah po dobijanju prvog naslednika, istom nasledniku dodeljuje uloga roditelja i na isti način vrši sledeća analiza. Tako se analizom samo jednog naslednika iz mogućeg seta naslednika, ide u dubinu grafa koji se pretražuje. Kada se dođe do poslednjeg seta naslednika i ukoliko ciljano rešenje nije pronađeno, algoritam se vraća, korak po korak, unazad do prethodnog roditelja i analizira preostale naslednike, čime se obezbeđuje iscrpno pretraživanje mogućih rešenja. Naravno i u ovom slučaju svaki dobijeni naslednik upoređuje se sa definisanim željenim stanjem i ukoliko se isti pronađe, algoritam se prekida.

Brzina dobijanja ciljanog rešenja (ako ono uopšte postoji), zavisi u ovom slučaju od položaja ciljanog rešenja u grafu mogućih rešenja koji se pretražuje, tako da se ne može reći da je pretraživanje po dubini bolje i brže od pretraživanja po širini i obrnuto. Koju od dve navedene metode treba koristiti, može zavisiti od iskustva ljudi koji pišu algoritam, a u suštini se svodi na procenu mesta u grafu mogućih rešenja u kojem se očekuje ciljano rešenje za definisani problem.

4.2.3 Tehnike veštačke inteligencije

Pored prilično uspešne primene optimizacionih metoda u analizi elektroenergetskih sistema, javlja se potreba za primenom stečenih znanja, iskustva i rasuđivanja dispečera, kao i potreba za uvažavanjem specifičnosti pojedinih distributivnih sistema, kako bi rešavanje bilo moguće ili kako bi rešenje bilo kompletno. Za posledicu, primena veštačke inteligencije više nas ili manje udaljava od optimalnog rešenja.

4.2.3.1 Ekspertni sistemi

Ekspertni sistemi zasnovani su na znanju ili pravilima. U osnovi, ekspertni sistemi upotrebljavaju bazu znanja i procedure koje komuniciraju sa bazom znanja, kako bi rešili probleme koji su dovoljno komplikovani da zahtevaju ljudsku ekspertizu kako bi bili rešeni. Glavne prednosti ekspertnih sistema jesu jasna definisanost, jednostavna prenosivost i prilagodljivost, kao i jednostavnost pravljenja prateće dokumentacije. Najveći problem je to što su bazirani samo na iskustvima koja su se već dogodila pod određenim okolnostima, te se na slične slučajeve mogu i primenjivati. S pojavom nekih novih problema, u smislu samih događaja, kao i novih okolnosti pod kojima su se već definisani događaji dogodili, ekspertni sistemi nailaze na teškoće prilikom rešavanja problema. Aplikacije bazirane na ekspertnim sistemima jako zavise od lokalnog iskustva inkorporiranog u bazu podataka, što je jedan od dodatnih razloga zbog kojeg ekspertni sistemi nisu našli širu primenu elektroenergetskim sistemima.

4.2.3.2 Veštačka neuralna mreža

Početak veštački neuralnih mreža datira neposredno posle Drugog svetskog rata, kada je prezentovan algoritam koji je demonstrirao način na koji neuralne mreže mogu uvežbavati učenje. Veštačke neuralne mreže uglavnom su podeljene na osnovu arhitekture (broj slojeva), topologije (dijagram povezivanja, kretanje napred ili povratna metoda) i metodologija učenja. Većina algoritama zasnovanih na veštačkim neuralnim mrežama koji se koriste u elektroenergetskim sistemima, višeslojna je mreža sa metodom kretanja unapred. Glavne prednosti neuralnih mreža jesu brzina, mogućnost učenja, prilagodljivost prema podacima, robustnost i povoljnost upotrebe kod nelinearnih problema. Iako su potrebni značajni računarski resursi u periodu

treninga algoritma, rezultati mogu biti vrlo brzo dobijeni kada je trening algoritma završen. Glavne negativne osobine veštačkih neuralnih mreža jesu velika dimenzionalnost problema, izbor optimalne konfiguracije, izbor metode treniranja, rezultat dobijen veštačkim neuralnim mrežama ne može se diskutovati, kao i činjenica da će se rezultat uvek dobiti, čak i ako ulazni podaci nemaju nikakvog smisla.

4.2.3.3 Fazi sistemi

U poređenju sa svetom matematike, gde su veličine uvek tačno određene (recimo temperatura vazduha je 20°C), u stvarnom svetu se iz više razloga ne mogu tačno definisati. Ako se oslonimo na svet matematike, temperature od recimo 19,9°C ili 20,1°C potpuno odstupaju od definisane temperature i kao takve se tretiraju kao potpuno netačne. To je sasvim dovoljno da se neki matematički proračun zaustavi sa informacijom da je proračun netačan ili nije moguć. S druge strane, u stvarnom svetu navedena odstupanja od definisane temperature sasvim su prihvatljiva, s tim što će jezički biti interpretirana kao temperatura vazduha je oko 20°C.

Fazi logika je zapravo nastala iz težnje da se upravo modeluju veličine iz realnog života, tako što se striktna ograničenja u modelima elektroenergetskih sistema omekšaju. Na ovaj je način moguće modelovati veličine (recimo opterećenja u distributivnoj mreži) i ako se nemaju precizni podaci o opterećenjima ili dozvoliti narušavanje postojećih ograničenja, čime se daje šansa algoritmu da dođe do prihvatljivog optimalnog rešenja. Važno je napomenuti da fazi logika u kombinaciji sa drugim tehnikama optimizacije (recimo u kombinaciji sa evolutivnim algoritmima), daje sasvim zadovoljavajuće rezultate u smislu unapređenja performansi optimizacionih tehnika sa kojima se kombinuje. Takođe, ugradnjom fazi logike u odgovarajuće algoritme, može se omogućiti olakšana upotreba algoritama i od strane ljudi koji nisu eksperti. Fazi logika se može koristiti kao opšta metodologija za ugradnju znanja i iskustva u proces odlučivanja.

4.2.3.4 Heurističke Pristup

Heuristički pristup za rešavanje obnavljanja pogona distributivnih sistema, praktičan je i zasniva se na poznavanju distributivnog sistema koji se razmatra. U ovom

pristupu se, takođe, koriste proceduralni programski jezici za pisanje numeričkih algoritama. Ovi algoritmi su razvijeni na osnovu poznavanja prirode distributivnog sistema, tzv. heuristike (radijalnost, pogonsko iskustvo, poznavanje koncepta zaštite, mogućnost višestrukog alternativnog napajanja potrošača i slično). Na ovaj način se dimenzionalnost rešavanja problema obnavljanja pogona distributivnih sistema svodi na razumnu meru, čime se postiže znatno umanjena potreba za računarskim vremenom. Heuristika može da se koristi u kombinaciji sa nekom od optimizacionih metoda, *fazi* logikom, proračunom tokova snaga i slično. Kako se ovaj pristup pokazao kao veoma efikasan, u stručnoj literaturi mu je poklonjeno dosta prostora. Nedostatak ovog pristupa jeste to što se kao rezultat ne dobija egzaktni optimum, ali to ne garantuje ni optimizacioni pristup.

4.2.3.4.1 *Pretraživanje po najboljem prvom rešenju (eng. best-first search)*

U poređenju sa pretraživanjem po širini i pretraživanjem po dubini, pretraživanje po najboljem prvom rešenju ne predstavlja iscrpnu metodu pretraživanja. Upoređivanjem dobijenih stanja sa ciljanim stanjem, vrši se procena kvaliteta dobijenih naslednika. Određivanjem kvaliteta naslednika moguće je vršiti selekciju naslednika, što omogućuje izvršavanje selektivnog, a ne iscrpnog pretraživanja. Ideja selektivnog pretraživanja jeste ubrzavanje procesa pronalaženja ciljanog stanja.

Upoređivanjem dobijenih naslednika, uloga roditelja dodeljuje se nasledniku koji je najbliži ciljanom stanju. Pretraživanje se nastavlja istom logikom do trenutka kada se dođe do ciljanog stanja ili se zaključi da nema rešenja.

Slično pretraživanju po najboljem prvom rešenju, moguće je vršiti takozvano penjanje uz brdo pretraživanje (eng. *hill-climbing search*), pri čemu se naslednici upoređuju sa roditeljem. Nasledniku se dodeljuje uloga roditelja, samo ukoliko je naslednik bliži ciljanom rešenju u poređenju sa roditeljem.

Pored navedenih načina pretraživanja koji su često upotrebljavani u ranoj fazi istraživanja algoritama za nalaženje rešenja obnavljanja pogona distributivnih sistema, u literaturi skorijeg datuma u upotrebi su i savremene heurističke metode. Savremene heurističke metode omogućile su olakšano rešavanje mnogih optimizacionih

problema, uključujući i optimizacione probleme za koje ranije nije bilo moguće naći rešenje klasičnim optimizacionim metodama. Zahvaljujući primeni savremenih heurističkih metoda, obezbeđeno je skraćenje vremena pronalaženja rešenja i povećana je robustnost kod savremenih algoritama.

4.2.3.4.2 Evolucioni proračuni

Evolutivni proces je, u suštini, optimizacioni proces zasnovan na velikom broju jedinki. Simulacijom evolutivnog procesa na računarima, dobija se stohastični optimizacioni proces koji vrlo često, prilikom simulacije realnog problema, daje bolje rezultate od klasičnih optimizacionih tehnika.

4.2.3.4.2.1 Genetski algoritam

Genetski algoritam je algoritam za pretraživanje koji je zasnovan na pretpostavkama prirodne selekcije i genetike. Osobine genetskog algoritma razlikuju se od drugih heurističkih algoritama po više osnova. Prvo, algoritam pretražuje paralelno više putanja, što smanjuje mogućnost da dobijeno rešenje predstavlja lokalni minimum. Zatim, genetski algoritam radi sa kodovima parametara, a ne sa samim parametrima. Kodirani parametri pomažu prilikom razvijanja tekućeg stanja u sledeće stanje, uz minimalno angažovanje računarskih kapaciteta. Zatim, genetski algoritam procenjuje, umesto optimizacione funkcije, sposobnost svakog lanca da vodi svoje pretraživanje. Genetski algoritam jedino mora da proceni ciljanu funkciju, kako bi se pretraživanje nesmetano odvijalo tako da nema potrebe za dodatnim proračunima ili za drugim lokalnim podacima. Na kraju, genetski algoritmi su tako koncipirani da uvek pretražuju prostor gde je verovatnoća za poboljšanje dobijenih rešenja velika.

4.2.3.4.2.2 Evoluciona strategija i evoluciono programiranje

Evolutivna strategija je bazirana na realno kodiranim promenljivama, i u izvornom obliku se oslanja na mutaciju kao pretraživački operator i na populaciju veličine jedan. Na osnovu toga se može reći da ima dosta zajedničkih osobina sa genetskim algoritmom. Osnovna zajednička osobina im je da održavaju populaciju mogućeg rešenja i da koriste mehanizme selekcije, kako bi odabrali najbolja rešenja iz populacije. Glavne razlike su takve da evolutivna strategija radi sa vektorima sa decimalnim zarezom, dok genetski algoritam radi sa binarnim lancima, genetski

algoritam se oslanja na rekombinaciju prilikom pretraživanja, nasuprot evolucionoj strategiji koja koristi mutaciju kao dominantni operator i na kraju, evolucionna strategija predstavlja simulaciju evolucije na nivou ponašanja jedne jedinke, naglašavajući vezu u ponašanju jedinke i njenih naslednika, nasuprot genetskom algoritmu koji održava genetsku vezu.

Evoluciono programiranje je stohastička optimizaciona strategija slična genetskom algoritmu, s tom razlikom što evoluciono programiranje naglašava vezu u ponašanju između roditelja i naslednika radije nego što simulira određene genetske operatore, kao što je to u prirodi slučaj. Evoluciono programiranje je slično evolucionoj strategiji, iako su ova dva načina pretraživanja razvijana nezavisno jedan od drugog. Kao u slučaju genetskog algoritma i evolucione strategije, evoluciono programiranje daje dobre rezultate kada do rezultata, uz pomoć drugih optimizacionih tehnika, nije moguće doći. Kombinatorna funkcija i funkcija sa ugrađenim problemima iz realnog života, po pravilu, sadrže više lokalnih optimalnih rešenja, tako da postoji opasnost da dobijeno rešenje zapravo predstavlja lokalni optimum, a ne globalni optimum analiziranog problema. Evoluciono programiranje sasvim uspešno prevazilazi ovakvu vrstu problema.

4.2.3.4.2.3 Diferencijalna evolucija

Diferencijalna evolucija je relativno nova heuristička optimizaciona tehnika koja je bazirana na analizi populacije. Za razliku od standardnih evolucionih algoritama, koji zavise od unapred definisane funkcije raspodele verovatnoće koja je neophodna za proces mutacije, diferencijalna evolucija koristi razlike slučajno izabranih parova ciljanih vektora za proces mutacije. Posledično, razlike slučajno izabranih parova ciljanih vektora prenose topografske informacije u pravcu optimizacionog procesa, što dovodi do ubrzanog rešavanja problema i veće verovatnoće nalaženja globalnog optimuma. Diferencijalna evolucija predstavlja stohastički direktno pretraživački optimizacioni metod i smatra se da je tačan, prihvatljivo brz i robustan optimizacioni metod.

Glavna prednost diferencijalne evolucije jeste jednostavnost i relativno brzo nalaženje globalnog optimuma funkcije, koja ima više lokalnih optimuma. Diferencijalna

evolucija nema jedinstveno ukrštanje, što omogućuje upotrebu vektora naslednika prilikom vođenja optimizacionog procesa. U diferencijalnoj evoluciji mutacija se obavlja aritmetičkom kombinacijom između jedinki za razliku od narušavanja reda kod gena sa malom verovatnoćom, tipičnom za genetski algoritam kao najpopularnijeg predstavnika evolucione tehnike. Druga bitna osobina jeste mogućnost pretraživanja sa decimalnim brojevima, umesto sa binarnim brojevima, kao što je to slučaj u većini evolutivnih tehnika kao što je, na primer, genetski algoritam.

4.2.3.4.2.4 Optimizacija rojenjem čestica

Optimizacija rojenjem čestica predstavlja tehniku koja je slična genetskom algoritmu, ali koja kreće u proračun sa početnom, slučajno izabranom populacijom. Ova tehnika je zasnovana na analogijama dobijenih iz proučavanja rojenja ptica i riba. Za razliku od drugih algoritama, svakom potencijalnom rešenju (koje se naziva čestica) pripisuje se slučajno definisano ubrzanje i kao takvo “ulazi” u prostor koji se pretražuje. Optimizacija rojenjem čestica pokazala se kao vrlo efikasna i jednostavna, a posebno je interesantna zato što se algoritam sastoji iz dva reda računarskog koda.

4.2.3.4.2.5 Kolonija mrava pretraživanje

Algoritam za pretraživanje nazvan kolonija mrava, inspirisan je ponašanjem kolonije mrava u prirodi. Mravi u prirodi pronalaze uvek najkraći mogući put od gnezda do izvora hrane, ne koristeći čulo vida. Uspešno rešavaju i problem pronalaženja novog najkraćeg puta između gnezda i izvora hrane, ukoliko im se na postojećem putu pojavi neka prepreka. Ovakvo ponašanje mrava objašnjava se takozvanim feromonskim tragom koji svaki od mrava ostavlja iza sebe, bez obzira na to kojim se putem kreće. Prirodno, svaki mrav teži da sledi put koji ima veći sadržaj feromona, što navodi na zaključak da je taj put već koristio veći broj mrava i da isti vodi ka željenom cilju.

Algoritam kolonije mrava na zadovoljavajući način obnavlja dobra rešenja, dobro funkcioniše sa razuđenim proračunima koji sprečavaju preranu konvergenciju algoritma i koristi konstruktivnu heuristiku koja omogućuje pronalaženje prihvatljivih rešenja u ranom periodu procesa pretraživanja.

4.2.3.4.2.6 *Tabu pretraživanje*

Tabu pretraživanje zapravo predstavlja gradijentno-spuštajuću metodu sa memorijom. Memorija sadrži određen broj stanja koji je već analiziran, uključujući stanja koja su proglašena za neželjena rešenja. Ovakve informacije su uskladištene u takozvanu Tabu listu. Kritične informacije koje treba uneti u algoritam baziran na tabu pretraživanju, jesu definisanje stanja, oblasti oko tog stanja, kao i dužina tabu liste. Pored ovih osnovnih parametara, potrebno je definisati i još dva dodatna, a to su težnja i unošenje raznolikosti. Težnja se upotrebljava kada su stanja svih suseda jednog tekućeg stanja na tabu listi. Tada se problem prevazilazi izborom novog stanja. Unošenje raznolikosti koristi se kada algoritam divergira. Tada se bira set novih stanja metodom slučajnog izbora.

4.2.3.4.2.7 *Simulirano kaljenje*

U statističkoj mehanici često se koristi proces kaljenja sa ciljem da se sistem opusti do nivoa kada poseduje minimalnu količinu slobodne energije. Prilikom procesa kaljenja, čvrsta materija se zagreva do veoma visokih temperatura, do trenutka kada čvrsta materija pređe u tečnu materiju, a zatim se temperatura lagano spušta. U tečnom stanju čestice materije haotično su raspoređene. U osnovnom stanju čestice su raspoređene u jakoj strukturnoj mreži, tako da je slobodna energija sistema minimalna. Jedini način da telo pređe iz čvrstog u osnovno stanje jeste da je prilikom zagrevanja temperatura dovoljno visoka, a da je vreme hlađenja dovoljno dugo. Na osnovu kaljenja opisanog u statističkoj mehanici, definisano je i simulirano kaljenje za rešavanje komplikovane kombinatorne optimizacije.

Simulirano kaljenje dolazi od analogije procesa fizičkog procesa kaljenja, pri čemu funkcija troškova i rešenje u optimizacionom procesu odgovara funkciji energije i stanja u statističkoj fizici. Da bi se pomoću simuliranog kaljenja došlo do rešenja za velike kombinatorne optimizacione probleme, potrebno je definisati odgovarajuće mehanizme za pravljenje poremećaja, funkcije troškova, prostor za rešenja i raspored hlađenja. Ova tehnika je vrlo značajna kod rešavanja rekonfiguracije velikih distributivnih sistema i prednosti upotrebe ove tehnike su očiglednije i značajnije, ukoliko je i distributivni sistem veći. Funkcije troškova sa glatkom strategijom

omogućavaju simuliranom kaljenju da lakše izbegne zamku lokalnog minimuma i da brže i jednostavnije pronađe rešenje blizu optimalnom rešenju.

4.2.3.4.2.8 Pareto višeciljna optimizacija

U poređenju sa optimizacionim problemima koji imaju jednu ciljnu funkciju i jedinstveno rešenje, rešenje za višeciljne optimizacione probleme sastoji se iz skupa kompromisa koji moraju da postoje između ciljeva. Zadatak višeciljnih optimizacionih problema jeste da generišu takve kompromise. Ispitivanje svih mogućih kompromisa od posebne je važnosti zato što omogućuje operatoru sistema da razume i vrednuje različite izbore koje ima na raspolaganju. Tradicionalno, rešavanje višeciljnih problema svodi se na dovođenje problema na jednu ciljnu funkciju. Rešenje se postiže maksimizacijom ili minimizacijom tako definisane jedne ciljne funkcije, vodeći računa o postavljenim ograničenjima sistema ili samog procesa. Rešenje je predstavljeno jednom jedinstvenom veličinom koja predstavlja kompromisno rešenje svih ciljeva sadržanih u optimizacionom problemu.

Međutim, ovakvo relativno jednostavno rešavanje višeciljnih funkcija, više nije dovoljno za rešavanje problema sa ciljevima koji su po svojoj prirodi oprečni jedni drugima. Ljudi koji rade u inženjeringu sve češće imaju potrebu da znaju sva potrebna optimizaciona rešenja za sve ciljeve istovremeno. Ideja je proistekla iz poslovnog sveta i nazvana je analiza razmene ili kompromisa (eng. *trade-off analysis*). Ovo predstavlja standardni pristup u optimizaciji problema u stvarnom svetu biznisa, menadžmenta i inženjeringa, kada treba predstaviti više međusobno konfliktnih ciljeva.

Način rešavanja obnavljanja pogona, opisan u disertaciji, rešen je heurističkim pristupom koji je zasnovan na modifikovanom Primovom algoritmu. Prilikom iznalaženja rešenja za obnavljanje pogona, koriste se svi raspoloživi kapaciteti distributivnog sistema, uključujući i sredjenaponske sabirnice. Kriterijumska funkcija je minimizacija neisporučene snage, što ujedno predstavlja i primarni cilj proračuna. Sekundarni cilj predloženog načina rešavanja sadržan je u koeficijentima koji se dodeljuju distributivnim linijama. Usvojen sekundarni cilj u disertaciji jeste minimizacija broja prekidačkih akcija. U toku obnavljanja pogona, koriste se svi

raspoloživi resursi, što znači da se pogonska struktura nenapojenog područja anulira pre početka obnavljanja pogona.

4.3 Formulacija problema i modifikacija Primovog algoritma

Osnovni pristup obnavljanju pogona podrazumeva definisanje prekidačkih akcija kojima se obezbeđuje napajanje dela konzuma koji je ostao bez električne energije, nakon detekcije i izolacije kvara. Prilikom obnavljanja pogona distributivnog sistema, osnovni je cilj obezbediti napajanje što je moguće većem broju potrošača. Na ovaj se način troškovi prekida potrošnje smanjuju. Kako su u centru pažnje ovog rada kvarovi koji uzrokuju prekid napajanja električnom energijom većeg broja potrošača (ispadi iz pogona trafostanica, transformatora ili opterećenih deonica), to će primarni cilj prilikom obnavljanja pogona distributivnog sistema biti minimiziranje snage koja treba da se obezbedi potrošačima koji se nalaze u oblasti pogođenoj kvarom. U slučaju težih kvarova, o kojima je ovde reč, realno je očekivati da će izvestan broj potrošača ostati bez napajanja.

U skladu sa ovakvim pristupom, zanemaruje se topološka struktura dela mreže pogođene kvarom (deo mreže koji je ostao bez napajanja posle izolacije elementa koji je u kvaru). Na ovaj način postoji mogućnost da se, prilikom rešavanja problema obnavljanja pogona, iskoriste topološki kapaciteti na najbolji mogući način. Osvrtom na topološku interpretaciju distributivnog sistema opisanu u poglavlju 3, vrednost funkcije prethodnika π za sve elemente koji su ostali bez napajanja posle detekcije i izolacije kvara postavlja se na nulu, čime se i inicira obnavljanje pogona distributivnog sistema. Na osnovu gore rečenog, mreža posmatranog distributivnog sistema biće podeljena na dve oblasti:

- Napojena oblast (deo mreže koji nije pogođen kvarom), čija će topološka struktura ostati nepromenjena pre početka obnavljanja pogona
- Nenapojena oblast (deo mreže koji je pogođen kvarom), čija će se topološka struktura pre početka obnavljanja pogona anulirati

4.3.1 Formulacija problema

Sada se može reći da je primarni cilj obnavljanja pogona prihvatiti opterećenje nenapojene oblasti, nastale izolovanjem elementa u kvaru. Pomenuti element se dodaje skupu nerasploživih elemenata $((\bar{\varepsilon}_1, \bar{\varepsilon}_2) \in \bar{E})$ i neće se uzimati u razmatranje prilikom proračunavanja za obnavljanje pogona. Ovaj cilj se ostvaruje određivanjem novih vrednosti funkcije prethodnika u nenapojenoj oblasti, tako da ukupna ispalna snaga u nenapojenoj oblasti u konačnom rešenju bude minimalna:

$$\min \sum_{\pi(x)=0} P_p(x) \quad (4.1)$$

uz ograničenja

$$I_b(y) \leq I_b^o(y), \quad \pi(y) \neq 0 \quad (4.2)$$

$$\Delta V(y) \leq \Delta V^o, \quad \pi(y) \neq 0 \quad (4.3)$$

$$y \leq r, \quad \pi(y) \neq 0 \quad (4.4)$$

$$\pi(\bar{\varepsilon}_1) \neq \bar{\varepsilon}_2 \quad \text{i} \quad \pi(\bar{\varepsilon}_2) \neq \bar{\varepsilon}_1 \quad \forall (\bar{\varepsilon}_1, \bar{\varepsilon}_2) \in \bar{E} \quad (4.5)$$

gde je

$P_p(x)$ - snaga potrošača x ,

$I_b(y)$ - opterećenje grane y ,

$\Delta V(y)$ - pad napona od sabirnica srednjeg napona do potrošača y

$I_b^o(y)$ - maksimalno dozvoljeno opterećenje grane y

ΔV^o - maksimalno dozvoljeni pad napona

Ograničenje (4.2) ima za zadatak da spreči preopterećenje deonice u distributivnom sistemu prilikom proračuna kojim se pronalazi rešenje za obnavljanje pogona.

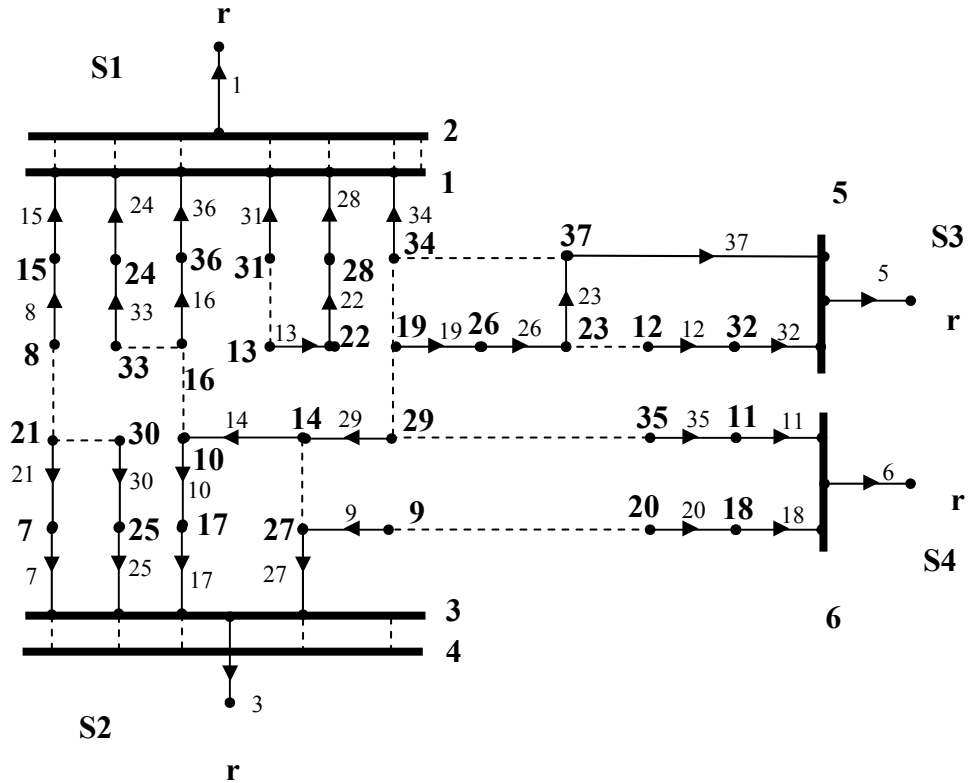
Distributivni sistemi su uglavnom projektovani i izgrađivani kao petljasti, pri čemu je pogonska struktura radijalna. Prilikom izgradnje distributivnih mreža, uvek se težilo tipizaciji ugrađivane opreme, tako da su se uglavnom koristili kablovi istih ili vrlo sličnih kapaciteta za prenos električne energije. Ova činjenica nameće zaključak da će do eventualnih preopterećenja deonica u distributivnom sistemu najpre doći kod glavnih izvoda koji su povezani na sredjenaponske sabirnice (izvoda). Drugim rečima, kontrolom ograničenja (4.2) samo za izvode distributivne mreže, sa velikom verovatnoćom se može reći da se kontroliše preopterećenost svih deonica distributivnog sistema. Naravno, mora se voditi računa i o opterećenosti transformatora, na koje se prethodni zaključak ne odnosi.

Relacija (4.3) predstavlja ograničenje po pitanju pada napona. Ovo ograničenje je definisano definisanjem maksimalne dozvoljene vrednosti pada napona. Važno je napomenuti da u gradskim (urbanim) distributivnim sistemima, gde je distributivna mreža izgrađena kablovskim vodovima, padovi napona nemaju bitnijeg značaja u proračunima. Po pravilu, daleko važniju ulogu imaju strujna ograničenja (4.2). U ogromnom broju slučajeva, strujna ograničenja (4.2) biće pre narušena od naponskih ograničenja (4.3).

Izrazom (4.4) se zahteva da, prilikom traženja rešenja za obnavljanje pogona distributivnog sistema, pogonska topološka struktura ostane radijalna. U algoritmu se ne vrši provera ovog ograničenja, jer je predloženi način rešavanja obnavljanja pogona tako napisan da je trenutna pogonska topološka struktura mreže uvek radijalna. Rešavanje potproblema radijalnosti na ovaj način nije bilo teško postići, s obzirom na činjenicu da se prihvat opterećenja vrši prihvatanjem samo jednog čvora za već postojeću radijalnu strukturu. Relacija \leq u ovom izrazu odnosi se na relaciju delimičnog uređenja u skupu čvorova grafa definisanog funkcijom prethodnika π . Takođe je značajno napomenuti da se radijalna struktura mora održati i prilikom transfera opterećenja u napojenoj oblasti distributivnog sistema, što je postignuto time da se svako uključanje spojnice (grane kostabla) mora ispratiti isključenjem jedne grane koja formira petlju. I prilikom prihvata opterećenja i prilikom transfera opterećenja, radijalnost pogonske topološke strukture distributivnog sistema očuvana je u svakom koraku proračuna.

Relacijom (4.5) je sprečen ulazak u proračun grane koja je pogođena kvarom.

Prezentacija predloženog postupka i razvijenog algoritma biće podržana odgovarajućim primerom hipotetičke distributivne mreže sa četiri izvorna postrojenja VN/SN (S1, S2, S3 i S4 na slici 4.2) koja napaja 31 potrošački transformator SN/NN.



Slika 4.2 Pogonska struktura distributivne mreže u normalnom režimu rada neposredno pre kvara.

U skladu sa modelom topološke interpretacije distributivnog sistema iz poglavlja 3 ovog rada, čvorovi koji pripadaju sabirnicama srednjeg napona jesu $N_i = \{1,2,3,4,5,6\}$, uz napomenu da su u postrojenjima S1 i S3 dvostruki sabirnički sistemi. Prema prikazanom uklopnom stanju, sabirnice 1, 3, 5 i 6 su pod naponom (opterećene), dok su sabirnice 2 i 4 bez napona i predstavljaju pomoćne ili druge glavne sabirnice. Znači, čvorovi koji predstavljaju pomoćne ili druge glavne sabirnice, ne pripadaju pogonskom stablu distributivnog sistema u normalnom režimu rada.

Svi ostali numerisani čvorovi predstavljaju potrošačke čvorove koji pripadaju skupu N_p .

U tabeli 4.1 date su vrednosti funkcija prethodnika π koje odgovaraju strukturi sa slike 4.2.

Tabela 4.1 *Tabelarni prikaz pogonske strukture mreže sa slike 4.2*

x	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\pi(x)$	r	0	r	0	r	r	3	15	27	17	6	32

x	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$\pi(x)$	22	10	1	36	3	6	26	18	7	28	37	1

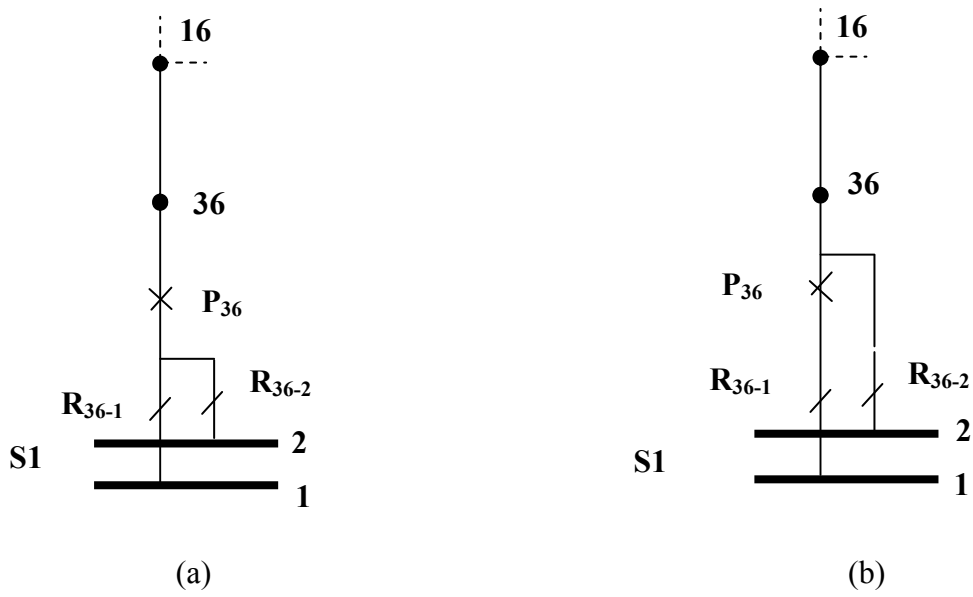
x	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
$\pi(x)$	3	23	3	1	14	25	1	5	24	1	11	1

x	37
$\pi(x)$	5

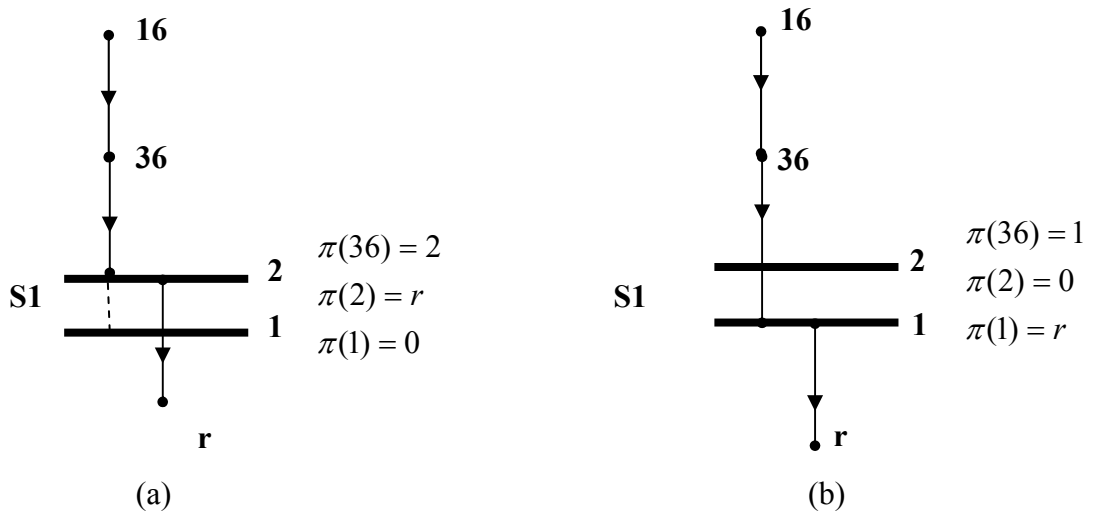
Postrojenja sa pomoćnim sistemom sabirnica (slika 4.3 (b)) ili sa drugim glavnim sabirnicama (slika 4.3 (a)) mogu podjednako da učestvuju u nalaženju rešenja za obnavljanje pogona distributivnih sistema. Kapaciteti i pomoćnih i drugih glavnih sabirnica znatno su iznad kapaciteta izvoda, tako da ne postoji opasnost od strujnog preopterećenja pomenutih sabirnica. Iako postoji razlika prilikom manipulacija između prvih – drugih glavnih sabirnica (slika 4.3 (a)) i glavnih – pomoćnih sabirnica (slika 4.3 (b)), krajnji rezultat tih manipulacija je, iz aspekta promene topološke strukture distributivnog sistema, isti. Normalno, uz pretpostavku da pomenutim manipulacijama upravlja adekvatno obučeno osoblje i da je prekidačka oprema ispravna, u praksi se ovakve promene pogonske topološke strukture sprovode za

kratko vreme, iako se takav utisak ne stiće na prvi pogled. Iz tih razloga se na slici 4.2 ne naglašava da li postrojenje ima pomoćne ili druge glavne sabirnice.

Transformatori u postrojenjima mogu biti direktno priključeni na jedne sabirnice, tako da je pogonska topološka interpretacija priključenja izvoda na sabirnice, shodno tome, data na slici 4.4 (a) i slici 4.4 (b).



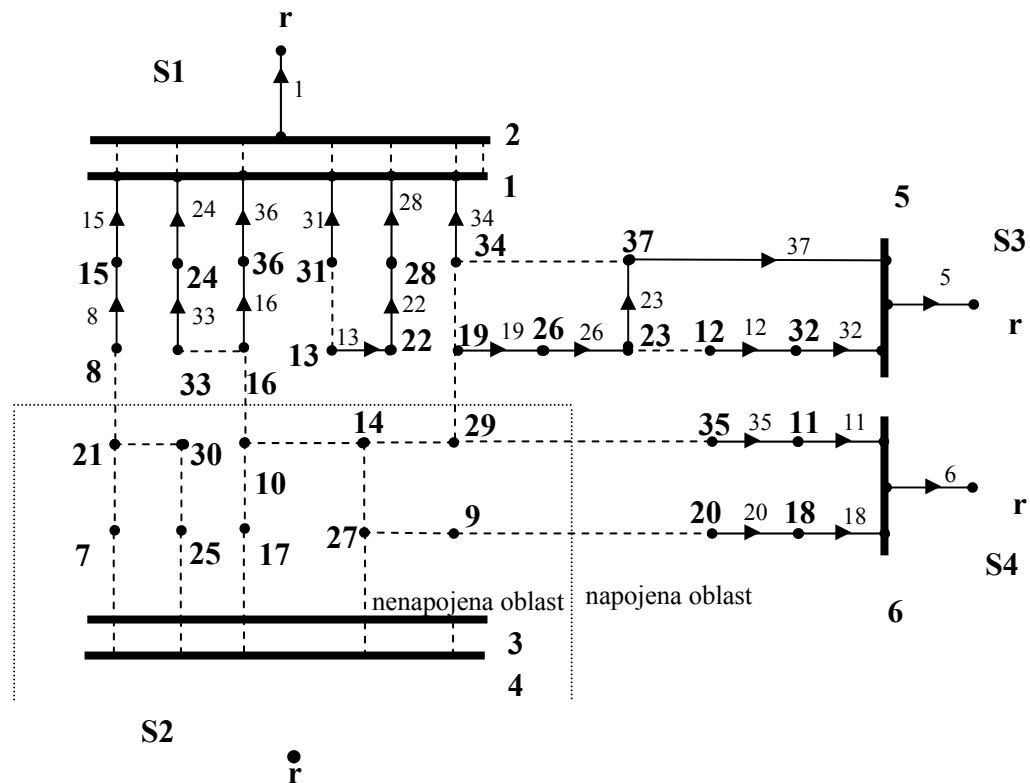
Slika 4.3 Raspored dela opreme za postrojenje S1 sa slike 4.1 za slučaj sabirnica sa dve glavne sabirnice (a) i jednom glavnom i jednom pomoćnom sabirnicom (b)



Slika 4.4 Topološka interpretacija napajanja izvoda 36 za slučaj kada se napaja sa sabirnica 2 (a) i sabirnica 1 (b)

Na slici 4.5 prikazana je topološka struktura hipotetičke distributivne mreže sa slike 4.2, za slučaj kvara na transformatoru u postrojenju S3, koji napaja sabirnice 3 i 4. Navedeni kvar se simulira, u skladu sa topološkom interpretacijom, kvarom na grani broj 3. U stvarnosti bi to značilo kvar na visokonaponskom delu postrojenja ili kvar, kao što je već rečeno, na samom transformatoru.

Ovakvom simulacijom kvara odvaja se čvor r i sabirnice posmatranog postrojenja, što bi u praksi značilo da je transformator pogođen kvarom odvojen od srednjenaponskih sabirnica. Sabirnice ostaju u nenapojenoj oblasti i tretiraju se kao potrošački čvorovi, sa potrošnjom jednakom nuli. Grane 3 i 4 tretiraju se kao nerasploživne ($\bar{E} = \{(r,3), (r,4)\}$). Funkcija prethodnika π svih potrošačkih čvorova koji pripadaju području postrojenja u kome se desio kvar, dobijaju vrednost 0. Tabelarni prikaz hipotetičke pogonske strukture neposredno posle lociranja i izolacije gore opisanog kvara na mreži datoj na slici 4.2, a koja odgovara slici 4.5, prikazana je u tabeli 4.2



Slika 4.5 Inicijalna struktura hipotetičke distributivne mreže neposredno posle kvara transformatora koji napaja sabirnice 3 i 4

Tabela 4.2 *Tabelarni prikaz pogonske strukture mreže sa slike 4.5*

x	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\pi(x)$	r	0	0	0	r	r	0	15	0	0	6	32

x	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$\pi(x)$	22	0	1	36	3	6	26	18	0	28	37	1

x	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
$\pi(x)$	0	23	0	1	14	0	1	5	24	1	11	1

x	37
$\pi(x)$	5

4.3.2 Primov algoritam

Ideja za način rešavanja obnavljanja pogona distributivnog sistema, nastala je analizom Primovog algoritma za nalaženje minimalnog drveta, a za koji se može reći da je specijalni oblik Dijkstrinovog algoritma za nalaženje najkraćih puteva [145]. Kako bi kasnije izlaganje o načinu rešavanja obnavljanja pogona distributivnog sistema bilo razumljivije, pomenuta ideja će biti razrađena iz čisto matematičkog aspekta, što će omogućiti da analogijama koje će posle uslediti sama ideja bude razumljivija.

Minimalno drvo se generiše tako što se kreće od jednog proizvoljnog čvora koji će predstavljati koren drveta i dodavanjem jednog po jednog čvora. Za čvorove posmatranog grafa može se reći da pripadaju:

- skupu U , koji se sastoji od čvorova već dodatih drvetu ili
- skupu $V \setminus U$, koji se sastoji od čvorova koji nisu u drvetu

Na početku formiranja minimalnog drveta, skup U se sastoji samo od jednog čvora koji zapravo predstavlja korena drveta. U svakoj iteraciji se bira najkraća grana čiji je jedan kraj (čvor u) u skupu U , a drugi (čvor v) u skupu $V \setminus U$. Čvor v se dodaje skupu U , a grana (u, v) se dodaje drvetu (E_π) .

Izbor najkraće grane sa zadanim svojstvima jeste ekvivalentan izboru čvora iz skupa $V \setminus U$ koji je najbliži skupu čvorova U . Rastojanje između čvora i skupa čvorova može se definisati na prirodan način, kao dužina najkraće grane čiji je jedan kraj upravo taj čvor, a drugi kraj je u skupu.

Kako bi smanjili računarsko vreme, nakon dodavanja novog čvora (u) u skup U , za sve čvorove iz skupa $V \setminus U$ koriguje se najkraće rastojanje do skupa U . Drugim rečima, sledi:

Neka su

$$\{g_1, g_2, g_3, \dots, g_n\} \in k, \quad (4.6)$$

gde su

g_1, g_2, g_3, \dots - grane između skupa U i skupa $V \setminus U$

k - skup svih (n) grana koje povezuju skup U i skup $V \setminus U$

Dodavanjem čvora v u skup U , skupu k dodaju se samo grane koje povezuju novoformirani skup U i skup $V \setminus U$, a koje se ujedno sustiču u čvor v , naravno ukoliko ih uopšte ima. Iz skupa k se u tom slučaju isključuje grana koja povezuje novopriključeni čvor u sa skupom U . Sledeći čvor koji se dodaje skupu U , opet se bira nalaženjem grane sa najmanjom dužinom iz skupa k .

Gore opisani način nalaženja minimalnog drveta može se ilustrovati posmatranjem slike 4.6. Radi lakšeg razumevanja biće opisana svaka iteracija algoritma, sa ključnim koracima unutar svake iteracije.

4.3.2.1 Početni uslovi ((a) na slici 4.6)

$$\{1\} \in U, \quad (4.7)$$

$$\{2,3,4,5,6,7,8,9\} \in V \setminus U, \quad (4.8)$$

$$\{4,8\} \in k, \quad (4.9)$$

Gde su

- 1 - čvor koji pripada skupu U . Skup U sadrži čvorove koji pripadaju drvetu. Ovaj čvor ujedno predstavlja koren drveta I .
- 2,3,4,5,6,7,8,9 - čvorovi koji pripadaju skupu $V \setminus U$. Skup $V \setminus U$ sadrži čvorove koji ne pripadaju drvetu.
- 4,8 - grane (koeficijenti) između skupa U i skupa $V \setminus U$.

4.3.2.2 Prva iteracija ((b) na slici 4.6)

Korak 1: Izbor grane sa minimalnim koeficijentom.

$$\min\{k\} = \min\{4,8\} = 4; \text{ čvor } u \in U = 1 \text{ i čvor } v \in V \setminus U = 2$$

Korak 2: Ažuriranje skupa U dodavanjem čvora v koji pripada izabranoj grani.

$$\{1,2\} \in U,$$

Korak 3: Ažuriranje skupa $V \setminus U$ brisanjem čvora v koji pripada izabranoj grani.

$$\{3,4,5,6,7,8,9\} \in V \setminus U,$$

Korak 4: Ažuriranje skupa k između ažuriranih skupova U i $V \setminus U$.

$$\{8,11,8\} \in k,$$

Ažurirani skupovi iz koraka 2, 3 i 4 predstavljaju početne uslove za sledeću iteraciju.

4.3.2.3 Druga iteracija ((c) na slici 4.6)

Korak 1: Izbor grane sa minimalnim koeficijentom.

$$\min\{k\} = \min\{8,11,8\} = 8; \text{ čvor } u \in U = 2 \text{ i čvor } v \in V \setminus U = 3$$

Korak 2: Ažuriranje skupa U dodavanjem čvora v koji pripada izabranoj grani.

$$\{1,2,3\} \in U,$$

Korak 3: Ažuriranje skupa $V \setminus U$ brisanjem čvora v koji pripada izabranoj grani.

$$\{4,5,6,7,8,9\} \in V \setminus U,$$

Korak 4: Ažuriranje skupa k između ažuriranih skupova U i $V \setminus U$.

$$\{2,4,7,8,11\} \in k,$$

Ažurirani skupovi iz koraka 2, 3 i 4 predstavljaju početne uslove za sledeću iteraciju.

4.3.2.4 Treća iteracija ((d) na slici 4.6)

Korak 1: Izbor grane sa minimalnim koeficijentom.

$$\min\{k\} = \min\{2,4,7,8,11\} = 2; \text{ čvor } u \in U = 3 \text{ i čvor } v \in V \setminus U = 9$$

Korak 2: Ažuriranje skupa U dodavanjem čvora v koji pripada izabranoj grani.

$$\{1,2,3,9\} \in U,$$

Korak 3: Ažuriranje skupa $V \setminus U$ brisanjem čvora v koji pripada izabranoj grani.

$$\{4,5,6,7,8\} \in V \setminus U,$$

Korak 4: Ažuriranje skupa k između ažuriranih skupova U i $V \setminus U$.

$$\{4,6,7,7,8,11\} \in k,$$

Ažurirani skupovi iz koraka 2, 3 i 4 predstavljaju početne uslove za sledeću iteraciju.

4.3.2.5 Četvrta iteracija ((e) na slici 4.6)

Korak 1: Izbor grane sa minimalnim koeficijentom.

$$\min\{k\} = \min\{4,6,7,7,8,11\} = 4; \text{ čvor } u \in U = 3 \text{ i čvor } v \in V \setminus U = 6$$

Korak 2: Ažuriranje skupa U dodavanjem čvora v koji pripada izabranoj grani.

$$\{1,2,3,6,9\} \in U ,$$

Korak 3: Ažuriranje skupa $V \setminus U$ brisanjem čvora v koji pripada izabranoj grani.

$$\{4,5,7,8\} \in V \setminus U ,$$

Korak 4: Ažuriranje skupa k između ažuriranih skupova U i $V \setminus U$.

$$\{2,6,7,7,8,10,11,14\} \in k ,$$

Ažurirani skupovi iz koraka 2, 3 i 4 predstavljaju početne uslove za sledeću iteraciju.

4.3.2.6 Peta iteracija ((f) na slici 4.6)

Korak 1: Izbor grane sa minimalnim koeficijentom.

$$\min\{k\} = \min\{2,6,7,7,8,10,11,14\} = 2 ; \text{ čvor } u \in U = 6 \text{ i čvor } v \in V \setminus U = 7$$

Korak 2: Ažuriranje skupa U dodavanjem čvora v koji pripada izabranoj grani.

$$\{1,2,3,6,7,9\} \in U ,$$

Korak 3: Ažuriranje skupa $V \setminus U$ brisanjem čvora v koji pripada izabranoj grani.

$$\{4,5,8\} \in V \setminus U ,$$

Korak 4: Ažuriranje skupa k između ažuriranih skupova U i $V \setminus U$.

$$\{1,7,7,8,10,11,14\} \in k ,$$

Ažurirani skupovi iz koraka 2, 3 i 4 predstavljaju početne uslove za sledeću iteraciju.

4.3.2.7 Šesta iteracija ((g) na slici 4.6)

Korak 1: Izbor grane sa minimalnim koeficijentom.

$$\min\{k\} = \min\{1,7,7,8,10,11,14\} = 1 ; \text{ čvor } u \in U = 7 \text{ i čvor } v \in V \setminus U = 8$$

Korak 2: Ažuriranje skupa U dodavanjem čvora v koji pripada izabranoj grani.

$$\{1,2,3,6,7,8,9\} \in U ,$$

Korak 3: Ažuriranje skupa $V \setminus U$ brisanjem čvora v koji pripada izabranoj grani.

$$\{4,5\} \in V \setminus U,$$

Korak 4: Ažuriranje skupa k između ažuriranih skupova U i $V \setminus U$.

$$\{7,10,14\} \in k,$$

Ažurirani skupovi iz koraka 2, 3 i 4 predstavljaju početne uslove za sledeću iteraciju.

4.3.2.8 Sedma iteracija ((h) na slici 4.6)

Korak 1: Izbor grane sa minimalnim koeficijentom.

$$\min\{k\} = \min\{7,10,14\} = 7; \text{ čvor } u \in U = 3 \text{ i čvor } v \in V \setminus U = 4$$

Korak 2: Ažuriranje skupa U dodavanjem čvora v koji pripada izabranoj grani.

$$\{1,2,3,4,6,7,8,9\} \in U,$$

Korak 3: Ažuriranje skupa $V \setminus U$ brisanjem čvora v koji pripada izabranoj grani.

$$\{5\} \in V \setminus U,$$

Korak 4: Ažuriranje skupa k između ažuriranih skupova U i $V \setminus U$.

$$\{9,10,14\} \in k,$$

Ažurirani skupovi iz koraka 2, 3 i 4 predstavljaju početne uslove za sledeću iteraciju.

4.3.2.9 Osmo iteracija ((i) na slici 4.6)

Korak 1: Izbor grane sa minimalnim koeficijentom.

$$\min\{k\} = \min\{9,10,14\} = 9; \text{ čvor } u \in U = 4 \text{ i čvor } v \in V \setminus U = 5$$

Korak 2: Ažuriranje skupa U dodavanjem čvora v koji pripada izabranoj grani.

$$\{1,2,3,4,5,6,7,8,9\} \in U,$$

Korak 3: Ažuriranje skupa $V \setminus U$ brisanjem čvora v koji pripada izabranoj grani.

$$\{ \} \in V \setminus U,$$

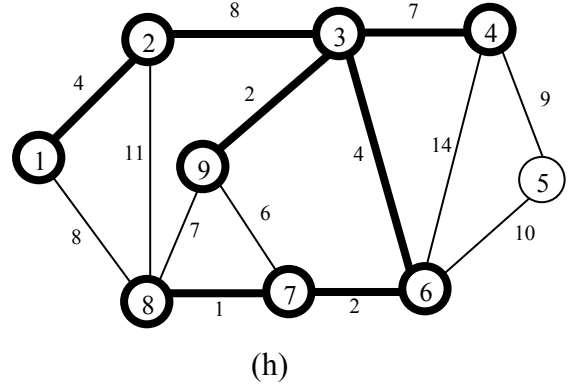
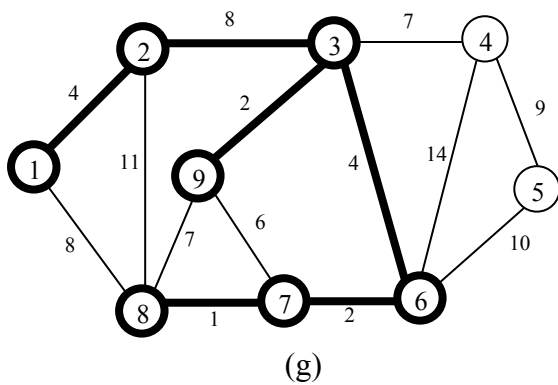
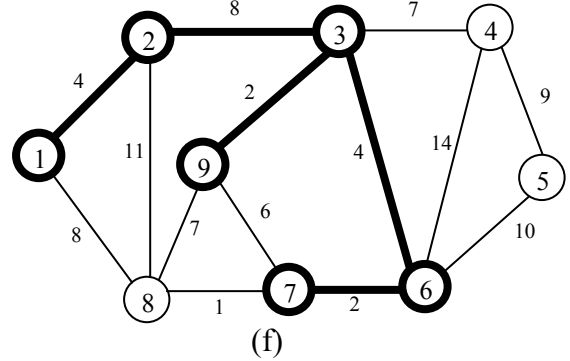
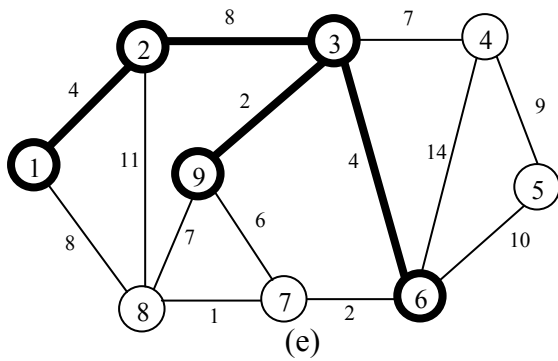
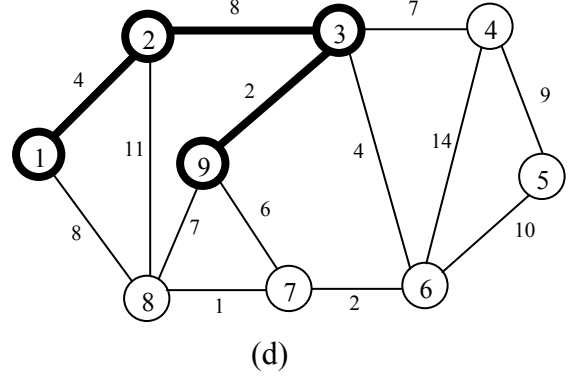
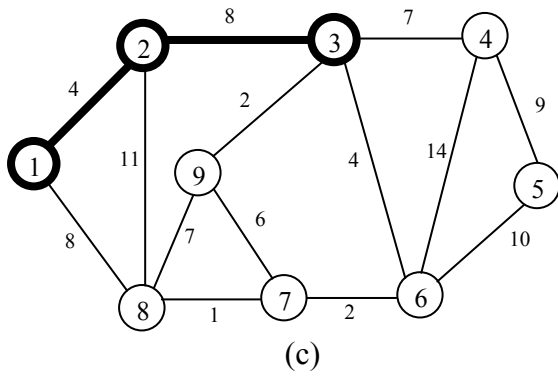
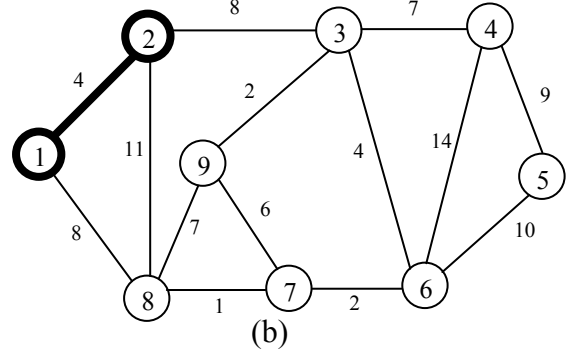
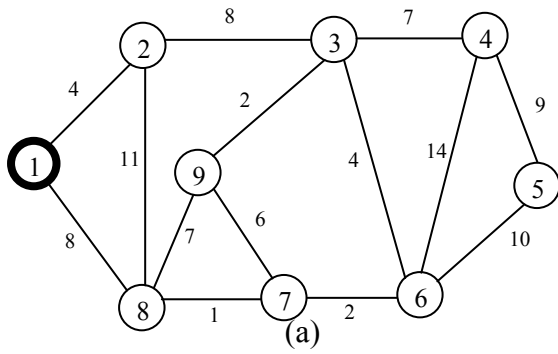
Korak 4: Ažuriranje skupa k između ažuriranih skupova U i $V \setminus U$.

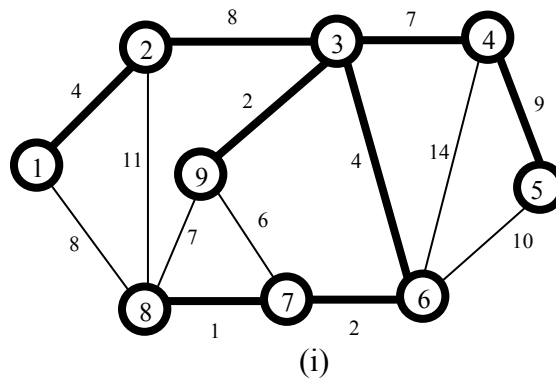
$$\{ \} \in k,$$

Kako je skup k kao i skup $V \setminus U$ prazan skup, iterativna procedura se zaustavlja. Minimalno drvo je na ovaj način definisano.

Iz prikazanog primera može se primetiti da se pojavljuju grane iste dužine, tako da ukoliko bi one imale najmanju vrednost u skupu k , to bi praktično moglo uticati na tok formiranja minimalnog drveta. Ovaj problem se može izbeći promišljenijim dodeljivanjem vrednosti dužina.

Kako se u svakom prolazu u skup U dodaje samo jedan čvor, to sledi da je potrebna $|V| - 1$ iteracija, kako bi svi čvorovi bili u sastavu dobijenog minimalnog drveta.





Slika 4.6 **Određivanje minimalnog drveta**

U ilustrovanom primeru sa slike 4.6 krenulo se od pretpostavke da postoji samo jedan inicijalni čvor, koji predstavlja jedan koren drveta, samim tim i jedno drvo. Može se reći da drvo I na kraju određivanja minimalnog drveta sadrži sve čvorove posmatranog grafa:

$$\{1,2,3,4,5,6,7,8,9\} \in I, \quad (4.10)$$

$$I = U \quad (4.11)$$

4.3.3 Modifikovani Primov algoritam

Ako se za isti graf određuju tri drveta po gore opisanom principu, mora se za svaku iteraciju odrediti drvo koje će vršiti prihvatanje čvorova iz skupa $V \setminus U$. Ovaj redosled može biti unapred određen (kao na primeru sa slike 4.7) ili na prvom koraku svake iteracije, kao što je rađeno prilikom pisanja algoritma za obnavljanje pogona distributivnog sistema. Znači, svaka iteracija mora imati glavno drvo koje će izvršiti prihvatanje čvorova iz skupa $V \setminus U$, dok drvo koje nije izabrano, ne učestvuje u prihvatanju opterećenja nekog od nenapojenih čvorova u tekućoj iteraciji.

Ilustracija modifikovanog Primovog algoritma može se prikazati na istom grafu koji je prikazan na slici 4.6, s tom razlikom što će postojati tri inicijalna čvorova i to čvorovi

1, 5 i 7 koji predstavljaju ujedno korene drvetu *I*, *II* i *III*, respektivno. Za ovako definisane početne uslove i za unapred zadati raspored glavnog drvetu za svaku iteraciju (neka je raspored *II, III, I, I, II* i *I*), dobiće se šuma koja je prikazana na slici 4.7.

Nalaženja šume može se opisati posmatranjem slike 4.7. Radi lakšeg razumevanja, biće opisana svaka iteracija algoritma sa ključnim koracima unutar svake iteracije.

4.3.3.1 Početni uslovi ((a) na slici 4.7)

$$\{1\} \in I, \quad (4.12)$$

$$\{5\} \in II, \quad (4.13)$$

$$\{7\} \in III, \quad (4.14)$$

$$\{I, II, III\} = \{1, 5, 7\} \in U, \quad (4.15)$$

$$\{2, 3, 4, 6, 8, 9\} \in V \setminus U, \quad (4.16)$$

$$\{4, 8\} \in k_I, \quad (4.17)$$

$$\{9, 10\} \in k_{II}, \quad (4.18)$$

$$\{1, 2, 6\} \in k_{III}, \quad (4.19)$$

Gde su

- 1,5,7 - čvorovi koji pripadaju skupu *U*. Skup *U* sadrži čvorove koji pripadaju nekom drvetu. Ovi čvorovi ujedno predstavljaju korene drvetu *I*, *II* i *III*, respektivno.
- 2,3,4,6,8,9 - čvorovi koji pripadaju skupu $V \setminus U$. Skup $V \setminus U$ sadrži čvorove koji ne pripadaju drvetu.
- 4,8 - grane (koeficijenti) između skupa *I* i skupa $V \setminus U$.
- 9,10 - grane (koeficijenti) između skupa *II* i skupa $V \setminus U$.
- 1,2,6 - grane (koeficijenti) između skupa *III* i skupa $V \setminus U$.

4.3.3.2 Prva iteracija ((b) na slici 4.7)

Korak 1: Izbor glavnog drveta.

Izabrano drvo je **II** sa unapred zadatog rasporeda (II, III, I, I, II i I)

Korak 2: Izbor grane sa minimalnim koeficijentom.

$\min\{k_{II}\} = \min\{9,10\} = 9$; čvor $u \in II = 5$ i čvor $v \in V \setminus U = 4$

Korak 3: Ažuriranje skupa glavnog drveta **II** dodavanjem čvora v koji pripada izabranoj grani.

$\{1\} \in I$,

$\{4,5\} \in II$,

$\{7\} \in III$

Korak 4: Ažuriranje skupa $V \setminus U$ brisanjem čvora v koji pripada izabranoj grani.

$\{2,3,6,8,9\} \in V \setminus U$,

Korak 5: Ažuriranje skupova k_I, k_{II} i k_{III} između ažuriranih skupova **I, II i III**

(respektivno) i skupa $V \setminus U$.

$\{4,8\} \in k_I$,

$\{7,10,14\} \in k_{II}$,

$\{1,2,6\} \in k_{III}$

Ažurirani skupovi iz koraka 3, 4 i 5 predstavljaju početne uslove za sledeću iteraciju.

4.3.3.3 Druga iteracija ((c) na slici 4.7)

Korak 1: Izbor glavnog drveta.

Izabrano drvo je **III** sa unapred zadatog rasporeda (II, III, I, I, II i I)

Korak 2: Izbor grane sa minimalnim koeficijentom.

$\min\{k_{III}\} = \min\{1,2,6\} = 1$; čvor $u \in III = 7$ i čvor $v \in V \setminus U = 8$

Korak 3: Ažuriranje skupa glavnog drveta **III** dodavanjem čvora v koji pripada izabranoj grani.

$\{1\} \in I$,

$\{4,5\} \in II$,

$\{7,8\} \in III$,

Korak 4: Ažuriranje skupa $V \setminus U$ brisanjem čvora v koji pripada izabranoj grani.

$$\{2,3,6,9\} \in V \setminus U,$$

Korak 5: Ažuriranje skupova k_I, k_{II} i k_{III} između ažuriranih skupova **I, II i III** (respektivno) i skupa $V \setminus U$.

$$\{4\} \in k_I,$$

$$\{7,10,14\} \in k_{II},$$

$$\{2,6,7,11\} \in k_{III}$$

Ažurirani skupovi iz koraka 3, 4 i 5 predstavljaju početne uslove za sledeću iteraciju.

4.3.3.4 Treća iteracija ((d) na slici 4.7)

Korak 1: Izbor glavnog drveta.

Izabrano drvo je **I** sa unapred zadatog rasporeda (**II, III, I, II i I**)

Korak 2: Izbor grane sa minimalnim koeficijentom.

$$\min\{k_I\} = \min\{4\} = 4; \text{ čvor } u \in I = 1 \text{ i čvor } v \in V \setminus U = 2$$

Korak 3: Ažuriranje skupa glavnog drveta **I** dodavanjem čvora v koji pripada izabranoj grani.

$$\{1,2\} \in I,$$

$$\{4,5\} \in II,$$

$$\{7,8\} \in III,$$

Korak 4: Ažuriranje skupa $V \setminus U$ brisanjem čvora v koji pripada izabranoj grani.

$$\{3,6,9\} \in V \setminus U,$$

Korak 5: Ažuriranje skupova k_I, k_{II} i k_{III} između ažuriranih skupova **I, II i III** (respektivno) i skupa $V \setminus U$.

$$\{8\} \in k_I,$$

$$\{7,10,14\} \in k_{II},$$

$$\{2,6,7\} \in k_{III}$$

Ažurirani skupovi iz koraka 3, 4 i 5 predstavljaju početne uslove za sledeću iteraciju.

4.3.3.5 Četvrta iteracija ((e) na slici 4.7)

Korak 1: Izbor glavnog drveta.

Izabrano drvo je **I** sa unapred zadatog rasporeda (*II, III, I, I, II* i *I*)

Korak 2: Izbor grane sa minimalnim koeficijentom.

$$\min\{k_I\} = \min\{8\} = 8; \text{ čvor } u \in I = 2 \text{ i čvor } v \in V \setminus U = 3$$

Korak 3: Ažuriranje skupa glavnog drveta **I** dodavanjem čvora **v** koji pripada izabranoj grani.

$$\{1,2,3\} \in I,$$

$$\{4,5\} \in II,$$

$$\{7,8\} \in III,$$

Korak 4: Ažuriranje skupa $V \setminus U$ brisanjem čvora **v** koji pripada izabranoj grani.

$$\{6,9\} \in V \setminus U,$$

Korak 5: Ažuriranje skupova k_I, k_{II} i k_{III} između ažuriranih skupova **I, II** i **III**

(respektivno) i skupa $V \setminus U$.

$$\{2,4\} \in k_I,$$

$$\{10,14\} \in k_{II},$$

$$\{2,6,7\} \in k_{III}$$

Ažurirani skupovi iz koraka 3, 4 i 5 predstavljaju početne uslove za sledeću iteraciju.

4.3.3.6 Peta iteracija ((f) na slici 4.7)

Korak 1: Izbor glavnog drveta.

Izabrano drvo je **II** sa unapred zadatog rasporeda (*II, III, I, I, II* i *I*)

Korak 2: Izbor grane sa minimalnim koeficijentom.

$$\min\{k_{II}\} = \min\{10,14\} = 10; \text{ čvor } u \in II = 5 \text{ i čvor } v \in V \setminus U = 6$$

Korak 3: Ažuriranje skupa glavnog drveta **II** dodavanjem čvora **v** koji pripada izabranoj grani.

$$\{1,2,3\} \in I,$$

$$\{4,5,6\} \in II,$$

$$\{7,8\} \in III,$$

Korak 4: Ažuriranje skupa $V \setminus U$ brisanjem čvora v koji pripada izabranoj grani.

$$\{9\} \in V \setminus U,$$

Korak 5: Ažuriranje skupova k_I, k_{II} i k_{III} između ažuriranih skupova **I, II i III** (respektivno) i skupa $V \setminus U$.

$$\{2\} \in k_I,$$

$$\{ \} \in k_{II},$$

$$\{7,6\} \in k_{III}$$

Ažurirani skupovi iz koraka 3, 4 i 5 predstavljaju početne uslove za sledeću iteraciju.

4.3.3.7 Šesta iteracija ((g) na slici 4.7)

Korak 1: Izbor glavnog drveta.

Izabrano drvo je **I** sa unapred zadatog rasporeda (**II, III, I, I, II i I**)

Korak 2: Izbor grane sa minimalnim koeficijentom.

$$\min\{k_I\} = \min\{2\} = 2; \text{ čvor } u \in I = 3 \text{ i čvor } v \in V \setminus U = 9$$

Korak 3: Ažuriranje skupa glavnog drveta **II** dodavanjem čvora v koji pripada izabranoj grani.

$$\{1,2,3,9\} \in I,$$

$$\{4,5,6\} \in II,$$

$$\{7,8\} \in III,$$

Korak 4: Ažuriranje skupa $V \setminus U$ brisanjem čvora v koji pripada izabranoj grani.

$$\{ \} \in V \setminus U,$$

Korak 5: Ažuriranje skupova k_I, k_{II} i k_{III} između ažuriranih skupova **I, II i III** (respektivno) i skupa $V \setminus U$.

$$\{ \} \in k_I,$$

$$\{ \} \in k_{II},$$

$$\{ \} \in k_{III}$$

Kako su k_I, k_{II}, k_{III} i $V \setminus U$ prazni skupovi, iterativna procedura se zaustavlja. Minimalna drva (šuma) su na ovaj način definisana.

Može se reći da šuma (drvo I, II i III) na kraju određivanja minimalnog drveta sadrži sve čvorove posmatranog grafa:

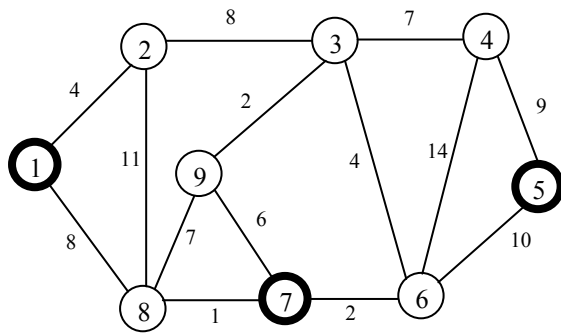
$$\{1,2,3,9\} \in I, \quad (4.20)$$

$$\{5,4,6\} \in II, \quad (4.21)$$

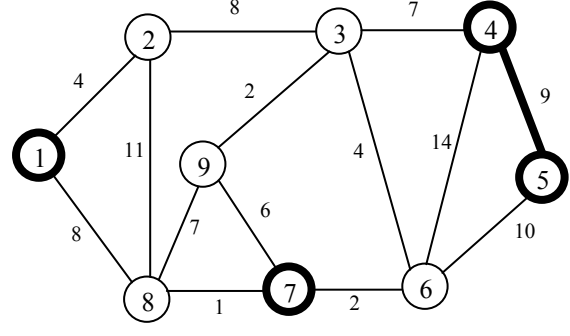
$$\{7,8\} \in III, \quad (4.22)$$

$$\{I, II, III\} \in U \quad (4.23)$$

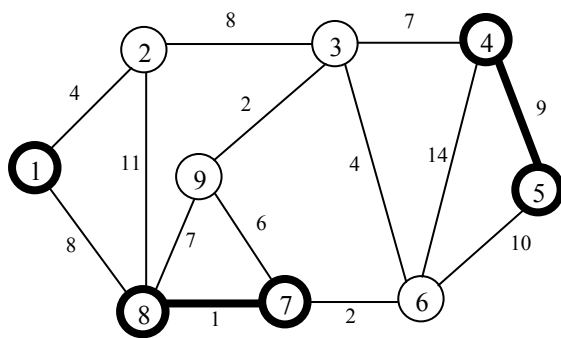
Napomena: Ukoliko nema raspoloživih grana u koraku 2 za izabrano glavno drvo, sledeće drvo sa unapred zadatog rasporeda biće izabrano kao glavno drvo. U ovom slučaju, minimalna drva (šuma) neće obuhvatiti sve čvorove.



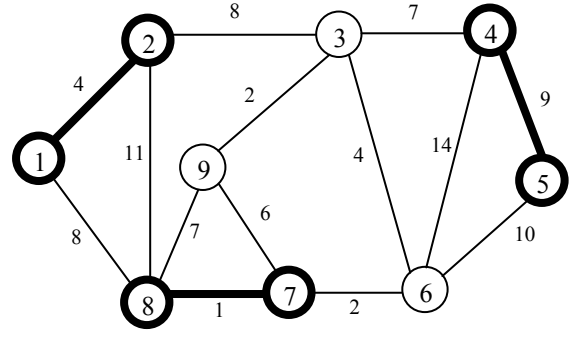
(a) start



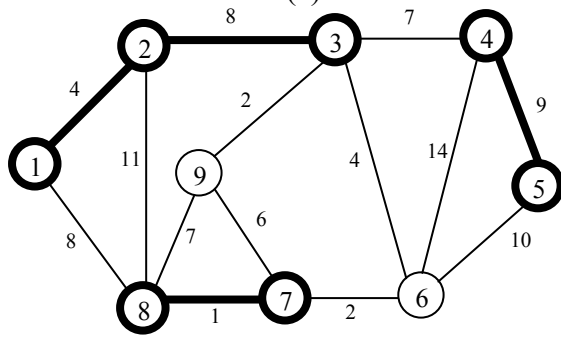
(b) drvo II



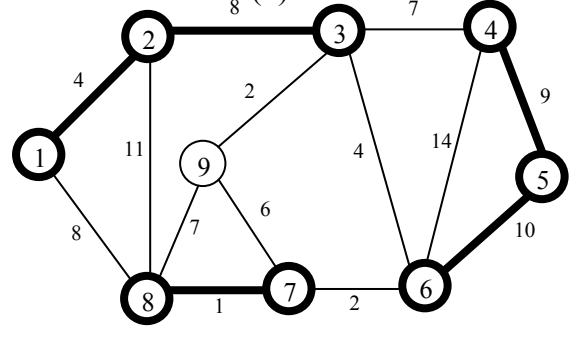
(c) drvo III



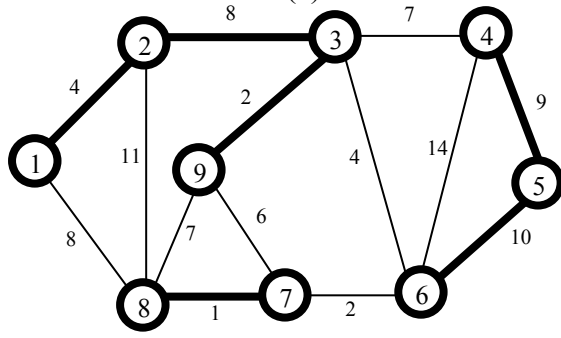
(d) drvo I



(e) drvo I



(f) drvo II



(g) drvo I

Slika 4.7 Određivanje šume od tri drveta za graf sa slike 4.6

4.3.4 Analogije između grafa i distributivne mreže

Sada se mogu zabeležiti analogije između grafa koji je upotrebljen za ilustraciju modifikovanog Primovog algoritma (isključujući korene stabala) prikazanog na slici 4.7. i nenapojene oblasti distributivne mreže prikazane na slici 4.5:

- Graf predstavlja analogiju nenapojene oblasti distributivne mreže koja je nastala posle lociranja i izolacije kvara.
- Na osnovu gore navedene analogije sledi da grana grafa predstavlja analogiju distributivne linije u nenapojenoj oblasti, a čvor grafa predstavlja analogiju SN/NN trafostanice u nenapojenoj oblasti..

Koreni stabala predstavljaju analogiju SN/NN trafostanica u napojenoj oblasti koje su povezane sa nenapojenom oblasti preko jedne ili više grana.

4.4 Algoritam za rešavanje obnavljanja pogona

U osnovi, algoritam se sastoji iz dve celine. U prvoj se vrši napajanje čvorova iz nenapojene oblasti predloženim načinom rešavanja obnavljanja pogona, zasnovanom na modifikovanom Primovom algoritmu opisanom u prethodnom poglavlju, a koji podrazumeva prekidačke akcije u nenapojenom delu distributivnog sistema. U drugoj celini, koja podrazumeva prekidačke akcije u napojenom delu distributivnog sistema, vrši se transfer opterećenja sa preopterećenih elemenata.

Vrednovanje puteva napajanja bazira se na raspoloživim kapacitetima izvoda. Za prihvatanje opterećenja biće izabran onaj izvod koji ima najveće resurse. U tom smislu, bira se drvo koje pripada odabranom izvodu. Kako se očekuju relativno mala preopterećenja zbog sistema napajanja čvor po čvor, vrši se pokušaj eliminacije istih transferom opterećenja.

Sledi detaljna diskusija ključnih celina razvijenog algoritma.

Uvažavajući usvojenu strategiju, posle lociranja i izolovanja deonice u kvaru, u nenapojenom području stvaraju se inicijalni uslovi za proračun obnavljanja pogona distributivnog sistema, isključivanjem svih sekcija. Tako su ostvareni uslovi za uzimanje u razmatranje svih deonica u nenapojenom području, što samo može ostaviti više prostora prilikom rešavanja obnavljanja pogona. Bitno je napomenuti da se u predloženom algoritmu uklopno stanje koje je nenapojeno područje imalo pre kvara ne "zaboravlja" u potpunosti.

Za minimizaciju ispalne snage (4.1) bitne su sledeća tri momenta:

- Selektivan prihvatanje opterećenja ispalnih potrošača koji se vrši saglasno težinskom koeficijentu grane koja povezuje nenapojeni i napojeni deo distributivnog sistema.
- Maksimalno angažovanje topoloških resursa dela distributivne mreže koja je ostala bez napajanja električnom energijom, što je omogućeno poništavanjem

prethodne pogonske strukture tog dela mreže. U ovom slučaju, veoma značajnu ulogu igra angažovanje srednjenaponskih sabirnica prilikom rešavanja obnavljanja pogona distributivnih sistema. Prihvatanje srednjenaponske sabirnice, kao čvora iz nenapojenog dela distributivnog sistema, skoro da ne utiče na promene na izvodu i transformatoru koji je trenutno angažovan za prihvatanje čvora iz nenapojene oblasti. Raspoloživi kapaciteti pomenutog izvoda i transformatora praktično se ne menjaju, jer je opterećenje na tek napojenim sabirnicama jednako nuli, dok se eventualno ima samo povećanje maksimalnog pada napona na pomenutom izvodu.

- Uključivanje u obnavljanje pogona distributivnog sistema dela mreže koja ne učestvuje direktno u prihvatu snage nenapojenih potrošača. Transferom opterećenja oslobađaju se novi kapaciteti za prihvatanje snage nenapojenih potrošača. Svrha tek urađenog transfera opterećenja ne mora biti samo oslobađanje kapaciteta za prihvatanje opterećenja nenapojenih potrošača, već i oslobađanje kapaciteta u mreži za neke buduće transfere opterećenja.

Veoma značajnu ulogu u nalaženju rešenja za obnavljanje pogona distributivnih sistema ima broj manipulacija koje je potrebno izvršiti da bi se na ovaj način dobijeno rešenje sprovelo u delo. Normalno, cilj je uraditi obnavljanje pogona sa što je moguće manjim brojem manipulacija. Izbor potencijalnih kandidata za prihvatanje opterećenja, u suštini, bazira se na proračunima tokova snaga i naponskih prilika.

Originalni problem opisan (4.1)-(4.5) u ovom radu praktično je razložen na dva potproblema i to:

- Način rešavanja obnavljanja pogona nenapojenog područja i
- Problem eliminacije preopterećenja i transfera opterećenja

4.4.1 Način rešavanja obnavljanja pogona nenapojenog područja

Način rešavanja obnavljanja pogona nenapojenog područja, u stvari, predstavlja proceduru prihvatanja opterećenja i sastoji iz dva osnovna dela:

- Izbor izvoda (korena stabala) kojim će se vršiti prihvatanje opterećenja potrošača iz nenapojene oblasti distributivnog sistema.
- Izbor potrošačkog čvora, čije će se opterećenje prihvatiti.

Grane koje povezuju napojenu i nenapojenu oblast (4.24 (a)), kao i federi sa susednih trafostanica koji mogu direktno učestvovati u napajanju potrošača u nenapojenoj oblasti (4.24 (b)) prikazanih na slici 4.10, mogu biti definisani kao skupovi:

$$B = \{b_1, \dots, b_m, \dots, b_n\} = \{(8,21), (16,10), (19,29), (35,29), (20,9)\}, \quad (4.24 (a))$$

$$F = \{f_1, \dots, f_m, \dots, f_n\} = \{15,36,37,11,18\} \quad (4.24 (b))$$

Na osnovu (3.24 (a)), koreni drveća mogu biti definisani kao:

$$R = \{r_1, \dots, r_m, \dots, r_n\} = \{8,16,19,35,20\} \quad (4.24 (c))$$

Takođe mogu biti definisani i korespondentni izvodi (na osnovu (4.24 (a)) i (4.24 (b))) trafostanice S2:

$$F_C = \{7,17,27\} \quad (4.25)$$

Korespondentni izvodi napajaju potrošače iz nenapojene oblasti navedenih u (4.24 (a)). U ovom slučaju, to su potrošači 21, 10, 29 i 9.

Gde je

n – ukupan broj grana koje povezuju napojenu i nenapojenu oblast, odnosno ukupan broj korena stabala.

4.4.1.1 Izbor korena stabla koje će vršiti prihvat nenapojenog potrošača u tekućoj iteraciji

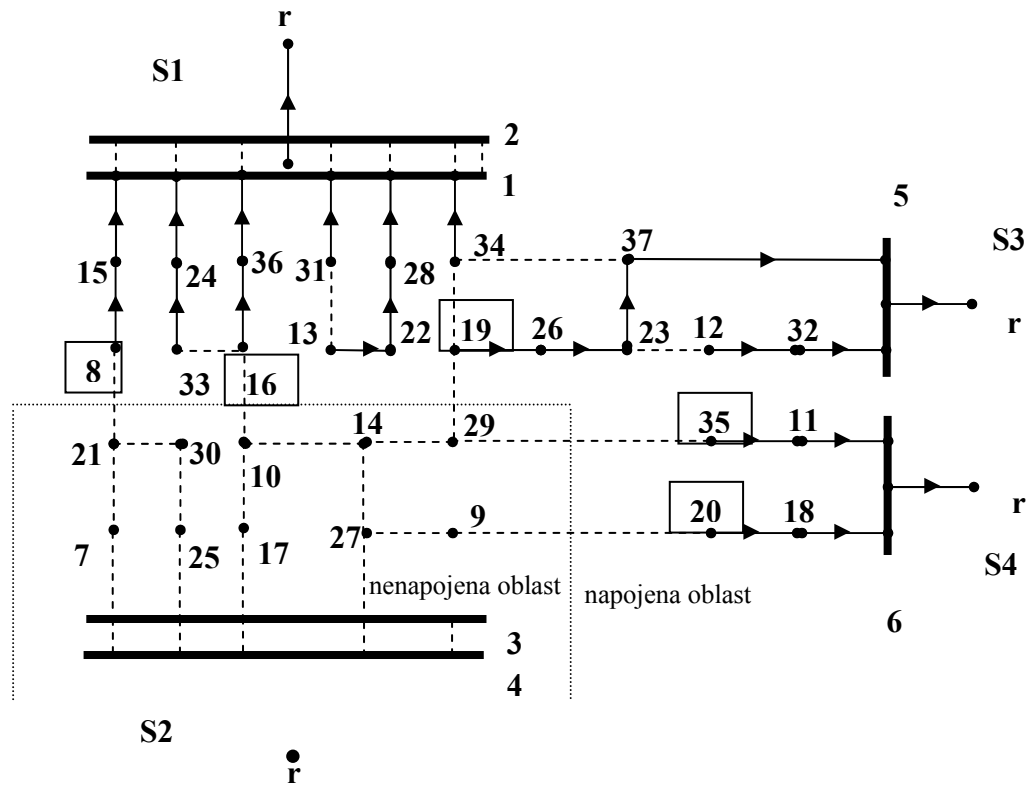
Izbor izvoda kojim će se vršiti napajanje potrošačkog čvora, praktično znači izbor korena stabla koja pripada tom izvodu. Dakle, stablo koje će prihvatiti opterećenje u tekućoj iteraciji, biće selektovano na osnovu proračuna tokova snaga. Stablo će biti selektovano isključivo na osnovu opterećenja transformatora i pripadajućih izvoda. Padovi napona uključeni su u mnogo manjoj meri zbog sledećih razloga:

- U savremenim gradskim distributivnim mrežama, koje su urađene kablovskim vodovima, pokazalo se da padovi napona imaju zanemarljivo male vrednosti, tako da čak i u slučajevima neznatnih preopterećenja izvoda ili transformatora, nisu ispod dozvoljenih granica.
- Do većih padova napona može doći na izvodima prigradskih distributivnih postrojenja, gde postoje i kablovski i vazdušni vodovi. Gledano iz ugla dispečera kojem bi, na kraju, rezultati jednog ovakvog algoritma i bili namenjeni, mnogo je važnije imati urađeni plan obnavljanja pogona koji uključuje i čvorove na kojima bi došlo do povećanog pada napona, nego plan obnavljanja pogona u kojem bi takvi čvorovi bili potpuno eliminisani. Dispečeri bi u tom slučaju sami doneli odluku da li određene potrošačke čvorove treba ostaviti bez napajanja.

Na osnovu navedenog, može se zaključiti da se izbor izvoda i pripadajućeg transformatora koji će u tekućoj iteraciji odrediti koren stabla, vrši jednostavnim izborom izvoda sa maksimalnim kapacitetom.

$$(p, q) = \max\{I_f^{\max} - I(g_f(p))\} \quad (4.26)$$

Izvodi koji su kandidati za opisani izbor, moraju biti povezani bar jednom granom sa nenapojenim delom distributivnog sistema. Pomoćne funkcije $g_f(p)$ i $g_t(p)$, koje su opisane u poglavlju 3, definišu izvod i pripadajući transformator koji napaja čvor p (na primer, za $p = 22$ (slika 4.5), $g_f(22) = 28$ i $g_t(22) = 1$).



Slika 4.8 Izabrani koreni stabala (uokvireno) 8, 16, 19, 35 i 20 za situaciju sa slike 4.5

4.4.1.2 Izbor potrošačkog čvora

Izborom izvoda počinje formiranje stabla. Za skup K važiće sledeća relacija:

$$\{k_I, k_{II} \dots k_n\} \in K, \quad (4.28)$$

gde je:

$k_I, k_{II} \dots k_n$ - Skupovi čvorova opisani relacijom (4.6)

$I, II \dots n$ - Minimalno drveće

n - Broj potencijalnih stabala

Sa slike 4.8 može se primetiti da jednom izvodu, koji sadrži koren stabla, istovremeno odgovara i jedno stablo, što je sasvim i prirodna pretpostavka. Treba naglasiti to da koren stabla postaje mora biti selektovan bar jednom, na način opisan u ovom poglavlju, kako bi formirao drvo. Postoji mogućnost da koren stabla ne formira drvo, što pre svega zavisi od kapaciteta pripadajućeg izvoda i transformatora.

Izbor grane (a samim tim i potrošačkog čvora iz nenapojenog dela distributivnog sistema) svodi se na nalaženje grane sa minimalnim težinskim koeficijentom, koji se računa prema sledećem obrascu:

$$C_l = c_\gamma + d, \quad (4.29)$$

gde su:

C_l - Težinski koeficijent grane koja pripada nenapojenoj oblasti distributivnog sistema. Ovaj koeficijent se određuje za svaku granu iz nenapojene oblasti, pre početka određivanja obnavljanja pogona i u toku odvijanja algoritma se ne menja.

c_γ - Konstanta pomoću koje se, zapravo, pamti pogonska struktura koja je postojala u delu sistema koji je posle lociranja i izolacije deonice u kvaru ostao bez napajanja električnom energijom. Vrednosti ove konstante su:

$$c_\gamma = \begin{cases} 10\ 000 & - (c_{\gamma 1}) \quad \text{za grane koje su bile opterećene pre kvara, iz} \\ & \text{čega sledi da su to grane koje su imale prekidačku opremu u} \\ & \text{poziciji "uključeno"} \\ 20\ 000 & - (c_{\gamma 2}) \quad \text{za izvode koji imaju daljinski kontrolisanu} \\ & \text{prekidačku opremu (na primer izvodi u trafostanicama) i koji} \\ & \text{ne pripadaju skupu } F_C \text{ (4.25)} \\ 50\ 000 & - (c_{\gamma 3}) \quad \text{za izvode koji imaju daljinski kontrolisanu} \\ & \text{prekidačku opremu (na primer izvodi u trafostanicama) i koji} \\ & \text{pripadaju skupu } F_C \text{ (4.25)} \\ 100\ 000 & - (c_{\gamma 4}) \quad \text{za grane koje nisu bile opterećene pre kvara, iz} \\ & \text{čega sledi da su to grane koje su imale prekidačku opremu u} \\ & \text{poziciji "isključeno"} \end{cases}$$

U ovom slučaju su navedene konkretne vrednosti koeficijenata c_γ za predloženi algoritam. Ove vrednosti mogu biti promenjene, ali se mora voditi računa da uvek mora biti :

$$c_{\gamma 1} < c_{\gamma 2} < c_{\gamma 3} < c_{\gamma 4} \quad (4.30)$$

d - Dužina posmatrane deonice.

Primeri dodeljivanja težinskih koeficijenata:

- za granu koja je bila opterećena pre kvara dužine 300 m, težinski koeficijent će biti 10 300,
- za izvod, koji ima daljinski kontrolisanu prekidačku opremu (na primer izvodi u trafostanicama) i koji ne pripadaju skupu F_C (4.25), dužine 550 m težinski koeficijent će biti 20 550,
- za izvod, koji ima daljinski kontrolisanu prekidačku opremu (na primer izvodi u trafostanicama) i koji pripada skupu F_C (4.25), dužine 800 m, težinski koeficijent će biti 50 800 i
- za granu koja nije opterećena pre kvara i koja je dužine 440 m, težinski koeficijent će biti 100 440,

Nameće se pitanje zbog čega je izvršena ovakva dodela težinskih koeficijenata granama, kao i to kako će se ona odraziti na konačne rezultate proračuna obnavljanja pogona distributivnih sistema. Odgovori na ova dva ključna pitanje jesu:

Kako je zadovoljenje kriterijumske funkcije (4.1) postignuto svakim sledećim prihvatom opterećenja nekog od nenapojenih potrošačkih čvorova, jedan od vrlo bitnih faktora za što bolje (i brže) obnavljanje pogona distributivnih sistema jeste broj manipulacija. Veliki broj manipulacija prilično komplikuje sprovođenje dobijenih rezultata u realnim uslovim (habanje opreme, veliki broj angažovanih ekipa i slično). Broj manipulacija kojima treba izvršiti obnavljanje pogona posmatranog distributivnog sistema, postao je skoro nezaobilazan faktor u literaturi koja se bavi ovom problematikom.

Iako se, kako je u radu već naglašeno, u toku odvijanja algoritma intenzivno koriste svi topološki resursi, čime se za napajanje jednog čvora može koristiti bilo koja raspoloživa grana, dodeljivanjem težinskih koeficijenata na gore opisani način postižu se dva cilja:

- Primarni cilj je favorizovanje, za prihvatanje opterećenja, grana koje su bile u pogonskoj strukturi pre kvara. Nakon lociranja i izolovanja kvara, u nenapojenoj oblasti prekidači (rastavljači snage) koji su bili u pogonskoj

strukturi distributivnog sistema, ostaju u položaju “uključeno”. Ova realnost je uvažena, upravo, gore opisanim dodeljivanja težinskih koeficijenata. Favorizovanjem ponovnog stavljanja pod opterećenje istih deonica očigledno je da je izbegnut izvestan broj manipulacija.

- Sekundarni cilj je smanjeni rizik od kvara na prekidačku opremi, kao i smanjenje verovatnoće kvarova na kablju. Ovo sledi iz činjenice da se u distributivnim sistemima koristi vrlo uzak spektar kablova srednjeg napona, te je verovatnoća od kvara na kablju po jedinici dužine približno jednaka za sve deonice. Dakle, što je duža deonica, veća je i verovatnoća da dođe do kvara.

Odgovor na pitanje kako će se ovakav pristup odraziti na krajnji rezultat, dobrim delom je sadržan u odgovoru na prvo pitanje i on će se detaljnije komentarisati u zaključku ovog rada. Bitno je naglasiti da ukoliko resursi nisu dovoljni za prihvatanje opterećenja, što iziskuje potrebu za transferom opterećenja, povoljan efekat u pogledu broja manipulacija, biće znatno umanjen.

Na osnovu dosad rečenog, može se opisati način obnavljanja pogona na sličan način na koji je opisano nalaženje minimalnih drveta (šume) opisanog u poglavlju 4.3.3.

4.4.1.3 Početni uslovi (na slici 4.10)

$$\{8\} \in 15, \quad (4.31)$$

$$\{16\} \in 36, \quad (4.32)$$

$$\{19\} \in 37, \quad (4.33)$$

$$\{35\} \in 11, \quad (4.34)$$

$$\{20\} \in 18, \quad (4.35)$$

$$\{8,16,19,35,20\} = \{15,36,37,11,8\} \in U, \quad (4.36)$$

$$\{7,9,10,14,17,21,25,27,29,30\} \in V \setminus U, \quad (4.37)$$

$$\{100100\} \in k_{15}, \quad (4.38)$$

$$\{100100\} \in k_{36}, \quad (4.39)$$

$$\{100100\} \in k_{37}, \quad (4.40)$$

$$\{100100\} \in k_{11}, \quad (4.41)$$

$$\{100100\} \in k_{18}, \quad (4.42)$$

Gde su

8,16,19,35,20	- čvorovi koji pripadaju skupu U. Skup U sadrži čvorove koji pripadaju drveću (šumi). Takođe, ovi čvorovi predstavljaju korene drveća 15, 36, 37, 11 i 18 respektivno.
7,9,10,14,17,21,25,27,29,30	- čvorovi koji pripadaju skupu VU. Skup VU sadrži čvorove koji pripadaju drveću (šumi)
$k_{15}, k_{36}, k_{37}, k_{11}, k_{18}$	- grane (koeficijenti) između skupa 15, 35, 36, 11 i 18 (respektivno) i skupa VU.

Posle definisanja početnih uslova, sledi iterativna procedura. Iterativna procedura je vrlo slična iterativnoj proceduri za nalaženje minimalnih drveta (šume), opisanoj u poglavlju 4.3.3, s tom razlikom što u ovom slučaju postoji korak više u svakoj iteraciji, koji je neophodan za proračun tokova snaga. Sledi kratak opis jedne iteracije.

Korak 1: Izbor glavnog stabla.

Ovaj izbor se, takođe, vrši po principu maksimalnog kapaciteta. Drugim rečima, od izvoda koji sadrže korene stabala bira se onaj koji ima najveći kapacitet za prihvatanje opterećenja:

$$I_m = \max\{(I_f^{\max} - I(g_f(p)))\}, \quad 1 \leq m \leq n \quad (4.43)$$

gde je:

I_m - Struja m-tog izvoda. Na ovaj način je selektovano i stablo (m-to stablo) koje će prihvatiti opterećenje potrošačkog čvora.

- I_f^{\max} - Maksimalna struja izvoda
 $I(g_f(p))$ - Aktuelna struja izvoda

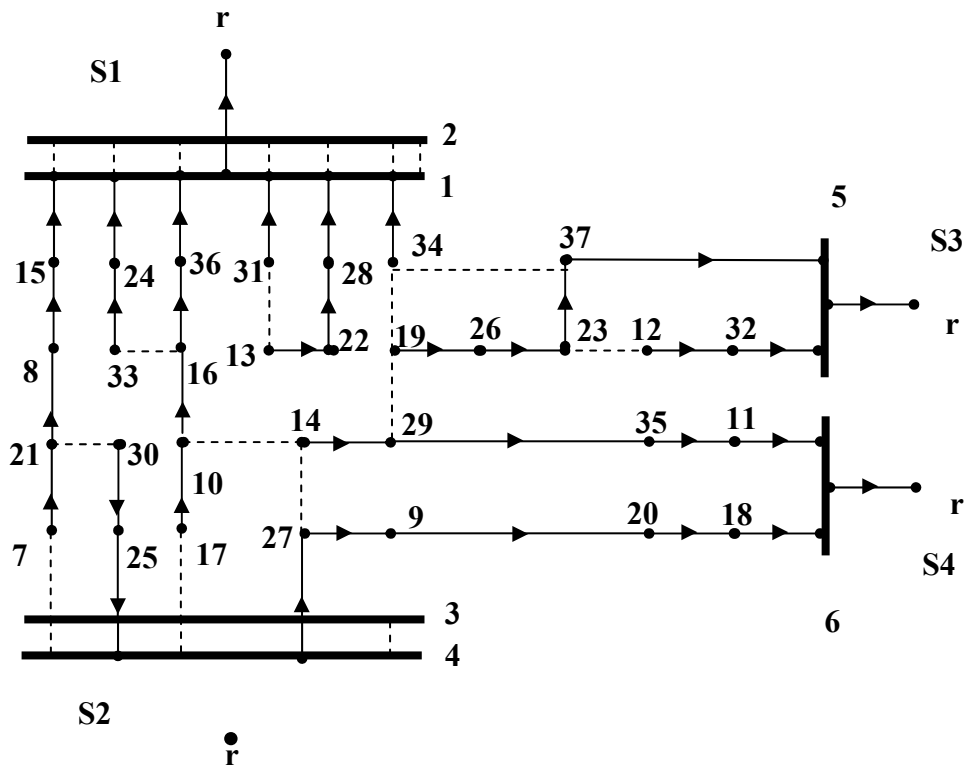
Korak 2: Izbor grane sa minimalnim koeficijentom:

Izborom grane sa najmanjim težinskim koeficijentom, praktično se vrši izbor potrošača koji će biti napojen.

Naredni **koraci 3, 4, i 5** zapravo su isti koraci kao kod ranije opisanog modifikovanog Primovog algoritma, a koji podrazumevaju ažuriranje skupova selektovanog drveta, skupa $V \setminus U$ i skupova $k_{15}, k_{36}, k_{37}, k_{11}, k_{18}$ respektivno.

Korak 6: Proračun tokova snaga.

Ažurirani skupovi iz koraka 3, 4 i 5 predstavljaju početne uslove za sedeću iteraciju.



Slika 4.11 Topološka struktura hipotetičkog distributivnog sistema posle završenog procesa obnavljanja pogona

Na slici 4.11 data je topološka struktura hipotetičkog distributivnog sistema posle završenog procesa obnavljanja pogona. Na dobijenom rešenju prikazana je upotreba pomoćnih sabirnica u procesu obnavljanja pogona, pri čemu se čvorovi 30 i 25 preko sabirnica 4 napajaju iz postrojenja S4, a uz pomoć pripadajućeg transformatora i izvoda 18. U ovom slučaju nije bilo potrebe za transferom opterećenja. Dodatna povoljnost upotrebe sabirnica prilikom obnavljanja pogona, jeste ta što se potrebne manipulacije dešavaju unutar VN/SN postrojenja, gde je daljinsko upravljanje prekidačkom opremom najprisutnije u distributivnim postrojenjima.

Izborom čvora, čije će se opterećenje prihvatiti i njegovim uključenjem u napojenu oblast, dolazi do povećanja opterećenja izvoda i pripadajućeg transformatora:

$$i_f(p, q) = \frac{I(g_f(p)) + I(q)}{I_f^{\max}}, \quad (4.44)$$

$$i_t(p, q) = \frac{I(g_t(p)) + I(q)}{I_t^{\max}}, \quad (4.45)$$

gde je:

$i_f(p, q)$ - relativna vrednost struje izvoda u slučaju da se prihvati opterećenje čvora q

$i_t(p, q)$ - relativna vrednost struje pripadajućeg transformatora u slučaju da se prihvati opterećenje čvora q

Indeksom $\alpha(p, q)$ vrši se ocena podobnosti granične grane za prihvati opterećenja čvora q. Ovim indeksom se proverava ograničenje (4.2). Ukoliko je došlo do narušavanja opterećenja, izražava se zahtev za transfer opterećenja i za rasterećenjem preopterećenog izvoda, odnosno transformatora. Kao što se iz konteksta može zaključiti, sa gledišta preopterećenja elemenata distributivnog sistema, za nas su interesantna dva elementa; izvod kojim se vrši prihvati opterećenja i pripadajući transformator. Određivanje indeksa $\alpha(p, q)$, u skladu sa već objašnjenim razlogom za

samo informativno uključenje ograničenja (4.3) u proračun, vrši se pomoću sledeće formule:

$$\alpha(p, q) = \max\{i_f(p, q), i_t(p, q)\} \quad (4.46)$$

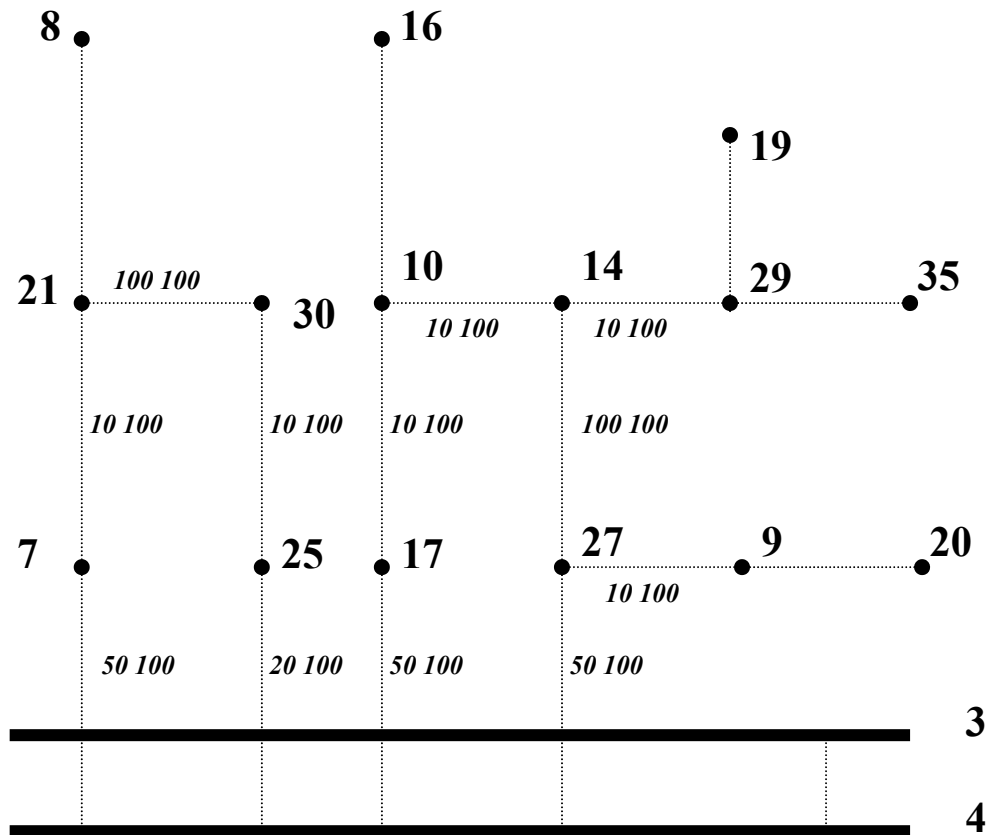
Indeks $\alpha(p, q)$ određuje nivo opterećenosti, a samim tim i nivo rezerve posmatranih elemenata distributivnog sistema. Ukoliko se opterećenje čvora q^0 odabrane grane (p^o, q^o) prihvati, sledi analiza indeksa $\alpha(p^o, q^o)$:

- Ukoliko je $\alpha(p^o, q^o) \leq 1$, ograničenje (4.2) praktično se ne proverava, već se vrši konačno pripajanje selektovanog čvora napojenoj oblasti. Zatim se proces ponavlja izborom sledećeg čvora iz nenapojene oblasti i ponovnom analizom ograničenja.
- Ukoliko je $\alpha(p^o, q^o) > 1$, vrši se provera ograničenja (4.2) i automatski se poziva procedura transfera opterećenja.

4.4.1.4 Ilustracija dodeljivanja koeficijenata

Dodeljivanje koeficijenata granama nenapojenog područja, od ključnog značaja za iznalaženje rešenja obnavljanja pogona distributivnih sistema pomoću predloženog algoritma. Dodeljivanje koeficijenata još jednom će biti detaljnije ponovljeno i praćeno primerom obnavljanja pogona hipotetičke distributivne mreže, pri čemu je dobijeno uklopno stanje na slici 4.11 obnavljanjem pogona ispalog konzuma sa slike 4.10.

Usvojiće se dužine deonica od 100 m za sve deonice nenapojenog područja, što će pojednostaviti objašnjavanje suštine predloženog algoritma. Dakle, u skladu sa već opisanom načinom dodele koeficijenata granama nenapojenog područja, grane sa slike 4.10 imaće koeficijente prikazane na slici 4.11(a).

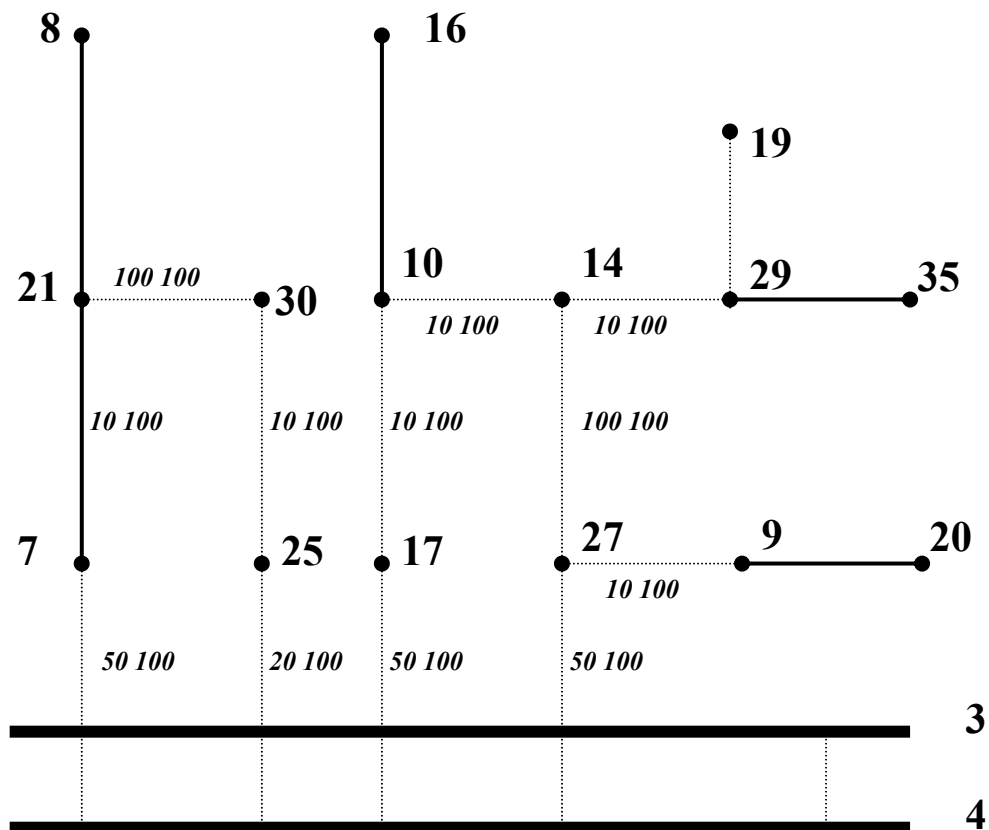


Slika 4.11(a) Koeficijenti dodeljeni granama nenapojenog područja sa slike 4.10

Ključne informacije o dodeljenim koeficijentima, sa osvrtom na svaku granu, mogu se opisati na sledeći način:

- Koeficijent 10 100 ima grane (7, 27), (30, 25), (10, 17), (14, 10), (29, 14) i (9, 27). Navedene grane predstavljaju deonice koje su bile opterećene u pogonskoj strukturi distributivnog sistema neposredno pre kvara, a nisu izvodi.
- Koeficijent 100 100 ima grane (21, 30) i (14, 27). Navedene grane, u ovom slučaju, predstavljaju deonice koje nisu bile opterećene u pogonskoj strukturi distributivnog sistema neposredno pre kvara.

Suštinska uloga koju ima ovakva dodela koeficijenata granama, može se videti na slici 4.11(b), koja predstavlja međustanje u toku odvijanja algoritma.

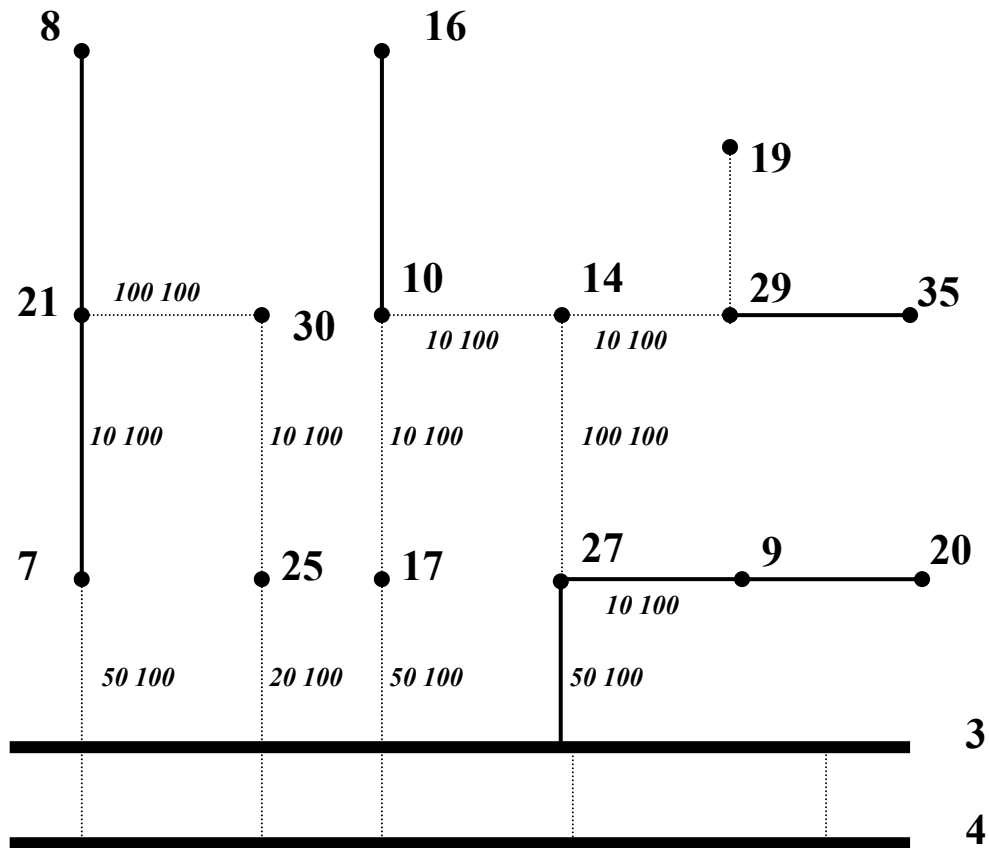


Slika 4.11(b) Međustanje odvijanja algoritma u iteraciji u kojoj je izvršen prihvata opterećenja preko korena u čvoru 8.

U tekućoj iteraciji, prilikom prihvata opterećenja preko korena u čvoru 8, a pošto je opterećenje čvora 21 već bilo prihvaćeno, postojao je izbor za prihvrat opterećenja čvora 7 ili čvora 30. Prihvaćen je čvor 7 zbog manjeg koeficijenta povezujuće grane (7, 21) od koeficijenta grane (21, 30). Dodeljivanjem najnižeg koeficijenta granama koje su bile opterećene u pogonskoj strukturi distributivnog sistema, a nisu pripadale izvodima, favorizuje se prihvrat opterećenja preko grana u kojima je prekidačka oprema u stanju uključeno. Drugim rečima, bila bi prihvaćena sva opterećenja preko grana reda veličine 10 000, pre nego što bi se u razmatranje uzeo prihvrat opterećenja preko grane reda veličine 20 000, 50 000 ili 100 000.

- Koeficijente 50 100 imaju grane (izvodi) (7, 3), (7, 4), (17, 3), (17, 4), (27, 3) i (27, 4). Prilikom dodele ovih koeficijenata, uzelo se u obzir da izvodi imaju daljinski kontrolisanu prekidačku opremu i da pripadaju skupu F_C .
- Koeficijent 20 100 ima samo izvod 25, drugim rečima grane (25, 4) i (25, 3). Prilikom dodele ovih koeficijenata, uzelo se u obzir da izvodi imaju daljinski kontrolisanu prekidačku opremu i da ne pripadaju skupu F_C .

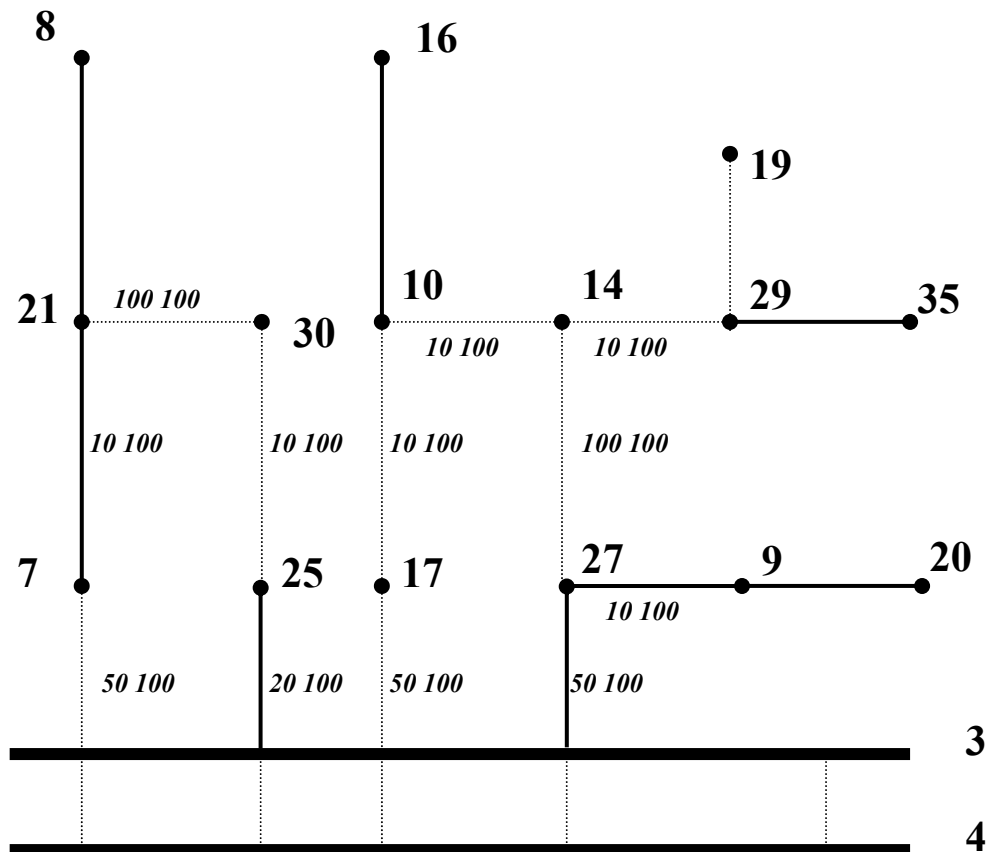
Suštinske prednosti ovakve dodele koeficijenata izvodima mogu se videti na slici 4.11(c) i slici 4.11(d).



Slika 4.11(c) Međustanje odvijanja algoritma u iteraciji u kojoj je izvršen prihvata opterećenja preko korena u čvoru 20.

Izborom korena stabla 20, a samim tim i stabla koje će izvršiti prihvat opterećenja, a kako je već izvršen prihvat opterećenja čvorova 9 i 27, algoritam je morao da se odluči između čvorova 14, 3 ili 4. Izabrana je grana sa manjim težinskim koeficijentom, ovog puta to je grana (27, 3). Dodeljivanjem težinskog koeficijenta od 50 000, što predstavlja dodelu većeg koeficijenta od grana koje su bile opterećene (a nisu izvodi) neposredno pre kvara, a manjeg od onih koje to nisu bile, postiže se sledeće:

- I dalje se vrši prihvat opterećenja preko grana čija je prekidačka oprema u položaju “zatvoreno”, samo što se “sačekao” prihvat opterećenja preko svih grana koeficijenta reda veličine 10 000.
- Pozitivan efekat ovog čekanja jeste prihvat opterećenja što je moguće većeg broja potrošača, bez novih prekidačkih akcija.



Slika 4.11(d) Međustanje odvijanja algoritma u koraku u kojem je izvršen prihvata opterećenja preko korena u čvoru 20.

Kako se i očekivalo, zbog opterećenja na sabirnicama koje je jednako nuli, ponovo je izabrano stablo sa korenom u čvoru 20 za dalji prihvata opterećenja. Postojao je izbor između dva izvoda, pri čemu je algoritam imao izbor između čvora 25 i čvora 17. Izabrana je grana sa manjim koeficijentom i prihvaćeno je opterećenje čvora 25. U svakom slučaju bi izabrali čvor (a samim tim i izvod) koji nam otvara novi set grana sa koeficijentima reda veličine 10 000. Iz tog razloga je značajno bilo favorizovati prihvat opterećenje čvora 25. Na ovaj način je omogućen:

- dalji nesmetan prihvat opterećenja, u slučaju ponovnog izbora stabla sa korenom 20. Ponovno razmatranje prihvata opterećenja čvora 17, od strane stabla sa korenom 20, dogodilo bi se tek pošto bi bili prihvaćeni svi čvorovi koji su u pogonskoj strukturi neposredno pre kvara pripadali izvodu 25 (shodno dodeljenim koeficijentima), naravno pod uslovom da čvor 17 u međuvremenu nije pripojen nekom drugom stablu.

- dalji nesmetan prihvata opterećenja, u slučaju ponovnog izbora stabla sa korenom 16. Nepreuzimanjem opterećenja čvora 17 od strane stabla sa korenom u čvoru 20, ostavljena je mogućnost stablu sa korenom u čvoru 16 da u nekom budućem koraku algoritma preuzme upravo opterećenje čvora 17.

Na osnovu poslednja dva gore navedena zaključka, primećuje se da algoritam teži da maksimalno iskoristi raspoložive kapacitete izvoda i transformatora. U konkretnom slučaju, preuzimanjem opterećenja čvora 17 u već pomenutoj iteraciji algoritma prikazanoj na slici 4.11(d), a od strane stabla sa korenom u čvoru 20, može se reći da će kapaciteti izvoda i transformatora kojima se ovo stablo pridružuje, biti maksimalno upotrebljeni. Međutim, na taj način postoji mogućnost da se ili kapacitet izvoda ili kapacitet transformatora kojem se pridružuje stablo sa korenom u čvoru 16, ne iskoristi u dovoljnoj meri (što bi uzrokovalo eventualno povećanje ukupnog broja nenapojenih potrošača u konačnom rešenju) ili povećanje broja prekidačkih akcija na mreži (što, takođe, umanjuje pozitivne efekte predloženog algoritma). Opisanim i ilustrovanim načinom dodele koeficijentata izvodima u nenapojenom području, upravo se eliminišu gore navedeni negativni efekti.

4.4.2 Eliminacija preopterećenja – transfer opterećenja

Prihvatom opterećenja potrošača iz područja koje je ostalo bez napajanja električnom energijom, direktno se utiče na smanjenje kriterijumske funkcije (4.1), dok se transferima opterećenja pokušavaju zadovoljiti data ograničenja. Prihvat opterećenja se vrši po principu čvor po čvor, tako da eventualna preopterećenja izvoda ili transformatora nisu značajna, što umnogome olakšava transfer opterećenja. Bitno je naglasiti da se i u prihvatu opterećenja i u transferu opterećenja u obzir uzimaju pomoćne ili druge glavne sabirnice, koje nisu pod naponom na početku procesa obnavljanja pogona. Sabirnice predstavljaju tačku u kojoj se susreću veliki broj potrošača s jedne strane, a ne predstavlja problem iz aspekta narušavanja granica usled preopterećenja s druge strane, pa je uključivanje sabirnica u proces obnavljanja pogona u velikoj meri doprinelo poboljšavanju performansi algoritma.

Transfer opterećenja vrši se u napojenom delu distributivnog sistema, čime se u proces obnavljanja pogona distributivnih sistema uključuje maksimum raspoloživih kapaciteta. Time se daje doprinos u težnji za napajanjem što većeg broja potrošača, odnosno za smanjenjem ispalne snage i zadovoljavanjem kriterijuma (4.1). Da bi se transfer uspešno obavio, neophodno je izvršiti identifikaciju raspoloživih resursa u napojenom delu mreže i, ako se ukaže potreba, što bolje ih iskoristiti. Ukoliko se transfer opterećenja završi neuspehom, dolazi do prekida daljeg obnavljanja pogona. Sve manipulacije na mreži koje su vršene u tom koraku, vraćaju se u prvobitni položaj.

Ukoliko dođe do preopterećenja transformatora, prednost se daje manipulacijama koje su vezane za postrojenje u kojem je došlo do preopterećenja. I u ovom slučaju misli se na upotrebu srednjenaponskih sabirnica. Ovaj vid rasterećenja, ukoliko je moguće, obezbeđuje oslobađanje većih kapaciteta, te je odnos *broj manipulacija / oslobođeni kapacitet* znatno povoljniji. Ukoliko se rasterećenje ne može obaviti na ovaj način, onda se pristupa razmeni opterećenja između izvoda i transformatora manipulacijama

na mreži. Svi vidovi transfera opterećenja ilustrovani su na hipotetičkoj distributivnoj mreži.

Ukoliko je, prilikom izbora potrošačkog čvora, došlo do preopterećenja nekog od elemenata (prvenstveno se misli na izvod i pripadajući mu transformator), pristupa se transferu opterećenja koji se vrši izmenom opterećenja u napojenom delu mreže. U radu je predložen algoritam za eliminaciju preopterećenja izvoda i transformatora koji se bazira na standardnim tehnikama manipulacija transfera opterećenja, pri čemu se maksimalno koriste raspoloživi resursi.

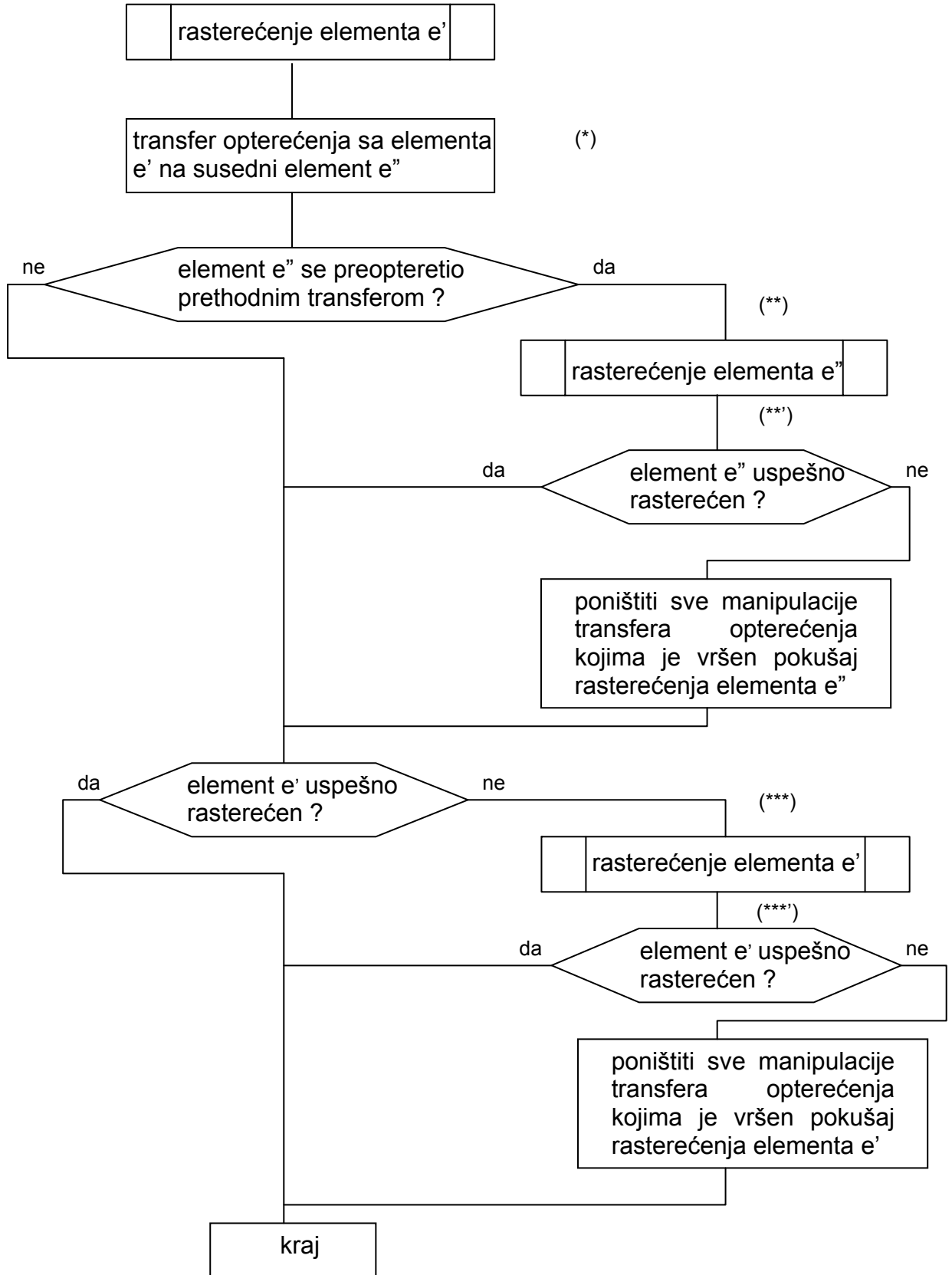
4.4.2.1 Struktura procedure transfera opterećenja

Krenuće se od pretpostavke da je prihvat opterećenja čvor q ($I_p(q)$), preko izabrane grane (p, q) , postavljanje $\pi(q) = p$, uzrokovao narušavanje strujnih ograničenja na izvodu $g_f(q)$ i/ili transformatoru $g_t(q)$. Ciklus transfera opterećenja pokreće upravo element koji je preopterećen. Kako pokušaj transfera može uzrokovati nova preopterećenja, razvijeni algoritam ima ponavljajuću strukturu (slika 4.12). Neka je sa e' obeležen element koji je preopterećen. Znači, mora se razmotriti mogućnost rasterećenja elementa e' na susedne elemente (izvode ili transformatore). Treba naglasiti da preopterećenje posmatranog elementa e' može biti uzrokovano prihvatom opterećenja čvora q ili prethodnim transferom opterećenja.

Eliminacija preopterećenja elementa e' vrši se transferom dela opterećenja sa elementa e' na element e'' nakon valorizacije i selekcije kandidata u (*), pozivom procedure, čiji je argument e' . Za valorizaciju i selekciju koriste se različiti postupci u zavisnosti od toga da li je reč o preopterećenju izvoda ili transformatora. U slučaju da se pokušajem transfera opterećenja elementa e' preopteretio element e'' , poziva se ista procedura sa ciljem da rastereti element e'' (procedura sa elementom e'' na mestu (**)). Ukoliko je rasterećenje elementa e'' bilo neuspešno, algoritam nastavlja dalje sa istom topološkom strukturom koja je bila pre pokušaja rasterećenja elementa e'' . Dalji tok procedure zavisi od stanja na izvodu e' u smislu ograničenja. Ako je transfer

sa e' na e'' bio nedovoljan za eliminaciju preopterećenja e' , vrši se naredni pokušaj eliminacije preopterećenja daljim transferom opterećenja pozivom procedure na mestu (***), argumentom e' .

Transferima opterećenja kojima se uzrokuju dalja preopterećenja, pridružena je odgovarajuća topološka interpretacija na kojoj je slikovito prikazan mehanizam generisanja manipulacija, sa ciljem da se prihvati maksimalno mogući iznos ispalog opterećenja.



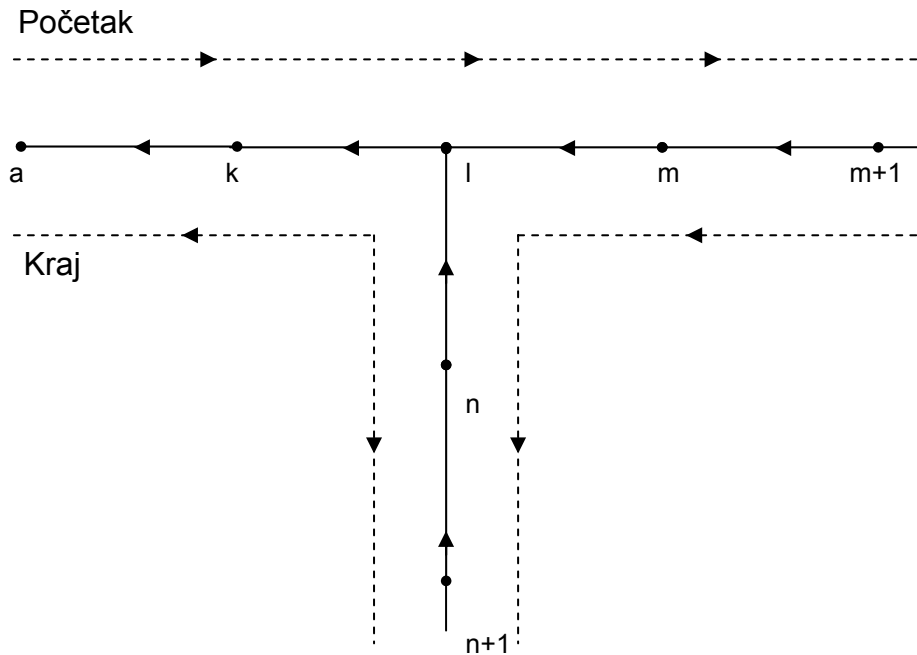
Slika 4.12 Tok algoritma transfera opterećenja u cilju eliminacije preopterećenja

4.4.2.2 Topološka interpretacija algoritma transfera opterećenja

Ciklusu transfera opterećenja odgovara usmereno zakorenjeno stablo nazvano stablo rasterećenja. Korenu tog stabla (čvor a na slici 4.13) odgovara element e_a koji se prilikom prihvata opterećenja čvora q iz nenapojene oblasti preopteretio po pretpostavci, čime započinje ciklus transfera opterećenja, odnosno eliminacije preopterećenja sa elementa e_a . Na slici 4.13 prikazani su samo karakteristični čvorovi i grane jednog stabla rasterećenja koje se generiše transferima opterećenja, izdvajajući one transfere kojima se uzrokuju dalja preopterećenja na elementima. Čvorovi odgovaraju strukturama distributivne mreže neposredno nakon transfera opterećenja, kojima su generisana nova preopterećenja (preopterećenje elementa e'' na slici 4.12), dok granama odgovaraju manipulacije transfera. U tom smislu, ponovni pozivi procedure sa mesta (**) predstavljaju razgranavanje stabla, odnosno formiranje novog čvora i grane stabla rasterećenja. Pozivi procedure sa mesta (***) vrše se kada je iznos priključenog opterećenja sa e' na e'' (na mestu (*)) bio nedovoljan da se eliminiše preopterećenja sa e' , što zahteva dalje manipulacije transfera sa elementa e' , što preglednosti radi nije prikazano na slici 4.13. Međutim, podrazumeva se da svakom čvoru stabla ne može odgovarati skup struktura distributivne mreže u kojima su vršeni transferi opterećenja sa e' na e'' , kojima preopterećenje e' nije eliminisano.

Prilikom svakog poziva procedure transfera sa mesta (**) na slici 4.12, formira se jedan novi čvor stabla rasterećenja, dok se izlascima iz procedure eliminiše jedan čvor tog stabla.

Na slici 4.13 punom linijom označen je jedan deo tog stabla, dok je tok odvijanja tih transfera prikazan isprekidanom linijom.



Slika 4.13 Topološka interpretacija odvijanja procedure transfera opterećenja

Prikazano stablo je zakorenjeno “memorijsko” stablo kojim se pamte informacije o prethodnim prelascima, odnosno o putu dolaska u tekuće stanje. U prikazanoj topološkoj interpretaciji, prelasci imaju sledeće značenja:

- Prelazak iz stanja l u stanje m odgovara pozivu procedure rasterećenja sa mesta (**) u okviru iste procedure prethodno pozvane sa argumentom e_l . Naime e_l se, zbog preuzimanja dela opterećenja sa preopterećenog elementa e_k , preopteretio, te se vrše manipulacije eliminisanja preopterećenja elementa e_l (prethodni poziv), odnosno dalji transferi opterećenja. Treba napomenuti da transferi opterećenja koji ne uzrokuju dalja preopterećenja, ali iznos priključenog opterećenja nije dovoljan za eliminaciju preopterećenja na e' , što vodi ponovnim pozivima algoritma sa mesta (***), nisu posebno istaknuti na slici 4.13. Transferom opterećenja sa e_l , kojim se prvi put naruše ograničenja nekog od susednih elemenata (e_m), generiše se novi čvor stabla rasterećenja,

nakon čega se vrši dalji transfer opterećenja u cilju eliminacije novonastalog preopterećenja, saglasno gore opisanom.

- Prilikom povratka, iz stanja m u stanje l (povratak u proceduru na mestu (**')) moguća su dva slučaja, odnosno dve moguće tekuće strukture mreže:
 - Element e_m je preopterećen, a sve mogućnosti za njegovo rasterećenje iscrpljene. Dalji nastavak procedure transfera opterećenja odvija se na strukturi distributivne mreže koja neposredno pre prvog ulaska u stanje m , jer se manipulacijama transfera sa e_m na e_{m+1} kao i svim narednim, nije eliminisalo preopterećenje elementa e_m . Drugim rečima, transfer opterećenja sa e_l na e_m , u cilju eliminacije preopterećenja na e_l , prouzrokovao je nova preopterećenja koja se daljim manipulacijama nisu mogla eliminisati. Zbog toga se sve manipulacije koje su vršene nakon transfera dela opterećenja sa e_l kojim je prouzrokovano preopterećenje e_m , moraju poništiti.
 - Element e_m uspešno je rasterećen manipulacijama transfera sa e_m na e_{m+1} , sa e_{m+1} na e_{m+2} itd., te se algoritam nastavlja u stanju l sa takvom tekućom strukturom.
- Prema toku algoritma na slici 4.13, sledi ispitivanje opterećenja na elementu e_l . Ako je preopterećenje još uvek prisutno, sledi dalje rasterećenje ponovnim pozivom sa mesta (***), koji dalje uzrokuje poziv sa mesta (**), odnosno kreiranje novog čvora stabla rasterećenja (čvor n na slici 4.13).

Ovakvim algoritmom je omogućeno da se u okviru jednog ciklusa transfer opterećenja, kojem odgovara jedno stablo rasterećenja, transferima opterećenja generišu nova preopterećenja teorijski proizvoljno velikog broja elemenata, jer je otvorena mogućnost da se u narednim transferima (u okviru istog ciklusa) novonastala preopterećenja eliminišu, čime je obezbeđena maksimalna upotreba raspoloživih kapaciteta distributivne mreže, koje je neophodno identifikovati u slučaju teških poremećaja u radu sistema.

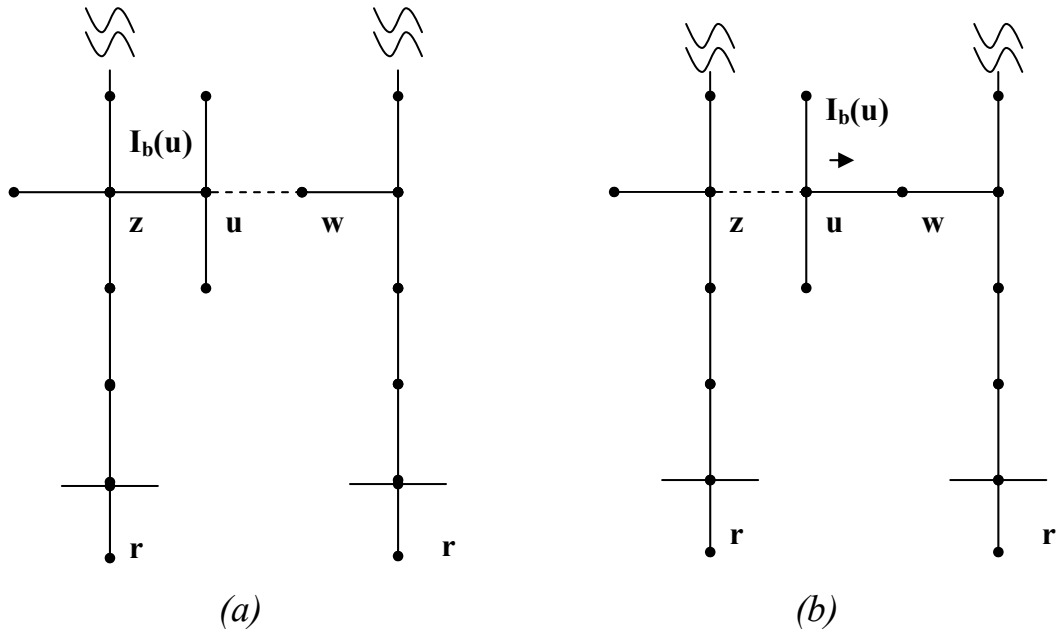
4.4.2.3 Vrednovanje manipulacija transfera opterećenja među izvodima

Prihvatom čvora q je, po pretpostavci, uzrokovano preopterećenje izvoda e_a , što pokreće jedan ciklus transfera opterećenja pozivom procedure sa slike 4.12. Takođe, pretpostavljeno je da ovom ciklusu transfera opterećenja odgovara stablo rasterećenja strukture prikazane slici 4.13, kao i da je sistem u stanju l u kojem je izvod e_l preopterećen.

Skup spojnica (u, w) , čiji čvor u pripada preopterećenom e_l (izvodu čije se preopterećenje pokušava eliminisati transferom opterećenja), a čvor w susednim raspoloživim izvodima, čine skup kandidata K' za transfer opterećenja (slika 4.14):

$$K' = \{(u, w) \mid (u, w \in N_p, (u, w) \in B_l, g_f(u) = e_l, g_f(w) \neq e_l)\} \quad (4.47)$$

Vrednovanje i selekcija spojnica kandidata za transfer opterećenja sa preopterećenog izvoda na susednim, bazira se na proračunima tokova snaga. U tom smislu, svakoj spojnici (u, w) pridružuje se indeks $\beta(u, w)$ kojim se kvantifikuje narušavanje strujnih i naponskih ograničenja na susednom izvodu nakon simulacije transfera opterećenja. Promeni strukture mreže, izvršene uključanjem spojnice (u, w) i isključenjem grane (z, u) , opterećenje $I_b(u)$ grane (z, u) priključuje se sa izvoda e_l na izvod e_m ($g_f(u) = e_l, g_f(w) = e_m$, na slici 4.14).



Slika 4.14 *Transfer opterećenja sa preopterećenog izvoda e_i na izvod e_m realizuje se uključenjem spojnice (u, w) i isključenjem grane (z, u) , odnosno primenom funkcije prethodnika čvora u : $\pi(u) = z$ na slici (a), odnosno $\pi(u) = w$ na slici (b)*

Topološka promena, prelazak na strukturu sa slike 4.14, najlakše se realizuje: vrednost funkcije prethodnika za čvor u iznosi $\pi(u) = z$ na slici 4.14-(a), odnosno $\pi(u) = w$ na slici 4.14-(b). Dakle za pamćenje je dovoljan samo jedan vektor.

Proračun indeksa grane $\beta(u, w)$ i njihov izbor vrši se analogno proračunu indeksa $\alpha(p, q)$ prema relaciji (4.24). U proceduri transfera opterećenja, ti se karakteristični parametri računaju prema formulama:

$$i(u, w) = \frac{I_b(u) + I_b(g_f(u))}{I_f^{\max}}, \quad (4.48)$$

gde je

I_f^{\max} - maksimalno dozvoljeno opterećenje izvoda

$I_b(g_f(u))$ - opterećenje izvoda e_m na slici 4.14-(a)

Dodavanjem opterećenja $I_b(u)$ dobija se buduće opterećenje izvoda e_m na slici 4.14-(b), koje se u relativnim jedinicama računa prema prethodnoj relaciji.

Indeks vrednovanja za nivo opterećenosti koji se pridružuje raspoloživim granama, u tom je slučaju:

$$\beta(u, w) = \min\{i(u, w)\}, \quad (4.49)$$

što ujedno predstavlja i selektovanu granu (u^o, w^o) kojom će se vršiti transfer opterećenja

$$\beta(u^o, w^o) = \beta(u, w) \quad (4.50)$$

Ukoliko je $\beta(u^o, w^o) \leq 1$ transfer opterećenja sa izvoda e_l na izvod e_m ne uzrokuje preopterećenje izvoda e_m , dok u slučaju $\beta(u^o, w^o) > 1$ izvršeni transfer narušava ograničenja na izvodu e_m , što nanovo pokreće proceduru rasterećenja izvoda (rasterećenje izvoda e_m) i kreira novi čvor na stablu rasterećenja izvoda. Da bi se sprečilo rasterećenje izvoda e_m transferom opterećenja sa izvoda e_m na izvod e_l preko grane (u, z) (slika 4.14-(b)), čime bi se izvršila inverzna manipulacija i time prešlo na početnu strukturu sa slike 4.14-(a), spojnica (u, z) se proglašava privremeno neraspoloživom za transfer opterećenja. Pri tome je ista spojnica u drugom pravcu, (spojnica (z, u)), raspoloživa za eventualno potreban dalji transfer opterećenja sa e_l na e_m . Nakon završetka kompletnog ciklusa transfera opterećenja koji je počeo od transfera sa izvoda e_a , sve privremeno neraspoložive spojnice proglašavaju se raspoloživim.

Nakon završetka ciklusa rasterećenja izvoda e_a , prilikom povratka u glavni program, moguća su dva slučaja:

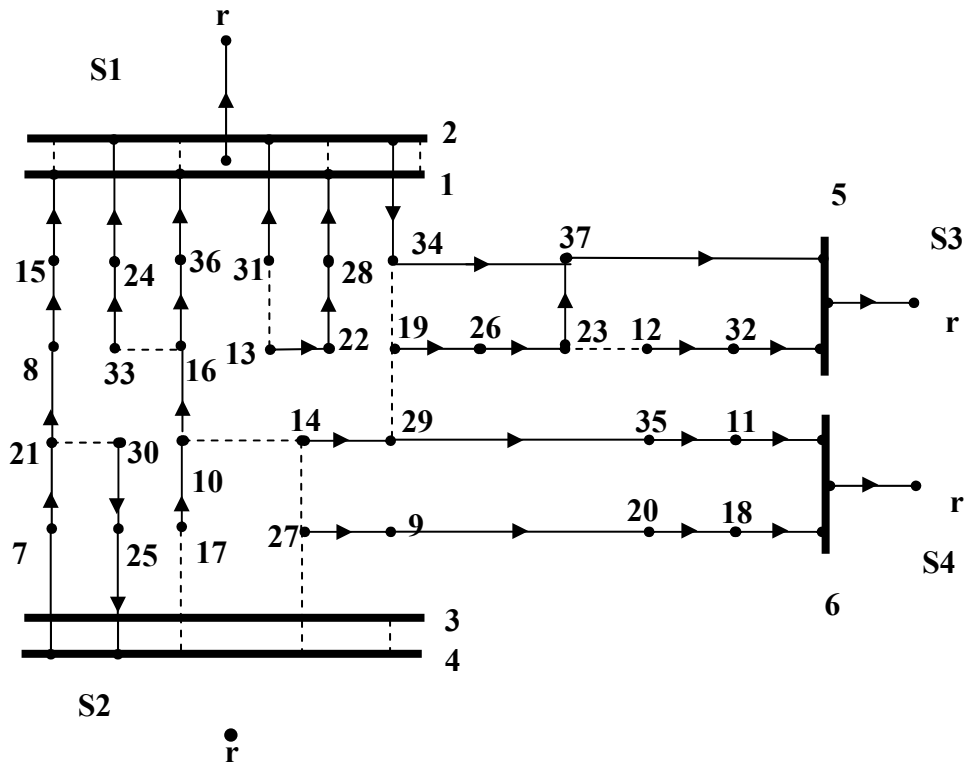
- ograničenja na izvodu e_a zadovoljena su, odnosno, preopterećenje e_a je uspešno eliminisano, nakon čega se vrši dalji prihvata ispalog opterećenja, saglasno gore opisanom postupku.
- preopterećenje je i dalje prisutno na izvodu e_a , usled čega se posmatrani izvod e_a proglašava neraspoloživim u daljem učešću u prihvatu opterećenja u eliminaciji preopterećenja drugih izvoda. Prisutno preopterećenje se ne toleriše, te se prihvata opterećenja čvora q , koji je i uzrokovao preopterećenje izvoda e_a , takođe poništava i čvor q ostaje u nenapojenoj zoni.

4.4.2.4 Vrednovanje manipulacija transfera opterećenja među transformatorima

Prihvata ispalog opterećenja ili transfer opterećenja sa izvoda na izvod, koji se vrši u cilju eliminacije preopterećenja na izvodima, može izazvati preopterećenje distributivnih transformatora, čija je eliminacija zadatak transfera opterećenja među transformatorima.

Procedura transfera opterećenja među transformatorima i izvodima razlikuju se jedino u delu izbora kandidata za transfer, dok se, sa strukturalne tačke gledišta, okviri procedura suštinski ne razlikuju. U tom smislu se proceduri transfera opterećenja među transformatorima može pridružiti odgovarajuće stablo rasterećenja transformatora. Dakle, može se govoriti o jednom od sledećih načina rasterećenja transformatora:

- Eliminacija preopterećenja vrši se razmenom opterećenja među transformatorima koji pripadaju različitim stanicama preko manipulacija na mreži, uz upotrebu pomoćnih sabirnica (ili drugih glavnih sabirnica) preopterećenog transformatora. Upotrebom pomoćnih sabirnica ili drugih glavnih sabirnica, može značajno da se poveća efikasnost manipulacija rasterećenja transformatora. Značaj ovih sabirnica leži u njihovom specifičnom topološkom položaju. Na slici 4.15 prikazana je ideja upotrebe ovih sabirnica u procesu transfera opterećenja.



Slika 4.15 Upotreba sistema sabirnica u proceduri transfere opterećenja među transformatorima

- Ukoliko su gore navedene mogućnosti iscrpljene, prelazi se na transfer opterećenja među transformatorima izmenom izvoda ili delova izvoda među transformatorima, ali ovog puta manipulacijama na mreži.

4.5 Provera predloženog načina rešavanja i algoritma na test mreži

Predloženi način rešavanja obnavljanja pogona distributivnog sistema, kao i algoritma, biće proveren na simuliranoj mreži distributivnog sistema. Prikazana mreža je naponskog nivoa 10 kV i sastoji se od 468 čvorova, 608 grana i 6 elektroenergetskih postrojenja X/10 kV. Sabirnice 2, 4, 6 i 10 u normalnom pogonu nisu pod naponom. Punim linijama označene su opterećene deonice, a isprekidanim linijama deonice koje nisu opterećene.

Opterećenja transformatora data su u tabeli 4.3.

Tabela 4.3 *Aktuelna i nominalna opterećenja transformatora koja se imaju neposredno pre kvara*

Transformacija br.	1	3	5	7	8	9
Aktuelno opterećenje (A)	415	587	809	793	841	945
Nominalno opterećenje (A)	675	700	900	1000	1100	1300

4.5.1 Provera predloženog načina rešavanja obnavljanja pogona

Način rešavanja restauracije distributivnih sistema biće testiran na navedenoj mreži. Maksimalna opterećenja 10kV izvoda jesu 200A.

Primarni cilj u toku ovog testa jeste ponovno napajanje svih potrošače u oblasti koja je ostala bez napajanja električne energije. Sekundarni cilj je da se napajanje

potrošača obavi sa minimalnim brojem prekidačkih akcija. Simuliran je ispad trafostanice SS3. Pretpostavlja se da sabirnice nisu pogođene kvarom, tako da i one mogu da učestvuju u obnavljanju pogona distributivnog sistema.

Rezultati prikazani na slikama 7.1, 7.2, 7.3, 7.4 i 7.5 (u prilogu 7.1) pokazuju da predloženi način rešavanja problema obnavljanja pogona daje zadovoljavajuće rezultate, ukoliko ima dovoljno kapaciteta na izvodima i transformatorima susednih trafostanica.

Topološka struktura mreže data je na slikama 7.1, 7.3 i 7.4. Finalna topološka struktura posle obnavljanja pogona distributivnog sistema, koja je prikazana na slici 7.4, dobijena je sledećim prekidačkim akcijama:

- Uključenje – ukupan broj uključenja je 18, od kojih je
 - 4 (22%) izvedeno daljinski na izvodima u trafostanicama
 - 10 (56%) izvedeno ručno između nenapojene oblasti i susednih trafostanica
 - 4 (22%) izvedeno ručno unutar nenapojene oblasti
- Isključenje – ukupan broj prekidačkih akcija je 16, od kojih je
 - 10 (62,5%) izvedeno daljinski na izvodima u trafostanicama
 - 6 (32,5%) izvedeno ručno unutar nenapojene oblasti

Prema navedenim rezultatima, ukupno 14 prekidačkih akcija obavljeno je u trafostanici. Navedene prekidačke akcije daljinski su kontrolisane, tako da su vreme i troškovi potrebni za njihovo izvođenje minimalni.

Ukupno 10 prekidačkih akcija obavljeno je između nenapojene oblasti i susednih trafostanica. Navedene prekidačke akcije su neizbežne, jer obezbeđuju napajanje energijom oblasti koje su pogođene kvarom.

Prostor za dalje smanjivanje broja prekidačkih akcija može biti tražen u preostalih 10 prekidačkih akcija (4 uključenja i 6 isključenja), ali se mora naglasiti da su rezultati zadovoljavajući, s obzirom na to da je broj smanjenja prekidačkih akcija sekundarni cilj predloženog načina rešavanja.

Takođe, struktura za 8, od ukupno 15 izvoda u oblasti pogođenoj kvarom, ostala je nepromenjena, u poređenju sa strukturom pre kvara, osim što je bilo potrebno jedno uključenje za povezivanje sa susednom transformatorskom stanicom i jedno isključenje da bi se obezbedila radijalna konfiguracija mreže (na primer, uključenje prekidača između čvorova 126 i 127 i isključenje prekidača između čvorova 24 i 5 na izvodu broj 24 koje se može videti na slikama 7.1 i 7.4 respektivno). Nepromenjena struktura navedenih izvoda vodi ka smanjenju broja prekidačkih akcija i ona je direktan rezultata načina rešavanja i usvojene željene konfiguracije posle obnavljanja pogona sistema, koja je ranije opisana. Za željenu konfiguraciju nenapojene oblasti posle obnavljanja pogona, usvojena je ista konfiguracija koja je bila pre kvara.

Na slikama 7.2 i 7.5 prikazana su opterećenja po granama i trafostanicama distributivne mreže.

Kako nije bilo preopterećenih elemenata u toku obnavljanja pogona, ista je obavljena samo pomoću dela algoritma u kojem se nalazi predloženi način rešavanja restauracije. U slučaju pojave preopterećenja u toku obnavljanja pogona, aktiviraće se i ostali delovi algoritma (rasterećenje, transfer opterećenja itd.). Rezultati simulacije mreže sa pojavom preopterećenja, detaljnije su analizirani u sledećem poglavlju.

4.5.2 Provera algoritma za rešavanje obnavljanja pogona

Provera kompletnog algoritma za rešavanje obnavljanja pogona obavlja se na istoj mreži kao i provera predloženog načina rešavanja. Na mreži su namerno stvoreni uslovi koji će dovesti do preopterećenja pojedinih elemenata distributivne mreže, u toku nalaženja rešenja obnavljanja pogona. Na ovaj način dolazi do automatskog aktiviranja dela algoritma koji rešava problem preopterećenja dela mreže pomoću transfera opterećenja. Rezultati opisanog algoritma mogu se videti na odgovarajućim grafičkim prikazima mreže gradskog distributivnog sistema.

Pogonska struktura mreže neposredno pre kvara, grafički je prikazana na slici 7.6 (a) (sa numerisanim čvorovima) i slici 7.6 (b) (sa opterećenjima po pojedinim granama). Kreće se od pretpostavke da je mreža neposredno pre kvara i ispada postrojenja iz pogona, imala optimalnu pogonsku strukturu.

Na slici 7.7 prikazana je pogonska struktura mreže sa numerisanim čvorovima, posle ispada transformatora na sabirnicama broj 5.

Rezultati obnavljanja pogona predloženim algoritmom prikazani su na slici 7.11 (a) (numeracija čvorova) i na slici 7.11 (b) (opterećenje po granama). Na navedenim slikama uočljivo je da nisu svi potrošači, koji su usled kvara ostali bez električne energije, ponovo snabdeveni istom. Treba naglasiti da je namerno usvojen kapacitet deonica od 150 A (u realnosti ovi kapaciteti imaju veće vrednosti) čime je, takođe namerno, uslovljeno to da izvestan broj potrošača ostane bez električne energije. Na ovaj način se mogu najbolje prezentovati performanse predloženog algoritma, u smislu iscrpnog iznalaženja rešenja za obnavljanje pogona. Bez napajanja električnom energijom ostali su čvorovi 193, 194, 195, 196, 197, 198, 199 i 200. Opterećenja transformacija posle iznalaženja rešenja predloženim algoritmom, data su u tabeli 7.4. Upoređivanjem početne i krajnje pogonske strukture distributivnog sistema, mogu se uočiti sledeće karakteristike predloženog algoritma:

- Upotrebom sabirnica 5 i 6, ispale transformacije SS 3, omogućen je pristup samom centru ispalog konzuma. Na slici 7.11 (a) i 7.11 (b) može se videti da je sabirnicama 5 prihvaćeno 130 A, a sabirnicama 6, 111 A. Ova činjenica još

jednom potvrđuje značaj upotrebe sabirnica transformacije u kvaru, u smislu poboljšanja efikasnosti prilikom iznalaženja rešenja za obnavljanje pogona.

- Upotreba pomoćnih sabirnica postrojenja, koja njima raspolažu, u cilju rasterećenja transformatora, prikazana je na primeru rasterećenja transformacije 3. Naime, u toku prihvata opterećenja, došlo je do preopterećenja na sabirnicama 3. Kako preko sabirnica 3, ranijim akcijama rasterećenja koje su se odvijale pomoću transformacije 8 i izvoda 68 i koje su prilikom zadnjeg rasterećenja preuzele čvor 23, nije moguće dalje rasterećenje između transformacija po sistemu čvor po čvor, algoritmom je razmotrena mogućnost preuzimanja opterećenja jednog izvoda transformacije 3. To je i učinjeno povezivanjem čvora 23 na sabirnice 4 i čvora 16 na sabirnice 4, takođe. Ovim prekidačkim akcijama je transformacija 8 preko izvoda 68 preuzela dodatno opterećenja od 41 A, što predstavlja ukupno opterećenja izvoda 16. Za isti iznos je rasterećena transformacija 3 i omogućen je dalji prihvata opterećenja nenapojenog područja. Očigledno je da bi bez učestvovanja sabirnica 4 u procesu rasterećenja transformacije 3, broj nenapojenih potrošača u konačnom rešenju bio znatno veći.
- Iz niza slučajeva rasterećenja preopterećenih izvoda, zanimljivo je posmatrati slučaj rasterećenja izvoda 49. Trenutak preopterećenja izvoda 49 prikazan je na slici 7.8 (a) (numeracija čvorova) i slici 7.8 (b) (opterećenja po granama). Sa slika se vidi da je, prilikom preuzimanja poslednjeg opterećenja jednog od nenapojenih potrošača, došlo do preopterećenja izvoda 49 (158 A). Razmatranjem mogućnosti rasterećenja izvoda 49 preko nekog od susednih izvoda, izbor pada na susedni izvod sa najvećim kapacitetom (u ovom slučaju to je izvod 48). Isključenjem grane 270-271 i uključenjem grane 270-267, dobija se struktura na slici 7.9 (a) (numeracija čvorova) i 7.9 (b) (opterećenje po granama). Ove prekidačke akcije uspešno su rasteretile preopterećeni izvod 49, ali su izazvale novo preopterećenje na izvodu 48 (168 A). Istom logikom, kao prilikom preopterećenja izvoda 49, rasterećuje se izvod 48 isključenjem 267-268 i uključenjem 267-58, što je prikazano na slici 7.10 (a) (numeracija čvorova) i 7.10 (b) (opterećenje po granama). I ovim prekidačkim akcijama uzrokuje se novo preopterećenje, ali ovog puta izvoda 58 (158 A). Još jednom se koristi isti postupak i akcijama isključenja 245-246 i uključenja 246-247,

uspešno se rasterećuje izvod 58 i, ovog puta, ne izaziva se novo preopterećenje, što je prikazano na slici 7.11 (a) i slici 7.11 (b), koje ujedno predstavljaju i rezultujuću strukturu distributivnog sistema posle iznalaženja rešenja za obnavljanje pogona. Na ovaj način je uspešno rasterećen prvobitno preopterećen izvod 49.

- Poređenjem slike 7.6 (a) i slike 7.11 (a) može se uočiti i primer rasterećenja transformatora, razmenom prekidačkih akcija između izvoda susednih transformatora. Ovaj vid rasterećenja ilustrovan je rasterećenjem transformacije 7 pomoću transformacije 9 isključenjem 266-385 i uključenjem 385-386.

Tabela 4.3 *Aktuelna i nominalna opterećenja transformatora koja se imaju po završetku iznalaženja obnavljanja pogona predloženim algoritmom*

Transformacija br.	1	3	5	7	8	9
Aktuelno opterećenje (A)	599	691	0	983	1037	989
Nominalno opterećenje (A)	675	700	900	1000	1100	1300

Najzad, kako je čitav algoritam rađen sa težnjom za što manjim brojem manipulacija, bitno je, posle dobijenih rezultata obnavljanja pogona prikazanih na slici 7.11 (a) i 7.11 (b), odrediti kojim manipulacijama treba doći do željene pogonske strukture distributivnog sistema. Algoritam je tako koncipiran da ulazni i izlazni podaci o stanju na mreži koja se analizira, relativno jednostavno definiše neophodne prekidačke akcije koje dovode mrežu u stanje koje je dobijeno predloženim algoritmom. Dakle, pomoću algoritma, izdvojene su prekidačke akcije za prelazak mreže iz stanja sa slike 7.6 (a) u stanje 7.11 (a), koje su prikazane u tabeli 4.4 i tabeli 4.5:

Tabela 4.4 *Prekidačke akcije isključenja koje su potrebne za prelaz mreže iz stanja prikazanog na slici 7.6 (a) u stanje mreže prikazanog na slici 7.11 (a)*

Isključenja		
Redni broj	čvor1	čvor2
1	16	3
2	23	3
3	24	5
4	25	5
5	28	5
6	30	5
7	31	5
8	32	5
9	33	5
10	35	5
11	37	5
12	38	5
13	132	131
14	193	188
15	194	201
16	195	194
17	196	197
18	197	198
19	198	199
20	199	200
21	200	28
22	202	203
23	211	31
24	226	225
25	229	228
26	234	233
27	246	245
28	267	268
29	270	271
30	274	102
31	385	266
32	463	98

Tabela 4.5 *Prekidačke akcije uključanja koje su potrebne za prelaz mreže iz stanja prikazanog na slici 7.6 (a) u stanje mreže prikazanog na slici 7.11 (a)*

Uključenja		
Redni broj	čvor 1	čvor 2
1	132	133
2	162	224
3	175	333
4	222	226
5	229	230
6	234	239
7	239	315
8	242	308
9	182	183
10	98	27
11	202	207
12	209	243
13	31	270
14	204	257
15	58	267
16	267	270
17	246	247
18	463	79
19	385	386
20	274	275
21	16	4
22	23	4
23	28	6
24	31	6
25	32	6
26	33	6
27	126	127

Prihvata opterećenja i transferi opterećenja u predloženom algoritmu tako su urađeni da praktično ne dozvoljavaju pojavu nepotrebnih prekidačkih akcija. Izuzetak čine dva slučaja i oba su prikazana na slici 7.11. Za oba slučaja je napisan dodatni deo algoritma koji vrši selekciju nepotrebnih manipulacija na mreži i eliminiše ih iz konačnog spiska prekidačkih akcija. Sledi više detalja o oba slučaja:

- Prvi deo mreže u kojoj se javljaju nepotrebne manipulacije, isključivo je vezan za nenapojeno područje i u principu predstavlja nepotrebna isključenja deonica koje ionako ostaju bez napona. Poređenjem slike 7.6 i slike 7.11, očigledno je da su manipulacije isključenja na deonicama 194-195, 196-197, 197-198, 198-199 i 199-200 nepotrebne. Algoritam dodatno filtrira prekidačke akcije, identifikuje ih i eliminiše. Na taj način se dobijaju rezultati prikazani u tabeli 4.6 i tabeli 4.7.
- U delu mreže koji nije pogođen kvarom, usled transfera opterećenja sa preopterećenih izvoda, jedini slučaj kada se javlja problem nepotrebnih manipulacija jeste upravo slučaj rasterećenja izvoda 49, o kojem je već bilo reči. Za ovaj slučaj karakteristično je to što u krajnjoj topološkoj strukturi preuzimanje opterećenja ispalog konzuma ne preuzima prvobitno za to određen izvod 49, već izvod 58. Usled prethodnog rasterećenja izvoda 49 isključenjem 102-274 i uključenjem 274-275, sleduje da su navedene prekidačke akcije nepotrebne. Dakle, algoritam analizira prvobitno određene izvode za prihvata opterećenja, zatim vrši identifikaciju istih, ukoliko neki od njih nije odigrao ulogu koja mu je namenjena, i vrši eliminaciju nepotrebnih prekidačkih akcija. Na taj način dobijaju se rezultati prikazani u tabeli 4.8 i tabeli 4.9.

Sada se može govoriti o konačnoj pogonskoj strukturi distributivnog sistema posle izvršene restauracije (obnavljanja pogona). Prekidačke akcije su jasno definisane, što opet jasno definiše buduću strukturu mreže, koja je i prikazana na slici 7.12 (a) (numeracija čvorova) i slici 7.12 (b) (opterećenja po granama).

Tabela 4.6 *Prekidačke akcije isključenja posle prvog filtriranja manipulacija*

Isključenja		
Redni broj	čvor 1	čvor 2
1	16	3
2	23	3
3	24	5
4	25	5
5	28	5
6	30	5
7	31	5
8	32	5
9	33	5
10	35	5
11	37	5
12	38	5
13	132	131
14	193	188
15	194	201
16	200	28
17	202	203
18	211	31
19	226	225
20	229	228
21	234	233
22	246	245
23	267	268
24	270	271
25	274	102
26	385	266
27	463	98

Tabela 4.7 *Prekidačke akcije uključanja posle prvog filtriranja manipulacija*

Uključenja		
Redni broj	čvor 1	čvor 2
1	132	133
2	162	224
3	175	333
4	222	226
5	229	230
6	234	239
7	239	315
8	242	308
9	182	183
10	98	27
11	202	207
12	209	243
13	31	270
14	204	257
15	58	267
16	267	270
17	246	247
18	463	79
19	385	386
20	274	275
21	16	4
22	23	4
23	28	6
24	31	6
25	32	6
26	33	6
27	126	127

Tabela 4.8 *Prekidačke akcije isključenja posle drugog filtriranja manipulacija.*
Ove prekidačke akcije ujedno predstavljaju i konačne prekidačke akcije isključenja.

Isključenja		
Redni broj	čvor 1	čvor 2
1	16	3
2	23	3
3	24	5
4	25	5
5	28	5
6	30	5
7	31	5
8	32	5
9	33	5
10	35	5
11	37	5
12	38	5
13	132	131
14	193	188
15	194	201
16	200	28
17	202	203
18	211	31
19	226	225
20	229	228
21	234	233
22	246	245
23	267	268
24	270	271
25	385	266
26	463	98

Tabela 4.9 *Prekidačke akcije uključanja posle drugog filtriranja manipulacija.*
Ove prekidačke akcije ujedno predstavljaju i konačne prekidačke akcije uključanja.

Uključenja		
Redni broj	čvor 1	čvor 2
1	132	133
2	162	224
3	175	333
4	222	226
5	229	230
6	234	239
7	239	315
8	242	308
9	182	183
10	98	27
11	202	207
12	209	243
13	31	270
14	204	257
15	58	267
16	267	270
17	246	247
18	463	79
19	385	386
20	16	4
21	23	4
22	28	6
23	31	6
24	32	6
25	33	6
26	126	127

Zahvaljujući predloženom načinu dodeljivanja koeficijenata granama, što umnogome utiče na finalnu strukturu analiziranog distributivnog sistema, može se primetiti da se obnavljanje pogona u nenapojenom delu mreže odvijalo upravo onako kako je i bilo zamišljeno. Pogonska struktura neposredno pre kvara, maksimalno je uvažavana. Kao rezultat ovakvog pristupa, može se primetiti da je broj manipulacija na taj način sveden na najmanju moguću meru, na prvom mestu. Osim grana koje inicijalno povezuju napojenu i nenapojenu oblast, a za koje moraju biti angažovane ekipe na terenu kako bi se prekidačke akcije dobijene proračunom sprovele u delo, algoritmom su favorizovane manipulacije u postrojenju koje je ostalo bez napajanja, čime je redukovan broj prekidačkih akcija koje bi trebalo sprovesti na terenu. Na ovaj način smanjuje se broj angažovanih ekipa na terenu ili se favorizuje prekidačka oprema sa daljinskom kontrolom, ukoliko je distributivni sistem poseduje. Eventualnim dodeljivanjem koeficijenata granama distributivnog sistema na neki drugi način, postoji mogućnost da se favorizuju neke druge prekidačke akcije, što ostavlja mogućnosti za povoljnije rezultate od ovde dobijenih.

5 ZAKLJUČAK

Predložen je efikasan način obnavljanja pogona distributivnih sistema posle teških poremećaja. Primarni cilj predloženog načina rešavanja jeste minimizacija ukupne snage koja treba da se ponovo obezbedi potrošačima u nenapojenom području, uz uvažavanje heurističkih pravila. Sekundarni cilj je minimizacija broja prekidačkih akcija potrebnih da se primarni cilj realizuje. Postizanjem primarnog i sekundarnog cilja, direktno se utiče na smanjenje prosečnog vremena trajanja prekida napajanja električnom energijom u toku godine, smanjenje troškova obnavljanja pogona, kao i opšte poboljšanje performansi distributivnog sistema.

Novi način rešavanja obnavljanja pogona zasniva se na Primovom algoritmu za nalaženje minimalnog drveta. Kako bi se Primov algoritam prilagodio potrebi obnavljanja pogona u distributivnim sistemima, urađena je prvo modifikacija Primovog algoritma, a zatim i njegova primena. Predloženim načinom rešavanja obnavljanja pogona distributivnih sistema, napravljeni su sledeći iskoraci:

- Prilikom modelovanja nenapojenog područja distributivnog sistema, deonicama su dodeljeni težinski koeficijenti u zavisnosti od toga da li deonice nisu bile opterećene pre kvara, jesu bile opterećene pre kvara i kao i to da li imaju daljinski kontrolisanu prekidačku opremu (na primer, izvodi u trafostanicama).
- Ključna vrednost predloženog načina rešavanja jeste ta što se može definisati željena pogonska struktura dela mreže koji je ostao bez električne energije posle obnavljanja pogona.

Predloženi način rešavanja može biti dobra osnova za dalja istraživanja obnavljanja pogona prilikom teških kvarova u gradskim distributivnim sistemima, kao i doprinos daljem razvoju problematike obnavljanja pogona distributivnih sistema, uključujući samostalno obnavljanje pogona sistema koje treba da bude jedna od karakteristika inteligentnih mreža.

Kompletan algoritam za rešavanje obnavljanja pogona sastoji se od predloženog efikasnog načina rešavanja obnavljanja pogona i transfera opterećenja sa izvoda i transformatora koji se preoptereće u toku nalaženja rešenja za obnavljanje pogona. Praktično je izvršeno razlaganje problema na dva potproblema. Potproblem prihvata opterećenja i potproblem transfera opterećenja koji se naizmenično rešavaju, što omogućuje maksimalno angažovanje raspoloživih kapaciteta distributivne mreže. Takođe, napisan je algoritam koji dopunjuje i smanjuje broj potrebnih prekidačkih akcije. Na ovaj način izbegnute su nepotrebne prekidačke akcije, čime se eliminiše nedostatak predloženog algoritma.

6 LITERATURA

- [1] C. W. Gellings, “*The Smart Grid: Enabling Energy Efficiency and Demand Response*”, Published by The Fairmont Press, Inc., Distributed by Taylor & Francis Ltd., 2009.
- [2] “*IEC Smart Grid Standardization Roadmap*”, SMB Smart Grid Strategic Group (SG3), Jun 2010.
- [3] “*Strategic Deployment Document for Europe’s Electricity Networks of the Future*”, Smart Grids, European Technology Platform, April 2010.
- [4] “*Position Paper on Smart Grids*”, European Regulators Group for Electricity and Gas (ERGEG) - Conclusions Paper, Jun 2010.
- [5] “*NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards*”, Office of the National Coordinator for Smart Grid Interoperability, National Institute of Standards and Technology , U.S. Department of Commerce, January 2010.
- [6] “*Strategic Research Agenda for Europe’s Electricity Networks of the Future*”, Smart Grids, European Technology Platform, April 2007.
- [7] J. R. Roncero, “*Integration is Key to Smart Grid Management*”, *CIREN Seminar*, Frankfurt, 23-24 June 2008, Paper No. 9.
- [8] M. A. Ortega-Vasquez, D. S. Kirschen, “*Assessing the Impact of Wind Power Generation on Operating Costs*”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 1, No. 3, December 2010, pp. 295-301.
- [9] Y. Yuan, Z. Li, K. Ren, “*Modeling Load Redistribution Attacks in Power Systems*”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 1, No. 3, December 2010, pp. 295-301.
- [10] N. Amjady, F. Keynia, H. Zareipour, “*Short-Term Load Forecast of Microgrids by a New Bilevel Prediction Strategy*”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 1, No. 3, December 2010, pp. 286-294.

-
- [11] B. D. Russell, C. L. Benne r, "Intelligent Systems for Improved Reliability and Failure Diagnosis in Distribution Systems", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 1, No. 1, June 2010, pp. 48-56.
- [12] J. Ma, P. Zhang, H. J. Fu, B. Bo, Z. Y. Dong, "Application of Phasor Measurement Unit on Locating Disturbance Source for Low Frequency Oscillation", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 1, No. 3, June 2010, pp. 340-346.
- [13] A. S. Bouhouras, G. T. Andreou, D. P. Labridis, A. K. Bakirtzis, "Selective Automation Upgrade in Distribution Networks Towards a Smarter Grid", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 1, No. 3, December 2010, pp. 278-285.
- [14] P. Zhang, F. Li, N. Bhat, "Next-Generation Monitoring, Analysis, and Control for the Future Smart Control Center", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 1, No. 2, September 2010, pp. 186-192.
- [15] A. Molderink, V. Bakker, M. G. C. Bosman, J. L. Hurink, G. J. M. Smit, "Management and Control of Domestic Smart Grid Technology", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 1, No. 2, September 2010, pp. 109-119.
- [16] A. R. Metke, R. L. Ekl, "Security Technology for Smart Grid Networks", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 1, No. 1, June 2010, pp. 99-107.
- [17] G. T. Heydt, "The next Generation of Power Distribution Systems", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 1, No. 3, December 2010, pp. 225-235.
- [18] T. T. Kim, H. V. Poor, "Strategic Protection against Data Injection Attacks in Power Grids", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 2, No. 2, Jun 2011, pp. 326-333.
- [19] M. Chertkov, F. Pan, M. G. Stepanov, "Predicting Failures in Power Grids: the Case of Static Overloads", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 2, No. 1, March 2011, pp. 162-172.
- [20] P. Mahat, Z. Chen, B. Bak-Jensen, C. L. Bak, "A simple Adaptive Overcurrent Protection of Distribution Systems With Distributed Generation", IEEE Transactions on Smart Grid, the article is accepted and will be issued in future issue of the journal.
- [21] M. Shahraeini, M. H. Javidi, M. S. Ghazizadeh, "Comparison between Communication Infrastructure of Centralized and Decentralized Wide Area Measurements Systems", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 2, No. 1, March 2011, pp. 206-211.
-

-
- [22] W. Su, M. Y. Chou, "Performance Evaluation of an EDA-Based Large-Scale Plug-In Hybrid Electric Vehicle Charging Algorithm", IEEE Transactions on Smart Grid, the article is accepted and will be issued in future issue of the journal.
- [23] S. Y. Su, C. N. Lu, R. F. Chang, G. Gutierrez-Alcaraz, "Distributed Generation Interconnection Planning: A Wind Power Case Study", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 2, No. 1, March 2011, pp. 181-189.
- [24] M. Erol-Kantarci, H. T. Mouftah, "Wireless Sensor Networks for Cost-Efficient Residential Energy Management in the Smart Grid", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 2, No. 2, June 2011, pp. 314-325.
- [25] T. M. Chen, J. C. Sanchez-Aarnoutse, J. Buford, "Petri Net Modeling of Cyber-Physical Attacks on Smart Grid", IEEE Transactions on Smart Grid, the article is accepted and will be issued in future issue of the journal.
- [26] F. Zavoda, "Sensors and IEDs Required by Smart Distribution Applications", ENERGY 2011: The First International Conference on Smart Grids, Green Communications and IT Energy-aware Technologies, AIRIA 2011, pp. 120-125.
- [27] D. Shirmohammadi, H. W. Hong, A. Semlien, G. H. Luo, "A Compensation Based Power Flow Method For Weakly Meshed Distribution and Transmission Networks", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, No. 2, May 1988, pp. 753-762.
- [28] C. S. Cheng, D. Shirmohammadi, "A Three Phase Power Flow Method for Real Time Distribution Systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 2, May 1995, pp. 671-679.
- [29] R. D. Zimmerman, H. D. Chiang, "Fast Decoupled Power Flow for Unbalanced Radial Distribution Systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 4, November 1995, pp. 2045-2052.
- [30] T. H. Chen, Y. L. Chang, "Integrated Models of Distribution Transformers and Their Loads for Three Phase Power Flow Analysis", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, January 1996, pp. 507-513.
- [31] T. M. Lin, Y. S. Su, H. C. Chin, J. H. Teng, "Three Phase Unbalanced Distribution Power Flow Solution with Minimum Data Preparation", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 14, No. 3, August 1999, pp. 1178-1183.
-

- [32] Y. Zhu, K. Tomsovic, “*Adaptive Power Flow Method for Distribution Systems with Dispersed Generation*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 17, No. 3, July 2002, pp. 822-827.
- [33] R. M. Ciric, A. P. Feltrin, L. F. Ochoa, “*Power Flow in Four Wire Distribution Networks – General Approach*”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, No. 4, November 2003, pp. 1283-1290.
- [34] Z. Wang, F. Chen, J. Li, “*Implementing Transformer Nodal Admittance Matrices Into Backward/Forward Sweep Based Power Flow Analysis for Unbalanced Distribution Systems*”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 4, January 2004, pp. 1831-1836.
- [35] P. R. Bijwe, G. K. V. Raju, “*Fuzzy Distribution Power Flow for Weakly Meshed Systems*”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 21, No. 4, November 2006, pp. 1645-1652.
- [36] M. Z. Kamh, R. Iravani, “*Unbalanced Model and Power Flow Analysis of Microgrids and Active Distribution Systems*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 25, No. 4, October 2010, pp. 2851-2858.
- [37] M. F. Al Hajri, M. E. El Hawary, “*Exploiting the Radial Distribution Structure in Developing a Fast and Flexible Radial Power Flow for Unbalanced Three Phase Networks*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 25, No. 1, January 2010, pp. 378-389.
- [38] K. Aoki, H. Kuwabara, T. Satoh, M. Kanezashi, “*Outage State Optimal Load Allocation by Automatic Sectionalizing Switches Operation in Distribution Systems*”, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. PWRD-2, No. 4, October 1987, pp. 1177-1185.
- [39] K. Aoki, T. Satoh, M. Itoh, H. Kuwabara, M. Kanezashi, “*Voltage Drop Constrained Restoration of Supply by Switch Operation in Distribution Systems*”, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 3, No. 3, July 1988, pp. 1267-1274.
- [40] C. C. Liu, S. J. Lee, S. S. Venkata, “*An Expert System Operational Aid for Restoration and Loss Reduction of Distribution System*”, IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 3, No. 2, May 1988, pp. 619-626.
- [41] K. Aoki, H. Kuwabara, T. Satoh, M. Kanezashi, “*An Efficient Algorithm for Load Balancing of Transformers and Feeders by Switch Operation in Large Scale Distribution Systems*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 4, October 1988, pp. 1865-1872.

-
- [42] F. F. Wu, A. Monticelli, “*Analytical Tool for Power System Restoration – Conceptual Design*”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, No. 1, February 1988, pp. 10-16.
- [43] A. M. Stanković, M. S. Čalović, “*Graph Oriented Algorithm for the Steady-State Security Enhancement in Distribution Networks*”, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 4, No. 1, January 1989, pp. 539-544.
- [44] A. L. Morelato, A. Monticelli, “*Heuristic Search Approach to Distribution System Restoration*”, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 4, No. 4, October 1989, pp. 2235-2241.
- [45] C. E. Lin, Y. W. Huang, H. L. Chow, C. L. Huang, “*A Distribution System Outage Dispatch by Data Base Method with Real Time Revision*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 1, January 1989, pp. 515-523.
- [46] E. N. Dialunas, D. G. Michos, “*Interactive Modeling of Supply Restoration Procedures in Distribution System Operation*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 3, July 1989, pp. 1847-1854.
- [47] K. Aoki, K. Nara, M. Itoh, T. Satoh, H. Kuwabara, “*A New Algorithm for Service Restoration in Distribution Systems*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 3, July 1989, pp. 1832-1839.
- [48] E. N. Dialynas, D. G. Michos, “*Probabilistic Assessment of Service Restoration In Power Distribution Systems*”, IEEE Transaction in Power Delivery, Vol. 6, No. 4, October 1991, pp. 1891-1898.
- [49] J. S. Wu, K. L. Tomsovic, C. S. Chen, “*A Heuristic Search Approach to Feeder Switching Operation for Overload, Faults, Unbalanced Flow and Maintenance*”, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 6, No. 4, October 1991, pp. 1579-1585.
- [50] D. S. Kirschen, T. L. Volkman, “*Guiding a Power System Restoration with an Expert System*”, IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 6, No. 2, May 1991, pp. 558-566.
- [51] D. Shirmohammadi, “*Service Restoration in Distribution Networks via Network Reconfiguration*”, IEE Transaction on Power Delivery, Vol. 7, No. 2, April 1992, pp. 952-958.

-
- [52] H. Kim, Y. Ko, K. H. Yung, "Algorithm of Transferring the Load of the Faulted Substation Transformer Using the Best-First Search Method", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No. 3, July 1992, pp. 1434-1442.
- [53] Y. Y. Hsu, H. M. Huang, H. C. Kuo, S. K. Peng, C. W. Chang, K. J. Chang, H. S. Yu, C. E. Chow, R. T. Kuo, "Distribution System Service Restoration Using a Heuristic Search Approach", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No. 2, April 1992, pp. 734-740.
- [54] H. C. Kuo, Y. Y. Hsu, "Distribution System Load Estimation and Service Restoration Using a Fuzzy Set Approach", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 4, October 1993, pp. 1950-1957.
- [55] C. Ucak, A. Pahwa, "An Analytical Approach for Step-By-Step Restoration of Distribution Systems Following Extended Outages", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 9, No. 3, July 1994, pp. 1717-1723.
- [56] N. D. R. Sarma, S. Ghosh, K. S. P. Rao, M. Srinivas, "Real Time Service Restoration in Distribution Networks – Practical Approach", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 4, October 1994, pp. 2064-2070.
- [57] N. D. R. Sarma, V. C. Prasad, K. S. P. Rao, V. Sankar, "A New Network Reconfiguration Technique for Service Restoration in Distribution Networks", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 4, October 1994, pp. 1936-1942.
- [58] Y. Y. Hsu, H. C. Kuo, "A Heuristic Based Fuzzy Reasoning Approach for Distribution System Service Restoration", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 2, April 1994, pp. 948-953.
- [59] T. E. Lee, Y. M. Tzeng, C. S. Chen, M. S. Kang, C. C. Lee, J. S. Wu, S. S. Liu, Y. M. Chen, "The Application of AM/FM System to Distribution Contingency Load Transfer", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No. 2, April 1995, pp. 1126-1135.
- [60] T. Nagata, H. Sasaki, R. Yokoyama, "Power System Restoration by Joint Usage of Expert System and Mathematical Programming Approach", IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 10, No. 3, August 1995, pp. 1473-1479.
- [61] V. S. Devi, D. P. S. Gupta, G. Anandalingam, "Optimal Restoration of Power Supply in Large Distribution System in Developing Countries", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No. 1, January 1995, pp. 430-438.
-

-
- [62] L. H. Fink, K. L. Liou, C. C. Liu, "From Generic Restoration Actions to Specific Restoration Strategies", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 2, May 1995, pp. 745-752.
- [63] Y. Y. Hsu, H. M. Huang, "Distribution Service Restoration Using the Artificial Neural Network Approach and Pattern Recognition Method", IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, Vol. 146, No. 3, May 1995, pp. 251-256.
- [64] H. J. Lee, Y. M. Park, "A Restoration Aid Expert System for Distribution Substations", Transaction on Power Delivery, Vol. 11, No. 4, October 1996, pp. 1765-1770.
- [65] M. J. Chow, L. S. Taylor, M. S. Chow, "Time of Outage Restoration Analysis in Distribution Systems", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 3, July 1996, pp. 1652-1658.
- [66] J. S. Wu, C. C. Liu, K. L. Liou, R. F. Chu, "A Petri Net Algorithm for Scheduling of Generic Restoration Actions", IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 12, No. 1, February 1997, pp. 69-76.
- [67] Q. Zhou, D. Shirmohammadi, W. H. E. Liu, "Distribution Feeder Reconfiguration for Service Restoration and Load Balancing", IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 12, No. 2, May 1997, pp. 724-729.
- [68] W. M. Lin, H. C. Chin, "Preventive and Corrective Switching for Feeder Contingencies in Distribution Systems with Fuzzy Set Algorithm", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 4, October 1997, pp. 1711-1716.
- [69] S. Toune, H. Fudo, T. Genji, Y. Fukuyama, Y. Nakanishi, "A Reactive Tabu Search for Service Restoration in Distribution Systems", IEEE International Conference on Evolutionary Computation, 4th-11th May 1998, Anchorage, Alaska, pp. 1-7.
- [70] K. N. Miu, H. D. Chiang, B. Yuan, G. Darling, "Fast Service Restoration for Large-Scale Distribution Systems with Priority Customers and Constraints", IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 13, No. 3, August 1998, pp. 789-795.
- [71] C. Y. Teo, "Conventional and Knowledge Based Approach in Fault Diagnosis and Supply Restoration for Power Network", IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 13, No. 1, February 1998, pp. 8-14.
- [72] A. Augugliaro, L. Dusonchet, E. R. Sanseverino, "Service Restoration in Compensated Distribution Networks Using a Hybrid Genetic Algorithm", Electric Power Systems Research, 46 (1998), pp. 59-66.
-

-
- [73] W. M. Lin, H. C. Chin, "A New Approach for Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Reduction and Service Restoration", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 3, July 1998, pp. 870-875.
- [74] J. S. Wu, "A Petri-Net Algorithm for Multiple Contingencies of Distribution System Operation", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, No. 3, August 1998, pp. 1164-1171.
- [75] S. J. Lee, S. I. Lim, B. S. Ahn, "Service Restoration of Primary Distribution Systems Based on Fuzzy Evaluation of Multi-Criteria", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, No. 3, August 1998, pp. 1156-1163.
- [76] E. Laverty, N. N. Schulz, "An Improved Algorithm to Aid in Post-Heat Storm Restoration", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 14, No. 2, May 1999, pp. 446-451.
- [77] A. Augugliaro, L. Dusonchet, E. R. Sanseverino, "Multiobjective Service Restoration in Distribution Networks Using an Evolutionary Approach and Fuzzy Sets", Electrical Power & Energy Systems, 22 (2000), pp. 103-110.
- [78] D. S. Popović, R. M. Ćirić, "A Multi-Objective Algorithm for Distribution Network Restoration", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 3, July 1999, pp. 1134-1141.
- [79] Y. T. Hsiao, C. Y. Chien, "Enhancement of Restoration Service in Distribution Systems Using a Combination Fuzzy-GA Method", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, No. 4, November 2000, pp. 1394-1400.
- [80] K. N. Miu, H. D. Chiang, R. J. McNulti, "Multi-Tier Service Restoration Through Network Reconfiguration and Capacitor Control for Large Scale Radial Distribution Networks", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, No. 3, August 2000, pp. 1001-1007.
- [81] K. L. Butler, N. D. R. Sarma, V. R. Prasad, "Network Reconfiguration for Service Restoration in Shipboard Distribution Systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 16, No. 4, November 2001, pp. 653-661.
- [82] R. A. Fischer, A. S. Laakonen, N. N. Schulz, "A General Polling Algorithm Using a Wireless AMR System for Restoration Confirmation", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 16, No. 2, May 2001, pp. 312-316.
-

-
- [83] A. Augugliaro, L. Dusonchet, E. R. Sanseverino, “*Evolving Non-Dominant Solutions in Multiobjective Service Restoration for Automated Distribution Networks*”, *Electric Power Systems Research*, 59 (2001), pp. 185-195.
- [84] M. Amin, “*Toward Self-Healing Energy Infrastructure Systems*”, *IEEE Computer Application in Power*, January 2001, pp. 20-28.
- [85] R. E. Brown, A. P. Hanson, “*Impact of Two-Stage Service Restoration on Distribution Reliability*”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 16, No. 4, November 2001, pp. 624-629.
- [86] M. R. Irving, W. P. Luan, J. S. Daniel, “*Supply Restoration in Distribution Networks Using a Genetic Algorithm*”, *Electrical Power & Energy Systems*, 24 (2002), pp. 447-457
- [87] M. R. Irving, W. P. Luan, J. S. Daniel, “*Genetic Algorithm for Supply Restoration and Optimal Load Shedding in Power System Distribution Network*”, *IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 149, No. 2, March 2002, pp. 145-151.
- [88] P. Wang, R. Billinton, “*Reliability Cost/Worth Assessment of Distribution Systems Incorporating Time-Varying Weather Conditions and Restoration Resources*”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 17, No. 1, January 2002, pp. 260-265.
- [89] S. Toune, H. Fudo, T. Genji, Y. Fukuyama, Y. Nakanishi, “*Comparative Study of Modern Heuristic Algorithms to Service Restoration in Distribution Systems*”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 17, No. 1, January 2002, pp. 173-181.
- [90] C. S. Chen, C. H. Lin, H. Y. Tsai, “*A Rule-Based Expert System with Colored Petri Net Models for Distribution System Service Restoration*”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 17, No. 4, November 2002, pp. 1073-1080.
- [91] C. S. Chen, Y. L. Ke, J. S. Wu, M. S. Kang, “*Application of Petri Nets to Solve Distributive System Contingency by Considering Customer Load Patterns*”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 17, No. 2, May 2002, pp. 417-423.
- [92] T. Genji, Y. Fukuyama, T. Oomori, K. Miyazato, N. Hayashi, “*Service Restoration in Distribution Systems Aiming Higher Utilization Rate of Feeders*”, *MIC 2003: The Fifth Metaheuristic International Conference*, 25th-28th August 2003, Kyoto, Japan, pp. 6.1-6.6.
-

-
- [93] C. M. Huang, "Multiobjective Service Restoration of Distribution Systems Using Fuzzy Cause-Effect Network", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, No. 2, May 2003, pp. 867-874.
- [94] D. Popovic, Z. Popovic, "Distribution Network Restoration Supply Based on Fuzzy Risk Management", 17th International Conference of Electricity Distribution, CIRED, Barcelona 12th-15th May 2003, Session 3, Paper No. 26.
- [95] M. Megdiche, Y. Besanger, J. Aupied, R. Garnier, N. Hadjsaid, "Reliability Assessment of Distribution Systems With Distributed Generation Including Fault Location and Restoration Process", 17th International Conference of Electricity Distribution, CIRED, Barcelona 12th-15th May 2003, Session 4, Paper No. 74.
- [96] Y. Deng, L. Cai, Y. Ni, "Algorithm for Improving the Restorability of Power Supply in Distribution Systems", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, No. 4, October 2003, pp. 1497-1502.
- [97] D. J. Shin, J. O. Kim, T. K. Kim, J. B. Choo, C. Singh, "Optimal Service Restoration and Reconfiguration of Network Using Genetic Tabu Algorithm", Electric Power Systems Research, 71 (2004), pp. 145-152.
- [98] M. S. Lee, J. T. Lim, "Restoration Strategy for Power Distribution Networks Using Optimal Supervisory Control", IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, Vol. 151, No. 3, May 2004, pp. 367-372.
- [99] W. Li, P. Wang, Z. Li, Y. Liu, "Reliability Evaluation of Complex Radial Distribution Systems Considering Restoration Sequence and Network Constraints", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, No. 2, April 2004, pp. 753-758.
- [100] Y. L. Ke, "Distribution Feeder Reconfiguration for Load Balancing and Service Restoration by Using G-Net Interference Mechanism", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, No. 3, July 2004, pp. 1426-1433.
- [101] K. L. Butler-Pury, N. D. R. Sarma, "Self-Healing Reconfiguration for Restoration of Naval Shipboard Power Systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 2, May 2004, pp. 754-762.
- [102] D. S. Popović, Z. N. Popovic, "A Risk Management Procedure for Supply Restoration in Distribution Networks", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.19, No.1, February 2004, pp. 221-228
-

-
- [103] V. H. Chen, M. S. Tsai, H. L. Kuo, "Distribution System Restoration Using the Hybrid Fuzzy-Grey Method", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 20, No. 1, February 2005, pp. 199-205.
- [104] J. Rodrigo, A. Rodriguez, A. Vargas, "Fuzzy-Heuristic Methodology to Estimate the Load Restoration Time in MV Networks", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 20, No. 2, May 2005, pp. 1095-1102.
- [105] I. Watanbe, I. Kurihara, "A Genetic Algorithm for Optimizing Switching Sequence of Service Restoration", 15. Power Systems Computation Conference (PSCC), Liege, Session 8, Paper 6, August 2005, pp. 1-7.
- [106] M. M. Nordman, M. Lehtonen, "An Agent Concept for Managing Electrical Distribution Network", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 2, April 2005, pp. 696-703.
- [107] S. Jadid, A. Kazemi, M. Yousefi, "Backtracking Search Method for the Optimal Restoration of Distribution System During Cold Load Pickup", 5th WSEAS International Conference on Power Systems and Electromagnetic Compatibility, Corfu, Greece, 23th-25th August, 2005, pp. 194-199.
- [108] S. I. Lim, S. J. Lee, M. S. Choi, D. J. Lim, B. N. Ha, "Service Restoration Methodology for Multiple Fault Case in Distribution Systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.21, No.4, November 2006, pp. 1638-1644.
- [109] S. I. Lim, S. J. Lee, M. S. Choi, D. J. Lim, D. H. Park, "Restoration Index in Distribution Systems and Its Application to System Operation", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 21, No. 4, November 2006, pp. 1966-1971.
- [110] E. Carpaneto, G. Chicco, A. Prunotto, "Reliability of Reconfigurable Distribution Systems Including Distributed Generation", 9th International Conference of Probabilistic Methods Applied in Power Systems, KTH, Stockholm, Sweden, 11th-15th Jun 2006.
- [111] Y. Kumar, B. Das, J. Sharma, "Genetic Algorithm for Supply Restoration in Distribution System with Priority Customers", 9th International Conference of Probabilistic Methods Applied in Power Systems, KTH, Stockholm, Sweden, 11th-15th Jun, 2006-05-020.
- [112] D. Sljivac, S. Nikolovski, Z. Kovac, "Distribution Network Restoration Using Sequential Monte Carlo Approach", 9th International Conference of Probabilistic Methods Applied in Power Systems, KTH, Stockholm, Sweden, 11th-15th Jun, 2006, pp. 1-6.
-

- [113] E. M. Kalinovski, M. T. A. Steiner, C. Carnieri, N. H. Mussi, C. Gulin, “*The Problem of Restoration of Distribution Networks: a Heuristic Method*”, IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security, Vol. 7, No. 3, March 2007, pp. 104-111.
- [114] S. Khushalani, J. M. Solanki, N. N. Schulz, “*Optimized Restoration of Unbalanced Distribution Systems*”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 22, No. 2, May 2007, pp. 624-630.
- [115] C. L. Moreira, F. O. Resende, J. A. P. Lopes, “*Using Low Voltage MicroGrids for Service Restoration*”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 22, No. 1, February 2007, pp. 395-403.
- [116] S. D. J. McArthur, E. M. Davidson, V. M. Catterson, A. L. Dimeas, N. D. Hatziargyriou, F. Ponci, T. Funabashi, “*Multi-Agent Systems for Power Engineering Application – Part I: Concepts, Approaches and Technical Challenges*”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 22, No. 4, November 2007, pp. 1743-1752.
- [117] S. D. J. McArthur, E. M. Davidson, V. M. Catterson, A. L. Dimeas, N. D. Hatziargyriou, F. Ponci, T. Funabashi, “*Multi-Agent Systems for Power Engineering Application – Part II: Technologies, Standards, and Tools for Building Multi-Agents Systems*”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 22, No. 4, November 2007, pp. 1753-1759.
- [118] I. S. Baxevanos, D. P. Labridis, “*Software Agents Situated in Primary Distribution Networks: A Cooperative System for Fault and Power Restoration Management*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 22, No. 4, October 2007, pp. 2378-2385.
- [119] J. M. Solanki, S. Khushalani, N. N. Schulz, “*A Multi-Agent Solution to Distribution System Restoration*”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 22, No. 3, August 2007, pp. 1026-1034.
- [120] A. Ahuja, S. Das, A. Pahwa, “*An AIS-ACO Hybrid Approach for Multi-Objective Distribution System Restoration*”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 22, No. 3, August 2007, pp. 1101-1111.
- [121] R. E. Perez-Guerrero, G. T. Heydt, “*Viewing the Distribution Restoration Problem as the Dual of the Unit Commitment Problem*”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 23, No. 2, May 2008, pp. 807-808.

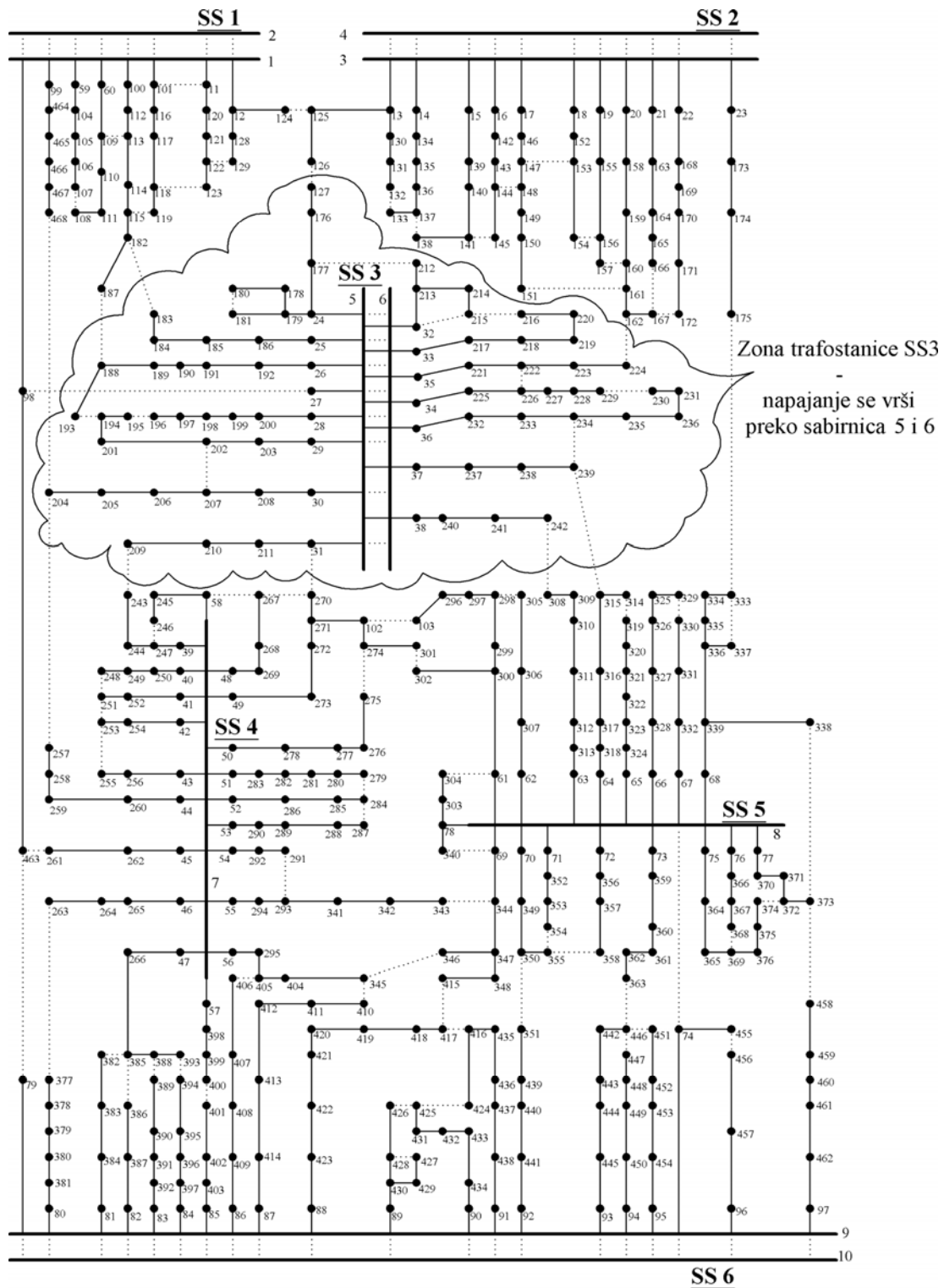
-
- [122] R. E. Perez-Guerrero, G. T. Heydt, “*Distribution System Restoration via Subgradient-Based Lagrangian Relaxation*”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 23, No. 3, August 2008, pp. 1162-1169.
- [123] R. E. Perez-Guerrero, G. T. Heydt, N. J. Jack, B. K. Keel, A. R. (Cas) Castelhana, “*Optimal Restoration of Distribution Systems Using Dynamic Programming*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23, No. 3, July 2008, pp. 1589-1596.
- [124] M. S. Tsai, “*Development of an Object-Oriented Service Restoration Expert System with Load Variations*”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 23, No. 1, February 2008, pp. 219-225.
- [125] Y. Kumar, B. Das, J. Sharma, “*Multiobjective, Multiconstraint Service Restoration of Electric Power Distribution System with Priority Customers*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.23, No.1, January 2008, pp. 261-270.
- [126] I. H. Lim, Y. I. Kim, H. T. Lim, M. S. Choi, S. Hong, S. J. Lee, S. I. Lim, S. W. Lee, B. N. Ha, “*Distributed Restoration System Applying Multi-Agent in Distribution Automation System*”, The work supported by Next Generation Power Technology Center and by the development program of Intelligent Distribution Management System of Ministry of Commerce, Korea, IEEE 2008, pp. 1-7.
- [127] D. S. Popović, E. E. Boskov, “*Advanced Fault Management as a Part of Smart Grid Solution*”, CIRED Seminar 2008: Smart Grids for Distribution, 23th-24th Jun 2008, Frankfurt, Germany.
- [128] K. S. Kumar, T. Jayabarathi, “*Optimal Power System Restoration and Reconfiguration in Distribution Circuit Using BFAM and BPSO*”, Electromagnetic Analysis & Applications, 2009, 3: pp. 163–169.
- [129] T. T. H. Pham, Y. Besanger, N. Hadjsaid, “*New Challenges in Power System Restoration with Large Scale of Dispersed Generation Insertion*”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 24, No. 1, February 2009, pp. 398-406.
- [130] N. S. Vadivoo, S. M. R. Slochanal, “*Distribution System Restoration Using Genetic Algorithm with Distributed Generation*”, Modern Applied Science, Vol. 3, No. 4, April 2009, pp. 98-110.

-
- [131] C. Ucak, “*Distribution System Restoration with Multiple Supplies after Extended Outages*”, ELECO 99 – International Conference on Electrical and Electronic Engineering, E01.114/A9-01, April 2009, pp. 194-198.
- [132] C. M. Huang, C. T. Hsieh, Y. C. Huang, Y. S. Wang, “*A Fast Restoration Strategy in Distribution Systems Using an Enhanced Differential Evolution Approach*”, International Journal of Emerging Electric Power Systems, Vol. 11, Issue 3, 2010, Article 4.
- [133] J. Liu, H. Cheng, X. Shi, J. Xu, “*A Tabu Search Algorithm for Fast Restoration of Large Area Breakdown in Distribution Systems*”, Energy and Power Engineering, 2010, pp. 1–5.
- [134] V. Kumar, R. Kumar H. C., I. Gupta, H. O. Gupta, “*DG Integrated Approach for Service Restoration Under Cold Load Pickup*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 25, No. 1, January 2010, pp. 398-406.
- [135] W. H. Chen, “*Quantitative Decision-Making Model for Distribution System Restoration*”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 25, No. 1, February 2010, pp. 313-321.
- [136] J. M. Solanki, S. K. Solanki, N. Schulz, “*Multi-Agent Based Reconfiguration for Restoration of Distribution Systems with Distributed Generation*”, Integrated Computer-Added Engineering, 17 (2010), pp. 331-346.
- [137] W. H. Chen, C. T. Li, “*Performance Quantification for Distribution System Restoration*”, Journal of the Chinese Institute of Engineers, Vol. 33, No. 4, pp. 563-572 (2010).
- [138] M. Uspensky, I. Kyzrodev, “*Power Supply Restoration in Distributive Networks*”, Reliability: Theory and Application (RT&A), No.2 (21), (Vol. 2) June 2011, pp. 72–84.
- [139] Y. Xu, W. Liu, “*Novel Multiagent Based Load Restoration Algorithm for Microgrids*”, IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 2, No. 1, March 2011, pp. 152-161.
- [140] M. R. Kleinberg, K. Miu, H. D. Chiang, “*Improving Service Restoration of Power Distribution Systems through Load Curtailment of In-Service Customers*”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 26, No. 3, August 2011, pp. 1110-1117.
- [141] Y. Oualmakran, J. Melendez, S. Heraiz, M. Lopez-Perea, E. Gonzalez, “*Survey on Knowledge Based Methods to Assist Fault Restoration in Power Distribution Networks*”, International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ), Las Palmas de Grand Canaria (Spain), 13th-15th April 2011.

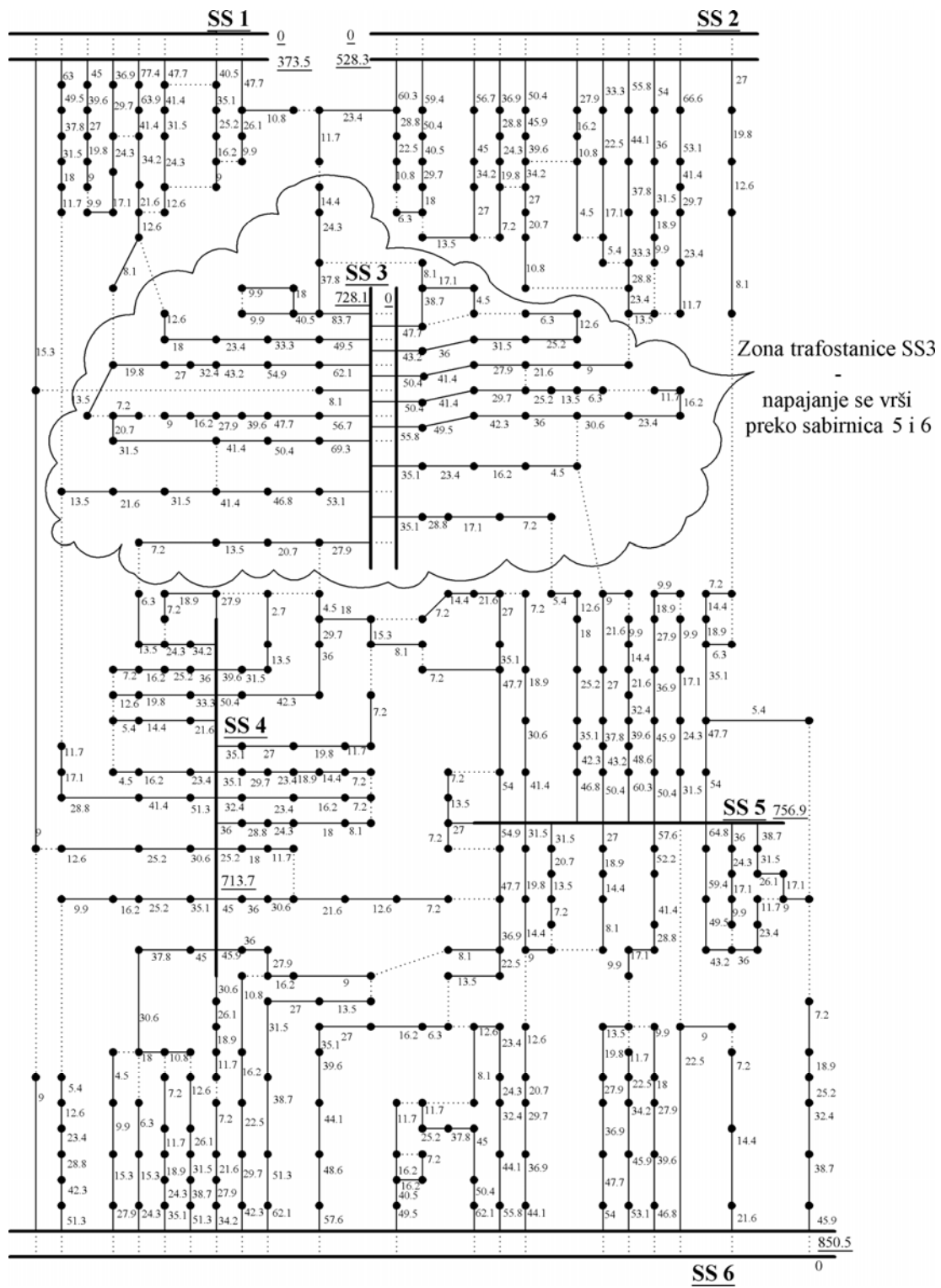
- [142] S.Dimitrijevic, N. Rajakovic, “*An innovative approach for solving the restoration problem in distribution networks*”, *Electric Power Systems Research*, 81 (2011), pp. 1961-1972.
- [143] B. C. Bansal, “*Optimization Methods for Electric Power Systems: An Overview*”, *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, Vol. 2, Issue 1, 205, Article 1021.
- [144] K. Y. Lee, M. A. El-Sharkawi, “*Modern Heuristic Optimization Techniques*”, A John Wiley & Sons Inc. Publication, 2008.
- [145] T. H. Cormen, C. E. Leiserson, R. L. Rivest, C. Stein, “*Introduction to Algorithms*”, Third Edition. MIT Press, 2009, Section 23.2: The algorithms of Kruskal and Prim, pp. 631–638.

7 PRILOZI

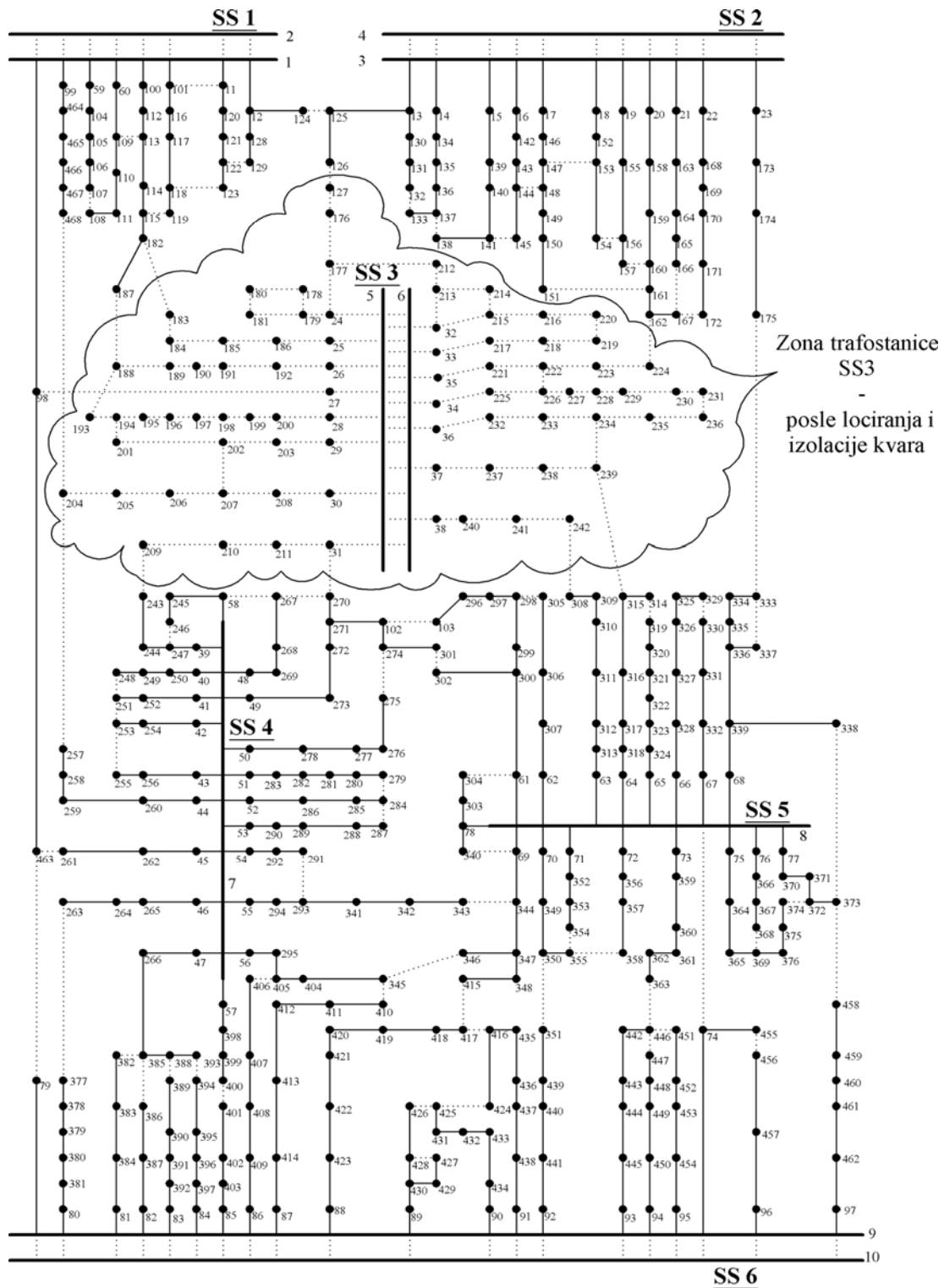
7.1 Provera predloženog načina rešavanja obnavljanja pogona



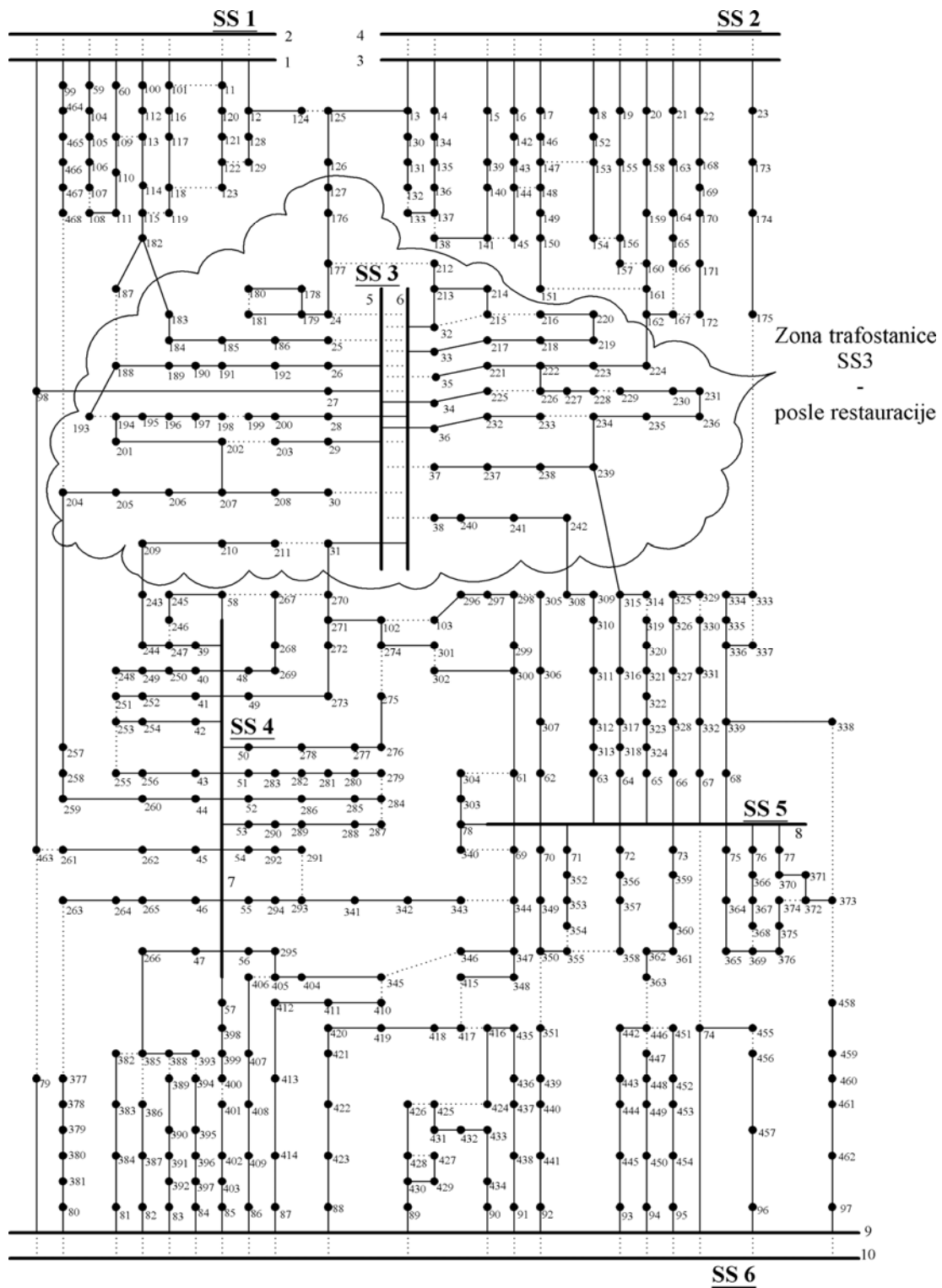
Slika 7.1 Pogonska struktura distributivnog sistema neposredno pre kvara sa numeracijom čvorova



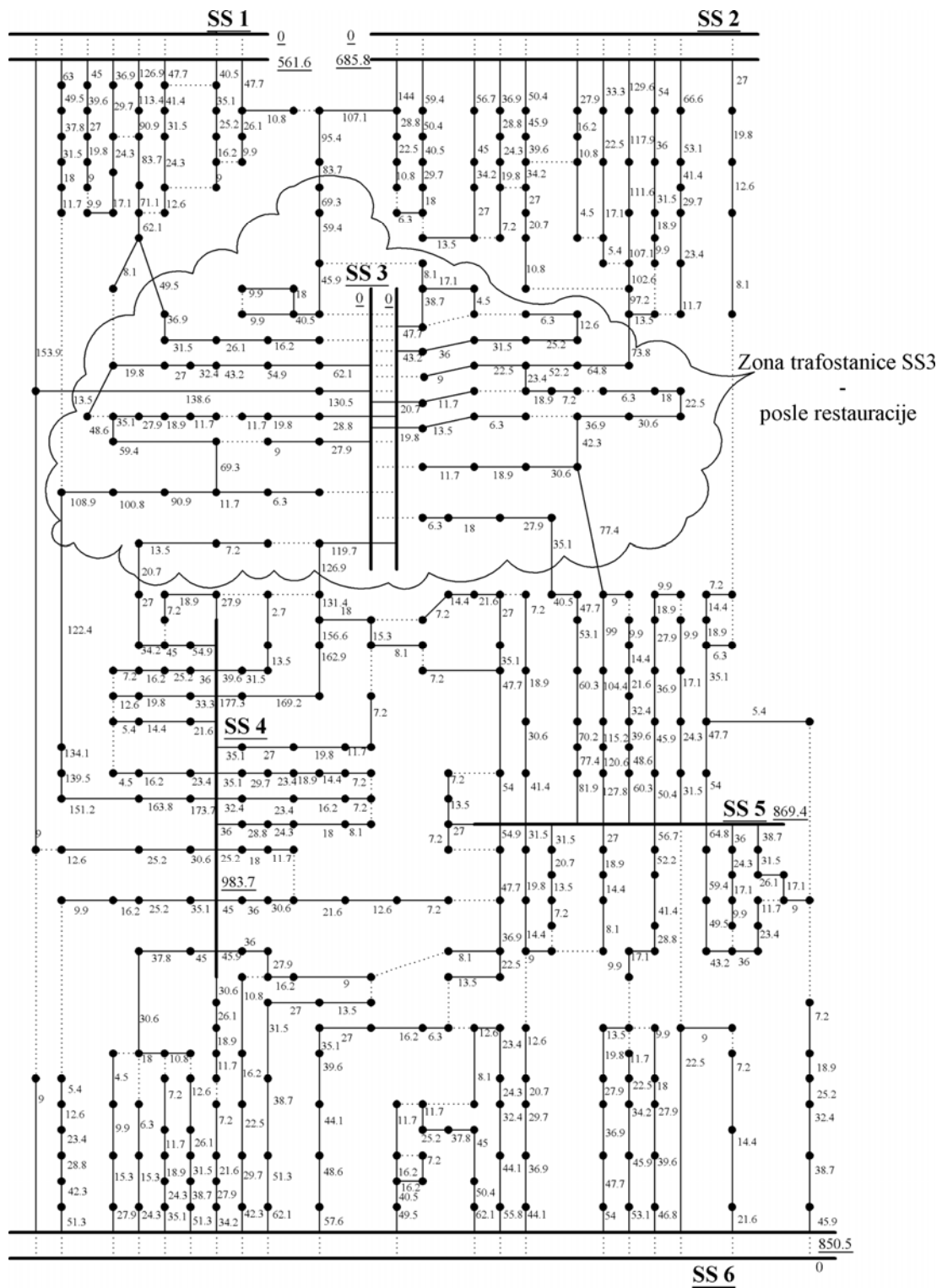
Slika 7.2 Opterećenje distributivnog sistema neposredno pre kvara



Slika 7.3 Pogonska struktura distributivnog sistema neposredno posle kvara

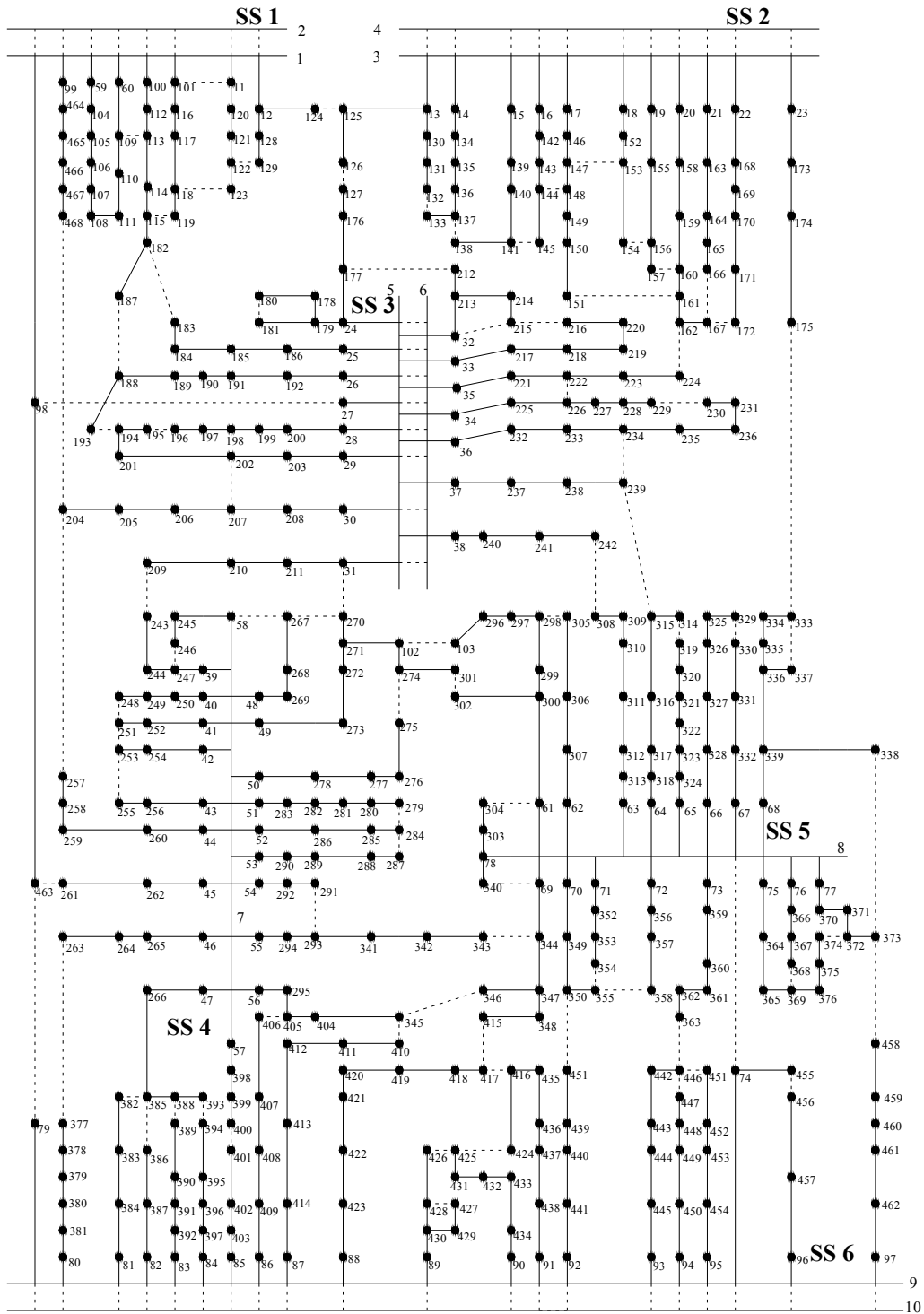


Slika 7.4 Pogonska struktura distributivnog sistema posle obnavljanja pogona

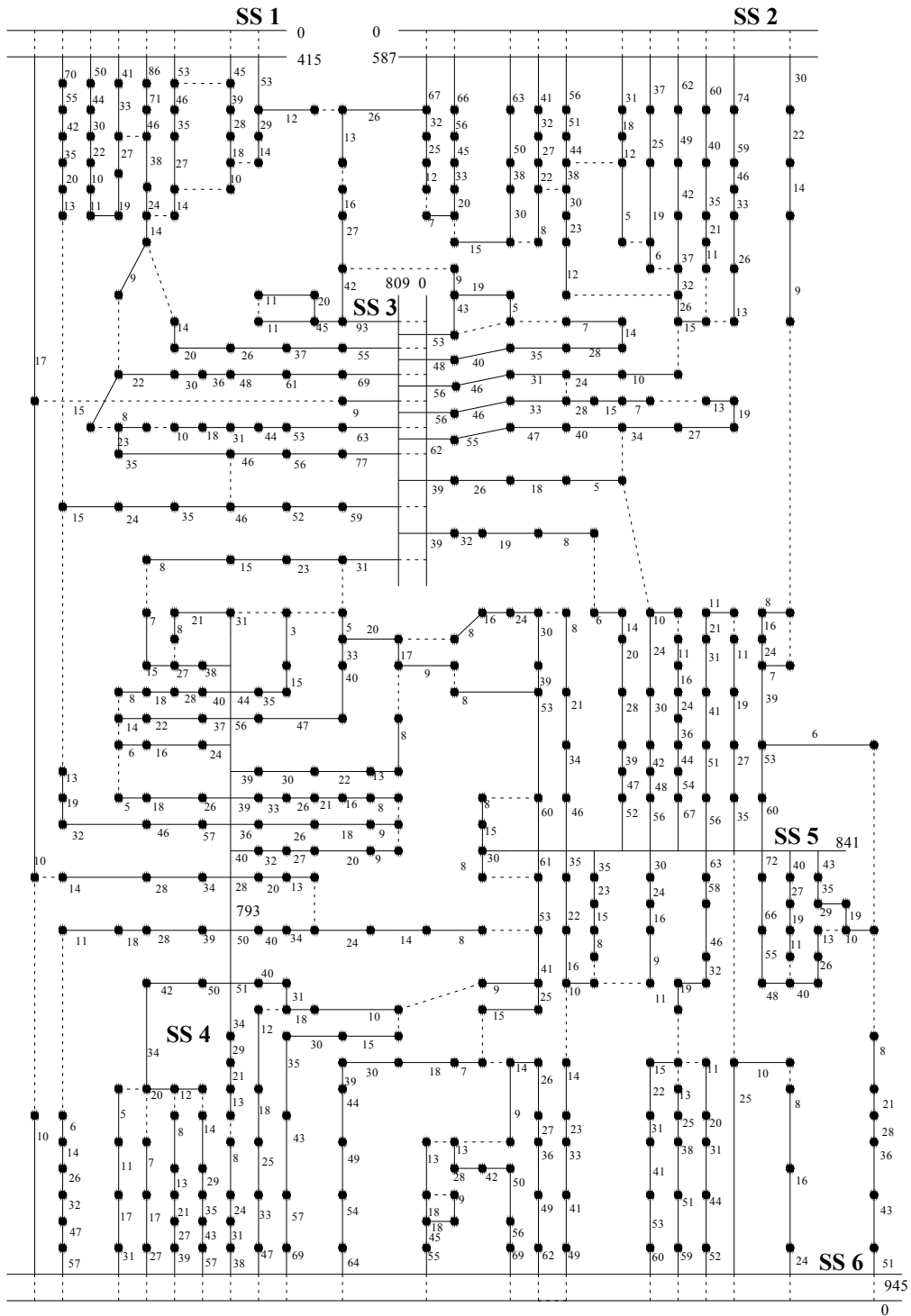


Slika 7.5 Opterećenje distributivnog sistema posle obnavljanja pogona

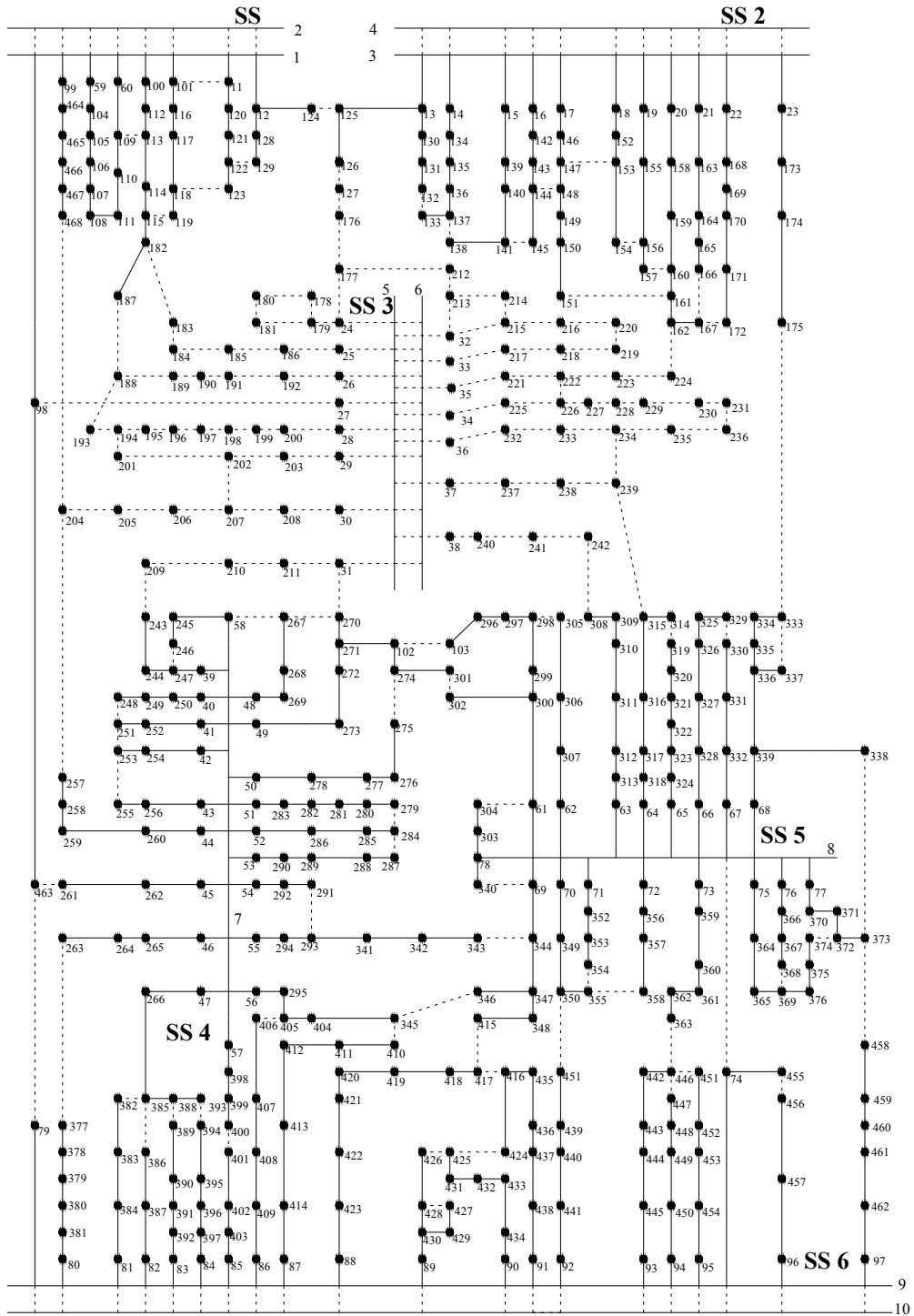
7.2 Provera algoritma za rešavanje obnavljanja pogona



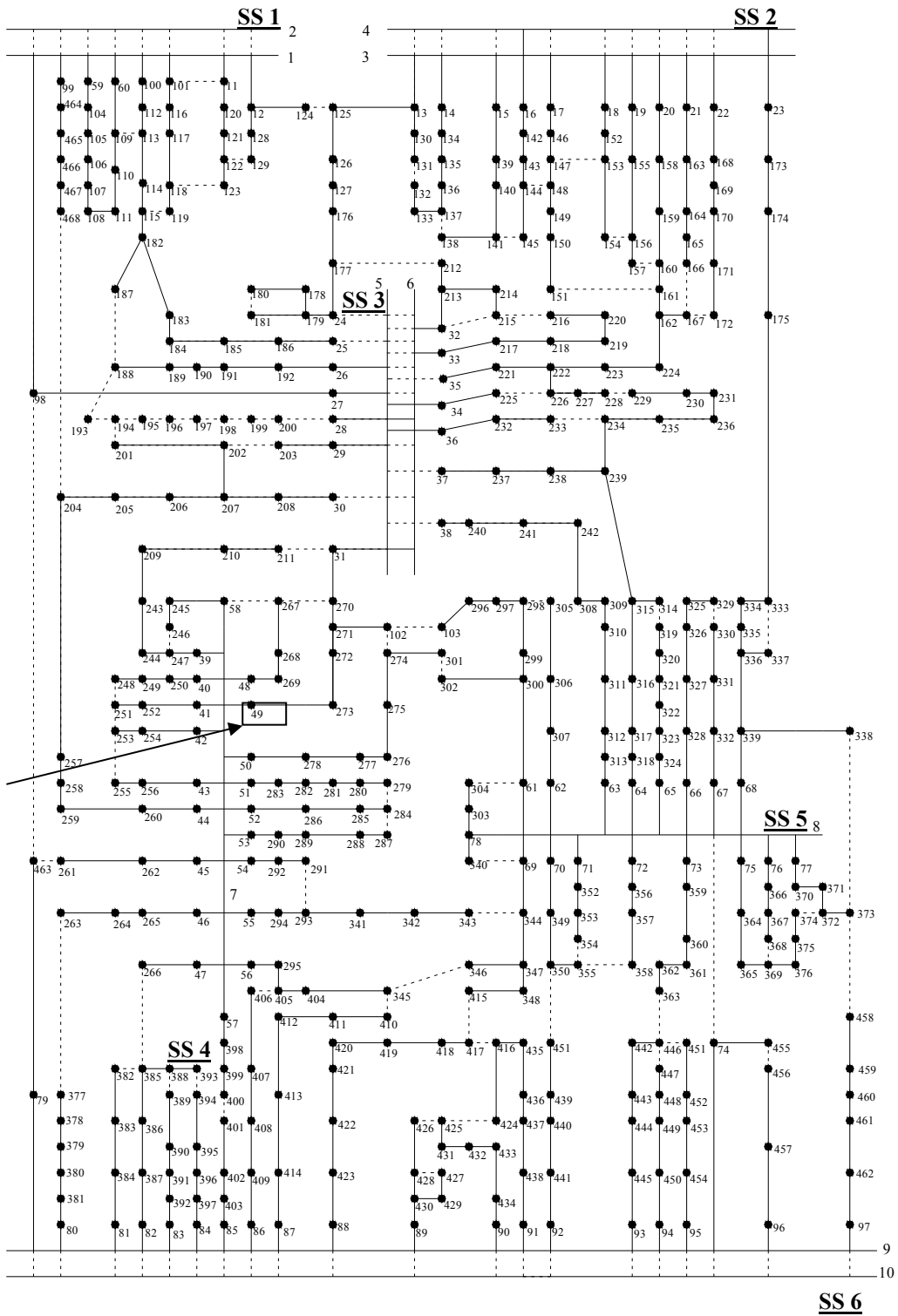
Slika 7.6 (a) Pogonska struktura distributivnog sistema neposredno pre kvara sa numeracijom čvorova



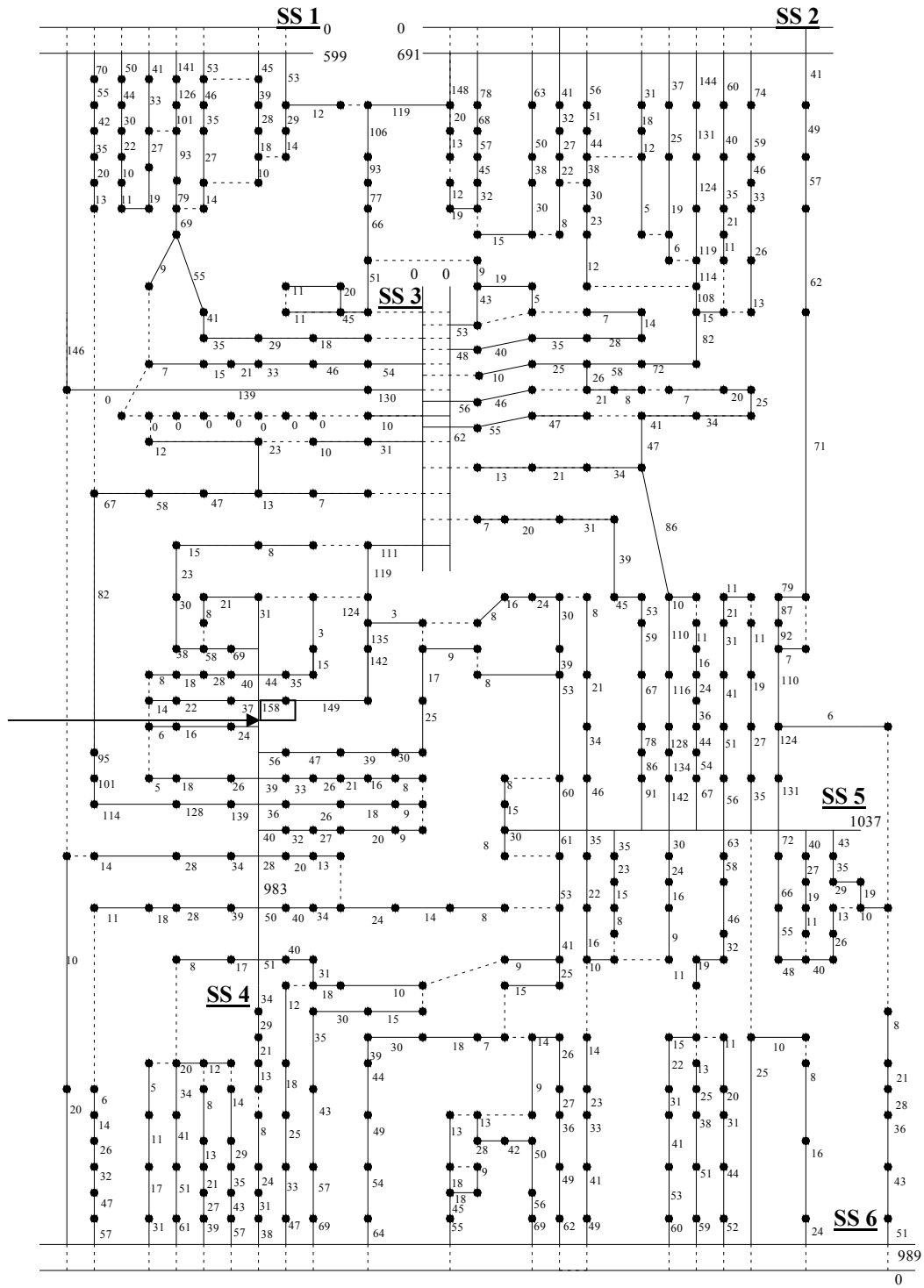
Slika 7.6 (b) Opterećenje po granama neposredno pre kvara



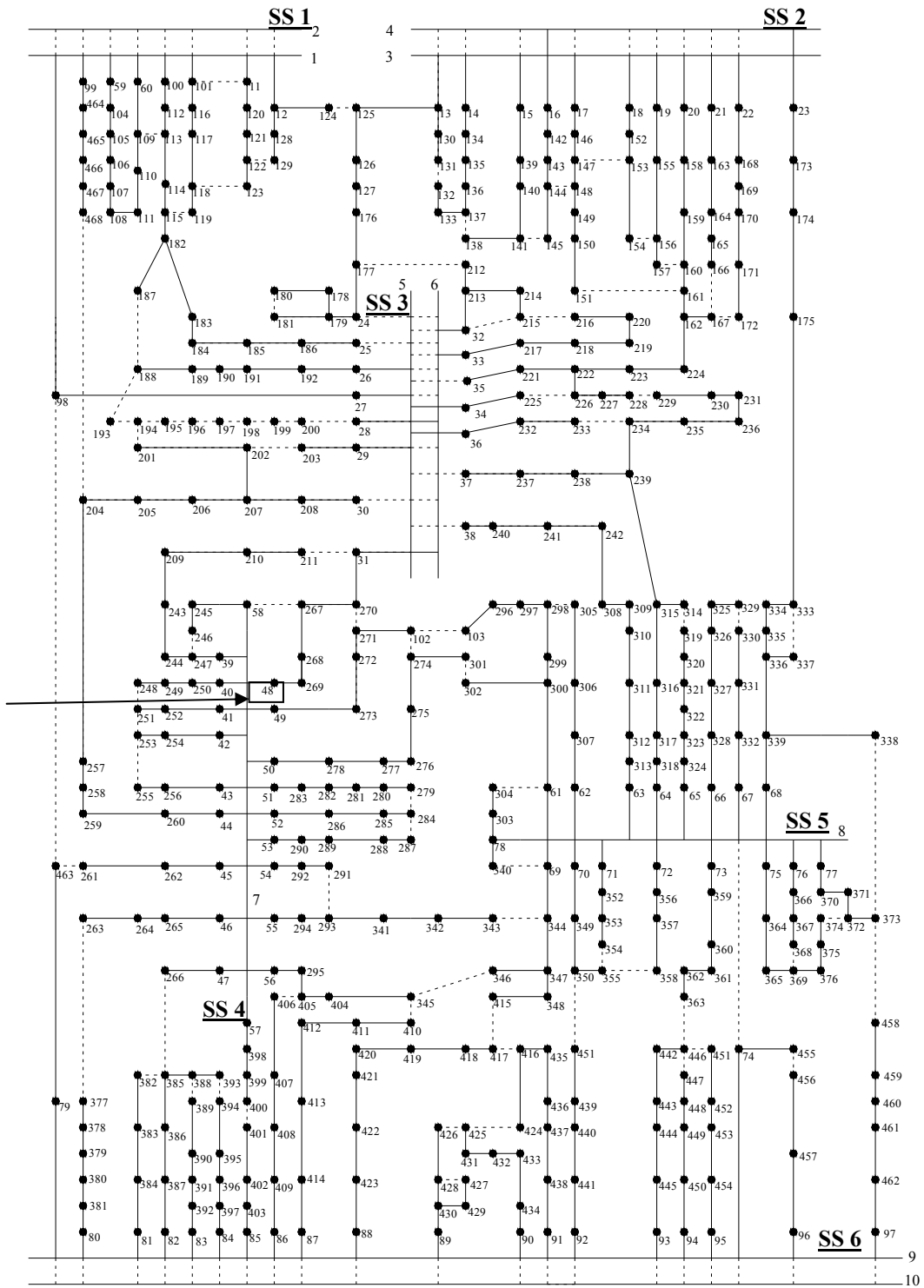
Slika 7.7 Struktura distributivnog sistema posle izolacije kvara



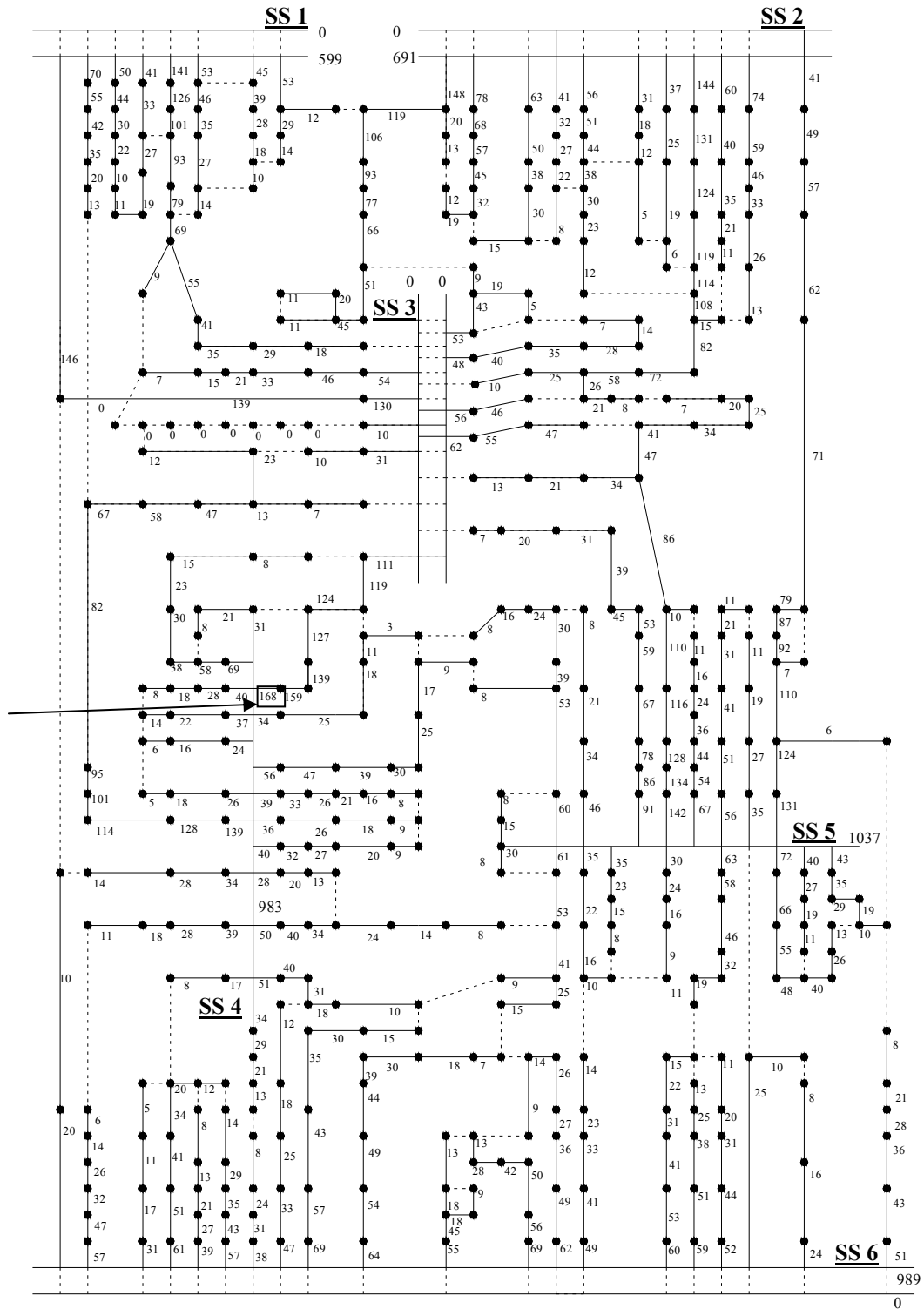
Slika 7.8 (a) Pogonska struktura distributivnog sistema u trenutku preopterećenja izvoda broj 49



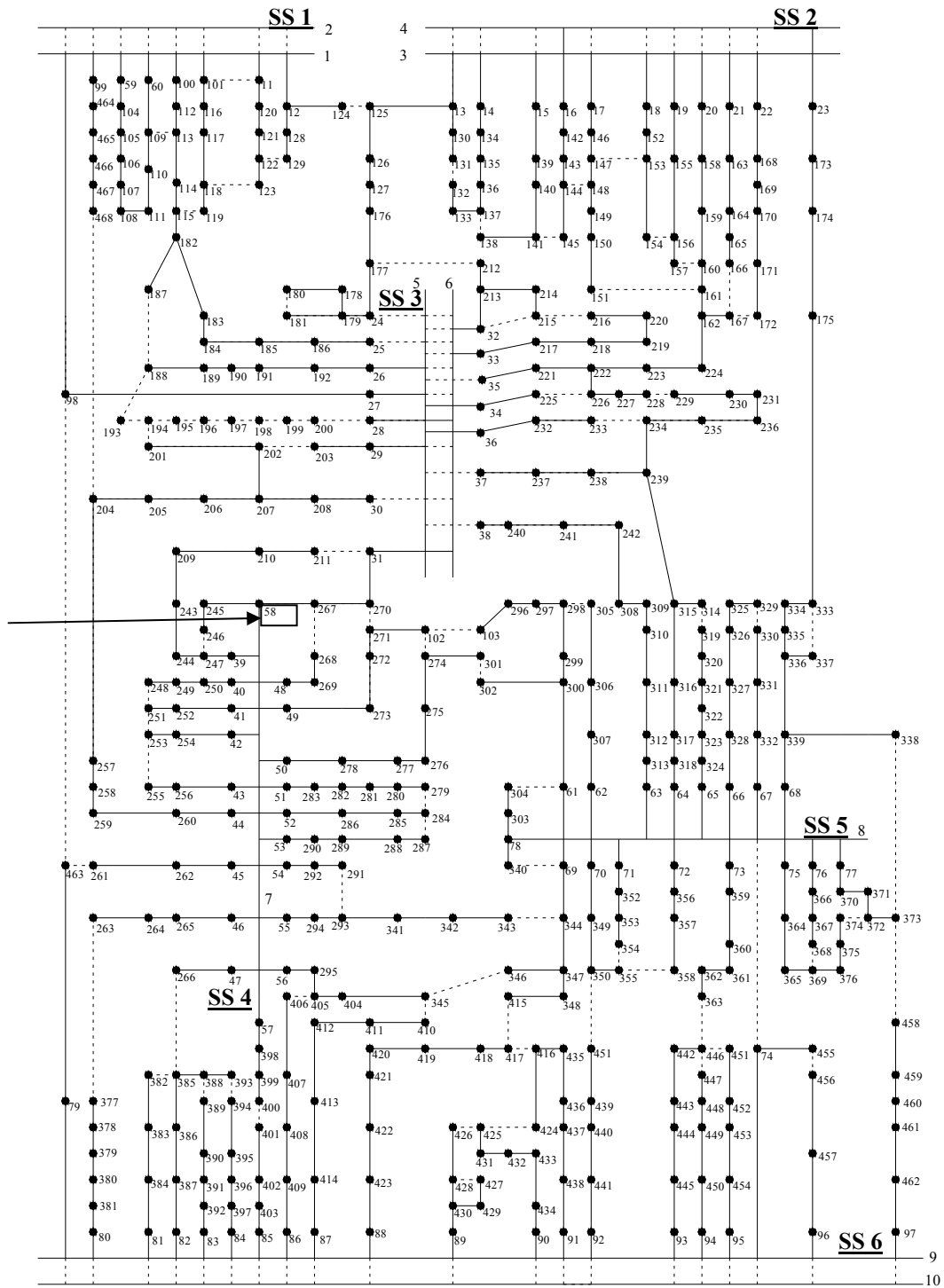
Slika 7.8 (b) Opterećenja po granama u trenutku preopterećenja izvoda broj 49



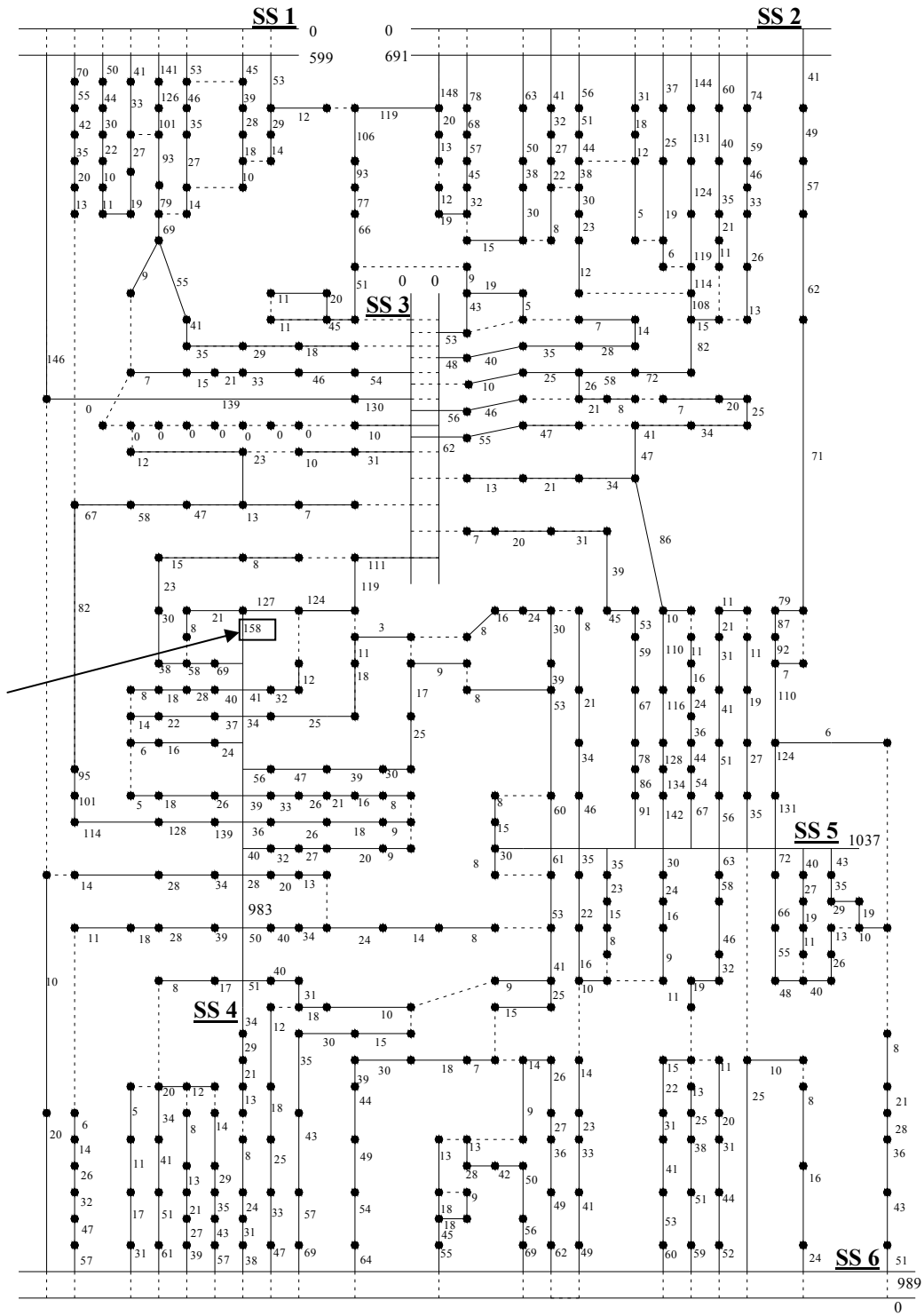
Slika 7.9 (a) Pogonska struktura distributivnog sistema u trenutku preopterećenja izvoda broj 48



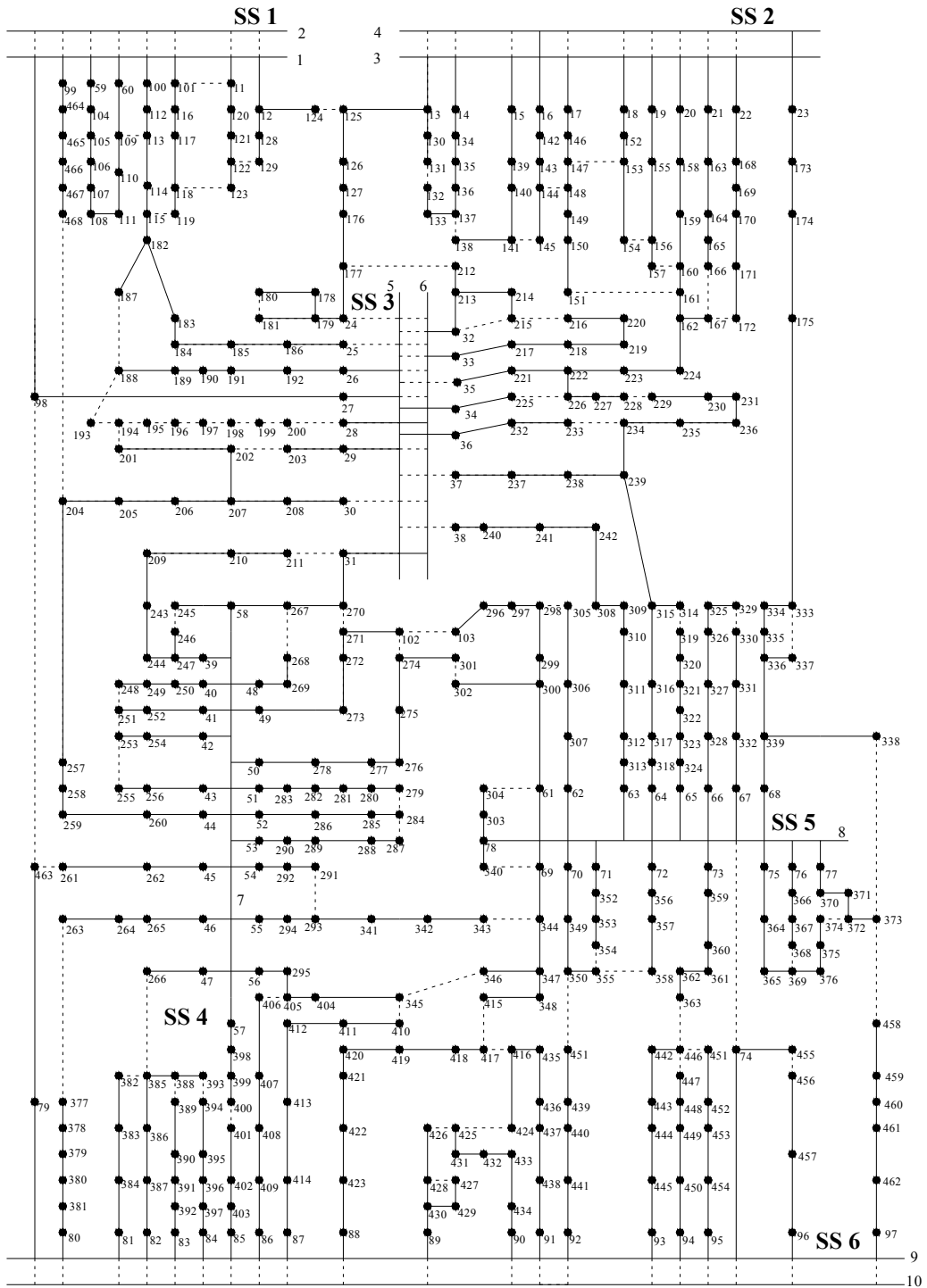
Slika 7.9 (b) Opterećenja po granama u trenutku preopterećenja izvoda broj 48



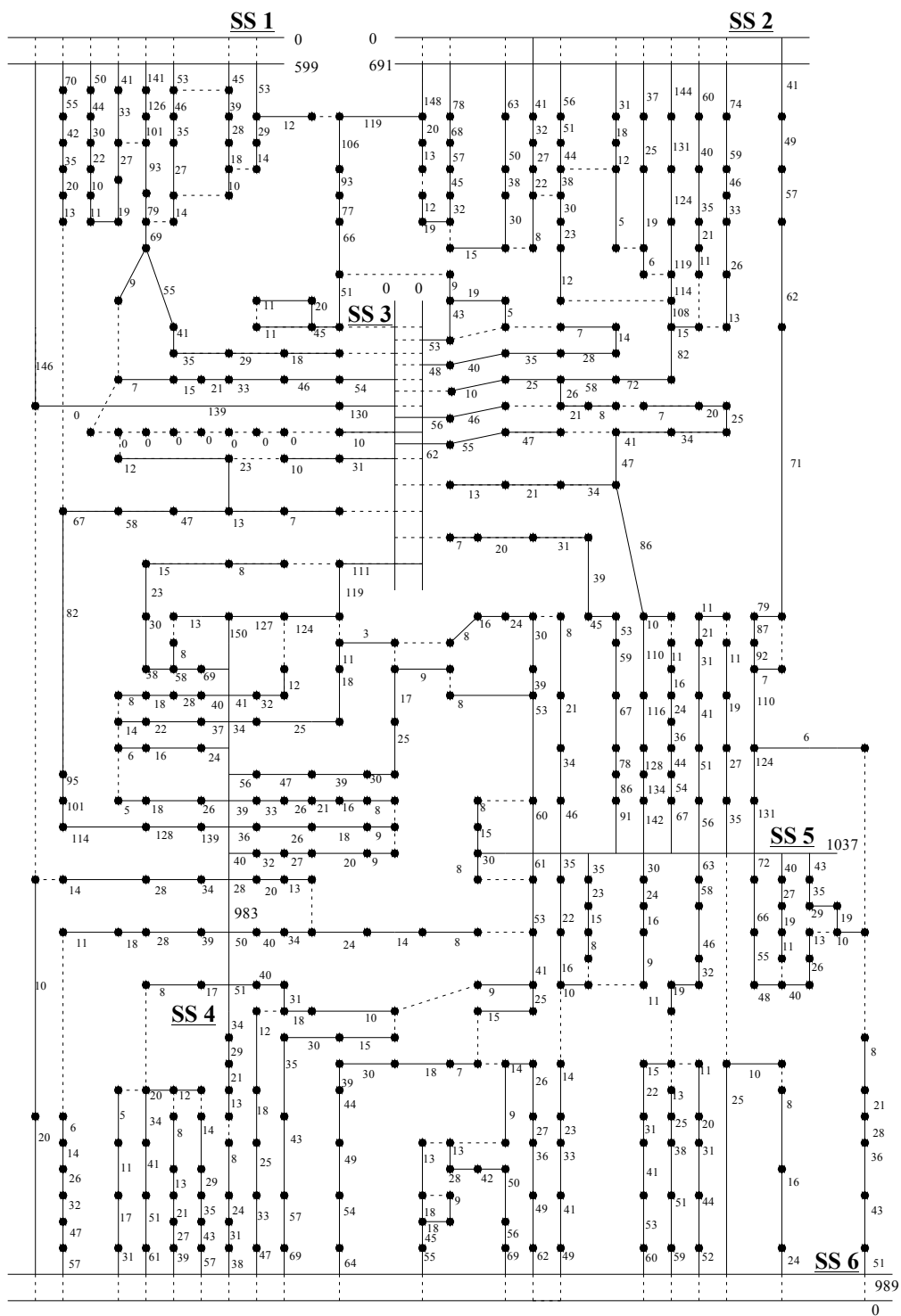
Slika 7.10 (a) Pogonska struktura distributivnog sistema u trenutku preopterećenja izvoda broj 58



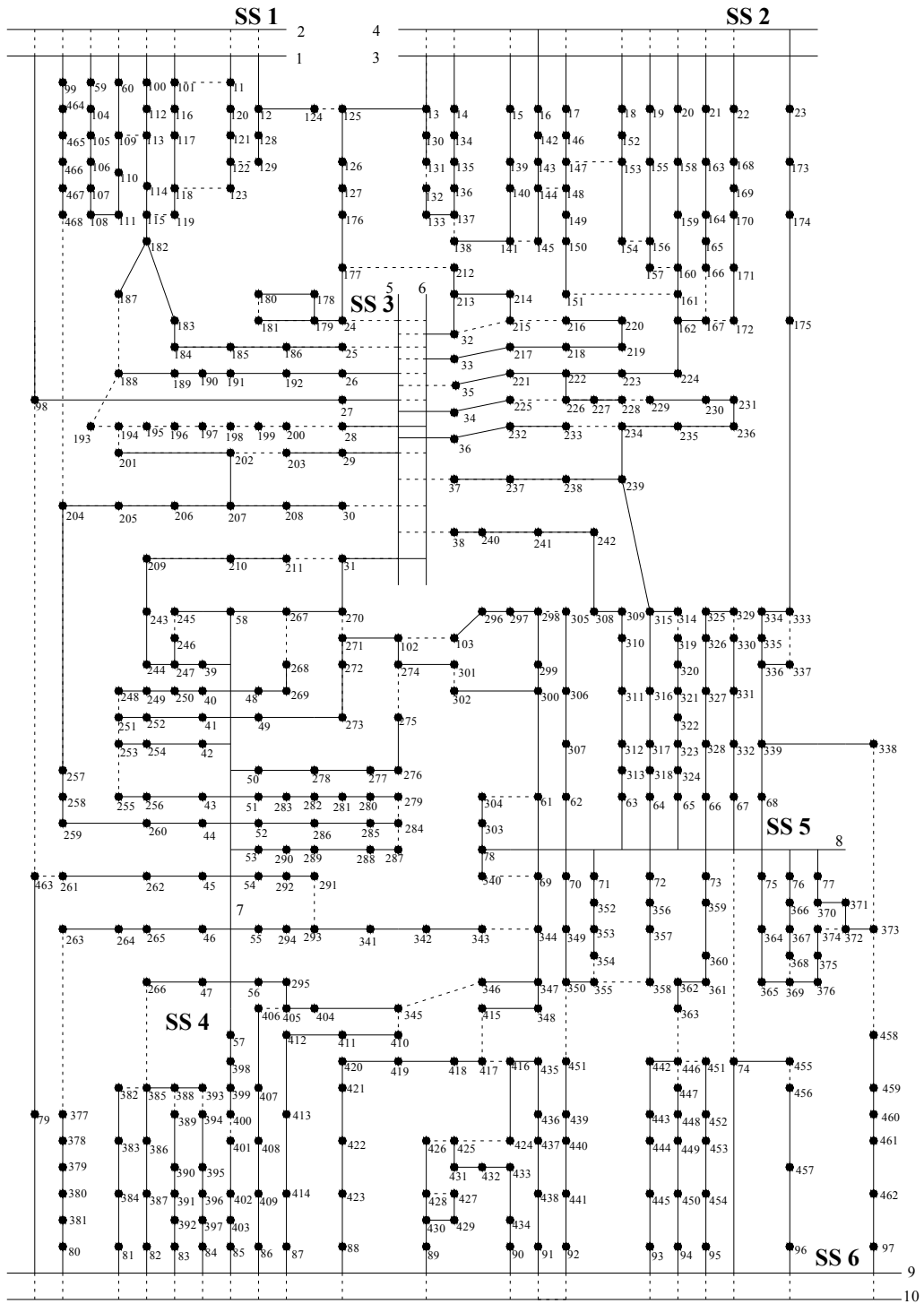
Slika 7.10 (b) Opterećenja po granama u trenutku preopterećenja izvoda broj 58



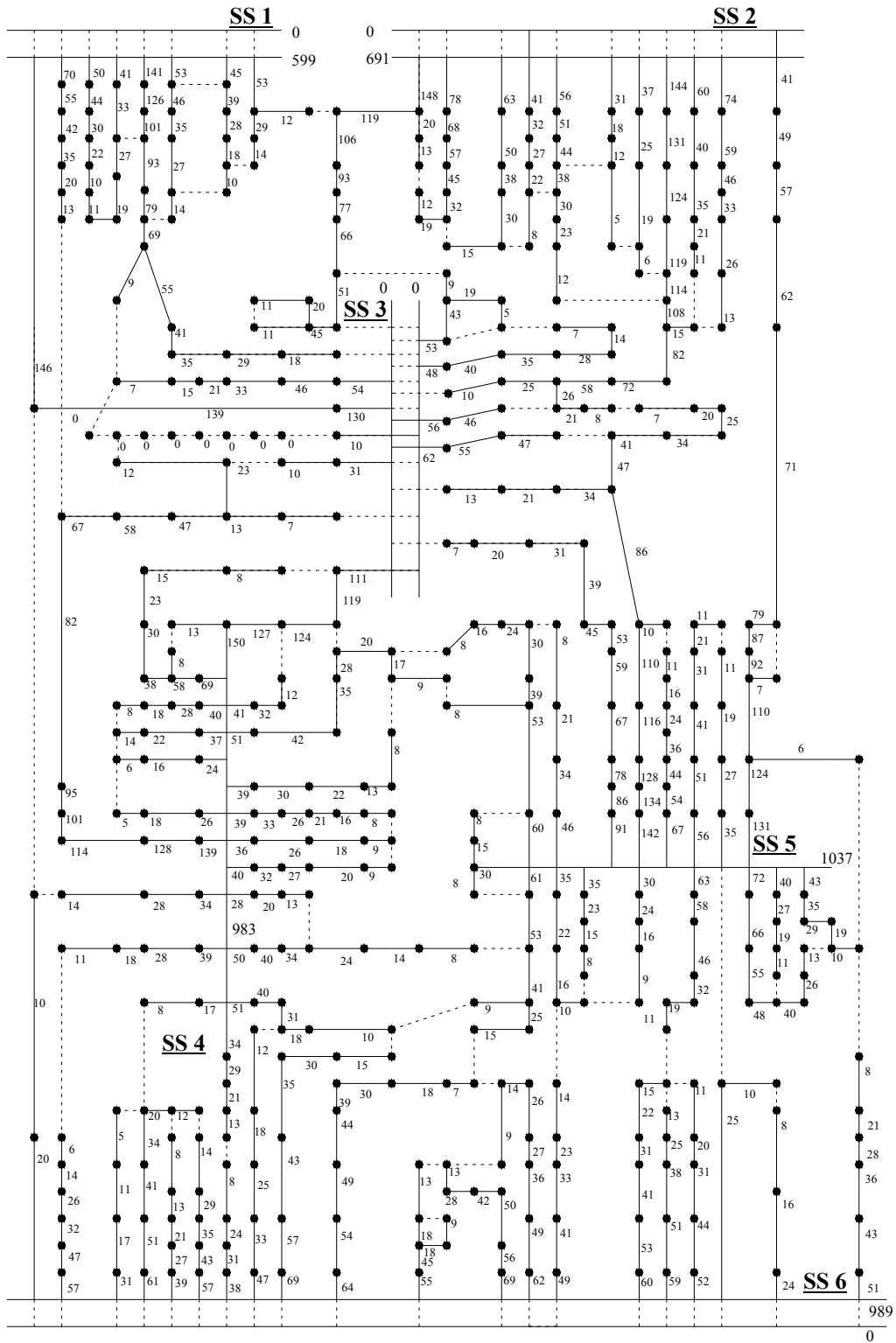
Slika 7.11 (a) Pogonska struktura distributivnog sistema posle završenog proračuna



Slika 7.11 (b) Opterećenje po granama posle završenog proračuna



Slika 7.12 (a) Finalna pogonska struktura distributivnog sistema posle filtriranja prekidačkih akcija



Slika 7.12 (b) Opterećenje po granama posle filtriranja prekidačkih akcija

BIOGRAFSKI PODACI AUTORA

Mr Srđan Dimitrijević je rođen 05. 01. 1971.god. u Beogradu. Osnovnu i srednju školu je završio u Velikoj Plani i Smederevskoj Palanci. Elektrotehnički fakultet, odsek energetske mreže, je upisao 1991.god u Čačku. Posle završene prve godine, nastavlja sa studijama u Beogradu na Elektrotehničkom Fakultetu, odsek energetske mreže i sistemi. Diplomirao je 17.07.1998.god sa prosečnom ocenom tokom studiranja 7.16 i ocenom diplomskog rada 10.

Postdiplomske studije je upisao 1998.god na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu. Odbranio je magistarsku tezu pod naslovom „Novi način rešavanja obnavljanja pogona srednjenaponskih distributivnih mreža posle teških poremećaja” i stekao akademsko zvanje magistra elektrotehničkih nauka iz oblasti Elektroenergetske mreže i sistemi, 17.06.2002.god. na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu.

Od januara 1999. god do aprila 1999. god bio je u radnom odnosu u preduzeću za planiranje i izgradnju JP „Plana“, u Velikoj Plani. Od aprila 1999. do avgusta 2004. god. bio je u radnom odnosu u Elektroprivredi Srbije – Elektrodistribucija u Velikoj Plani, između ostalog i na poslovima analize, modelovanja i planiranja distributivnih sistema. Od avgusta 2004.god. do oktobra 2007.god. bio je u radnom odnosu u kompaniji ENTEL-Energoprojekt u Beogradu gde je radio kao konsultant na međunarodnim projektima. Od oktobra 2007.god. do aprila 2011.god. imao je ugovor sa kompanijom KEMA-Consulting, sedište u Holandiji, ogranak u Bonu (Nemačka) gde je u okviru INC (eng. *Intelligent Networks and Control*) grupe radio kao konsultant na međunarodnim projektima. Od aprila 2011.god. je u radnom odnosu u kompaniji Mott Macdonald, sedište u Velikoj Britaniji, ogranak u Abu Dhabi-u (Ujedinjeni Arapski Emirati) gde, između ostalog, radi na međunarodnim projektima iz oblasti analize (studija) elektroenergetskih sistema.

Mr Srdjan Dimitrijević je zajedno sa mentorom, kao prvi autor, publikovao rad u međunarodnom časopisu sa SCI liste. Članak je objavljen pod naslovom “An innovative approach for solving the restoration problem in distribution networks”, u časopisu *Electric Power Systems Research*, 81 (2011), pp. 1961-1972.

Изјава о ауторству

Потписани-а Срђан Р. Димитријевић

Бр. уписа 884

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

ОБНАВЉАЊЕ ПОГОНА ДИСТРИБУТИВНИХ СИСТЕМА У ОКВИРУ
РАЗВОЈА ИНТЕЛИГЕНТНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТСКИХ МРЕЖА

- резултат сопственог истраживач ког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица

у Београду, 26.05.2012.

Потпис докторанда



**Изјава о истоветности штампане и електронске верзије
докторског рада**

Име и презиме аутора Срђан Р. Димитријевић

Број уписа 884

Студијски програм Електроенергетске мреже и системи

Наслов рада ОБНАВЉАЊЕ ПОГОНА ДИСТРИБУТИВНИХ
СИСТЕМА У ОКВИРУ РАЗВОЈА ИНТЕЛИГЕНТНИХ
ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТСКИХ МРЕЖА

Ментор Проф. Др Никола Рајаковић

Потписани Срђан Р. Димитријевић

изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

у Београду, 26.05.2012.

Потпис докторанда



Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку "Светозар Марковић" да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

ОБНАВЉАЊЕ ПОГОНА ДИСТРИБУТИВНИХ СИСТЕМА У ОКВИРУ РАЗВОЈА ИНТЕЛИГЕНТНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТСКИХ МРЕЖА

која је моје ауторска дело.

Дисертацију са свим прилозима предао сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио.

1. Ауторство
2. Ауторство – некомерцијално
3. Ауторство - некомерцијално - без прераде
4. Ауторство - некомерцијално - делити под истим условима
5. Ауторство - без прераде
6. Ауторство - делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

у Београду, 26.05.2012.

Потпис докторанда

