

**UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET**

Mr Zoran Miljanić, dipl. el. ing.

**OPTIMIZACIJA ESTIMACIJE STANJA EES-a
PRIMJENOM GENETSKIH ALGORITAMA
U USLOVIMA PROMJENLJIVE TOPOLOGIJE MREŽA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Podgorica, 2012.

107291277



Нит N 2160

34839

PODACI I INFORMACIJE O DOKTORANTU

Ime i prezime: ZORAN MILJANIĆ

Datum i mjesto rođenja: 13.02.1980. Bar

Naziv završenog postdiplomskog studijskog programa i godina završetka: ELEKTROENERGETSKI
SISTEMI, 2006.

INFORMACIJE O DOKTORSKOJ DISERTACIJI

Naziv doktorskih studija: ELEKTROENERGETSKI SISTEMI

Naslov teze: OPTIMIZACIJA ESTIMACIJE STANJA EES-a PRIMJENOM GENETSKIH ALGORITAMA U
USLOVIMA PROMJENLJIVE TOPOLOGIJE MREŽA

Fakultet na kojem je disertacija odbranjena: ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET PODGORICA

UDK, OCJENA I ODBRANA DOKTORSKE DISERTACIJE

Datum prijave doktorske teze: 27.11.2007.

Datum sjednice Senata Univerziteta na kojoj je prihvaćena teza: 21.02.2008.

Komisija za ocjenu podobnosti teze i kandidata:

Prof. dr Ilija Vujošević

Prof. dr Zdravko Uskoković

Prof. dr Igor Đurović

Mentor:

Prof. dr Igor Đurović

Komisija za ocjenu doktorske disertacije:

Prof. dr Ilija Vujošević

Prof. dr Nešo Mijušković

Prof. dr Igor Đurović

Komisija za odbranu doktorske disertacije:

Prof. dr Nešo Mijušković

Prof. dr Ilija Vujošević

Prof. dr Jadranka Radović

Prof. dr Sreten Škuletić

Prof. dr Igor Đurović

Lektor: Sanja Orlandić

Datum odbrane: 10.01.2013.

Datum promocije: _____.

Mojim roditeljima, jer su me naučili strastima i toleranciji

Značajem se

Profesoru Stiji Vujoševiću, na savjetima i nezanimljivoj podršci tokom ovog rada na fakultetu.

Profesoru Igoru Đurđeviću, na saradnji i podršci u istraživačkom radu.

PREDGOVOR

Statička estimacija stanja nezaobilazna je funkcija upravljanja elektroenergetskim sistemom (EES). Ona ima zadatak da obezbijedi pouzdanu procjenu vektora stanja sistema na bazi redundantnih mjerenja iz sistema. Vektor stanja čine moduli i fazni stavovi napona čvorova posmatranog EES. Pouzdanost procjene vektora stanja direktno je uslovljena kvalitetom mjerne konfiguracije, kao i nivoom redundanse mjernih uređaja. Ukoliko mjerna konfiguracija ispunjava određene tehničke zahtjeve, onda je kroz estimaciju stanja moguće detektovati i identifikovati greške mjernih uređaja, a zatim iste i otkloniti, čime je rezultujuća procjena vektora stanja pouzdana. Na osnovu dobijene informacije o vektoru stanja, moguće je, kroz razne analize, izvršiti pouzdanu kvalitativnu i kvantitativnu procjenu parametara režima rada EES i na osnovu toga donijeti prave upravljačke odluke kojima bi se sistem održao u tehnički i ekonomski najpovoljnijem režimu rada. Dakle, estimacija stanja ima zadatak da, korišćenjem „sirovih“ mjerenja iz sistema (mjerenja koja mogu da sadrže i greške), obezbijedi pouzdan ulazni podatak za najrazličitije aplikacije sistema upravljanja (klasični i optimalni tokovi snaga, analiza sigurnosti, stabilnosti, prognoza potrošnje itd.) koje se bave tehničkim, ali i ekonomskim aspektima rada EES.

Značaj estimacije stanja postajao je sve veći s razvojem EES, ali i elektroenergetskog sektora. Naime, uspostavljanje tržišta električne energije, koje je praćeno restrukturiranjem elektroprivrednih kompanija i deregulacijom elektroenergetskog sektora, kao i naglašeni značaj efekta klimatskih promjena i promovisanje obnovljivih izvora i distribuirane proizvodnje, stvorili su novu situaciju u kojoj klasični, vertikalno organizovani EES, ne mogu uspješno obavljati svoju funkciju. Savremeni EES mora da bude fleksibilan kako bi odgovorio svim izazovima koje mu nametne tržište električne energije. Ta fleksibilnost se, osim odgovarajućim kapacitetima sistema, postiže i kroz sistem upravljanja. Centralizovano upravljanje više nije rješenje jer nije moguće na taj način uspješno upravljati sve većim brojem zahtjeva koji se stavljaju pred sistem. Stoga se neke upravljačke funkcije preusmjeravaju na regionalne centre upravljanja, dok se na centralnom nivou obrađuju već gotove, pouzdane informacije. Taj trend je teško primijeniti na estimaciju stanja, jer je za njen uspješan rad potrebno obezbijediti mjerne informacije iz čitavog sistema kojim se upravlja. S obzirom na to da je estimacija stanja vitalna funkcija za uspješan rad mnogih drugih funkcija upravljanja, značaj njenog unapređivanja je veliki i često je bila predmet istraživanja.

Cilj ove disertacije je optimizacija estimacije stanja EES, uzimajući u obzir promjenljivu topologiju mreže. Dva su fundamentalna faktora koja utiču na efikasnost estimacije stanja: mjerna konfiguracija i algoritam statičke estimacije stanja. Mjerna konfiguracija obezbjeđuje ulazni podatak za algoritam estimacije stanja. Ona se opisuje tehničkim i ekonomskim karakteristikama. Tehničke karakteristike tiču se observabilnosti sistema, robusnosti mjerne konfiguracije, komunikacionih ograničenja i drugih zahtjeva koji su specifični za realni sistem. Ekonomska karakteristika mjerne konfiguracije je cijena. Kreiranjem mjerne konfiguracije s optimalnim karakteristikama obezbjeđuje se kvalitetna informaciona osnova za postizanje pouzdane estimacije stanja. U ovoj disertaciji predstavljen je metod za planiranje optimalne mjerne konfiguracije koji ima mogućnost uključivanja različitih tehničkih i ekonomskih kriterijuma optimizacije, kako bi se postigle željene performanse mjerne konfiguracije za bilo koji praktični sistem. Pored toga, u cilju unapređivanja efikasnosti samog algoritma estimacije stanja, analizirane su mjerne konfiguracije sastavljene od fazorskih mjerenja koja će biti osnova budućih sistema za monitoring EES. Naime, usljed svoje pouzdanosti i tehničkih performansi, fazorska mjerenja se odlično slažu sa algoritmom estimacije stanja, jer povećavaju njegovu proračunsku efikasnost. Time se otvara mogućnost za

pouzdana praćenje i prelaznih procesa. Dakle, dinamika estimatora stanja je bolja, pa će biti u stanju da obezbijedi sve potrebne informacije sistemu upravljanja i u okolnostima u kojima će se naći budući EES. Istraživanja sprovedena u okviru ove disertacije rezultirala su publikovanjem radova u vodećim međunarodnim časopisima i saopštenjima na referentnim stranim i domaćim konferencijama.

Tekst disertacije je, pored uvodnog poglavlja, referenci i dodatka, organizovan u 5 poglavlja. U prvom poglavlju predstavljeni su izazovi upravljanja EES, uz poseban akcenat na statičkoj estimaciji stanja, i raspoloživim algoritmima za njeno sprovođenje. U okviru istog poglavlja dat je pregled metoda analize observabilnosti sistema i redundanse mjerne konfiguracije, kao preduslova za izvršavanje pouzdane statičke estimacije stanja. Takođe, predstavljena su i fazorska mjerenja, kao važan element budućih sistema za monitoring parametara režima rada EES. Na kraju poglavlja dat je pregled istraživanja u oblasti planiranja mjernih konfiguracija. Metaheuristički metodi za planiranje optimalne mjerne konfiguracije predstavljeni su u drugom poglavlju. U trećem poglavlju posebna pažnja posvećena je celularnom genetskom algoritmu kao metodi koji se u ovoj disertaciji predlaže kao najbolji za optimizaciju mjerne konfiguracije sastavljene od fazorskih mjerenja. Detaljno su date sprovedene analize za podešavanje svih parametara od interesa za najefikasniju upotrebu toga metoda za planiranje optimalne mjerne konfiguracije. Rezultati primjene predloženog metoda na tipske IEEE sisteme dati su u četvrtom poglavlju. Analizirani su različiti optimizacioni kriterijumi, a dobijeni rezultati upoređeni su s rezultatima najboljih metoda iz literature. Posljednje poglavlje donosi zaključke proistekle iz istraživačkog rada, kao i prijedloge za buduća istraživanja.

Cilj koji se želi postići ovom disertacijom je da se problem estimacije stanja i posebno planiranja optimalne mjerne konfiguracije izloži u obliku najpodesnijem za sve upućene u probleme upravljanja EES, počev od istorijskog razvoja istraživanja u toj oblasti, kroz postojeće stanje i aktuelne i očekivane buduće probleme, do metoda za njihovo prevazilaženje.

U Podgorici, septembra 2012. god.

IZVOD TEZE

Razvoj tradicionalnih elektroenergetskih sistema (EES) uglavnom je pratio porast potrošnje. Glavni zadatak bio je obezbijediti dovoljno sopstvenih proizvodnih i prenosnih kapaciteta. Upravljanje takvim sistemom bilo je centralizovano i uglavnom se sastojalo od upravljanja proizvodnjom velikih izvora električne energije. Dalji porast potrošnje stvorio je situaciju u kojoj sopstveni proizvodni kapaciteti nijesu dovoljni i neophodno je osloniti se na razmjenu energije sa okolnim sistemima. U početku, razmjena energije bila je samo za potrebe havarijske ispomoći i nabavku nedostajućih količina električne energije, ali je vremenom postala neophodna za normalno funkcionisanje sistema koji ne raspolažu sopstvenom proizvodnjom potrebnih kapaciteta. Time je stvorena osnova za uspostavljanje tržišta električne energije koje je preuzelo ulogu glavnog uticajnog faktora koji diktira razvoj EES. Tako su savremeni trendovi koje je nametnulo tržište električne energije: veće korišćenje obnovljivih izvora energije kroz distribuiranu proizvodnju, unapređivanje efikasnosti rada mreža (snižavanje gubitaka) kroz optimizaciju pogona sistema, unapređivanje nivoa usluga koje se isporučuju potrošačima, kao i veći stepen povezanosti sa susjednim nacionalnim sistemima. Upravljanje sistemom u novim okolnostima postaje značajno složeniji zadatak nego kod tradicionalnih EES. Donošenje upravljačkih odluka mora biti zasnovano na kvalitetnim informacijama o parametrima rada sistema. Te informacije prikuplja sistem za monitoring. Međutim, pouzdane upravljačke odluke ne mogu se donijeti na bazi „sirovih“ informacija iz sistema za monitoring. Razlog za to je nepouzdanost mjernih informacija usljed grešaka mjernih uređaja ili komunikacionih problema. Usljed toga, nezaobilazan element savremenih upravljačkih sistema je estimator stanja. On ima zadatak da u svakom trenutku, na bazi redundantnih mjerenja iz sistema, obezbijedi pouzdanu procjenu vektora stanja sistema i na taj način obezbijedi ulazni podatak za sve potrebne analize režima rada sistema (analiza tokova snaga, sigurnosti, stabilnosti, prognoza potrošnje itd.).

Cilj ove doktorske disertacije je unapređivanje estimacije stanja sistema, uzimajući u obzir njegovu promjenljivu topologiju, sa posebnim osvrtom na planiranje optimalne mjerne konfiguracije. Efikasnost estimacije stanja određena je efikasnošću korišćenog algoritma i kvalitetom mjerne konfiguracije koja obezbjeđuje neophodnu informacionu osnovu za njeno sprovođenje. Algoritam statičke estimacije stanja postaje značajno efikasniji ukoliko se koriste fazorska mjerenja, usljed čijih se tehničkih karakteristika estimacija stanja može vršiti u značajno manjim intervalima nego što je to slučaj kod klasičnih mjernih konfiguracija. Time se otvara mogućnost za praćenje sistemskih procesa koje karakteriše izražena dinamika. S druge strane, kvalitet mjerne konfiguracije je osnovni ograničavajući faktor za pouzdanost statičke estimacije stanja. Naime, ukoliko kvalitet mjerne konfiguracije nije zadovoljavajući, onda, bez obzira na kvalitet algoritma, proces statičke estimacije stanja ne može rezultirati pouzdanom procjenom vektora stanja, a u nekim slučajevima uopšte ne može biti izvršen. Stoga je problem planiranja optimalne mjerne konfiguracije aktuelna tema za istraživanje, pogotovo od komercijalne upotrebe fazorskih mjerenja, devedesetih godina prošlog vijeka.

Planiranje optimalne mjerne konfiguracije predstavlja složeni kombinatorni optimizacioni problem čija složenost eksponencijalno raste s dimenzijom sistema koji se analizira. Stoga, njegovo rješavanje direktnim metodima, pogotovo za veće sisteme, ne daje prihvatljive rezultate s aspekta kvaliteta i performansi metoda. Mnogo bolji rezultati se postižu metaheurističkim metodima koje kombinuju dobre osobine heurističkih metoda kad je u pitanju brzina konvergencije optimumu, i nekih specifičnosti analiziranog problema koji usmjeravaju pretragu na pravi put kako bi se postiglo

kvalitetnije rješenje. U okviru ove disertacije dat je pregled metaheurističkih metoda koje se koriste za planiranje optimalne mjerne konfiguracije, a posebna pažnja posvećena je celularnom genetskom algoritmu kao metodi koja se predlaže kao najbolja za analizirani optimizacioni problem. Performanse predloženog metoda analizirane su na tipskim IEEE sistemima, a dobijeni rezultati upoređeni su s rezultatima metoda dostupnim u okviru literature. Analiziran je kvalitet dobijene optimalne mjerne konfiguracije kao i karakteristike konvergencije metoda kroz: potreban broj iteracija do optimuma, proračunsko vrijeme metoda i uspješnost konvergencije (konvergencije lokalnom optimumu). Uzimajući u obzir sve analizirane performanse, potvrđene su prednosti predloženog metoda u odnosu na ostale raspoložive metode.

Kriterijumi koji su usvojeni prilikom planiranja optimalne mjerne konfiguracije su: observabilnost sistema, robusnost mjerne konfiguracije i komunikaciona ograničenja. Observabilnost sistema je osnovni preduslov za izvođenje estimacije stanja, tj. to je najbitnija karakteristika mjerne konfiguracije kada je estimacija stanja u pitanju. Međutim, mjerna konfiguracija neće osigurati pouzdanu estimaciju stanja samo na osnovu ispunjavanja uslova observabilnosti sistema. Razlozi su promjenljiva konfiguracija mreže i mogući ispadi mjernih uređaja. Promjene uklopnog stanja mreže nijesu karakteristične samo za havarijsko stanje sistema, već su sastavni dio normalnog rada EES. One mogu dovesti do gubitka observabilnosti sistema, pa je potrebno to preduprijediti. Sličan zaključak može se izvesti i za slučaj ispada mjernog uređaja. Dakle, i pored velike pouzdanosti mjernih uređaja, u praksi je potrebno računati na mogući gubitak jednog mjerenja iz mjerne konfiguracije, bilo usljed kvara samog mjernog uređaja, bilo radi problema u prenosu njegove mjerne informacije do centra upravljanja. Oba navedena problema uzimaju se u obzir kroz kriterijum robusnosti mjerne konfiguracije. Kriterijum komunikacionih ograničenja, posebno dobija na značaju sa upotrebom modernih fazorskih mjerenja. Naime, ona zbog prirode svog rada zahtijevaju da mjesto njihove instalacije (transformatorska stanica) raspolaže s potrebnom komunikacionom infrastrukturom. Taj kriterijum je uključen u dva oblika: raspoloživost infrastrukture i dostupnost komunikacionih kanala. Rezultati primjene svih kriterijuma, posebno i kombinovano, dati su i komentarisani na primjeru tipskih IEEE sistema.

Poseban doprinos ove disertacije je modularnost predloženog metoda za planiranje optimalne mjerne konfiguracije. Naime, svi kriterijumi su modularno uključeni u samu definiciju optimizacionog problema i lako ih je prilagoditi potrebama analize praktičnoga sistema, ili uključiti dodatne, za konkretan sistem ili namjenu, karakteristične kriterijume.

Na kraju disertacije, dati su zaključci koji su proistekli iz istraživanja, uz osvrt na smjernice za budući rad u oblasti estimacije stanja EES.

ABSTRACT

Traditional power systems were developed in order to follow demand increase. The main task was to provide necessary production and transmission capacity. Power system control was centralized and it basically consisted of production control of large power plants. Further increase in demand created a situation where national production capacities were not enough for demand supply, so it was necessary to rely on electricity exchange with neighboring systems. At the beginning, electricity exchange was used only for the system in need during outages, or for providing lower amount of electricity needed for demand supply. With time, electricity exchange became necessary for normal operation of systems that did not dispose of enough capacity of own production. That created the basis for electricity market development, which took the lead as the main factor that has been driving power system development. Modern trends that were influenced by the electricity market are: greater share of renewable sources in electricity production in the form of distributed generation, increasing power grid efficiency (decrease of losses) by employing grid operation optimization, improving consumer services and greater degree of interconnections with neighboring systems. Power system control became significantly more complex task than it was for the traditional power systems, due to the new circumstances. Making control decisions has to be based on reliable information concerning system operation parameters. That information is gathered by the monitoring system. However, reliable control decisions cannot be derived from the raw information collected by the monitoring system. The reason for that is low reliability of measurement data due to measurement errors or communication problems. Due to that, inevitable part of a control system is the state estimator. It has the task to provide a reliable estimation of the state vector basing on the redundant measurement set. Obtained results are then used as input data in all control system applications used for the system operation analysis (power flow, security analysis, stability analysis, load forecast, etc.).

The goal of this doctoral dissertation is to improve power system state estimation taking into account the system's multiple topology scenarios, with special emphasis on the optimal metering configuration planning problem. The efficiency of state estimation is defined by the algorithm efficiency and the quality of the metering configuration that provides necessary data for the estimation. The algorithm for static state estimation becomes more efficient if phasor measurement units are used within metering configuration. In that case, state estimation can be performed in shorter time periods due to the phasor measurement units technical characteristics, than it is the case for the traditional metering configurations. That enables monitoring of the system processes characterized by increased dynamics. On the other side, quality of the metering configuration is the main limiting factor for reliable state estimation. If the quality of the metering configuration is not satisfactory, than, in spite of good algorithm characteristics, state estimation cannot obtain reliable estimate. In some cases of low quality metering configurations, state estimation cannot be carried out. Therefore, optimal metering configuration planning is popular research subject, especially from the commercial expansion of phasor measurement units during nineties of the past century.

Optimal metering configuration planning is a difficult combinatorial optimization problem whose complexity level increases with the analyzed system size. Therefore, the problem solving with direct methods, especially for greater systems, does not provide acceptable solutions with respect to result quality and the methodology performance. With respect to direct methods, metaheuristic methods provide much better results because they combine good features of heuristic methods

referring to convergence speed, and some specific problem characteristics that drive the search process towards the better optimum. The overview of the metaheuristic methods used for optimal metering configuration planning is given within the dissertation. Special attention is given to the cellular genetic algorithm as the method that is proposed here as the best for optimal metering configuration planning. The proposed method performance is analyzed on the standard IEEE systems, and derived results are compared with results obtained by other available methods. The quality of obtained metering configuration is analyzed, together with convergence performance, which is defined by: necessary number of iterations to obtain the optimum, time needed to obtain the optimum and hit rate (percentage of successful convergences). Taking into account all performance aspects, the proposed method has significant advantages with respect to available methods.

The criteria that are considered during optimal metering configuration planning are: system observability, metering configuration robustness and communication constraints. Observability is the most important characteristic of a metering configuration, because it enables state estimation. However, a metering configuration will not enable reliable state estimation just due to the fact that it provides system observability. The reason for that are variable system topology and possible measurement loss. Changes in the network topology are not the characteristic of systems subjected to outages, but also of the systems that operate in the normal regime. They can cause loss of observability, so they should be prevented. Similar conclusion can be made for the case of measurement loss. So, although modern metering devices are reliable, in practice it should be calculated with possible single measurement loss (due to the outage of a measurement device or communication failure). Both mentioned problems are taken into account as the criterion of metering configuration robustness. The communication criterion became especially important with the expansion of phasor measurement units. Namely, due to their functionality requirements, it is necessary to provide certain communication infrastructure on their installation site (substations). This criterion is included in two forms: communication infrastructure availability and communication channels number limit. The effect of all considered criteria is individually and globally demonstrated on standard IEEE systems. The analysis of the derived results is also given.

Another quality of this dissertation is the modularity of the proposed method for optimal metering configuration planning. Namely, all considered criteria are modules within the optimization problem formulation, so they could easily be adjusted to specific system needs, or to include additional optimization criteria (characteristic for specific system in practice).

At the end, concluding remarks that were derived from the research are given with an insight in the future research directions in the area of the state estimation.

SADRŽAJ

PREDGOVOR	i
IZVOD TEZE	iii
ABSTRACT	v
PREGLED KORIŠĆENIH AKRONIMA	4
UVOD	5
1. IZAZOVI UPRAVLJANJA ELEKTROENERGETSKIM SISTEMIMA	8
1.1. Struktura elektroenergetskih sistema	9
1.2. Monitoring rada elektroenergetskih sistema	12
1.3. Statička estimacija stanja elektroenergetskih sistema	15
1.3.1. Istorijat problema statičke estimacije	15
1.3.2. Metodi estimacije stanja	17
1.3.2.1. Metod minimalnih kvadrata odstupanja	17
1.3.2.2. Ograničenja metoda minimalnih kvadrata odstupanja za estimaciju stanja sistema	26
1.3.2.3. DC metod statičke estimacije stanja	28
1.3.2.4. Ortogonalna faktORIZACIJA	28
1.3.2.5. Hibridni metod	30
1.3.2.6. Metod Peters-Wilkinson	30
1.3.2.7. Metod minimalnih kvadrata odstupanja sa ograničenjem tipa jednakosti	31
1.3.2.8. Metod zasnovan na proširenoj matrici	33
1.3.2.9. Blokovska formulacija problema estimacije stanja	34
1.3.2.10. Linearni metod estimacije stanja	35
1.3.3. Analiza observabilnosti mreže	38
1.3.3.1. Numerički pristup analizi observabilnosti	39
1.3.3.2. Topološki pristup analizi observabilnosti	41
1.3.3.3. Analiza redundanse mjerne konfiguracije	42
1.4. Fazorska mjerenja	47
1.5. Planiranje mjerne konfiguracije	50
1.5.1. Optimizacija klasične mjerne konfiguracije	50
1.5.2. Optimizacija mjerne konfiguracije sastavljene od fazorskih mjerenja	52
2. OPTIMIZACIONI METODI ZA PLANIRANJE MJERNIH KONFIGURACIJA	57
2.1. Metod simuliranog kaljenja	58
2.1.1. Algoritam SA	58
2.1.2. Primjena SA za rješavanje OPMK problema	60

2.2. Metod tabu pretrage	62
2.2.1. Algoritam metoda tabu pretrage.....	62
2.2.2. Primjena metoda tabu pretrage na OPMK problem	64
2.3. Metod lokalne pretrage.....	65
2.3.1. Algoritam metoda lokalne pretrage	65
2.3.2. Primjena iterativne lokalne pretrage na OPMK problem	66
2.4. Standardni genetski algoritam	67
2.4.1. Struktura standardnog genetskog algoritma.....	69
2.4.2. Primjena GA za rješavanje OPMK problema	70
2.5. Imunizirajući genetski algoritam	71
2.6. Metod diferencijalne evolucije sa nedominiranim sortiranjem	73
2.6.1. Algoritam NSDEA	75
2.6.2. Primjena NSDEA na OPMK problem	77
2.7. Metod optimizacije po uzoru na koloniju mrava	78
2.7.1. Algoritam ACO	79
2.7.2. Primjena ACO za rješavanje OPMK problema	81
2.8. Metod optimizacije zasnovan na grupi čestica	83
2.8.1. Algoritam BPSO metoda	84
2.8.2. Primjena BPSO na OPMK problem	85
2.9. Genetski algoritam sa nedominiranim sortiranjem I i II.....	86
2.9.1. Algoritam NSGA i NSGA-II	87
2.9.2. Primjena NSGA za rješavanje OPMK problema	88
3. CELULARNI GENETSKI ALGORITAM.....	90
3.1. Struktura populacije	90
3.2. Evoluciono pravilo	92
3.3. Primjena CGA za rješavanje OPMK problema	93
3.3.1. Struktura hromozoma	94
3.3.2. Funkcija cilja.....	95
3.3.3. Analiza observabilnosti	98
3.3.4. Parametri CGA	100
4. REZULTATI SIMULACIJA	105
4.1. Osnovni OPMK problem	105
4.2. Robusnost mjerne konfiguracije.....	112
4.3. Komunikaciona ograničenja	113

5. ZAKLJUČAK.....	117
6. REFERENCE.....	122
7. DODATAK.....	130
IEEE tipski sistem sa 14 čvorova	130
IEEE tipski sistem sa 30 čvorova	131
IEEE tipski sistem sa 57 čvorova	133
IEEE tipski sistem sa 118 čvorova	137

PREGLED KORIŠĆENIH AKRONIMA

ACO	Ant Colony Optimization – Optimizacioni metod baziran na koloniji mrava
AGC	Automatic Generation Control – Automatska kontrola učestanosti i aktivnih snaga generatora, kao i razmjene snage sa okolnim sistemima
BPSO	Binary Particle Swarm Optimization – Optimizacioni metod baziran na kretanju grupe čestica kod koga su operatori binarnog tipa
CGA	Cellular Genetic Algorithm – Celularni genetski algoritam
CGAE	Cellular Genetic Algorithm with Evolutional Rule – Celularni genetski algoritam sa evolucionim pravilom
DFT	Discrete Fourier Transformation
EES	Elektroenergetski sistem
EMS	Energy Management System – Sistem za upravljanje tokom energije (upravljanje EES)
FFT	Fast Fourier Transformation
GA	Genetic Algorithm – Genetski Algoritam
GPS	Global Positioning System
ICT	Information and Communication Technology
IEA	International Energy Agency
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IGA	Immunity Genetic Algorithm – Imuni genetski algoritam
ILS	Iterative Local Search – Optimizacioni metod zasnovan na iterativnom postupku lokalne pretrage prostora rješenja
MKO	Minimalni Kvadrati Odstupanja
NEWS	North East West South – tip susjedstva kod celularne strukture populacije
NSDEA	Nondominated Sorting Differential Evolution Algorithm – Diferencijalni algoritam sa nedominiranim sortiranjem
NSGA	Nondominated Sorting Genetic Algorithm – Genetski algoritam sa nedominiranim sortiranjem
OPMK	Optimalno Planiranje Mjerne Konfiguracije
PMU	Phasor Measurement Unit – Fazorski mjerni uređaj
PSO	Particle Swarm Optimization – Optimizacioni metod baziran na kretanju grupe čestica
RTU	Remote Terminal Unit – Uređaj koji se nalazi u svim postrojenjima kojima se daljinski upravlja. Ima za zadatak da proslijeđuje mjerne informacije centru upravljanja kao i da prima upravljačke naredbe.
SA	Simulated Annealing – Optimizacioni metod zasnovan na simuliranom kaljenju
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition – Sistem za nadgledanje, upravljanje i prikupljanje mjernih podataka
SE	Statička estimacija
TS	Tabu Search – Optimizacioni postupak zasnovan na tabu listama

UVOD

Sigurnost snabdijevanja energijom i održivost postojećeg energetskeg bilansa prioritetna su pitanja koja tretiraju energetske politike svih razvijenih zemalja. Značajno mjesto u predloženim odgovorima zauzimaju reforme u elektroenergetskom sektoru. One, između ostalog, podrazumijevaju dinamičniji razvoj tržišta električne energije, aktivniju razmjenu električne energije sa okolnim sistemima, razvoj distribuirane proizvodnje, veći stepen iskorišćenja alternativnih izvora energije kao i podizanje nivoa usluga potrošača. Sve to stvara nove uslove rada koji postojećim elektroenergetskim sistemima (EES) otežavaju obavljanje njihovog osnovnog zadatka, tj. pouzdano i ekonomično snabdijevanje potrošača električnom energijom propisanog kvaliteta u dovoljnim količinama.

Savremeni standardi proizvodnje i potrošnje električne energije će, osim na strukturne promjene u elektroenergetskim mrežama, najznačajnije uticati na povećanje dinamike, obima i kvaliteta upravljanja EES. Osnovni preduslov za kvalitetno upravljanje je pouzdan monitoring svih parametara od interesa (parametri režima i elemenata EES, uklopno stanje mreže, cijena električne energije, meteorološka prognoza itd.). Pouzdanost monitoringa je, osim hardverskom osnovom, presudno uslovljena kvalitetom estimacije stanja sistema. Osnovni zadatak estimacije stanja sistema je da obezbijedi pouzdanu informaciju o svim parametrima od interesa za upravljanje na bazi redundantnih mjerenja raspoređenih širom sistema. Pored algoritma estimacije stanja, na kvalitet procjene stanja presudno utiče i mjerna konfiguracija. Ona mora da obezbijedi dovoljan nivo pouzdanih informacija o mjerenim parametrima sistema uzimajući u obzir sve očekivane okolnosti koje ograničavaju njen normalan rad.

Cilj ove doktorske disertacije je unaprijeđenje pouzdanosti statičke estimacije stanja kroz pronalaženje optimalne strategije za kreiranje mjerne konfiguracije. Prilikom definisanja kriterijuma optimizacije uzeti su u obzir tehnički i ekonomski kriterijumi koji su od praktičnog interesa. Tehnički kriterijumi obuhvataju sve okolnosti koje mogu da ograniče, ili čak, onemoguće uspješnu estimaciju stanja. Osnovni zadatak mjerne konfiguracije je da obezbijedi dovoljnu informacionu osnovu za izvršenje statičke estimacije stanja. Tada mjerna konfiguracija obezbijeduje osnovnu (baznu) observabilnost sistema, tj. moguće je procijeniti sve napone čvorova i odgovarajuće fazne stavove. Međutim, bazna observabilnost nije dovoljna za postizanje estimacije stanja zadovoljavajućeg nivoa sigurnosti i pouzdanosti. Ispad jednog mjerenja ili minimalna promjena u konfiguraciji mreže može dovesti do gubitka observabilnosti, a filtriranje grešaka praktično nije moguće zbog nulte redundanse kada su mjerni uređaji u pitanju. Dakle, optimalna mjerna konfiguracija mora biti dovoljno robusna da obezbijedi dovoljan broj podataka potreban za kvalitetnu estimaciju stanja i u slučajevima kada dolazi do ispada elemenata mreže ili mjernih uređaja. Željeni nivo robusnosti mjerne konfiguracije određen je usvojenim tehničkim kriterijumima optimizacije. Među njima su najčešće analizirani: promjenljiva konfiguracija mreže usljed različitih radnih režima (normalne ili havarijske promjene uklopnog stanja mreže), pouzdanost mjernih uređaja koji čine mjernu konfiguraciju i komunikacioni kapaciteti mjernih uređaja i transformatorskih stanica u kojima se instalira mjerna oprema. Zadovoljavanje tehničkih kriterijuma uslovljava povećanje nivoa redundanse, a to značajno uvećava nivo investicije u mjernu konfiguraciju. Stoga, svi tehnički kriterijumi suprotstavljeni su jednom ekonomskom, a to je cijena mjerne konfiguracije. Cijena zavisi od tipa mjernih uređaja koji se koriste, njihovih karakteristika, kao i ukupnog broja uređaja koji čine optimalnu mjernu konfiguraciju. Na taj način u optimalnoj mjernoj konfiguraciji ostvaruje se ravnoteža između tehničkih i ekonomskog kriterijuma.

Problem optimizacije mjerne konfiguracije je kombinatorne prirode i njegova dimenzionalnost je eksponencijalno zavisna od veličine analiziranog sistema. Uslijed toga, optimizacioni problem se direktno može riješiti samo za sisteme manjih dimenzija. Direktno rješavanje problema za veće, praktične sisteme, zbog složenosti problema, odnosno veličine prostora rješenja, nije moguće izvesti za neko prihvatljivo vrijeme koristeći standardne hardverske kapacitete. U tom slučaju, koriste se tehnike za strateško pretraživanje prostora rješenja kao što su: heurističke, metaheurističke i tehnike cjelobrojnog programiranja. U ovom radu biće detaljno obrađene sve tehnike koje su u upotrebi, a posebna pažnja biće posvećena predloženoj tehnici, celularnom genetskom algoritmu (CGA) i njenim prednostima u rješavanju problema kreiranja optimalne mjerne konfiguracije.

CGA pripada grupi metaheurističkih tehnika a podgrupi genetskih algoritama (GA). Izdvaja se po posebnoj strukturi populacije i načinu na koji su standardni operatori GA primijenjeni. Prostor rješenja pretražuje se lokalno i globalno, što mu omogućava da veoma uspješno izbjegava lokalne optimume. Time ostvaruje bolje performanse u pretrazi prostora rješenja u odnosu na druge tehnike bazirane na GA, ali i ostale tehnike koje se koriste za rješavanje problema kreiranja optimalne mjerne konfiguracije.

Definisanje optimalne strategije za raspodjelu mjernih uređaja širom sistema uslovljena je i tipom mjernih uređaja. Tip mjernog uređaja definisan je prije svega mjerenom veličinom. Mjerene veličine su ulazni podatak za algoritam statičke estimacije stanja. Kao izlazne veličine, estimator stanja daje pouzdanu procjenu efektivnih vrijednosti napona čvorova sistema sa odgovarajućim faznim stavovima. Na osnovu njih moguće je odrediti sve ostale veličine od interesa (tokove snaga po elementima sistema, padove napona, struje itd.). Razlikuju se dvije grupe mjernih uređaja koje se danas koriste za potrebe monitoringa sistema: klasična mjerenja i fazorska mjerenja. Klasična mjerenja koja su u širokoj upotrebi su: voltmetri, ampermetri, vatmetri i varmetri. Karakteristična su po tome što mjere efektivnu ili maksimalnu vrijednost napona, struje, aktivne i reaktivne snage. Fazorska mjerenja, kao što im samo ime govori, mjere fazor napona u čvoru u kome su instalirana i fazore struja grana incidentnih tom čvoru. Tu mogućnost imaju zato što su sva fazorska mjerenja u sistemu sinhronizovana sa sistemom za globalno pozicioniranje (GPS) što im dozvoljava precizno mjerenje faznog stava. Iako ideja fazorskih mjerenja postoji od 60-ih godina prošlog vijeka, ona su pravu primjenu dobila tek sa razvojem komunikacionih tehnologija u posljednjih deset godina. Razlozi za široku primjenu fazorskih mjerenja u odnosu na klasična mjerenja su: pouzdanost rada, visoka integrabilnost u savremena tehnološka rješenja monitoringa sistema, mogućnost upotrebe u praćenju prelaznih procesa kao i povećana efikasnost algoritma za estimaciju stanja. Osnovna razlika u formulaciji problema statičke estimacije stanja sistema između klasičnih mjernih sistema i onih koji koriste fazorska mjerenja je u složenosti sistema diferencijalnih jednačina. Na osnovu mjernih podataka od klasičnih mjernih uređaja formuliše se sistem nelinearnih diferencijalnih jednačina za potrebe procjene stanja sistema. S druge strane, upotrebom fazorskih mjerenja linearizuje se problem estimacije stanja, čime se ubrzava rad estimatora stanja. U ovom radu posebna pažnja posvećena je fazorskim mjerenjima kao osnovi budućih mjernih sistema zaduženih za monitoring parametara režima rada EES.

Performanse predložene metode upoređene su sa rezultatima postojećih metoda primijenjenih na tipske IEEE sisteme od 14, 30, 57 i 118 čvorova. Performanse su analizirane u dva osnovna nivoa: kvalitet ostvarenih rezultata i efikasnost procesa pretrage tj. brzina konvergencije optimalnom rješenju. Kvalitet rezultata definisan je tehničkim mogućnostima i cijenom optimalne mjerne konfiguracije. Brzina konvergencije je određena brojem iteracija, vremenom potrebnim za

postizanje optimalnog rješenja i sposobnošću izbjegavanja lokalnih optimuma. Predloženi metod daje rezultate koji odgovaraju globalnom optimumu uz bolje karakteristike konvergencije u odnosu na postojeće metode.

Glavni dio teksta disertacije organizovan je u 5 poglavlja. Prvo poglavlje posvećeno je savremenim izazovima upravljanja EES uz poseban osvrt na monitoring rada sistema. Pored toga, dat je pregled naučno-istraživačkog rada u oblasti statičke estimacije stanja i planiranja optimalne mjerne konfiguracije. Metodi optimizacije mjernih konfiguracija prezentirani su u drugom poglavlju. Treće poglavlje bavi se celularnim genetskim algoritmom kao metodologijom koja se predlaže kao najbolje rješenje za problem kreiranja optimalne mjerne konfiguracije za ostvarivanje pouzdane estimacije stanja. Rezultati primjene predložene metodologije i upoređenje sa postojećim metodama i tehnikama dati su u četvrtom poglavlju. Na kraju, u okviru Zaključka, dat je pregled postavljenih i ostvarenih ciljeva u ovoj disertaciji.

1. IZAZOVI UPRAVLJANJA ELEKTROENERGETSKIM SISTEMIMA

Osnovna uloga elektroenergetskih sistema je da obezbijede dovoljno, sigurno, kvalitetno i ekonomično snabdijevanje potrošača električnom energijom. Potreban uslov da bi se to ostvarilo je da sistem raspolaže sa odgovarajućim proizvodnim, prenosnim i distributivnim kapacitetima. Način njihove eksploatacije definiše uspješnu realizaciju osnovne funkcije EES. Eksploatacija EES se često definiše kao skup upravljačkih akcija preduzetih u cilju zadovoljenja potreba potrošača, uz uslov da se obezbijede sigurnost pogona izvora i mreže, pouzdanost napajanja potrošača kvalitetnom električnom energijom i najmanji troškovi poslovanja [1]. Sve funkcije eksploatacije mogu se podijeliti prema vremenskim periodima u kojima se izvršavaju:

- operativno planiranje – ili priprema pogona, obuhvata određeni vremenski period (dnevni, sedmični, mjesečni ili godišnji) koji prethodi samoj upravljačkoj akciji, tj. događaju u sistemu koji je uslovljava,
- upravljanje u realnom vremenu – obuhvata kratak period prije i poslije događaja koji uslovljava upravljačku akciju, i
- analiza ostvarenog pogona – obuhvata period nakon izvedenih upravljačkih akcija i tiče se kritičke analize ostvarenog kvaliteta pripreme pogona i upravljanja u realnom vremenu.

Posebno izazovne su one funkcije eksploatacije koje se tiču upravljanja u realnom vremenu, jer je vrijeme odlučivanja i reagovanja vrlo kratko usljed izražene dinamike rada EES. Kako bi se osiguralo uspješno upravljanje u realnom vremenu angažuju se jaki računarski kapaciteti sa odgovarajućim aplikacijama dizajniranim samo za potrebe upravljanja. Time se veliki broj upravljačkih akcija automatizuje, čime se smanjuje vrijeme odziva sistema upravljanja na stohastičke procese u EES koji mogu narušiti normalan rad sistema. Kod savremenih EES funkcije upravljanja u realnom vremenu mogu se podijeliti na dvije grupe:

- osnovne funkcije:
 - akvizicija i arhiviranje podataka,
 - kontrola topologije mreže,
 - kontrola prekoračenja i alarma,
 - automatska regulacija učestanosti, proizvodnje i razmjene aktivnih snaga (Automatic Generation Control - AGC),
 - regulacija napona i reaktivnih snaga,
 - pogonska statistika
- dodatne funkcije:
 - statička estimacija (stanja i parametara) na bazi redundantnog skupa informacija iz sistema
 - analiza sigurnosti pogona
 - ekonomski dispečing aktivnih snaga
 - izrada optimalnog plana napona, proizvodnje/apsorpcije i tokova reaktivnih snaga.

Navedene funkcije upravljanja u realnom vremenu nisu uvijek bile obuhvaćene na isti način u sistemu upravljanja EES. Tako je kod klasičnih sistema broj dodatnih funkcija bio ograničen na analizu ostvarenog upravljanja. Sa razvojem sistema (povećanjem konzuma, proizvodnih i prenosnih kapaciteta, a pogotovo s rastom razmjene električne energije između sistema u interkonekciji) upravljanje je imalo sve složeniji zadatak da očuva sigurnost EES, pa je rastao i broj dodatnih funkcija. Pored toga, od kvaliteta upravljanja direktno zavisi i profit koji se može ostvariti od

razmjene električne energije sa susjednim sistemima, koja je intenzivirana razvojem tržišta električne energije. Kod modernih EES postoji težnja da se većina dodatnih funkcija upravljanja u realnom vremenu presele u grupu osnovnih funkcija. Dakle, upravljanje EES značajno zavisi od strukture sistema kojim se upravlja, kao i uslovima na tržištu električne energije.

1.1. Struktura elektroenergetskih sistema

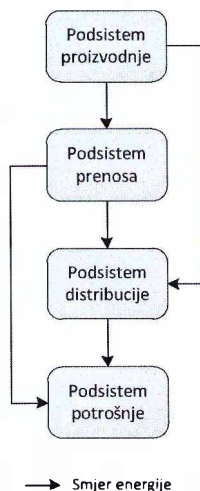
Restruktuiranje, privatizacija elektroprivrednih kompanija, liberalizacija i deregulacija tržišta procesi su koji su uticali na transformaciju strukture elektroenergetskog sektora, a time i definisali savremene metode upravljanja EES. Restruktuiranje nacionalnih elektroprivrednih kompanija je vrlo složen proces koji zavisi od nacionalne energetske strategije i politike, kao i makroekonomskih pokazatelja države. Način na koji će biti izvršena varira od države do države i ne postoji univerzalna strategija koja se može primjeniti. Privatizacija elektroprivrednih kompanija prije svega znači napuštanje odrednice električne energije kao socijalne kategorije. Bitno je naglasiti da privatizacija nije dovoljan uslov da bi se obezbijedila konkurentnost na tržištu električne energije. Konkurentnost je osnovni preduslov za postizanje veće efikasnosti snabdijevanja i niže cijene električne energije. Ona se postiže kroz pravilno pripremljen regulatorni okvir kojim se upravlja odnosima na tržištu.

Liberalizacija tržišta električne energije predstavlja težnju za uvođenjem manje restriktivne regulative za kompanije iz elektroenergetskog sektora. Iz ovoga slijedi i deregulacija tržišta, ili reregulacija (po nekim izvorima bolji naziv [2]) koja se tiče uspostavljanja novog regulatornog okvira za energetske sektor. U idealnim uslovima, liberalno tržište električne energije bi funkcionisalo u propisanom regulatornom okviru, uz nadzor od strane regulatornog tijela koje ima za zadatak zaštitu interesa potrošača, a bez prisustva bilo kakvog političkog uticaja koji bi uslovljavao veličinu izvora ili gorivo koje on koristi.

S aspekta upravljanja, posebno su značajne klasična (Slika 1.1) i savremena struktura elektroenergetskog sektora (Slika 1.2). Klasičnu strukturu karakteriše vertikalno integrisani EES kod koga je centralizovano upravljanje sistemom. EES su razvijani tako da prenesu veliku snagu sa udaljenih lokacija, gdje su obično smještene velike elektrane, do centara potrošnje. Tada su prihvatljivi bili samo veliki izvori zbog toga što ih prati veća efikasnost, a time i isplativost u odnosu na manje izvore. Takođe, kada je priroda izvora u pitanju, posebno su bile cijenjene termoelektrane na uglj, zbog njihovog pozitivnog uticaja na stabilnost sistema. Elektroenergetska mreža planirana je u skladu sa lokacijom velikih izvora energije i potrošačkih centara. U ovoj situaciji centralizacija sistema upravljanja je najbolje rješenje.

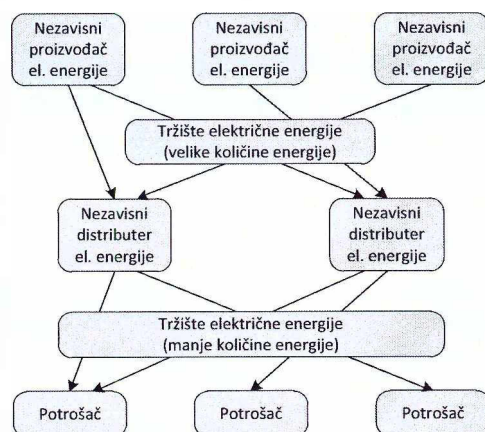
Kod savremenih, privatizovanih elektroprivrednih kompanija, gdje se električnom energijom trguje kao sa bilo kojim drugim dobrim, potpuno centralizovano upravljanje nije poželjno. Razlog je prevelik broj elemenata EES različitog uticaja na kvalitet rada ukupnog sistema koji onemogućava efikasno upravljanje ukoliko se vrši samo sa jednog mjesta (Slika 1.3). To se prije svega vidi u ekspanziji distribuirane proizvodnje i obnovljivih izvora energije. Oni se za razliku od velikih proizvodnih kapaciteta nalaze u blizini centara potrošnje i priključuju se na distributivnu mrežu. To su najčešće mali proizvodni kapaciteti, za razliku od klasičnih trendova u proizvodnji električne energije. Među pomenutim, malim proizvodnim kapacitetima podrazumijevaju se: male hidroelektrane, kogeneracije (biomasa), vjetroelektrane (manji parkovi i pojedinačno), solarne elektrane (veće instalacije i instalacije na nivou domaćinstava) i drugi raspoloživi obnovljivi izvori (geotermalna energija, energija talasa itd.). Pored broja elemenata, na složenost upravljanja

distribuiranom proizvodnjom utiče i stohastičnost proizvodnje iz obnovljivih izvora (promjenljivi vremenski uslovi).



Slika 1.1 Klasična struktura elektroenergetskog sektora

Distribuirana proizvodnja fundamentalno mijenja strukturu distributivnih mreža. One od tradicionalno pasivnih (Slika 1.4a) mreža, postaju aktivne (Slika 1.4b). Usljed decentralizacije proizvodnje povećava se značaj stabilnosti sistema i regulacije frekvencije, kao i čuvanja viškova električne energije. Kada je čuvanje energije u pitanju, posebno su pogodne termoelektre, jer čuvanje goriva na lageru omogućava njegovo korišćenje u trenutku kada je to isplativo za proizvođača.



Slika 1.2 Moderna struktura elektroenergetskog sektora

Veliki uticaj na razvoj elektroenergetskih sistema ima i cijena električne energije. Današnje procjene ukazuju na veliku nesigurnost u kretanju cijene električne energije. Procjene variraju od skromnih smanjenja do značajnog rasta uslovljenog rastućom potrošnjom (IEA – International Energy Agency).

Novi uslovi na tržištu značajno mijenjaju način rada sistema. S obzirom da je proizvodnja privatizovana, proizvođači nisu obavezni da proizvode električnu energiju kad god je to potrebno potrošačima, već kada je njima to isplativo. To znači da proizvođači mogu odabrati da proizvode samo baznu energiju što im odgovara zbog efikasnosti proizvodnje, odnosno izbjegavaju proizvodnju vršne energije koja je mali dio konzuma. Broj proizvođača je veliki, pa je posebno teško



Figure 1 consists of two diagrams, (a) and (b), illustrating network architectures. Diagram (a) shows an existing architecture with a central core (represented by a circle with a cross) connected to three distribution layers (represented by circles with a cross). Each distribution layer is connected to three access layers (represented by circles with a cross). The access layers are further connected to various network elements, including servers and routers. Diagram (b) shows the proposed architecture, which has a similar structure but with a different topology for the access layers. The access layers are connected to the distribution layers in a way that allows for more flexible routing and load balancing.

Slika 1.4 Distributivna mreža a) pasivna, b) aktivna

11

izazove kada je upravljanje u pitanju. Posebno se ističe problem modelovanja takvog generatora u proračunima tokova snaga. Naime, generator se ne može uključiti na konvencionalan način jer proizvodi energiju za dvije različite oblasti, što je suprotno osnovnoj pretpostavci o generatorima u jednoj oblasti. Drugi problem se tiče havarijske ispomoći u slučaju ispada takvog generatora.

Savremena struktura EES zahtijeva, prije svega, veliku fleksibilnost usljed dosta nesigurnih trendova uticajnih faktora (cijena električne energije, razvoj komercijalnih OIE tehnologija, uslova na tržištu električne energije, zahtjeva potrošača itd.) u budućnosti. Ta fleksibilnost se postiže odgovarajućim performansama elemenata sistema, a posebno je značajan i sistem upravljanja. Preduslov za uspješno upravljanje svim procesima koji karakterišu savremene EES je postojanje adekvatnog monitoringa. Sistem za monitoring mora da zadovolji u pogledu nivoa informacija, njihove preciznosti, pouzdanosti rada, upravljivosti i komunikacionih karakteristika. Monitoring današnjih sistema vrši se posredstvom SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) sistema. Oni imaju za zadatak nadgledanje i upravljanje elementima sistema, prikupljanje i čuvanje mjernih podataka od mjernih uređaja raspoređenih širom sistema. Mogućnosti sistema za monitoring rasle su sa razvojem informacionih i komunikacionih tehnologija (ICT), kako kroz razvoj algoritama u centru upravljanja, tako i kroz unaprijeđivanje funkcionalnosti samih mjernih uređaja. Upravljanje je utoliko kvalitetnije koliko je preciznija i pouzdanija informacija o parametrima radnog režima sistema, koja se dobija od sistema za monitoring.

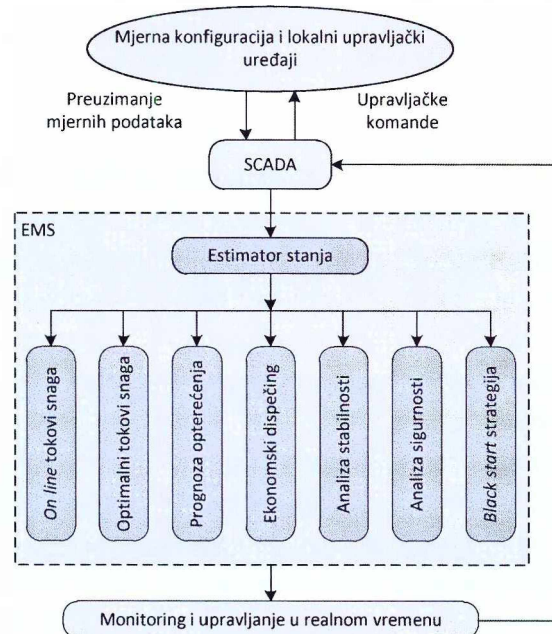
1.2. Monitoring rada elektroenergetskih sistema

Usljed izražene dinamike rada EES, precizne informacije iz sistema su neophodne za donošenje ispravnih i efikasnih upravljačkih odluka. Kakva će biti priroda upravljačkih odluka zavisi od toga u kakvom režimu rada se nalazi sistem. EES najveći dio vremena provodi u normalnom režimu rada. Tada su sve upravljačke akcije usmjerene na očuvanje postojećeg režima rada, kao i na ekonomičnost rada sistema. Međutim, mnoge nepredviđene okolnosti u sistemu (ispadi u mreži, proizvodnji ili potrošnji) dovode do napuštanja normalnog režima rada. Tada je potrebno pravovremenim i pravim upravljačkim akcijama što prije sistem vratiti u normalni radni režim kako bi se očuvala sigurnost rada ili, u slučaju većih poremećaja, spasio sistem od raspada. Iako upravljačke akcije nakon poremećaja imaju veliki značaj, posebna pažnja se posvećuje tzv. preventivnom upravljanju koje se izvršava u normalnom režimu rada. Ono ima za zadatak da predvidi moguće poremećaje na osnovu *real-time* informacija iz sistema, a onda preventivnim upravljačkim akcijama spriječi ili ublaži njihov efekat na sistem. Preventivno upravljanje sprovodi se na osnovu *on-line* analize sigurnosti rada sistema koristeći veoma detaljne mjerne informacije.

Režim rada sistema opisuje se karakterističnim promjenljivim parametrima režima (napon, učestanost, tokovi snaga, struje i druge promjenljive od interesa). Iako bi najjednostavniji pristup praćenja režima rada sistema bio instalacija onoliko mjernih uređaja koliko se promjenljivih režima prati, tom rješenju se ne pribjegava zbog visokih troškova za njegovu realizaciju. Ekonomičniji pristup je instalacija mjernih uređaja određenog tipa koji su strateški raspoređeni u sistemu tako da omogućavaju direktno mjerenje ili dovoljno informacija za naknadni proračun svih promjenljivih od interesa. Za tako formiranu mjernu konfiguraciju kaže se da obezbijедуje observabilnost sistema. Dakle, observabilnost sistema je neophodan preduslov da bi se omogućilo donošenje efikasnih upravljačkih odluka. Parametri čije poznavanje čini sistem observabilnim sadržani su u vektoru stanja. Njega čine efektivne vrijednosti napona čvorova i odgovarajući fazni stavovi. Na osnovu

vektora stanja i poznatih parametara mreže mogu se proračunati sve veličine od interesa za potpuno opisivanje radnog stanja sistema.

Prikupljanje mjernih informacija samo je jedna od funkcija sistema za monitoring koji je, s druge strane, podsistem jedinstvenog upravljačko-mjernog sistema (Slika 1.5). Sistem za monitoring ima za zadatak da sve prikupljene mjerne informacije prilagodi tako da se obezbijedi što precizniji uvid u stanje sistema. To se postiže kroz proračunavanje onih parametara od interesa koji nisu direktno mjereni, detekciju i identifikaciju mogućih grešaka u mjerenjima i njihovo otklanjanje, kao i prezentiranje svih parametara od interesa kroz odgovarajući interfejs prema korisniku.



Slika 1.5 Blok šema strukture SCADA/EMS sistema

Savremeni sistemi za monitoring sadržani su u funkcijama SCADA sistema. SCADA sistem se sastoji od centralne (*master*) stanice, koja komunicira sa jedinicama udaljenih terminala (RTU). Na taj način dispečeri u centru upravljanja imaju mogućnost da nadgledaju parametre i upravljaju transformatorskim stanicama i elektranama. Uzimajući u obzir cijenu RTU jedinica, ranije ih je bilo ekonomski prihvatljivo instalirati u svim elektranama i transformatorskim stanicama u prenosnoj mreži, dok je danas taj trend proširen i na distributivnu mrežu. Razlozi su težnje za poboljšanjem kvaliteta upravljanja na svim nivoima mreže, ekspanzija distribuirane proizvodnje, ali i cijena RTU uređaja koja prati opadajući trend.

RTU uređaji su opremljeni komunikacionom opremom koja se koristi za slanje mjernih podataka (preuzetih od mjernih uređaja iz transformatorske stanice gdje je RTU smješten) i statusa rasklopne preme (položaji prekidača, rastavljača, regulacionih otcjepa transformatora) ka centru upravljanja. S druge strane, oni se koriste i za primanje upravljačkih naredbi i podešavanja od strane centra upravljanja. Komunikaciona oprema za nadgledanje statičkog stanja sistema zahtjeva kapacitete u opsegu od 600 to 4800 bps sa ažuriranjem informacija svakih 2 do 10s, u zavisnosti od značaja posmatranih podataka.

Klasične funkcije SCADA sistema su:

- prikupljanje podataka – proslijeđivanje mjernih podataka i statusa rasklopne opreme centru upravljanja (telemetrija);

- upravljanje opremom – daljinsko upravljanje rasklopnom opremom (otvaranje i zatvaranje prekidača, upravljanje regulacionim otcjepima transformatora); svaka upravljačka odluka se softverski provjerava kako bi se izbjegle greške prilikom uklapanja ili isklapanja elemenata;
- sigurnosna ograničenja – definisanje ograničenja u obliku upravljačkih akcija koje mogu biti izvršene nad nekim elementom sistema, kao i ko ih može vršiti;
- alarmiranje – obavješćavanje operatora o neplaniranim događajima i neželjenim uslovima rada sistema i/ili njegovih elemenata. Alarmi su hijerarhijski grupisani u odnosu na značaj, odgovornost i vremenski okvir. Mogu biti podešeni da zahtijevaju potvrdu o detekciji od strane dispečera;
- čuvanje informacija – snimanje odabranih informacija, upravljačkih akcija i alarma;
- automatsko djelovanje – u slučaju događaja u sistemu koji mogu izazvati velike probleme u radu i dovesti do raspada sistema, SCADA sistem može biti podešen tako da automatski izvrši rasterećivanje sistema kako bi sačuvao sistem;
- dodatne funkcije – interfejs SCADA sistema se prilagođava potrebama dispečera i može uključiti razne dodatne načine prikaza informacija o radu sistema kako bi se olakšalo upravljanje kao npr. skiciranje trendova raznih veličina kako bi se stvorila osnova za preventivno upravljanje.

Centar upravljanja je hijerarhijski najbitniji element kod SCADA sistema i njegov kvalitetan i pouzdan rad direktno se odražava na rad EES. S tim u vezi, funkcije centra upravljanja se distribuiraju na više računara kako bi se i u slučaju ispada jednog, upravljanje nastavilo nesmetano posredstvom rezervnog sistema.

Kao što se može vidjeti sa blok šeme sistema upravljanja (Slika 1.5), svi mjerni podaci se iz SCADA sistema proslijeđuju estimatoru stanja, a onda funkcijama sistema upravljanja kojima se precizno analizira radni režim sistema i to:

- proračun tokova snaga – proračun svih veličina od interesa za dobijanje precizne slike o statičkom stanju EES (fazori napona u čvorovima, struja elemenata sistema, tokovi aktivnih i reaktivnih snaga i ostale veličine od interesa za tačno definisanje radnih uslova svih elemenata sistema);
- proračun optimalnih tokova snaga – uzimanje u obzir ekonomskih kriterijuma prilikom planiranja angažovanja proizvodnih kapaciteta kako bi se ostvarili ekonomski optimalni tokovi snaga u mreži;
- prognoza opterećenja – prognoziranje konzuma kako bi se napravio plan optimalnog angažovanja proizvodnih i prenosnih i distributivnih kapaciteta;
- ekonomski dispečing – planiranje angažovanja agregata u cilju postizanja optimalnog pogona s aspekta troškova rada,
- analiza stabilnosti sistema – analiza uticaja poremećaja u sistemu na stabilnost sistema;
- analiza sigurnosti sistema – provjera ispunjenosti definisanih ograničenja kako bi se očuvao siguran pogon, tj. normalni režim rada sistema;
- priprema strategije restauracije napajanja – definisanje automatskih ili kontrolisanih akcija za uspostavljanje napajanja cijelog konzuma u slučaju da je dio ili čitav (*black start* rutina) ostao bez napajanja.

Uvidom u dobijene rezultate svih navedenih analiza dispečer donosi optimalnu upravljačku odluku (ili je upravljačka odluka automatska ukoliko je vrijeme reagovanja od velikog značaja za očuvanje pouzdanog rada EES) koja se preko SCADA sistema prenosi na elemente EES.

Informacije koje prikuplja SCADA sistem mogu biti nepouzdanae usljed grešaka mjernih uređaja ili komunikacionih problema. Takve informacije iz sistema dovode do stvaranja pogrešne slike o radnom režimu, a time i do donošenja neodgovarajućih upravljačkih odluka. Taj problem se prevazilazi dodatnom funkcijom sistema upravljanja, estimacijom stanja.

1.3. Statička estimacija stanja elektroenergetskih sistema

Estimacija stanja je nezaobilazna funkcija savremenih sistema upravljanja. Ona ima za zadatak da obezbijedi najbolju moguću procjenu stanja sistema na osnovu redundantnih mjerenja iz sistema. Osnove estimacije stanja elektroenergetskih sistema postavio je F. C. Schweppe [3], [4] i [5]. Pod procjenom stanja podrazumijeva se određivanje pouzdane procjene vektora stanja, tj. modula napona čvorova mreže i odgovarajućih faznih stavova. Po tome je algoritam estimacije stanja sličan proračunu tokova snaga [1], [6], [7]. Značaj proračuna tokova snaga je očigledan jer se na osnovu dobijenih rezultata mogu dobiti sve veličine od interesa za definisanje kvaliteta rada pojedinih elemenata, a time i cjelokupnog EES (opterećenja vodova, padovi napona, profili potrošnje itd.). Najveći nedostatak proračuna tokova snaga je direktna uslovljenost kvaliteta proračuna od pouzdanosti ulaznih podataka, tj. informacija od mjernih uređaja. Estimacija stanja ima za zadatak da obezbijedi iste informacije kao i proračun tokova snaga, ali da na kvalitet njenih rezultata ne utiču moguće greške u mjernim podacima.

Osnovna razlika statičke estimacije stanja u odnosu na proračun tokova snaga je u nivou potrebnih informacija za pouzdan proračun vektora stanja. Naime, za sistem od n čvorova, potrebno je raspolagati sa $2n-1$ nezavisnih mjerenja iz sistema kako bi se kao rezultat proračuna tokova snaga dobio vektor stanja. Ta mjerenja se odnose na podešenu aktivnu snagu i napon generatora u sistemu i aktivnu i reaktivnu snagu potrošača, dok se za fiksne vrijednosti uzima informacija o uklopnom stanju mreže, kao i njeni parametri. Kod estimacije stanja, broj mjerenja je veći od $2n-1$. Ona ne moraju biti iste vrste kao mjerenja navedena kao potrebna za proračun tokova snaga. Za estimaciju stanja mogu se koristiti i mjerenja toka snage (aktivne i reaktivne) po granama, naponi u čvorovima i struje u granama. Akcenat je na suvišnim, tj. redundantnim mjerenjima koja omogućavaju da se u procesu estimacije stanja detektuju i identifikuju, a onda i otklone greške u mjerenjima. Što je veća redundansa, to je pouzdanija procjena stanja. Međutim, instalacija velikog broja mjernih uređaja nije ekonomična, pa je potrebno pronaći optimalni odnos između cijene mjerne konfiguracije i željenih performansi estimacije stanja.

1.3.1. Istorijat problema statičke estimacije

Od formulacije problema statičke estimacije (SE) stanja od strane Schweppe-a, u literaturi se može naći veliki broj radova koji se bave teorijskim i praktičnim usavršavanjima osnovne metodologije za rješavanje problema. Pregled istraživačkog rada može se naći u [8]. Usljed proračunske zahtjevnosti metodologije za rješavanje problema statičke estimacije, posebna pažnja u istraživanju je posvećena mogućnostima ubrzavanja algoritma estimacije (brzina i pouzdanost konvergencije, memorijski zahtjevi). S tim u vezi, poseban značaj za unaprijeđivanje metodologije SE ima pristup koji se bavi eksploatacijom rijetkih matrica (koje su prisutne u matematičkom modelu SE) prezentiran u [9]. S druge strane, takođe fundamentalan doprinos u unaprijeđenju metodologije rješavanja SE dat je u okviru [10]. Predloženi metod je zasnovan na brzom raspregnutom metodu za proračun tokova snaga [11]. Odgovarajući brzi raspregnuti metod estimacije stanja zahtjeva manje

Informacije koje prikuplja SCADA sistem mogu biti nepouzdanae usljed grešaka mjernih uređaja ili komunikacionih problema. Takve informacije iz sistema dovode do stvaranja pogrešne slike o radnom režimu, a time i do donošenja neodgovarajućih upravljačkih odluka. Taj problem se prevazilazi dodatnom funkcijom sistema upravljanja, estimacijom stanja.

1.3. Statička estimacija stanja elektroenergetskih sistema

Estimacija stanja je nezaobilazna funkcija savremenih sistema upravljanja. Ona ima za zadatak da obezbijedi najbolju moguću procjenu stanja sistema na osnovu redundantnih mjerenja iz sistema. Osnove estimacije stanja elektroenergetskih sistema postavio je F. C. Schweppe [3], [4] i [5]. Pod procjenom stanja podrazumijeva se određivanje pouzdane procjene vektora stanja, tj. modula napona čvorova mreže i odgovarajućih faznih stavova. Po tome je algoritam estimacije stanja sličan proračunu tokova snaga [1], [6], [7]. Značaj proračuna tokova snaga je očigledan jer se na osnovu dobijenih rezultata mogu dobiti sve veličine od interesa za definisanje kvaliteta rada pojedinih elemenata, a time i cjelokupnog EES (opterećenja vodova, padovi napona, profili potrošnje itd.). Najveći nedostatak proračuna tokova snaga je direktna uslovljenost kvaliteta proračuna od pouzdanosti ulaznih podataka, tj. informacija od mjernih uređaja. Estimacija stanja ima za zadatak da obezbijedi iste informacije kao i proračun tokova snaga, ali da na kvalitet njenih rezultata ne utiču moguće greške u mjernim podacima.

Osnovna razlika statičke estimacije stanja u odnosu na proračun tokova snaga je u nivou potrebnih informacija za pouzdan proračun vektora stanja. Naime, za sistem od n čvorova, potrebno je raspolagati sa $2n-1$ nezavisnih mjerenja iz sistema kako bi se kao rezultat proračuna tokova snaga dobio vektor stanja. Ta mjerenja se odnose na podešenu aktivnu snagu i napon generatora u sistemu i aktivnu i reaktivnu snagu potrošača, dok se za fiksne vrijednosti uzima informacija o uklopnom stanju mreže, kao i njeni parametri. Kod estimacije stanja, broj mjerenja je veći od $2n-1$. Ona ne moraju biti iste vrste kao mjerenja navedena kao potrebna za proračun tokova snaga. Za estimaciju stanja mogu se koristiti i mjerenja toka snage (aktivne i reaktivne) po granama, naponi u čvorovima i struje u granama. Akcenat je na suvišnim, tj. redundantnim mjerenjima koja omogućavaju da se u procesu estimacije stanja detektuju i identifikuju, a onda i otklone greške u mjerenjima. Što je veća redundansa, to je pouzdanija procjena stanja. Međutim, instalacija velikog broja mjernih uređaja nije ekonomična, pa je potrebno pronaći optimalni odnos između cijene mjerne konfiguracije i željenih performansi estimacije stanja.

1.3.1. Istorijat problema statičke estimacije

Od formulacije problema statičke estimacije (SE) stanja od strane Schweppe-a, u literaturi se može naći veliki broj radova koji se bave teorijskim i praktičnim usavršavanjima osnovne metodologije za rješavanje problema. Pregled istraživačkog rada može se naći u [8]. Usljed proračunske zahtjevnosti metodologije za rješavanje problema statičke estimacije, posebna pažnja u istraživanju je posvećena mogućnostima ubrzavanja algoritma estimacije (brzina i pouzdanost konvergencije, memorijski zahtjevi). S tim u vezi, poseban značaj za unaprijeđivanje metodologije SE ima pristup koji se bavi eksploatacijom rijetkih matrica (koje su prisutne u matematičkom modelu SE) prezentiran u [9]. S druge strane, takođe fundamentalan doprinos u unaprijeđenju metodologije rješavanja SE dat je u okviru [10]. Predloženi metod je zasnovan na brzom raspregnutom metodu za proračun tokova snaga [11]. Odgovarajući brzi raspregnuti metod estimacije stanja zahtjeva manje

memorije i brži je usljed rješavanja manjeg broja jednačina sa konstantnim koeficijentima (ne mijenjaju se u toku iteracija) u okviru matrica. Dalje unaprijeđenje ovog postupka nastavljeno je u okviru [12]. Isti postupak, ali u pravougaonim koordinatama predstavljen je u [13]. U [14] je predstavljena formulacija raspregnutog metoda SE za upotrebu u distributivnim mrežama. Međutim, pri određenim radnim uslovima, kao i kombinaciji mrežnih parametara, karakteristike konvergencije brzog raspregnutog metoda za estimaciju stanja mogu biti značajno slabije. To se ne ogleda samo u brzini već i u pouzdanosti estimacije jer može doći do situacije da, usljed primjene aproksimacija raspregnutog postupka, vrijednosti matrice Jacobian-a mjerenja ne budu dovoljne preciznosti. U tom slučaju, rezultujuća procjena vektora stanja ne odgovara najboljoj mogućoj procjeni.

Na razvoj metoda za estimaciju stanja uticao je i razvoj performansi računara koji se koriste u upravljačkim centrima. Naime, tokom posljednje dvije decenije, memorijski kapaciteti i brzina računara su značajno povećani, pa proračunska zahtjevnost metoda za estimaciju nije analizirana u onoj mjeri kao ranije. Estimacija stanja sistema može se na savremenim računarima izvršiti i nekoliko puta u toku 1 minuta, ukoliko je učestanost osvježavanja mjernih podataka dovoljno velika, a obim grešaka mjerenja nije veliki. Međutim, razvoj tehnologije mjernih uređaja uslovljava proširenje obima mjernih podataka koje je potrebno uključiti u proces SE. S druge strane, dinamika procesa na tržištu električne energije uslovljava je snažno povezivanje sistema koji, radi postizanja zadovoljavajućih performansi, moraju imati visoko iskoordinisan rad. To se postiže proširivanjem djelovanja nacionalnih estimatora stanja na veće geografske teritorije, čime se omogućava precizno praćenje razmjene električne energije između udaljenih nacionalnih sistema [15]. Dakle, metod SE mora imati mogućnost da se efikasno nosi sa velikim mrežama i odgovarajućim mjernim konfiguracijama, što istraživanje efikasnosti metoda ponovo čini aktuelnom temom za istraživanje, bez obzira na performanse računara.

Vodeći računa o dimenzionalnosti problema SE, predlaže se postupak u [16] koji dio estimacije stanja vrši na nivou transformatorske stanice. Postupak estimacije stanja je razložen u dvije faze. Prvu fazu čini estimacija na osnovu mjerenja koja su dio transformatorske stanice pomoću linearnog estimatora. Rezultat prve faze čine tokovi snaga i naponi čvorova, i oni se proslijeđuju drugoj fazi u okviru konvencionalne estimacije stanja na nivou cijelog sistema. Kod ovog postupka glavna prednost hijerarhijske podjele estimacije stanja je ta što se prva faza estimacije stanja može izvršiti distribuirano (nezavisno na nivou geografski razdvojenih djelova posmatranog sistema). To posebno ima korist u slučaju visokog nivoa redundanse mjerenja, kada su zahtjevi za komunikacionim kapacitetima veliki. Usljed distribuiranog pristupa SE postiže se i određena ušteda u angažovanju proračunskih kapaciteta. U [17] je dalje proširen postupak iz [16] sa usvajanjem manjeg broja privremenih promjenljivih. Predloženi metod je formulisan kao linearni na nivou čitavog sistema, a ne samo izolovanih transformatorskih stanica. Usljed velike ekspanzije fazorskih mjerenja, metod estimacije stanja značajno je olakšan jer je matematički model problema linearan u odnosu na klasičnu formulaciju. Pored jednostavnije matematičke formulacije problema, olakšavajuća okolnost je i veća pouzdanost fazorskih mjerenja u odnosu na klasična, čime je umanjen obim procesiranja grešaka mjerenja.

U daljem tekstu biće predstavljen osnovni metod rješavanja estimacije stanja, a onda i njegova najznačajnija unaprijeđenja i novi predloženi metodi.

1.3.2. Metodi estimacije stanja

Statička estimacija stanja predstavlja proceduru određivanja fazora napona u svim čvorovima sistema u nekom određenom vremenskom trenutku. To se može ostvariti i direktno, putem mjerenja (fazorska mjerenja). Međutim, takav pristup bi bio veoma osjetljiv na greške mjerenja. Taj problem se prevazilazi pomoću redundantnih mjerenja. Mjerene veličine od interesa za estimaciju stanja su: tokovi snaga (aktivnih i reaktivnih) po granama, ili u vidu injektiranja, kao i efektivne vrijednosti i fazori napona i struje.

Estimacija vektora stanja je vezana za određeni vremenski trenutak. Dakle, sva mjerenja bi trebala biti očitana istovremeno i iskorišćena kao ulazni podatak za estimator stanja. Međutim, to nije moguće praktično ostvariti usljed različitog kašnjenja u prenosu informacija od mjernog uređaja do centra upravljanja. S tim u vezi, određena raznovremenost očitavanja mjernih uređaja je prihvatljiva, jer se vrši estimacija statičkog stanja sistema, a nju karakterišu sporije promjene režimskih parametara.

Stanje sistema se opisuje vektorom stanja, tj. naponima čvorova i odgovarajućim faznim stavovima. Time se podrazumijeva konstantnost parametara sistema i uklopnog stanja mreže. Međutim, greške u parametrima ili uklopnom stanju sistema mogu se pojaviti (neprijavljeni kvarovi, uticaj temperature na promjenu otpornosti itd.) i dovesti do nepouzdanosti estimacije stanja. Usljed toga, u okviru algoritma algoritmu estimacije stanja uključuje se i estimacija parametara.

1.3.2.1. Metod minimalnih kvadrata odstupanja

Proces estimacije stanja ima za zadatak da kao rezultat obezbijedi najpouzdaniju procjenu stanja sistema na osnovu raspoloživih mjerenja. Metod koji se široko koristi u statistici, a može se iskoristiti i za statičku estimaciju stanja EES, je metod najizvjesnije estimacije (*maximum likelihood estimation*). Greške mjerenja, koje su osnovni razlog ekspanzije estimatora stanja, pretpostavljaju se sa poznatom funkcijom raspodjele vjerovatnoće koja zavisi od nepoznatih parametara (vektor stanja). Ukupna funkcija gustine vjerovatnoće za sva mjerenja može se izraziti preko pomenutih nepoznatih parametara. Ova funkcija se naziva funkcija izvjesnosti i ima maksimalnu vrijednost kada su nepoznati parametri odabrani tako da su najbliže svojim stvarnim vrijednostima. Dakle, estimacija stanja EES može se formulirati kao optimizacioni postupak u kome je potrebno izvršiti maksimizaciju funkcije izvjesnosti (u ovom slučaju funkcije cilja), koja je funkcija nepoznatih promjenljivih stanja. Rješenje optimizacionog problema su vrijednosti elemenata vektora stanja za koje funkcija cilja ima maksimalnu vrijednost.

Greške mjernih uređaja pretpostavljaju se sa normalnom (Gauss) raspodjelom koja se opisuje srednjom vrijednošću μ , i varijansom σ^2 . Mijenjanjem ovih parametara može se pronaći optimalna vrijednost vektora stanja, tj. njegova najbolja procjena. Ukupna funkcija gustine vjerovatnoće predstavlja vjerovatnoću mjerenja m nezavisnih mjerenja, od kojih svako ima istu funkciju gustine vjerovatnoće koja odgovara normalnoj raspodjeli. Ukupna funkcija gustine vjerovatnoće može se izraziti kao proizvod pojedinačnih funkcija gustine raspodjele ako se pretpostavi da je svako mjerenje nezavisno:

$$f_m(z) = f(z_1)f(z_2) \cdots f(z_m), \quad (1.1)$$

gdje je $z = [z_1 \ z_2 \ \dots \ z_m]^T$ – vektor mjerenja.

Funkcija $f_m(z)$ je funkcija izvjesnosti za vektor z . Ona predstavlja mjeru vjerovatnoće da vektor z uzme tačno određenu kombinaciju vrijednosti mjerenja koja pripadaju posmatranoj mjernoj

konfiguraciji. Cilj metoda najizvjesnije estimacije stanja je maksimizacija funkcije izvjesnosti kroz varijaciju pretpostavljenih parametara funkcije gustine vjerovatnoće, tj. srednje vrijednosti μ i standardne devijacije σ . Kako bi se pojednostavila procedura prilikom optimizacije, funkcija $f_m(z)$ se obično mijenja sa njenim logaritmom. Ta modifikovana funkcija može se napisati kao:

$$\log f_m(z) = \sum_{i=1}^m \log f(z_i) = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \left(\frac{z_i - \mu_i}{\sigma_i} \right)^2 - \frac{m}{2} \log 2\pi - \sum_{i=1}^m \log \sigma_i. \quad (1.2)$$

Slijedi da se optimizacioni problem može formulisati kao:

$$x_{\text{opt}} = \arg \max_x (\log f_m(z)), \quad (1.3)$$

ili, uzimajući u obzir (1.2)

$$x_{\text{opt}} = \arg \min_x \left(\sum_{i=1}^m \left(\frac{z_i - \mu_i}{\sigma_i} \right)^2 \right), \quad (1.4)$$

gdje je x_{opt} – optimalna procjena vektora stanja.

Dakle, problem optimizacije je sveden na minimizaciju funkcije (1.4). On se može preformulisati tako da se izrazi preko rezidijuma mjerenja, koji se definiše kao:

$$r_i = z_i - \mu_i = z_i - E(z_i) \quad (1.5)$$

gdje je $E(z_i)$ – srednja vrijednost, tj. matematičko očekivanje vrijednosti mjerenja z_i . Ono se može izraziti kao nelinearna funkcija $h_i(x)$, koja povezuje izmjerenu vrijednost i -tog mjerenja i vektora stanja x .

Dakle, optimizacioni problem iz (1.4), može se definisati kao minimizacija zbira kvadrata modifikovanih rezidijuma svih mjerenja. Svakom rezidijumu mjerenja pridružen je odgovarajući težinski koeficijent koji je obrnuto proporcionalan pretpostavljenoj varijansi greške posmatranog mjerenja. Uzimajući to u obzir, formulacija optimizacionog problema je:

$$x_{\text{opt}} = \arg \min_x \left(\sum_{i=1}^m W_{ii} r_i^2 \right) \quad (1.6)$$

s. t. $z_i = h_i(x) + r_i, \quad i = 1, 2, \dots, m$

Optimizacioni problem u (1.6) formulisan je kao problem minimizacije sume uz ograničenje tipa jednakosti koje se formira na osnovu veze između vektora stanja i mjerenih veličina. Ovaj postupak optimizacije naziva se metod minimuma kvadrata odstupanja (MKO). Da bi se on mogao primijeniti, neophodno je definisati funkciju $h_i(x)$. Potrebno je definisati onoliko ograničenja (funkcija $h_i(x)$) koliko ima mjernih uređaja, pa se radi preglednosti, problem formuliše matricno kao:

$$z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ h_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \vdots \\ h_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_m \end{bmatrix} = h(x) + e \quad (1.7)$$

gdje su:

$h_i(x)$ – nelinearna funkcija koja povezuje i -ti mjerni uređaj sa vektorom stanja,

$x = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ – vektor stanja sistema sa n čvorova i

$e = [e_1, e_2, \dots, e_n]$ – vektor grešaka mjerenja, gdje je m broj mjernih uređaja.

Kada su u pitanju statističke karakteristike grešaka mjernih uređaja, prave se sljedeće pretpostavke:

- $E(e_i) = 0$, $i = 1, 2, \dots, m$ – matematičko očekivanje greške mjerenja je 0,
- $E[e_i e_j] = 0$ – greške mjerenja su nezavisne; slijedi da važi:

$$\text{Cov}(e) = E[e \cdot e^T] = R = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_m^2 \end{bmatrix}.$$

Standardna devijacija svakog mjernog uređaja se računa tako da izražava očekivanu tačnost posmatranog mjernog uređaja.

Uzimajući prethodno u obzir, definicija optimizacionog problema iz (1.6) može se preformulisati i svesti na minimizaciju funkcije:

$$J(x) = \sum_{i=1}^m (z_i - h_i(x))^2 / R_{ii} = [z - h(x)]^T R^{-1} [z - h(x)]. \quad (1.8)$$

Slijedi da se minimum funkcije $J(x)$ ima za onu vrijednost vektora stanja, za koju važi:

$$g(x) = \frac{\partial J(x)}{\partial x} = -H^T(x) R^{-1} [z - h(x)] = 0, \quad (1.9)$$

gdje je $H(x) = \frac{\partial h(x)}{\partial x}$.

Ako se nelinearna funkcija $g(x)$ razvije u Taylor-ov red u okolini vektora stanja x^* , dobija se:

$$g(x) = g(x^*) + G(x^*)(x - x^*) + \dots = 0. \quad (1.10)$$

Zanemarujući članove razvoja višeg reda iz relacije (1.10), dolazi se do iterativne procedure za rješavanje problema estimacije vektora stanja, poznate kao Gauss-Newton-ov metod:

$$\begin{aligned} x^{k+1} &= x^k - [G(x^k)]^{-1} \cdot g(x^k) \\ G(x^k) &= \frac{\partial g(x^k)}{\partial x^k} = H^T(x^k) \cdot R^{-1} \cdot H(x^k) \\ g(x^k) &= -H^T(x^k) \cdot R^{-1} \cdot (z - h(x^k)) \end{aligned} \quad (1.11)$$

gdje su:

x^k – vektor stanja u k -toj iteraciji i

$G(x)$ – matrica pojačanja.

Matrica G je pozitivna i simetrična kod observabilnih sistema. S obzirom da je G rijetka matrica, najčešće se ne vrši njena inverzija (jer bi se kao rezultat dobila matrica koja ne pripada grupi rijetkih matrica), već se vrši njena trougaona faktorizacija kako bi se odgovarajuće jednačine iz (1.11) riješile pomoću naprijed/nazad supstitucije u svakoj od iteracija:

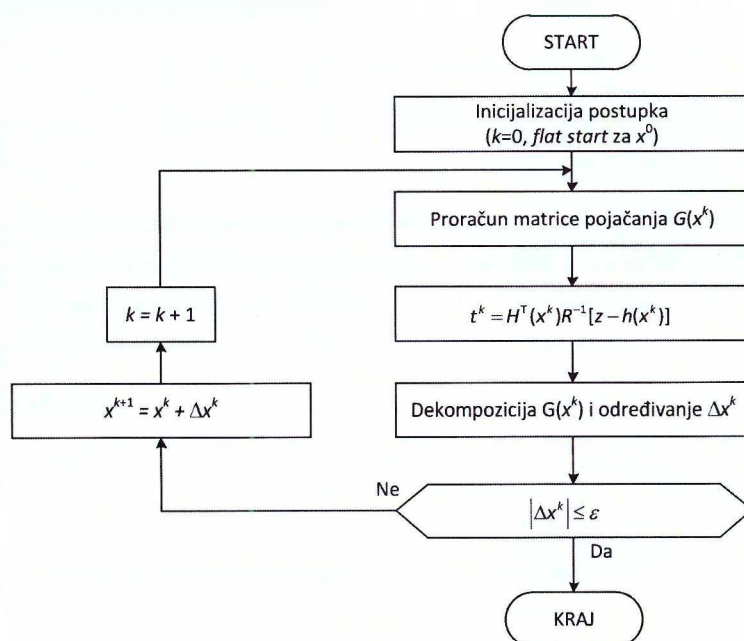
$$\begin{aligned} G(x^k) \cdot \Delta x^{k+1} &= H^T(x^k) R^{-1} [z - h(x^k)], \\ \Delta x^{k+1} &= x^{k+1} - x^k. \end{aligned} \quad (1.12)$$

Relacija (1.12) predstavlja iterativni postupak rješavanja optimizacionog problema definisanog u (1.3). Za inicijalizaciju postupka, potrebno je pretpostaviti početnu vrijednost vektora stanja x^0 . Slično kao kod iterativnih metoda koji se koriste za proračun tokova snaga, najčešće se za početne vrijednosti usvaja tzv. *flat start*, tj. svi naponi su jednaki nominalnim naponima odgovarajućih čvorova, a svi fazni stavovi napona su jednaki nuli. Algoritam za iterativno rješavanje problema estimacije vektora stanja može se predstaviti blok-šemom (Slika 1.6).

Najzahtjevnije računске operacije koje se izvršavaju tokom jedne iteracije su:

- proračun mjerne funkcije $h(x^k)$,
- formiranje Jacobian matrice mjerenja $H(x^k)$,
- formiranje matrice pojačanja $G(x^k)$,
- Cholesky dekompozicija matrice pojačanja $G(x^k)$,
- izvođenje naprijed/nazad supstitucije radi proračuna Δx^{k+1} .

Oblik mjerne funkcije uslovljen je tipom mjernog uređaja, odnosno mjerene veličine. Najčešće su u upotrebi mjerenja napona (efektivna vrijednost) u čvorovima, tokova snaga u vodovima (aktivnih i reaktivnih), injektiranja snaga u čvorovima (aktivnih i reaktivnih) i struja (efektivna vrijednost) elemenata sistema. Navedena mjerenja se često nazivaju i klasična mjerenja. Razlog za to je ekspanzija upotrebe fazorskih mjerenja, koja se ističu po pouzdanosti rada i pozitivnom uticaju na povećanje efikasnosti estimacije stanja.



Slika 1.6 Algoritam statičke estimacije stanja

U cilju formiranja funkcije $h(x)$, potrebno je izraziti mjerene veličine preko vektora stanja. Kada se posmatra zapis vektora stanja u polarnim koordinatama [18], sve mjerene veličine za sistem od n čvorova potrebno je izraziti preko $2n-1$ veličina koje čine vektor stanja (moduli i fazni stavovi napona čvorova). Jedan element vektora stanja se usvaja sa vrijednošću 0, a on predstavlja fazni stav napona referentnog čvora u sistemu. S obzirom da je taj element poznat, on se obično izostavlja iz formulacije vektora stanja:

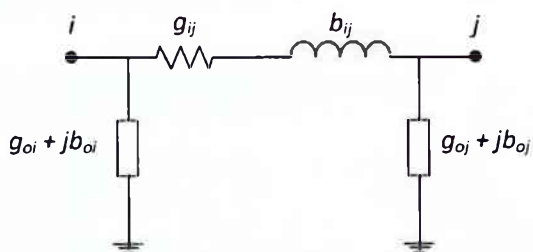
$$x^T = [\theta_1 \theta_2 \dots \theta_n V_1 V_2 \dots V_n]. \quad (1.13)$$

Za potrebe definisanja zavisnosti između mjerenih veličina i vektora stanja koristi se generalizovani model grane sistema u obliku Π šeme (Slika 1.7).

Tako slijedi da za mjerenje injektiranja aktivne i reaktivne snage važi:

$$\begin{aligned} P_i &= V_i \sum_{j \in N_i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i &= V_i \sum_{j \in N_i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}), \end{aligned} \quad (1.14)$$

gdje su G_{ij} i B_{ij} respektivno, realni i imaginarni dio elementa Y_{ij} matrice admitansi nezavisnih čvorova Y_B , a N_i skup čvorova susjednih posmatranom čvoru i .



Slika 1.7 Generalizovani model grane sistema (Π šema)

Tokovi aktivne i reaktivne snage po granama definišu se relacijama:

$$\begin{aligned} P_{ij} &= V_i^2 (g_{oi} + g_{ij}) - V_i V_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_{ij} &= -V_i^2 (b_{oi} + b_{ij}) - V_i V_j (g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}), \end{aligned} \quad (1.15)$$

gdje su:

g_{oi} – odvodnost prema zemlji posmatrane grane (Slika 1.7) kod čvora i ,

b_{oi} – susceptansa prema zemlji (otočna susceptansa) posmatrane grane (Slika 1.7) kod čvora i ,

g_{ij} – redna provodnost posmatrane grane (Slika 1.7) između čvorova i i j i

b_{ij} – redna susceptansa posmatrane grane (Slika 1.7) između čvorova i i j .

Efektivna vrijednost linijske struje između čvorova i i j određuje se prema relaciji:

$$I_{ij} = \frac{\sqrt{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}}{V_i}, \quad (1.16)$$

Ako se zanemari otočna admitansa posmatrane grane dobija se:

$$I_{ij} = \sqrt{(g_{ij}^2 + b_{ij}^2)(V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij})}. \quad (1.17)$$

Prema definiciji iz (1.9), struktura Jacobian matrice mjerenja je:

$$H^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{inj}}{\partial \theta} & \frac{\partial P_{tok}}{\partial \theta} & \frac{\partial Q_{inj}}{\partial \theta} & \frac{\partial Q_{tok}}{\partial \theta} & \frac{\partial I_{eff}}{\partial \theta} & 0 \\ \frac{\partial P_{inj}}{\partial V} & \frac{\partial P_{tok}}{\partial V} & \frac{\partial Q_{inj}}{\partial V} & \frac{\partial Q_{tok}}{\partial V} & \frac{\partial I_{eff}}{\partial V} & \frac{\partial V_{eff}}{\partial V} \end{bmatrix}. \quad (1.18)$$

Na osnovu relacija (1.14) - (1.17) mogu se definisati svi elementi matrice H :

- elementi matrice H koji odgovaraju mjerenjima aktivne snage injektiranja:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} &= -V_i^2 B_{ii} + \sum_{j=1}^n V_i V_j (-G_{ij} \sin \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij}) \\
\frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} &= V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \\
\frac{\partial P_i}{\partial V_i} &= V_i G_{ii} + \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\
\frac{\partial P_i}{\partial V_j} &= V_i (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij})
\end{aligned} \tag{1.19}$$

- elementi matrice H koji odgovaraju mjerenjima reaktivne snage injektiranja:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} &= -V_i^2 G_{ii} + \sum_{j=1}^n V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\
\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} &= V_i V_j (-G_{ij} \cos \theta_{ij} - B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\
\frac{\partial Q_i}{\partial V_i} &= -V_i B_{ii} + \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \\
\frac{\partial Q_i}{\partial V_j} &= V_i (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij})
\end{aligned} \tag{1.20}$$

- elementi matrice H koji odgovaraju mjerenjima toka aktivne snage:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_i} &= V_i V_j (g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}) \\
\frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_j} &= -V_i V_j (g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}) \\
\frac{\partial P_{ij}}{\partial V_i} &= -V_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}) + 2(g_{ij} + g_{oi}) V_i \\
\frac{\partial P_{ij}}{\partial V_j} &= -V_i (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij})
\end{aligned} \tag{1.21}$$

- elementi matrice H koji odgovaraju mjerenjima toka reaktivne snage:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_i} &= -V_i V_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}) \\
\frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_j} &= V_i V_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}) \\
\frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_i} &= -V_j (g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}) - 2(b_{ij} + b_{oi}) V_i \\
\frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_j} &= -V_i (g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij})
\end{aligned} \tag{1.22}$$

- elementi matrice H koji odgovaraju mjerenjima struje:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial l_{ij}}{\partial \theta_i} &= \frac{g_{ij}^2 + b_{ij}^2}{l_{ij}} V_i V_j \sin \theta_{ij} \\
\frac{\partial l_{ij}}{\partial \theta_j} &= -\frac{g_{ij}^2 + b_{ij}^2}{l_{ij}} V_i V_j \sin \theta_{ij} \\
\frac{\partial l_{ij}}{\partial V_i} &= \frac{g_{ij}^2 + b_{ij}^2}{l_{ij}} (V_i - V_j \cos \theta_{ij}) \\
\frac{\partial l_{ij}}{\partial V_j} &= \frac{g_{ij}^2 + b_{ij}^2}{l_{ij}} (V_j - V_i \cos \theta_{ij})
\end{aligned} \tag{1.23}$$

- elementi matrice H koji odgovaraju mjerenjima napona:

$$\frac{\partial V_i}{\partial \theta_i} = 0, \frac{\partial V_i}{\partial \theta_j} = 0, \frac{\partial V_i}{\partial V_i} = 1, \frac{\partial V_i}{\partial V_j} = 0. \tag{1.24}$$

Nakon definisanja matrice H , u okviru algoritma estimacije stanja (Slika 1.6), potrebno je proračunati matricu pojačanja. Ona se računa koristeći matricu H i matricu kovarijansi R (koja ima samo dijagonalne elemente koji odgovaraju varijansama mjerenja), i to prema relaciji:

$$G = H^T R^{-1} H. \tag{1.25}$$

Matrica pojačanja ima sljedeće osobine:

- strukturalna i numerička simetrija,
- pripada grupi rijetkih matrica, ali više je popunjena od matrice R ,
- sve njene svojstvene vrijednosti su nenegativne, a u slučaju pune observabilnosti sistema, svojstvene vrijednosti su pozitivne.

Ona se čuva kao rijetka matrica radi efikasnosti procesiranja i korišćenja memorijskih kapaciteta. Matrica G se formira postupno, mjerenje po mjerenje. Ako se Jacobian matrica mjerenja predstavi pomoću vektor vrsta koje odgovaraju pojedinačnim mjerenjima, i to:

$$H = \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ \vdots \\ H_m \end{bmatrix}, \tag{1.26}$$

a matrica kovarijansi kao:

$$R = \begin{bmatrix} R_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{mm} \end{bmatrix}, \tag{1.27}$$

slijedi da se matrica pojačanja može formirati prema relaciji:

$$G = \sum_{i=1}^m H_i^T R_i^{-1} H_i. \tag{1.28}$$

Kako vektor vrste H_i imaju dosta nultih elemenata, njihov proizvod će takođe biti rijetka matrica. Dakle, svi nenulti elementi matrice G mogu biti proračunati i sačuvani u skladu sa procedurama

preporučenim za rijetke matrice.

U cilju efikasne naprijed/nazad supstitucije koja se izvršava kako bi se proračunala nova vrijednost vektora stanja, matrica pojačanja se podvrgava dekompoziciji koju je definisao Cholesky. Naime, matrica G se prikazuje kao proizvod donje trougaone matrice i njene transponovane matrice [19], tj.:

$$G = L \cdot L^T. \quad (1.29)$$

Ova dekompozicija ne mora biti moguća za slučaj kada analizirani sistem nije observabilan. U tom slučaju, nije moguće pronaći rješenje problema statičke estimacije stanja. Određeni trougaoni faktori matrice pojačanja, nisu jedinstveni i broj njihovih elemenata koji je različit od nule veoma zavisi od načina na koji je izvršena dekompozicija. Postoji više metoda za preuređivanje matrice kako bi se optimizovao broj nultih elemenata trougaonih faktora. Nakon dekompozicije matrice G , moguće je izvršiti naprijed/nazad supstituciju i to prema relaciji:

$$L \cdot L^T \Delta x^k = t^k \quad (1.30)$$

gdje je t^k desna strana relacije (1.12). Riješenje se ostvaruje u dva koraka:

- supstitucija unaprijed – usvaja se $L^T \Delta x^k = u$, a onda se određuju svi elementi matrice u koristeći relaciju $Lu = t^k$; tada je moguće prvo odrediti $u_1 = t_1 / L_{11}$, nakon toga se zamjenom proračunatog u_1 red problema snižava za 1 i nastavlja se sa rješavanjem sljedeće jednačine u nizu; ponavljanjem procedure supstitucije unaprijed, dolazi se do svih rješenja u_2, \dots, u_n ;
- supstitucija unazad – kako je u određeno, moguće je riješiti relaciju $L^T \Delta x^k = u$, počev od krajnjeg reda, tj. $\Delta x_n^k = u_n / L_{nn}$. Nakon toga se proračunata vrijednost za Δx_n^k zamijeni u prethodni red kako bi se proračunalo Δx_{n-1}^k ; nakon toga se procedura ponavlja do proračunavanja Δx_1^k čime je procedura estimacije u k -toj iteraciji završena.

Obije procedure se izvršavaju dosta efikasno usljed značajnog broja nultih elemenata u trougaonim faktorima L . Proračunski najzahtjevnija procedura kod algoritma estimacije stanja (Slika 1.6) je faktorizacija matrice pojačanja tokom svake iteracije. Jedan pristup relaksaciji proračuna je da se matrica pojačanja približno odredi i održava konstantnom kroz iteracije. Ova aproksimacija je opravdana jer se matrica pojačanja ne mijenja značajnije kroz iteracije. Druga aproksimacija, koja proističe iz metoda za proračun tokova snaga [11], tiče se mjerenja tokova snaga. Naime, može se uzeti u obzir da je osjetljivost aktivnih tokova snaga na promjene napona mala, kao i reaktivnih snaga na promjenu faznog stava (pogotovo za prenosne mreže). Time je moguće izvršiti raspreganje problema estimacije stanja [10], [12].

Kod raspregnutog postupka estimacije stanja, vrste matrice mjerenja $h(x)$ grupisane su u dva dijela: aktivni i reaktivni. Grupu aktivnih mjerenja čine: mjerenja tokova aktivne snage i injektiranja aktivne snage. Reaktivna mjerenja su: mjerenja tokova reaktivne snage, injektiranja reaktivne snage i modula napona u čvorovima. Mjerenja struje ne mogu biti uključena u raspregnutu formulaciju problema estimacije stanja, jer za njih ne važi osnovna pretpostavka raspregnutog postupka (tj. mala osjetljivost na promjene napona ili faznog stava). Nemogućnost uključivanja mjerenja struje u proces estimacije stanja je najveći nedostatak raspregnutog postupka.

Osnovne razlike raspregnute u odnosu na standardnu formulaciju problema estimacije stanje tiču se vektora mjerenja i odgovarajuće matrice Jacobian:

$$z = \begin{bmatrix} z_a \\ z_r \end{bmatrix} \quad H = \begin{bmatrix} H_{aa} & H_{ar} \\ H_{ra} & H_{rr} \end{bmatrix} \quad R = \begin{bmatrix} R_a & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix}. \quad (1.31)$$

Usljed osnovnih pretpostavki raspregnutog metoda estimacije stanja, zanemaruju se vandijagonalni elementi Jacobian matrice mjerenja, tj. H_{ar} i H_{ra} . Time se eliminišu i vandijagonalne submatrice matrice pojačanja, koja postaje konstantna, a određuje se tokom inicijalne iteracije (na osnovu *flat start* inicijalizacije):

$$G = \begin{bmatrix} G_{aa} & 0 \\ 0 & G_{rr} \end{bmatrix}, \quad (1.32)$$

čije se komponente određuju kao:

$$\begin{aligned} G_{aa} &= H_{aa}^T R_a^{-1} H_{aa} \\ G_{rr} &= H_{rr}^T R_r^{-1} H_{rr}. \end{aligned} \quad (1.33)$$

Slijedi da se desna strana relacije (1.12) može napisati kao:

$$T = \begin{bmatrix} H_{aa}^T R_a^{-1} \Delta z'_a \\ H_{rr}^T R_r^{-1} \Delta z'_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_a \\ T_r \end{bmatrix}, \quad (1.34)$$

gdje su:

$$\Delta z'_a = \Delta z_a / V$$

$$\Delta z'_r = \Delta z_r / V$$

$$\Delta z_a = z_a - h_a(x)$$

$$\Delta z_r = z_r - h_r(x).$$

Slično kao kod brzog raspregnutog metoda za proračun tokova snaga, moguće je uvesti dodatne aproksimacije radi relaksacije postupka proračuna [18]. Dodatne aproksimacije tiču se formiranja matrica H_{aa} i H_{rr} . Naime, zanemaruju se oni parametri koji slabije utiču na tokove aktivnih snaga u matrici H_{aa} , odnosno parametri koji slabije utiču na tokove reaktivnih snaga u matrici H_{rr} . Uzimajući prethodno u obzir, mogu se definisati dodatne aproksimacije:

- zanemari se uticaj otočnih reaktansi i transformatora sa nenominalnim prenosnim odnosom prilikom formiranja matrice H_{aa} ,
- zanemari se uticaj zakretnih transformatora za promjenu faznog stava u H_{rr} i
- zanemarivanje uticaja rednih otpornosti [10].

Navedene aproksimacije se koriste za brzi raspregnuti metod estimacije stanja koji se zasniva na polarnim koordinatama, a proceduru njegovog izvršavanja moguće je predstaviti blok šemom (Slika 1.6).

Submatrice pojačanja G_{aa} i G_{rr} se formiraju samo jednom, i to na početku iterativnog postupka, kada se vrši i njihova dekompozicija. Usljed toga, određivanje ΔV i $\Delta \theta$ se vrši mnogo efikasnije nego kod osnovnog postupka, upotrebom naprijed/nazad supstitucije bez ponovne dekompozicije matrice pojačanja tokom svake iteracije. Takođe, bitna prednost brzog raspregnutog postupka su manje dimenzije submatrica matrice pojačanja (praktično su dvostruko manjih dimenzija), što direktno utiče na relaksaciju proračuna.

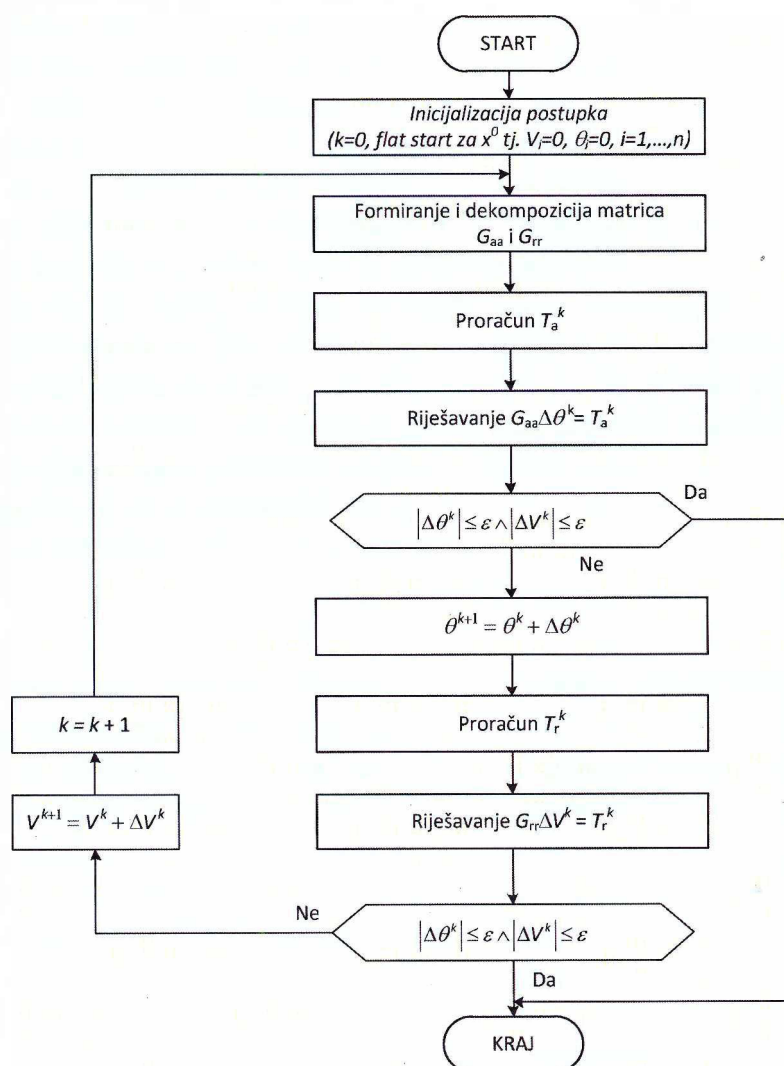
Brzi raspregnuti postupak estimacije stanja našao je široku primjenu u praksi i njegove različite varijante su implementirane u upravljačkim centrima EES. U poređenju sa osnovnim metodom estimacije stanja, mogu se definisati sljedeće prednosti brzog raspregnutog postupka:

- manji memorijski zahtjevi (manje matrice, veći broj nultih elemenata u matricama),

- brže izvršava proračun, tj. daje rezultujuću estimaciju stanja (manje parametara za proračun, manje dimenzije matrica, formiranje matrica samo tokom prve iteracije, jednostavnija dekompozicija matrica usljed njihovih manjih dimenzija).

S druge strane, brzi raspregnuti postupak ima određena ograničenja koja moraju biti uzeta u obzir prilikom odlučivanja o njegovoj primjeni na konkretan sistem:

- postoje slučajevi koji narušavaju polazne pretpostavke metoda, a tiču se prije svega parametara mreže i određenih uslova koje nameće radni režim sistema; ovakvi slučajevi mogu dovesti do divergencije postupka ili, čak, konvergencije značajno lošijim rješenjima, međutim, to se rijetko dešava kod praktičnih sistema;
- mjerenja struje se sa svojom mjernom funkcijom $h(x)$ ne mogu uklopiti u osnovne pretpostavke raspreganja svih mjerenja na aktivna i reaktivna, pa se brzi raspregnuti postupak estimacije stanja ne može pouzdano koristiti ako u mjernoj konfiguraciji postoje mjerenja struje.



Slika 1.8 Algoritam brzog raspregnutog postupka statičke estimacije stanja

1.3.2.2. Ograničenja metoda minimalnih kvadrata odstupanja za estimaciju stanja sistema

Primjena metoda minimalnih kvadrata odstupanja za potrebe statičke estimacije stanja skoro uvijek je uspješna, pogotovo kada su u pitanju performanse savremenih računara. Međutim, iz

prakse je poznato da pri određenim okolnostima u EES, ovaj metod ima problema sa numeričkom stabilnošću. Takve okolnosti onemogućavaju uspješnu konvergenciju (divergiraju ili konvergiraju rješenjima koja sadrže značajnu grešku).

Ako se posmatra glavna relacija koja predstavlja metod MKO za estimaciju stanja:

$$G(x^k)\Delta x^k = H^T(x^k)W\Delta z^k, \quad (1.35)$$

gdje su:

$$\Delta z^k = z - h(x^k) \text{ i}$$

$W = R^{-1}$ – matrica težinskih koficijenata.

Relacija (1.35) se rješava Cholesky faktorizacijom nakon koje se vrši naprijed/nazad supstitucija. Kod observabilnih sistema nije potrebno posebno uređivati matricu pojačanja (uz vođenje računa o pivotima) kako bi se izbjegli problemi usljed numeričke nestabilnosti. Međutim, prije nego se počne sa dekompozicijom matrice G , potrebno je prerasporediti njene vrste i kolone kako bi se sačuvala njena struktura rijetke matrice koliko je to moguće. Raspored nultih elemenata matrice G direktno je uslovljen rasporedom nultih elemenata u matrici H . Mjerna konfiguracija i topologija mreže definišu kako će i koliko nultih elemenata biti u matrici H . Tako, svako mjerenje injektiranja snage uključuje sve susjedne čvorove i njima odgovarajuće elemente vektora stanja u matricu H . Uzimajući to u obzir, u opštem slučaju, matrica G će biti manje rijetka u odnosu na matricu admitansi čvorova. Slijedi da će rješavanje relacije (1.35) biti mnogo zahtjevnije proračunski nego što bi to bio slučaj pri rješavanju problema tokova snaga za istu mrežu.

Posebno važna razlika između statičke estimacije stanja i proračuna tokova snaga je u numeričkim karakteristikama metoda. Parametar koji se koristi da definiše dobre ili loše numeričke karakteristike metoda naziva se mjera numeričke podobnosti. Na primjer, za sistem linearnih jednačina kaže se da je numerički slabo-podoban ukoliko male promjene u matrici koficijenata i /ili vektoru sa desne strane znaka jednakosti, uzrokuju značajne greške u vektoru rješenja. Što je matrica bliže singularnoj, to je posmatrani metod numerički slabije podoban. Mjera numeričke podobnosti sistema se može kvantifikovati relacijom:

$$\kappa(A) = \|A\| \cdot \|A^{-1}\|, \quad (1.36)$$

gdje $\|A\|$ predstavlja normu matrice A . Ova vrijednost je jednaka 1 za jediničnu matricu, a teži beskonačnosti za matrice koje se približavaju singularnoj.

Proračun mjere numeričke podobnosti obično se vrši približno, usljed velike proračunske zahtjevnosti kako se može i vidjeti iz same njene definicije. Dobar pristup za približan proračun je i odnos $\lambda_{\max}/\lambda_{\min}$, gdje su λ_{\max} i λ_{\min} najveća i najmanja svojstvena vrijednost normalizovane posmatrane matrice, respektivno [19]. Iako se kombinacija usvajanja vrlo male vrijednosti ε , ograničenja u računarskim kapacitetima i izražene slabe numeričke podobnosti problema rijetko pojavljuje istovremeno, ona može dovesti do problema u konvergenciji, ili čak dovesti do divergencije.

Kada je u pitanju MKO metod za estimaciju stanja, izdvajaju se sljedeće okolnosti koje nepovoljno djeluju na karakteristike konvergencije metoda:

- prevelika vrijednost usvojenih težinskih koficijenata koji odgovaraju virtuelnim mjerenjima (mjerenjima koja se dodaju naknadno ukoliko za to postoji potreba (ispad mjerenja koji narušava observabilnost), a zasnovana su na iskustvu i informacijama o ranijim mjerenjima na lokacijama od interesa),

- dugi i kratki vodovi koji incidiraju istom čvoru i
- veliki broj mjerenja injektiranja snage.

Postoje različiti pristupi koji su predloženi kako bi se prevazišao problem numeričke stabilnosti MKO metoda za statičku estimaciju stanja EES.

1.3.2.3. DC metod statičke estimacije stanja

U nekim analizama vezanim prije svega za karakteristike mjerne konfiguracije, posebno je značajna brzina kojom se može ostvariti estimacija stanja sistema. U tom pogledu ističe se jednostavnost primjene DC aproksimacije mjernih relacija [20]. Pretpostavke koje se uzimaju u obzir su:

- vrijednosti modula napona čvorova sistema su jednake i iznose 1 r.j.,
- konduktanse svih vodova su zanemarljive,
- razlike u faznim stavovima napona su male (do 30° , tada važi $\sin\theta \approx \theta$, $\cos\theta \approx 1$).

Usvajajući navedene pretpostavke, mogu se definisati nove, pojednostavljene mjerne relacije, tj. funkcija $h(x)$, za sve vrste mjerenih veličina. Tako je mjerna relacija za tok aktivne snage između čvorova i i j :

$$P_{ij} = \frac{\theta_i - \theta_j}{x_{ij}}, \quad (1.37)$$

gdje je x_{ij} – reaktansa grane između čvorova i i j .

Na osnovu prethodne relacije, može se izvesti relacija za injektiranje aktivne snage:

$$P_i = \sum_{j \in N_i} P_{ij} \quad (1.38)$$

gdje je N_i – skup čvorova susjednih posmatranom čvoru i .

Dakle, DC model problema estimacije stanja za mjerenja aktivne snage može se prikazati u matricnoj formi relacijom:

$$z_a = H_{aa}\theta + e_a, \quad (1.39)$$

gdje su:

z_a – vektor mjerenja tokova i injektiranja aktivnih snaga,

H_{aa} – Jacobian matrica mjerenja koja je funkcija samo reaktansi grana i

e_a – vektor grešaka mjerenja.

Potrebno je naglasiti da usljed usvajanja referentnog čvora i njegove eliminacije iz vektora θ , matrica H_{aa} takođe neće imati kolonu koja odgovara referentnom čvoru,

1.3.2.4. Ortogonalna faktORIZACIJA

S obzirom da je dekompozicija matrice pojačanja, proračunski najzahtjevniji postupak, njegova relaksacija je česta tema istraživanja kada su u pitanju metodi estimacije stanja. Jedan način za rješavanje tog problema je metod ortogonalne faktORIZACIJE [21], [22] i [23]. Naime, bilo koja pravougaona matrica punog ranga, može se izraziti kao:

$$A = QR, \quad (1.40)$$

gdje su:

A – pravougaona matrica dimenzija $m \times n$,

Q – ortogonalna matrica dimenzija $m \times m$ ($Q^T = Q^{-1}$) i

R – gornja trapezoidna matrica dimenzija $m \times n$ (tj. prvih n vrsta odgovaraju gornjoj trougaonoj matrici, a preostalih $m-n$ vrsta su nulti elementi).

Iz uslova ortogonalnosti matrica, može se napisati:

$$Q^T A = R, \quad (1.41)$$

a to je osnova poznatih metoda za faktorizaciju matrica, gdje se matrica R dobija nakon serije elementarnih transformacija nad matricom A .

Ako se matrice Q i R prikažu preko submatrica, relaciju (1.40) moguće je prikazati kao:

$$A = \begin{bmatrix} Q_n & Q_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ 0 \end{bmatrix} = Q_n U \Rightarrow Q_n^T A = U. \quad (1.42)$$

Dakle, dovoljno je formirati samo submatricu Q_n umjesto pune matrice Q .

U cilju primjene ortogonalne faktorizacije u okviru metoda MKO, potrebno je preformulisati relaciju (1.35), i to na sljedeći način:

$$\underbrace{\tilde{H}^T \tilde{H}}_G \Delta x = \tilde{H}^T \Delta \tilde{z}, \quad (1.43)$$

gdje su,

$$\begin{aligned} \tilde{H} &= W^{1/2} H \\ \Delta \tilde{z} &= W^{1/2} \Delta z \end{aligned} \quad (1.44)$$

Na ovaj način se matrica težinskih koeficijenata ne pojavljuje direktno, već je uključena u ostale matrice. Kako iz uslova ortogonalnosti važi $Q Q^T = I$, a uzimajući u obzir (1.42), relacija (1.43) može se transformisati kao:

$$\begin{aligned} \tilde{H}^T Q Q^T \tilde{H} \Delta x &= \tilde{H}^T \Delta \tilde{z} \\ R^T R \Delta x &= R^T Q^T \Delta \tilde{z} \\ U^T U \Delta x &= U^T Q_n^T \Delta \tilde{z} \end{aligned} \quad (1.45)$$

S obzirom da je matrica U nesingularna, može se pisati:

$$U \Delta x = Q_n^T \Delta \tilde{z}. \quad (1.46)$$

Relacija (1.46) je ključna kod metoda estimacije stanja pomoću ortogonalne faktorizacije. Ukratko, primjena metoda ortogonalne faktorizacije kod metoda MKO za estimaciju stanja može se prikazati sljedećim karakterističnim koracima:

- faktorizacija $\tilde{H} = QR$
- proračun $\Delta z_q = Q_n^T \Delta \tilde{z}$
- određivanje Δx nakon primjene supstitucije samo u jednom smjeru (unazad)

$$U \Delta x = \Delta z_q. \quad (1.47)$$

Dakle, nije potrebno formirati niti vršiti dekompoziciju matrice pojačanja. Takođe, kako postupak QR faktorizacije nije zasnovan na skalarnim pivotima, numerički je stabilniji od LU faktorizacije. To omogućava korišćenje velikih težinskih koeficijenata za virtuelna mjerenja bez opasnosti za

narušavanje numeričke stabilnosti. Osnovni nedostatak je potreba određivanja matrice Q , koja je, iako izražena kao proizvod elementarnih matrica, ipak dosta popunjenija od matrice pojačanja G . Međutim, efikasnom upotrebom Givens-ovih rotacija, postupak kreiranja matrice Q nije proračunski zahtjevan [22].

1.3.2.5. Hibridni metod

Upoređujući relacije (1.43) i (1.46), može se zaključiti da je matrica U , koja se dobija kao rezultat QR faktorizacije, ista kao i odgovarajuća matrica koja se dobija Cholesky faktorizacijom kod osnovne formulacije metoda MKO. Naime, različiti algoritmi za faktorizaciju matrice H , daju uvijek istu matricu U , ali različite matrice Q . Međutim, ovo ne mora biti slučaj u praksi usljed grešaka zaokruživanja u toku proračuna. Ovaj problem je analiziran u [24], gdje se predlaže sljedeća procedura kako bi se izbjegao prepoznati problem:

- određivanje U ortogonalnom transformacijom matrice \tilde{H} pri čemu nije potrebno čuvati dobijene elemente matrice Q ,
- proračun vektora $\Delta z_h = \tilde{H}^T \Delta \tilde{z}$,
- određivanje Δx rješavanjem sistema jednačina $U^T U \Delta x = \Delta z_h$.

Dakle, osnovna karakteristika hibridnog metoda je ortogonalna faktorizacija matrice H , za razliku od osnovnog metoda MKO gdje se vrši faktorizacija matrice pojačanja G .

1.3.2.6. Metod Peters-Wilkinson

Alternativni metod zasnovan na faktorizaciji matrice \tilde{H} je predložen u [25]. Polazi se od:

$$\tilde{H} = LU \quad (1.48)$$

gdje su:

L – donja trapezoidna matrica i

U – gornja trougaona matrica.

Zamjenom (1.48) u osnovnu relaciju definisanu u (1.43) dolazi se do:

$$\begin{aligned} U^T L^T L U \Delta x &= U^T L^T \Delta \tilde{z} \\ L^T L U \Delta x &= L^T \Delta \tilde{z} \\ (L^T L) \Delta y &= L^T \Delta \tilde{z} \end{aligned} \quad (1.49)$$

gdje je,

$$\Delta y = U \Delta x. \quad (1.50)$$

Osnovni koraci u proceduri metoda estimacije stanja koji koristi Peters-Wilkinson metod faktorizacije su:

- LU faktorizacija matrice \tilde{H} ,
- proračun Δy iz relacije (1.49), što uključuje Cholesky faktorizaciju $L^T L$ koju prati naprijed/nazad supstitucija,
- određivanje Δx supstitucijom unazad (1.50).

Osnovna prednost ovog metoda estimacije stanja je činjenica da je faktorizacija $L^T L$ podobnija s aspekta numeričke stabilnosti u odnosu na faktorizaciju $\tilde{H}^T \tilde{H}$, što je očigledno ako se uzme u obzir struktura matrica koje su predmet faktorizacije.

1.3.2.7. Metod minimalnih kvadrata odstupanja sa ograničenjem tipa jednakosti

Upotreba velikih težinskih koeficijenata za modelovanje veoma preciznih virtuelnih mjerenja (kao što su čvorovi sa nultim injektiranjem), vodi do slabljenja numeričke podobnosti matrice pojačanja G . Jedan način da se izbjegne potreba definisanje velikih težinskih koeficijenata je da se pomenuta mjerenja definišu kao ograničenja osnovnog optimizacionog problema. Ovakav pristup predložen je u [26], i može se formulisati kao:

$$\begin{aligned} x_{opt} &= \underset{x}{\operatorname{argmin}}(J(x)) \\ \text{s.t. } c(x) &= 0, \end{aligned} \quad (1.51)$$

gdje su:

$$J(x) = \frac{1}{2} [z - h(x)]^T W [z - h(x)] - \text{funkcija cilja i}$$

$c(x) = 0$ – predstavlja tačna virtuelna mjerenja (kao što su nulta injektiranja snage u čvorovima), čime su ona isključena iz $h(x)$.

Ovaj optimizacioni problem može se riješiti koristeći Lagrange-ov metod, formirajući funkciju:

$$\mathcal{L}(x) = J(x) - \lambda^T c(x) \quad (1.52)$$

pa slijedi,

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{L}(x)}{\partial x} &= 0 \Rightarrow H^T W [z - h(x)] + C^T \lambda = 0 \\ \frac{\partial \mathcal{L}(x)}{\partial \lambda} &= 0 \Rightarrow c(x) = 0 \end{aligned} \quad (1.53)$$

gdje je $C = \frac{\partial c(x)}{\partial x}$ - Jacobian matrice $c(x)$.

Sistem nelinearnih jednačina iz (1.53) se može riješiti iterativno ako se primijeni Gauss-Newton-ov metod prema relaciji:

$$\begin{bmatrix} H^T W H & C^T \\ C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ -\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H^T W \Delta z^k \\ -c(x^k) \end{bmatrix}, \quad (1.54)$$

gdje su:

$$\Delta x = x^{k+1} - x^k$$

$$\Delta z^k = z - h(x^k).$$

Iz (1.54) se može vidjeti da matrica težinskih koeficijenata W više ne sadrži velike vrijednosti težinskih koeficijenata, čime je otklonjen jedan od osnovnih uzroka numeričke nestabilnosti postupka estimacije stanja.

Međutim, mana formulacije problema estimacije stanja prema (1.54) je struktura dobijene matrice koeficijenata. Usljed toga, u cilju očuvanja numeričke stabilnosti, potrebno je vršiti pivotizaciju matrice u kombinaciji sa LU faktorizacijom u cilju očuvanja strukture rijetke matrice. Time se narušava početna simetrija matrice. Stoga je potrebno odabrati pravu tehniku za pivotizaciju matrice [19].

Dalje poboljšanje numeričke podobnosti matrice koeficijenata postiže se skaliranjem člana Lagrange-ove funkcije koji odgovara funkciji cilja $J(x)$:

$$\mathcal{L}(x) = \alpha J(x) - \lambda_s^T c(x). \quad (1.55)$$

Jednostavno se dokazuje da faktor skaliranja ne utiče na konačnu procjenu estimatora stanja, kao i da važi $\lambda_s = \alpha \lambda$. Slijedi da je sistem jednačina koji se riješava u svakoj iteraciji:

$$\begin{bmatrix} \alpha H^T W H & C^T \\ C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ -\lambda_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha H^T W \Delta z^k \\ -c(x^k) \end{bmatrix}, \quad (1.56)$$

gdje je αW zamijenjeno sa W .

Posebno male vrijednosti za mjeru numeričke stabilnosti dobijaju se ako se faktor skaliranja odabere prema:

$$\alpha = \frac{1}{\max W_{ii}} \quad \text{ili} \quad \alpha = \frac{1}{\sum_{i=1}^m W_{ii}}. \quad (1.57)$$

Ukoliko skaliranja ne bi bilo, moglo bi doći i do pogoršanja numeričke podobnosti u odnosu na osnovni slučaj (osnovna formulacija problema estimacije stanja), jer su u praktičnim slučajevima dijagonalni elementi matrice W značajno veći u odnosu na koeficijente matrice C . Skaliranje primijenjeno na osnovnu funkciju $J(x)$ ne bi imalo nikakvog efekta na numeričku podobnost matrice G . Dakle mogućnost poboljšanja numeričke podobnosti putem skaliranja je dodatna povoljnost predloženog metoda koji podrazumijeva modelovanje virtuelnih mjerenja kao ograničenja tipa jednakosti.

Odnos između predloženog i osnovnog metoda estimacije stanja, može se pokazati ukoliko se matematički model osnovnog MKO metoda preformuliše tako da virtuelna mjerenja budu prikazana odvojeno od realnih:

$$J(x) = \frac{1}{2} [z - h(x)]^T W [z - h(x)] + \frac{\rho}{2} c(x)^T c(x), \quad (1.58)$$

gdje je ρ težinski koeficijent značajno veći od bilo kojeg dijagonalnog elementa W .

Optimalna procjena vektora stanja dobija se na osnovu izraza:

$$H^T W [z - h(x)] - \rho C^T c(x) = 0, \quad (1.59)$$

što se može preurediti kao:

$$\begin{aligned} H^T W [z - h(x)] + C^T \lambda &= 0 \\ c(x) + \frac{1}{\rho} \lambda &= 0. \end{aligned} \quad (1.60)$$

Iz relacije (1.60) slijedi da je u svakoj iteraciji potrebno riješiti sistem jednačina koji se može predstaviti matricnom relacijom:

$$\begin{bmatrix} H^T W H & C^T \\ C & -1/\rho \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ -\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H^T W \Delta z^k \\ -c(x^k) \end{bmatrix}. \quad (1.61)$$

Uočava se da za velike vrijednosti ρ relacije (1.61) i (1.60) prelaze u relacije (1.54) i (1.53), respektivno. S druge strane, ukoliko se eliminiše λ iz relacije (1.61), dolazi se do osnovne formulacije problema estimacije stanja, bez ograničenja:

$$[H^T W H + \rho C^T C] \Delta x = H^T W \Delta z^k - \rho C^T c(x^k) \quad (1.62)$$

Dakle, formulacija problema estimacije stanja kao optimizacionog problema sa ograničenjem tipa jednakosti, odgovara proširenom obliku osnovnog matematičkog modela istog problema, kod koga se virtuelna mjerenja sa visokim stepenom pouzdanosti ne kvadriraju (tj. proizvod matrica $C^T C$ se ne računa).

Lagrange-ovi koeficijenti se mogu proračunati za slučaj optimalnog rješenja prema relaciji:

$$\lambda = -\rho c(x_{opt}). \quad (1.63)$$

Što je veći koeficijent ρ to su manji rezidijumi virtuelnih mjerenja. Njihov proizvod predstavlja vektor Lagrange-ovih koeficijenata koji zadržavaju osobine rezidijuma mjerenja što se koristi za detekciju grešaka.

1.3.2.8. Metod zasnovan na proširenoj matrici

Za razliku od prethodno predstavljenog metoda, koji virtuelna mjerenja uzima u obzir kroz uvođenje ograničenja kod osnovnog optimizacionog problema, metod zasnovan na proširenoj matrici [27], [28] i realna mjerenja uvodi kao ograničenja u optimizacioni postupak. Naime, svi rezidijumi mjerenja se posmatraju kao promjenljive. Tada je formulacija optimizacionog problema sljedeća:

$$\begin{aligned} x_{opt} &= \underset{x}{\operatorname{argmin}} (J(x)) \\ \text{s.t. } c(x) &= 0 \\ r - z + h(x) &= 0 \end{aligned} \quad (1.64)$$

gdje je $J(x) = \frac{1}{2} r^T W r$ - funkcija cilja.

Slijedi da Lagrange-ova funkcija ima oblik:

$$\mathcal{L} = J(x) - \lambda^T c(x) - \mu^T (r - z + h(x)), \quad (1.65)$$

pa su uslovi za postizanje minimuma funkcije:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{L}(x)}{\partial x} &= 0 \Rightarrow C^T \lambda + H^T \mu = 0 \\ \frac{\partial \mathcal{L}(x)}{\partial \lambda} &= 0 \Rightarrow c(x) = 0 \\ \frac{\partial \mathcal{L}(x)}{\partial r} &= 0 \Rightarrow W r - \mu = 0 \\ \frac{\partial \mathcal{L}(x)}{\partial \mu} &= 0 \Rightarrow r - z + h(x) = 0. \end{aligned} \quad (1.66)$$

Iz treće relacije sistema jednačina (1.66), moguće je izraziti r ili μ i tako eliminisati jednu promjenljivu ($r = R\mu$). Linearizacijom ostalih jednačina, dobija se sljedeći matricni zapis:

$$\begin{bmatrix} R & H & 0 \\ H^T & 0 & C^T \\ 0 & C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu \\ \Delta x \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta z^k \\ 0 \\ -c(x^k) \end{bmatrix}. \quad (1.67)$$

Matrica koeficijenata iz (1.67) naziva se Hachtel-ova matrica. Ona bi postala identična odgovarajućoj matrici prethodno predstavljenog metoda ukoliko bi se eliminisao parametar μ . Hachtel-ova matrica ima veliki broj nultih elemenata, pa rješavanje odgovarajućih matrica ne predstavlja proračunski zahtjevan zadatak. Međutim, posebna pažnja se mora posvetiti pravoj strategiji za preuređivanje matrice kako bi faktorizacija bila što efikasnija. Pored toga što Hachtel-ova matrica ima bolju mjeru numeričke podobnosti u odnosu na matricu pojačanja u osnovnom modelu, njene dobre osobine, kada je numerička stabilnost u pitanju, moguće je dalje poboljšati. To se postiže pravilnim skaliranjem težinskih koeficijenata (matrice $R = W^{-1}$), tj. korišćenjem αW umjesto W . Relacija se svodi na:

$$\begin{bmatrix} \alpha^{-1}R & H & 0 \\ H^T & 0 & C^T \\ 0 & C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu_s \\ \Delta x \\ \lambda_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta z^k \\ 0 \\ -c(x^k) \end{bmatrix}, \quad (1.68)$$

gdje su μ i λ skalirani Lagrange-ovi koeficijenti.

1.3.2.9. Blokowska formulacija problema estimacije stanja

Pored problema sa numeričkom stabilnošću uzrokovanih velikim težinskim koeficijentima koji se pridružuju virtuelnim mjerenjima (koji su riješeni metodama predstavljenim u okviru poglavlja 1.3.2.7 i 1.3.2.8), glavni uzročnik numeričke nestabilnosti su mjerenja injektiranih snaga. Osnovni razlog za to je značajno veći broj elemenata u matrici mjerenja $h(x)$ (a usljed toga i u okviru H i G) koji odgovaraju mjerenjima injektiranih snaga, u odnosu na mjerenja tokova snaga ili napona. U cilju prevazilaženja tog problema, u [29] je predložen metod koji se zasniva na formiranju blok matrice koja odgovara koeficijentima.

Prvi korak je podjela mjerenja na dvije grupe. Jednoj pripadaju samo mjerenja injektiranja snage, a drugoj sva ostala mjerenja. Osnovni sistem jednačina koji se rješava u svakoj iteraciji predstavljen u matičnoj formi je:

$$\begin{bmatrix} R_{tu} & 0 & H_{tu} & 0 \\ 0 & R_i & H_i & 0 \\ H_{tu}^T & H_i^T & 0 & C^T \\ 0 & 0 & C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu_{tu} \\ \mu_i \\ \Delta x \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta z_{tu} \\ \Delta z_i \\ 0 \\ -c(x^k) \end{bmatrix}, \quad (1.69)$$

gdje su sa odgovarajućim indeksima označene matrice koje odgovaraju mjerenjima injektiranih snaga (indeks - i) i mjerenjima tokova snaga i napona (indeks - tu).

Eliminacijom μ_{tu} dobija se:

$$\begin{bmatrix} R_i & H_i & 0 \\ H_i^T & -H_{tu}^T W_{tu} H_{tu} & C^T \\ 0 & C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu_i \\ \Delta x \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta z_i \\ -H_{tu}^T W_{tu} \Delta z_{tu} \\ -c(x^k) \end{bmatrix}, \quad (1.70)$$

gdje su:

μ_i – koeficijenti Lagrange-ove funkcije koji odgovaraju mjerenjima injektiranih snaga (aktivnih i reaktivnih),

λ – koeficijenti Lagrange-ove funkcije koji odgovaraju visoko pouzdanim virtuelnim mjerenjima i

x – vektor stanja (moduli napona čvorova i odgovarajući fazni stavovi).

Rezultujući matricni model predstavlja kombinaciju između pristupa sa proširenom matricom i MKO modela sa ograničenjem tipa jednakosti. Osnovna karakteristika relacije (1.70) je da su sve promjenljive vezane za čvorove sistema. Slijedi da je moguće vršiti simetrične permutacije vrsta i kolona tako da se promjenljive koje odgovaraju jednom čvoru grupišu u blokove. Veličine blokova koje se mogu pojaviti su:

- 4×4 kada postoji mjerenje injektiranja snage ili virtuelno mjerenje,
- 2×2 u ostalim slučajevima.

Veličine blokova su dvostruko manje kod raspregnute formulacije problema estimacije stanja. Kako eliminisanje mjerenja tokova snaga i napona ne kreira dodatne vandijagonalne elemente u matrici koeficijenata, slijedi da rezultujuća blok matrica ima istu strukturu kao i matrica admitansi čvorova (osim u slučaju irelevantnih grana koje se inače ne pojavljuju ni u ostalim formulacijama problema). Dakle, rješavanje rezultujućeg sistema jednačina koristeći blok matricu bi bio jednostavan ukoliko bi svi dijagonalni blokovi bili odgovarajući pivoti (u tom slučaju bi se problem sveo na procedure koje se koriste kod proračuna tokova snaga). Međutim, postoje okolnosti kada i pored pune observabilnosti sistema, blok pivot može biti singularan jer su rutine preuređivanja primijenjene s ciljem očuvanja karakteristika rijetkih matrica. Jedno rješenje ovog problema je dodavanje male vrijednosti kako bi se posmatrani blok učinio nesingularnim, međutim tada se komplikuje numerička analiza observabilnosti.

1.3.2.10. Linearni metod estimacije stanja

Jedan od razloga ekspanzije fazorskih mjerenja je njihov povoljan uticaj na matematičku složenost procesa estimacije stanja EES. Tako je u [30] i [31] pokazano da, ako mjernu konfiguraciju čine mjerenja fazora napona u čvorovima i fazora struja u njima incidentnim granama, pri čemu su sva mjerenja sinhronizovana, postupak estimacije stanja postaje linearan. Za razliku od mjerne funkcije $h(x)$ kod klasičnih mjernih konfiguracija, kod fazorske je mjerna funkcija linearna u kompleksnoj ravni.

Problem linearne estimacije stanja može se prikazati na sljedeći način:

$$\begin{aligned} \underline{x}_{\text{opt}} &= \underset{x}{\operatorname{argmin}} (J(x)) \\ \text{s.t. } \underline{z} &= \underline{H} \underline{x} + \underline{r}, \end{aligned} \quad (1.71)$$

gdje su:

$J(x) = \underline{r}^T \underline{W} \underline{r}$ - funkcija cilja i

\underline{H} - kompleksna mjerna matrica.

Svako mjerenje, svaki element vektora stanja i rezidijum mjerenja povezani su linearnom funkcijom u kompleksnoj ravni, pa se mogu predstaviti kao: $\underline{z}_i = z_{i,\text{real}} + jz_{i,\text{imag}}$, $\underline{x}_i = x_{i,\text{real}} + jx_{i,\text{imag}}$ i $\underline{r}_i = r_{i,\text{real}} + jr_{i,\text{imag}}$. Za potrebe proračuna, oni se prikazuju u realnoj ravni kao vektori dimenzija 2×1, i to:

$$\underline{z}_i = \begin{bmatrix} z_{i,\text{real}} \\ z_{i,\text{imag}} \end{bmatrix}, \quad \underline{x}_i = \begin{bmatrix} x_{i,\text{real}} \\ x_{i,\text{imag}} \end{bmatrix} \quad \text{ i } \quad \underline{r}_i = \begin{bmatrix} r_{i,\text{real}} \\ r_{i,\text{imag}} \end{bmatrix}.$$

Dakle, svakom elementu kompleksne mjerne matrice $\underline{h}_{ij} = h_{ij,\text{real}} + jh_{ij,\text{imag}}$ odgovara blok matrice H u realnoj ravni i to:

$$H_{ij} = \begin{pmatrix} h_{ij,\text{real}} & -h_{ij,\text{imag}} \\ h_{ij,\text{imag}} & h_{ij,\text{real}} \end{pmatrix}. \quad (1.72)$$

Slijedi da se za sistem sa n čvorova i mjernu konfiguraciju sa m mjerenja (koja odgovaraju svim aktivnim kanalima fazorskih mjerenja) problem estimacije stanja može formulirati na sljedeći način:

$$\begin{aligned} x_{opt} &= \argmin(J(x)) \\ \text{s.t. } \begin{pmatrix} z_1 \\ \vdots \\ z_m \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} H_{11} & \dots & H_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{m1} & \dots & H_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} r_1 \\ \vdots \\ r_m \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (1.73)$$

gdje je $J(x) = r^T W r$ - funkcija cilja, kod koje važi da je W dijagonalna matrica sastavljena od dijagonalnih blokova dimenzija 2×2 , za koje važi:

$$W_i = \begin{pmatrix} \sigma_{z1, \text{real}}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{z1, \text{real}}^2 \end{pmatrix}.$$

Rješenje problema estimacije definisanog u (1.73), dobija se direktno (nema iteracija) iz relacije:

$$x = (H^T W H)^{-1} H^T W z. \quad (1.74)$$

Potrebno je naglasiti da je trajanje estimacije stanja kod linearnog estimatora stanja ekvivalentno trajanju jedne iteracije kod tradicionalnog estimatora stanja (klasična mjerna konfiguracija).

Linearni matematički model estimatora predložen je i u [32] i [33], ali je u cilju bolje proračunske efikasnosti izvršena podjela procesa estimacije u dvije faze (nivoa). Prvi nivo odgovara transformatorskoj stanici, a drugi se izvršava u centru upravljanja. Potreban nivo redundanse je isti kao i kod osnovnog metoda estimacije stanja, pa prije nego što se počne izvršavati estimacija stanja, neophodno je obezbijediti observabilnost sistema, što se može provjeriti na jedan od klasičnih načina.

Estimacija stanja u prvoj fazi, tj. na nivou transformatorske stanice, vrši se posebno za svaki naponski nivo. Olakšavajuća okolnost je ta što u okviru jednog naponskog nivoa u transformatorskoj stanici nema impedansi, pa je proces estimacije stanja pojednostavljen. Mjerenja fazora struje i fazora napona obrađuju se posebno, što dalje pojednostavljuje proceduru estimacije, ali mnogo bitnije je to što se mjerenja fazora struje koristi za detekciju položaja prekidača u postrojenju. Prva faza estimacije je podijeljena u dva dijela: estimacija struja i estimacija napona.

Estimacija struja vrši se kako bi se odredili fazori struja prekidača, a time i statusi prekidača. Osnovna pretpostavka modela je da sve sabirnice i prekidači na istom naponskom nivou čine kolo sa nultom impedansom. U ovom dijelu prve faze posmatraju se samo mjerenja struja prekidača z_{cb} i mjerenja struja injektiranja z_{inj} . Početna pretpostavka je da su svi prekidači zatvoreni. Odgovarajuća relacija za mjerenje struja injektiranja:

$$z_{inj} = Ax + r_{inj} \quad (1.75)$$

gdje su:

A – incidencije matrica grana gdje su locirani prekidači u sabirničke sekcije,

x – vektor stanja koji čine struje prekidača i

r_{inj} – odgovarajući vektor rezidijuma mjerenja.

Relacija koja odgovara strujama prekidača:

$$z_{cb} = lx + r_{cb} \quad (1.76)$$

gdje su:

I – jedinična matrica i

r_{inj} – odgovarajući vektor rezidijuma mjerenja.

Ukupna mjerna funkcija može se prikazati kao:

$$\begin{pmatrix} z_{inj} \\ z_{cb} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A \\ I \end{pmatrix} x + \begin{pmatrix} r_{inj} \\ r_{cb} \end{pmatrix}. \quad (1.77)$$

Direktnim rješavanjem relacije (1.77) završava se prva faza estimacije stanja. Time su procijenjene struje prekidača, pa se vrši detekcija grešaka tradicionalnim putem (analizom rezidijuma mjerenja). Rezultujuće struje prekidača su procijenjene sa visokom pouzdanošću, pa se mogu koristiti za preciznu procjenu topologije mreže. Nakon ispravke grešaka u topologiji, vrši se ponovna estimacija stanja, ali sa novom matricom A , kako bi se dalje unaprijedila preciznost određivanja struja prekidača.

Značajna prednost ovog metoda estimacije stanja je odvojenost procjene analognih mjerenja (vrijednosti struja) i topologije mreže. Time je moguće nezavisno vršiti detekciju grešaka analognih mjerenja i statusa prekidača. S obzirom da se to sve vrši na nivou transformatorske stanice, dimenzija problema je značajno manja nego kod tradicionalnog pristupa, a može se paralelno izvoditi za sve transformatorske stanice, što je značajno proračunski efikasnije. Takođe, s obzirom da je detekcija grešaka u topologiji mreže jedan od osnovnih izvora grešaka u estimaciji stanja kod tradicionalnog pristupa, pristup sa estimacijom na nivou transformatorske stanice ima dodatnu prednost.

Drugi dio prve faze tiče se estimacije napona čvorova u transformatorskoj stanici. Nakon estimacije stanja, poznata je topologija trafostanice sa velikom pouzdanošću. Na osnovu mjerenja napona svih sabirničkih sekcija, može se formirati relacija za potrebe estimacije:

$$\underline{z} = \underline{H} \underline{x} + \underline{r}, \quad (1.78)$$

gdje je \underline{H} vektor kome su svi elementi 1.

Slijedi da se vektor stanja može odrediti direktno iz:

$$\begin{aligned} x_{real} &= \frac{\sum_{i=1}^m w_{2i-1, 2i-1} z_{i, real}}{\sum_{i=1}^m w_{2i-1, 2i-1}} \\ x_{imag} &= \frac{\sum_{i=1}^m w_{2i, 2i} z_{i, imag}}{\sum_{i=1}^m w_{2i, 2i}} \end{aligned} \quad (1.79)$$

gdje je w_{ij} – dijagonalni element matrice W (blokowska formulacija).

Pored toga što se estimacija na nivou transformatorske stanice vrši u dvije faze, ona nije proračunski zahtjevnija (u odnosu na klasični pristup) jer se estimacija vrši direktno i bez iteracija, na malim mjernim konfiguracijama. Pouzdana procjena topologije mreže, napona čvorova i struja grana i injeckiranja se kao rezultat proslijeđuju centru upravljanja gdje se vrši druga faza estimacije stanja. Ovaj pristup ima veliku prednost jer transformatorske stanice, koje su opremljene fazorskim

mjerenjima, proslijeđuju centru upravljanja mjerne podatke visoke pouzdanosti, kao i tačnu informaciju o topologiji mreže.

Druga faza estimacije vrši se u centru upravljanja, i ona potpuno odgovara matematičkoj formulaciji definisanoj u (1.73), a u blokovskoj formulaciji ima oblik:

$$\begin{pmatrix} V_b \\ I_{b1} \\ I_{b2} \\ I_{inj} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I \\ Y_{b1} \\ Y_{b2} \\ Y \end{pmatrix} x + r, \quad (1.80)$$

gdje je sa lijeve strane znaka jednakosti vektor mjerenja (mjerenje napona čvorova, struja na početku grane, struja na kraju grane i struja injektiranja čvorova).

Matrice Y_{b1} , Y_{b2} i Y su matrice koje se formiraju na osnovu topologije mreže i admitansi grana. Dakle, postupak estimacije stanja u potpunosti je linearan i u drugoj fazi, na nivou centra upravljanja. Pošto je u prvoj fazi već izvršena estimacija stanja na nivou transformatorskih stanica, to će postupak estimacije stanja na nivou sistema u velikoj mjeri biti oslobođen provjere grešaka mjerenja (za sva lokalno provjerena mjerenja). Pristup podijele estimacije stanja na dva nivoa nudi proračunske uštede u odnosu na tradicionalni pristup, ali ga je moguće primijeniti samo ako je zadovoljen određeni nivo redundanse fazorskih mjerenja, što podiže cijenu mjerne konfiguracije.

1.3.3. Analiza observabilnosti mreže

Statička estimacija stanja vrši se na osnovu raspoloživih mjerenja iz sistema. Što je broj raspoloživih mjerenja veći, to je konačni rezultat estimacije stanja pouzdaniji. Stoga se i kaže da se estimacija stanja vrši na osnovu redundantnog seta mjerenja. To znači da za estimaciju stanja nema gornje granice broja mjernih uređaja, kada je u pitanju njena procedura. Sva mjerenja su dio algoritma estimacije. Međutim, postoji donja granica. Ona se po broju mjerenja poklapa sa brojem promjenljivih koje čine vektor stanja (za sistem od n čvorova, ta granica je $2n-1$). Za mjernu konfiguraciju sa brojem uređaja manjim od pomenute donje granice estimacija stanja ne može biti izvršena u potpunosti, tj. ne može se dobiti procjena za sve elemente vektora stanja. U slučaju broja mjernih uređaja koji je jednak donjoj granici, algoritam statičke estimacije stanja svodi se na proračun tokova snaga. Tada se kaže da je sistem observabilan, tj. statička estimacija stanja će kao rezultat dati potpun vektor stanja. Što je broj mjernih uređaja veći od granice potrebne za osiguravanje observabilnosti sistema, to estimacija stanja ima mogućnost da ispuni sve svoje zadatke (detekcija i identifikacija grešaka mjerenja, topologije, parametara). Međutim, ukoliko mjerna konfiguracija ne zadovoljava uslov observabilnosti, onda se algoritam statičke estimacije ne može uspješno primijeniti, tj. divergira ili daje rezultate koji imaju veliku grešku. Stoga je neophodno izvršiti testiranje observabilnosti prije nego što se počne sa izvršavanjem algoritma estimacije.

U zavisnosti od tipa mjernih uređaja i njihovih lokacija u sistemu, analiza observabilnosti sistema daje informaciju da li se može pronaći jedinstvena procjena stanja sistema. Ova analiza se može sprovesti u inicijalnoj fazi instalacije estimatora stanja (*off line*), kako bi se provjerio kvalitet postojeće mjerne konfiguracije. Ukoliko bi se utvrdilo da sistem nije observabilan, neophodno bi bilo dodati nova mjerenja kako bi se ostvarila observabilnost sistema. Analiza observabilnosti vrši se i u realnom vremenu, neposredno prije pokretanja algoritma estimacije stanja. Time se osigurava da estimator može naći jedinstveno rješenje na osnovu dostupnih mjerenja u tom trenutku.

Komunikacioni problemi, promjene uklopnog stanja mreže, ili kvarovi mjernih uređaja mogu dovesti do situacije kada estimacija stanja sistema ne može biti izvršena (tj. sistem nije observabilan). Tada sistem obično ima nekoliko izolovanih observabilnih ostrva, pri čemu je svako sa svojim referentnim uglom za fazne stavove napona čvorova, nezavisnim u odnosu na ostala ostrva. Analizom observabilnosti moguće je izvršiti detekciju takvih ostrva prije izvršavanja algoritma estimacije stanja, a onda i odabrati virtuelna mjerenja koja bi povezala izolovana ostrva i na taj način omogućila estimaciju stanja.

Observabilnost neke mreže određena je tipom i lokacijom raspoloživih mjernih uređaja, kao i topologijom mreže. S tim u vezi, metodi za analizu observabilnosti koji se mogu naći u literaturi dijele se u dvije glavne grupe:

- topološki metodi [34], [35], [36], [37] i [38]: zasnivaju se na teoriji grafova; angažuju samo cjelobrojne operacije sa relativno kompleksnom implementacijom, ali bez numeričkih problema; ne omogućavaju direktno određivanje kritičnih setova što ograničava njihovu primjenu;
- numerički metodi [39], [40], [41], [42], [43] i [44]: zasnivaju se na trougaonoj faktorizaciji matrice pojačanja, Jacobian i Gram matrice; angažuju operacije sa realnim brojevima; karakteriše ih jednostavna implementacija, ali i mogući numerički problemi prilikom analize matrice rezidijuma mjerenja pri određivanju kritičnih mjerenja i setova; jednostavna primjena i nezahtjevnost proračuna preporučuju ove metode za primjenu u upravljanju u realnom vremenu.

1.3.3.1. Numerički pristup analizi observabilnosti

S obzirom da observabilan sistem omogućava estimatoru da pronađe jedinstveno rješenje za vektor stanja, kod numeričkog pristupa za analizu observabilnosti polazi se od osnovne definicije problema estimacije stanja (metod MKO):

$$\Delta x = \underbrace{(H^T W H)^{-1}}_G H^T R^{-1} \Delta z. \quad (1.81)$$

Jedinstveno rješenje za Δx može se odrediti samo u slučaju da matrica pojačanja nije singularna, odnosno rang matrice H je jednak broju promjenljivih stanja. Dakle, procedura analize observabilnosti svodi se na problem određivanja singularnosti matrice pojačanja, odnosno ranga matrice H . To se postiže nekom od metoda faktorizacije matrica.

Međutim, kako je provjera observabilnosti često izvršavana procedura u realnom vremenu, to je brzina postupka od velikog značaja. Kako dimenzija matrice H direktno zavisi od broja mjernih uređaja i veličine sistema, to analiza observabilnosti može da bude zahtjevna za velike sisteme. U cilju prevazilaženja problema, pokazuje se da raspredanje postupka estimacije stanja može da se iskoristi i za analizu observabilnosti. S obzirom da važi:

$$\begin{aligned} \Delta z_a &= H_{aa} \Delta \theta \\ \Delta z_r &= H_{rr} \Delta V, \end{aligned} \quad (1.82)$$

observabilnost se može utvrditi kroz provjeru ranga samo jedne od matrica H_{aa} ili H_{rr} . Bitno je samo napomenuti da je za slučaj faznog stava vektor stanja manji zbog usvajanja referentnog čvora, tj. $n-1$ gdje je n broj čvorova sistema (što je neophodan rang matrice H_{aa}). Za slučaj napona nema referentnog čvora, pa je traženi rang matrice H_{rr} kako bi sistem bio observabilan, n . Odnosno, dovoljno je analizirati slučaj observabilnosti faznih stavova, ukoliko postoji bar jedno naponsko

mjerenje po observabilnom ostrvu.

Potrebno je naglasiti da je observabilnost sistema nezavisna u odnosu na parametre grana, kao i na radni režim sistema. Tako, sve impedanse grana sistema mogu se pretpostaviti kao reaktanse jedinične vrijednosti, a svi naponi sistema kao da su poznati i iznose 1 r.j, tada se može pisati jednačina tokova snaga po granama prema relaciji:

$$P_b = A\theta, \quad (1.83)$$

gdje su:

P_b – vektor tokova aktivnih snaga po granama,

A – matrica incidencije grana u čvorove i

θ – vektor faznih stavova napona čvorova.

Dakle, ako je svaki element procijenjenog vektora faznih stavova napona čvorova jednak 0, onda su i odgovarajući čvorovi jednaki 0. Na osnovu DC modela statičke estimacije stanja, može se napisati:

$$H_{aa}\theta = z_a \Rightarrow \theta = (H_{aa}^T H_{aa})^{-1} H_{aa}^T z_a = G_{aa}^{-1} t_a. \quad (1.84)$$

Vektor θ će imati sve elemente jednake 0 samo u slučaju da svi mjerni uređaji pokazuju 0. Pokazuje se da ako postoji neka procjena vektora stanja koja ispunjava relaciju:

$$H_{aa}\theta = 0, \quad (1.85)$$

ali vodi ka tokovima snaga po granama različitim od 0 prema relaciji (1.83), onda sistem nije observabilan, a one grane kojima odgovaraju nenulti tokovi snaga su neobservabilne grane.

Pored matrice pojačanja i Jacobian matrice mjerenja, za analizu observabilnosti može se koristiti i Gram matrica [42], [44]. Ona se definiše na osnovu Jacobian matrice mjerenja kao:

$$A = H_{aa} H_{aa}^T. \quad (1.86)$$

Gram matrica sadrži informaciju o međusobnom odnosu mjernih uređaja. Posebno je korisna za određivanje osnovne mjerne konfiguracije (minimalne mjerne konfiguracije koja osigurava observabilnost sistema) i detekciju kritičnih mjerenja i setova. Ukoliko je rang Gram matrice jednak broju nezavisnih čvorova sistema, kaže se da posmatrana mjerna konfiguracija čini sistem observabilnim.

Posebno značajan rezultat analize observabilnosti je i detekcija observabilnih ostrva. Naime, na taj način je moguće izvršiti estimaciju stanja sistema samo na nivou observabilnih ostrva, ali i pronaći koja su to mjerenja potrebna da bi se sva observabilna ostrva integrisala i time omogućila estimaciju stanja cjelokupnog EES. U te svrhe moguće je iskoristiti DC metod estimacije stanja, tj. relacije (1.84) i (1.83) kako bi se detektovale neobservabilne grane, a na osnovu toga i observabilna ostrva u sistemu. Algoritam se izvodi rekurzivno, a zasnovan je na eliminaciji irelevantnih mjerenja injektiranja. Irelevantna su ona mjerenja injektiranja koja su incidentna neobservabilnim granama. Procedura se može predstaviti sljedećim koracima:

- eliminacija svih grana koje nemaju incidentna mjerenja,
- određivanje neobservabilnih grana prema relacijama (1.84) i (1.83),
- eliminacija svih neobservabilnih grana i njima incidentnih mjerenja injektiranja.

Navedeni postupak se ponavlja sve dok više nema pronađenih neobservabilnih grana. Tada je moguće identifikovati observabilna ostrva koja su razdvojena neobservabilnim granama.

1.3.3.2. Topološki pristup analizi observabilnosti

Problem numeričkih metoda za analizu observabilnosti je isti kao i kod matematičkog modela statičke estimacije stanja, tj. numerička stabilnost. U cilju otklanjanja tog problema, razvijene su topološke metode koje nemaju operacija sa realnim brojevima, već su zasnovane na logičkim operacijama. Naime, za potrebe analize observabilnosti koriste se informacije o topologiji mreže, tipu i lokaciji mjernih uređaja. Parametri same mreže (impedanse, prenosni odnos transformatora itd.) nisu od uticaja tokom analize observabilnosti (uzima se da su sve reaktanse jednake 1). Takođe, pretpostavlja se da se sva mjerenja mogu da se podijele na aktivna i reaktivna, a time i da se aktivna mjerenja mogu iskoristiti za analizu observabilnosti. Dakle, posmatraju se samo mjerenja aktivnih tokova snaga i injektiranja koja su linearno povezana sa faznim stavovima napona čvorova bez grešaka mjerenja. Odgovarajuća relacija je:

$$z_a = H_{aa} \theta. \quad (1.87)$$

gdje je iz matrice H_{aa} eliminisana kolona koja odgovara referentnom čvoru.

Prema DC modelu tokova snaga, mjerenje toka snage u grani između čvorova i i j , određuje se prema relaciji:

$$P_{ij} = \theta_i - \theta_j. \quad (1.88)$$

Ukoliko je moguće formirati stablo grafa tako da svakoj grani pomenutog grafa odgovara mjerenje toka snage tada se mogu odrediti svi fazni stavovi napona čvorova posmatrane mreže, tj. sistem je potpuno observabilan. Dakle, ideja algoritma topološkog metoda za analizu observabilnosti je pridruživanje mjerenja tokova snaga granama mreže, a onda se pokušava formulisanje stabla grafa. Ukoliko se formuliše stablo, sistem je observabilan. U suprotnom, kao rezultat se dobija više odvojenih stabala manjih dimenzija. Tada se koriste preostala mjerenja injektiranja snaga kako bi se kroz iterativni postupak, manja stabla povezala u jedno, a time obezbijedila observabilnost sistema. Ukoliko je i druga faza procedure neuspješna, sistem se proglašava neobservabilnim.

Postoje različite predložene metode za analizu observabilnosti zasnovane na topološkim principima. Međutim, sve one se mogu prikazati kroz jednu generalizovanu proceduru:

- pridruživanje svih mjerenja tokova snaga odgovarajućim granama grafa posmatrane mreže,
- procesiranje mjerenja injektiranja tako da se formira jedinstveno stablo grafa koje odgovara posmatranoj mreži; jedno mjerenje injektiranja može se pridružiti bilo kojoj incidentnoj grani (samo jednoj); dakle, analiziraju se mjerenja injektiranja jedno po jedno kako bi se izvršilo spajanje formiranih manjih stabala koji odgovaraju djelovima mreže; definisanje optimalnog redoslijeda procesiranja mjerenja injektiranja je osnovna razlika među predloženim metodama za topološku analizu observabilnosti; najčešće se predlažu strategije koje ostavljaju mogućnost vraćanja na već procesirana mjerenja injektiranja i promjena grane kojoj su bila pridružena.

Ukoliko sistem nije observabilan, potrebno je definisati observabilna ostrva. Koristeći topološki pristup, to se može uraditi na sljedeći način:

- odbacuju se ona mjerenja injektiranja koja imaju bar jednu incidentnu granu koja formira konturu sa granama koje su već definisane kao grane stabla (ova injektiranja ne donose nikakvu novu mjernu informaciju u odnosu na raspoloživa mjerenja toka snage),
- ažuriraju se raspoloživa stabla,

postupak se ponavlja sve dok se ne eliminišu sva mjerenja injektiranja. Na osnovu rezultujućih stabala grafa kreiraju se observabilna ostrva sistema.

Implementacija topoloških metoda za analizu observabilnosti je složenija u odnosu na numeričke metode, ali je s druge strane oslobođena od problema sa numeričkom stabilnošću. Takođe, za velike sisteme, topološke metode pokazuju bolje performanse kada je brzina analize u pitanju. Najveća mana topoloških metoda je nemogućnost analize redundanse mjerne konfiguracije.

1.3.3.3. Analiza redundanse mjerne konfiguracije

Osnovni zadatak mjerne konfiguracije je da obezbijedi observabilnost sistema kako bi statička estimacija stanja mogla biti izvršena. Međutim, da bi kvalitet i pouzdanost estimacije stanja bila na zadovoljavajućem nivou, mjerna konfiguracija mora biti planirana tako da ima dovoljan nivo redundanse mjerenja. Naime, observabilnost sistema mora biti očuvana i u slučaju gubitka jednog mjerenja (kvar mjerenja ili komunikacionih problema), kao i sposobnost detekcije i identifikacije grešaka mjerenja. Sposobnost mjerne konfiguracije da osigura pouzdanu estimaciju stanja određena je brojem kritičnih mjerenja i kritičnih setova mjerenja.

Mjerenje iz mjerne konfiguracije može biti kritično ili redundantno. Kritično je ono mjerenje, čijom se eliminacijom iz mjerne konfiguracije gubi observabilnost sistema [34]. Takođe, za mjerenje se kaže da pripada kritičnom setu mjerenja, ukoliko gubitak jednog od mjerenja iz posmatranog seta mjerenja, ostala mjerenja čini kritičnim. Redundantna mjerenja su ona mjerenja koja se mogu eliminisati iz mjerne konfiguracije bez gubitka observabilnosti sistema. Identifikacija kritičnih mjerenja i setova osnovni je zadatak analize redundanse mjerne konfiguracije.

Slično kao kod analize observabilnosti, postoje dva pristupa analizi redundanse, topološki i numerički. Topološki metodi se koriste samo za detekciju kritičnih mjerenja, dok se numerički koriste i za detekciju kritičnih setova mjerenja. Topološki metodi su uglavnom kombinatornog tipa i zasnovani su na traženju kritičnog stabla grafa (sastavljenog od kritičnih mjerenja) [35], [36], [38]. U [37] je predložen kombinovani numeričko-simbolički metod za detekciju kritičnih mjerenja i setova. Numerički pristup zasnovan na analizi rezidijuma mjerenja predložen je u [41]. Metod zasnovan na trougaonoj dekompoziciji Jacobian matrice mjerenja kojim se može izvršiti analiza observabilnosti i redundanse mjerne konfiguracije predlaže se u [45]. Detekcija kritičnih mjerenja upotrebom Gram matrice predlaže se u [42].

Osnovni problem topoloških metoda je nemogućnost detekcije kritičnih setova mjerenja. Kod numeričkih metoda, problem je numerička stabilnost postupka analize redundanse. Naime, kod analize rezidijuma, problem su proračuni koji uključuju operacije sa vrijednostima koje nisu isti red veličine (velike razlike između dijagonalnih elemenata matrice pojačanja). Taj problem je u određenoj mjeri ublažen kod metoda koji uključuju faktorizaciju Jacobian matrice. Najzahtjevnija procedura kod njih je sama faktorizacija, čija primjena predstavlja značajno ograničenje kada se radi sa velikim sistemima, a brzina metoda je od značaja (upravljanje u realnom vremenu).

Analiza redundanse mjerne konfiguracije može se izvršiti upotrebom Gram matrice. Za te potrebe, pomenuta matrica se predstavlja pomoću submatrica na sljedeći način:

$$A = \begin{bmatrix} A_{bb} & A_{br} \\ A_{rb} & A_{rr} \end{bmatrix}, \quad (1.89)$$

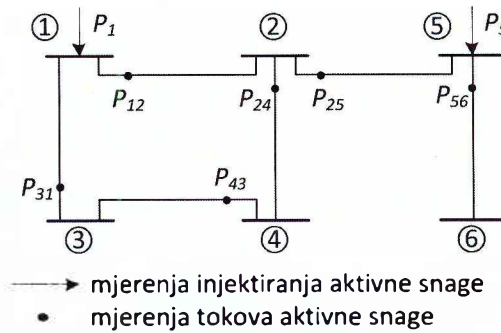
gdje su:

A_{bb} – submatrica koja sadrži informaciju o odnosu između mjerenja koja čine osnovni mjerni set,

A_{rb} i A_{br} – submatrice koje sadrže informaciju o odnosu između redundantnih mjerenja i mjerenja iz osnovnog seta ($A_{rb} = A_{br}^T$) i

A_{rr} – submatrica koja sadrži informaciju o odnosu između redundantnih mjerenja.

Upotrebu Gram matrice za analizu redundanse najbolje je pokazati na primjeru (Slika 1.9). Nakon formiranja Jacobian matrice mjerenja, proračunava se Gram matrica. Nakon toga, potrebno je izvršiti njenu trougaonu faktorizaciju kako bi se prepoznala mjerenja koja pripadaju osnovnom setu i redundantna mjerenja. Dijagonalni elementi faktorizovane Gram matrice, koji su različiti od 0, odgovaraju mjerenjima iz osnovnog seta. Preostala mjerenja su redundantna mjerenja. Koristeći dobijeni rezultat, vrši se preraspoređivanje vrsta i kolona Gram matrice, tako da se prvo navode mjerenja iz osnovnog seta, a onda redundantna mjerenja. Tada se dobija forma matrice prikazana u relaciji (1.89).



Slika 1.9 Primjer mreže

Dakle, osnovna Gram matrica za analizirani primjer (Slika 1.9), je:

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} P_{1-2} & P_{2-4} & P_{2-5} & P_{3-1} & P_{4-3} & P_{5-6} & P_1 & P_5 \end{matrix} \\ \begin{matrix} P_{1-2} \\ P_{2-4} \\ P_{2-5} \\ P_{3-1} \\ P_{4-3} \\ P_{5-6} \\ P_1 \\ P_5 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 3 & 1 \\ -1 & 2 & 1 & 0 & -1 & 0 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & 2 & 0 & 0 & -1 & -1 & -3 \\ -1 & 0 & 0 & 2 & -1 & 0 & -3 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & -1 & 2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 2 & 0 & 3 \\ 3 & -1 & -1 & -3 & 1 & 0 & 6 & 1 \\ 1 & -1 & -3 & 0 & 0 & 3 & 1 & 6 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (1.90)$$

Nakon faktorizacije, dobija se:

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} P_{1-2} & P_{2-4} & P_{2-5} & P_{3-1} & P_{4-3} & P_{5-6} & P_1 & P_5 \end{matrix} \\ \begin{matrix} P_{1-2} \\ P_{2-4} \\ P_{2-5} \\ P_{3-1} \\ P_{4-3} \\ P_{5-6} \\ P_1 \\ P_5 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 3 & 1 \\ 0 & 1.5 & 0.5 & -0.5 & -1 & 0 & 0.5 & -0.5 \\ 0 & 0 & -2.67 & 0.67 & -0.67 & 2 & -0.67 & 4.67 \\ 0 & 0 & 0 & 3.75 & -3.75 & -0.75 & -3.75 & -0.75 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4.8 & 0 & 4.8 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (1.91)$$

Uočavaju se nenulti dijagonalni elementi, pa se zaključuje da osnovni mjerni set čine mjerenja: $[P_{1-2} \ P_{2-4} \ P_{2-5} \ P_{3-1} \ P_{5-6}]$. Osnovni mjerni set nije jedinstven. On je uslovljen usvojenim rasporedom mjernih uređaja u okviru Gram matrice. Karakteristika osnovnog mjernog seta je da se sva redundantna mjerenja mogu prikazati kao linearna kombinacija njegovih mjerenja. Preraspoređivanjem vrsta i kolona matrice iz (1.90) tako da se mjerenja iz osnovnog navedu prva, a onda primjenom naprijed/nazad faktorizacije, dobija se:

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} P_{1-2} & P_{2-4} & P_{2-5} & P_{3-1} & P_{5-6} & P_{4-3} & P_1 & P_5 \end{matrix} \\ \begin{matrix} P_{1-2} \\ P_{2-4} \\ P_{2-5} \\ P_{3-1} \\ P_{5-6} \\ P_{4-3} \\ P_1 \\ P_5 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & 2 & 0 \\ 0 & -3 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & -4 \\ 0 & 0 & 0 & 5 & 0 & -5 & -5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4.8 & 0 & 0 & 4.8 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (1.92)$$

Dakle, u opštoj formi, nakon faktorizacije dobija se matrica oblika:

$$A = \left[\begin{array}{c|c} D_{bb} & F_{br} \\ \hline 0_{rb} & 0_{rr} \end{array} \right], \quad (1.93)$$

gdje su:

D_{bb} – rezultujuća dijagonalna submatrica koja odgovara mjerenjima iz osnovnog mjernog seta i

F_{br} – matrica koeficijenata koji povezuju redundantna mjerenja sa mjerenjima iz osnovnog seta.

Kritično mjerenje je uvijek član osnovnog mjernog seta. Njemu odgovarajuća vrsta (kolona) je linearno nezavisna, tj. ne može se napisati kao linearna kombinacija bilo kojih preostalih vrsta (kolona) iz posmatrane Gram matrice. Dakle, kritično mjerenje nosi jedinstvenu informaciju i ne može biti zamijenjeno nekim drugim mjerenjem iz mjerne konfiguracije. S druge strane, redundantno mjerenje ne nosi jedinstvenu informaciju, pa može biti zamijenjeno drugim mjerenjem iz mjerne konfiguracije. Ideja metoda predloženog u [44] sastoji se u provjeri odnosa između mjerenja koristeći faktorizaciju Gram matrice. Naime, na osnovu submatrice koeficijenata zavisnosti mjernih uređaja F_{br} moguće je izvršiti analizu redundanse mjerne konfiguracije. Analiza se svodi na detekciju nultih elemenata u pomenutoj submatrici. Za analizirani slučaj, ona je:

$$F_{br} = \begin{matrix} & \begin{matrix} P_{4-3} & P_1 & P_5 \end{matrix} \\ \begin{matrix} P_{1-2} \\ P_{2-4} \\ P_{2-5} \\ P_{3-1} \\ P_{5-6} \end{matrix} & \begin{bmatrix} -2 & -2 & 0 \\ 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -4 \\ -5 & -5 & 0 \\ 0 & 0 & 4.8 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (1.94)$$

Ukoliko u okviru neke od vrsta submatrice F_{br} su svi elementi jednaki 0, onda je mjerenje koje odgovara toj vrsti, kritično mjerenje, tj. nijedno mjerenje iz posmatrane mjerne konfiguracije ne posjeduje njegovu mjernu informaciju. Ako je samo jedno mjerenje iz vrste različito od 0, onda mjerenja, koja odgovaraju koloni submatrice F_{br} sa nenultim elementima, zajedno sa posmatranim mjerenjem iz osnovnog seta, čine kritični mjerni set. Tako se za analizirani primjer predstavljen

submatricom iz (1.94), može zaključiti da ne postoje kritična mjerenja, ali da postoje dva kritična mjerna seta i to: $[P_{2-4} P_{4-3}]$ i $[P_{2-5} P_{5-6} P_5]$.

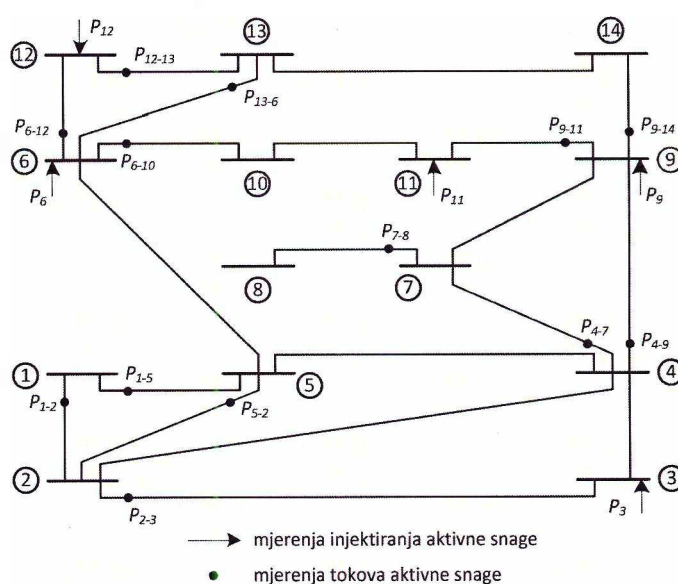
Dobra okolnost kod ovog pristupa analize redundanse je ta da ispad jednog ili više redundantnih mjerenja ne zahtijeva ponovnu faktorizaciju matrice, već je samo potrebno eliminisati odgovarajuće vrste, a onda u skladu sa navedenim pravilima, izvršiti identifikaciju kritičnih mjerenja i setova.

Identifikacija kritičnih setova veoma je uslovljena odabirom mjerenja iz osnovnog mjernog seta. Naime, član kritičnog mjernog seta ne nosi jedinstvenu informaciju, pa može biti i u grupi redundantnih mjerenja, kao i ostala mjerenja iz istog kritičnog mjernog seta. Time neće biti moguće izvršiti njihovu identifikaciju, jer gore predloženi pristup podrazumijeva da je bar jedno mjerenje iz kritičnog seta dio osnovne mjerne konfiguracije. Kako bi se ipak izvršila identifikacija svih kritičnih setova, potrebno je izvršiti pojedinačnu eliminaciju, praćenu faktorizacijom matrice, onih mjerenja iz osnovnog mjernog seta koja nisu prethodno identifikovana kao kritična, ili dio kritičnog seta mjerenja. Ukoliko nova faktorizacija detektuje nova kritična mjerenja, onda ona, zajedno sa eliminisanim mjerenjem, čine kritični mjerni set koji se nije mogao otkriti u prvoj iteraciji.

Algoritam analize redundanse može se predstaviti sljedećim koracima:

- formiranje mjerne Jacobian matrice koristeći sva mjerenja iz mjerne konfiguracije (DC pristup),
- računanje Gram matrice,
- faktorizacija Gram matrice (Gauss-ova naprijed/nazad faktorizacija),
- analiza submatrice F_{br} ,
- sukcesivna pojedinačna eliminacija svih mjerenja iz osnovnog mjernog seta koja nisu identifikovana kao kritična ili članovi kritičnog mjernog seta.

Analiza redundanse pomoću metoda baziranog na faktorizaciji Gram matrice može se predstaviti na IEEE sistemu sa 14 čvorova (Slika 1.10). Kod njega je primijenjena proizvoljna klasična mjerna konfiguracija, koja obezbijeduje observabilnost sistema.



Slika 1.10 IEEE standardni sistem sa 14 čvorova

Nakon izvršene analize redundanse za posmatrani IEEE sistem (Slika 1.10), dobijeni su sljedeći rezultati:

- P_{7-8} je kritično mjerenje i
- postoje tri kritična seta: $[P_{1-2}, P_{1-5}]$, $[P_{4-7}, P_{9-14}, P_9]$ i $[P_{2-3}, P_{6-10}, P_3, P_6 \text{ i } P_{11}]$.

Kvalitet mjerne konfiguracije uslovljen je sposobnošću mjerne konfiguracije da očuva observabilnost i pouzdanost estimacije stanja u slučaju ispada nekog od mjernih uređaja. Da li je mjerna konfiguracija ostala bez mjerenja iz osnovnog ili redundantnog mjernog seta, različit uticaj ima na održavanje observabilnosti sistema. Tako je posmatrana mjerna konfiguracija analizirana za tri karakteristična slučaja:

- i. ispad više redundantnih mjerenja,
- ii. ispad mjerenja iz osnovnog seta bez gubitka observabilnosti i
- iii. ispad dva mjerenja iz kritičnog seta.

Nakon faktorizacije odgovarajuće Gram matrice, dolazi se do osnovnog mjernog seta koji čine mjerenja: $P_{1-2}, P_{1-5}, P_{2-3}, P_{4-7}, P_{4-9}, P_{6-10}, P_{6-12}, P_{7-8}, P_{9-11}, P_{9-14}, P_{12-13}, P_3$ i P_6 . Preostala mjerenja čine redundantni mjerni set ($P_{5-2}, P_{13-6}, P_9, P_{11}$ i P_{12}).

Slučaj i. – Ispad mjerenja: P_{5-2}, P_{13-6} i P_{12} .

Sistem ostaje observabilan. Nema povećanja broja kritičnih mjerenja, tj. jedino kritično mjerenje je P_{7-8} . Identifikovana su dva su kritična mjerna seta i to: $[P_{4-7}, P_{9-14}, P_9]$ i $[P_{1-2}, P_{1-5}, P_{2-3}, P_{6-10}, P_{6-12}, P_{12-13}, P_3, P_6, P_{11}]$. Dakle, došlo je do spajanja dva kritična seta identifikovana kod osnovne mjerne konfiguracije. Time je observabilnost sistema sačuvana, a pouzdanost estimacije stanja nije značajno narušena, jer su ispadom 3 mjerenja samo dva mjerenja novi članovi kritičnog seta mjerenja. Pritom, u ovom slučaju nije potrebno vršiti ponovnu faktorizaciju, već samo eliminaciju odgovarajućih kolona koje odgovaraju redundantnim mjerenjima iz submatrice F_{br} . Time je procedura prihvatljiva za on-line primjenu.

Slučaj ii. – Ispad mjerenja P_{1-2}, P_{2-3} i P_{4-9} .

Sistem ostaje observabilan. Broj kritičnih mjerenja se povećava na 11, i to su: $P_{1-5}, P_{4-7}, P_{6-10}, P_{7-8}, P_{9-11}, P_{9-14}, P_3, P_6, P_{5-2}, P_9, P_{11}$. Kritičnih mjernih setova nema, jer su sva mjerenja detektovana da pripadaju kritičnim setovima u normalnom slučaju, sada kritična mjerenja. Zbog velikog broja kritičnih mjerenja (11 od mogućih 14), u ovom slučaju je praktično onemogućena bitna funkcionalnost estimatora stanja – detekcija grešaka mjerenja. U ovom slučaju je neophodno izvršiti ponovnu faktorizaciju dijela Gram matrice jer su u kvaru mjerenja iz osnovnog mjernog seta.

Slučaj iii. – Ispad mjerenja P_3 i P_6 .

Ispad bilo koja dva mjerenja iz kritičnog mjernog seta vodi ka gubitku observabilnosti. U praksi se obično takva situacija nadomješta uvođenjem pseudo-mjernih uređaja, tj. prethodnih informacija o mjerenju veličina potrebnih za uspostavljanje observabilnosti. Za ovaj slučaj, uvedeno je pseudo-mjerenje P_{5-10} . Sa njim u mjernoj konfiguraciji, observabilnost sistema je vraćena i može se izvršiti statička estimacija stanja. Nakon faktorizacije matrice, detektovano je 5 kritičnih mjerenja i dva kritična seta mjerenja. Kritična mjerenja su: $P_{2-3}, P_{6-10}, P_{7-8}, P_{11}$ i P_{5-10} . Kritični mjerni setovi su: $[P_{5-2}, P_{1-2}, P_{1-5}]$ i $[P_{4-7}, P_{4-9}, P_{9-11}, P_{9-14}, P_9]$. Očekivano, odabrano pseudo-mjerenje, pripada grupi kritičnih mjerenja. Ovaj slučaj karakteriše najsloženiji postupak detekcije kritičnih mjerenja i setova, jer je potrebno prvo pronaći koje je to pseudo mjerenje(a) potrebno obezbijediti, kako bi se vratila observabilnost sistema. To se postiže faktorizacijom Jacobian matrice mjerenja nakon čega se prepoznaju čvorovi koji nisu observabilni, a onda se kao pseudo-mjerenja odaberu ona koja su najpouzdanija a nose mjerne informacije koje se tiču neobservabilnih čvorova. Nakon toga, ponavlja se postupak detekcije kritičnih mjerenja i kritičnih setova.

U cilju postizanja boljih performansi i izbjegavanja suvišnih faktorizacija, moguće je prethodno formulisati nekoliko osnovnih mjernih setova i za njih izvršiti potrebne faktorizacije *off-line* i

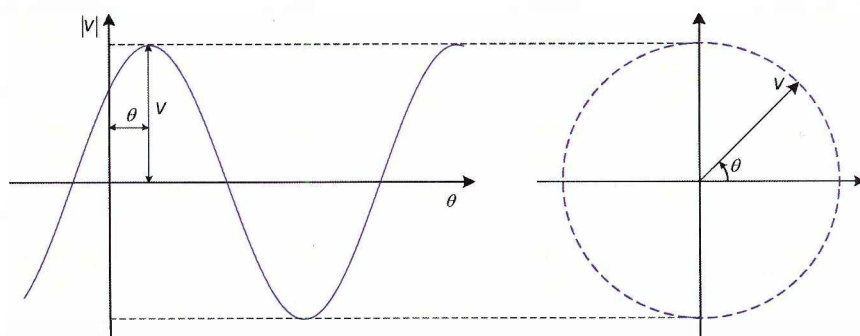
sačuvati dobijene rezultate za on-line potrebe. Na taj način, u slučaju ispada bilo kojeg od redundantnih mjerenja (iako je u osnovnom mjernom setu), nema potrebe za izvršavanjem faktorizacije, već se samo izvrši eliminacija odgovarajućih vrsta iz jedne od sačuvanih faktorizovanih matrica. Postupak zasnovan na Gram matrici iz [44] ne zahtijeva inverziju matrice kao kod analize rezidijuma [41], pa je time otporniji na numeričke probleme.

1.4. Fazorska mjerenja

Fazni stav naponskih fazora čvorova elektroenergetske mreže uvijek je bio od posebnog interesa za analizu radnih režima EES. Iz metoda tokova snaga [18] poznato je da je tok aktivne snage kroz elektroenergetski vod skoro direktno proporcionalan razlici faznih stavova fazora napona koji odgovaraju početnom i krajnjem čvoru posmatranog voda. Kako je veliki broj procesa koji prati upravljanje EES vezan za poznavanje tokova aktivnih snaga, mjerenje faznih stavova fazora napona ima veliki praktični značaj.

Najraniji radovi koji se tiču direktnog mjerenja faznog stava datiraju još iz osamdesetih godina XX vijeka [46], [47], [48]. U procesu je korišćena satelitska komunikacija kako bi se obezbijedila referentna osa za vrijeme na različitim lokacijama u sistemu. Fazni stav se određivao prema prvom sljedećem prolasku sinusoide napona kroz 0 ali tako da ima pozitivan gradijent. Računanjem razlike između dobijenih faznih stavova u odnosu na zajednički referentnu osu, dobija se konkretna fazna razlika između fazora napona posmatranih čvorova. Preciznost mjerenja je u pomenutim slučajevima bila 40 μ s. Nisu mjerene efektivne vrijednosti napona kako bi se dobio fazor napona. Takođe, nije uzeto u obzir postojanje harmonika u talasnom obliku mjerenog napona. Mjerenje samo faznih stavova nije praktično za sistem, pa predložena mjerenja nisu našla primjenu.

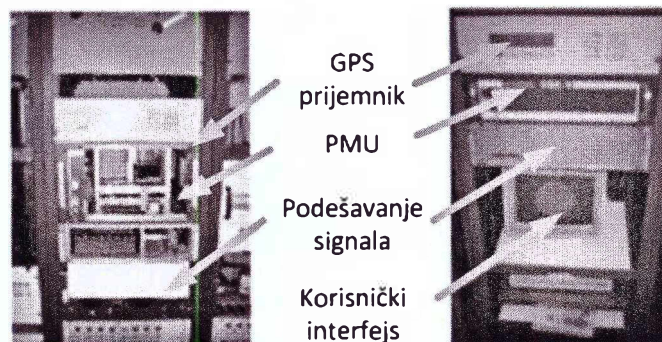
Savremeni razvoj tehnologije fazorskih mjerenja uslovljen je potrebama mikroprocesorskih zaštita u prenosnim vodovima. U početnoj fazi razvoja mikroprocesorskih zaštita sedamdesetih godina problem su predstavljale ograničene mogućnosti procesiranja koje nisu dozvoljavale efikasno rješavanje matematičkog modela. U cilju pojednostavljivanja matematičkog modela, razvijen je metod zasnovan na simetričnim komponentama napona i struja [49]. Taj metod obuhvata efikasan algoritam za proračun simetričnih komponenti napona i struja. Na osnovu toga je moguće odrediti fazore napona i struja, što je postavilo osnove za razvoj modernih fazorskih mjerenja (PMU).



Slika 1.11 Sinusoidalni talas napona i njegovo fazorsko predstavljanje

Prvi rad koji je istakao važnost mjerenja fazora napona čvorova kao osnovnih elemenata vektora stanja, objavljen je 1983. godine [50]. Pravi razvoj fazorskih mjerenja krenuo je sa razvojem

globalnog sistema pozicioniranja. Ovaj sistem je omogućio sinhronizaciju fazorskih mjerenja raspoređenim na širokim geografskim područjima. Prvi prototip fazorskih mjerenja izrađen je na Virginia Tech univerzitetu ranih osamdesetih godina prošlog vijeka (Slika 1.12). Prvi komercijalni fazorski mjerni uređaj napravljen je 1991., a tada je bio opremljen i dodatnim internim časovnikom za potrebe sinhronizacije u slučaju nedostupnosti satelita (to je bio slučaj zbog malog broja satelita koji su bili korišćeni za komercijalne GPS potrebe). Iste godine IEEE je objavio standard koji se tiče formata informacija koje razmjenjuju PMU i centar upravljanja. Revizija standardna izvršena je 2005. godine [51].



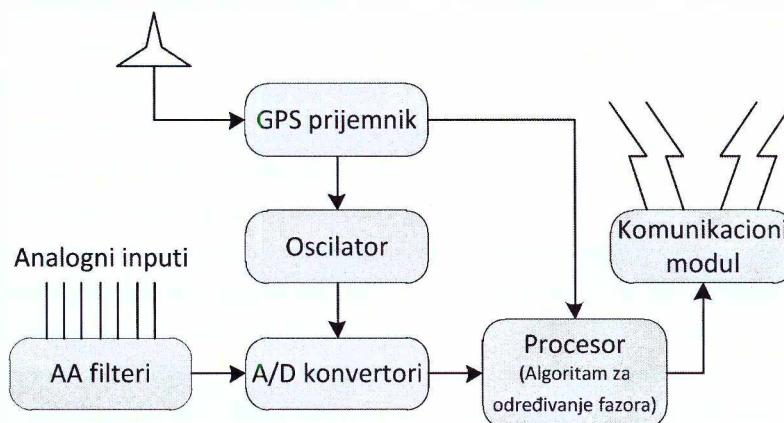
Slika 1.12 Prototip fazorskog mjerenja

Kao što je poznato, fazorsko predstavljanje napona ima smisla samo za čisti sinusoidni oblik napona. U praksi, talasni oblik napona često sadrži i komponente drugih frekvencija. Tada je potrebno izvršiti ekstrakciju samo jedne komponente talasnog oblika koja ima odgovarajuću frekvenciju i predstaviti je fazorom. Ekstrakcija se vrši najčešće upotrebom Fourier-ove transformacije. Uzimajući u obzir da su mjerne informacije diskretizovane, koristi se diskretizovana Fourier-ova transformacija (DFT) ili brza Fourier-ova transformacija (FFT).

Pored toga, kod definicije fazora, podrazumijeva se da ne dolazi do mijenjanja karakteristika mjerene veličine tokom vremena (amplituda i fazni stav ostaju konstantni). Međutim, u praksi za mjerenje fazora potrebno je odabrati vremenski prozor za uzimanje podataka iz sistema. Njegovo definisanje zavisi od namjene fazorskih mjerenja. Ukoliko je mjerenje namijenjeno praćenju statičkog stanja sistema, onda učestanost mjerenja i širina prozora mogu biti manji. Za potrebe praćenja prelaznih pojava, neophodna je veća učestanost mjerenja i širi prozor kako bi se zadovoljio potreban nivo tačnosti mjerenja.

Sinhronizacija fazorskih mjerenja je neophodna kako bi se postiglo njihovo pravilno funkcionisanje. To se postiže vremenskim obilježavanjem svih mjerenja u trenutku zahvata informacija. Za te potrebe koriste se časovnici visoke preciznosti sinhronizovani pomoću satelitske komunikacije sa GPS sistemom. Sinhronizacijom mjerenja širom sistema umanjen je značaj brzine prenosa informacija jer procesiranje informacija može biti urađeno kvalitetno iako informacije o mjerenjima nisu trenutno poslate u centar upravljanja. Jasno je da podaci o mjerenjima ne moraju stići u istom trenutku u centar upravljanja, jer to zavisi od udaljenosti fazorskog mjerenja od centra upravljanja, kao i o raspoloživosti komunikacionih kapaciteta. Za proračun fazora koriste se samo one informacije koje su zahvaćene u istom trenutku. Vremensko označavanje trenutka kada je zahvat mjernih podataka iz sistema izvršen neophodno je za formiranje koherentne slike radnog režima sistema.

S obzirom da postoji veliki broj proizvođača fazorskih mjernih uređaja, a definisani standard tiče se samo formata informacija koje oni razmjenjuju sa centrom upravljanja, sama izvedba uređaja veoma varira od proizvođača do proizvođača. Međutim, moguće je napraviti generalizovani prikaz strukture fazorskog uređaja (Slika 1.13). Analogni ulazni podaci tiču se mjerenja struje i napona sa sekundara odgovarajućih mjernih transformatora. Pomenuta mjerenja su trofazna kako bi se mogle proračunati sve simetrične komponente. S obzirom da se u transformatorskoj stanici stiče više vodova, potrebno je mjeriti struju svakog od njih, kao i napone svih dostupnih čvorova u okviru stanice. Dakle, fazorsko mjerenje može imati veliki broj analognih ulaznih mjernih podataka.



Slika 1.13 Generalizovana blok šema fazorskog mjerenja

Za upotrebu fazorskih mjerenja neophodna je odgovarajuća komunikaciona infrastruktura na mjestima njihove ugradnje. Dva su aspekta koja se posmatraju kada se procjenjuje kvalitet komunikacione infrastrukture: kapacitet komunikacionih kanala i kašnjenje u prenosu informacija do centra upravljanja. Priroda informacija koje se prenose prema centru upravljanja nisu zahtjevne kada je kapacitet u pitanju, ali kašnjenje u prenosu može biti ograničenje za neke primjene fazorskih mjerenja. To se prvenstveno odnosi na primjene fazorskih mjerenja u aplikacijama od značaja za upravljanje u realnom vremenu. U slučaju upotrebe mjerenja za potrebe planiranja EES, tada nije problem izraženo kašnjenje u prenosu informacija do centra upravljanja.

Najbolji medijum za ostvarivanje komunikacije između fazorskih mjerenja i centra upravljanja je putem fiber-optičkih linkova koje karakterišu ogromni kapaciteti, brzina prenosa i otpornost na elektromagnetnu interferenciju. Kod EES, najpopularniji vid instalacije fiber-optičkih kablova je u vidu zaštitnog užeta kod prenosnih vodova. Zaštitna užad mogu nositi više od jednog fiber-optičkog kabla koji se mogu koristiti za potrebe komunikacije, zaštite i upravljanja sistemom.

Fazorska mjerenja značajno unaprijeđuju rad estimatora stanja kroz povećanje pouzdanosti i preciznosti estimacije. Ona daju direktnu informaciju o traženoj veličini, tj. fazoru napona čvora. Obezbjediavanje fazora napona čvorova i struja u incidentnim granama daje pouzdanu informaciju estimatoru stanja. Usljed toga, algoritam statičke estimacije je daleko jednostavniji i postaje linearan problem [30], za razliku od slučaja kada se koriste samo klasična mjerenja.

Fazorska mjerenja nalaze široku primjenu u mnogim oblastima planiranja i eksploatacije EES. Ovdje će posebna pažnja biti posvećena njihovom doprinosu u pouzdanom monitoringu sistema i estimaciji stanja kao nezaobilaznom dijelu modernih sistema upravljanja EES kroz pronalaženje strategije za formiranje optimalne fazorske mjerne konfiguracije.

1.5. Planiranje mjerne konfiguracije

Osnovni zadatak mjerne konfiguracije je da obezbijedi dovoljan nivo informacija za izvršavanje statičke estimacije stanja. Međutim, taj nivo podataka nije dovoljan za postizanje pouzdane estimacije stanja, pa je potrebno obezbijediti dodatna, redundantna mjerenja. Redundantnost mjernih podataka je od velike važnosti za uspješnu estimaciju stanja. Odgovarajući nivo redundanse omogućava estimatoru stanja da efikasno detektuje, identifikuje i otkloni efekat loših mjerenja. Redundansa je određena brojem, tipom i topološkom distribucijom mjernih uređaja širom sistema. Iako bi visoki stepen redundanse bio povoljan s aspekta tehničkih performansi mjerne konfiguracije, tome se najčešće ne pribjegava zbog finansijskih ograničenja. Nivo redundanse može biti ugrožen i usljed standardnih promjena uklopnog stanja mreže, mogućih kvarova mjernih uređaja i komunikacionih kanala. U tim slučajevima može doći do narušavanja kritičnog nivoa redundanse kada estimator stanja više nije u mogućnosti da izvrši identifikaciju grešaka u mjerenjima, što uslovljava manje kvalitetnu estimaciju stanja sistema.

Planiranje mjerne konfiguracije za pouzdan monitoring i upravljanje sistemom je složen problem, ne samo zbog dimenzionalnosti problema, već i zbog potrebe da se u optimalnom rješenju zadovolje razni suprotstavljeni zahtjevi (tehničke performanse i cijena mjerne konfiguracije). Sa odgovarajućom mjernom konfiguracijom estimator stanja može uspješno procesirati raspoložive mjerne podatke i obezbijediti pouzdanu estimaciju parametara režima posmatranog sistema, tj. vektor stanja. Podaci dobijeni iz estimatora stanja dalje se koriste u svim aplikacijama značajnim za efikasno upravljanje sistemom, kao i za potrebe planiranja budućih operativnih akcija.

Problem planiranja mjerne konfiguracije istorijski se može podijeliti na dva razdoblja, koja su povezana sa tehnološkim razvojem mjernih uređaja i dostupnih ICT tehnologija. Prvi se tiče upotrebe klasičnih, analognih, mjernih uređaja: voltmetri, ampermetri, uređaji za mjerenje aktivne i reaktivne snage. Drugi, period počinje sa komercijalizacijom tehnologije fazorskih mjerenja, devedesetih godina prošlog vijeka, a tiče se savremenih mjernih konfiguracija. Naime, usljed naprednih mogućnosti fazorskih mjerenja, njihova upotreba je doživjela veliku ekspanziju. U cilju pripreme elektroenergetskih mreža za razvoj smart grid mogućnosti, savremeni mjerni sistemi za monitoring EES, planiraju se sa fazorskim mjerenjima.

1.5.1. Optimizacija klasične mjerne konfiguracije

Problem optimizacije mjerne konfiguracije sastavljene od klasičnih mjernih uređaja prvi put analizirao je Koglin 1975. godine u [52]. On predlaže optimizacioni metod koji uzima u obzir tehničke i finansijske kriterijume optimizacije. Predloženi metod se zasniva na detaljnoj pretrazi svih mogućih rješenja. Problem predloženog metoda su loše performanse pri primjeni na praktične sisteme čija je dimenzionalnost izražena.

Kako je testiranje observabilnosti neizbježno pri analizi kvaliteta neke mjerne konfiguracije, potrebno je voditi računa i o njenoj efikasnosti kada se radi sa složenijim sistemima. S tim u vezi, u [53] i [36] predložen je metod za obezbjeđivanje observabilnosti zasnovan na topološkim karakteristikama posmatrane mreže i mjernih uređaja. Na taj način izbjegnuti su mogući numerički problemi prilikom analize observabilnosti klasičnim putem. Pored pronalaženja optimalnih pozicija za mjerne uređaje, u analizu su uključeni i RTU jedinice, koji služe za prenos mjernih podataka do centra upravljanja. Potrebno je naglasiti da njihova cijena značajno prevazilazi cijene pojedinačnih mjernih uređaja. Metod za poboljšanje observabilnosti putem dodavanja mjernih uređaja na strateški odabranim lokacijama prezentiran je u [54]. On je zasnovan na identifikaciji observabilnih

ostrva u sistemu i pronalaženju optimalnih lokacija za mjerne uređaje koji će pomenuta ostrva objединiti i time obezbijediti potpunu observabilnost sistema.

Prvi predloženi metod koji pored kriterijuma observabilnosti, uzima u obzir i pouzdanost estimacije stanja i robustnost mjerne konfiguracije prezentiran je u [55]. Pouzdanost estimacije je određena mogućnošću detekcije grešaka mjerenja, a u pomenutom radu opisana je brojem kritičnih mjerenja. S druge strane, robustnost je modelovana kao sposobnost mjerne konfiguracije da održi punu observabilnost sistema i u slučaju gubitka jednog RTU uređaja. Time se gube i sva mjerenja koja su koristila njegove komunikacione kapacitete. Slična postavka optimizacionog problema predstavljena je i u [56]. Predloženi metod je zasnovan na linearnom programiranju. Postupak započinje od inicijalne konfiguracije RTU uređaja, koji se sortiraju prema broju susjednih čvorova. Zatim se, u iterativnoj proceduri, RTU uređaji sukcesivno eliminišu sve dok su zadovoljeni kriterijumi optimizacije. U [55] i [56] nije uzeta u obzir cijena mjerne konfiguracije već samo tehničke performanse. S druge strane, u [57] finansijski troškovi mjerne konfiguracije su uzeti u obzir. Metod je formulisan kao detaljna pretraga prostora rješenja. U cilju redukcije proračunske zahtjevnosti metoda, pretraga je formulisana u dvije faze. Prva faza ima za zadatak da pronađe suboptimalno rješenje i time ograniči samo na dio prostora rješenja. Nakon toga nastupa druga faza pretrage koja detaljno ispituje ograničeni prostor rješenja. Ta faza sastoji se od eliminacije RTU uređaja sve dok se ne postigne rješenje zadovoljavajućeg kvaliteta. Problem ovakvog pristupa je velika zavisnost kvaliteta konačnog rješenja od prve faze pretrage, tj. definisanja bazne mjerne konfiguracije. Uticaj promjene uklopnog stanja mreže na robustnost mjerne konfiguracije analizira se u [58] i [59]. Oba metoda koriste cjelobrojno programiranje kako bi se riješio optimizacioni problem, s razlikom da se procjena pouzdanosti mjerne konfiguracije u [58], vrši pomoću odgovarajućih matrica incidencije, dok se u [59] to radi pomoću Jacobian matrice mjerenja.

S obzirom da pronalaženje optimalnih lokacija za mjerne uređaje (sa RTU uređajima) predstavlja složeni optimizaciono-kombinatorni problem, metaheuristički metodi za optimizaciju su našli široku primjenu u toj oblasti. Tako je u [60] predložen metod tabu pretrage za rješavanje osnovnog problema optimizacije mjerne konfiguracije, tj. obezbjeđivanje observabilnosti uz minimalan broj angažovanih mjernih uređaja. Ista formulacija optimizacionog problema je korišćena u [61] i [62], sa razlikom u angažovanim metaheurističkim metodama. Genetski algoritam je predložen u [61], a metod simuliranog kaljenja u [62]. U [63] genetski algoritam je spregnut sa metodom za testiranje observabilnosti zasnovanom na topološkom pristupu kako bi se relaksirali proračunski zahtjevi pri upotrebi metoda za analizu velikih sistema. Međutim, analizirani su samo tehnički zahtjevi (osnovna observabilnost, pouzdanost). Pristup zasnovan na genetskom algoritmu koji uzima u obzir sve značajne tehničke kriterijume, kao i postizanje istih angažovanjem što je moguće manje mjerenja, prezentiran je u [64]. Analizirani tehnički kriterijumi su: osnovna observabilnost mjerne konfiguracije, održavanje observabilnosti u uslovima promjenljive topologije mreže (ispad jedne grane) i obezbjeđivanje detekcije i identifikacije grešaka mjerenja (predstavljeno brojem kritičnih mjerenja i setova). Nije uključena mogućnost kvara na mjerenju ili RTU uređaju, ali usljed modularnosti predloženog metoda, njihovo naknadno uključivanje ne bi predstavljalo problem. Cijena mjerne konfiguracije jedan je od glavnih kriterijuma u [65], ali nije uzeta u obzir robustnost mjerne konfiguracije u slučaju promjene uklopnog stanja mreže sistema koji se analizira.

Razvojem ICT tehnologije, mjerni uređaji su konstantno unaprijeđivani, pa je njihova uloga postajala sve šira kada su razni aspekti upravljanja EES u pitanju. Naime, pored osnovne namjene, tj. monitoringa statičkog stanja, savremeni mjerni uređaji imaju mogućnosti praćenja brzih prelaznih procesa, čime postaju veoma značajni za aplikacije koje se tiču stabilnosti i zaštite EES. Poseban

iskorak u razvoju mjernih uređaja za potrebe upravljanja EES napravljen je razvojem komercijalnog fazorskog uređaja 1991. godine, a onda i razvojem standarda koji propisuje format, kvalitet i pouzdanost njegovih mjernih informacija. To je uslovalo postepeno napuštanje klasičnih mjernih konfiguracija kroz, prvo hibridne konfiguracije (sastavljene od klasičnih i fazorskih mjernih uređaja) sa tendencijom potpunog prelaza na fazorska mjerenja u cilju postavljanja osnove za buduće, smart grid aplikacije u prenosnim i distributivnim elektroenergetskim mrežama. S tim u vezi, otvorila se nova oblast za istraživanje, tj. oblast koja tretira postupke za pronalaženje optimalnih lokacija za fazorske mjerne uređaje, koji u sebi objedinjavaju funkcije mjerenja i komunikacionih kapaciteta potrebnih za slanje informacija ka centru upravljanja.

1.5.2. Optimizacija mjerne konfiguracije sastavljene od fazorskih mjerenja

Slično kao kod problema optimizacije mjerne konfiguracije sastavljene od klasičnih mjernih uređaja, i ovdje je osnovni zadatak pronalaženje optimalnih čvorova u sistemu (transformatorskih stanica) gdje je potrebno instalirati fazorska mjerenja. Koja su to optimalna mjesta i koliki broj mjernih uređaja je potreban, uslovljeno je željenom namjenom mjerne konfiguracije (monitoring statičkog stanja sistema, praćenje prelaznih procesa, alokacija kvarova u sistemu itd.). Trenutno je cijena mjerne konfiguracije posebno značajan kriterijum prilikom njenog planiranja jer su cijene fazorskih uređaja još uvijek velike. Međutim, usljed rasta potražnje, očekuje se njihov pad u skoroj budućnosti. Specifični zahtjevi za komunikacionom infrastrukturu na mjestu instalacije fazorskih uređaja, po cijeni mogu prevazići samu cijenu fazorskog uređaja. Time je, za pravi izbor lokacija, potrebno uzeti u obzir kako namjenu i željene performanse mjerne konfiguracije, tako i cijenu na koju utiču različiti faktori.

Složenost optimizacionog problema, kao i primjena mjerne konfiguracije usloveli su razvoj različitih metoda za njegovo rješavanje. Prvo istraživanje koje se bavi strateškom raspodjelom fazorskih mjerenja u sistemu objavljeno je 1993. u okviru [66]. Tamo je predložen metod dualne pretrage koji čine modifikovana bisektivna pretraga i metaheuristički metod simuliranog kaljenja. Prva faza je pripremna i predstavlja je bisektivna pretraga zasnovana na topologiji mreže i teoriji grafova. Ima za zadatak da formira inicijalnu stratešku raspodjelu fazorskih mjernih uređaja širom sistema. Pomenuta konfiguracija predstavlja ulazni podatak za drugu fazu pretrage, tj. metod simuliranog kaljenja. Ideja dvije faze pretrage je ubrzavanje postupka optimizacije u odnosu na slučaj kada se koristi samo metaheuristički metod. Mana ove metode je ta što prva faza pretrage može dovesti do istraživanja samo ograničenog prostora rješenja, tj. do konvergencije lokalnom optimumu. U [67] se predlaže kombinovanje više metaheurističkih metoda za rješavanje osnovnog optimizacionog problema (omogućavanje observabilnosti uz minimalan broj fazorskih mjerenja) u cilju redukovanja prostora rješenja koji se pretražuje. Metodi koji se koriste su modifikovano simulirano kaljenje i metod tabu pretrage.

Za unaprijeđivanje postojećih fazorskih mjernih konfiguracija dodavanjem novih fazorskih mjernih uređaja na strateškim lokacijama u [68] predložen je metod zasnovan na formulisanju stabla odluka. Cilj metoda je formiranje mjerne konfiguracije koja se koristi za praćenje sigurnosnih ograničenja napona u sistemskim čvorovima. U [69] optimizacija je motivisana uspješnim monitoringom i upravljanjem sistemima u interkonekciji u slučaju velikih poremećaja u nekom od sistema. Cilj optimizacije je pronalaženje strateških pozicija za fazorske uređaje tako da se maksimizuju performanse njihovog odziva na kvarove. Na željene performanse fazorskih mjerenja utiče rastojanje od mjesta kvara i vrijeme reagovanja. Sigurnost EES je osnovni kriterijum za pronalaženje optimalnih lokacija za fazorska mjerenja u [70], gdje su prikazana četiri različita

deterministička pristupa. Prva dva metoda tretiraju osnovni optimizacioni problem i imaju za cilj brzo pronalaženje rješenja. Metodi su zasnovani na rekurzivnom i direktnom sigurnosnom algoritmu, respektivno. Druga dva metoda testiraju $n-1$ sigurnosni kriterijum koji se tiče ispada mjernog uređaja ili grane, respektivno.

Formulisanje optimizacionog problema kao problema sa više ciljeva kao što su: minimizacija broja fazorskih mjerenja i maksimizacija redundanse prvi su put prezentirani u [71]. Genetski algoritam sa nedominiranim sortiranjem je predložen kao optimizacioni metod koji kao rezultat daje optimalni Pareto front rješenja za razliku od jednog rješenja, kako je to obično slučaj. Metod pokazuje dobre performanse kod optimizacionih problema sa više ciljeva koje karakteriše veliki prostor rješenja.

Optimizacioni pristup koji ima mogućnost analize hibridnih mjernih konfiguracija (kombinovano korišćenje klasičnih i fazorskih mjernih uređaja) predstavljen je u [72]. Metod je zasnovan na cjelobrojnom programiranju. U [73] je predstavljen koncept „nivoa neobservabilnosti“ čvora, koji se koristi kao parametar kvaliteta mjerne konfiguracije sastavljene od fazorskih mjerenja. Nivo neobservabilnosti čvora je definisan blizinom observabilnih čvorova posmatranom čvoru. Pretraga za optimalnom konfiguracijom organizovana je u dvije faze. Prva faza je zasnovana na teoriji grafova i ima za zadatak da pozicionira fazorska mjerenja skoro uniformno širom sistema. To postiže kroz postepeno formiranje stabla grafa od grana koje su observabilne usljed postavljanja fazorskog mjerenja, vodeći pritom računa o rastojanju između observabilnih i neobservabilnih čvorova (nivo neobservabilnosti čvora). Pronađena mjerna konfiguracija predstavlja suboptimalno rješenje koje se dalje optimizuje u drugoj fazi pretrage. Druga faza pretrage obavlja se pomoću metoda simuliranog kaljenja.

U [74] je detekcija grešaka u mjernim uređajima uključena kao kriterijum u postupak optimizacije mjerne konfiguracije. To se postiže analizom tekuće mjerne konfiguracije i pronalaženjem kritičnih mjernih uređaja. Zatim se, upotrebom cjelobrojnog programiranja, pronalaze strateške lokacije za fazorske mjerne uređaje, koje obezbjeđuju eliminaciju kritičnih mjerenja u mjernoj konfiguraciji. Time su ranija kritična mjerenja pretvorena u redundantna. Optimizacioni metod zasnovan na osjetljivosti observabilnosti sistema na lociranje fazorskih mjerenja u pojedinim čvorovima predstavljen je u [75]. I ovdje je pretraga za optimalnim rješenjem organizovana u dvije faze. Prva ima za zadatak da napravi početnu pretpostavku optimalnog rješenja na osnovu topoloških karakteristika čvorova. Čvorovi sa većim brojem incidentnih grana i većim uticajem na observabilnost u sistemu (većom osjetljivošću) imaju prednost kod inicijalne alokacije fazorskih mjerenja. Glavnu potragu za optimalnim rješenjem obavlja metod simuliranog kaljenja.

Cjelobrojno programiranje je predloženo za rješavanje optimizacionog problema definisanog u [76]. Cilj optimizacije je eliminisanje kritičnih mjerenja kroz strateško pozicioniranje fazorskih, ali i klasičnih mjerenja. Kroz eliminaciju kritičnih mjerenja postiže se i željeni nivo redundanse (observabilnosti čvorova i nakon ispada jednog mjernog uređaja ili grane). Metaheuristički metod tabu pretrage predložen je u [77] za potrebe pronalaženja mjerne konfiguracije koja osigurava potpunu observabilnost uz željeni nivo redundanse. Metod karakteriše niže angažovanje memorijskih i proračunskih kapaciteta. U cilju postizanja dobrih performansi pravi se lista prioriteta, bazirana na heurističkom pravilu. U [78] je predložena strategija za alokaciju fazorskih mjerenja u cilju postizanja observabilnosti lokacije kvara u prenosnoj mreži, vodeći računa o cijeni rezultujuće mjerne konfiguracije. Potrebni nivo observabilnosti se postiže pomoću lociranja fazorskih mjerenja tako da je svaki čvor observabilan od strane fazorskih uređaja u dva čvora.

Pogodno formulisanje funkcije cilja kako bi se proširio domen prihvatljivih rješenja u cilju lakše pretrage predloženo je u [79]. Optimalno rješenje se pronalazi maksimizacijom funkcije cilja upotrebom adaptivnog algoritma zasnovanog na kloniranju rješenja. Pomenuti algoritam ima mogućnost da ubrza proces optimizacije i izbjegne lokalne optimume. Cilj pristupa koji se predlaže u [15] je pozicioniranje fazorskog mjerenja u svaki podsistem distribuiranog estimatora stanja kako bi se smanjile varijanse grešaka estimacije, a u isto vrijeme i povećala lokalna redundansa mjerenja. Pristup baziran na minimalnom koeficijentu uređenosti normalizovane matrice mjerenja (proizvod norme matrice sa normom inverzne matrice) predložen je u [80]. Cilj optimizacije je osiguravanje potpune observabilnosti sistema, čak i u slučajevima ispada jednog mjernog uređaja ili grane. Pronalaženje strateških lokacija za fazorska mjerenja vrši heuristički algoritam koji ima za cilj minimizaciju broja angažovanih mjerenja. U [81] se predlaže pristup koji koristi cjelobrojno kvadratno programiranje za rješavanje problema optimizacije mjerne konfiguracije (osnovna observabilnost, kao i observabilnost u situaciji kada se desi kvar jednog mjerenja ili ispadne jedna grana). Postupak ima za cilj minimizaciju broja angažovanih fazorskih mjerenja, uz maksimizaciju nivoa redundanse.

Binarni algoritam koji se zasniva na iscrpnoj pretrazi prostora rješenja predložen je u [82]. Pristup uključuje optimizaciju fazorske mjerne konfiguracije, sa ili bez klasičnih mjerenja, uz vođenje računa o efektu koji ima ispad jedne grane na osiguravanje observabilnosti. Pretragom se upravlja pomoću formulisanih kriterijuma za upoređivanje rješenja, a u slučaju više rješenja predložena je i strategija za odabir najboljeg. Višefazni metod baziran na linearnom cjelobrojnem programiranju predložen je u [83] za potrebe rješavanja optimizacionog problema. Kod ovog metoda se usvaja vrijeme za koje se želi postići optimum. Može se, ali i ne mora, uzeti u obzir efekat čvorova sa nultim injektiranjem na observabilnost sistema. Oni su modelovani kao linearna ograničenja. Pouzdanost mjerne konfiguracije testira se kroz provjeru observabilnosti u slučaju ispada jednog mjernog uređaja. Svako konfiguraciji, koja je kandidat za rješenje, pridružuju se dva indeksa, koji se tiču observabilnosti čvorova i redundantnosti mjerenja na nivou sistema, respektivno. Pomenuti indeksi se koriste za rangiranje rješenja u slučaju višestrukih rješenja. Generalizovani metod zasnovan na linearnom cjelobrojnem programiranju koristi se za rješavanje optimizacionog problema u [84]. Analizira se formiranje optimalne mjerne konfiguracije za razne usvojene nivoe redundanse, potpune i nepotpune observabilnosti, sa ili bez uračunavanja efekta čvorova sa nultim injektiranjem. Slično prethodnom, samo uz uračunavanje klasičnih mjernih uređaja (mjerenje toka snage i injektiranja snage), isti autor predlaže postupak predstavljen u [85].

Pristup zasnovan na iscrpnoj pretrazi prostora rješenja predložen je za pronalaženje optimalne mjerne konfiguracije u [86]. U cilju sužavanja prostora rješenja i time povećanja performansi predloženog metoda, primijenjuju se virtuelno eliminisanje rješenja i redukcija matrice prije nego se pristupi glavnoj pretrazi. Zatim se vrši iscrpna pretraga, pri čemu se kao lokacije za fazorska mjerenja biraju oni čvorovi koji čine observabilnim najveći broj, do tog trenutka, neobservabilnih čvorova. U [87] je predstavljen metod zasnovan na cjelobrojnem kvadratnom programiranju za potrebe pronalaženja optimalne konfiguracije fazorskih mjerenja uzimajući u obzir observabilnost, robusnost (kroz maksimizaciju redundanse observabilnosti u svim čvorovima sistema) i cijenu mjerne konfiguracije. Takođe, u optimizaciju su uključena i klasična mjerenja. Klasična mjerenja su uključena u optimizacioni metod predložen u [88]. On koristi binarno programiranje za rješavanje osnovnog optimizacionog problema uz uključivanje mogućnosti višestrukog ispada fazorskih mjerenja. Matrica povezanosti čvorova formira se samo na početku prema originalnoj topologiji mreže.

Varijanta genetskog algoritma sa dodatnim, imunizirajućim operatorom predlaže se u kao metod za rješavanje osnovnog optimizacionog problema u [89]. Na osnovu topoloških karakteristika analizirane mreže i mogućnosti da se ostvari njena observabilnost ekstrahovane su tri „vakcine“. U radu je pokazano da vakcine ubrzavaju konvergenciju postupka. Posebna pažnja posvećena je efektu rekombinacije između jedinki koje potiču od istih roditelj-jedinki. Takođe, predloženo je i posebno pravilo za analizu observabilnosti topološkim putem. Modifikovani pristup koji koristi linearno cjelobrojno programiranje predstavljen je u [90]. Strateške lokacije za fazorska mjerenja biraju se na osnovu rangiranja čvorova prema uticaju na naponsku stabilnost. Kada se analiziraju spadaju elementa mjerne konfiguracije i mreže, ograničenja optimizacije modifikuju se koristeći topološki pristup. U osnovi isti metod (linearno cjelobrojno programiranje) predlaže se i u [91], ali uzima u obzir i ograničenja u broju kanala kod fazorskih mjerenja.

Ispad grane ili fazorskog mjerenja, sa ili bez računanja sa efektom čvorova sa nultim injehtiranjem, su kriterijumi koji mogu biti uključeni zajedno ili odvojeno u optimizacioni pristup predstavljen u [92], što ga čini posebno fleksibilnim. Komunikaciona ograničenja su takođe uzeta u obzir kao ograničenja mjernih uređaja (broj aktivnih kanala). U [93] je predložena metoda „jedno fazorsko mjerenje – jedna grana“ za formiranje optimalne mjerne konfiguracije. Metod je zasnovan na cjelobrojnem programiranju, a uzima u obzir observabilnost osnovne konfiguracije, robusnost (ispad mjernog uređaja ili grane) i mogućnost detekcije grešaka mjerenja. Pristup koji koristi diferencijalni metod sa nedominiranim sortiranjem predlaže se u [94]. Rješava se optimizacioni problem sa više ciljeva, gdje je kao osnovni cilj uzeta observabilnost u osnovnoj mornoj konfiguraciji i u slučaju ispada jednog mjernog uređaja, a drugi cilj je cijena mjerne konfiguracije.

U [95] je predložen metod u dvije faze u cilju formiranja optimalne mjerne konfiguracije. U prvoj fazi se formira inicijalna mjerna konfiguracija koja obezbijeduje punu observabilnost sistema. Ona se formira na osnovu posebnog predloženog algoritma za rangiranje čvorova (zasnovano na topološkom pristupu). Zatim se inicijalna mjerna konfiguracija unaprijeđuje kroz postupak iterativne lokalne pretrage. Prednost ovog metoda je jednostavna primjena. Pretraga u takođe dvije faze, predložena je i u [96]. Prvo se koristeći cjelobrojno programiranje formira topološki observabilna mjerna konfiguracija. U drugoj fazi provjerava se rang odgovarajuće Jacobian matrice kroz metod sekvencijalne eliminacije, a onda se, u slučaju potrebe, prilagođava mjerna konfiguracija.

Broj angažovanih kanala kod fazorskog mjerenja je kao ograničenje uključeno u postupak optimizacije prezentiran u [97]. Kao optimizacioni postupak angažovan je metod zasnovan na linearnom cjelobrojnem programiranju. Cjelobrojno programiranje predloženo je kao optimizacioni metod i u [98], s razlikom da se pored fazorskih mjerenja, tretiraju i klasični mjerni uređaji. U [99] se predlaže modifikovani binarni metod kretanja virtuelnih čestica (Binary Particle Swarm Optimization - BPSO) kao optimizacioni metod. Kriterijum optimizacije je observabilnost u osnovnoj konfiguraciji mreže kao i u slučaju ispada jedne grane ili mjernog uređaja. Predlaže se i novo pravilo koje se tiče čvorova sa nultim injehtiranjem prilikom analize observabilnosti.

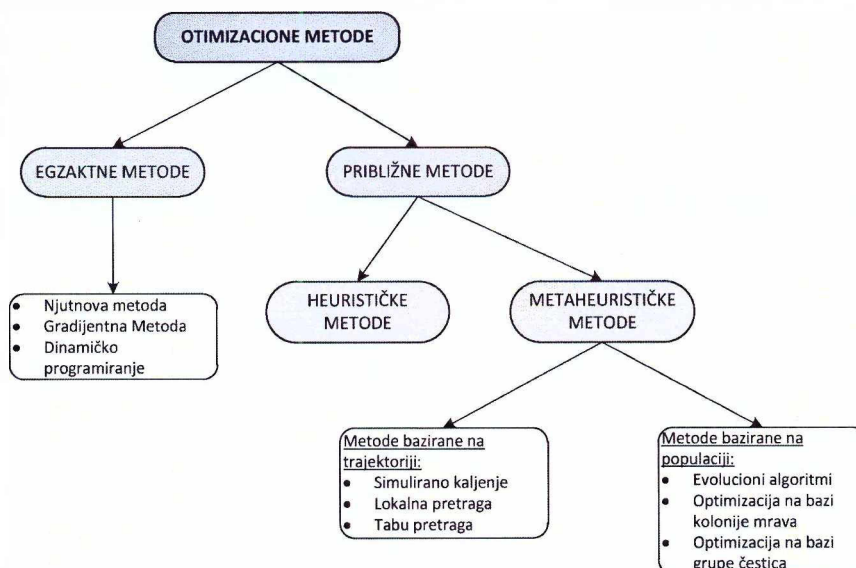
Analiza uticaja ekspanzije proizvodnih i prenosnih kapaciteta na observabilnost sistema izvršena je u [100]. Predložen je višefazni algoritam za strateško raspoređivanje fazorskih uređaja koji uzima u obzir stohastičku prirodu uređaja i vjerovatnoću ispada. Izvršena je efikasna linearizacija inače nelinearnog indeksa vjerovatnoće observabilnosti. U [101] se predlaže algoritam iscrpne pretrage koji optimalno raspoređuje fazorska mjerenja, pri čemu je osnovni kriterijum zaštita od „data injection“ napada. Algoritam zasnovan na binarnom metodu optimizacije kretanja čestica predstavljen je u [102]. Cilj je minimizacija broja angažovanih fazorskih mjerenja uz postizanje pune observabilnosti i zadovoljavajuće redundanse uz mogućnost uključivanja i klasičnih mjernih uređaja.

Uzimajući u obzir sprovedena istraživanja u oblasti optimizacije mjerne konfiguracije mogu se prepoznati dva osnovna cilja istraživanja: unaprijeđivanje kvaliteta optimalne mjerne konfiguracije i pronalaženje efikasnog metoda za njeno planiranje. Kvalitet optimalne mjerne konfiguracije definisan je kriterijumima optimizacije. Najčešće analiziran kriterijum je osiguravanje observabilnosti sistema angažovanjem minimalnog broja mjerenja. Ovako formulisan optimizacioni problem često se definiše kao osnovni optimizacioni problem kada je planiranje mjerne konfiguracije u pitanju. Pored osnovnog, kao kriterijum optimizacije uzima se i robusnost mjerne konfiguracije. Ona se tiče osiguravanja observabilnosti sistema u slučajevima ispada jednog mjernog uređaja ili grane mreže. Ovaj kriterijum se donekle preklapa sa kriterijumom koji podrazumijeva minimizaciju kritičnih mjerenja i setova. Oni su direktno povezani sa sposobnošću mjerne konfiguracije da obezbijedi estimatoru stanja dovoljan nivo informacija kako bi se detektovale i identifikovale greške mjerenja. Često se navedeni kriterijumi poistovijećuju sa pouzdanošću mjerne konfiguracije. Kako su komunikacioni kapaciteti vrlo značajno sredstvo za ostvarivanje pouzdanog monitoringa, a često je moguća njihova ograničenost, ili čak nedostupnost u nekim od transformatorskih stanica, potrebno ih je uključiti u kriterijume optimizacije. Naime, komunikaciona ograničenja se u optimizacioni problem uključuju kroz definisanje zabranjenih lokacija ili dozvoljenog kapaciteta za mjerne uređaje. Dodatni kriterijumi povećavaju složenost optimizacionog problema, što u prvi plan postavlja efikasnost primijenjenog optimizacionog metoda. Različiti metodi se koriste za optimizaciju mjerne konfiguracije, počev od klasičnih metoda iscrpne pretrage prostora rješenja, do metaheurističkih metoda sa jednim ili više optimizacionih ciljeva. Odabir pravog metoda zavisi od kriterijuma optimizacije, topologije i veličine posmatranog sistema, tipa mjernih uređaja, ali i namjene mjerne konfiguracije.

2. OPTIMIZACIONI METODI ZA PLANIRANJE MJERNIH KONFIGURACIJA

Optimalno planiranje mjerne konfiguracije (OPMK) za postizanje pouzdane statičke estimacije stanja je složeni kombinatorni problem. Njegova složenost eksponencijalno zavisi od veličine sistema (broja čvorova i grana odgovarajuće mreže). Takođe, problem postaje utoliko složeniji koliko ima dodatnih uslova koje rješenje mora zadovoljiti. Sve to uslovljava da se problem planiranja mjernih konfiguracija označava kao problem velikog stepena složenosti.

U literaturi postoji niz optimizacionih metoda koji se koriste za rješavanje OPMK problema (Slika 2.1). Mogu se razlikovati dvije osnovne grupe: egzaktna i približna. Osnovna prednost egzaktnih metoda je, kako im i ime govori, je ta da kao rezultat uvijek daju globalni optimum. Međutim, mana koja značajno ograničava njihovu upotrebu je da uspješno mogu biti primijenjeni samo na male sisteme. U slučaju velikih sistema, OPMK problem postaje značajno složeniji, pa vrijeme izvršenja egzaktnih metoda postaje drastično veće. Takođe, neki dodatni uslovi, koje optimalno rješenje mora ispuniti, mogu u potpunosti osujetiti egzaktno rješavanje. S obzirom da dimenzionalnost praktičnih sistema predstavlja ograničenje za primjenu egzaktnih metoda, mnogo širu primjenu imaju približne metode koje za prihvatljivo vrijeme daju rješenje. Među njima razlikuju se dvije grupe metoda: heurističke i metaheurističke metode. Kod heurističkih metoda akcenat je na brzom rješavanju OPMK problema i oni su značajno brži od egzaktnih metoda, pa se mogu koristiti i za najsloženije sisteme. Međutim, odlična brzina rješavanja ostvarena je na račun kvaliteta pronađenog rješenja. Naime, heurističke metode najčešće ne daju kao rezultat globalni optimum. S obzirom da od kvaliteta rješenja zavisi pouzdanost statičke estimacije stanja, a time i uspješnost svih upravljačkih programa, očigledan je značaj metoda koje će ponuditi kvalitetno rješenje uz prihvatljivo vrijeme pretrage. Takve karakteristike imaju metaheurističke metode koje, pomoću njima karakterističnih procedura, usmjeravaju pretragu ka kvalitetnijim rješenjima.



Slika 2.1 Podjela optimizacionih tehnika

U zavisnosti od načina kako se vrši pretraga prostora rješenja, metaheurističke metode dijele se na metode zasnovane na populaciji i one zasnovane na trajektoriji. Obije grupe metoda primjenjuju se za rješavanje OPMK problema. Od metoda zasnovanih na trajektoriji najviše se koriste simulirano kaljenje, tabu pretraga i razne varijante lokalne pretrage, a od populacionih

metaheurističkih metoda koriste se razne varijante evolucionih algoritama (diferencijalna evolucija, standardni genetski algoritmi, imunizirajući GA, celularni GA), optimizacija po uzoru na koloniju mrava ili grupu čestica itd.

Priroda optimizacione metode koja će se koristiti zavisi i od načina na koji je OPMK problem definisan. On može biti definisan kao optimizacioni problem sa jednim ili više ciljeva. Prethodno navedene metode odgovaraju formulaciji OPMK problema kao problema sa jednim ciljem. Međutim, u upotrebi su i metode za rješavanje OPMK problema formulisanog da ima više ciljeva. U te svrhe korišćena je varijanta GA koja se zove genetski algoritam sa nedominantnim sortiranjem. On je razvijen u dvije varijante označene sa I i II.

U okviru ovog poglavlja, posebna pažnja biće posvećena metaheurističkim metodama koje su u literaturi korišćene za rješavanje OPMK problema.

2.1. Metod simuliranog kaljenja

Simulirano kaljenje ili *Simulated annealing* (SA) je kao metaheuristički metod razvijen prema analogiji sa fizičkim procesom kaljenja čvrstih tijela kod koga se kristalna rešetka zagrijava a onda prepušta sporom hlađenju sve dok ne postigne optimalno stanje konfiguracije. Tada kristalna rešetka zauzima minimalno energetska stanje i oslobođena je defekata. Ukoliko je postupak hlađenja dovoljno spor, konačni rezultat kaljenja je rešetka unaprijeđenog strukturnog integriteta. Metaheuristički metod simulirano kaljenje uspostavlja vezu između fizičkog procesa kaljenja i postupka pretraživanja prostora rješenja u cilju pronalaženja globalnog minimuma za potrebe rješavanja nekog optimizacionog problema. Dakle, koristeći analogiju, formira se iterativni optimizacioni algoritam sa funkcijom cilja koja upravlja pretragom prostora rješenja. Nakon svake iteracije, funkcija cilja generiše dva rješenja (tekuća iteracija i međurješenje) čiji se kvalitet upoređuje. Bolje rješenje se uvijek zadržava dok se samo dio rješenja lošijeg kvaliteta zadržavaju za potrebe izbjegavanja lokalnih optimuma prilikom rješavanja optimizacionog problema. Vjerovatnoća prihvatanja lošijih rješenja zavisi od parametra koji odgovara temperaturi, i on se najčešće mijenja u zavisnosti od iteracije algoritma. Ključna karakteristika SA je mogućnost izbjegavanja lokalnih optimuma usljed djelimičnog prihvatanja i lošijih rješenja. Nivo prihvatanja lošijih rješenja opada sa smanjivanjem temperature kada algoritam konvergira optimalnom rješenju.

2.1.1. Algoritam SA

Postoji više načina za primjenu SA metoda u cilju pronalaženja optimalne mjerne konfiguracije, ali svaka od varijanti podrazumijeva definisanje funkcije cilja. Funkcijom cilja definisane su željene performanse optimalne mjerne konfiguracije. Definisanjem kriterijuma optimizacije utiče se na strukturu funkcije cilja. Osnovni kriterijum optimizacije je ostvarivanje observabilnosti sistema, tj. omogućavanje statičke estimacije stanja. Pored osnovnog kriterijuma mogu se uzeti u obzir i razni drugi kriterijumi kojima se povećava pouzdanost mjerne konfiguracije, a time i statičke estimacije stanja. Sve tehničke kriterijume potrebno je postići vodeći računa o cijeni mjerne konfiguracije. Nakon formiranja funkcije cilja, moguće je riješiti optimizacioni problem u skladu sa algoritmom SA (Slika 2.2). Algoritam je struktuiran tako da vrši minimizaciju funkcije cilja.

Prije nego se počne sa izvršavanjem algoritma, potrebno je definisati oblik rješenja. S obzirom da se mjerni uređaji smještaju u trafostanicama, a one predstavljaju čvorove u mreži, najjednostavnije

je mjernu konfiguraciju predstaviti vektor vrstom x dužine jednake broju čvorova analiziranog sistema. Ako se za primjer uzmu fazorska mjerenja, onda se uzima da je element vektora x koji odgovara čvoru i jednak 1 ukoliko je mjerenje planirano u tom čvoru, u suprotnom pomenuti element je 0 (Slika 2.3).

Na početku izvršavanja algoritma (Slika 2.2), slučajnim izborom formira se početna mjerna konfiguracija. Zatim se usvaja početna temperatura, što predstavlja nultu iteraciju. U okviru prve iteracije slučajnim postupkom formira se novo kandidat-rješenje, nakon čega se upoređuje njegov kvalitet sa slučajno odabranim početnim rješenjem. Kvalitet rješenja definisan je vrijednošću funkcije cilja, tj. fitnes funkcije. Ukoliko je kandidat rješenje kvalitetnije od rješenja iz prethodne iteracije, onda se kandidat rješenje čuva za sljedeću iteraciju. U suprotnom, kandidat rješenje se čuva sa vjerovatnoćom jednakom:

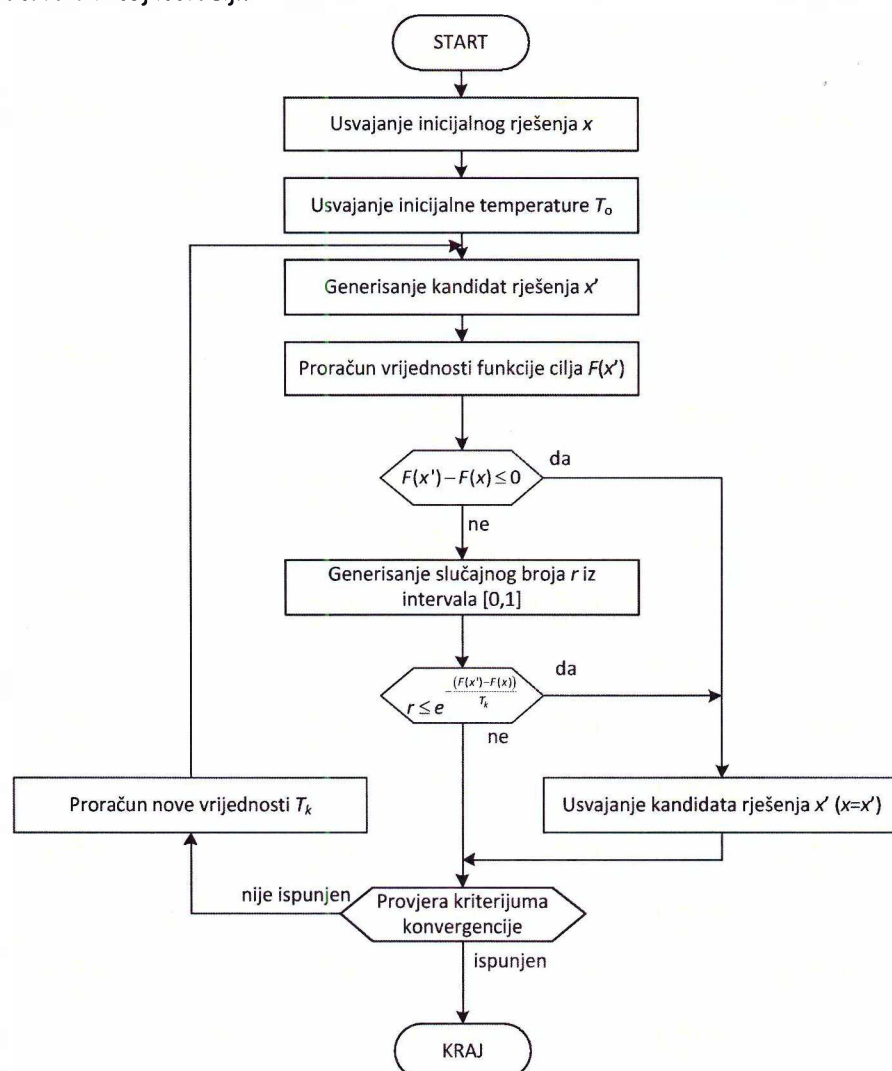
$$p = e^{-\frac{F(x') - F(x)}{T_k}}, \quad (2.1)$$

gdje su:

$F(x')$ – vrijednost fitnes funkcije kandidat rješenja,

$F(x)$ – vrijednost fitnes funkcije rješenja iz prethodne iteracije i

T_k – temperatura u k -toj iteraciji.



Slika 2.2 Algoritam metoda simuliranog kaljenja

Dakle, što je kvalitet kandidata za rješenje lošiji od kvaliteta rješenja iz prethodne iteracije, to je manja vjerovatnoća da će kandidat za rješenje biti usvojen za sljedeću iteraciju. Takođe, potrebno je naglasiti da usljed uticaja parametra koji odgovara temperaturi, kako odmiču iteracije (opada temperatura) sve je manje vjerovatno da će rješenje slabijeg kvaliteta biti sačuvano za sljedeću iteraciju. Na ovaj način temperatura utiče na kontrolu entropije prostora rješenja. Ovaj mehanizam zadržavanja lošijih rješenja utiče na uspješnije zaobilazanje lokalnih optimuma. Nakon usvajanja rješenja, proračunava se nova vrijednost temperature, a onda i provjerava uslov za finalizaciju iterativnog postupka. U zavisnosti od načina konvergencije rješenju, moguća su dva pristupa koji definišu posljednju iteraciju:

- postizanje minimalne usvojene temperature,
- postizanje rješenja zadovoljavajućih karakteristika.

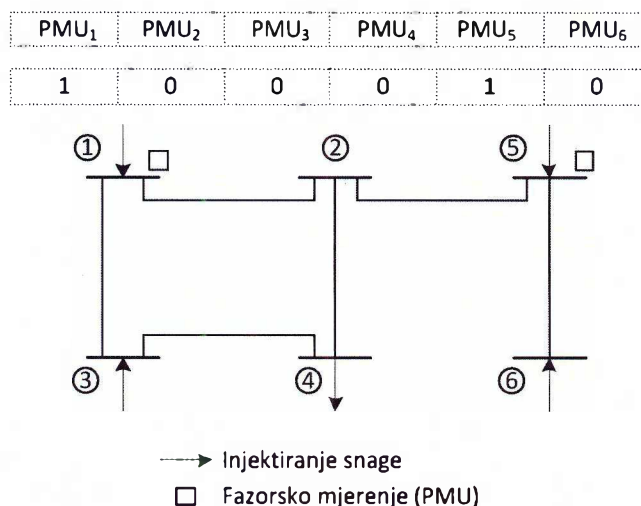
Oba uslova se koriste prema potrebama optimizacionog postupka. U slučaju kada nije moguće kvantifikovati optimalno rješenje prije početka rješavanja optimizacionog problema, pribjegava se postepenom snižavanju inicijalizovane temperature na kraju svake iteracije. To snižavanje može biti linearno za neki proizvoljno usvojeni iznos (pri čemu je potrebno definisati i krajnju temperaturu), ili u skladu sa nekom usvojenom funkcijom kao na primjer:

$$T_k = \ln\left(\frac{T_o}{k} + 1\right), \quad (2.2)$$

gdje su:

T_o – inicijalno usvojena temperatura i

k – broj iteracije.



Slika 2.3 Primjer kodiranja mjerne konfiguracije

Ukoliko nije zadovoljen uslov finalne iteracije, prelazi se na sljedeću iteraciju i formiranje novog kandidata rješenja nakon čega se ponavlja postupak sve dok se ne zadovolji definisani uslov konvergencije.

2.1.2. Primjena SA za rješavanje OPMK problema

Metod simuliranog kaljenja u različitim varijantama koristio se za rješavanje OPMK problema. Osnovne razlike među njima su u načinu na koji se formira kandidat rješenje, strukturi funkcije cilja i načinu testiranja observabilnosti.

Formiranje kandidat-riješenja može biti sprovedeno i nakon prethodno sprovedene lokalne pretrage više rješenja. U tom slučaju se, serijom manjih izmjena tekućeg rješenja, formira grupa različitih rješenja od kojih se odabira najbolje koje ide u dalju proceduru. Na ovaj način se povećava efikasnost lokalne pretrage kako bi se potraga za globalnim optimumom usmjerila na pravi put. Jedan takav pristup prezentiran je u [66], gdje se SA koristi za odlučivanje kako na optimalan način formirati observabilno stablo grafa koristeći minimalan broj fazorskih mjerenja. Tu je SA metod korišćen u sprezi sa topološki baziranim postupkom sužavanja prostora rješenja, tako da je rezultujući postupak formulisan u obliku dualne pretrage. Prvi dio pretrage je preliminarni i tiče se pronalaženja početne observabilne konfiguracije, a drugi dio je baziran na SA metodu i ima za cilj minimizaciju pretpostavljene mjerne konfiguracije, uz zadržavanje observabilnosti sistema. U tom dijelu postupak, slučajnim putem, vrši promjene pretpostavljene mjerne konfiguracije, smanjujući broj angažovanih mjerenja sve dok je to moguće (dok je zadovoljen uslov observabilnosti). Ovakav kombinovani pristup ima za cilj relaksaciju procesa pretrage i sužavanje prostora rješenja kroz približavanje zoni kvalitetnih rješenja u prvoj fazi pretrage, a onda kroz upotrebu SA metoda i pronalaženje optimalnog rješenja. Postupak koji je u potpunosti zasnovan na SA metodu prezentiran je u [62], s razlikom da se kandidat-rješenja generišu slučajnim putem numeričkim postupkom. Njime su tretirana samo observabilna rješenja, pri čemu se observabilnost provjerava numeričkim putem, faktorizacijom matrice pojačanja G . To je često značajno ograničenje u odnosu na topološki pristup provjere observabilnosti, posebno za velike sisteme. Topološki pristup je predložen u okviru tehnike prezentirane u [73], gdje je SA metod korišćen za rješavanje problema kreiranja optimalne mjerne konfiguracije, uz vođenje računa o nivou observabilnosti i komunikacionim ograničenjima.

Zajedničko za sve pomenute varijante SA je da imaju istu osnovnu strukturu funkcije cilja. Ona ima za zadatak da omogući evaluaciju kvaliteta rješenja, čime usmjerava pretragu ka globalnom optimumu. U zavisnosti od kriterijuma optimizacije funkcija cilja može imati različitu strukturu. Funkcija ima najjednostavniju strukturu kada se rješava osnovni optimizacioni problem, tj. pronalaženje optimalne mjerne konfiguracije koja obezbijedi observabilnost koristeći minimalni broj mjerenja. U tom slučaju, opšti oblik funkcije cilja može se predstaviti kao:

$$F(x) = w_1 C_1 + w_2 C_2, \quad (2.3)$$

gdje su:

w_1, w_2 – težinski koeficijenti koji odgovaraju observabilnosti i cijeni konfiguracije, respektivno,
 C_1 – parametar koji uzima vrijednost 1 za neobservabilnu mjernu konfiguraciju, a 0 za observabilnu i
 C_2 – cijena mjerne konfiguracije (proporcionalna broju mjernih uređaja).

S obzirom da se radi o minimizaciji funkcije cilja, veći težinski koeficijenti pridružuju se značajnijim zahtjevima koje rješenje mora ispuniti. Tako, za osnovni slučaj, važi da je observabilnost sistema prioritet, pa slijedi da je $w_1 > w_2$. Kakav će odnos parametara biti zavisi od veličine sistema. Na sličan način mogu se uključiti i dodatni kriterijumi sa njima odgovarajućim težinskim koeficijentima.

Funkcija cilja ima najjednostavniji oblik u [66], gdje tretira samo kriterijum observabilnosti kroz broj neobservabilnih čvorova. Minimizacija broja angažovanih mjernih uređaja postiže se kroz iterativni postupak eliminacije, vodeći računa o očuvanju observabilnosti. Predložena funkcija cilja u [62] ima dva člana, prvi se tiče broja angažovanih mjerenja, a drugi član se tiče njihove raspodjele širom sistema. Pritom, odabirom odgovarajućih težinskih koeficijenata, promoviše se ravnomjerna

geografska raspodjela mjernih uređaja širom sistema. Tako bi se maksimizovao učinak uređaja, a time i smanjio njihov ukupni broj. S obzirom da se evaluiraju samo observabilna rješenja, nije potreban član koji se tiče observabilnosti u funkciji cilja. U skladu sa strukturom funkcije cilja predstavljenom u (2.3) je predložena funkcija iz [73], uz dodatni član koji se tiče komunikacionih ograničenja koji se može predstaviti sa w_3C_3 . S obzirom da je u [73] analizirana nedostupnost komunikacionih kapaciteta u nekim od postrojenja (čvorova sistema), to C_3 predstavlja broj nedostupnih čvorova u kojima su predviđeni mjerni uređaji. Težinski koeficijent w_3 mora biti najveći kako bi se eliminisala rješenja koja predviđaju mjerne uređaje u nedostupnim čvorovima.

Kod svih predloženih varijanti primjene metoda SA potreba za usklađivanjem težinskih koeficijenata sa dimenzijom problema je osnovni problem ovako struktuiranih funkcija cilja.

2.2. Metod tabu pretrage

Uzimajući u obzir kvalitetnu primjenu kod problema kombinatorne prirode, metoda tabu pretrage je našla primjenu i kod kreiranja optimalne mjerne konfiguracije [77]. Metod je zasnovan na pretrazi prostora rješenja u okolini posmatranog rješenja, tj. lokalnoj pretrazi uz dodatni mehanizam korišćenja privremenog pamćenja pretraženih dijelova prostora rješenja kako bi se izbjegli lokalni optimumi.

2.2.1. Algoritam metoda tabu pretrage

Karakteristični djelovi strukture metoda tabu pretrage su:

- struktura prostora rješenja koji se pretražuje,
- tabu lista,
- kriterijum aspiracije.

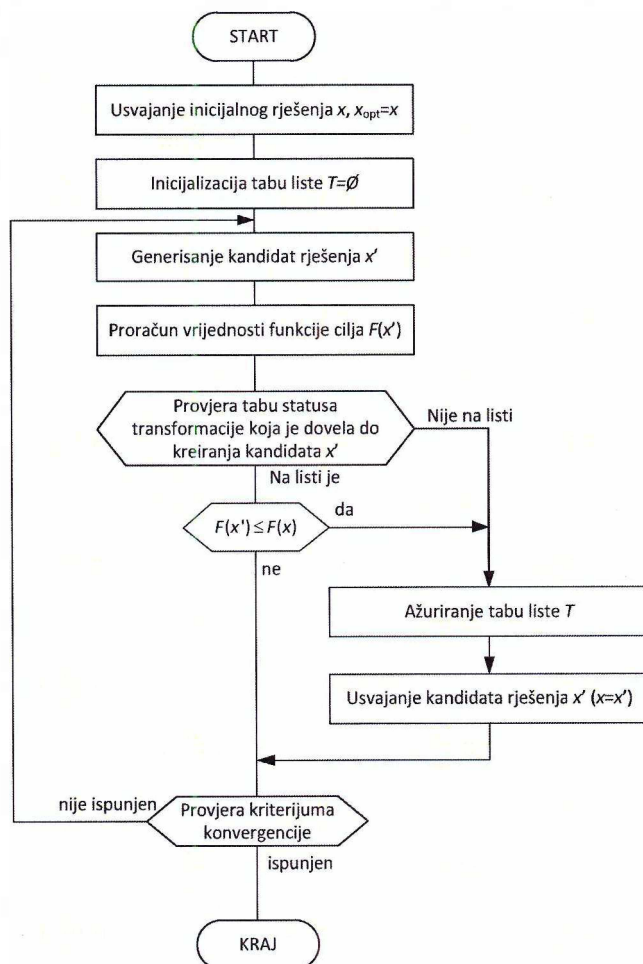
Kada je u pitanju struktura prostora rješenja, metod tabu pretrage predstavlja nastavak na klasične metode lokalne pretrage, uz postojanje kratkotrajne memorije (tabu liste). Ukupni prostor rješenja predstavljen je sa svim mogućim rješenjima za posmatrani optimizacioni problem. Uzimanjem u obzir kriterijuma optimizacije, taj prostor može biti sužen tako da tabu pretragom budu obuhvaćena samo rješenja koja zadovoljavaju pomenute kriterijume. Pretraživanje prostora rješenja vrši se postupno i to na nivou prostora susjednih rješenja. To se postiže definisanjem lokalnih transformacija kojima se podvrgava posmatrano rješenje kako bi se generisao prostor susjednih rješenja. Lokalne transformacije usvajaju se u skladu sa optimizacionim problemom. Na primjer, za OPMK problem lokalna transformacija može biti promjena mjesta jednom mjernom uređaju, ili eliminacija (dodavanje) jednog mjernog uređaja. Značajno je uzeti u obzir da dobro definisanje prostora susjednih rješenja omogućava bolju pretragu ukupnog prostora rješenja, a time i vjerovatnije pronalaženje globalnog optimuma.

Dio strukture metoda tabu pretrage, po kome se on razlikuje od klasičnih metoda lokalne pretrage je tabu lista. Ona ima za zadatak da spriječi nepotrebno ispitivanje rješenja dobijenih pomoću transformacija koje su ranije potvrđene kao neefikasne. Njihova uloga posebno je korisna prilikom izbjegavanja lokalnih optimuma. Primjer tabu transformacije za OPMK problem može biti zabrana eliminacije mjerenja sa lokacije koja mu je dodijeljena u prethodnoj iteraciji, a čime se ostvarilo poboljšanje kvaliteta rješenja. Neka transformacija može biti tabu samo nekoliko iteracija. Tabu liste predstavljaju kratkotrajnu memoriju i obično nisu velikih dimenzija. U zavisnosti od performansi, usvaja se određena dužina tabu liste koja se kroz iteracije osvježava (eliminišu se

zastarjele, a dodaju nove zabranjene transformacije). Nije praktično pamtiiti cjelokupna rješenja na tabu listama jer je to veoma zahtjevno memorijski. Stoga, najčešće se kao tabu proglase transformacije koje bi dovele do anuliranja dejstva sprovedenih transformacija u nekoliko prethodnih iteracija.

Efekat tabu liste može dovesti i do slabljenja performansi ukoliko su usvojene tabu transformacije previše stroge. Tada može doći do eliminacije transformacija koje mogu dovesti do kreiranja kvalitetnijih rješenja čak i kad nema opasnosti od lokalnih optimuma. Na taj način dolazi do stagnacije u procesu pretrage. U cilju eliminacije ovakvih situacija, potrebno je uvesti dodatnu proceduru koja će omogućiti preskakanje ograničenja tabu liste kada je to potrebno. Ta procedura zove se kriterijum aspiracije. Najjednostavniji i najčešći način primjene ovog kriterijuma je kroz dozvoljavanje transformacija sa tabu liste ukoliko one dovode do kreiranja kvalitetnijeg od do tada najboljeg rješenja. Za različite probleme moguće je definisati različite kriterijume aspiracije, ali uvijek se vodi računa o osnovnom principu, odnosno, ukoliko zabranjena transformacija dovodi do novog rješenja, onda se ona dozvoljava.

Postupak primjene metoda tabu pretrage moguće je predstaviti blok šemom (Slika 2.4). Naime, nakon pretpostavljanja rješenja u početnoj iteraciji, vrši se kreiranje kandidata rješenja (ili grupe kandidata rješenja) putem slučajne perturbacije posmatranog rješenja. Potrebno je prethodno usvojiti dozvoljeni nivo perturbacije. Na primjer, za potrebe OPMK problema usvojena je tzv. udaljenost 1 u odnosu na posmatrano rješenje, tj. promjena lokacije, ili eliminacija jednog mjernog uređaja.



Slika 2.4 Blok šema metoda tabu pretrage

Nakon toga, provjerava se dozvoljenost izvedene perturbacije za najbolje kandidat-rješenje. Ukoliko nije na tabu listi, onda se ona ažurira sa prethodno izvedenom transformacijom, kako se u sljedećih par iteracija njeno dejstvo ne bi moglo poništiti. Ukoliko je izvedena transformacija na tabu listi, provjerava se kriterijum aspiracije. Nakon toga, vrši se prihvatanje ili odbijanje kandidata rješenja. Na kraju, provjerava se kriterijum završavanja optimizacionog postupka i odlučuje se da li se nastavlja sa pretragom, ili je ostvareno najbolje rješenje konačan rezultat primjene metoda tabu pretrage. Pomenuti kriterijum može biti formulisan kao:

- fiksni broj iteracija usvojen kao dovoljan za dostizanje optimalnog rješenja,
- fiksni broj iteracija nakon kojeg nema nikakvog napretka u kvalitetu rješenja,
- dostizanje poznatog kvaliteta rješenja.

U zavisnosti od prirode problema i nivoa informacija o željenim karakteristikama optimalnog rješenja, odlučuje se koji od navedena tri pristupa primijeniti.

2.2.2. Primjena metoda tabu pretrage na OPMK problem

U [77] je predložena varijanta metoda tabu pretrage za rješavanje OPMK problema. Ona je spregnuta sa topološki baziranom metodom za formiranje observabilne mjerne konfiguracije. Dakle, rezultujući postupak je formiran u obliku pretrage u dvije faze. Prvi je topološki i tiče se formiranja observabilne mjerne konfiguracije za zadat broj mjernih uređaja. Drugi je baziran na tabu pretrazi i zadatak mu je da, pretragom prostora rješenja, umanji broj mjernih uređaja potreban za postizanje observabilnosti.

Prva faza pretrage nije iterativna i izvršava se samo jednom, na početku postupka predloženog u [77]. Ona je zasnovana na par jednostavnih pravila kako bi se formirala početna mjerna konfiguracija koja obezbjeđuje observabilnost sistemu:

- postavlja se mjerni uređaj u čvor koji ima najviše susjednih neobservabilnih čvorova,
- provjeri se broj preostalih neobservabilnih čvorova,
- ukoliko sistem nije potpuno observabilan, ponovo se procedura vraća na prvi korak.

Pored dobijene mjerne konfiguracije, kao ulazni podatak za drugu fazu pretrage uzima se broj angažovanih mjernih uređaja. On na početku predstavlja gornju granicu za očekivani optimalni broj angažovanih mjerenja i označava se sa n_{pmax} . Donja granica se određuje proizvoljno kao $n_{pmin}=0.1n_{pmax}$. Prije nego se formira inicijalno rješenje za drugu fazu pretrage, tj. metod tabu pretrage, u [77] se predlaže pretpostavljanje optimalnog broja mjernih uređaja prema relaciji:

$$n_p = INT(0.7n_{pmin} + 0.3n_{pmax}). \quad (2.4)$$

Nakon toga se heuristički formira rješenje koje zadovoljava pretpostavljeni broj angažovanih mjernih uređaja i otpočinje primjena druge faze pretrage. Metod tabu pretrage ima za zadatak da pronade observabilnu mjernu konfiguraciju za pretpostavljeni broj mjerenja iz (2.4) koristeći prezentirani algoritam (Slika 2.4). Ukoliko se kao rezultat druge faze pretrage uspješno pronade mjerna konfiguracija, izvršava se ažuriranje n_{pmin} , a zatim ponavlja procedura od primjene relacije (2.4). Nakon svake iteracije provjerava se uslov konvergencije koji je definisan kao:

$$n_{pmax} - n_{pmin} = 1. \quad (2.5)$$

Funkcija cilja koja se koristi kod tabu pretrage struktuirana je analogno (2.3) uz dodatak člana koji promoviše rješenja sa većim stepenom redundanse, ali ne prije zadovoljavanja osnovnog

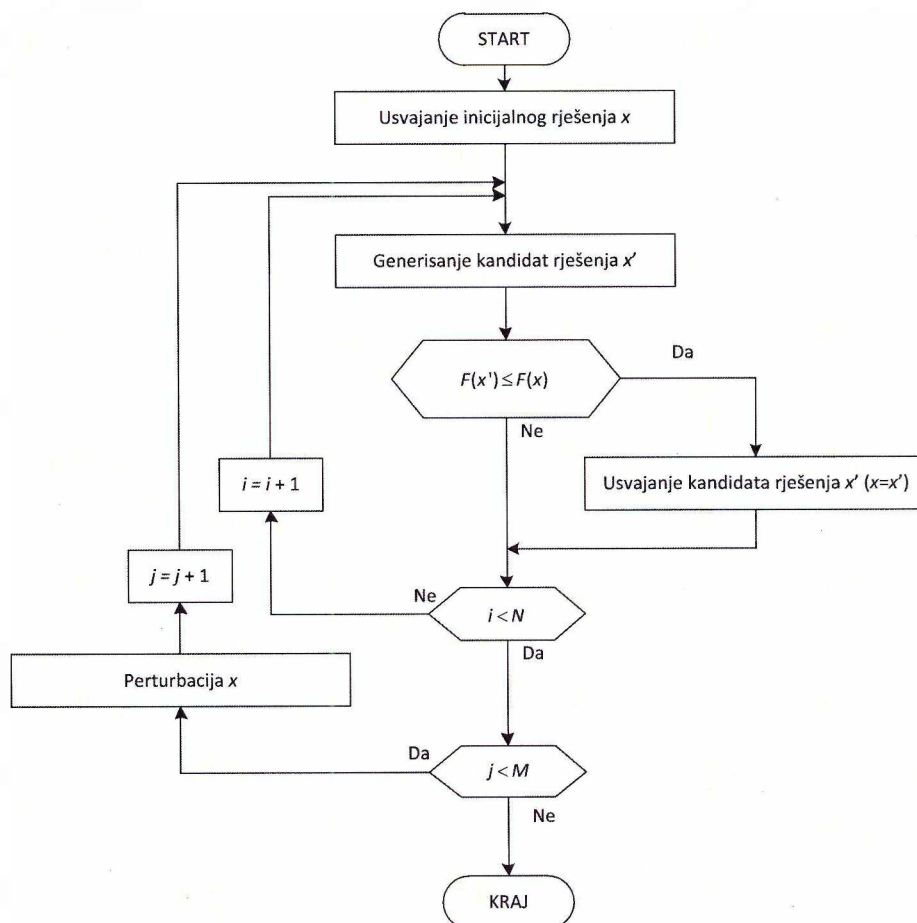
uslova, tj. observabilnosti i najnižeg mogućeg broja angažovanih mjerenja. Hijerarhija uslova određena je korišćenim težinskim koeficijentima.

2.3. Metod lokalne pretrage

Iako je efikasnost od velikog značaja za širu primjenu nekog metaheurističkog metoda, takođe je bitan nivo složenosti njegove primjene. Složenost primjene je dvojaka i ogleda se u algoritamskoj složenosti (računska i memorijska zahtjevnost) i potrebnom nivou informacija o konkretnom problemu. Metod koji se odlikuje jednostavnom primjenom, uzimajući u obzir oba pomenuta vida složenosti, je metod lokalne pretrage.

2.3.1. Algoritam metoda lokalne pretrage

Metod lokalne pretrage (Slika 2.5) zasnovan je na jednostavnom pristupu pretraživanja prostora rješenja kroz iterativno pretraživanje lokalizovanih podprostora rješenja koji su susjedni nekom posmatranom rješenju. Mehanizam generisanja prostora rješenja susjednog nekom rješenju je kroz usvojene slučajne perturbacije. Kakve će one biti, zavisi od postignutih performansi za konkretan problem. Čitav postupak primjene metoda može se razložiti u dvije faze. Prva se tiče lokalne pretrage iz koje se kao rezultat dobija lokalni optimum. Druga faza ima za zadatak da definisanjem nove zone pretrage izbjegne postignuti lokalni optimum. Postojanje druge faze, postupak lokalne pretrage čini iterativnim.



Slika 2.5 Algoritam metoda iterativne lokalne pretrage

Obije faze pretrage izvode se u više iteracija i obično se za njih usvaja neki konačan broj ponavljanja. Broj ponavljanja nije isti za obje faze, a usvaja se na osnovu performansi koje metod pokaže. Nije praksa da se iterativni postupak prijevremeno završava, ali, ukoliko postoji definisan željeni nivo kvaliteta rješenja, to je moguće uključiti u algoritam (Slika 2.5) sa dodatnim uslovom.

Prije nego se primijeni metod, potrebno je definisati:

- inicijalno rješenje prihvatljivog kvaliteta,
- vrstu perturbacije za kreiranje susjednog prostora rješenja u odnosu na posmatrano rješenje,
- vrstu perturbacije za izbjegavanje postignutog lokalnog optimuma,
- broj iteracija obje faze pretrage (N, M).

Na početku se vrši pretpostavljanje inicijalnog rješenja koje zadovoljava kriterijume optimizacije. Onda se za potrebe lokalne pretrage vrši perturbacija rješenja. Ukoliko je dobijeno rješenje boljeg ili istog kvaliteta od tekućeg, ono se čuva kao tekuće. Nakon toga, provjerava se kriterijum završetka lokalne pretrage, što je slučaj i kada rješenje nije boljeg kvaliteta od tekućeg rješenja. Zatim se lokalna pretraga nastavlja sa novom perturbacijom tekućeg rješenja. Nakon završene lokalne pretrage vrši se dodatna perturbacija rješenja koje predstavlja lokalni optimum, kako bi se spriječila konvergencija lokalnom optimumu. Ovaj nivo pretrage se ponavlja određen broj iteracija, nakon čega se tekuće rješenje proglašava rezultatom optimizacionog postupka.

2.3.2. Primjena iterativne lokalne pretrage na OPMK problem

Usljed jednostavnosti primjene i dobrim rezultatima pri rješavanju složenih kombinatornih problema, u [95] je predložena metoda bazirana na iterativnoj lokalnoj pretrazi za rješavanje OPMK problema. Analiziran je osnovni OPMK problem, bez uključivanja dodatnih kriterijuma kao što su pouzdanost estimacije stanja, robusnost mjerne konfiguracije, komunikaciona ograničenja itd. Kao funkcija cilja usvojen je samo uslov da mjerna konfiguracija bude observabilna.

Prije nego se primijeni iterativna lokalna pretraga, potrebno je pronaći observabilnu mjernu konfiguraciju koja je dovoljno blizu optimalnoj kako bi postupak pretrage bio efikasniji. To se postiže primjenom posebnog algoritma predloženog u [95], koji je zasnovan na definisanju nivoa važnosti čvora. Važnost čvora određena je prije svega njegovom povezanošću sa ostalim čvorovima, ali i povezanošću njemu susjednih čvorova, a može se odrediti prema relaciji:

$$PR(i) = \frac{1-d}{n} + d \left(\frac{PR(j_1)}{C(j_1)} + \frac{PR(j_2)}{C(j_2)} + \dots + \frac{PR(j_n)}{C(j_n)} \right), \quad (2.6)$$

gdje su:

$PR(i)$ – važnost čvora i ,

d – koeficijent iz intervala $(0,1)$,

n – broj susjednih čvorova,

j_1, j_2, \dots, j_n – redni brojevi susjednih čvorova čvora i ,

$C(j_1), C(j_2), \dots, C(j_n)$ – broj incidentnih grana za čvorove j_1, j_2, \dots, j_n , respektivno.

Dakle, nakon definisanja važnosti svih čvorova u skladu sa relacijom (2.6), formira se lista čvorova sortirana po važnosti. Zatim se vrši pozicioniranje mjernog uređaja u čvor koji je na čelu liste. Nakon toga, vrši se provjera observabilnosti i formira se lista neobservabilnih čvorova sortirana po važnosti. U skladu sa novoformiranom listom, vrši se pozicioniranje novog mjernog uređaja. Navedeni postupak se ponavlja sve dok sistem ne bude u potpunosti observabilan, tj. dok broj neobservabilnih čvorova ne bude jednak 0.

Za uspješnu primjenu metoda iterativne lokalne pretrage potrebno je definisati način na koji se vrši perturbacija rješenja, tj. kreiranje susjednog prostora rješenja. U [95] su predložena dva vida perturbacije rješenja i to:

- slučajna promjena položaja jednog mjernog uređaja – perturbacija za potrebe lokalne pretrage i
- dodavanje jednog ili više uređaja u zavisnosti od složenosti analiziranog problema – perturbacija rješenja za potrebe izbjegavanja lokalnog optimuma.

Nakon generisanja kandidat-rješenja pomjeranjem jednog mjernog uređaja iz tekućeg rješenja, vrši se provjera mogućnosti eliminacije jednog mjernog uređaja iz kandidat konfiguracije. Ukoliko se to ostvari, dobijeno rješenje sa pamti kao tekuće, a postupak lokalne pretrage nastavlja sve dok se ne izvrše sve planirane iteracije za ovu fazu pretrage. Kao rezultat dobija se optimalno rješenje iz lokalnog okruženja u odnosu na početno rješenje. Kako bi se zaobišao lokalni optimum, ulazi se u novu fazu pretrage tako što se ostvarenom rješenju, slučajnim izborom dodaje novi mjerni uređaj, a postupak vraća na ponovnu lokalnu pretragu. Nakon izvršavanja predviđenog broja iteracija (koji zavisi od performansi algoritma) dolazi se do konačnog rješenja.

2.4. Standardni genetski algoritam

Metod koji sa svim svojim varijantama ima najširu upotrebu u rješavanju optimizacionih problema je genetski algoritam (GA). On je zasnovan na analogiji sa procesom prirodne evolucije. U tom procesu su prepoznati određeni prirodni operatori koji, kroz generacije, osiguravaju opstanak i napredak samo onih jedinki koje karakterišu najbolje kvalitativne osobine. U skladu sa tim, može se govoriti o optimizaciji inicijalne generacije jedinki. Ta osobina, uz prepoznati mehanizam prirodne evolucije, uslovlja je razvoj metodološkog ekvivalenta procesu prirodne evolucije, a u cilju uspješnog rješavanja složenih optimizacionih problema.

Izdvađa se nekoliko karakterističnih osobina standardnog GA u odnosu na prethodno opisane metaheurističke metode:

- populacija,
- selekcija,
- rekombinacija i
- mutacija.

GA pripada grupi populacionih metaheurističkih metoda. Populaciju čine jedinke koje odgovaraju rješenjima optimizacionog problema. Na početku, kreira se inicijalna populacija. Najjednostavniji pristup je taj da se ona kreira slučajnim postupkom. Taj pristup se bira u slučaju da postoji mali broj informacija o tome kakvo optimalno rješenje treba da bude. Ukoliko postoje neke informacije o rješenju, pozitivna je praksa da se to iskoristi za kreiranje inicijalne populacije kako bi se sam proces pretrage ubrzao. Time se GA odmah usmjeri na onaj dio prostora rješenja koji vodi ka optimumu. Potrebno je naglasiti da je, prije formiranja populacije, potrebno usvojiti strukturu jedinke (hromozoma) koja predstavlja rješenje (Slika 2.3). Ona zavisi od optimizacionog problema i mora jednoznačno određivati moguće rješenje.

Primjenom operatora GA vrši se unaprijeđivanje kvaliteta jedinki kroz generacije, odnosno riješava se optimizacioni problem. Selekcija je prvi od tri operatora standardnog GA. Ona ima za zadatak da odabere najkvalitetnije jedinke koje će se koristiti za kreiranje nove generacije. Te jedinke se često nazivaju roditelj-jedinke (hromozomi). Odabira se onoliko roditelj-jedinki koliko je

potrebno za kreiranje nove generacije. Postoji više načina na koji se izvodi selekcija, ali najpoznatiji su:

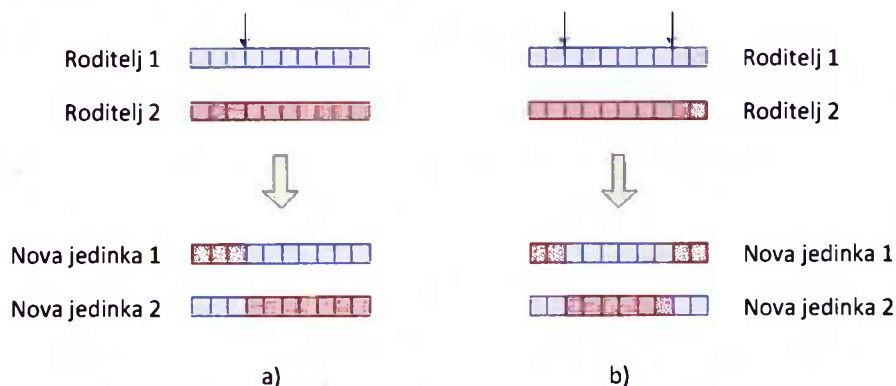
- sortirana selekcija,
- slučajna selekcija,
- turnirska selekcija,
- ruletska selekcija.

Sortirana selekcija je najlakša za primjenu iako ne odgovara onome što se dešava u prirodi. Naime, vrši se uparivanje roditelja prema listi kako su raspoređeni u okviru populacije od kraja prema početku. S druge strane kod slučajne selekcije, sve jedinke iz tekuće populacije imaju jednake šanse da budu izabrane kao roditelj-jedinke. Kod najprostije turnirske selekcije biraju se dvije jedinke iz tekuće populacije, od kojih se kao roditelj prihvata ona jedinka koja ima bolji kvalitet tj. manju (u slučaju minimizacije funkcije) vrijednost fitnes funkcije. Turnirska selekcija može brojati i više učesnika ukoliko se to pokaže opravdano s aspekta postignutog kvaliteta optimuma, ali to povlači za sobom veće proračunsko angažovanje. S druge strane, ruletska selekcija je zasnovana na principu rada ruletskog točka. Naime, brojevima na ruletu odgovaraju jedinke iz populacije, pri čemu je potrebno naznačiti da je vjerovatnoća izbora jedinke srazmjerna njenom kvalitetu. Prema tome, za selekciju roditeljskih jedinki potrebno je okretati ruletski točak onoliko puta koliko je roditelja potrebno. Opšta uloga operatora selektivnosti je da pretragu za optimalnim rješenjem usmjeri na okolinu do tada najkvalitetnijih rješenja.

Nakon izvršene selekcije primijenjuje se operator rekombinacija. Zadatak rekombinacije je da kreira novu populaciju na osnovu odabranih roditelj-jedinki. Rekombinacija predstavlja razmjenu djelova jedinki kako bi se formirale dvije nove jedinke (Slika 2.6). Najčešći oblici rekombinacije su:

- *single point crossover* – rekombinacija sa jednom tačkom razdvajanja
- *two point crossover* – rekombinacija sa dvije tačke razdvajanja.

Kod rekombinacije sa jednom tačkom razdvajanja, slučajnim izborom bira se tačka razdvajanja a onda se vrši podjela roditelj-jedinki na dva dijela. Nova jedinka se formira koristeći jedan dio prve roditelj-jedinke a komplementaran dio druge jedinke (Slika 2.6a). Druga jedinka se formira od preostalih, neraspoređenih djelova roditelj-jedinki.



Slika 2.6 Prikaz operatora rekombinacije

a) single point crossover

b) two point crossover

U slučaju rekombinacije sa dvije tačke, roditelj jedinke dijele se na tri dijela, a nove jedinke formiraju se na analogan način kao u prethodnom slučaju (Slika 2.6b). Potrebno je naglasiti da je rekombinacija operator koji se izvršava u skladu sa usvojenom vjerovatnoćom. Njena vrijednost se

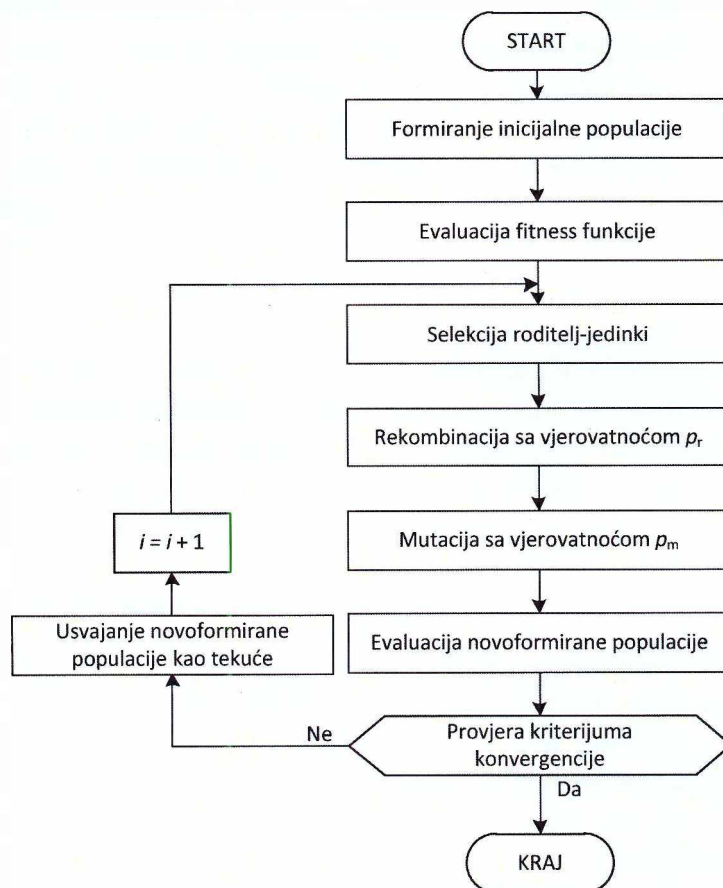
usvaja u skladu sa performansama algoritma. U situacijama kada ne dolazi do rekombinacije, odabrane roditelj-jedinke postaju članovi nove generacije.

Rezultat primjene operatora rekombinacije je privremena nova populacija i na nju se primijenjuje operator mutacija. Mutacija ima za zadatak da otvori nove prostore pretrage, van onih koji su u blizini optimalnih rješenja. Na taj način se postižu bolji rezultati u izbjegavanju lokalnih optimuma. Mutacija se primijenjuje u skladu sa usvojenom vjerovatnoćom i to lokalno, na nivou usvojenog minimalnog dijela jedinke. U slučaju binarne predstave jedinke, minimalni dio jedinke je jedan bit. Ukoliko dolazi do mutacije, minimalni dio rješenja mijenja vrijednost (kod binarne predstave 1 prelazi u 0, i obrnuto).

Zajedničkim djelovanjem svih operatora GA na odabranoj populaciji postiže se lokalno i globalno istraživanje prostora rješenja u cilju rješavanja optimizacionog problema. Na taj način uspješno je uspostavljena analogija sa prirodnom evolucijom, što je stvorilo mogućnosti za široku primjenu u rješavanju optimizacionih problema.

2.4.1. Struktura standardnog genetskog algoritma

Procedura primjene GA jednostavno se može predstaviti iterativnom primjenom njegovih operatora (Slika 2.7). Na početku je potrebno usvojiti veličinu populacije. Veća populacija utiče na raznovrsnost pretrage i uslovljava povećanje brzine konvergencije. S druge strane, veća populacija znači i intenziviranje proračunskih zahtjeva usljed većeg obima posla za operatore GA. Optimalan odnos između veličine populacije i broja generacija postiže se testiranjem performansi za konkretan optimizacioni problem.



Slika 2.7 Blok šema standardnog GA

Nakon formiranja, određuje se kvalitet članova početne populacije kroz proračun vrijednosti fitnes funkcije, odnosno funkcije koja se minimizuje (ili maksimizuje). S obzirom da se vrši procjena kvaliteta svake jedinke iz populacije posebno, način na koji je fitnes funkcija definisana može značajno da utiče na ukupne performanse GA, kako kvalitativno tako i u nivou proračunske zahtjevnosti.

Prvi korak u kreiranju nove generacije jedinki je selekcija roditelj-jedinki prema jednom od mogućih mehanizama selekcije. Uzimajući u obzir da se od dvije roditelj-jedinke dobijaju dvije nove jedinke, potrebno je izabrati $N/2$ parova jedinki, gdje je N broj jedinki u populaciji. Sljedeći operator je rekombinacija i ona se primijenjuje na nivou para roditelj-jedinki sa na početku usvojenom vjerovatnoćom p_r . Ukoliko ne dođe do rekombinacije, posmatrane roditelj-jedinke se čuvaju umjesto očekivanih novoformiranih jedinki. Vjerovatnoća rekombinacije koja se najčešće koristi je iz intervala $[0.9, 1]$. Posljednji operator je mutacija i primijenjuje se sa vjerovatnoćom p_m na nivou gradivnog dijela jedinke (u slučaju binarne predstave jedinke to je jedan bit). Njen zadatak je da sve jedinke iz međupopulacije, u skladu sa usvojenom vjerovatnoćom, mutira i kreira novu populaciju. Vjerovatnoća mutacije obično je niska i usvaja se u zavisnosti od prirode problema, a najčešći način njenog definisanja je $p_m = 1/L$, gdje je L usvojena dužina jedinke (hromozoma). Nakon svih operatora, vrši se procjena kvaliteta jedinki iz nove populacije i prelazi se na sljedeću generaciju u kojoj je prethodno dobijena populacija definisana kao tekuća.

Često se za potrebe unaprijeđivanja performansi GA, primijenjuje tzv. elitistička strategija. Ona podrazumijeva čuvanje jedne ili više najkvalitetnijih jedinki za sljedeću generaciju. Dakle, nakon završetka mutacije i procjene kvaliteta novih jedinki vrši se zamjena najmanje kvalitetne nove jedinke sa najkvalitetnijom jedinkom iz tekuće generacije. To se može proširiti i na više jedinki. Takođe, jedna varijanta elitističke strategije je i čuvanje samo onih novih jedinki koje su kvalitetnije od jedinki iz tekuće generacije. To se postiže upoređivanjem vrijednosti fitnes funkcije svih jedinki iz nove u odnosu na tekuću generaciju. Prije upoređivanja, jedinke iz tekuće i međugeneracije se sortiraju prema vrijednosti fitnes funkcije. Primjenu elitističke strategije treba uskladiti sa performansama problema, jer u nekim slučajevima može dovesti do preuranjene konvergencije usljed zasićenosti populacije istim ili sličnim jedinkama.

Na kraju svake iteracije provjerava se kriterijum konvergencije. Ukoliko nije zadovoljen, nova populacija postaje tekuća i postupak se ponavlja. Kriterijum konvergencije najčešće je broj ostvarenih iteracija, ali se može vezati i za kvalitet postignutog rješenja ukoliko je to poznato pri formulisanju optimizacionog problema. U nekim slučajevima provjerava se stepen napredovanja kvaliteta najbolje jedinke. Ukoliko dođe do stagnacije nakon određenog broja generacija, onda se može smatrati da je postupak konvergirao i zaustaviti. Ovaj pristup se primijenjuje kada je izražen značaj vremena proračuna, tj. u situacijama primjene rezultata GA u *real-time* aplikacijama.

2.4.2. Primjena GA za rješavanje OPMK problema

Standardni GA predložen je kao optimizacioni metod za pronalaženje optimalne mjerne konfiguracije u [64]. Analizirana je mjerna konfiguracija sastavljena samo od klasičnih mjernih uređaja uz vođene računa o komunikacionoj infrastrukturi kroz uzimanje u obzir RTU (*Remote Terminal Units*) uređaja. RTU uređaj predstavlja komunikacione kapacitete koji se moraju obezbijediti na mjestu instalacije mjernih uređaja kako bi se omogućilo funkcionisanje telemetrije, tj. prenos mjerenja do centra upravljanja. Usljed značajne cijene RTU uređaja u odnosu na mjerne uređaje, pozitivna praksa je grupisanje mjernih uređaja u istom čvoru (transformatorskoj stanici) kako bi se napravila ušteda jer više mjernih uređaja može koristiti kapacitete jednog RTU uređaja.

Tehnički kriterijumi koji su uzeti u obzir prilikom optimizacije su:

- postizanje observabilne mjerne konfiguracije u baznom slučaju,
- očuvanje observabilnosti u slučaju ispada jedne grane,
- odsustvo kritičnih mjerenja i setova mjerenja u slučaju ispada jedne grane.

Sve tehničke kriterijume je potrebno zadovoljiti uz minimalne finansijske troškove koji su predstavljeni brojem mjerenja i RTU uređaja. Ostvarivanje postavljenih optimizacionih kriterijuma postiže se odgovarajućom strukturom fitnes funkcije:

$$F(x) = C_{\text{met}} + C_{\text{RTU}} + \sum_{i=1}^{NT} [k_i P_{\text{obs}}(i) + N_{\text{Cm}}(i) P_{\text{Cm}}(i) + N_{\text{Cs}}(i) P_{\text{Cs}}(i)], \quad (2.7)$$

gdje su:

C_{met} – cijena svih mjernih uređaja koji čine mjernu konfiguraciju x ,

C_{RTU} – cijena svih RTU uređaja koji čine mjernu konfiguraciju x ,

k_i – koeficijent koji uzima vrijednost 0 za observabilni a 1 za neobservabilni i -ti scenario ispada jedne grane,

$N_{\text{Cm}}, N_{\text{Cs}}$ – broj kritičnih mjerenja i broj kritičnih setova mjerenja, respektivno i

$P_{\text{obs}}, P_{\text{Cm}}, P_{\text{Cs}}$ – težinski koeficijenti koji odgovaraju observabilnosti, kritičnim mjerenjima i kritičnim setovima mjerenja, respektivno.

U cilju postizanja željene hijerarhije svih optimizacionih kriterijuma, potrebno je da važi $P_{\text{obs}} \gg P_{\text{Cm}} \gg P_{\text{Cs}}$. Takođe, u [64] je predložena cijena jednog mjernog uređaja od 4.5, a jednog RTU 100 novčanih jedinica. Kada su karakteristike GA u pitanju, usvojena je veličina populacije od 50 jedinki, sa turnirskom selekcijom i rekombinacijom sa jednom tačkom razdvajanja. Usvojena vjerovatnoća rekombinacije je 0.9, a mutacije 0.02. Takođe, predloženi GA koristi elitističku strategiju čuvanja jedinki za drugu generaciju. Kriterijum konvergencije je maksimalni broj generacija, a u zavisnosti od problema koriste se vrijednosti 500 i 1000.

2.5. Imunizirajući genetski algoritam

Tehnika zasnovana na standardnom GA, uz dodatni operator i neke osobine SA metoda je imunizirajući genetski algoritam (IGA). Predložen je kao novi algoritam u [103] (Slika 2.8), a njegova osnovna odlika je postojanje novog tzv. imunizirajućeg operatora. Njegovim djelovanjem IGA ima bolje performanse od GA usljed korišćenja informacija o prirodi problema za intervencije u normalnoj proceduri rada GA. Te intervencije imaju za zadatak da onemoguće ponavljanja u procesu GA i slabljenje kvaliteta novih jedinki koje su posljedica slučajnog karaktera operatora rekombinacije i mutacije. Time se postiže konstantni napredak u kvalitetu najbolje jedinke kroz generacije.

Dvije procedure čine novi imunizirajući operator: vakcinacija i imunoselekcija. Vakcinacija je procedura koja se definiše u skladu sa raspoloživim informacijama o samom problemu, ali i željenom rješenju. Ona se mora pripremiti prije primjene IGA, a izvršava se nakon izvedenih standardnih operatora GA. Vakcinacija ima za cilj unaprijeđivanje kvaliteta novoformiranih jedinki kroz njihovu korekciju koristeći generalne osobine problema, ili karakteristike najbolje jedinke dobijene do posmatrane generacije. Vakcinacija može biti izvršena u više faza ukoliko postoji više različitih osobina rješenja koje se moraju posmatrati odvojeno. Obim primjene (broj jedinki iz populacije) vakcinacije definiše se u skladu sa performansama IGA za rješavanje posmatranog

problema. Nakon vakcinacije, vrši se imunoselekcija. Ona ima dvije faze. Prvu, kojoj je zadatak da provjeri uspješnost dejstva prethodne faze. U drugu fazu prosljeđuju se samo one jedinke koje su nakon vakcinacije boljeg kvaliteta. Ukoliko vakcinacija ne doprinese povećanju kvaliteta, onda se u drugu fazu imunoselekcije prosljeđuje jedinka u obliku u kom je bila prije vakcinacije. Rezultat prve faze imunoselekcije su jedinke koje mogu biti odabrane za učešće u rekombinaciji. Druga faza je selekcija koja se vrši u skladu sa odgovarajućim mehanizmom definisanim u okviru SA metoda. Naime, primijenjuje se ruletska selekcija kod koje se vjerovatnoća izbora jedinke definiše kao:

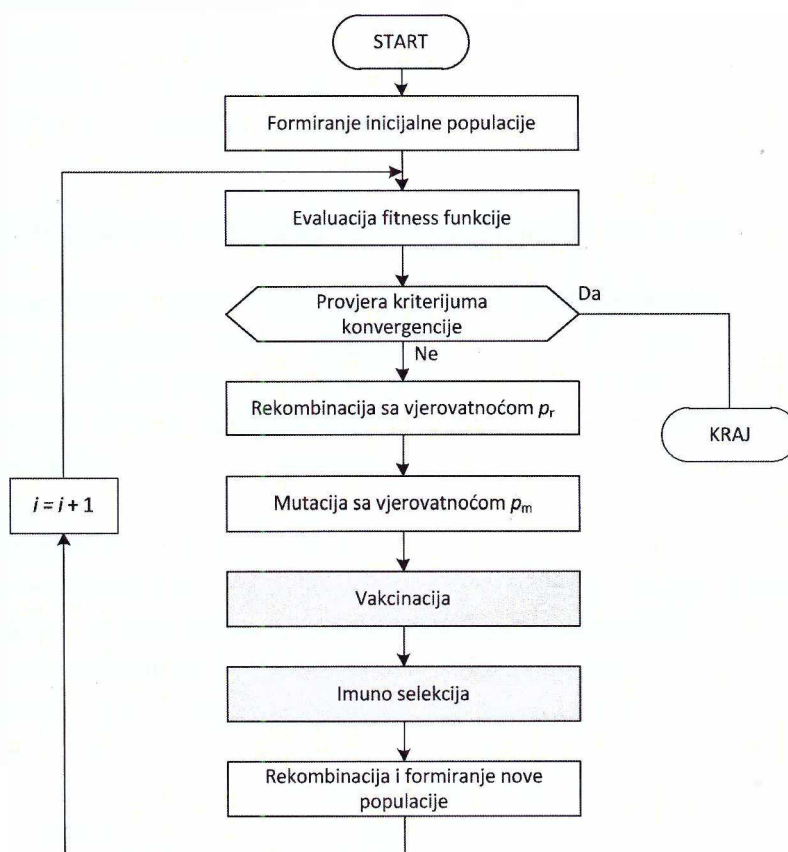
$$P(x_i) = \frac{e^{f(x_i)/T_k}}{\sum_{j=1}^{n_0} e^{f(x_j)/T_k}}, \quad (2.8)$$

gdje su:

$f(x_i), f(x_j)$ – vrijednost fitnes funkcije jedinki x_i i x_j ,

T_k – temperatura koja odgovara k -toj generaciji a računa se prema (2.2) i

n_0 – broj članova populacije.



Slika 2.8 Blok šema IGA

U [89] je predložena primjena IGA za rješavanje OPMK problema. Optimizacioni problem tretira samo osnovne kriterijume: observabilnost u baznoj konfiguraciji i minimalna cijena mjerne konfiguracije koja se sastoji samo od fazorskih mjerenja. Observabilnost se određuje topološkim pristupom. Struktura funkcije cilja je analogna (2.3), s tim što se observabilnost tretira kroz broj neobservabilnih čvorova analiziranog sistema. Dakle član C_1 uzima cjelobrojne vrijednosti. Usvojeni

su težinski faktori 1 i 3, pri čemu veći broj odgovara članu koji se tiče observabilnosti, a manji cijeni mjerne konfiguracije, tj. broju angažovanih mjernih uređaja.

Osnovna karakteristika predloženog metoda su procedure koje obuhvata vakcinacija kao dio imunog operatora. Naime, vakcinacija obuhvata tri vakcine:

- i. čvor koji ima samo jednu incidentnu granu ne treba da bude lokacija za mjerni uređaj,
- ii. čvor koji je susjedan čvoru koji ima samo jednu incidentnu granu treba odabrati kao lokaciju za mjerni uređaj ukoliko se ne radi o čvoru sa nultim injektiranjem,
- iii. čvor sa nultim injektiranjem ne treba da bude odabran kao lokacija za mjerni uređaje.

Prve dvije vakcine primijenjuju se na čitavu populaciju, dok treća samo na polovinu slučajno odabranih jedinki iz populacije.

Pored definisanih vakcina, u [89] je analiziran uticaj rekombinacije između jedinki koje potiču od istih roditelj-jedinki. Naime, ako se posmatra situacija da kao roditelji budu odabrane iste jedinke koje su u prethodnoj generaciji formirane (što je očekivan slučaj kada su ujednačeni kvaliteti jedinki u populaciji), realno je očekivati da se nakon rekombinacije dobiju rješenja vrlo slična njihovim roditelj-jedinkama, tj. jedinkama iz prethodne iteracije. Takva situacija utiče na usporavanje konvergencije i smanjivanje kvaliteta rješenja. Nakon testiranja, u [89] je istaknuto da zabrana rekombinacije između jedinki koje potiču od istih roditelj-jedinki daje dobre rezultate samo u slučaju manjih usvojenih veličina populacija. Razlog je taj što je kod velikih populacija manja vjerovatnoća da dođe do zabranjene rekombinacije.

2.6. Metod diferencijalne evolucije sa nedominiranim sortiranjem

Diferencijalni evolucioni algoritam (DEA) je jednostavan ali efikasan populacioni metaheuristički metod. Prvi put su ga predstavili Rainer Storn i Kenneth Price 1995. godine [104]. Zasnovan je na genetskom algoritmu, ali ne prati mehanizme GA operatora. Zbog svoje jednostavnosti i dobrih osobina pri rješavanju složenih optimizacionih problema, ima široku upotrebu. Posebno je dobar kod optimizacionih problema sa kontinualnim prostorom pretrage, mada se može koristiti i za slučaj diskretnog prostora rješenja.

Osnovni princip rada DEA metoda može se predstaviti kroz tri faze:

- generisanje perturbacija kako bi se kreirale nove jedinke – često se ova procedura zove diferencijalna mutacija pošto se izvršava slučajnim izborom jedinki,
- diferencijalna rekombinacija novodobijene jedinke i originala,
- upoređivanje kvaliteta originala i jedinke dobijene nakon rekombinacije - formiranje nove generacije jedinki.

Optimizacioni problemi najčešće imaju više od jednog kriterijuma koji optimalno rješenje treba da zadovolji. Ti kriterijumi su često suprotstavljeni jedni drugima, pa je potrebno odlučiti se za njihovu hijerarhiju prije nego što se započne proces optimizacije. To se postiže struktuiranjem funkcije cilja koristeći težinske koeficijente, ili uvođenjem ograničenja kakvo rješenje može biti član populacije. Najčešće nije moguće odabrati težinske koeficijente tako da jednako odgovaraju svakom optimizacionom problemu. Kao rješenje za taj problem, predlaže se formulisanje optimizacionog problema kao problema sa više ciljeva. Tada se svaki od ciljeva evaluira posebno i nije potrebno opredijeliti se za hijerarhiju ciljeva kroz upotrebu težinskih koeficijenata. Modifikacija DEA kod koje se optimizacioni problem definiše tako da ima više ciljeva je diferencijalni evolucioni algoritam sa nedominiranim sortiranjem (NSDEA).

Zajedničko za optimizacione probleme sa više ciljeva je da se predstavljaju sa onoliko funkcija cilja koliko ima ciljeva. U opštoj formi, to se može zapisati kao:

$$\begin{aligned} \min f_i(x), \quad & i = 1, 2, \dots, N_c \\ g_j(x) \leq 0, \quad & j = 1, 2, \dots, J \\ h_k(x) = 0, \quad & k = 1, 2, \dots, K \end{aligned} \quad (2.9)$$

gdje su:

f_i – funkcija i -tog cilja, pri čemu je ukupan broj analiziranih ciljeva N_c ,

x – promjenljiva koja odgovara rješenju (jedinki iz populacije),

g_j – funkcija koja odgovara j -tom ograničenju tipa nejednakosti kojih ima ukupno J i

h_k – funkcija koja odgovara k -tom ograničenju tipa jednakosti kojih ima ukupno K .

Najčešće rješenje koje je optimalno za jednu funkciju cilja bude daleko od optimalnog za ostale funkcije. Ne postoji rješenje koje je optimalno istovremeno za sve funkcije cilja uzete u obzir. Potrebno je pronaći rješenje koje je dovoljno kvalitetno s aspekta svih analiziranih ciljeva. Upoređivanje kvaliteta rješenja u slučaju definicije optimizacionog problema kao problema sa više ciljeva, vrši se u skladu sa uslovima tzv. Pareto dominacije [105]. Tako, ako se posmatraju dva rješenja koja odgovaraju jedinkama iz optimizacionog postupka x i y , x je kvalitetnije od y ako i samo ako je ispunjeno:

$$\begin{aligned} f_i(x) \leq f_i(y) \quad & \forall i \in \{1, 2, \dots, N_c\}, i \\ f_j(x) < f_j(y) \quad & \exists j \in \{1, 2, \dots, N_c\}. \end{aligned} \quad (2.10)$$

Prema uslovima Pareto dominacije, kaže se da je neko rješenje x , Pareto optimalno ili Pareto nedominirano, ako ne postoji neko drugo rješenje iz skupa rješenja (populacije, kada su odgovarajuće jedinke u pitanju) koje njime dominira prema uslovima definisanim u (2.10).

Dakle, upoređujući jedinke iz populacije prema Pareto uslovima, dolazi se do grupe rješenja koja se nazivaju Pareto optimalni set rješenja. Vrijednosti funkcija ciljeva koje odgovaraju rješenjima iz Pareto optimalnog seta čine nedominirani vektor cilja. Oblast koju formiraju svi nedominirani vektori cilja zove se Pareto front. Dakle, rješavanje optimizacionog problema sa više ciljeva postiže se pronalaženjem što kvalitetnijih Pareto optimuma. Njima odgovarajući vektori cilja treba da budu raspoređeni uniformno na Pareto frontu kako bi se maksimizovale mogućnosti odlučivanja kada je kvalitet konačnog optimuma u pitanju.

Jednom Paretovom frontu pripada više jedinki koje nisu dominantne jedna u odnosu na drugu. Čitava populacija se dijeli na frontove koji su rangirani prema kvalitetu jedinki koje im pripadaju. Da bi se procijenio kvalitet jedinki u okviru istog fronta, a u cilju bolje kasnije pretrage, vrši se procjena rastojanja od najbližih susjednih jedinki. Što je ta distanca veća, to je posmatrana jedinka usamljenija u dijelu prostora rješenja u kome se nalazi. Takve jedinke su poželjne za proces pretrage, pa ih je potrebno zadržati prije nego one jedinke iz istog fronta koje su smještene u dijelu prostora rješenja gdje je nagomilano više jedinki. Na taj način se promoviše pretraživanje neistraženih djelova prostora rješenja, tj. efikasnija pretraga. Ako se posmatraju tri rješenja, x , y i z , pri čemu rješenja x i z odgovaraju jedinkama iz populacije koje su u frontu smještene prije i poslije jedinke kojoj odgovara rješenje y , respektivno, pomenuti parametar rastojanje proračunava se prema relaciji:

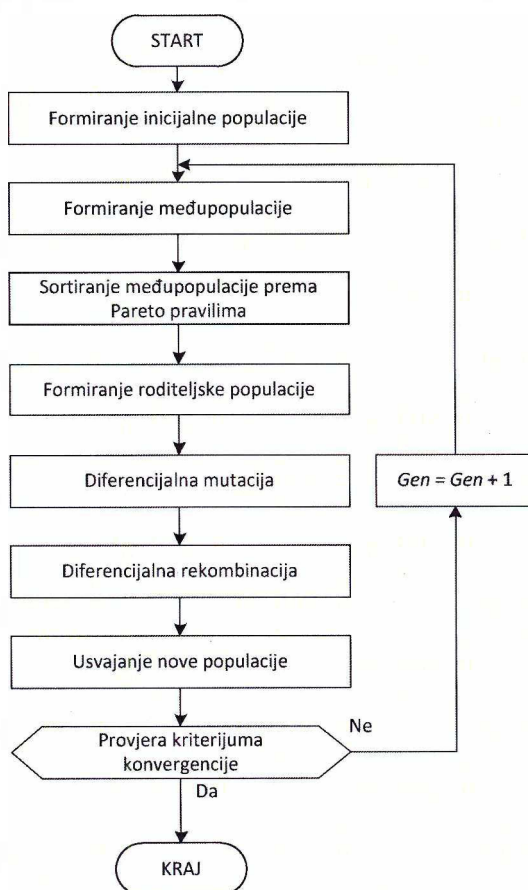
$$d(y) = \sum_{i=1}^{N_c} |f_i(x) - f_i(z)|. \quad (2.11)$$

Ovaj parametar se ne proračunava za jedinke koje se nalaze na kraju fronta, već se uzima kao beskonačno kako bi se sigurno očuvale za sljedeću generaciju.

2.6.1. Algoritam NSDEA

Procedura primjene metoda NSDEA može se razdvojiti u dvije faze: faza sortiranja nedominiranih jedinki i faza primjene operatora DEA metode. Prva faza karakteristična je za metode rješavanja optimizacionih problema sa više ciljeva. Zasnovana je na Paretovim pravilima upoređivanja i ima za zadatak da procijeni kvalitet jedinki iz populacije. Druga faza zadužena je za istraživanje prostora rješenja, a to postiže pomoću operatora DEA metode. Obije faze primjene NSDEA metoda mogu se predstaviti blok-dijagramom (Slika 2.9).

Na početku, potrebno je izvršiti inicijalizaciju NSDEA. Ona obuhvata usvajanje svih potrebnih parametara i inicijalne populacije jedinki (koja se formira slučajnim izborom). Parametri čije vrijednosti se definišu na početku su: maksimalni broj generacija (kriterijum konvergencije), koeficijent diferencijalne mutacije i vjerovatnoća diferencijalne rekombinacije. Početna populacija se kod kombinatornih optimizacionih problema formuliše kao skup binarnih vektora (jedinke), tj. pravougaona binarna matrica. Sve jedinke biraju se slučajno, ali vodeći računa o tome da ne dođe do ponavljanja jedinki u populaciji.



Slika 2.9 Algoritam NSDEA metoda

Nakon formiranja inicijalne populacije formira se međupopulacija tako što se objedine jedinke tekuće populacije sa jedinkama nove populacije. U prvoj iteraciji, ne postoji nova populacija, pa je međupopulacija isto što i tekuća populacija. Potrebno je održati raznovrsnost populacije, pa se

provjerava da li postoji istih jedinki. Ukoliko postoji, one se slučajnim postupkom mijenjaju sve dok se ne postigne da sve jedinke u populaciji budu jedinstvene.

Za potrebe sortiranja jedinki u populaciji potrebno je proračunati funkcije cilja za svaki element međupopulacije. Nakon toga se, prema Paretovim pravilima, vrši sortiranje jedinki međupopulacije na Paretove frontove. Zatim se proračunavaju rastojanja od susjeda za svaku jedinku prema relaciji (2.11).

Nakon što je međupopulacija sortirana, kreira se tzv. roditeljska populacija koja broji onoliko jedinki koliko i početna populacija, tj. m . Dakle, potrebno je odbaciti suvišne jedinke iz međupopulacije. To se postiže tako što se zadrže samo m najkvalitetnijih jedinki. S obzirom da su one već sortirane, zadržavaju se jedinke po Paretovim frontovima, počev od najkvalitetnijih (najčešće rangirani sa najmanjim brojem) pa sve do frontova nižeg kvaliteta dok se ne postigne traženi broj jedinki za roditeljsku populaciju. Tako formirana populacija je ulazna informacija za dio algoritma koji odgovara DEA metodu.

Mehanizmi diferencijalne mutacije i rekombinacije su okosnica DEA metoda. Diferencijalna mutacija je prvi operator i rezultira kreiranjem nove jedinke na osnovu tri slučajno odabrane jedinke iz populacije. Ističu se tri pristupa za njenu primjenu:

$$\begin{aligned} y_{i,g} &= x_{r1,g} + F(x_{r2,g} - x_{r3,g}) \\ y_{i,g} &= x_{b,g} + F(x_{r1,g} - x_{r2,g}) \\ y_{i,g} &= x_{i,g} + F(x_{b,g} - x_{i,g}) + F(x_{r1,g} - x_{r2,g}) \end{aligned} \quad (2.12)$$

gdje su:

$x_{i,g}$ – i -ti element tekuće generacije,

$y_{i,g}$ – i -ti element međugeneracije,

$x_{b,g}$ – najbolja jedinka pronađena do g -te generacije,

r_1, r_2 i r_3 – slučajno odabrani brojevi iz intervala $[1, m]$, gdje je m broj jedinki u populaciji i

F – koeficijent mutacije koji se bira iz intervala $[0, 2]$.

Nakon izvršene mutacije, primijenjuje se operator rekombinacija, koji se može predstaviti relacijom:

$$z_{i,j} = \begin{cases} x_{i,j}, & r_j > c_r \\ y_{i,j}, & r_j \leq c_r \end{cases} \quad (2.13)$$

gdje su:

$x_{i,j}$ – i -ta jedinka iz j -te generacije populacije,

$y_{i,j}$ – i -ta jedinka iz međupopulacije koja odgovara j -toj generaciji,

$z_{i,j}$ – i -ta jedinka iz populacije nakon rekombinacije u j -toj generaciji,

r_j – slučajni broj iz intervala $[0, 1]$, generisan u j -toj generaciji za potrebe rekombinacije i

c_r – vrijednost koja se bira iz intervala $[0, 1]$, a koja predstavlja vjerovatnoću rekombinacije.

Nakon izvršene rekombinacije, usvaja se nova populacija, a onda i provjerava kriterijum konvergencije, tj. da li je postignut maksimalni usvojeni broj generacija. Optimalno rješenje je ono koje se nalazi u frontu koji je rangiran sa najnižim brojem. Ukoliko u frontu postoji više od jednog rješenja, potrebno je povećati broj generacija, ili uvesti dodatni kriterijum na osnovu kojeg bi se mogla donijeti konačna odluka o prihvatljivosti rješenja.

2.6.2. Primjena NSDEA na OPMK problem

Kada se analizira OPMK problem koji uključuje dodatne kriterijume osim baznih (observabilnost sistema i minimalan broj mjerenja), problem se može formulisati kao optimizacioni problem sa više ciljeva. Takav pristup je odabran i u [94], gdje je kao optimizacioni algoritam predložen modifikovani DEA, tj. NSDEA metod.

Formulacija optimizacionog problema obuhvata dva cilja i jedno ograničenje. Naime, jedan cilj je minimizacija broja angažovanih mjernih uređaja, drugi je da se maksimizuje redundantna observabilnost čvorova sistema, a sve navedeno se mora postići pod uslovima da optimalna mjerna konfiguracija obezbijedi punu observabilnost sistema. Optimizacioni problem se može predstaviti sa:

$$\begin{aligned} \min f_1 &= \sum_{i=1}^n PA_i \\ \min f_2 &= n - r \\ \text{s.t. } OA_i &= 1, i \in \{1, 2, \dots, n\} \end{aligned} \quad (2.14)$$

gdje su:

PA_i – element vektora PA , koji ukazuje na to da li je mjerni uređaj lociran u čvoru i (ukoliko je element jednak 1) ili ne (ukoliko je posmatrani element 0),

n – broj čvorova posmatranog sistema,

r – nivo redundantne observabilnosti čvorova sistema,

OA_i – element vektora OA , koji ukazuje na observabilnost čvora i ($OA_i = 1$ – observabilan čvor, $OA_i = 0$ – neobservabilan čvor).

Nivo redundantne observabilnosti čvorova određuje se nakon $n-1$ testa pouzdanosti mjernih uređaja. Uzimajući u obzir da se inicijalna populacija kreira slučajnim izborom, to je za očekivati da će biti i jedinki koje odgovaraju neobservabilnim rješenjima. Nivo redundanse koji im odgovara uzima se kao negativan broj, i to -100. Observabilnost se određuje topološkim pristupom.

U odnosu na standardne operatore nedominiranog sortiranja, u [94] se predlaže novi pristup za određivanje rastojanja od najbliže jedinke u istom Pareto frontu. Razlog je taj što relacija (2.11) podrazumijeva da je rješenje y , na sredini između rješenja x i z , što ne mora da bude slučaj. Dakle, isto rastojanje bi se proračunalo za neka rješenja y_1 i y_2 , bez obzira na slučaj da je rješenje y_1 u neposrednoj blizini rješenja x , a rješenje y_2 na sredini između rješenja x i z . Gledano s aspekta kvaliteta pretraživanja prostora rješenja, prihvatanje rješenja y_1 bi značilo dalje pretraživanje već istraženog prostora u okolini rješenja x . S druge strane, daleko kvalitetnija odluka bi bila zadržavanje rješenja y_2 koja bi omogućila istraživanje neistraženog dijela prostora rješenja. S tim u vezi, predložena je nova relacija koja će bolje odgovarati stvarnom rastojanju koje ima rješenje u odnosu na susjede:

$$d(y) = \sum_{i=1}^{N_s} 0.5 |f_i(x) - f_i(z)| + \min[|f_i(x) - f_i(y)|, |f_i(y) - f_i(z)|]. \quad (2.15)$$

S obzirom na postojanje više ciljeva koji su suprotstavljeni, rješenje optimizacionog problema vrednuje se koristeći Paretova pravila. Nakon primjene Paretovih pravila sva rješenja su podijeljena u frontove, pri čemu su najkvalitetnija rješenja smještena u najbolje rangiranom frontu, tj. optimalnom frontu. U [94] je predložena procedura kako između rješenja iz optimalnog Pareto fronta odabrati najpovoljnije za rješavani OPMK problem. Ta procedura je zasnovana na fuzzy teoriji. Naime, ona se sastoji u definisanju stepena ispunjenosti svake funkcije cilja za svaku od

jedinki iz optimalnog Paretovog fronta. Pomenuti stepen se predstavlja sa funkcijom pripadnosti zasnovanom na fuzzy teoriji:

$$h_i = \begin{cases} 1, & f_i \leq f_i^{\min} \\ \frac{f_i^{\max} - f_i}{f_i^{\max} - f_i^{\min}}, & f_i^{\max} > f_i > f_i^{\min} \\ 0, & f_i \geq f_i^{\max} \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, N_c \quad (2.16)$$

gdje su:

f_i – funkcija i -tog cilja,

N_c – ukupan broj ciljeva optimizacionog problema,

f_i^{\max}, f_i^{\min} – maksimalna i minimalna vrijednost funkcije i -tog cilja i

h_i – stepen ispunjenosti i -tog cilja, (ukoliko i -ti cilj nije ispunjen, uzima vrijednost 0, u suprotnom 1).

Na kraju, za proračun ukupnog stepena ispunjenosti svih ciljeva optimizacije za neko od rješenja iz optimalnog Paretovog fronta, koristi se relacija:

$$h = \frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^{N_c} h_i. \quad (2.17)$$

Rješenje iz optimalnog Pareto fronta koje ima najveći vrijednost h , usvaja se kao konačno rješenje optimizacionog problema.

Pored novog mehanizma za nedominirano sortiranje, u [94] se predlaže inovirana strategija diferencijalne mutacije, a može se izraziti relacijom:

$$y_{i,g} = x_{b,g} + (F + 0.001R)(x_{r1,g} - x_{r2,g}) \quad (2.18)$$

gdje je R – slučajan broj iz intervala $[0, 1]$.

Dakle, nova jedinka se kreira tako da se uvažava dva uticaja. Prvi je dominantan i direktno zavisi od najbolje jedinke iz generacije. Na taj način pretraga se navodi na prostor rješenja koji provjereno ima kvalitetna rješenja. Drugi uticaj predstavlja zajedničko djelovanje dvije slučajno odabrane jedinke iz tekuće generacije. Time se promoviše i pretraga van zona koje su već pretražene kako bi se izbjegli lokalni optimumi. Potrebno je naglasiti da usvojeni koeficijent mutacije F , kao i slučajni broj R , predstavljaju težinske koeficijente koji određuju koliko će značajan uticaj slučajno odabranih jedinki biti na kreiranje nove jedinke. Kako će biti usvojen parametar mutacije značajno zavisi od vrste problema koji se analizira. Isto važi i za koeficijent diferencijalne rekombinacije C_r .

2.7. Metod optimizacije po uzoru na koloniju mrava

Razvoj ove metodologije (*Ant Colony Optimization* - ACO) zasnovana je na visoko koordinisanom ponašanju mrava prilikom kretanja od mravinjaka do hrane. Oni imaju mogućnost da pronađu optimalni put do hrane čak i u slučaju kada je ona veoma udaljena (kada postoji veliki broj mogućih puteva). U cilju pronalaženja optimalnog puta, mravi koriste iskustvo mrava koji su ranije pronašli put do hrane. Ranije iskustvo se prenosi preko vida indirektno komunikacije koja se održava uz pomoć uticaja na okolinu. Tako, na početku, prvi mrav ostavlja trag u vidu feromona čime je povećana vjerovatnoća da će ostali mravi pratiti isti put.

ACO metoda je razvijena na osnovu analogije sa stvarnom kolonijom mrava. Osnovna ideja je da se iskoriste samoorganizujući principi koji omogućavaju visokokoordinisano ponašanje stvarnih mrava, kako bi se koordinisala populacija vještačkih jedinki koje sarađuju u rješavanju optimizacionih problema. To se može postići upotrebom vještačkog feromonskog traga.

2.7.1. Algoritam ACO

Kako će raditi pojedini djelovi strukture ACO algoritma zavisi od načina na koji je problem definisan. Definisanje problema podrazumijeva pripremu modela mreže u kome su određene pozicije na putanji vještačke jedinke koja odgovara mravu. Nakon toga, moguće je startovati ACO algoritam. Njegova tipična struktura sastoji se od:

- ostavljanja feromonskog traga,
- odlučivanja i
- dodatnih akcija koje promovišu istraživanje i/ili konvergenciju.

Čvorovi koji se prepoznaju u modelu mreže predstavljaju pozicije koje vještačke jedinke mogu zauzeti. Kretanje jedinke kroz mrežu podijeljeno je na elementarne jedinice puta, odnosno dionice puta između dva čvora. Proces odlučivanja obuhvata donošenje odluke koju elementarnu dionicu puta preći kao sljedeću, tj. koji čvor mreže posjetiti nakon tekućeg. Samo se prvi (startni) čvor bira slučajnim izborom. Svi ostali čvorovi se biraju u zavisnosti od iskustva stečenog prilikom procesa pretrage. Prethodno iskustvo sastoji se iz dva dijela: ostavljenog feromonskog traga i heurističke informacije o rješenju. Feromonski trag je prisutan usljed inicijalne postavke, ali i lokalnog i globalnog ažuriranja feromonskog traga. Potrebno je naglasiti, da je prisutan i mehanizam isparavanja feromonskog traga koji je posebno modelovan.

Lokalno ažuriranje feromona se vrši nakon svakog prelaska dionice puta između dva čvora od strane jedinke. Ako se uzme da je problem definisan tako da jedinka može najviše jednom posjetiti čvor iz mreže, a posmatra se mreža od n čvorova, lokalno ažuriranje feromona radi se $n-1$ put za svaku jedinku iz populacije. Dakle, svaki ukupni put jedinke sastoji se od $n-1$ elementarnih dionica (put između dva čvora). Lokalno ažuriranje feromonskog traga predstavljeno je relacijom:

$$\tau_{ij} = \tau_{ij} + \sum_{k=1}^m \Delta \tau_o^k \quad (2.19)$$

gdje su:

τ_{ij} – količina feromonskog traga za dionicu puta između čvorova i i j ,

m – broj mrava čija ukupna putanja obuhvata dionicu puta između čvorova i i j ,

$\Delta \tau_o^k$ – količina feromona koju ostavlja jedinka k , a definisana je kao:

$$\Delta \tau_o^k = \begin{cases} \frac{m}{FF_{\max}}, & \text{ako putanja jedinke } k \text{ obuhvata dionicu} \\ & \text{puta između čvorova } i \text{ i } j \\ 0, & \text{ako putanja jedinke } k \text{ ne obuhvata dionicu} \\ & \text{puta između čvorova } i \text{ i } j \end{cases}$$

gdje je FF_{\max} maksimalna vrijednost funkcije cilja (koja se minimizuje) koja određuje kvalitet rješenja.

Lokalno ažuriranje feromonskog traga omogućava istraživanje prostora rješenja. S druge strane, ono može dovesti do veoma spore konvergencije usljed promovisanja velikog broja putanja, pa je potrebno to ograničiti. Globalno ažuriranje feromona omogućava popularizaciju putanja koje

odgovaraju kvalitetnijim rješenjima. Dakle, globalno ažuriranje feromona, za razliku od lokalnog, ubrzava konvergenciju. Relacija, kojom se modeluje globalno ažuriranje feromonskog traga je:

$$\begin{aligned}\tau_{ij} &= \tau_{ij} + \Delta \tau_{ij}^{bs}, \\ \Delta \tau_{ij}^{bs} &= \frac{1}{FF_{bs}},\end{aligned}\quad (2.20)$$

gdje je FF_{bs} – vrijednost funkcije cilja rješenja koje odgovara najboljoj putanji u posmatranom trenutku.

U cilju postizanja prihvatljivih performansi ACO algoritma (brzina i kvalitet konvergencije), potrebno je uskladiti parametre lokalnog i globalnog ažuriranja feromonskog traga. Za konvergenciju posebno značajan mehanizam ACO algoritma je isparavanje feromona. On omogućava da putanje koje su odabrane slučajnim izborom usljed, u tom trenutku, nedostajuće prethodne informacije iz procesa pretrage, a koje nisu dovele do poboljšanja rješenja, postanu manje privlačne za nove jedinke. Ovaj mehanizam se predstavlja relacijom:

$$\tau_{ij} = (1 - \rho) \tau_{ij}, \quad (2.21)$$

gdje je ρ – koeficijent isparavanja feromona.

U cilju formiranja putanje, tj. kretanja jedinke koriste jednostavan mehanizam, tzv. pseudo-slučajno pravilo koje je predstavljeno sa relacijom:

$$j = \begin{cases} \arg \max_{l \in N_i^k} [\tau_{il}^\alpha \cdot \eta_{il}^\beta], & \text{ako važi } q \leq q_0, \\ \text{ruletska selekcija,} & \text{u ostalim slučajevima} \end{cases} \quad (2.22)$$

gdje su:

j – sljedeći čvor u putanji jedinke,

N_i^k – dozvoljeno susjedstvo čvora i za jedinku k ,

η_{ij} – heuristička informacija o rješenju koje odgovara posmatranoj putanji,

α – težinski koeficijent koji odgovara feromonskom tragu,

β – težinski koeficijent koji odgovara heurističkoj informaciji o odgovarajućem rješenju,

q_0 – parametar koji određuje značaj prethodnog iskustva iz pretrage i

q – slučajna promjenljiva koja ima uniformnu raspodjelu u intervalu $[0, 1]$.

Drugim riječima, sa vjerovatnoćom q_0 , jedinka bira najbolju moguću dionicu u skladu sa postojećim feromonskim tragom i heurističkom informacijom o odgovarajućem rješenju. S druge strane, sa vjerovatnoćom $1 - q_0$ sljedeću dionicu bira na osnovu ruletske selekcije definisane sa:

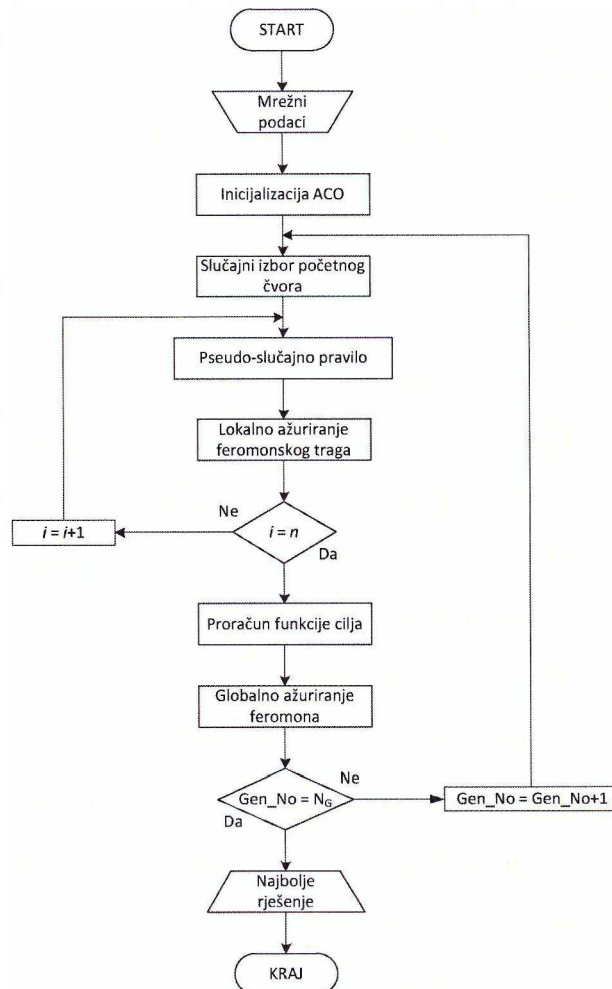
$$p_{ij}^k = \frac{\tau_{ij}^\alpha \eta_{ij}^\beta}{\sum_{l \in N_i^k} \tau_{il}^\alpha \eta_{il}^\beta} \quad \text{akovaži } j \in N_i^k, \quad (2.23)$$

gdje je p_{ij}^k - vjerovatnoća da će čvor j biti odabran kao sljedeći čvor na putanji jedinke k .

Dakle, prije nego se primijeni ruletska selekcija sljedeće dionice puta, potrebno je proračunati odgovarajuće vjerovatnoće koristeći relaciju (2.23). Koeficijenti α i β određuju balans između uticaja prethodne pretrage (postojeći feromonski trag) i kvaliteta odgovarajućeg rješenja (heuristička informacija), respektivno. Definisanjem dozvoljenog susjedstva nekog čvora za posmatranu jedinku postiže se eliminacija već posjećenih čvorova kao budućih čvorova na putanji. Time su eliminisane

petlje u putanji koje usporavaju konvergenciju. Heuristička promjenljiva η_{ij} uzima se najčešće kao inverzna vrijednost funkcije cilja za odgovarajuće rješenje (kada se vrši njena minimizacija). S obzirom da se tek na osnovu ukupne putanje ona može jednoznačno povezati sa odgovarajućim rješenjem, potrebno je izvršiti procjenu kvaliteta rješenja na osnovu dijela putanje. Kako će to biti izvedeno, zavisi od prirode problema.

Promjenom vrijednosti parametra q_0 može se uticati na intenzivnost pretrage prostora rješenja, tj. na izbor da li istraživati prostor oko trenutno najboljeg rješenja ili istraživati druge putanje. Uzimajući u obzir prethodno navedeno, moguće je blok šemom predstaviti strukturu algoritma ACO metoda (Slika 2.10).



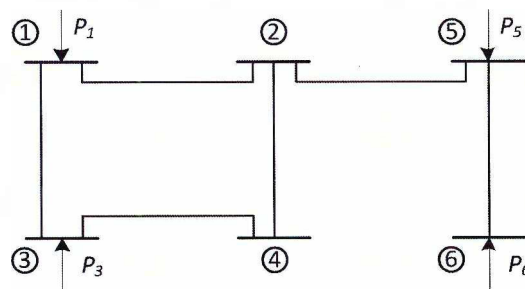
Slika 2.10 Algoritam ACO metoda

2.7.2. Primjena ACO za rješavanje OPMK problema

U [106] je predstavljen pristup za rješavanje OPMK problema zasnovan na ACO metodi. Problem je formulisan tako da pronađena optimalna putanja jedinke u okviru mrežnog modela (koji je razvijen prema analiziranom problemu), odgovara optimalnim lokacijama za fazorske uređaje u sistemu, a u cilju zadovoljavanja željenih performansi tražene mjerne konfiguracije.

OPMK problem se može formulisati kao problem jedinke da pronađe optimalni put od početnog čvora (koji se bira slučajnim izborom) do krajnjeg čvora mrežnog modela problema. Putanja se sastoji od tačno n čvorova koje jedinka mora posjetiti tokom jedne generacije. Prije nego se primijeni ACO algoritam, potrebno je definisati mrežni model koji odgovara problemu. Na izgled

mrežnog modela utiče konfiguracija mreže sistema koji se analizira (Slika 2.11). U odgovarajućem ACO mrežnom modelu (Slika 2.12), svaki čvor mreže sistema predstavljen je sa parom čvorova, tj. mrežni model čini $2n$ čvorova, gdje je n broj čvorova analiziranog sistema. Iako mrežni model obuhvata $2n$ čvorova, jedna potpuna putanja obuhvata tačno n čvorova mrežnog modela, dok svi preostali čvorovi nisu posjećeni. Ovaj vid modelovanja, gdje jednom čvoru stvarnog sistema odgovaraju 2 čvora u ACO mrežnom modelu, usvojen je da bi se omogućilo da jedinka, posjetom jednom ili drugom čvoru iz para čvorova, u stvari odlučuje da li odgovarajući čvor iz sistema treba da bude lokacija za mjerni uređaj. Dakle, n čvorova iz mrežnog modela, ako su dio putanje, simuliraju odabir njima odgovarajućih čvorova kao lokacija za mjerne uređaje, a ostalih n simuliraju zadržavanje postojeće mjerne konfiguracije (tj. nema dodavanja mjernih uređaja na tim lokacijama). Dakle, nakon formiranja ukupne putanje jedinke, moguće je definisati kojem to rješenju odgovara provjeravanjem koji su čvorovi posjećeni.



Slika 2.11 Primjer mreže sistema



- Mjerni uređaj je lociran u čvoru.
- Mjerni uređaj nije lociran u čvoru.

Slika 2.12 Mrežni model koji odgovara primjeru (Slika 2.11)

Za potrebe primjene ACO metoda na predstavljeni primjer (Slika 2.11), a u cilju pronalaženja mjerne konfiguracije koja obezbjeđuje observabilnost sistema sa najmanje angažovanih mjernih uređaja, potrebno je usvojiti odgovarajuće vrijednosti svih parametara ACO metoda. U [106] su predloženi sljedeći parametri koji obezbjeđuju prihvatljive performanse ACO: $\alpha = 1$, $\beta = 5$, $\rho = 0.01$ i $q = 0.9$.

Kvalitet rješenja definisan je funkcijom cilja:

$$F(x) = F_{\text{obs}} \cdot (n - N_{\text{obs}}) + F_{\text{ml}} (N_{\text{m}} - N_{\text{ml}}) + F_{\text{bl}} (N_{\text{b}} - N_{\text{bl}}) + F_{\text{m}} \cdot N_{\text{m}} + F_{\text{zb}} (n - N_{\text{zb}}), \quad (2.24)$$

gdje su:

n – broj čvorova sistema,

N_{obs} – broj observabilnih čvorova u osnovnom slučaju,

N_m, N_b – broj mjerenja i grana, respektivno,

N_{ml}, N_{bl} – broj observabilnih scenarija u slučaju ispada mjerenja i grane, respektivno,

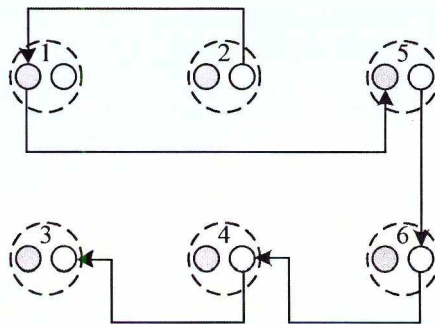
N_{zb} – broj čvorova sistema observabilnih usljed dejstva čvorova sa nultim injehtiranjem i

$F_{obs}, F_{ml}, F_{bl}, F_m, F_{zb}$ – težinski koeficijenti koji odgovaraju baznoj observabilnosti, robusnosti na ispad jednog mjerenja i grane, cijeni konfiguracije i efektu čvorova sa nultim injehtiranjem respektivno.

Svi težinski koeficijenti odabiraju se prema hijerarhiji kriterijuma optimizacije, a za analizirani slučaj važi: $F_{obs} \gg F_{ml} \gg F_{bl} \gg F_m \gg F_{zb}$. Značajni parametri ACO algoritma koji zavise od prirode analiziranog problema su dozvoljeno susjedstvo i heuristička promjenljiva h_{ij} . Pri rješavanju OPMK problema, dozvoljeno susjedstvo posmatranog čvora i je definisano kao ono susjedstvo koje isključuje sve one čvorove ACO mrežnog modela koji su već bili posjećeni od strane posmatrane jedinke, kao i svi čvorovi koji su sa njima upareni.

Heuristička promjenljiva najčešće se računa kao inverzna vrijednost funkcije cilja za rješenje koje odgovara tekućoj putanji. S obzirom da se ona računa i za nedovršene putanje, mora se izvršiti njena procjena na osnovu parcijalno poznatog konačnog rješenja. To rješenje se definiše na osnovu postojećeg puta koji je prešla posmatrana jedinka (dakle puta do posmatranog čvora j). Preostali dio puta se mora pretpostaviti. Pristup koji je predložen u [106] nalaže da se preostali dio puta pretpostavi tako da nema angažovanja novih mjernih uređaja.

Rezultat primjene ACO metoda na OPMK problem u posmatranom primjeru (Slika 2.11), je optimalna putanja jedinke (Slika 2.13). Na osnovu te putanje moguće je odrediti pripadajuće optimalno rješenje, tj. optimalnu mjernu konfiguraciju. U analiziranom slučaju, optimalna mjesta za instalaciju mjernih uređaja su čvorovi 1 i 5.



Slika 2.13 Rezultujuća optimalna putanja

2.8. Metod optimizacije zasnovan na grupi čestica

Optimizacioni metod baziran na populaciji čestica koje mijenjaju svoju poziciju sa vremenom u multidimenzionalnom prostoru zove se *Particle Swarm Optimization* (PSO). Tokom kretanja svaka čestica (jedinka) bira svoju novu poziciju na osnovu sopstvenog iskustva i globalnog iskustva ostalih jedinki u populaciji. Na taj način, kroz generacije, dolazi se do optimalne pozicije. Uspostavljanjem jednoznačne veze između pozicije čestice i rješenja nekog optimizacionog problema moguće je, na osnovu dobijene optimalne pozicije čestice, dobiti optimalno rješenje posmatranog problema.

Za potrebe rješavanja kombinatornih optimizacionih problema širu upotrebu ima posebna vrsta PSO metoda koja se zove binarni PSO metod (BPSO). Kod BPSO, prostor pretrage je diskretan, a promjenljive mogu imati samo vrijednosti 0 i 1. BPSO je prvo predložen u [107]. On predstavlja

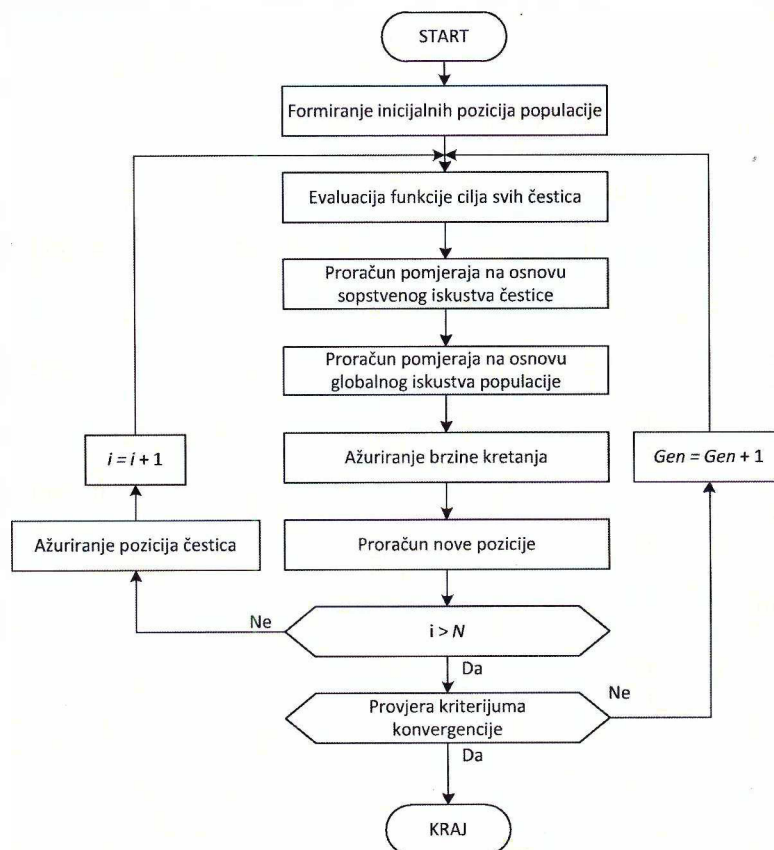
modifikaciju PSO metoda baziranog na realnim vrijednostima promjenljivih. Dalje unaprijeđenje ovog postupka dato je u [108].

2.8.1. Algoritam BPSO metoda

Osnovna procedura kod BPSO metoda je određivanje nove pozicije neke čestice. Ona zavisi od tekuće pozicije, ali i od sopstvenog iskustva i iskustva na nivou populacije. Sopstveno iskustvo definisano je najboljom pozicijom koju je posmatrana čestica zauzimala do posmatrane generacije, dok je globalno iskustvo definisano najboljom pozicijom koju je zauzimala neka čestica iz populacije.

Pored pozicije čestice, u svakoj iteraciji (generaciji) vrši se proračun i ažuriranje parametra koji se naziva brzina čestice. Ovaj parametar se koristi za proračun nove pozicije. Faze karakteristične za BPSO metod kroz koje prolazi jedna čestica kao član populacije su (Slika 2.14):

- proračun pomjeraja na osnovu sopstvenog iskustva čestice,
- proračun pomjeraja na osnovu globalnog iskustva populacije čestica,
- ažuriranje brzine kretanja čestice i
- proračun nove pozicije.



Slika 2.14 Algoritam BPSO metoda

Pomjeraj koji zavisi od sopstvenog iskustva čestice proračunava se na osnovu relacije:

$$d_{1,i}^k = p_{b,i} \oplus x_i^k, \quad (2.25)$$

gdje su:

$p_{b,i}$ – najbolja pozicija čestice i do posmatrane generacije k i

x_i^k – pozicija čestice i u k -toj generaciji.

Analogno prethodnom, računa se i pomjeraj zasnovan na globalnom iskustvu, tj. prema relaciji:

$$d_{2,i}^k = p_{gb} \oplus x_i^k, \quad (2.26)$$

gdje je $p_{b,i}$ – najbolja pozicija koju je do k -te generacije zauzimala neka čestica iz populacije.

Ažuriranje brzine čestice vrši se koristeći rezultate relacija (2.25) i (2.26), a prema relaciji:

$$v_i^{k+1} = v_i^k + c_1 \oplus d_{1,i}^k + c_2 \oplus d_{2,i}^k, \quad (2.27)$$

gdje su:

v_i^k – brzina čestice i u k -toj generaciji i

c_1 i c_2 – slučajno izabrane veličine.

Brzina čestice je parametar koji utiče na to koji dio prostora rješenja će se pretraživati. Naime, velike vrijednosti brzina mogu dovesti do izbjegavanja dobrih rješenja jer previše značajno utiču na tekuću poziciju čestice. S druge strane male brzine mogu uticati da samo mali dio prostora rješenja bude pretražen, što vodi lokalnim optimumima. Stoga, u skladu sa optimizacionim problemom, definiše se maksimalna brzina kretanja čestice. Maksimalna brzina utiče na to sa kojim kvalitetom će biti pretražen prostor rješenja između tekućeg i konačnog položaja čestice.

Konačno, ažuriranje pozicije čestice vrši se prema relaciji:

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1}. \quad (2.28)$$

Iz relacija (2.28) i (2.27) može se da postoje tri faktora koja utiču na novu poziciju čestice. Prvi faktor je inercija prethodno definisane brzine čestice (v_i^k), drugi je uslovljen sopstvenim iskustvom čestice ($c_1 \oplus d_{1,i}^k$), a treći je vezan za iskustvo čitave populacije ($c_2 \oplus d_{2,i}^k$), tj. reprezentuje saradnju među svim jedinkama.

Kao što je to uobičajeno kod metaheurističkih metoda, kriterijum konvergencije može biti maksimalan broj iteracija, dostizanje rješenja nekog određenog kvaliteta ili neki određeni broj iteracija koji ne donosi napredak u kvalitetu najboljeg rješenja.

2.8.2. Primjena BPSO na OPMK problem

S obzirom na primjenu na diskretne optimizacione probleme, BPSO je u [109] predložen kao optimizacioni metod za rješavanje osnovnog OPMK problema. Optimizacioni problem je definisan funkcijom cilja struktuiranom prema (2.3). Pozicija čestice je definisana binarnim nizom dužine jednake broju čvorova posmatranog sistema. Svako mjesto u nizu odgovara jednom od čvorova kandidata za lokaciju fazorskog uređaja. Elementi niza jednaki 1 znače da su u njima odgovarajućim čvorovima locirani fazorski uređaj, u suprotnom su elementi jednaki 0.

Parametar maksimalne brzine je definisan na nivou čitavog niza, tj. svih dimenzija pozicija čestice. Prema tome, ona predstavlja u stvari maksimalni broj uređaja koji može odgovarati nekom rješenju optimizacionog problema. U [109] je kao maksimalna brzina definisana kao 1/4 ili 1/5 od ukupnog broja čvorova sistema. Ovaj limit se provjerava u svakoj iteraciji nakon ažuriranja brzine čestice. Ukoliko dođe do prekoračenja limita, onda se slučajnim izborom vrši smanjivanje brzine dok ona ne zadovolji definisani limit. S obzirom na binarnu predstavu parametra brzine, to se postiže, eliminacijom elemenata jednakih 1 sve dok njihov broj ne bude manji od dozvoljenog.

Potrebno je naglasiti da su performanse BPSO veoma zavisne od inicijalizacije postupka, tj. definisanja početnih pozicija čestica. Uzimajući to u obzir, u [109] je predložen poseban algoritam za

pronalaženje inicijalne mjerne konfiguracije koja zadovoljava sve kriterijume tražene optimizacijom. Pomenuti algoritam ne daje optimalnu mjernu konfiguraciju. Pored toga, predložen je i princip eliminacije pojedinih čvorova kao lokacija za mjerni uređaj. Pomenuti princip je zasnovan na topologiji mreže sistema i osobinama fazorskih uređaja, a može se izraziti kroz dva pravila:

- čvorovi koji imaju samo jednu incidentnu granu ne mogu biti lokacije za mjerni uređaj, i
- čvorovi koji nemaju injeckiranja ne treba da budu lokacije za mjerni uređaj.

Poštovanjem predloženih pravila postiže se smanjivanje dimenzija pozicije čestice, a time i prostora rješenja koji se pretražuje.

Usvojeni kriterijum konvergencije je maksimalni broj iteracija, a u [109] je to 100 iteracija.

2.9. Genetski algoritam sa nedominiranim sortiranjem I i II

Optimizacioni metod zasnovan na standardnom genetskom algoritmu, ali prilagođen za potrebe rješavanja optimizacionih problema sa više ciljeva, je genetski algoritam sa nedominiranim sortiranjem (NSGA) [110]. Široku primjenu GA, je nastavio i NSGA, samo za optimizacione probleme sa više suprotstavljenih ciljeva. U osnovi ima istu strukturu kao i standardni GA. Glavna razlika u odnosu na GA je mehanizam nedominiranog sortiranja. Ovaj mehanizam zasnovan je na Paretovim pravilima [105] i definisanju posebnog parametra za upravljanje diversifikacijom jedinki (*sharing* parametar).

Optimizacioni problem se definiše sa više funkcija cilja, uz eventualna dodatna ograničenja. Uzimajući u obzir da je kod standardnog GA samo jedna funkcija cilja i da se ona koristi za procjenu kvaliteta rješenja, postavlja se pitanje kako se vrednuju rješenja kod NSGA jer postoji više od jedne funkcije cilja. Osnovni mehanizam za procjenu kvaliteta jedinki kod NSGA je Paretovo nedominirano sortiranje. Ono grupiše sve jedinke iz populacije u niz nedominiranih frontova. Jedan Pareto front čine jedinke koje međusobno nisu bolje jedna od druge. Jedinke iz bolje rangiranih frontova su bolje od onih iz niže rangiranih frontova. Sortiranje populacije se vrši prema relacijama iz (2.10).

Nakon sortiranja, kvalitet jedinki je određen samo pripadnošću određenom frontu, pa mu se dodjeljuje tzv. vještačka vrijednost fitnes funkcije, koja se može definisati kao:

$$f_v^r = \frac{N_{pop}}{r}, \quad (2.29)$$

gdje su:

N_{pop} – broj jedinki u populaciji i

r – rang Paretovog fronta (niža vrijednost odgovara većem značaju fronta).

Dakle, veća vrijednost vještačke fitnes funkcije odgovara bolje rangiranim Paretovim frontovima. Posebno je analiziran problem diversifikacije jedinki u populaciji. Naime, zbog prirode optimizacionog problema, kao i operatora GA, mogu se javiti iste jedinke (ili jedinke koje imaju iste vrijednosti funkcija cilja) u većem broju. To uzrokuje lošije performanse u pretraživanju prostora rješenja. Način da se prevaziđe taj problem i utiče na diversifikaciju rješenja je definisanje nove vrijednosti fitnes funkcije koja će uzeti u obzir uticaj postojanja istih jedinki u populaciji. Nova vrijednost fitnes funkcije odabrana je tako da smanji privlačnost istih jedinki, tj. da utiče da ne budu sačuvane za sljedeću generaciju, a može se proračunati prema relaciji:

$$f_{sh_i}^r = f_v^r / n_i, \quad (2.30)$$

gdje je n_i broj istih jedinki kao što je posmatrana jedinka i .

Slijedi da se svakoj jedinki koja nema kopija u populaciji pridruži odgovarajuća vrijednost vještačke fitnes funkcije proračunate prema (2.29), a onim jedinkama koje imaju kopije, pridružuje se vrijednost fitnes funkcije računate prema relaciji (2.30). Ostala procedura NSGA svodi se na primjenu operatora standardnog GA.

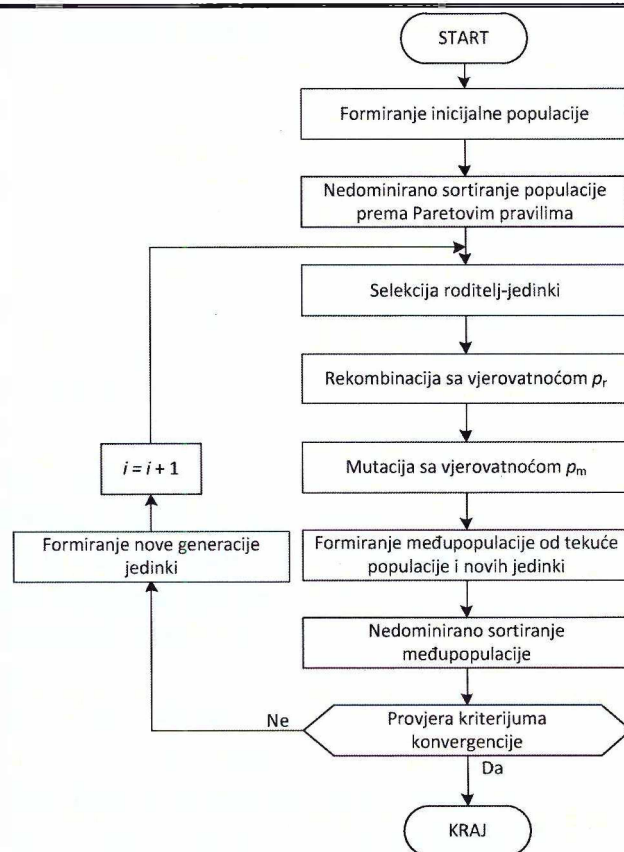
NSGA je veoma efikasan algoritam, ali je kod njega prepoznato nekoliko problema kao što su: složenost proračuna, nedostatak elitizma i problem diversifikacije populacije kroz odabir odgovarajućeg parametra (korekcija fitnes funkcije). Modifikovana verzija NSGA, koja se označava sa NSGA-II predložena je u [111]. Njena osnovna prednost je generalniji pristup rješavanju problema diversifikacije rješenja kroz definisanje novog parametra koji predstavlja rastojanje do susjednih rješenja u Paretovom frontu. Na taj način, izbjegnut je problem preklapanja fitnes funkcija između jedinki koje pripadaju različitim frontovima do koga je dolazilo usljed primjene nemodifikovane relacije (2.30). Promovisanjem jedinki kojima odgovara veće rastojanje od susjeda postiže se poboljšanje kvaliteta istraženosti prostora rješenja.

Za razliku od NSGA, kod NSGA-II se vrijednost tzv. vještačke fitnes funkcije neke jedinke poistovijećuje sa rangom Paretovog fronta kome ona pripada. Ostali operatori su isti kao i kod standardnog GA, sa jednim izuzetkom. Naime, nakon izvršene rekombinacije, kod GA se formira nova populacija, sa ili bez elitističkih mehanizama. Kod NSGA-II se nakon rekombinacije, dobijena populacija objedinjava sa tekućom i ponovo sortira prema Paretovim pravilima nedominiranog sortiranja. Iz novodobijene populacije se odbacuju sve jedinke koje se nisu plasirale u N_{pop} najboljih (gdje je N_{pop} broj jedinki u populaciji).

2.9.1. Algoritam NSGA i NSGA-II

Procedure primjene NSGA i NSGA-II mogu se predstaviti blok dijagramom (Slika 2.15). Nakon generisanja inicijalne populacije slučajnim izborom vrši se sortiranje jedinki u frontove prema Paretovim pravilima. Sortiranje uključuje i proračun rastojanja od susjednih jedinki za svaku jedinku iz populacije. Time je populacija pripremljena za standardni GA operator, selekciju. U zavisnosti od performansi za posmatrani optimizacioni problem, vrši se turnirska ili ruletska selekcija radi kreiranja roditeljske populacije. Prilikom upoređivanja jedinki daje se prednost onim jedinkama koje su iz bolje rangiranih frontova, a ukoliko jedinke pripadaju istom frontu, onda je kvalitetnija ona koja ima veće rastojanje od svojih susjeda.

U skladu sa vjerovatnoćom usvojenom na početku, jedinke iz kreirane roditeljske populacije podvrgavaju se rekombinaciji. Za kombinatorne probleme, najčešće se koriste rekombinacija sa jednom ili dvije tačke razdvajanja. Operator mutacija primijenjuje se na rezultujuću populaciju novih jedinki. Kod osnovnog NSGA metoda ovo bi bila populacija koja bi se usvojila kao nova generacija jedinki. To je jedna od osobina NSGA koja je prepoznata kao loša. Razlog je taj što ne čuva dobra rješenja iz tekuće populacije, tj. nema elitističku strategiju koja je potvrđena kao dobar pristup za ubrzavanje konvergencije. S druge strane, NSGA-II nema tu osobinu jer se kod njega, nakon mutacije, tekuća i populacija novih jedinki objedinjavaju u tzv. međupopulaciju. U cilju čuvanja najboljih jedinki vrši se Paretovo nedominirano sortiranje nove međupopulacije. Kreiranje nove generacije jedinki vrši se tako što se kroz iterativni postupak odbacuju jedinke, počev od najlošije rangiranog fronta sve dok ne ostane broj jedinki jednak usvojenoj veličini populacije. Ovakva elitistička strategija može se uključiti i u okviru NSGA metoda.



Slika 2.15 Blok šema NSGA i NSGA-II

Na kraju svake iteracije vrši se provjera kriterijuma konvergencije koji je najčešće maksimalan broj generacija, ali moguće ga je prilagoditi i konkretnom problemu ukoliko postoji dovoljno informacija o optimalnom rješenju.

2.9.2. Primjena NSGA za rješavanje OPMK problema

U [71] je OPMK problem formulisan sa više ciljeva, a za rješavanje je predložena sprega standardnog GA i NSGA metoda. Naime, definisana su dva cilja optimizacije. Prvi se tiče pronalaženja observabilne konfiguracije sastavljene od minimalnog broja fazorskih uređaja. A drugi se tiče postizanja dovoljnog nivoa redundanse mjernih uređaja kako bi se očuvala observabilnost usljed ispada jedne grane. Uočava se da su ciljevi suprotstavljeni jedan drugom, tj. poboljšanje nekog rješenja s aspekta jednog od ciljeva, vodi ka neispunjavanju preostalog cilja. U cilju pronalaženja optimalne mjere između zadovoljavanja oba cilja optimizacije, primijenjuje se NSGA. Radi efikasnosti algoritma, test observabilnosti je baziran na topološkom pristupu.

Kao što je navedeno u prethodnom poglavlju, prvi korak primjene NSGA je formiranje inicijalne populacije. Ona predstavlja početni dio prostora rješenja koji se pretražuje i korisno je ako se već na početku pretraga pravilno usmjeri. S tim u vezi, u [71] je predložena primjena GA da bi se na pravi način formirala inicijalna populacija za NSGA. Naime, uzimajući u obzir postojanje dva optimizaciona cilja, standardni GA se koristi za posebno rješavanje oba cilja, kako bi se dobili optimumi za oba slučaja. Time se formiraju donja i gornja granica za prostor rješenja koji će pretraživati NSGA.

U cilju efikasnije upotrebe standardnog GA za rješavanje osnovnog OPMK problema, predlaže se sortiranje čvorova. Rang nekog čvora određen je brojem čvorova koje lociranje mjernog uređaja u posmatranom čvoru čini observabilnim. Takođe, vodi se računa o čvorovima koji sigurno nisu dio

optimalnog rješenja (zavisi od analiziranog problema). Ukoliko neki čvor ima rang jednak 1 (a nije čvor sa nultim injektiranjem), onda je njemu susjedni čvor sigurno dio optimalne konfiguracije. Time se prostor rješenja smanjuje jer su neke lokacije za mjerne uređaje već fiksirane. Ukoliko više čvorova ima isti rang, onda se odluka o tome koji čvor od njih je optimalan prenosi na GA koji nakon usvojenog broja generacija daje rezultat. Dakle, ponavlja se iterativni postupak rangiranja čvorova i primjene GA sve dok se ne dođe do konačne mjerne konfiguracije koja je rješenje za prvi cilj optimizacije.

Određivanje optimalne konfiguracije za drugi cilj vrši se analogno postupku koji se koristi za prvi optimizacioni cilj. Naime, kriterijum je nivo redundanse observabilnosti čvorova, koji mora biti dovoljan da očuva observabilnost i u slučaju ispada jedne grane (svih ili samo specificiranih grana). Postupak počinje od prethodno utvrđene mjerne konfiguracije koja obezbijeduje observabilnost. Onda se iterativno dodaju mjerni uređaji u skladu sa rangom čvora. Pomenuti rang se u ovoj fazi definiše kao broj observabilnih čvorova nakon ispada bilo koje grane, ukoliko je mjerni uređaj smješten u posmatranom čvoru. Za čvorove koji imaju isti rang odluku o smještanju mjernih uređaja daje GA. Fitnes funkcija za GA je broj čvorova u sistemu kod kojih je nivo redundanse veći od 2 (tj. pomenuti čvorovi su observabilni preko više od 2 mjerna uređaja).

Rezultat primjene GA su dvije mjerne konfiguracije. Rješenje ukupnog optimizacionog problema treba tražiti između njih. U cilju efikasnije pretrage, jedinka NSGA populacije je formirana kao binarni vektor dužine jednake razlici dužina optimalnih jedinki koje su dobijene kao rezultat primjene standardnog GA. Time je prostor pretrage značajno smanjen, a da se nisu eliminisala kvalitetna rješenja. Pored primjene standardne strukture NSGA (Slika 2.15), problem preklapanja vrijednosti fitnes funkcije između jedinki koje pripadaju različitim Pareto frontovima rješava se prema relaciji:

$$f_v^r = \begin{cases} \min_{j \in F^{r-1}} \left\{ f_{sh_j}^{r-1} \right\} \frac{r-1}{r}, & r > 1 \\ N_{pop}, & r = 1 \end{cases} \quad (2.31)$$

Na ovaj način je obezbijeđeno da fitnes funkcija jedinke, koja ima kopije u svom frontu, ne bude kvalitetnija od jedinki iz niže rangiranih frontova.

Potrebno je naglasiti da rekombinacija može da drastično naruši kvalitet rješenja, pogotovo kad samo jedinke određenog kvaliteta mogu biti elementi populacije. S tim u vezi dodat je operator koji kontroliše kvalitet rekombinacije. Taj operator ima za zadatak da eliminiše sve one mjerne uređaje koji su na nedozvoljenim (nepovoljnim) pozicijama, a dodajući nove mjerne uređaje sve dok se ne zadovolji uslov observabilnosti. Mjerni uređaj je nepovoljno lociran ako se broj neobservabilnih čvorova ne smanjuje nakon uklanjanja posmatranog mjernog uređaja. Nove lokacije za mjerne uređaje se biraju na osnovu ranije definisanog ranga čvora. Ukoliko se bira između više isto rangiranih čvorova, primijenjuje se slučajno biranje. Na ovaj način se održava efikasnost algoritma. U slučaju da pomenuti operator ne pronađe prihvatljivu jedinku, posmatrana jedinka se odbacuje i formira se nova, slučajno generisana, tako da zadovoljava kriterijum kvaliteta.

3. CELULARNI GENETSKI ALGORITAM

Celularni genetski algoritam prvi put je predstavljen u [112]. U odnosu na ostale varijante GA metoda, osnovna karakteristika CGA je struktura populacije. Naime, kod standardnog GA, populacija je organizovana u obliku jednodimenzionalnog niza jedinki. Kod CGA populacija je organizovana u obliku dvodimenzionalnog niza (kvadratna ili pravougaona struktura). Takođe, kod CGA definiše se novi pojam u odnosu na GA, a to je susjedstvo jedinke. Usljed toga, jedinkama je dozvoljena interakcija samo sa sopstvenim susjedstvom. Takođe, često se koristi i analogija sa ćelijskim strukturama, pa se uvodi parametar aktivnosti jedinki, tj. jedinke se dijele na aktivne i neaktivne. Samo aktivne jedinke učestvuju u standardnim GA operacijama. Usljed ovakve strukture populacije, CGA ima dobre performanse kada je pretraživanje prostora rješenja u pitanju, a održava i zadovoljavajući nivo diversifikacije jedinki u populaciji. To je uslovilo njegovu primjenu na rješavanje složenih optimizacionih problema.

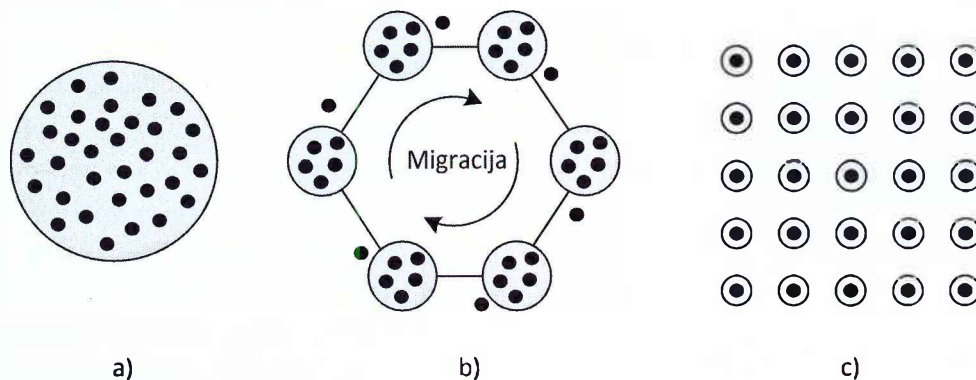
3.1. Struktura populacije

Populacija jedinki kod GA predstavlja dio prostora rješenja. Primjenom GA operatora nastoji se pretraga prostora rješenja usmjeriti samo na kvalitetna rješenja, kako bi se došlo do globalnog optimuma. Standardni GA i većina njegovih varijanti koriste jedinstvenu, centralizovanu populaciju (Slika 3.1) jedinki na koju se cjelovito primijenjuju operatori (selekcija, rekombinacija i mutacija). Sa rješavanjem sve složenijih optimizacionih problema javila se potreba za unaprijeđivanjem performansi, prije svega kada su brzina pretrage i kvalitet rješenja u pitanju. Najjednostavniji pristup je bio dijeljenje prostora rješenja (populacije) i paralelna primjena operatora GA. Tako se došlo do ideje decentralizovane populacije koja je posebno pogodna za paralelno procesiranje. Ideja upotrebe paralelnih, distribuiranih populacija zasnovana je na ideji da će izolovanost subpopulacija dovesti do veće diversifikacije jedinki [113]. U [114] je pokazano da algoritmi koji koriste decentralizovane populacije kvalitetnije pretražuju prostor rješenja, pa time postižu bolje kvalitativne rezultate uz manje angažovano vrijeme od ekvivalentnih algoritama sa centralizovanom populacijom. Za razliku od centralizovane populacije (Slika 3.1a), postoji mnogo načina da se izvrši decentralizacija populacije, ali sve varijante decentralizovane strukture mogu se svesti na dva osnovna vida: distribuirana (Slika 3.1b) i celularna struktura populacije (Slika 3.1c).

Distribuiranu strukturu populacije karakteriše podjela populacije na nekoliko izolovanih djelova (ostrva, tj. subpopulacija). Operatori GA se posebno primijenjuju nad subpopulacijama. Omogućena je razmjena nekih (najčešće najboljih) jedinki između izolovanih djelova kako bi se uticalo na diversifikaciju jedinki u okviru subpopulacija, i time izbjegli lokalni optimumi. Iako su najčešće operatori GA jednako podešeni za primjenu na svakoj subpopulaciji, postoje i pristupi koji koriste različita podešavanja [115].

S druge strane, kod celularne strukture populacije, decentralizacija predstavlja podjelu populacije na preklapajuća susjedstva fiksne veličine karakteristična za svaku jedinku posebno. Pritom, interakcija je moguća samo između jedinki iz istog susjedstva. Preklapanje susjedstava jedinki omogućava kvalitetnije pretraživanje prostora rješenja. Jedan razlog je usporeno širenje jedinki kroz populaciju usljed decentralizacije u vidu malih susjedstava, pa je time izraženija diversifikacija. Drugi je snažnija promocija kvalitetnih rješenja unutar svakog od susjedstava [116]. Preklapanje susjedstava odgovara mehanizmu migracije (razmjene jedinki) kod distribuirane

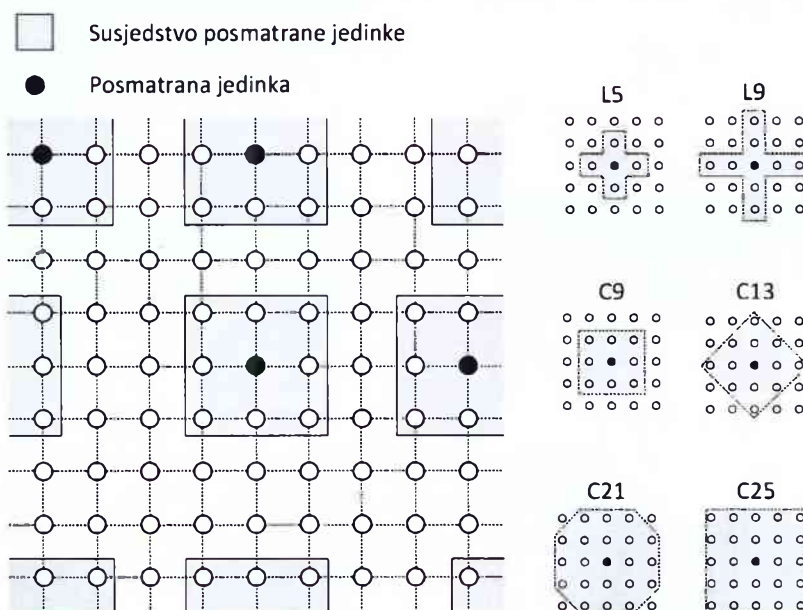
strukture populacije. Usvajanjem veće ili manje veličine susjedstva postiže se respektivno veći ili manji stepen preklapanja susjedstava, a time i migracije jedinki.



Slika 3.1 Struktura populacije kod GA

Posmatrajući oba vida decentralizovane strukture mogu se izvesti njihove osnovne razlike. Naime, celularnu strukturu karakteriše značajno manja dimenzija subpopulacije (mala susjedstva jedinki) u kojima su jedinke snažno povezane. S druge strane, distribuiranu strukturu populacije karakteriše značajno veći broj jedinki u okviru subpopulacije, ali je veza između jedinki slabija u odnosu na celularnu strukturu.

Osnovna karakteristika celularne strukture je susjedstvo jedinke. Ako se posmatra dvodimenzionalna struktura populacije (Slika 3.1), moguće je odabrati susjedstva različitih veličina (Slika 3.2). Koju veličinu usvojiti, određuju performanse primjene CGA na konkretan optimizacioni problem. Bitno je naglasiti da se jedinkama na granicama populacije kao susjedne računaju jedinke sa suprotnog kraja populacije. Takva struktura populacije naziva se toroidalna struktura (Slika 3.2).



Slika 3.2 Definisanje susjedstva jedinki kod celularne strukture populacije

Oznake za susjedstva su: L_n se koristi za susjedstvo formirano od $n-1$ najbližih jedinki po vertikali ili horizontali, dok se sa C_n označava susjedstvo od $n-1$ jedinki najbližih posmatranoj jedinki. Dva

susjedstva koja imaju najširu primjenu su L5 (često se zove i Von Neumann ili NEWS susjedstvo) i C9 poznato kao Moore-ovo susjedstvo.

Svi standardni operatori GA primijenjuju se na nivou susjedstva. Dakle, u okviru susjedstva se biraju jedinke roditelji, zatim se primijenjuju rekombinacija i mutacija i kreira nova jedinka. S obzirom da se kao rezultat rekombinacije dobijaju dvije jedinke (Slika 2.6), čuva se ona jedinka koja je naslijedila veći dio kvalitetnijeg roditelja. Zatim, poštujući usvojeni kriterijum, vrši se zamjena posmatrane jedinke sa novodobijenom. Najčešće se kao kriterijum koristi kvalitet dobijene jedinke u odnosu na posmatranu.

Pošto je struktura populacije decentralizovana, čime se i operatori GA primijenjuju odvojeno, otvara se pitanje kada ažurirati populaciju sa novim jedinkama, na kraju generacije (kada se izvrše GA operatori za susjedstva svake jedinke iz populacije), ili odmah nakon izvršenih GA operatora na susjedstvu posmatrane jedinke. Ukoliko se ažuriranje populacije vrši na kraju generacije, istovremeno za svaku jedinku iz populacije, onda se radi o sinhronom CGA [117]. S druge strane, ako se ažuriranje vrši u toku generacije, nakon izvršenih operatora na nivou susjedstva jedinki, onda je to asinhroni CGA. U okviru jedne generacije treba izvršiti onoliko operacija reprodukcije koliko je potrebno da bi se kreirala nova populacija usvojene veličine. Za razliku od sinhronog CGA, kod asinhronog je od velikog značaja redosljed prema kojem se jedinke (odnosno njihova susjedstva) podvrgavaju GA operatorima. Usljed toga, postoji više pristupa i to:

- linearni – redosljed je formiran u skladu sa numeracijom elemenata u odgovarajućoj matrici, dakle red po red počev od gornjeg reda (vrste) ka nižim, s lijeva na desno,
- fiksni slučajni raspored – pri inicijalizaciji CGA usvaja se slučajna permutacija osnovnog (linearnog) redosljeda jedinki koja je novi redosljed koji se poštuje u svakoj generaciji,
- ažurirani slučajni raspored – slično prethodnom, formira se permutacija redosljeda jedinki, samo se ona ažurira u svakoj generaciji za razliku od prethodnog slučaja i
- slučajni raspored – u skladu sa nazivom, svaka jedinka koja se podvrgava GA operatorima bira se slučajno (uniformna raspodjela), pri čemu je u toku jedne generacije moguće posjetiti istu jedinku više puta. Usljed toga, za razliku od ostalih pristupa, ovdje je potrebno limitirati broj slučajno odabranih jedinki na broj koji je dovoljan da se popuni nova populacija zadate veličine.

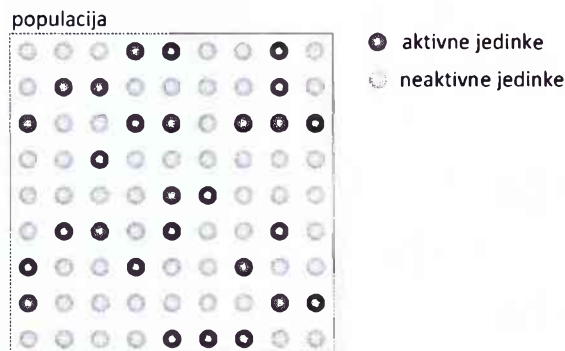
Struktura populacije kod CGA najčešće je kvadratna (Slika 3.2), ali može se koristiti i pravougaona, kada se uz odabir odgovarajućeg susjedstva može uticati na dodatnu diversifikaciju jedinki u populaciji kada se rješavaju složeni optimizacioni problemi [118].

3.2. Evoluciono pravilo

Kod standardnog CGA, sve jedinke su aktivne i mogu učestvovati u selekciji i biti podvrgnute rekombinaciji i mutaciji. U [119] je predložen pristup za poboljšanje diversifikacije populacije u odnosu na standardni CGA. To se postiže uvođenjem evolucionog pravila koje opredjeljuje koje jedinke mogu biti podvrgnute djelovanju GA operatora.

Prilikom inicijalizacije populacije, svim jedinkama se slučajnim izborom dodijeljuju statusi „aktivan“ ili „neaktivan“. Prema evolucionom pravilu (Slika 3.3), svim jedinkama se ažurira status jednovremeno i to na kraju svake generacije CGA. Samo aktivne jedinke mogu imati interakciju sa sopstvenim susjedstvom, odnosno učestvovati u standardnim GA operacijama. Ovim se redukuje pritisak koji ima operator selekcije, što je korisno jer obezbjeđuje efikasnije izbjegavanje

prijevremene konvergencije, tj. lokalnih optimuma. Time je poboljšana stopa diversifikacije jedinki koja postoji kroz preklapanje susjedstava, kao i efikasnost istraživanja prostora rješenja na nivou susjedstva posmatrane jedinke.



Slika 3.3 Ilustracija „igre života“

Predloženo evoluciono pravilo zove se „igra života“. Procedura njegove primjene može se opisati sljedećim pravilima:

- neaktivna jedinka koja je okružena sa tri aktivne, postaje aktivna,
- aktivna jedinka koja je okružena sa 2 ili 3 aktivne jedinke, ostaje aktivna i
- u svakom drugom slučaju, jedinka postaje ili ostaje neaktivna.

Kada se koristi evoluciono pravilo, kao kriterijum konvergencije, pored broja generacija, može se usvojiti i stagnacija u broju aktivnih jedinki. Naime, kada se prilikom inicijalizacije, slučajnim izborom jedinke podijele na aktivne i neaktivne, približno 50% njih će biti aktivno. Usljed primjene evolucionog pravila taj broj će kroz generacije opadati, sve dok se ne ustali na nekom broju. Tada evoluciono pravilo više nema efekta i tada su se stekli uslovi za prekid iterativnog postupka.

Pored efekta koji ima na diversifikaciju jedinki, evoluciono pravilo dijelom smanjuje proračunske zahtjeve CGA, pa algoritam zahtjeva manje vremena da postigne optimum, tj. da konvergira rješenju. Izbor o primjeni evolucionog pravila treba donijeti na osnovu prirode optimizacionog problema. Ako optimizacioni problem karakteriše veliki broj lokalnih optimuma, onda je upotreba evolucionog pravila pravo rješenje. Ukoliko je dimenzionalnost problema velika, a lokalni optimumi nisu izraženi, onda upotreba evolucionog pravila može usloviti da konvergencija ka optimalnom rješenju bude sporija. Razlog za to je veliki broj generacija uzrokovan izraženom diversifikacijom rješenja, usljed koje se detaljno pretražuje širok prostor rješenja (karakterističan za probleme velike dimenzionalnosti). U slučaju velikog broja generacija, broj aktivnih jedinki se smanji prije nego što se CGA približi dijelu prostora rješenja gdje se očekuje globalni optimum, pa je pretraga manje efikasna. Pravi izbor za ovakve probleme su standardni CGA sa manjom populacijom ukoliko se, pored kvaliteta rješenja, želi postići i kratko vrijeme angažovanja proračunskih kapaciteta.

3.3. Primjena CGA za rješavanje OPMK problema

Pronalaženje strateških lokacija za mjerne uređaje u cilju zadovoljavanja željenih karakteristika mjerne konfiguracije je složeni kombinatorno-optimizacioni problem. Kao što je prikazano u prethodnim poglavljima, različite metaheurističke metode se koriste za njegovo rješavanje. Među njima, evolucione metode su posebno popularne. Jedan od glavnih razloga za to je dobar odnos između diversifikacije pretrage kao i dobrog pretraživanja u zoni kvalitetnih rješenja. Ova

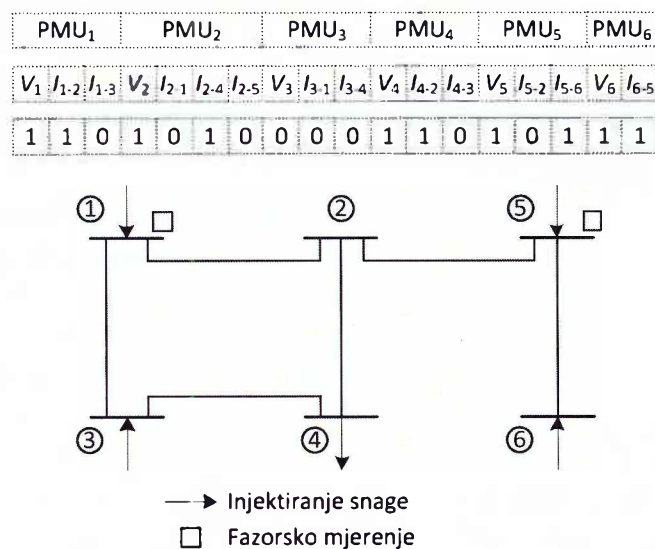
karakteristika posebno dolazi do izražaja kod decentralizovane strukture populacije koja je slučaj kod CGA.

Uspješna primjena CGA uslovljena je načinom na koji se formuliše optimizacioni problem. Naime, potrebno je odabrati strukturu hromozoma tako da jednoznačno definiše rješenje optimizacionog problema, pritom vodeći računa o memorijskim i proračunskim zahtjevima. Takođe, formulisanje funkcije cilja na pravi način omogućava CGA da precizno evaluiira svaku karakteristiku jedinke čime pravilno usmjerava proces pretrage. Time se direktno utiče na kvalitet konvergencije CGA, koji se ogleda u kvalitetu postignutog rješenja i efikasnosti njegovog pronalaženja.

3.3.1. Struktura hromozoma

Osnovna jedinica populacije CGA, je hromozom, tj. jedinka. Njen zadatak je da u potpunosti predstavlja sve osobine rješenja koje su od interesa za optimizaciju. U slučaju OPMK problema, jedinka predstavlja mjernu konfiguraciju, i to mora biti jednoznačno. Kada se traži mjerna konfiguracija sastavljena od fazorskih mjerenja, hromozom je struktuiran tako da uzme u obzir lokaciju kao i broj kanala koji su angažovani kod posmatranih mjernih uređaja. Kanali kod fazorskih uređaja odgovaraju jednom naponskom i jednom ili više mjerenja strujnih fazora. Naponsko mjerenje se odnosi na mjerenje fazora napona u čvoru gdje se fazorsko mjerenje nalazi, a mjerenja strujnih fazora odgovaraju incidentnim granama. Struktura hromozoma uslovljena je sistemom koji se analizira. Slika 3.4 daje prikaz strukture hromozoma za konkretnu mrežu u slučaju višekanalne predstave fazorskih uređaja. Za jednostavniji slučaj, kada se ne analizira angažovanost mjernih kanala po fazorskom uređaju, dužina hromozoma je jednaka broju čvorova analiziranog sistema (Slika 2.3).

Struktura hromozoma (Slika 3.4) mora se kreirati tako da se uzmu u obzir svi mogući kanali za mjerni uređaj lociran u nekom od čvorova sistema. Maksimalan broj kanala koji se može angažovati, uslovljen je topologijom mreže analiziranog sistema. On je definisan brojem incidentnih grana čvora u kome je mjerni uređaj lociran. Dakle, u okviru strukture hromozoma, nije ravnomjerno raspodijeljen udio informacija o svakom angažovanom mjernom uređaju.



Slika 3.4 Struktura hromozoma za višekanalna fazorska mjerenja

Može se definisati dužina hromozoma kada se uzima u obzir višekanalna priroda fazorskih uređaja prema relaciji:

$$L = n + 2b \quad (3.1)$$

gdje su:

n – broj čvorova mreže analiziranog sistema i

b – broj grana grafa koji odgovara mreži analiziranog sistema.

3.3.2. Funkcija cilja

CGA je optimizacioni metod koji se koristi za optimizacione probleme sa jednim ciljem. Dakle, u skladu sa tim potrebno je formulisati i funkciju cilja. Za OPMK problem koji uzima u obzir i višekanalnu predstavu fazorskih uređaja optimizacioni model formulisani je prema relaciji:

$$\begin{aligned} x_{\text{opt}} &= \underset{x}{\operatorname{argmin}}(F(x)) \\ \text{s.t.} \quad n_{\text{ac}} &\leq l_{\text{ac}} \end{aligned} \quad (3.2)$$

gdje su:

x – vektor vrsta dužine L , čiji i -ti element uzima vrijednost 1 (odgovarajući kanal posmatranog fazorskog mjerenja je aktivan) ili 0 (odgovarajući kanal posmatranog fazorskog mjerenja se ne koristi),

n_{ac} – broj aktivnih kanala za mjernu konfiguraciju predstavljenu sa x i

l_{ac} – usvojeni dozvoljeni broj aktivnih mjernih kanala.

Funkcija cilja, tj. fitnes funkcija definiše se prema:

$$F(x) = w_{\text{obs}}(n - N_{\text{obs}}) + w_{\text{ml}}(N_{\text{m}} - N_{\text{os1}}) + w_{\text{bl}}(b - N_{\text{os2}}) + w_{\text{m}} \cdot N_{\text{m}}, \quad (3.3)$$

gdje su:

w_{obs} – težinski koeficijent vezan za kriterijum postizanja observabilnosti u osnovnoj mjernoj konfiguraciji,

w_{ml} i w_{bl} – težinski koeficijent vezan za kriterijum postizanja robusnosti mjerne konfiguracije, i to za slučaj ispada jednog fazorskog mjerenja i jedne grane mreže, respektivno,

w_{m} – težinski koeficijent koji odgovara značaju cijene mjerne konfiguracije,

N_{obs} – broj observabilnih čvorova za osnovnu mjernu konfiguraciju,

N_{m} – broj angažovanih mjernih uređaja i

$N_{\text{os1}}, N_{\text{os2}}$ – broj observabilnih scenarija u slučaju ispada jednog mjerenja, ili jedne grane, respektivno.

Vrijednosti parametara $N_{\text{m}}, N_{\text{obs}}, N_{\text{os1}}$ i N_{os2} opisuju mjernu konfiguraciju, a određuju se nakon analize observabilnosti za posmatranu mjernu konfiguraciju x .

Prema definiciji optimizacionog problema iz (3.2), zadatak CGA je da pronađe mjernu konfiguraciju (koja se predstavlja sa vektorom x), tako da funkcija cilja definisana u (3.3) ima minimalnu vrijednost. Optimizacioni problem ima jedno ograničenje tipa jednakosti. Ono se odnosi na dozvoljeni limit angažovanja kanala kod mjernih uređaja. Ovaj limit je uključen zbog, u praksi, realnih komunikacionih ograničenja na mjestima instalacije fazorskih uređaja, ali i zbog cijene fazorskih uređaja na koju utiče i broj angažovanih kanala. Iako je ovdje OPMK problem definisan kao optimizacioni sa jednim ciljem, CGA mora ispuniti više od jednog cilja prilikom potrage za optimalnom mjernom konfiguracijom. Ovi ciljevi su: tehnički (observabilnost i robusnost mjerne konfiguracije) i ekonomski (minimalni broj angažovanih mjernih uređaja). Različiti ciljevi predstavljeni su posebnim djelovima funkcije cilja uz odgovarajuće težinske koeficijente. S obzirom

da su tehnički ciljevi suprotstavljeni ekonomskom, potrebno je definisati odgovarajuće težinske koeficijente tako da obezbijede pronalaženje mjerne konfiguracije koja ispunjava tehničke ciljeve uz minimalnu cijenu. Da bi se tehnički ciljevi promovisali kao bitniji od ekonomskog, potrebno im je pridružiti veće težinske koeficijente.

Odabiranje pravih vrijednosti težinskih koeficijenata uslovljeno je hijerarhijom ciljeva optimizacije. U okviru OPMK problema koji se ovdje analizira, hijerarhija je sljedeća: observabilnost bazne konfiguracije (w_{obs}), robusnost (w_{ml} , w_{bl}) i broj angažovanih fazorskih mjerenja (w_m). Dakle, težinski koeficijent ima veću vrijednost ukoliko je odgovarajući cilj važniji. Međutim, nije dovoljno proizvoljno odabrati vrijednosti težinskih koeficijenata u skladu sa usvojenom hijerarhijom. Ukoliko je razlika između koeficijenata manja nego što bi to trebalo da bude, neka rješenja koja ispunjavaju kriterijume niže važnosti bi imala bolju vrijednost funkcije cilja od nekih prihvatljivijih rješenja. To može biti objašnjeno na primjeru.

Ako se, radi jednostavnosti, posmatra samo osnovni OPMK problem, tj. pronalaženje strateških lokacija za minimalan broj mjernih uređaja da bi se osigurala observabilnost. U tom slučaju funkcija cilja ima oblik:

$$F = w_{obs} (n - N_{obs}) + w_m N_m. \quad (3.4)$$

Ako se posmatra neki sistem od 100 čvorova, a težinski faktori su proizvoljno odabrani prema hijerarhiji (observabilnost, cijena, respektivno) kao $w_{obs} = 2$, $w_m = 1$. U nekoj generaciji CGA u populaciji, mogu se pojaviti jedinke sa sljedećim karakteristikama:

- jedinka x , koju karakteriše $N_{obs} = 99$ i $N_m = 20$, čime je odgovarajuća vrijednost funkcije cilja $F_x = (100 - 99) \cdot 2 + 20 \cdot 1 = 22$,
- jedinka y , koju karakteriše $N_{obs} = 100$ i $N_m = 30$, čime je odgovarajuća vrijednost funkcije cilja $F_y = (100 - 100) \cdot 2 + 30 \cdot 1 = 30$.

Dakle, može se vidjeti da jedinka x , koja odgovara mjernoj konfiguraciji koja ne ispunjava kriterijum observabilnosti, ima manju vrijednost funkcije cilja od jedinke y , pa će biti sačuvana za sljedeću generaciju. To uslovljava lošiju konvergenciju CGA, jer utiče na pretraživanje dijela prostora rješenja koji nema zadovoljavajući kvalitet. To ne bi bio slučaj da su odgovarajući težinski koeficijenti odabrani kao $w_{obs} = 20$, $w_m = 1$. U ovom slučaju, odgovarajuće vrijednosti funkcija cilja su $F_x = 60$ i $F_y = 30$ što obezbjeđuje čuvanje stvarno kvalitetnije jedinke za sljedeću generaciju, tj. jedinke y . Efekat promocije lošijih jedinki može se desiti i za vrijednosti težinskih koeficijenata $w_{obs} = 20$, $w_m = 1$. Razlog za to je zavisnost vrijednosti težinskih koeficijenata od veličine analiziranog sistema. Otvara se pitanje kako usvojiti prave vrijednosti za težinske koeficijente.

Rezultati istraživanja u oblasti rješavanja OPMK problema pokazuju da minimalan broj fazorskih mjerenja potreban za omogućavanje potpune observabilnosti nije manji od 20% od ukupnog broja čvorova u sistemu [66]. Slijedi, da posmatrajući pomenuti primjer sistema sa 100 čvorova, može se definisati granični slučaj za određivanje težinskih koeficijenata, posmatraju se dvije jedinke:

- prva, koja odgovara mjernoj konfiguraciji koja ima 20% čvorova sistema sa fazorskim mjerenjima, a obezbjeđuje observabilnost svih osim jednog čvora sistema, tada je funkcija cilja:
$$F_x = (100 - 99) \cdot w_{obs} + 20 \cdot w_m = w_{obs} + 20 \cdot w_m$$
- druga, koja odgovara mjernoj konfiguraciji koja ima fazorska mjerenja u svim čvorovima sistema (i time obezbjeđuje potpunu observabilnost):

$$F_x = (100 - 100) \cdot w_{\text{obs}} + 100 \cdot w_m = 100 \cdot w_m$$

Kako bi se obezbijedila promocija stvarno kvalitetnijih rješenja, mora da važi:

$$F_y < F_x \Rightarrow 100 \cdot w_m < w_{\text{obs}} + 20 \cdot w_m \Rightarrow w_{\text{obs}} > 80w_m. \quad (3.5)$$

Dakle, može se zaključiti da, ukoliko se težinski koeficijenti izaberu tako da je hijerarhijski važniji koeficijent, bar $0.8n$ puta veći (gdje je n broj čvorova sistema), neće doći do promocije jedinki slabijeg kvaliteta, a time će i proces pretrage biti efikasniji.

Posebna ograničenja, karakteristična za neki praktični sistem, (nedostatak komunikacione infrastrukture, ograničen kapacitet) mogu usloviti da isti fazorski uređaj ima različitu cijenu instalacije za različite čvorove u sistemu. U tom slučaju član funkcije cilja iz (3.3) koji odgovara cijeni mjerne konfiguracije treba prilagoditi kako bi uzeo u obzir cijenu instalacije za konkretan slučaj. Kako bi se to postiglo, potrebno je raspolagati sa cijenom instalacije mjernog uređaja po čvoru posmatranog sistema. U tom slučaju, odgovarajući član funkcije cilja će biti $w_m p_m$, gdje p_m predstavlja normalizovanu cijenu mjerne konfiguracije:

$$p_m = \frac{P_m}{P_{\text{PMU}}}, \quad (3.6)$$

gdje su:

P_m – stvarna cijena mjerne konfiguracije (procijenjena prema raspoloživim informacijama karakterističnim za konkretan sistem) i

P_{PMU} – maksimalna cijena pojedinačne instalacije mjernog uređaja u nekom od čvorova posmatranog sistema.

Kada se koristi normalizovana cijena mjerne konfiguracije, nije potrebno mijenjati težinski koeficijent w_m koji je ranije definisan, jer ako se pretpostavi ista cijena instalacije fazorskih uređaja po čvoru (nema praktičnih ograničenja), p_m postaje N_m , tj., član iz funkcije cilja koji se odnosi na ekonomski kriterijum je isti kao u (3.3).

Definisanje težinskih koeficijenata može se izbjeći uz definisanje optimizacionog problema na odgovarajući način. Naime, ukoliko se neki optimizacioni ciljevi mogu fiksirati kao obavezni kvaliteti optimalnog rješenja, onda se oni mogu iskoristiti za ograničavanje prostora rješenja. Tako u slučaju OPMK problema, mjerna konfiguracija mora zadovoljiti tehničke kriterijume optimizacije (observabilnost osnovne mjerne konfiguracije, robusnost konfiguracije na ispad fazorskog mjerenja ili grane mreže sistema, komunikaciona ograničenja u vidu broja angažovanih kanala, ili nedostupnosti komunikacionih kapaciteta u nekim čvorovima sistema). Ti kriterijumi se mogu formulisati kao ograničenja tipa jednakosti (ako su tačno poznati kvaliteti rješenja), ili nejednakosti (ako postoji opseg rješenja koja zadovoljavaju s aspekta posmatranih kriterijuma). U tom slučaju, optimizacioni problem se može formulisati kao:

$$\begin{aligned} x_{\text{opt}} &= \underset{x}{\operatorname{argmin}}(F(x)) \\ \text{s.t. } N_{\text{obs}} &= n, N_{\text{os1}} = N_m, N_{\text{os2}} = b \\ x_i &= 0, i = 1, \dots, p \\ n_c &= l_c \end{aligned} \quad (3.7)$$

gdje su:

x – vektor vrsta dužine n (broj čvorova sistema) čiji i -ti element uzima vrijednost 1 (i -ti čvor je lokacija za fazorsko mjerenje) ili 0 (i -ti čvor nije lokacija za fazorsko mjerenje),

x_i – element vektora vrste x koji odgovara čvoru koji ne može biti lokacija za fazorsko mjerenje usljed nepostojanja komunikacione infrastrukture,

p – dužina hromozoma,

n_c – broj aktivnih kanala fazorskih uređaja i

l_c – usvojeni limit za broj angažovanih mjernih kanala.

Funkcija cilja definiše se kao:

$$F(x) = \sum_{i=1}^n x_i. \quad (3.8)$$

Prva tri ograničenja iz (3.7) odgovaraju ograničenjima koja obezbijavaju da mjerna konfiguracija bude observabilna u osnovnom slučaju, kao i u slučaju ispada jednog mjernog uređaja ili grane. Promjena uklopnog stanja mreže je sastavni dio normalnog radnog režima nekog sistema. To je ovdje modelovano sa ispadom jedne grane, ali za konkretan slučaj, može se prilagoditi listi očekivanih manipulacija u sistemu. S druge strane, ispad jednog mjerenja se uzima u obzir i pored toga što je pouzdanost fazorskih mjerenja veća nego kod klasičnih mjernih uređaja. Razlog za to je mogući problem u prenosu informacija prema centru upravljanja. Tri su parametra koja opisuju ova ograničenja: N_{obs} , N_{os1} i N_{os2} . Ova ograničenja se provjeravaju putem testa observabilnosti. Druga dva parametra se dobijaju nakon testiranja observabilnosti za sve moguće scenarije ispada jednog mjerenja ili grane. Svi scenariji su izvedeni iz osnovne mjerne konfiguracije i uklopnog stanja mreže. S obzirom na to da provjera robusnosti mjerne konfiguracije zahtjeva veliki broj provjera observabilnosti, potrebno je voditi računa o performansama metoda koji se koristi za testiranje observabilnosti.

Posljednja dva ograničenja tiču se ograničenja u komunikacionoj infrastrukturi u čvoru gdje je mjerenje locirano i dostupnosti kanala po fazorskom uređaju. Ova ograničenja se uzimaju u obzir kroz definisanje strukture hromozoma. Na taj način izbjegnuta je nepotrebna evaluacija ovog kriterijuma tokom svake generacije CGA. Međutim, evaluacija dozvoljenog limita u broju aktivnih kanala fazorskog mjerenja vrši se pomoću dodatnog operatora dodatog nakon CGA operatora. On provjerava broj aktivnih kanala za svaku jedinku i , ukoliko je dozvoljeni broj prevaziđen, slučajni broj kanala se oslobađa sve dok se ne zadovolji usvojeni limit.

Kod definicije optimizacionog problema kao u (3.7) populaciju mogu činiti samo jedinke zadovoljavajućeg kvaliteta, tj. one jedinke koje ispunjavaju sva definisana tehnička ograničenja. Dakle, kada cijena mjerne konfiguracije ne bi bila od interesa, bilo koja jedinka iz populacije bi se mogla usvojiti kao optimalno rješenje. Na taj način, CGA operatori vrše kombinovanje samo jedinki koje posjeduju zahtijevane tehničke kvalitete. Osnovna ideja je da se omogući kombinovanje dobrih osobina više jedinki kroz generacije kako bi se kreirala najbolja jedinka, tj. rješenje optimizacionog problema.

Izbjegavanje definisanja hijerarhije optimizacionih ciljeva kroz odgovarajuće težinske koeficijente omogućava širu upotrebu optimizacionog metoda bez potrebe prilagođavanja funkcije cilja.

3.3.3. Analiza observabilnosti

Glavni kriterijum za evaluaciju mjerne konfiguracije je postizanje potpune observabilnosti sistema. U cilju postizanja veće robusnosti, osnovni kriterijum je proširen sa zahtjevima obezbijedivanja observabilnosti i u slučaju ispada mjerenja ili grane. Evaluacija kriterijuma vrši se pomoću testiranja observabilnosti. Uzimajući u obzir da je potrebno analizirati i efekat dostupnosti

mjernih kanala kod fazorskih mjerenja, neophodno je primijeniti odgovarajući pristup. Metod zasnovan na faktorizaciji Jacobian matrice koristi se ovdje zbog svoje fleksibilnosti. Za analizirani primjer (Slika 3.4) fazorska mjerenja su locirana u čvorovima 1 i 5, pa je odgovarajuća Jacobian matrica mjerenja:

$$H = \begin{matrix} V_1 \\ I_{1-2} \\ I_{1-3} \\ V_5 \\ I_{5-2} \\ I_{5-6} \end{matrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}, \quad (3.9)$$

gdje su:

V_1 , I_{1-2} i I_{1-3} predstavljaju mjerenje napona i struja grana za fazorsko mjerenje u čvoru 1 i

V_5 , I_{5-2} i I_{5-6} predstavljaju mjerenje napona i struja grana za fazorsko mjerenje u čvoru 5.

Oba posmatrana fazorska mjerenja imaju isto ograničenje u broju iskoristivih mjernih kanala, tj. 3, što odgovara maksimumu za fazorska mjerenja postavljena u tim čvorovima. Kada se analiziraju fazorska mjerenja sa nižim ograničenjem u broju dozvoljenih kanala, onda se odgovarajuća vrsta(e) iz matrice H ukloni.

Observabilnost sistema provjerava se nakon trougaone faktorizacije matrice H . Ukoliko je broj dijagonalnih elemenata različitih od nule jednak broju čvorova sistema, sistem je potpuno observabilan. Faktorizacijom matrice iz (3.9) dobija se:

$$H = \begin{matrix} V_1 \\ I_{1-2} \\ I_{1-3} \\ V_5 \\ I_{5-2} \\ I_{5-6} \end{matrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

U (3.10) nije vršena promjena redoslijeda kolona jer svakoj koloni odgovara čvor sistema. Kolone su raspoređene tako da prate redne brojeve čvorova. Nakon faktorizacije (naprijed-nazad), svi nenulti elementi koji preostanu u koloni ukazuju na to koje mjerenje čini observabilnim koji čvor. Kao što se može vidjeti iz (3.10), broj nenulatih elemenata koji odgovaraju čvorovima je 5, što znači da je samo 5 čvorova sistema observabilno, tj. sistem nije potpuno observabilan. Iz (3.10) se može vidjeti da sva mjerenja osim I_{5-2} nose potrebnu informaciju o odgovarajućim čvorovima, tj. čine ih observabilnim. Jedini neobservabilni čvor je 4 jer ne postoji mjerenje u posmatranoj mjernoj konfiguraciji koje nosi informaciju o njemu. Pomenuti čvor će biti observabilan ukoliko se i u njemu postavi fazorsko mjerenje, ili u čvorovima 2 ili 3. Međutim, u nekim slučajevima nije potrebno postavljati dodatno fazorsko mjerenje. Dovoljno je uzeti u obzir efekat čvorova sa nultim injektiranjem [89], [66] i [109]. To se postiže proširivanjem postojećeg mjernog seta sa ekvivalentnim virtuelnim mjerenjem struje u okviru Jacobian matrice mjerenja. Za analizirani primjer, jedini čvor sa nultim injektiranjem je 2, pa je odgovarajuće mjerenje struje:

$$I_{zh2} = I_{2-1} + I_{2-4} + I_{2-5} = 0. \quad (3.11)$$

Dakle, odgovarajuća vrsta matrice H je $[-1 \ 3 \ 0 \ -1 \ -1 \ 0]$, a njenim uključivanjem u matricu H iz (3.9) čini sistem potpuno observabilnim, a to se može vidjeti i nakon nove trougaone faktorizacije:

$$H = \begin{matrix} V_1 \\ I_{1-2} \\ I_{1-3} \\ V_5 \\ I_{5-2} \\ I_{5-6} \\ I_{2b2} \end{matrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (3.12)$$

S obzirom na potrebe analize robusnosti mjerne konfiguracije korišćena metoda za analizu observabilnosti može da predstavlja značajan dio proračunske složenosti optimizacionog metoda. Stoga, bilo koja ušteda u proceduri testiranja observabilnosti biće korisna, posebno za sisteme većih dimenzija. Topološki pristup analizi observabilnosti posebno dobro se slaže sa mjernim konfiguracijama sastavljenim od fazorskih mjerenja. S tim u vezi, predlaže se i metoda zasnovana na matrici povezanosti čvorova A . Njeni elementi se biraju prema sljedećim pravilima:

- $a_{ij} = 1$ – kada su čvor i i j povezani i
- $a_{ij} = 0$ – kada čvorovi i i j nisu povezani.

Pored matrice A definiše se i vektor observabilnosti čvorova kao:

$$T = A \cdot x^T, \quad (3.13)$$

gdje su:

T – vektor kolona sa nenegativnim elementima koji odgovaraju čvorovima sistema. Nenulti elementi vektora T odgovaraju čvorovima sistema. Ukoliko nema nultih elemenata u okviru vektora T , testirana mjerna konfiguracija čini sistem observabilnim.

x – vektor vrsta dužine n (gdje je n broj čvorova) koja predstavlja mjernu konfiguraciju (x_i je 1 ukoliko je u čvoru i locirano fazorsko mjerenje, u suprotnom, odgovarajući element je 0).

Potrebno je naglasiti da u slučaju analize dostupnosti kanala kod fazorskih uređaja observabilnost se, takođe, provjerava prema relaciji (3.13), ali je potrebno prethodno prilagoditi matricu povezanosti čvorova A u skladu sa odgovarajućim hromozomom. Prilagođavanje se sastoji od promjene osnovnog oblika matrice A (koji je izveden na osnovu topologije mreže) tako da svaki element matrice a_{ij} koji odgovara nekorišćenom kanalu fazorskog mjerenja u čvoru i bude 0 umjesto 1. Efekat čvorova sa nultim injektiranjem se ovdje uzima rekursivno nakon testiranja observabilnosti prema relaciji (3.13), nakon čega se ažurira vektor observabilnosti čvorova T .

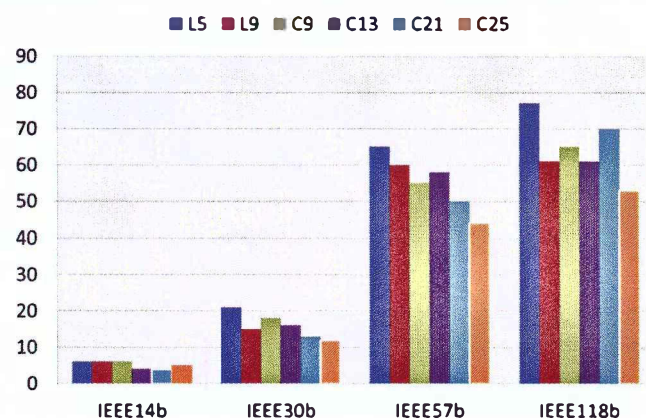
3.3.4. Parametri CGA

U cilju postizanja zadovoljavajuće efikasnosti CGA prilikom rješavanja optimizacionog problema, potrebno je njegove parametre prilagoditi potrebama optimizacionog problema. Osnovna karakteristika CGA je decentralizacija populacije u mala preklapajuća susjedstva. Usvojena veličina susjedstva jedan je od osnovnih parametara CGA. S tim u vezi, ovdje je sprovedena analiza performansi CGA u rješavanju OPMK problema u zavisnosti od usvojene veličine susjedstva. Analizirana su standardna susjedstva (Slika 3.2). Parametri kvaliteta performansi CGA koji su uzeti u

obzir su: kvalitet postignutog optimalnog rješenja (minimalna vrijednost funkcije cilja), prosječan broj iteracija do optimalnog rješenja i vrijeme potrebno da se postigne optimalno rješenje. Za veličinu populacije usvojena je minimalna moguća koja dozvoljava dostizanje globalnog optimuma, tj. populacija od 400 jedinki, organizovana u obliku toroidalne strukture 20×20 . Pored navedenog, potrebno je usvojiti način na koji će biti uzeti u obzir standardni GA operatori.

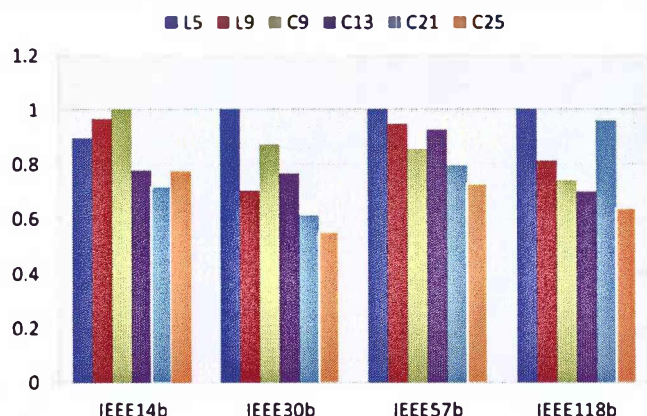
Standardni GA operatori se primijenjuju i kod CGA, ali se usljed specifičnosti strukture izvršavaju samo na nivou susjedstava. Operator selekcija vrši se prema pravilima turnirske selekcije u kojoj učestvuju sve jedinke iz susjedstva. Nakon toga, dvije rezultujuće roditelj-jedinke učestvuju u rekombinaciji. Ovdje se primijenjuje rekombinacija sa dvije tačke razdvajanja. Iako su rezultat rekombinacije dvije jedinke, kao rezultujuća usvaja se ona koja je naslijedila veći dio roditelj-jedinke koja ima bolju vrijednost funkcije cilja. Usvojena vjerovatnoća rekombinacije je 1. Na dobijenu jedinku primijenjuje se operator mutacija koji se izvršava sa vjerovatnoćom $p_m=1/L$ (gdje je L dužina hromozoma) na nivou svakog bita jedinke (jer je jedinka predstavljena binarno). Nakon mutacije, proračunava se funkcija cilja za svaku od jedinki iz populacije. Zatim se vrši upoređivanje starih i odgovarajućih novih jedinki. Za sljedeću generaciju čuvaju se samo one nove jedinke čija je vrijednost funkcije cilja bolja od odgovarajućih jedinki iz tekuće populacije.

Bez obzira na tip usvojenog susjedstva, CGA za tipske IEEE sisteme (pogledati DODATAK), daje isti globalni optimum, pa je s aspekta kvaliteta rješenja svejedno koji tip odabrati. Međutim, usljed različite veličine susjedstva (od 5 jedinki kod L5 susjedstva, do 25 jedinki kod C25 susjedstva), nije jednaka proračunska zahtjevnost CGA za sva analizirana susjedstva. S tim u vezi, analizirane su dvije karakteristike: prosječan broj iteracija do optimalnog rješenja (Slika 3.5) i vrijeme potrebno da se taj optimum postigne (Slika 3.6).



Slika 3.5 Prosječan broj generacija do optimalnog rješenja

Podaci o prosječnom broju iteracija i vremenu izvedeni su nakon 100 nezavisnih pokretanja CGA. Analizirani su tipski IEEE sistemi različitog broja čvorova, kako bi se uzela u obzir i veličina prostora pretrage i zahtjevnost evaluacije funkcije cilja. Prema predstavljanim rezultatima (Slika 3.5), uočava se da je, u slučaju usvojenog C25 tipa susjedstva, potrebno najmanje iteracija (naglašeno na slici) da bi se pronašla optimalna mjerna konfiguracija. To je posebno uočljivo za veće sisteme. Međutim, samo broj iteracija ne može biti dovoljan razlog da se susjedstvo C25 prepozna kao najbolje, jer većim susjedstvima odgovara i veća proračunska zahtjevnost. Opravdanost veće proračunske zahtjevnosti treba tražiti u efikasnosti postizanja optimuma. Jedan parametar efikasnosti je broj iteracija, ali parametar koji definitivno pokazuje mjeru efikasnosti CGA za usvojeni tip susjedstva je vrijeme potrebno da se dostigne optimum (Slika 3.6).



Slika 3.6 Prosječno vrijeme do optimuma normirano prema najvećem vremenu

U cilju kvalitetnijeg predstavljanja i upoređivanja performansi CGA za različite usvojene veličine susjedstava i analizirane tipske IEEE sisteme, predstavljeni rezultati (Slika 3.6) normirani su prema najvećem postignutom vremenu. Inače, simulacije su vršene na računar sa 1GB RAM memorije i procesorom sa taktom od 2GHz. Uočava se da je zadržan trend utvrđen za broj iteracija, tj. CGA sa susjedstvom C25 za najkraći period dostiže optimum. Generalno, iako to djelimično zavisi od samog analiziranog sistema, bolje se ponašaju CGA sa usvojenim većim susjedstvima. Međutim, taj zaključak važi samo za analiziranu veličinu populacije, tj. 20×20 strukturu. Za veći broj jedinki u populaciji za očekivati je bolje performanse s aspekta kvaliteta optimuma i broja iteracija potrebnih za njegovo dostizanje, ali i veću proračunsku i memorijsku zahtjevnost. Kako kvalitet rješenja nije potrebno analizirati (u svim slučajevima se postiže isti optimum), jedino što se može iskoristiti za donošenje zaključka o najpovoljnijoj veličini populacije je vrijeme potrebno da se ostvari optimum. Ovdje je analiziran slučaj CGA sa susjedstvom C25 koji je pokazao najbolje rezultate u prethodnim analizama, i to na najsloženijem tipskom sistemu (Slika 3.7).

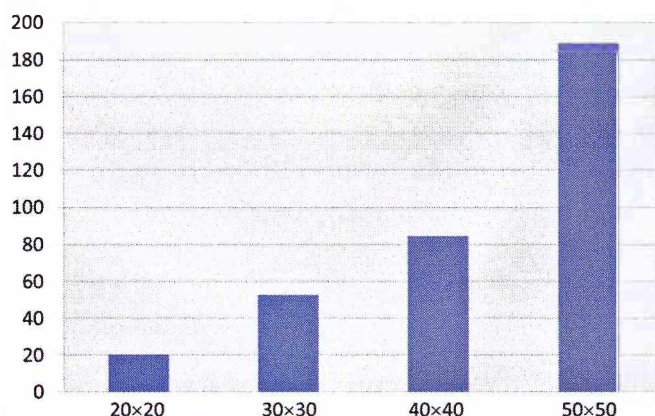
Lako je uočiti da se za veće populacije vrijeme potrebno za postizanje optimuma uvećava, i to brže nego linearno. Razlog treba tražiti u velikoj proračunskoj zahtjevnosti proračuna funkcije cilja za sve jedinke iz populacije, kao i veću inerciju operatora CGA usljed izražene veličine populacije, a nedovoljno efikasno usmjeravanje pretrage koje bi rezultiralo manjim brojem iteracija do optimuma.

S obzirom da za populacije manje od 20×20 kvalitet rješenja nije zadovoljavajući, zaključuje se da je veličina populacije koja daje najbolje rezultate kada se analizira OPMK problem 20×20 . Dakle, veličina populacije je takođe parametar koji je potrebno usvojiti u skladu sa performansama algoritma. Može se zaključiti da mala populacija vodi do spore pretrage i čestih konvergiranja lokalnom optimumu usljed male diversifikacije jedinki. S druge strane, velika populacija može dovesti do vrlo spore konvergencije usljed velikih memorijskih i proračunskih zahtjeva CGA u tom slučaju.

Kada su u pitanju standardni GA operatori, potrebno je opredijeliti se za način njihove primjene i odgovarajuće parametre. Naime, kada je operator selekcije u pitanju, potrebno je opredijeliti se za jedan od standardnih pristupa:

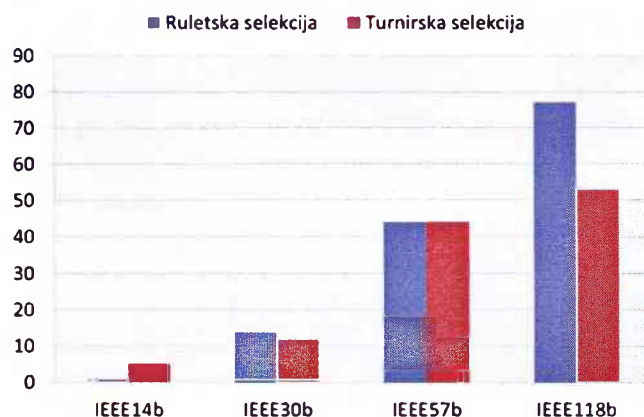
- turnirska selekcija sa N članova – slučajnim izborom bira se N jedinki iz susjedstva, a samo se ona sa boljom vrijednošću funkcije cilja zadržava kao roditelj; Pritom, za N se najčešće uzimaju 2, 4 ili 8; Za slučajeve $N = 4$, i $N = 8$, pravi se turnir slučajnim izborom konkurentskih jedinki, a kao rezultat dobija se jedna jedinka koja se usvaja kao potencijalni roditelj;

- ruletska selekcija – gdje poljima na ruletskom točku odgovaraju jedinke iz definisanog susjedstva; pritom, veličina polja se definiše u skladu sa kvalitetom posmatrane jedinke; naime, veličini polja odgovara vjerovatnoća izbora neke jedinke (koja je obrnuto proporcionalan vrijednosti funkcije cilja kada je u pitanju minimizacija funkcije cilja, što je ovdje slučaj).



Slika 3.7 Prosječno vrijeme do optimuma za tipski IEEE sistem sa 118 čvorova u [s]

Bez obzira na to koji od operatora selekcije bio usvojen, kada se primijeni na rješavanje OPMK problema, CGA daje isti kvalitet rezultata. Kako proračunska kompleksnost operatora selekcije zavisi od načina njegove realizacije, najbolji način da se procijeni njegov efekat je kroz prosječan broj iteracija potrebnih da se ostvari optimum (Slika 3.8).



Slika 3.8 Prosječan broj iteracija do optimuma u zavisnosti od usvojenog operatora selekcije

Na osnovu predstavljenih rezultata (Slika 3.8) uočava se da CGA ima bolje performanse kada je za operator selekcije odabran turnirski pristup. Ovdje je usvojena turnirska selekcija sa 4 člana jer se za $N = 2$ dobijaju nešto slabiji rezultati u smislu broja generacija potrebnih do postizanja optimuma, dok kod $N = 8$ problem predstavlja veća zahtjevnost proračuna kod većih analiziranih sistema. U svakom slučaju, za konkretan sistem potrebno je provjeriti performanse algoritma za sve opcije operatora selekcije, jer na performanse utiče i sama konfiguracija sistema koji se analizira (vidi se da za sistem IEEE57b, nema razlike u performansama između ruletske i turnirske selekcije).

Pored operatora selekcije, potrebno je definisati vjerovatnoću rekombinacije i mutacije, kao osnovnih parametara druga dva operatora. Najčešće se vjerovatnoća rekombinacije bira u opsegu [0.9-1]. Međutim, kada je primjena na OPMK problem u pitanju, pokazalo se da je najbolje usvojiti

$p_c=1$, jer za sve niže vrijednosti dolazi do prolongiranja konvergencije, tj. optimalno rješenje se postiže za više generacija. S druge strane, operator mutacija se kod GA koristi da unese blagu promjenu u jedinke kako bi se preduprijedila konvergencija lokalnom optimumu. Prevelika vrijednost vjerovatnoće mutacije značajno usporava konvergenciju. Stoga se najčešće operator bira kao niska vrijednost, reda ne većeg od nekoliko procenata. Međutim, primjena univerzalne vrijednosti za vjerovatnoću mutacije ne bi dovela do efikasne konvergencije za svaki analizirani sistem. Stoga je najčešće korišćeno rješenje, kada su u pitanju GA, da se vjerovatnoća mutacije definiše kao recipročna vrijednost dužine hromozoma. Taj pristup je usvojen i za analize sprovedene u ovom radu.

Posebna specifičnost metoda za rješavanje OPMK problema koji se predlaže ovim radom je dodatni operator koji djeluje nakon mutacije u okviru CGA. On je direktna posljedica tretiranja komunikacionih ograničenja kao kriterijuma optimizacije, bilo u vidu ograničenja u broju kanala fazorskih mjerenja, ili uopšte komunikacione infrastrukture u nekoj transformatorskoj stanici. Taj operator je zasnovan na sličnom principu kao kod vakcinacije prezentirane u [89]. Naime, prije nego se izvrši evaluacija funkcije cilja za novoformiranu međupopulaciju, primijenjuje se novi operator. On provjerava koliko je kanala fazorskih mjerenja aktivno kod rješenja koje odgovara posmatranoj jedinki iz populacije. Ukoliko je došlo do prekoračenja dozvoljenog limita, operator vrši oslobađanje kanala slučajnim izborom sukcesivno sve dok se traženi uslov ne zadovolji. Na taj način, vrši se eliminacija rješenja koja ne zadovoljavaju pomenuti tehnički kriterijum. Ovaj operator može uzeti u obzir i postojanje različitih ograničenja u broju kanala u zavisnosti od čvora u kome je fazorsko mjerenje instalirano. Ovaj slučaj je karakterističan za neki praktični sistem kod kojeg postoji komunikaciona infrastruktura različitog kapaciteta u transformatorskim stanicama u sistemu.

Nakon usvajanja svih parametara analiziranih u ovom poglavlju, izvršeno je podešavanje predloženog metoda za rješavanje OPMK problema. Jednom podešeni metod nije potrebno mijenjati, osim za potrebe analize različitih kriterijuma optimizacije. S obzirom na modularnu strukturu funkcije cilja, moguće je uključiti samo one kriterijume koji su od interesa za primjenu na praktičnom slučaju. U sljedećem poglavlju demonstrira se primjena predloženog metoda na tipske IEEE sisteme i to za različite kriterijume optimizacije.

4. REZULTATI SIMULACIJA

Predloženi optimizacioni metod [120], zasnovan na CGA, primijenjen je na optimizaciju mjerne konfiguracije za tipske IEEE sisteme od 14, 30, 57 i 118 čvorova (pogledati DODATAK). Analizirane su 3 formulacije optimizacionog problema koje su izvedene na osnovu željenih karakteristika rezultujuće mjerne konfiguracije, a to su:

- osnovni OPMK problem – dominantno analiziran u okviru literature, a tiče se obezbijedivanja osnovne funkcije mjerne konfiguracije pod ekonomski najpovoljnijim uslovima, tj. observabilnosti sistema;
- robusnost – u cilju unaprijeđivanja pouzdanosti estimacije stanja EES mjerna konfiguracija mora biti sposobna da pored gubitka mjernog uređaja ili promjene topologije mreže (ispada grane) očuva observabilnost sistema i dovoljan nivo redundanse za identifikaciju i detekciju grešaka mjerenja;
- uvažavanje komunikacionih ograničenja – usljed ekspanzije PMU mjernih uređaja, a na osnovu specifičnih komunikacionih preduslova koji moraju biti ispunjeni kako bi se izvršila njihova instalacija, komunikaciona ograničenja moraju biti tretirana ukoliko je u pitanju praktična realizacija planirane mjerne konfiguracije.

Ostvareni rezultati prikazani su u poglavljima 4.1 - 4.3, uz poređenje sa najboljim metodama raspoloživim u literaturi.

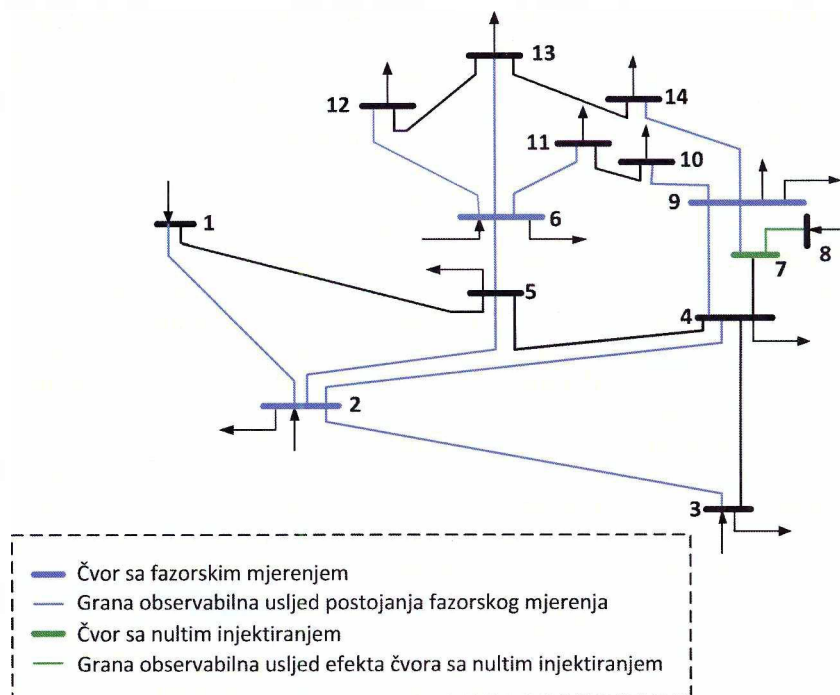
4.1. Osnovni OPMK problem

Svi metodi predloženi u literaturi tretiraju osnovni OPMK problem, bez obzira na tip mjernih uređaja ili specifične optimizacione kriterijume. Naziv osnovni je dobio po tome što je rezultujuća optimalna konfiguracija, finansijski najpovoljnija konfiguracija koja može osigurati rad estimatora stanja. U formulaciji OPMK mogu se prepoznati dva suprotstavljena cilja: minimizacija broja angažovanih mjernih uređaja (cijene) i obezbijedjenje observabilnosti. Dakle, u pitanju su finansijski i tehnički cilj. Za ostvarivanje tehničkog cilja, potrebno je iskoristiti što manji broj mjernih uređaja. Predloženi metod je primijenjen na tipske IEEE sisteme. Tabela 4.1 predstavlja ostvarene rezultate predloženog metoda primijenjenog na osnovni optimizacioni problem.

Tabela 4.1 Optimalne mjerne konfiguracije za tipske IEEE sisteme za slučaj osnovnog OPMK problema

Sistem	Lokacije PMU mjerenja	Broj PMU mjerenja
IEEE 14-čvorova	2, 6, 9	3
IEEE 30-čvorova	3, 5, 10, 12, 18, 24, 27	7
IEEE 57-čvorova	1, 4, 13, 19, 25, 29, 32, 38, 51, 54, 56	11
IEEE 118-čvorova	3, 8, 11, 12, 17, 21, 25, 28, 34, 35, 40, 45, 49, 53, 56, 62, 72, 75, 77, 80, 85, 86, 90, 94, 102, 105, 110, 114	28

Iz prezentiranih rezultata (Tabela 4.1) uočava se da je za obezbijedivanje observabilnosti, optimalno instalirati fazorska mjerenja u 20-25% čvorova sistema. Potrebno je naglasiti da se na taj način ne osiguravaju napredne funkcionalnosti estimatora stanja (detekcija i identifikacija grešaka mjerenja). Optimalne mjerne konfiguracije za analizirane sisteme mogu prikazane su i grafički (Slika 4.1 - Slika 4.4).



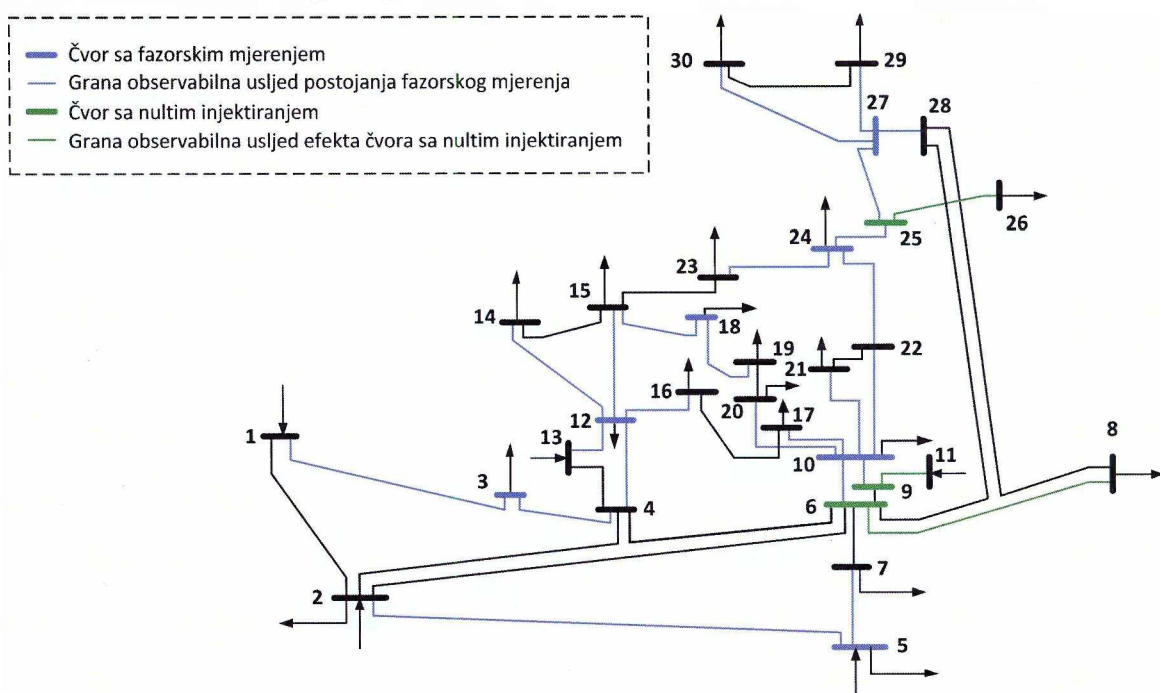
Slika 4.1 Optimalna mjerna konfiguracija za sistem IEEE 14 čvorova – osnovni optimizacioni slučaj

Sa slikom se može uočiti na koji način se, strateškim rasporedom fazorskih mjerenja, postiže observabilnost svakog čvora u sistemu. Naime, poznato je da fazorsko mjerenje čini observabilnim čvor u kome je instalirano (posredstvom instaliranog mjerenja fazora napona – sabirnice označene plavom bojom na slikama) i svih susjednih čvorova (posredstvom mjerenja fazora napona u čvoru i mjerenja fazora struja u granama incidentnim čvoru u kome je fazorsko mjerenje instalirano – grane označene plavom bojom).

Kao što se može uočiti sa šematskih prikaza optimalnih mjernih konfiguracija, observabilnost sistema nije obezbijeđena isključivo djelovanjem fazorskih mjernih uređaja. Dio čvorova sistema observabilan je usljed dejstva čvorova sa nultim injektiranjem (sabirnice označene zelenom bojom). Time je postignuto angažovanje manjeg broja fazorskih mjerenja uz ispunjavanje zahtijevanog kvaliteta mjerne konfiguracije. Dakle, može se izvesti generalni zaključak da je potrebno uračunati efekat čvorova sa nultim injektiranjem prilikom planiranja mjerne konfiguracije.

Čvorovi sa nultim injektiranjem (Tabela 4.2) predstavljaju značajnu mogućnost za smanjivanje cijene mjerne konfiguracije jer predstavljaju pseudo-mjerenja koja su poznata sa visokom sigurnošću. S obzirom na dva glavna pristupa analize observabilnosti, uzimanje u obzir efekta čvorova sa nultim injektiranjem ima dva pristupa: numerički i topološki. Kod numeričkog pristupa, za svaki od čvorova sa nultim injektiranjem, formira se relacija za struju (ili snagu) injektiranja u čvor, koja se izjednačava sa nulom. Ta relacija se uključuje u matricu mjerenja $h(x)$, a kasnije i u Jacobian matricu mjerenja. S druge strane, kod topološkog pristupa, usvojena su pravila koja proizilaze iz Kirchhoff-ovog zakona za struje, a to su [109]:

- neobservabilni čvor sa nultim injektiranjem postaje observabilan, ako i samo ako su svi njemu susjedni čvorovi observabilni,
- neobservabilni čvor susjedan observabilnom čvoru sa nultim injektiranjem postaje observabilan, ukoliko su svi ostali čvorovi, iz susjedstva posmatranog čvora sa nultim injektiranjem, observabilni.



Slika 4.2 Optimalna mjerna konfiguracija za sistem IEEE 30 čvorova – osnovni optimizacioni slučaj

Kako je numerički pristup analize observabilnosti proračunski zahtijevan za veće sisteme, a sama analiza observabilnosti fazorskih mjernih konfiguracija je efikasnija kada se koristi topološki pristup observabilnosti, ovdje je usvojen topološki pristup evaluacije efekta čvorova sa nultim injektiranjem. On se mora izvršavati rekurzivno u više iteracija, kako bi se pravilno uračunao efekat svakog čvora sa nultim injektiranjem. Obično je broj iteracija mali (često je dovoljna samo jedna iteracija), ali može da bude i značajniji kod sistema sa većim brojem međusobno povezanih čvorova sa nultim injektiranjem. U tom slučaju rekurzivno ispitivanje efekta čvorova sa nultim injektiranjem postaje neophodno jer može doći do pogrešne procjene efekta, što vodi ka formiranju manje povoljne (skuplje) mjerne konfiguracije.

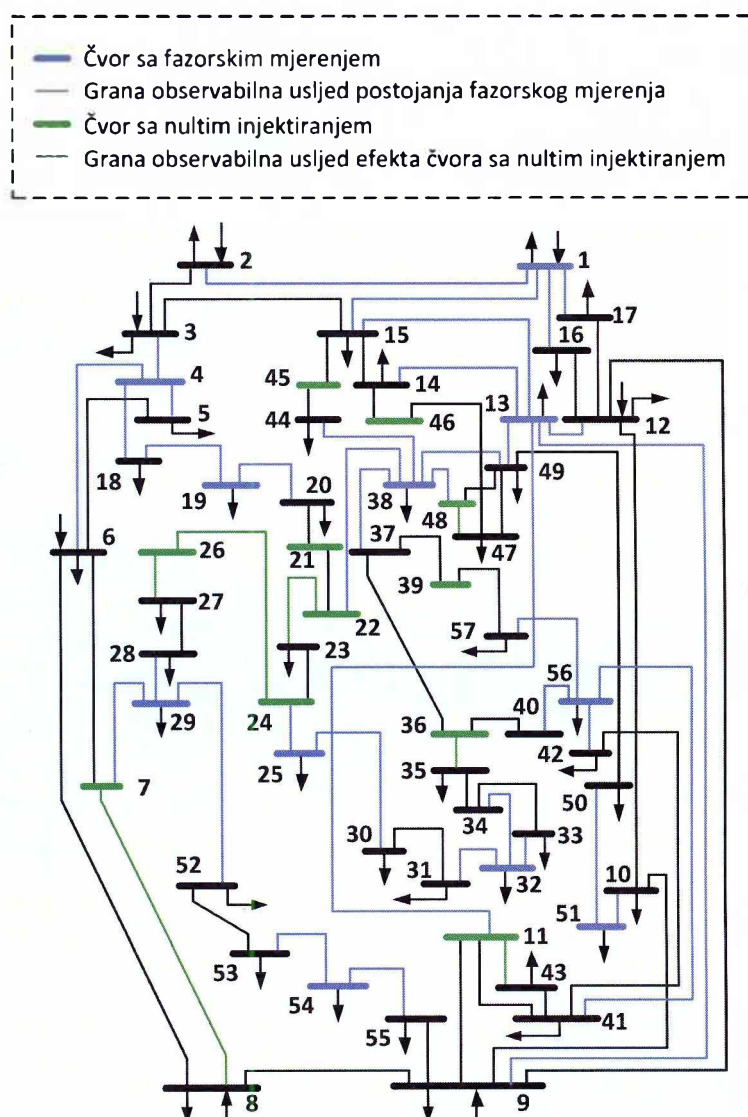
Tabela 4.2 Pregled čvorova sa nultim injektiranjem kod tipskih IEEE sistema

Sistem	IEEE 14-čvorova	IEEE 30- čvorova	IEEE 57- čvorova	IEEE 118- čvorova
Čvorovi sa nultim injektiranjem	7	6, 9, 22, 25, 27, 28	4, 7, 11, 21, 22, 24, 26, 34, 36, 37, 39, 40, 45, 46, 48	5, 9, 30, 37, 38, 63, 64, 68, 71, 81
Broj čvorova sa nultim injektiranjem	1	6	15	10

Koliko će čvorova sa nultim injektiranjem imati efekat u okviru optimalne mjerne konfiguracije zavisi od topologije analizirane mreže. Tako je kod tipskog IEEE sistema sa 14 čvorova iskorišćen efekat jedinog čvora sa nultim injektiranjem. Kod sistema sa 30 čvorova iskorišćen je efekat 3 od 5 raspoloživih čvorova, a kod sistema sa 57 i 118 čvorova taj odnos je 11 od 15 i 10 od 10, respektivno. Ako se uzme u obzir proračunati broj fazorskih mjerenja potreban za formiranje optimalne mjerne konfiguracije (Tabela 4.1), i slučaj kada nije uračunat efekat čvorova sa nultim injektiranjem (Tabela 4.3), onda je lako procijeniti uštedu koja se dobila.

Za analizirane tipske IEEE sisteme, ušteda u cijeni mjerne konfiguracije ide od 15-50%. Nivo uštede zavisi od broja čvorova sa nultim injektiranjem i njihovog rasporeda u sistemu. Tako je,

prema predstavljenim rezultatima, najveća ušteda usljed efekta čvorova sa nultim injehtiranjem, kod IEEE sistema sa 57 čvorova (preko 50%). Pomenuti sistem ima najviše čvorova sa nultim injehtiranjem (15), od kojih je 11 iskorišćeno prilikom kreiranja optimalne mjerne konfiguracije. Ta ušteda bi se mogla iskoristiti za povećanje nivoa redundanse mjerne konfiguracije, a time i unaprijeđivanje pouzdanosti estimacije stanja.



Slika 4.3 Optimalna mjerna konfiguracija za sistem IEEE 57 čvorova – osnovni optimizacioni slučaj

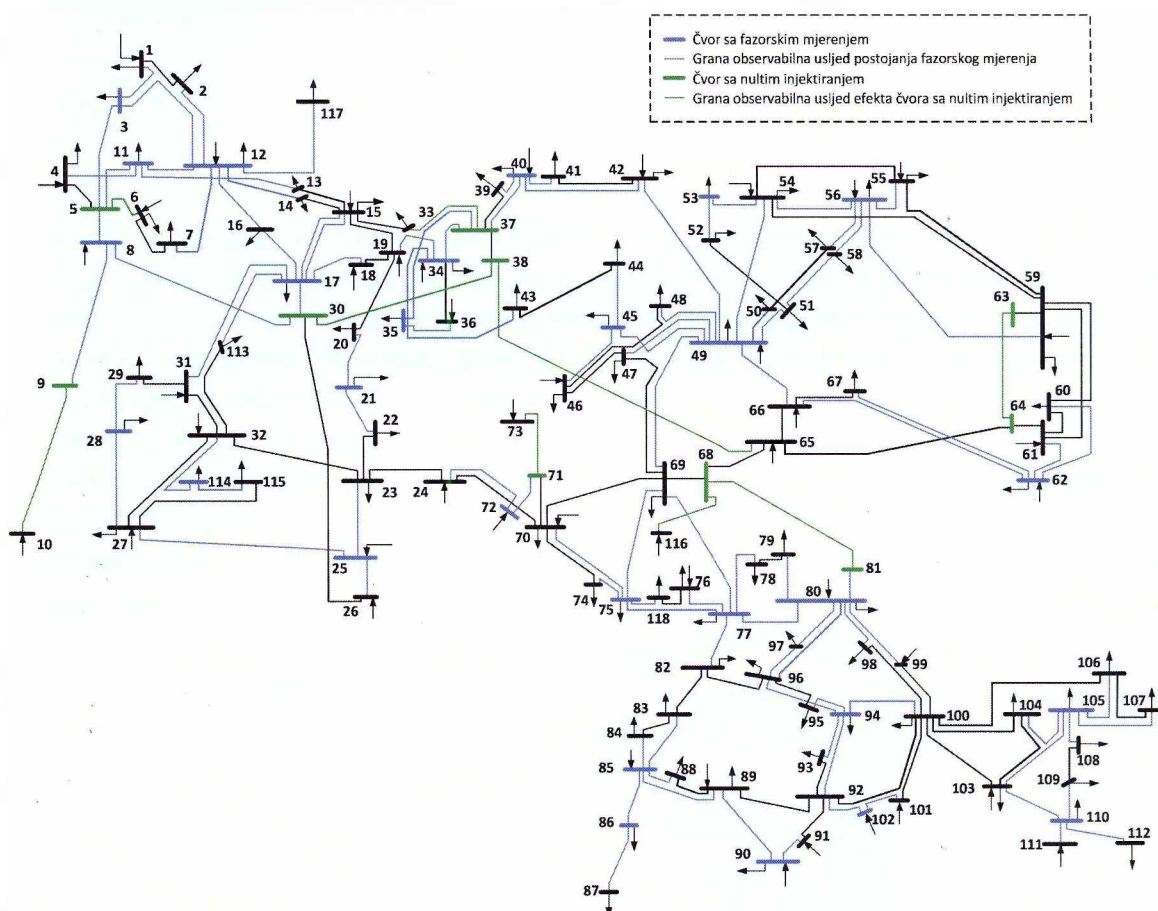
Tabela 4.3 Optimalne mjerne konfiguracije za tipske IEEE sisteme za slučaj osnovnog OPMK problema, bez računanja efekta čvorova sa nultim injehtiranjem

Sistem	Lokacije PMU mjerenja	Broj PMU mjerenja
IEEE 14-čvorova	2, 8, 10, 13	4
IEEE 30- čvorova	1, 6, 7, 9, 10, 12, 18, 24, 25, 30	10
IEEE 57- čvorova	2, 6, 12, 15, 19, 22, 25, 27, 32, 36, 38, 41, 46, 51, 52, 54, 57	17
IEEE 118- čvorova	2, 5, 10, 12, 15, 17, 21, 25, 29, 34, 37, 42, 45, 49, 53, 56, 62, 64, 70, 71, 75, 77, 80, 85, 86, 91, 94, 102, 105, 110, 114, 116	32

Kako je osnovni optimizacijski problem često bio predmet istraživanja, to je moguće izvršiti poređenje predloženog metoda sa metodima raspoloživim u literaturi. Poređenje je izvršeno za 4 tipiska IEEE sistema, a vrši se prema:

- kvalitetu ostvarenog rješenja,
- prosječnom broju evaluacija funkcije cilja do optimuma,
- vremenu potrebnom da se ostvari optimalni rezultat i
- uspješnost konvergencije (procenat ostvarenih globalnih optimuma nakon 100 izvršavanja algoritma metoda).

Kvalitet optimalne mjerne konfiguracije, kada je osnovni optimizacijski problem u pitanju, određen je brojem angažovanih mjerenja. Dakle, što je broj angažovanih mjerenja manji, to je mjerna konfiguracija bolja. Tabela 4.4 daje pregled rezultata raznih metoda primijenjenih na optimizacijski problem. Izdvajaju se 4 metoda po kvalitetu postignutih rezultata za sve analizirane sisteme: CGA, IGA, PSO i ACO metod. Dakle, svi oni daju globalno optimalno rješenje, pa su s aspekta kvaliteta rješenja jednakih performansi.



Slika 4.4 Optimalna mjerna konfiguracija za sistem IEEE 118 čvorova – osnovni optimizacijski slučaj

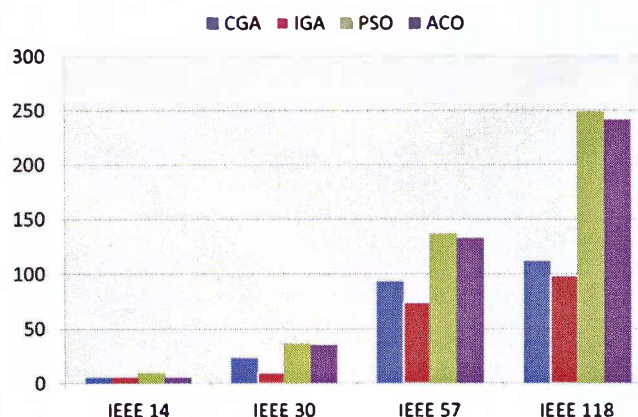
U cilju poređenja navedenih metoda, potrebno je analizirati i druge aspekte performansi, tj. karakteristike konvergencije. One se mogu opisati sa brojem iteracija potrebnim za postizanje optimuma, vremenom potrebnim da se on postigne i procentom uspješnosti postizanja globalnog optimuma. Broj iteracija do optimuma tiče se, prije svega, mehanizama pretrage ugrađenim u sam optimizacijski postupak (operatori selekcije, rekombinacije i mutacije, tabu liste, feromonski trag, selekcija zasnovana na simuliranom kaljenju itd.). Pored toga, značajan uticaj na broj iteracija ima i

struktura usvojene funkcije cilja. Naime, ukoliko je funkcija cilja formulisana tako da uzima u obzir više karakteristika rješenja, onda ona ima mogućnost da precizno evaluira slična rješenja, što joj dozvoljava da, u toku jedne iteracije, usmjeri pretragu na pravi način. Efikasnost kombinovanog djelovanja pomenuta dva faktora na broj iteracija potreban da se postigne optimum, za prethodno utvrđene najbolje metode, grafički je prikazana (Slika 4.5). Rezultati su dobijeni nakon 100 nezavisnih pokretanja odgovarajućih algoritama metoda.

Tabela 4.4 Poređenje postignutih optimalnih rezultata sa metodama raspoloživim u literaturi

Metoda	IEEE 14-čvorova	IEEE 30- čvorova	IEEE 57- čvorova	IEEE 118- čvorova
CGA	3	7	11	28
GA [121]	3	7	12	29
NSGA [71]	-	8	-	29
IGA [89]	3	7	11	28
SA [66]	3	7	11	-
TS [77]	3	-	13	-
PSO [109]	3	7	11	28
ILS [95]	4	-	17	32
BS [82]	3	7	-	-
ACO [106]	3	7	11	28
IP [72]	3	-	12	29

Posmatrajući dobijene rezultate (Slika 4.5) uočava se da, osim za slučaj IEEE tipskog sistema sa 14 čvorova, najbolji rezultat postiže IGA metod, tj. potrebno mu je najmanje evaluacija funkcije cilja (iteracija) kako bi pronašao optimalnu mjernu konfiguraciju. Po rezultatima ga prati CGA metod, čiji se zaostatak u odnosu na IGA metod, smanjuje kako raste veličina analiziranog sistema. Metodi PSO i ACO značajno zaostaju za IGA i CGA u odnosu na ovaj parametar konvergencije, što se posebno uočava pri povećanju dimenzionalnosti problema. Međutim, ovaj parametar nije dovoljan da bi se donijela odluka o brzini konvergencije, jer različite metode karakterišu iteracije različite proračunske složenosti. Razlog za to je sama priroda metode, ali i usvojena struktura funkcije cilja i njenog proračuna. S tim u vezi, navedene metode se upoređuju i prema vremenu potrebnom da se dostigne optimum (Tabela 4.5).



Slika 4.5 Prosječan broj evaluacija funkcije cilja do postignutog optimuma

Na osnovu predstavljenih rezultata (Tabela 4.5), uočava se da najbolji rezultat ostvaruje predložena CGA metoda, tj. prosječno najmanje vremena traje potraga za optimalnom mjernom

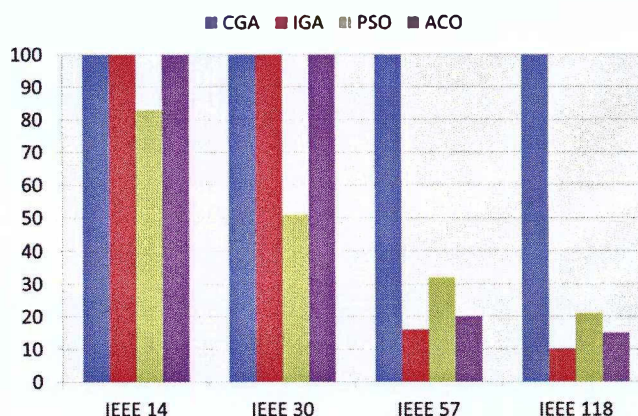
konfiguracijom. Razlog za to može se tražiti u jednostavnosti funkcije cilja, efikasnosti CGA operatora, kao i decentralizovane strukture populacije, koji obezbijavaju efikasnu pretragu sa minimalnim proračunskim zahtjevima u odnosu na konkurente. Trajanje jedne iteracije kod CGA je manje nego kod ostalih metoda za osnovni optimizacioni problem. Time, CGA, i pored većeg broja iteracija u odnosu na IGA metod, brže pronalazi optimalnu mjernu konfiguraciju.

Tabela 4.5 Prosječno vrijeme potrebno da se ostvari optimum [s]

Metod	IEEE 14-čvorova	IEEE 30-čvorova	IEEE 57-čvorova	IEEE 118-čvorova
CGA	0.162	1.121	10.705	53.122
IGA	0.444	1.483	15.462	75.219
PSO	1.114	11.366	128.388	572.610
ACO	0.205	2.205	21.402	187.144

Simulacije su izvršene na PC računaru sa 1GB RAM memorije i procesorom sa taktom od 2GHz.

Za *off-line* primjene metoda planiranja optimalne mjerne konfiguracije, dovoljan parametar je kvalitet ostvarenog rješenja. S druge strane, značajan parametar za primjenu metode u *on-line* aplikacijama centra upravljanja EES, je procenat uspješnosti metoda, tj. vjerovatnoća da će se nakon jednog pokretanja odgovarajućeg algoritma postići globalni optimum. Praksa upotrebe nekih metoda je da se, usljed slučajnog postupka inicijalizacije metoda, kao i stohastičnosti samog procesa pretrage prostora rješenja, ne postiže uvijek globalni optimum. Mjera uspješnosti metoda da postigne globalni optimum prikazuje se kroz broj uspješnih konvergencija nakon 100 ponavljanja [116]. S tim u vezi, dat je grafički prikaz uspješnosti konvergencije metoda koje daju globalno optimalno rješenje (Slika 4.6).



Slika 4.6 Uspješnost konvergencije u [%]

Za analizirane tipske sisteme predloženi metod CGA ima najbolju konvergenciju. Ona se posebno ističe kod većih sistema (sa 57 i 118 čvorova), koje karakteriše veće prisustvo lokalnih optimuma. Povećanje dimenzije problema kod CGA utiče na povećanje vremena pretrage (broja iteracija do optimuma), ali ne i na uspješnost postizanja globalnog optimuma. To nije slučaj kod ostalih metoda, koji već kod sistema sa 57 čvorova imaju uspješnost ispod 50%. Povećanje uspješnosti metoda se donekle može ostvariti kroz povećanje populacije. Međutim, to uslovljava veću proračunsku i memorijsku zahtjevnost postupka. Podešavanje algoritma treba izvršiti u skladu sa potrebama sistema upravljanja, ali i topologijom sistema i nekim njegovim specifičnostima koje zavise od konkretnog slučaja.

Na osnovu predstavljenih rezultata analize osnovnog optimizacionog problema zaključuje se da je predloženi metod, s aspekta kvaliteta ostvarenih rezultata, u rangu najboljih metoda predloženih u literaturi. S druge strane, kada je konvergencija metoda u pitanju, pokazano je da CGA ima bolje performanse u odnosu na najbolje konkurente, pa stoga može biti uzet u obzir za *on-line* aplikacije sistema upravljanja.

Usljed stalnog povećavanja složenosti okolnosti u kojima rade savremeni EES, posebna pažnja je posvećena pouzdanosti estimacije stanja kao osnovnom izvoru kvalitativnih i kvantitativnih informacija o sistemu. Osnovno sredstvo za ostvarivanje pouzdane estimacije stanja je pouzdana mjerna konfiguracija sa zadovoljavajućim nivoom redundanse mjerenja. Postizanje željenog nivoa redundanse u suprotnosti je sa ekonomskim kriterijumom optimizacije, pa je potrebno naći optimalnu mjeru u zadovoljavanju oba kriterijuma. S tim u vezi, predmet istraživanja ove disertacije je i planiranje robusne mjerne konfiguracije.

4.2. Robusnost mjerne konfiguracije

Normalni režim rada EES obuhvata razne promjene uklopnog stanja mreže u cilju povećavanja margine sigurnosti. Pored toga, razne nepredviđene okolnosti (kvarovi, preopterećenja, ispadi potrošnje) najčešće vode ka promjeni topologije mreže (isključenja preopterećenih elemenata, ili onih u kvaru). Ako se još uzme u obzir i princip rada mjernih uređaja koji čine mjernu konfiguraciju (bez obzira na to da li su klasična mjerenja ili PMU u pitanju), tj. način na koji se obezbijeduje observabilnost čvorova sistema, lako je prepoznati značaj analize robusnosti mjerne konfiguracije. Naime, promjena topologije mreže može da snizi nivo redundanse mjerenja ili, čak, ugrozi observabilnost sistema. S tim u vezi, opravdano je prilikom optimizacije mjerne konfiguracije uvesti dodatni kriterijum koji tretira sposobnost optimalne mjerne konfiguracije da očuva svoje karakteristike (observabilnost i redundansu) i u slučaju promjene topologije mreže. Promjena topologije mreže se najčešće svodi na tzv. $n-1$ sistem pouzdanosti. Dakle, ispad bilo koje grane mreže ne smije ugroziti sposobnost optimalne mjerne konfiguracije da obezbijedi observabilnost sistema.

Drugi vrlo bitan aspekt robusnosti mjerne konfiguracije tiče se pouzdanosti rada samih mjernih uređaja. Naime, iako su savremeni i pouzdaniji od klasičnih mjernih uređaja, fazorski uređaji nisu imuni na kvarove. Ti kvarovi mogu biti vezani za same mjerne uređaje, ali i za njihove komunikacione kanale koji, u slučaju kvara, ne proslijeđuju informaciju centru upravljanja. Tako, iako je mjerni uređaj lokalno ispravan, on je za centar upravljanja neispravan, jer ne može biti korišćen u procesu estimacije stanja. Dakle, prilikom planiranja optimalne mjerne konfiguracije potrebno je uzeti u obzir i mogućnost ispada jednog mjernog uređaja, a u cilju očuvanja observabilnosti sistema.

Rezultati uvažavanja kriterijuma robusnosti dati su tabelarno (Tabela 4.6) kroz pregled optimalnih lokacija fazorskih mjerenja za slučaj ispada mjerenja, grane i jednog mjerenja ili grane.

Očekivano, broj potrebnih mjerenja je značajno veći nego za osnovni optimizacioni problem. Slijedi da su robusne mjerne konfiguracije skuplje u odnosu na osnovni slučaj. Međutim, s aspekta pouzdanosti mjerne konfiguracije i kvaliteta rezultata statičke estimacije stanja, jasno je da robusna mjerna konfiguracija ima veliku prednost. Iz prikazanih rezultata (Tabela 4.6), može se uočiti da je ispad mjernog uređaja ozbiljniji problem nego ispad grane s aspekta robusnosti mjerne konfiguracije. Objašnjenje za to se može tražiti u tome da jedno fazorsko mjerenje obezbijeduje

observabilnost više čvorova sistema, dok ispad grane najčešće dovodi do gubitka observabilnosti samo jednog čvora. Slijedi da mjerna konfiguracija otporna na ispad fazorskog mjerenja, košta više od mjerne konfiguracije otporne na ispad grane. Na osnovu iste tabele može se uočiti da mjerna konfiguracija, koja je planirana uzimajući u obzir ispad mjerenja ili grane, nije skuplja od slučaja kada se analizira samo ispad mjernog uređaja. Dakle, kada se planira robusna mjerna konfiguracija, ekonomski je opravdano uključiti ispad mjerenja ili grane.

Tabela 4.6 Optimalne mjerne konfiguracije za tipске IEEE sisteme za slučaj kriterijuma robusnosti

Sistem	Ispad PMU uređaja	Ispad grane sistema	Ispad PMU ili grane
IEEE 14-bus	1, 2, 4, 6, 9, 11, 13	1, 3, 6, 8, 9, 11, 13	2, 3, 5, 6, 8, 9, 10, 13
IEEE 30-bus	1, 2, 3, 7, 10, 12, 13, 15, 17, 19, 20, 24, 27, 29	1, 3, 5, 6, 10, 11, 13, 14, 15, 16, 19, 24, 26, 29	1, 2, 3, 5, 6, 10, 11, 12, 13, 15, 17, 19, 20, 24, 26, 29, 30
IEEE 57-bus	1, 3, 6, 9, 12, 14, 15, 19, 20, 25, 27, 29, 30, 32, 33, 38, 41, 50, 51, 53, 54, 56, 57	2, 6, 10, 14, 16, 17, 19, 23, 27, 29, 30, 32, 33, 38, 41, 44, 50, 53, 55, 56	1, 2, 6, 9, 12, 14, 15, 18, 20, 25, 27, 29, 31, 32, 33, 38, 41, 50, 51, 53, 54, 56, 57
IEEE 118-bus	1, 3, 6, 8, 10, 11, 12, 15, 17, 19, 20, 22, 23, 24, 27, 28, 29, 32, 34, 35, 40, 41, 43, 45, 46, 49, 51, 53, 54, 56, 57, 59, 62, 65, 66, 70, 72, 75, 76, 77, 78, 80, 84, 85, 86, 87, 89, 91, 92, 94, 96, 100, 101, 105, 106, 108, 110, 111, 112, 114, 117	1, 7, 10, 11, 12, 15, 17, 19, 20, 22, 24, 25, 27, 29, 34, 35, 39, 41, 44, 46, 49, 52, 54, 57, 58, 59, 61, 67, 70, 73, 75, 76, 78, 80, 83, 85, 87, 88, 90, 92, 94, 96, 100, 101, 105, 106, 109, 111, 112, 113, 114, 116, 117	2, 3, 6, 9, 10, 11, 12, 15, 17, 19, 21, 22, 24, 25, 27, 29, 31, 32, 34, 36, 40, 42, 43, 45, 46, 49, 52, 53, 56, 57, 58, 59, 61, 62, 67, 70, 73, 75, 77, 78, 80, 84, 85, 86, 87, 89, 90, 92, 94, 96, 100, 101, 105, 106, 108, 110, 111, 112, 115, 116, 117, 118

Razvoj sistema upravljanja prati razvoj EES, ali je značajno uslovljen i raspoloživim komunikacionim tehnologijama. To je posebno došlo do izražaja kod savremenih sistema i mjernih konfiguracija koje čine fazorska mjerenja. Naime, transformatorske stanice koje su mjesta instalacije mjernih uređaja, često ne raspolažu potrebnom komunikacionom infrastrukturu, ili ona nije dovoljnog kapaciteta. Takođe, raspoloživost kanala kod fazorskih uređaja zavisi kako od mjesta instalacije, tako i od proizvođača opreme. Uslijed toga, postupak planiranja optimalne mjerne konfiguracije neće dati rezultat koji je praktično ostvariv. U cilju prevazilaženja ovog problema potrebno je u postupak optimizacije uključiti komunikaciona ograničenja.

4.3. Komunikaciona ograničenja

Praktične okolnosti u sistemu mogu dovesti do toga da prethodno predstavljeni rezultati ne budu primjenljivi na realne sisteme. Razlog za to je dostupnost komunikacione infrastrukture i kapaciteta u okviru sistema za koji se planira mjerna konfiguracija. U cilju pronalaženja praktično primjenljive optimalne mjerne konfiguracije potrebno je u formulaciju optimizacionog problema uključiti i komunikaciona ograničenja.

U literaturi su najčešće analizirana fazorska mjerenja sa neograničenim brojem kanala (tj. uvijek imaju onoliko kanala koliko je potrebno za određenu lokaciju). Međutim, u praktičnom slučaju postoje ograničenja u broju kanala, bilo u vidu ograničenja proizvođača, ili same lokacije (uslijed

ograničenih komunikacionih kapaciteta). S tim u vezi, upotrebom predloženog metoda izvršena je optimizacija mjerne konfiguracije koja uključuje u obzir sve navedene kriterijume, tj.: observabilnost, robusnost i minimalnu cijenu. Ostvareni rezultati za tipski IEEE sistem od 14 čvorova su dati tabelarno sa detaljnim prikazom lokacija mjerenja (Tabela 4.7), dok je za veće sisteme dat tabelarno sa podacima o broju angažovanih fazorskih mjerenja (Tabela 4.8). Kao što se može vidjeti, optimizacija je izvršena za sva moguća ograničenja u broju kanala za posmatranu topologiju mreže.

Tabela 4.7 Optimalne lokacije fazorskih uređaja i aktivni kanali za slučaj IEEE 14 sistema

Channel limit	Osnovni optimizacioni slučaj		Ispad mjerenja ili grane	
	Lokacije fazorskih mjerenja ^{a)}	Broj	Lokacije fazorskih mjerenja	Broj
2	$I_{2-1}, I_{2-3}, I_{4-2}, I_{4-7}, I_{5-4}, I_{5-6}, I_{6-11}, I_{6-13}, I_{9-4}, I_{9-10}, I_{12-6}, V_{14}, I_{14-13}$	7	$I_{1-2}, I_{1-5}, I_{2-1}, I_{2-3}, I_{4-3}, I_{6-5}, I_{6-11}, V_8, I_{8-7}, I_{9-7}, I_{9-14}, V_{10}, I_{11-10}, I_{12-6}, I_{12-13}, I_{13-12}, I_{13-14}$	10
3	$V_2, I_{2-3}, I_{2-4}, I_{5-1}, I_{5-2}, I_{5-6}, I_{6-11}, I_{6-12}, I_{9-7}, I_{9-10}, I_{9-14}, V_{13}, I_{13-14}$	5	$I_{2-1}, I_{2-3}, I_{2-5}, I_{3-2}, I_{3-4}, I_{5-1}, I_{5-6}, I_{6-11}, I_{6-12}, I_{6-13}, V_8, I_{9-7}, I_{9-10}, I_{9-14}, V_{10}, I_{10-9}, I_{10-11}, I_{13-12}, I_{13-14}$	8
4	$I_{2-1}, I_{2-3}, I_{2-4}, I_{2-5}, V_6, I_{6-5}, I_{6-11}, I_{6-12}, I_{9-7}, I_{9-10}, I_{9-14}, I_{13-12}, I_{13-14}$	4	$I_{2-1}, I_{2-3}, I_{2-5}, I_{3-2}, I_{3-4}, I_{5-1}, I_{5-6}, I_{6-11}, I_{6-12}, I_{6-13}, V_8, I_{9-7}, I_{9-10}, I_{9-14}, V_{10}, I_{10-9}, I_{10-11}, I_{13-12}, I_{13-14}$	8
5, 6	$V_2, I_{2-1}, I_{2-3}, I_{2-5}, V_6, I_{6-11}, I_{6-12}, I_{6-13}, V_9, I_{9-4}, I_{9-7}, I_{9-10}, I_{9-14}$	3	$I_{2-1}, I_{2-3}, I_{2-5}, I_{3-2}, I_{3-4}, I_{5-1}, I_{5-6}, I_{6-11}, I_{6-12}, I_{6-13}, V_8, I_{9-7}, I_{9-10}, I_{9-14}, V_{10}, I_{10-9}, I_{10-11}, I_{13-12}, I_{13-14}$	8

^{a)} V_p – mjerenje fazora napona koje pripada fazorskom mjerenju u čvoru p

I_{p-q} – mjerenje fazora struje koje pripada fazorskom mjerenju u čvoru p , a smješteno je u grani $p-q$

Očekivan zaključak je da veća ograničenja u broju kanala vode ka manjem broju angažovanih mjernih uređaja, tj. da je optimalna mjerna konfiguracija manje cijene. Na osnovu prikazanih rezultata (Tabela 4.7) može se uočiti da usvojeno ograničenje u broju aktivnih kanala u različitoj mjeri utiče na osnovni optimizacioni problem u odnosu na slučaj kada je u optimizaciju uključen kriterijum robusnosti. Kod osnovnog optimizacionog problema se uočava značajniji uticaj ograničenja broja kanala, jer se optimalne mjerne konfiguracije mijenjaju zajedno sa promjenom ograničenja broja kanala. S druge strane, za slučaj kada je robusnost mjerne konfiguracije uključena, optimalna mjerna konfiguracija slabo se mijenja sa promjenom ograničenja broja kanala. U ovom slučaju dobija se ista rezultujuća optimalna mjerna konfiguracija za ograničenja broja kanala od 3 pa na više. Analogan zaključak može se izvesti i na osnovu rezultata dobijenih za ostale tipske IEEE sisteme, čime se može konstatovati da zaključci izvedeni za tipski IEEE sistem sa 14 čvorova mogu se usvojiti kao generalni. Razlog za takav zaključak je način na koji fazorski uređaji ostvaruju observabilnost. Naime, poznato je da fazorski uređaj može učiniti observabilnim sve čvorove koji su susjedni (povezani granom) čvoru u kome je fazorski uređaj lociran. Sa smanjivanjem broja dozvoljenih aktivnih kanala, direktno se ograničavaju mogućnosti obezbjeđivanja observabilnosti svih fazorskih uređaja, bez obzira u kom čvoru oni bili smješteni. Time je neophodno povećati broj fazorskih uređaja kako bi se osigurala observabilnost mreže. S druge strane, kada je u pitanju robusnost mreže, mora se voditi računa o ispadu mjernog uređaja. Tada je najbolja strategija da mjerni uređaj koji je u kvaru ne obezbjeđuje observabilnost velikog broja čvorova. Tada ga je lakše zamijeniti, tj. njegovu zonu observabilnosti pokriti drugim fazorskim mjerenjima. Dakle, optimalna strategija se sastoji od angažovanja mjernih uređaja sa manjim brojem aktivnih kanala. Prema prikazanim rezultatima optimalni broj kanala je 3, tj., i pored većeg ograničenja u broju kanala, nije moguće formirati ekonomski prihvatljiviju mjernu konfiguraciju koja uvažava robusnost mjerne konfiguracije.

4. REZULTATI SIMULACIJA

Tabela 4.8 Broj fazorskih mjerenja optimalnih mjernih konfiguracija za tipske IEEE sisteme

Channel limit ^{a)}	IEEE 30 čvorova		IEEE 57 čvorova		IEEE 118 čvorova	
	BC ^{b)}	CC ^{c)}	BC	CC	BC	CC
2	12	19	21	34	54	71
3	8	17	14	30	38	62
4	7	17	12	30	31	62
5	7	17	11	30	28	62
6	7	17	11	30	28	62
7	7	17	11	30	28	62
8	7	17	-	-	28	62
9	-	-	-	-	28	62
10	-	-	-	-	28	62

^{a)} Ograničenje broja kanala usvaja se prema čvoru posmatrane mreže, koji ima najveći broj incidentnih grana.

^{b)} Osnovni slučaj

^{c)} Uvažena je robusnost mjerne konfiguracije (ispad fazorskog mjerenja ili grane)

Ograničenje broja kanala kod fazorskih uređaja predmet je istraživanja [97] i [122]. Tabela 4.9 predstavlja rezultate poređenja predloženog metoda (uz uključivanje evolucionog pravila) [123] sa pomenutim metodima. Poređenje je izvršeno samo za osnovni optimizacioni slučaj jer je samo on analiziran u [97] i [122].

Tabela 4.9 Optimalan broj fazorskih mjerenja u zavisnosti od broja kanala za osnovni optimizacioni problem

Broj kanala	IEEE 14-bus			IEEE 30-bus			IEEE 57-bus			IEEE 118-bus		
	CC	IP-ES	IP-NC	CGAE	IP-ES	IP-NC	CGAE	IP-ES	IP-NC	CGAE	IP-ES	IP-NC
2	7	7	7	12	14	14	21	21	23	54	56	56
3	5	5	5	8	9	9	14	14	16	38	39	38
4	4	4	4	7	7	8	12	12	13	31	31	31
5-9	3	3	3	7	7	7	11	11	12	28	30	28

^{a)} IP-ES – metod zasnovan na cjelobrojnom programiranju i iscrpnoj pretrazi [97],

^{b)} IP-NC – metod zasnovan na cjelobrojnom programiranju, matrici povezanosti čvorova i matrici selektivnosti grana [122].

Pored komunikacionih ograničenja u vidu kapaciteta (broja kanala), u praktičnim slučajevima očekivano je i da neke lokacije ne posjeduju nikakvu komunikacionu infrastrukturu. Stoga ne mogu biti odabrane kao mjerne lokacije, pa je potrebno u skladu sa tim prilagoditi optimizacioni postupak. To se postiže na dva načina: isključivanjem odgovarajućih čvorova kao mogućih lokacija za fazorska mjerenja, ili pridruživanjem veće instalacione cijene (težinskog koeficijenta) posmatranoj lokaciji. Prva opcija je prihvatljivija s aspekta efikasnosti postupka, jer smanjuje red problema. To se kod CGA postiže skraćivanjem hromozoma, tj. eliminacijom djelova hromozoma koji odgovaraju lokacijama koje nemaju komunikacionu infrastrukturu. Druga opcija ima smisla za velike sisteme, gdje cijena komunikacione infrastrukture može biti prihvatljiv dodatni trošak ukoliko je posmatrana lokacija značajno čvorište mreže. Ovaj slučaj ima samo teorijski značaj, jer su u praksi sva značajna čvorišta opremljena najsavremenijom komunikacionom opremom.

Uticaj nedostupnosti komunikacione infrastrukture može se analizirati na primjeru tipskog IEEE sistema sa 14 čvorova tako što se provjeravaju sve kombinacije nedostupnosti od 1 do 5 čvorova, za osnovni i slučaj kada je uključena robusnost kao kriterijum optimizacije. Tabela 4.10 predstavlja broj fazorskih mjerenja potrebnih za kreiranje optimalne mjerne konfiguracije za različite slučajeve

nedostupnosti lokacija za fazorska mjerenja. Uočava se da je optimalna mjerna konfiguracija veoma uslovljena rasporedom nedostupnih lokacija širom sistema. Sa povećanjem broja nedostupnih lokacija, pogoršavaju se rješenja u odnosu na osnovni slučaj, tj. potrebna su veća ulaganja u mjernu konfiguraciju. To je praćeno i povećanjem procenta kombinacija nedostupnih lokacija koje onemogućavaju kreiranje optimalne konfiguracije željenih kvaliteta. Posebno su nepovoljne kombinacije nedostupnosti lokacija koje su međusobno topološki povezane, a karakteriše ih slaba povezanost sa ostalim čvorovima. Takve kombinacije formiraju neobservabilno ostrvo, čime je onemogućen postupak optimizacije. Sudeći po nemogućnosti realizacije optimalnog rješenja, nedostupnost lokacija veći efekat ima na optimizacioni slučaj kada je uključena robusnost nego na osnovni slučaj. Dakle, nedostupnost nekih čvorova kao fazorskih lokacija može značajno ograničiti mogućnost kreiranja robusne mjerne konfiguracije, a time i pouzdane estimacije stanja.

Tabela 4.10 Uticaj nedostupnosti komunikacione infrastrukture na optimalnu mjernu konfiguraciju

Broj nedostupnih lokacija za fazorska mjerenja	1		2		3		4		5	
Optimizacioni slučaj	BC ^{a)}	CC ^{b)}	BC	CC	BC	CC	BC	CC	BC	CC
Najbolji scenario	3	8	3	8	3	8	3	8	3	8
Najlošiji scenario	4	9	5	10	5	10	6	10	6	9
Nema rješenja [%]	0	7.1	0	33	1.6	64.8	6.6	87.4	16.3	97.3

^{a)} Osnovni optimizacioni slučaj

^{b)} Uvažena je robusnost mjerne konfiguracije (ispad fazorskog mjerenja ili grane)

Uključivanje komunikacionih ograničenja u optimizacioni postupak je neophodno kod praktičnih sistema kako bi se pronašla primjenljiva optimalna mjerna konfiguracija. Generalni zaključak je da ukoliko nedostupni čvorovi nisu međusobno povezani, moguće je kreirati mjernu konfiguraciju koja će zadovoljiti s aspekta kvaliteta (observabilnost, robusnost i cijena).

5. ZAKLJUČAK

Vitalna funkcija sistema upravljanja je estimacija stanja. Ona ima zadatak da obezbijedi pouzdanu procjenu vektora stanja na bazi redundantnih mjerenja iz sistema. Na osnovu informacija koje obezbijedi estimator stanja vrše se različite analize (tokovi snaga, razmjena energije s okolnim sistemima, analiza sigurnosti, stabilnosti, prognoza potrošnje itd.), kako bi se precizno definisali svi parametri koji opisuju radni režim EES. Osnovni kvalitet estimacije stanja je pouzdanost dobijenih rezultata. Naime, estimator stanja vrši estimaciju na osnovu mjernih podataka dobijenih od sistema za monitoring. Te informacije često sadrže greške usljed kvarova mjernih uređaja ili komunikacionih problema, pa direktno računanje vektora stanja na osnovu njih ne bi bilo pouzdano, a to bi rezultiralo lošim upravljačkim odlukama. Stoga, estimator stanja, na osnovu algoritma i raspoloživih mjerenja, vrši detekciju i identifikaciju grešaka, zatim i njihovo otklanjanje, što omogućava dobijanje pouzdane procjene vektora stanja.

Dinamika rada savremenih EES i novi zahtjevi sa kojima će se suočiti budući EES posebno se odražavaju na estimator stanja kao funkciju sistema upravljanja na koju se oslanjaju ostale njegove funkcionalnosti. Informacija koju obezbjeđuje estimator stanja mora biti pouzdana i brza, kako bi i upravljačke odluke bile pravovremene i u skladu sa zahtjevima efikasnog rada EES. S tim u vezi definisani su i ciljevi istraživanja kojima je rezultirala ova disertacija. Naime, glavni cilj disertacije je optimizacija statičke estimacije stanja korišćenjem genetskog algoritma koji je, zbog svoje prilagodljivosti na različite optimizacione probleme, prepoznat kao metaheuristički metod sa najširoom primjenom. Poseban akcenat stavljen je na promjenljivost topologije sistema, koja je sastavni dio normalnog radnog režima. Pored toga, jedan od ciljeva je i pronalaženje optimalnog rasporeda mjernih uređaja u sistemu tako da su zadovoljeni tehnički i ekonomski zahtjevi. Tehnički zahtjevi tiču se obezbjeđivanja pouzdane estimacije stanja, dok je ekonomski zahtjev vezan za cijenu mjerne konfiguracije.

Efikasnost estimacije stanja definišu dva faktora: algoritam estimacije i kvalitet mjerne konfiguracije. Djelovanjem na pomenuta dva faktora moguće je izvršiti optimizaciju estimacije stanja. Algoritam statičke estimacije stanja, koji se u osnovnoj formi koristi i danas, formulisao je Fred Schweppe 1970. godine. Algoritam estimacije vremenom se razvijao u cilju prevazilaženja problema sa numeričkom stabilnošću koje su unosila mjerenja injektiranih snaga, čvorovi sa nultim injektiranjem, čvorovi u kojima se stiču veoma dugi i kratki vodovi i sl. Međutim, osnovna formulacija problema, a i algoritam u većem dijelu nijesu se mijenjali. Sa razvojem računarske tehnologije realizacija algoritma estimacije nije predstavljala hardverski problem, jer je sam proces estimacije stanja postao brži od učestanosti osvježavanja mjerenja iz sistema. Nove okolnosti u elektroenergetskom sektoru, koje se prije svega ogledaju u jakom uticaju tržišta električne energije na povećavanje efikasnosti rada EES, doveli su do potrebe da se ponovo otvori pitanje efikasnosti algoritma estimacije stanja. S tim u vezi, ovdje je analiziran uticaj mjernih konfiguracija koje se sastoje od fazorskih mjerenja, koja imaju mogućnost da linearizuju problem estimacije stanja u odnosu na njegovu tradicionalnu definiciju izvedenu za klasične mjerne konfiguracije. Naime, fazorska mjerenja vrše mjerenje fazora napona čvora u kome su instalirana, kao i mjerenje fazora struja u svim granama koje se stiču u taj čvor. Upotrebom podatka o fazoru napona čvora, fazora incidentnih struja grana i informacije preuzete od konfiguratora mreže (topologija mreže i parametri grana), moguće je odrediti fazore napona svih čvorova koji su granama povezani sa čvorom u kome je fazorsko mjerenje instalirano. Dakle, fazorska mjerenja direktno ili indirektno daju informaciju o samom vektoru stanja koji predstavlja rezultat statičke estimacije stanja. Usljed

toga, a uzimajući u obzir njihovu pouzdanost i brzinu osvježavanja informacija, upotreba fazorskih mjerenja brzo se širi i pored trenutno visoke cijene, a predviđaju se kao osnova napredne mjerne infrastrukture budućih sistema za monitoring EES.

Drugi važan aspekt postizanja efikasne statičke estimacije stanja je kvalitet mjerne konfiguracije. Ona ima za zadatak da obezbijedi dovoljnu informacionu osnovu statičkom estimatoru stanja kako bi on bio u mogućnosti da obezbijedi pouzdanu estimaciju vektora stanja EES. Dakle, osnovni ograničavajući faktor pouzdane estimacije stanja je kvalitet mjerne konfiguracije. Glavni kvalitet koji mjerna konfiguracija mora imati je obezbjeđivanje observabilnosti sistema, jer time omogućava proces statičke estimacije stanja. U okviru ove disertacije obrađeni su razni pristupi analize observabilnosti, uz naglašavanje njihovih dobrih i loših osobina. Potrebno je naglasiti da su predstavljena i dva pristupa analize observabilnosti nastala kao rezultat istraživačkog rada na ovoj disertaciji. Jedan je numerički, zasnovan na Gram matrici i posebno je pogodan za analizu redundanse mjerne konfiguracije sastavljene od klasičnih mjernih uređaja. Drugi je topološki, pripremljen specijalno za fazorske mjerne konfiguracije kod kojih se svi mjerni kanali posmatraju posebno. Oba pristupa obrađena su u radovima koji su publikovani u referentnim međunarodnim časopisima i saopštenjima međunarodnih konferencija.

Sama observabilnost, nije dovoljan uslov da mjerna konfiguracija osigura dovoljan nivo informacija za pouzdanu estimaciju stanja. Naime, normalan radni režim EES obuhvata promjene uklopnog stanja koje mogu dovesti do gubitka observabilnosti ukoliko je nivo redundanse mjernih uređaja nedovoljan. Sličan zaključak može se izvesti i u slučaju kvara jednog mjernog uređaja. Dakle, kvalitetna mjerna konfiguracija mora biti sposobna da očuva observabilnost sistema u slučaju promjene topologije mreže i eventualnog ispada nekog od mjernih uređaja iz konfiguracije. Ta karakteristika mjerne konfiguracije zove se robusnost. Pored observabilnosti i robusnosti, prilikom planiranja mjerne konfiguracije potrebno je voditi računa o ograničenjima karakterističnim za analizirani sistem. Naime, u praksi nijesu sve transformatorske stanice opremljene potrebnom komunikacionom infrastrukturom, pogotovo kada su u pitanju moderna fazorska mjerenja. Pored same dostupnosti infrastrukture, potrebno je voditi računa i o dostupnosti komunikacionih kapaciteta. Kada su u pitanju fazorska mjerenja, njima najčešće nijesu potrebni isti komunikacioni kapaciteti u različitim transformatorskim stanicama. Razlog je različit broj mjerenja (broj mjerenja fazora napona i fazora struja). Različiti kapaciteti uslovljavaju i različitu cijenu instalacije istih mjernih uređaja u različitim transformatorskim stanicama. Time se dolazi do finalnog kvaliteta mjerne konfiguracije, tj. njene cijene. Svi prethodno navedeni kvaliteti su tehničke prirode i suprotstavljeni su jedinom ekonomskom kvalitetu, tj. cijeni mjerne konfiguracije. Pronalaženje optimalnog odnosa između tehničkih i ekonomskih kvaliteta mjerne konfiguracije uslovljeno je potrebama i mogućnostima posmatranog sistema, a predmet je problema planiranja optimalne mjerne konfiguracije.

Pronalaženje optimalnih pozicija mjernih uređaja u cilju osiguravanja pouzdane statičke estimacije stanja složen je kombinatorni problem. Njegova složenost eksponencijalno raste s dimenzijom posmatranog sistema. Upotreba direktnih metoda za rješavanje toga problema ne daje zadovoljavajuće rezultate, pogotovo za veće sisteme. Stoga je u ovoj disertaciji posebna pažnja posvećena metaheurstičkim metodama, kao posebnoj grupi metoda koji se koriste za rješavanje složenih optimizacionih problema. Oni objedinjavaju dobre osobine heurističkih metoda kada je brzina konvergencije u pitanju i neke zakonitosti koje karakterišu analizirani problem kako bi se unaprijedio kvalitet postignutog optimalnog rješenja. U cilju boljeg razumijevanja primjenljivosti različitih metaheurstičkih metoda na problem planiranja optimalne mjerne konfiguracije, detaljno

su obrađeni njihovi algoritmi kao i eventualne posebne aproksimacije koje se tiču analiziranog problema. Od predstavljenih metoda, dvije primjene su nastale u toku istraživanja koja su pratila ovu disertaciju, i to: optimizacioni metod zasnovan na koloniji mrava i celularni genetski algoritam (CGA). Imajući u vidu bolje performanse CGA metoda, on je detaljno prikazan kroz princip rada, varijante primjene, podešavanje parametara i postignute rezultate na tipskim IEEE sistemima.

Celularni genetski algoritam u odnosu na standardni genetski algoritam karakteriše decentralizovana struktura populacije, tzv. celularna struktura. Jedinica decentralizacije populacije je veličina susjedstva. Standardni operatori GA primijenjuju se samo na nivou susjedstva. Dobre karakteristike pri rješavanju složenih optimizacionih problema CGA duguje baš specifičnoj strukturi populacije i interakciji susjedstava jedinki, usljed kojih se vrši detaljna eksploatacija prostora rješenja uz očuvanje raznovrsnosti jedinki u populaciji.

U okviru disertacije analizirane su performanse CGA u zavisnosti od svih uticajnih parametara. Tako su analizirane performanse CGA u zavisnosti od tipa susjedstva, populacije, standardnih GA operatora. Predstavljeno je i evoluciono pravilo kao mogućnost daljeg poboljšavanja performansi CGA u smislu relaksacije proračunske zahtjevnosti. Za analizirani optimizacioni problem, kao najbolje pokazalo se susjedstvo C25, mada s aspekta kvaliteta rješenja, sva susjedstva daju isti rezultat. Kada je u pitanju veličina populacije, najbolje performanse algoritma dobijene su za populaciju od 400 jedinki raspoređenih u 20×20 toroidalnu strukturu. Najčešće korišćeni operatori selekcije su turnirska i ruletska selekcija. S aspekta problema optimizacije mjerne konfiguracije, najbolje performanse CGA postižu se za usvojenu turnirsku selekciju sa 4 člana. Usvojena je vjerovatnoća rekombinacije $p_c = 1$, jer za sve manje vrijednosti dolazi do prolongiranja konvergencije optimumu. Kada je operator mutacije u pitanju, njegova vjerovatnoća je definisana u zavisnosti od veličine hromozoma, tj. dimenzije problema kao $p_m = 1/L$. Nakon odabira optimalnih parametara CGA, izvršeno je planiranje optimalne mjerne konfiguracije za tipske IEEE sisteme. Ostvareni rezultati upoređeni su sa rezultatima ostalih raspoloživih tehnika, kroz poređenje kvaliteta ostvarenog rješenja i performansi optimizacionih metoda. Na taj način je ukazano na prednosti CGA u odnosu na ostale metode koji se koriste za planiranje mjerne konfiguracije.

Doprinos efikasnosti predloženog metoda za planiranje mjerne konfiguracije ogleda se i u formulaciji optimizacionog problema. Naime, u proces optimizacije uključeni su svi kriterijumi koji su od interesa, bez obzira na posmatrani sistem. Međutim, ukoliko postoje neki dodatni kriterijumi od interesa za praktični sistem, oni jednostavno mogu biti uključeni usljed modularnosti formulacije optimizacionog problema. Kriterijumi uključeni u optimizaciju su: observabilnost sistema u osnovnoj konfiguraciji mreže sistema, robusnost mjerne konfiguracije (tj. održavanje observabilnosti u svim situacijama promjene topologije, tj. $n-1$ princip pouzdanosti grana sistema) i komunikaciona ograničenja (postojanje mjerne infrastrukture na mjestu instalacije i dostupnost komunikacionih kapaciteta). Svi tehnički kriterijumi suprotstavljeni su jednom ekonomskom, tj. cijeni mjerne konfiguracije koja može biti definisana kao stvarna cijena, ili posredstvom broja angažovanih mjernih uređaja.

Optimizacioni kriterijumi najčešće se uključuju pomoću posebno definisane funkcije cilja. Svakom optimizacionom kriterijumu odgovara poseban član u funkciji cilja kome se pridružuje odgovarajući težinski koeficijent definisan u skladu sa hijerarhijom samih kriterijuma. Prilikom izbora težinskih koeficijenata, potrebno je voditi računa o veličini sistema kako ne bi došlo do promocije manje kvalitetnih rješenja kroz generacije CGA. Izbor težinskih koeficijenata može se izbjeći tako što se tehnički kriterijumi definišu kao uslovi koje mora ispuniti bilo koji član populacije. Na taj način se pojednostavljuje funkcija cilja, koja onda predstavlja samo ekonomski kriterijum, tj. cijenu mjerne

konfiguracije. Time se postiže da, usljed dejstva operatora CGA, dolazi do kombinovanja samo kvalitetnih rješenja, tj. onih rješenja koja zadovoljavaju tehničke kriterijume.

Posebna pažnja posvećena je komunikacionom kriterijumu, koji dobija na značaju sa primjenom fazorskih mjerenja. U cilju efikasne primjene toga kriterijuma, definisana su dva pristupa u zavisnosti od toga da li se radi o nepostojanju komunikacione infrastrukture ili dostupnosti kapaciteta. Prvi slučaj se uzima u obzir već prilikom definisanja strukture hromozoma, čime se prostor rješenja smanjuje, a sa njim i složenost problema. Za potrebe evaluacije drugog kriterijuma uvodi se poseban operator u okviru CGA. On se primijenjuje nakon operatora mutacije, a ima zadatak da provjerava raspoloživi broj komunikacionih kanala kod jedinki iz međupopulacije koja je kreirana dejstvom standardnih CGA operatora. Ukoliko dođe do prekoračenja, proizvoljan broj kanala sukcesivno se oslobađa, sve dok se ne zadovolji usvojeno ograničenje.

Rezultati dobijeni primjenom predloženog metoda na tipskim IEEE sistemima ukazuju na to da je za optimalnu mjernu konfiguraciju, koja omogućava statičku estimaciju stanja, potrebno postaviti fazorska mjerenja u 20–25% čvorova u sistemu. Međutim, takva mjerna konfiguracija neće obezbijediti pouzdanu estimaciju stanja usljed niskog nivoa redundanse mjerenja, odnosno nemogućnosti da očuva observabilnost sistema usljed promjena uklopnog stanja sistema, ili ispada jednog mjernog uređaja. U cilju prevazilaženja tog problema, uključen je kriterijum robusnosti koji rezultira optimalnom mjernom konfiguracijom koja ima raspoređena fazorska mjerenja u 50% čvorova sistema. Dakle, robusna mjerna konfiguracija predstavlja dvostruko veću investiciju u odnosu na osnovnu mjernu konfiguraciju koja omogućava estimaciju stanja. Potrebno je naglasiti da su u okviru ove disertacije analizirane sve konfiguracije sistema uzimajući u obzir $n-1$ princip pouzdanosti, pa su zaključci nešto strožiji. Naime, u praktičnom slučaju, dosta vodova sistema imaju paralelnu rezervu, a uzimajući u obzir samo uklopna stanja karakteristična za konkretan sistem može se postići robusna šema i s manjom investicijom. Još jedan prostor za uštedu, kada su fazorska mjerenja u pitanju, jeste uzimanje u obzir raspoloživosti komunikacionih kanala. Naime, angažovanje fazorskih mjerenja sa manjim brojem kanala podrazumijeva manju investiciju.

Na osnovu rezultata dobijenih nakon uključivanja broja angažovanih kanala fazorskih mjerenja, dolazi se do zaključka da je za optimalnu robusnu mjernu konfiguraciju potrebno angažovati fazorska mjerenja koja nemaju više od 3 aktivna kanala. Za osnovnu mjernu konfiguraciju (koja obezbjeđuje samo observabilnost sistema) to nije slučaj. Naime, veći broj kanala znači angažovanje manje fazorskih mjerenja. S druge strane, kada u nekim transformatorskim stanicama posmatranog sistema nema potrebne komunikacione infrastrukture za instalaciju fazorskih mjerenja, uočava se problem formiranja robusne mjerne konfiguracije u slučaju nedostupnosti nekih transformatorskih stanica sa specifičnom topološkom lokacijom u sistemu. U nekim slučajevima nije moguće kreirati čak ni osnovnu mjernu konfiguraciju koja obezbjeđuje observabilnost sistema. Takvi karakteristični slučajevi odnose se na susjedne i slabo povezane transformatorske stanice ili postrojenja na kraju radijalnog kraka sistema. U takvim slučajevima, jedini izbor je ulaganje u komunikacionu infrastrukturu jer, u suprotnom, ne bi se mogla obezbijediti pouzdana estimacija stanja sistema.

Na kraju, potrebno je naglasiti da se ovom doktorskom disertacijom ne iscrpljuje istraživanje u oblasti optimizacije estimacije stanja jer sa razvojem EES konstantno dolaze novi izazovi za unapređivanje efikasnosti rada sistema. Tu, prije svih, odgovornost preuzima sistem upravljanja, a kvalitetne i pravovremene upravljačke odluke mogu se donijeti samo uz pomoć pouzdane i precizne informacione osnove koja se efikasno obezbjeđuje na osnovu kvalitetne mjerne konfiguracije. Mogući dalji pravci istraživanja su:

- kombinovanje više optimizacionih metoda, tj. stvaranje hibridnih optimizacionih metoda kako bi se iskoristile dobre osobine, a izbjegle mane postojećih metoda;
- primjena fazorskih mjerenja u estimaciji stanja prelaznih režima EES;
- uključivanje dodatnih ograničenja u problem optimizacije mjerne konfiguracije kao što su: greška u određivanju frekvencije i faznog stava napona i struja kod fazorskih mjerenja i uticaj vremenskih uslova na rad mjerne konfiguracije (temperatura, vlažnost);
- primjena teorije grafova u optimizaciji mjerne konfiguracije;
- analiza estimacije stanja i planiranja optimalne mjerne konfiguracije kod EES u interkonekciji, kada problem estimacije ima najveću složenost;
- analiza distribuiranog pristupa estimacije stanja, tj. koordinacije između lokalnih i regionalnih estimatora stanja, kao i centralnog estimatora stanja;
- primjena estimacije stanja u distributivnim mrežama, usljed aktuelnosti distribuirane proizvodnje i potrebe za većim kvalitetom upravljanja i optimizacijom pogona distributivne mreže;
- primjena fazorskih mjerenja u detekciji i alociranju kratkih spojeva u mreži;
- uloga fazorskih mjerenja u budućim sistemima napredne mjerne infrastrukture kao preduslova za uspostavljanje nove generacije elektroenergetskih mreža – pametnih mreža.

Prioritete daljih pravaca istraživanja opredjeljivaće napredak u razvoju ICT tehnoloških rješenja i rastući nivo zahtjeva pred EES u pogledu sigurnosti, pouzdanosti i ekonomičnosti njegovog funkcionisanja.

6. REFERENCE

- [1] I. Vujošević, *Upravljanje elektroenergetskim sistemima*, Elektrotehnički fakultet Podgorica ed. Podgorica, Crna Gora: skripta, 2012.
- [2] L. L. Lai, *Power system restructuring and deregulation*. London, GB: Wiley, 2002.
- [3] F.C. Schweppe and J. Wildes, "Power system static-state estimation part I: Exact model," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-89, pp. 120-125, Januar 1970.
- [4] F.C. Schweppe and D.B. Rom, "Power system static-state estimation Part II: Approximate Model," *IEEE Transactions on power apparatus and systems*, vol. PAS-89, pp. 125-130, Januar 1970.
- [5] F.C. Schweppe, "Power system static-state estimation, Part III: Implementation," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-89, pp. 130-135, Januar 1970.
- [6] G.W. Stagg and A.H. El-Abiad, *Computer methods in power system analysis*. New York: McGraw-Hill Book Co, 1968.
- [7] A.S. Debs, *Modern power systems control and operation*. Atlanta, USA, GA: DSI, 1996.
- [8] A. Monticelli, *State estimation in electric power system. A generalized approach*. Norwell, MA: Kluwer, 1999.
- [9] W. Tinney and R. Walker, "Direct solutions of sparse network equations by optimally ordered triangular factorization," *Proceedings of the IEEE*, vol. 55, pp. 1801–1809, Novembar 1967.
- [10] A. Garcia, A. Monticelli, and P. Abreu, "Fast decoupled state estimation and bad data processing," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-98, no. 5, pp. 1645–1652, 1979.
- [11] B. Stott and O. Alsac, "Fast decoupled load flow," *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-93, pp. 859–869, 1974.
- [12] A. Monticelli and A. Garcia, "Fast decoupled state estimators," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 5, no. 2, pp. 556–564, Maj 1990.
- [13] I. O. Habiballa and V. H. Quintana, "Modified fast-decoupled state estimation in rectangular-coordinates," in *Proceedings of the 22nd Annual North American Power Symposium*, Auburn, AL, 1990, pp. 102–111.
- [14] W. Lin and J. Teng, "State estimation for distribution systems with zero-injection constraints," in *Proceedings of the Power Industry Computer Application Conference*, 1995, pp. 523–529.
- [15] W. Jiang, V. Vittal, and G. T. Heydt, "A distributed state estimator utilizing synchronized phasor measurements," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, no. 2, pp. 1–6, Maj 2007.
- [16] A. Gómez-Expósito and A. de la Villa, "Two-level state estimation with local measurement pre-processing," *IEEE Transaction on Power Systems*, vol. 24, no. 2, pp. 676–684, Maj 2009.
- [17] C. Gómez-Quiles, A. de la Villa Jaén, and A. Gómez-Expósito, "A Factorized Approach to WLS State Estimation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no. 3, pp. 1724-1732, 2011 Avgust.
- [18] I. Vujošević, *Analiza elektroenergetskih sistema I*. Podgorica, Crna Gora: Univerzitet Crne Gore, Elektrotehnički fakultet, 2006.

-
- [19] G. W. Stewart, *Matrix algorithms - Volume 1. - Basic decompositions*. Maryland: Siam, 1998.
- [20] M.S. Čalović and A.T. Sarić, *Eksploatacija elektroenergetskih sistema*. Beograd: Beopres, 1999.
- [21] A. Simes-Costa and V. Quintana, "A robust numerical technique for power system state estimation," *IEEE Transactors on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-100, pp. 691-698, Februar 1981.
- [22] M. Vempati, I. Slutsker, and W. Tinney, "Enhancements to Givens rotations for power system state estimation," *IEEE Transactors on Power Systems*, vol. 6, no. 2, pp. 842-849, Maj 1991.
- [23] J. Wang and V. Quintana, "A decoupled orthogonal row processing algorithm for power system state estimation," *IEEE Transactors on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-103, pp. 2337-2344, Avgust 1984.
- [24] A. Monticelli, C. Murari, and F. Wu, "A hybrid state estimator: Solving normal equations by orthogonal transformations," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-105, no. 2, pp. 3460-3468, Decembar 1985.
- [25] J. Gu, K. Clements, G. Krumpholz, and P. Davis, "The solution of illconditioned power system state estimation problems via the method of Peters and Wilkinson," in *Proceedings of the PICA conference*, Houston, 1983, pp. 239-246.
- [26] F. Aschmoneit, N. Peterson, and E. Adrian, "State estimation with equality constraints," in *Proceedings of the 10th PICA conference*, Toronto, 1977, pp. 427-430.
- [27] A. Gjelsvik, S. Aam, and L. Holten, "Hachtel's augmented matrix method - A rapid method improving numerical stability in power system static state estimation," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-104, pp. 2987-2993, Novembar 1985.
- [28] W. Liu, F. Wu, L. Holten, A. Gjelsvik, and S. Aam, "Computational issues in the Hachtel's augmented matrix method for power system state estimation," in *Proceedings of the 9th. Power System Computation Conference*, Lisabon, 1987.
- [29] R. Nucera and M. Gilles, "A blocked sparse matrix formulation for the solution of equality-constrained state estimation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 6, no. 1, pp. 214-224, Februar 1991.
- [30] R. Živanovic and C. Cairns, "Implementation of PMU technology in state estimation: An overview," in *Proceedings of the IEEE AFRICON*, 1996, pp. 1006-1011.
- [31] R. F. Nuqui and A. G. Phadke, "Hybrid linear state estimation utilizing synchronized phasor measurements," in *Proceedings of the IEEE Power Tech. 2007*, Lausanne, 2007, pp. 1665-1669.
- [32] T. Yang, H. Sun, and A. Bose, "Transition to a two-level linear state estimator—Part I: Architecture," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no. 1, pp. 46-53, Februar 2011.
- [33] T. Yang, H. Sun, and A. Bose, "Transition to a two-level linear state estimator—Part II: Algorithm," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no. 1, pp. 54-62, Februar 2011.
- [34] K. A. Clements, G. R. Krumpholz, and P. W. Davis, "Power system observability: A practical algorithm using network topology," *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-99, no. 4, pp. 1534-1542, Jul/Avgust 1980.
- [35] K. A. Clements, G. R. Krumpholz, and P.W. Davis, "Power system state estimation residual analysis: An algorithm using network topology," *IEEE Transactions on Power Apparatus and*
-

-
- Systems*, vol. PAS-100, no. 4, pp. 1779-1787, April 1981.
- [36] K. A. Clements, G. R. Krumpholz, and P. W. Davis, "Power system state estimation with measurement deficiency: An observability measurement placement algorithm," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-102, pp. 2012-2020, Jul 1983.
- [37] G. N. Korres and G. C. Contaxis, "Identification and updating of minimally dependent sets of measurements in state estimation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 6, no. 3, pp. 999-1005, August 1991.
- [38] A. Simoes-Costa, T. S. Piazza, and A. Mandel, "Qualitative methods to solve qualitative problems in power system state estimation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 5, no. 3, pp. 941-949, August 1990.
- [39] A. Monticelli and F. F. Wu, "Network observability: Theory," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-104, no. 5, pp. 1042-1048, Maj 1985.
- [40] D. Falcao and M. Arias, "State estimation and observability analysis based on echelon forms of the linearized measurement models," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 9, no. 2, pp. 979-987, Maj 1994.
- [41] M. B. Do Coutto Filho, J. C. S. Souza, F. M. F. Oliveira, and M. Th. Schilling, "Identifying critical measurements & sets for power system state estimation," in *Proceedings of the IEEE Porto PowerTech Conference*, Porto, 2001.
- [42] M. C. de Almeida, E. N. Asada, and A. V. Garcia, "On the use of Gram matrix in observability analysis," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 23, no. 1, Februar 2008.
- [43] Z. Miljanić, I. Đurović, and I. Vujošević, "Identifikacija kritičnih mjerenja i setova upotrebom Jacobian matrice," in *Zbornik I Savjetovanja CG KO CIGRE*, Budva, 2009, pp. R-C2-04.
- [44] Z. Miljanić, I. Đurović, and I. Vujošević, "Redundancy analysis and observability restoration based on the Gram matrix factorization," in *Proceedings of the 44th International Universities' Power Engineering Conference*, Glasgow, 2009.
- [45] J. B. A. London, L. F. C. Alberto, and N. G. Bretas, "Analysis of measurement-set qualitative characteristics for state-estimation purposes," in *Proceedings of the IET Generation, Transmission and Distribution Conference*, 2007, pp. 39-45.
- [46] G. Missout and P. Girard, "Measurement of bus voltage angle between Montreal and Sept-Iles," *IEEE Transactions on PAS*, vol. 99, no. 2, pp. 536-539, Mart/April 1980.
- [47] G. Missout, J. Beland, and G. Bedard, "Dynamic measurement of the absolute voltage angle on long transmission Lines," *IEEE Transactions on PAS*, vol. 100, no. 11, pp. 4428-4434, Novembar 1981.
- [48] P. Bonanomi, "Phase angle measurements with synchronized clocks – principles and applications," *IEEE Transactions on PAS*, vol. 100, no. 11, pp. 5036-5043, Novembar 1981.
- [49] A.G. Phadke, T. Hlibka, and M. Ibrahim, "Fundamental basis for distance relaying with symmetrical components," *IEEE Transactions on PAS*, vol. 96, no. 2, pp. 635-646, Mart/April 1977.
- [50] A.G. Phadke, J.S. Thorp, and M.G. Adamiak, "A new measurement technique for tracking voltage phasors, local system frequency, and rate of change of frequency," *IEEE Transactions on PAS*, vol. 102, no. 5, pp. 1025-1038, Maj 1983.
-

-
- [51] "IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems," IEEE 1344–1995 C37.118–2005, 2005.
- [52] H. J. Koglin, "Optimal measuring system for state estimation," in *Proceedings of the PSCC*, Cambridge, U.K., 1975, pp. 3–12.
- [53] K. A. Clements, G. R. Krumpholz, and P. W. Davis, "State estimation measurement system reliability evaluation—An efficient algorithm based on topological observability theory," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-102, pp. 2012–2020, Jul 1983.
- [54] A. Monticelli and F. F. Wu, "Network observability: Identification of observable islands and measurement placement," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-102, no. 12, pp. 3769–3777, December 1983.
- [55] G. N. Korres and G. C. Contaxis, "A tool for the evaluation and selection of state estimation measurement schemes," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 9, no. 2, pp. 1110–1116, May 1984.
- [56] M. Yehia, R. Jabr, I. El-Bitar, and R. Waked, "A PC based state estimator interfaced with a remote terminal unit placement algorithm," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 16, no. 2, pp. 210–215, May 2001.
- [57] M. E. Baran, J. Zhu, H. Zhu, and K. E. Garren, "A meter placement method for state estimation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 10, no. 3, pp. 1704–1710, August 1995.
- [58] A. Abur and F. H. Magnago, "Optimal meter placement for maintaining observability during single branch outages," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 14, no. 4, pp. 1273–1278, November 1999.
- [59] F. H. Magnago and A. Abur, "A unified approach to robust meter placement against loss of measurements and branch outages," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 15, no. 3, pp. 945–949, August 2000.
- [60] H. Mori and O. Matsuzaki, "A tabu search based approach to meter placement in static state estimation," in *Proceedings of the Intelligent System Application Power Systems (ISAP)*, Rio de Janeiro, 1999, pp. 365–369.
- [61] O. F. Ricciari and D. M. Falcão, "A meter placement method for state estimation using genetic algorithms," in *Proceedings of the Intelligent System Application Power Systems (ISAP)*, Rio de Janeiro, 1999, pp. 360–364.
- [62] A. B. Antonio, J. R. A. Torrao, and M. B. Do Coutto Filho, "Meter placement for power system state estimation using simulated annealing," in *Proceedings of IEEE Porto power tech conference*, Porto, 2001.
- [63] J. Cosier, J. G. Rolim, and A. J. A. S. Costa, "Meter placement for power state estimation: An approach based on genetic algorithm and topological observability analysis," in *Proceedings of the Intelligent Systems Application to Power Systems (ISAP'01)*, Budimpešta, 2001.
- [64] J. C. Souza, M. B. Do Coutto Filho, M. Th. Schilling, and Capdeville C., "Optimal metering systems for monitoring power networks under multiple topological scenarios," *IEEE Transactions on power systems*, vol. 20, no. 4, pp. 1700–1708, November 2005.
- [65] J. C. S. Souza, M. B. Do Coutto Filho, E. M. Meza, and M. Th. Schilling, "Optimal meter placement for reliable state estimation," in *Proceedings of the 12th Intelligent Systems Application to Power Systems Conference (ISAP'03)*, Lemnos, 2003.
- [66] T. L. Baldwin, L. Mili, M. B. Boisen Jr., and R. Adapa, "Power system observability with minimal
-

- phasor measurement placement," *IEEE Transaction of Power Systems*, vol. 8, no. 2, pp. 707–715, May 1993.
- [67] K. S. Cho, J.R. Shin, and S. H. Hyun, "Optimal placement of phasor measurement units with GPS receiver," in *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, 2001, pp. 258–262.
- [68] R. F. Nuqui, A. G. Phadke, R. P. Schulz, and N. Bhatt, "Fast on-line voltage security monitoring using synchronized phasor measurements and decision trees," in *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, 2001, pp. 1347–1352.
- [69] I. Kamwa and R. Grondin, "PMU configuration for system dynamic performance measurement in large multiarea power systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 17, no. 2, pp. 385–394, Maj 2002.
- [70] G. B. Denegri, M. Invernizzi, and F. Milano, "A security oriented approach to PMU positioning for advanced monitoring of a transmission grid," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Power Systems Technology*, 2002, pp. 798–803.
- [71] B. Milošević and M. Begović, "Nondominated sorting genetic algorithm for optimal phasor measurement placement," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, no. 1, pp. 69–75, 2003.
- [72] B. Xu and A. Abur, "Observability analysis and measurement placement for systems with PMUs," in *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Power Systems Conference and Exposition*, 2004, pp. 943–946.
- [73] R. F. Nuqui and A. G. Phadke, "Phasor measurement unit placement techniques for complete and incomplete observability," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 4, pp. 2381–2388, 2005.
- [74] J. Chen and A. Abur, "Improved bad data processing via strategic placement of PMUs," in *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2005, pp. 509–513.
- [75] H.S. Zhao, Z.Q. Mi Y. Li, and L. Yu, "Sensitivity constrained PMU placement for complete observability of power systems," in *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference and Exhibition*, 2005.
- [76] J. Chen and A. Abur, "Placement of PMUs to enable bad data detection in state estimation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, no. 4, pp. 1608–1615, November 2006.
- [77] J. Peng, Y. Sun, and H. F. Wang, "Optimal PMU placement for full network observability using Tabu search algorithm," *International Journal of Electric Power Energy Systems*, vol. 28, no. 4, pp. 223–231, 2006.
- [78] K. P. Lien, C. W. Liu, C. S. Yu, and J. A. Jiang, "Transmission network fault location observability with minimal PMU placement," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, no. 3, pp. 1128–1136, Jul 2006.
- [79] X. Bian and J. Qiu, "Adaptive clonal algorithm and its application for optimal PMU placement," in *Proceedings of the Communications, Circuits and Systems International Conference*, 2006, pp. 2102–2106.
- [80] C. Rakpenthai, S. Premrudeepreechacharn, S. Uatrungjit, and N. R. Watson, "An optimal PMU placement method against measurement loss and branch outage," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 1, pp. 101–107, Januar 2007.

-
- [81] S. Chakrabarti, D. Eliades, E. Kyriakides, and M. Albu, "Measurement uncertainty considerations in optimal sensor deployment for state estimation," in *Proceedings of the IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing*, 2007.
- [82] S. Chakrabarti and E. Kyriakides, "Optimal placement of phasor measurement units for power system observability," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 23, no. 3, pp. 1433–1440, August 2008.
- [83] D. Dua, S. Dambhare, R. K. Gajbhiye, and S. A. Soman, "Optimal multistage scheduling of PMU placement: An ILP approach," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, no. 4, pp. 1812–1820, Oktober 2008.
- [84] B. Gou, "Generalized integer linear programming formulation for optimal PMU placement," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 23, no. 3, pp. 1099–1104, August 2008.
- [85] B. Gou, "Optimal placement of PMUs by integer linear programming," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 23, no. 3, pp. 1525–1526, August 2008.
- [86] M. Zhou et al., "A preprocessing method for effective PMU placement studies," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation Restructuring Power Technologies*, 2008, pp. 2862–2867.
- [87] S. Chakrabarti, E. Kyriakides, and D. G. Eliades, "Placement of synchronized measurements for power system observability," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, no. 1, pp. 12–19, Januar 2009.
- [88] N. H. Abbasy and H. M. Ismail, "A unified approach for the optimal PMU location for power system state estimation," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, no. 2, pp. 806–813, Maj 2009.
- [89] F. Aminafar, C. Lucas, A. Khodaei, and M. Fotuhi-Firuzabad, "Optimal placement of phasor measurement units using immunity genetic algorithm," *IEEE Transactions on power systems*, vol. 24, no. 3, pp. 1014–1020, 2009.
- [90] R. Sodhi, S. C. Srivastava, and S. N. Singh, "Optimal PMU placement to ensure system observability under contingencies," in *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2009, pp. 1–6.
- [91] M. Korkali and A. Abur, "Placement of PMUs with channel limits," in *Proceedings of the IEEE PES power and engineering society general meeting*, 2009, pp. 1–4.
- [92] F. Aminifar, A. Khodaei, M. Fotuhi-Firuzabad, and M. Shahidehpour, "Contingency-constrained PMU placement in power networks," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, no. 1, pp. 516–523, Februar 2010.
- [93] R. Emami and A. Abur, "Robust measurement design by placing synchronized phasor measurements on network branches," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, no. 1, pp. 38–43, Februar 2010.
- [94] C. Peng, H. Sun, and J. Guo, "Multi-objective optimal PMU placement using a non-dominated sorting differential evolution algorithm," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 32, no. 8, pp. 886–892, 2010.
- [95] M. Hurtgen and J.C. Maun, "Optimal PMU placement using Iterated Local Search," *International Journal of Electric Power and Energy Systems*, vol. 32, no. 8, pp. 857–60, 2010.
- [96] R. Sodhi, S. C. Srivastava, and S. N. Singh, "Optimal PMU placement method for complete topological and numerical observability of power system," *International Journal of Electric*
-

-
- Power and Energy Systems*, vol. 80, no. 9, pp. 1154–1159, September 2010.
- [97] M. Korkali and A. Abur, "Impact of network sparsity on strategic placement of phasor measurement units with fixed channel capacity," in *Proceedings of the IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, 2010, pp. 3445–3448.
 - [98] R. Kavasseri and S. K. Srinivasan, "Joint optimal placement of PMU and conventional measurements in power systems," in *Proceedings of the IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, 2010, pp. 3449–3452.
 - [99] M. Hajian, A. M. Ranjbar, T. Amraee, and B. Mozafari, "Optimal placement of PMUs to maintain network observability using a modified BPSO algorithm," *International Journal of Electric Power and Energy Systems*, vol. 33, no. 1, pp. 28–34, Januar 2011.
 - [100] F. Aminifar, M. Fotuhi-Firuzabad, M. Shahidehpour, and A. Khodaei, "Probabilistic multistage PMU placement in electric power systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, no. 2, pp. 841–849, April 2011.
 - [101] T. T. Kim and H. V. Poor, "Strategic protection against data injection attacks on power grids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 2, no. 2, pp. 326–333, Jun 2011.
 - [102] A. Ahmadi, Y. Alinejad-Beromi, and M. Moradi, "Optimal PMU placement for power system observability using binary particle swarm optimization and considering measurement redundancy," *Expert Systems Application*, vol. 38, pp. 7263–7269, 2011.
 - [103] J. Licheng and Wang L., "A novel genetic algorithm based on immunity," *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics - Part A: Systems and humans*, vol. 30, no. 5, pp. 552–561, September 2000.
 - [104] K. Price, R. Storn, and J. Lampinen, *Differential evolution: a practical approach to global optimization*. Berlin: Springer, 2005.
 - [105] E. Zitzler and L. Thiele, "Multiobjective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength Pareto approach," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 3, no. 4, pp. 257–271, 1999.
 - [106] Z. Miljanić, I. Đurović, and I. Vujošević, "Optimal PMU placement using ant colony optimization approach," in *Proceedings of The 46th International Universities' Power Engineering Conference*, Soest, 2011.
 - [107] J. Kennedy and R. Eberhart, "A discrete binary version of particle swarm algorithm," in *IEEE Computational cybernetics and simulation conference*, 1997, pp. 4104–4108.
 - [108] F. Afshinmanesh, A. Marandi, and A. Rahimi-Kian, "A novel binary particle swarm optimization method using artificial immune system," in *IEEE 2006 Eurocon. Conference*, 2006, pp. 4104–4109.
 - [109] M. Hajian, A. M. Ranjbar, T. Amraee, and A. R. Shirani, "Optimal placement of phasor measurement units: Particle swarm optimization approach," in *Proceedings of the International conference on intelligent systems application to power systems*, 2007, pp. 1–6.
 - [110] N. Srinivas and Kalyanmoy Deb, "Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms," *Evolutionary Computation*, vol. 2, no. 3, pp. 221–248, 1994.
 - [111] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan, "A fast elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6, no. 2, pp. 182–197, april 2002.
-



- [112] D. Whitley, "Cellular genetic algorithms," in *Proceedings of the 5th international conference on genetic algorithms*, 1993, p. 658.
- [113] S. Wright, "Isolation by distance," *Genetics*, vol. 28, pp. 114–138, 1943.
- [114] E. Alba and J.M. Troya, "Improving flexibility and efficiency by adding parallelism to genetic algorithms," *Statistics and Computing*, vol. 12, no. 2, pp. 91–114, 2002.
- [115] E. Alba, F. Luna, and A.J. Nebro, "Advances in parallel heterogeneous genetic algorithms for continuous optimization," *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, vol. 14, no. 3, pp. 101–117, 2004.
- [116] B. Dorronosoro and E. Alba, "A simple cellular genetic algorithm for continuous optimization," in *Proceedings of the IEEE Congress on evolutionary computation*, Vancouver, 2006, pp. 2838–2844.
- [117] B. Schonfisch and A. de Roos, "Synchronous and asynchronous updating in cellular automata," *BioSystems*, vol. 51, pp. 123–143, 1999.
- [118] J. Sarma and K.A. De Jong, "An analysis of local selection algorithms in a spatially structured evolutionary algorithm," in *Proceedings of the Seventh International Conference on Genetic Algorithms*, 1997, pp. 181–186.
- [119] L. Yuming, Li Ming, and Li Ling, "Cellular Genetic Algorithms with Evolutional Rule," in *Proceedings of the International workshop on intelligent systems and applications*, 2009, pp. 1–4.
- [120] Z. Miljanić, I. Đurović, and I. Vujošević, "Optimal placement of PMUs with limited number of channels," *Electric Power Systems Research*, vol. 90C, pp. 93–98, Jun 2012.
- [121] F.J. Marin, F. Garcia-Lagos, G. Joya, and F. Sandoval, "Genetic algorithms for optimal placement of phasor measurements units in electric networks," *Electron Letters*, vol. 39, no. 19, pp. 1403–1005, 2003.
- [122] R. Kumar and V. S. Rao, "Optimal placement of PMUs with limited number of channels," in *Proceedings of the North American Power Symposium*, 2011, pp. 1–7.
- [123] Z. Miljanić, I. Đurović, and I. Vujošević, "Multiple channel PMU placement considering communication constraints," *Energy systems*, vol. DOI : 10.1007/s12667-012-0069-6, 2012.

7. DODATAK

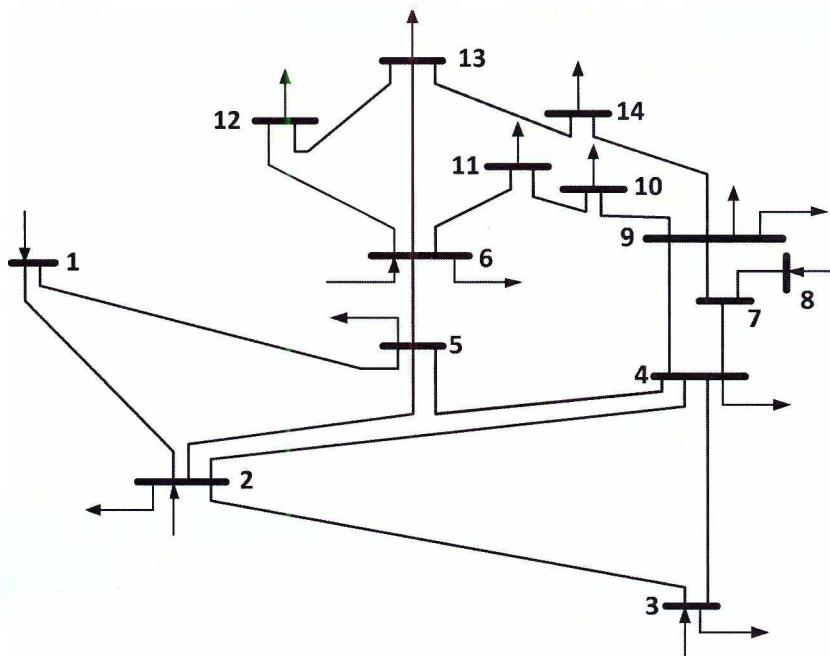
IEEE tipski sistem sa 14 čvorova

Tabela 7.1 Podaci o čvorovima sistema IEEE 14b

N. br. čvora	Nap. nivo	Tip	V_r [p.u.]	R [Ω]	P_r [MW]	Q_r [MVar]	P_s [MW]	Q_s [MVar]	U_n [p.u.]	Q_{max} [MVar]	Q_{min} [MVar]	G [p.u.]	B [p.u.]
1	HV	3	1.06	0	0	0	232.4	-16.9	1.06	0	0	0	0
2	HV	2	1.045	-4.98	21.7	12.7	40	42.4	1.045	50	-40	0	0
3	HV	2	1.01	-12.72	94.2	19	0	23.4	1.01	40	0	0	0
4	HV	0	1.019	-10.33	47.8	-3.9	0	0	0	0	0	0	0
5	HV	0	1.02	-8.78	7.6	1.6	0	0	0	0	0	0	0
6	LV	2	1.07	-14.22	11.2	7.5	0	12.2	1.07	24	-6	0	0
7	ZV	0	1.062	-13.37	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	TV	2	1.09	-13.36	0	0	0	17.4	1.09	24	-6	0	0
9	LV	0	1.056	-14.94	29.5	16.6	0	0	0	0	0	0	0.19
10	LV	0	1.051	-15.1	9	5.8	0	0	0	0	0	0	0
11	LV	0	1.057	-14.79	3.5	1.8	0	0	0	0	0	0	0
12	LV	0	1.055	-15.07	6.1	1.6	0	0	0	0	0	0	0
13	LV	0	1.05	-15.16	13.5	5.8	0	0	0	0	0	0	0
14	LV	0	1.036	-16.04	14.9	5	0	0	0	0	0	0	0

Tabela 7.2 Podaci o granama sistema IEEE 14b

Početni čvor	Krajnji čvor	r [p.u.]	x [p.u.]	b [p.u.]
1	2	0.01938	0.05917	0.0528
1	5	0.05403	0.22304	0.0492
2	3	0.04699	0.19797	0.0438
2	4	0.05811	0.17632	0.034
2	5	0.05695	0.17388	0.0346
3	4	0.06701	0.17103	0.0128
4	5	0.01335	0.04211	0
4	7	0	0.20912	0
4	9	0	0.55618	0
5	6	0	0.25202	0
6	11	0.09498	0.1989	0
6	12	0.12291	0.25581	0
6	13	0.06615	0.13027	0
7	8	0	0.17615	0
7	9	0	0.11001	0
9	10	0.03181	0.0845	0
9	14	0.12711	0.27038	0
10	11	0.08205	0.19207	0
12	13	0.22092	0.19988	0
13	14	0.17093	0.34802	0



Slika 7.1 Šematski prikaz IEEE 14b sistema

IEEE tipski sistem sa 30 čvorova

Tabela 7.3 Podaci o čvorovima sistema IEEE 30b

R. br. čvora	Nap. nivo	Tip čvora	U_i [p.u.]	θ_i [°]	P_p [MW]	Q_p [MVar]	P_s [MW]	Q_s [MVar]	U_n [p.u.]	Q_{max} [MVar]	Q_{min} [MVar]	G [p.u.]	B [p.u.]
1	132	3	1.06	0	0	0	260.2	-16.1	1.06	0	0	0	0
2	132	2	1.043	-5.48	21.7	12.7	40	50	1.045	50	-40	0	0
3	132	0	1.021	-7.96	2.4	1.2	0	0	0	0	0	0	0
4	132	0	1.012	-9.62	7.6	1.6	0	0	0	0	0	0	0
5	132	2	1.01	-14.37	94.2	19	0	37	1.01	40	-40	0	0
6	132	0	1.01	-11.34	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	132	0	1.002	-13.12	22.8	10.9	0	0	0	0	0	0	0
8	132	2	1.01	-12.1	30	30	0	37.3	1.01	40	-10	0	0
9	1	0	1.051	-14.38	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	33	0	1.045	-15.97	5.8	2	0	0	0	0	0	0	0.19
11	11	2	1.082	-14.39	0	0	0	16.2	1.082	24	-6	0	0
12	33	0	1.057	-15.24	11.2	7.5	0	0	0	0	0	0	0
13	11	2	1.071	-15.24	0	0	0	10.6	1.071	24	-6	0	0
14	33	0	1.042	-16.13	6.2	1.6	0	0	0	0	0	0	0
15	33	0	1.038	-16.22	8.2	2.5	0	0	0	0	0	0	0
16	33	0	1.045	-15.83	3.5	1.8	0	0	0	0	0	0	0
17	33	0	1.04	-16.14	9	5.8	0	0	0	0	0	0	0
18	33	0	1.028	-16.82	3.2	0.9	0	0	0	0	0	0	0
19	33	0	1.026	-17	9.5	3.4	0	0	0	0	0	0	0
20	33	0	1.03	-16.8	2.2	0.7	0	0	0	0	0	0	0
21	33	0	1.033	-16.42	17.5	11.2	0	0	0	0	0	0	0

7. DODATAK

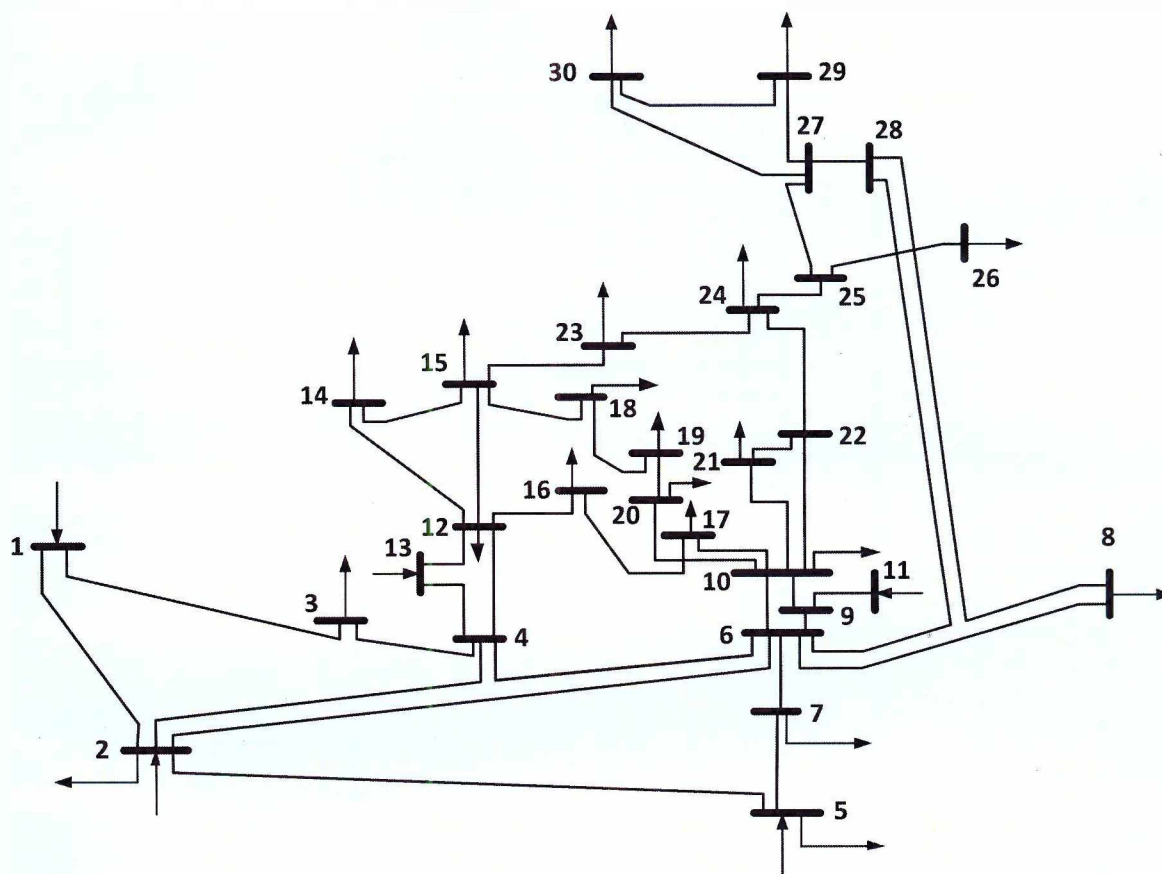
R. br. čvora	Nap. nivo	Tip čvora	U_r [p.u.]	θ [°]	P_r [MW]	Q_r [MVar]	P_s [MW]	Q_s [MVar]	U_n [p.u.]	Q_{min} [MVar]	Q_{max} [MVar]	G [p.u.]	B [p.u.]
22	33	0	1.033	-16.41	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	33	0	1.027	-16.61	3.2	1.6	0	0	0	0	0	0	0
24	33	0	1.021	-16.78	8.7	6.7	0	0	0	0	0	0	0.043
25	33	0	1.017	-16.35	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	33	0	1	-16.77	3.5	2.3	0	0	0	0	0	0	0
27	33	0	1.023	-15.82	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	132	0	1.007	-11.97	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	33	0	1.003	-17.06	2.4	0.9	0	0	0	0	0	0	0
30	33	0	0.992	-17.94	10.6	1.9	0	0	0	0	0	0	0

Tabela 7.4 Podaci o granama sistema IEEE 30b

Polazni čvor	Krajnji čvor	$\cos \phi$ [p.u.]	X [p.u.]	B [p.u.]
1	2	0.0192	0.0575	0.0528
1	3	0.0452	0.1652	0.0408
2	4	0.057	0.1737	0.0368
3	4	0.0132	0.0379	0.0084
2	5	0.0472	0.1983	0.0418
2	6	0.0581	0.1763	0.0374
4	6	0.0119	0.0414	0.009
5	7	0.046	0.116	0.0204
6	7	0.0267	0.082	0.017
6	8	0.012	0.042	0.009
6	9	0	0.208	0
6	10	0	0.556	0
9	11	0	0.208	0
9	10	0	0.11	0
4	12	0	0.256	0
12	13	0	0.14	0
12	14	0.1231	0.2559	0
12	15	0.0662	0.1304	0
12	16	0.0945	0.1987	0
14	15	0.221	0.1997	0
16	17	0.0524	0.1923	0
15	18	0.1073	0.2185	0
18	19	0.0639	0.1292	0
19	20	0.034	0.068	0
10	20	0.0936	0.209	0
10	17	0.0324	0.0845	0
10	21	0.0348	0.0749	0
10	22	0.0727	0.1499	0
21	22	0.0116	0.0236	0
15	23	0.1	0.202	0
22	24	0.115	0.179	0
23	24	0.132	0.27	0
24	25	0.1885	0.3292	0
25	26	0.2544	0.38	0
25	27	0.1093	0.2087	0
28	27	0	0.396	0
27	29	0.2198	0.4153	0
27	30	0.3202	0.6027	0
29	30	0.2399	0.4533	0
8	28	0.0636	0.2	0.0428

7. DODATAK

Početni čvor	Krajnji čvor	R	X	B
		[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]
6	28	0.0169	0.0599	0.013



Slika 7.2 Šematski prikaz IEEE 30b sistema

IEEE tipski sistem sa 57 čvorova

Tabela 7.5 Podaci o čvorovima sistema IEEE 57b

R. br. čvora	Nap. nivo	Tip čvora	U_i	θ_i	P_i	Q_i	P_s	Q_s	U_s	Q_{max}	Q_{min}	G	B
			[p.u.]	[°]	[MW]	[MVar]	[MW]	[MVar]	[p.u.]	[MVar]	[MVar]	[p.u.]	[p.u.]
1	V1	3	1.04	0	55	17	128.9	-16.1	1.04	0	0	0	0
2	V1	2	1.01	-1.18	3	88	0	-0.8	1.01	50	-17	0	0
3	V1	2	0.985	-5.97	41	21	40	-1	0.985	60	-10	0	0
4	V1	0	0.981	-7.32	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	V1	0	0.976	-8.52	13	4	0	0	0	0	0	0	0
6	V1	2	0.98	-8.65	75	2	0	0.8	0.98	25	-8	0	0
7	V1	0	0.984	-7.58	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	V1	2	1.005	-4.45	150	22	450	62.1	1.005	200	-140	0	0
9	V1	2	0.98	-9.56	121	26	0	2.2	0.98	9	-3	0	0
10	V1	0	0.986	-11.43	5	2	0	0	0	0	0	0	0
11	V1	0	0.974	-10.17	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	V1	2	1.015	-10.46	377	24	310	128.5	1.015	155	-150	0	0
13	V1	0	0.979	-9.79	18	2.3	0	0	0	0	0	0	0
14	V1	0	0.97	-9.33	10.5	5.3	0	0	0	0	0	0	0

7. DODATAK

R. br. čvora	Nap. nivo	Tip čvora	U_i [p.u.]	θ_i [°]	P_p [MW]	Q_p [MVar]	P_k [MW]	Q_k [MVar]	U_n [p.u.]	Q_{max} [MVar]	Q_{min} [MVar]	G [p.u.]	B [p.u.]
15	V1	0	0.988	-7.18	22	5	0	0	0	0	0	0	0
16	V1	0	1.013	-8.85	43	3	0	0	0	0	0	0	0
17	V1	0	1.017	-5.39	42	8	0	0	0	0	0	0	0
18	V2	0	1.001	-11.71	27.2	9.8	0	0	0	0	0	0	0.1
19	V2	0	0.97	-13.2	3.3	0.6	0	0	0	0	0	0	0
20	V2	0	0.964	-13.41	2.3	1	0	0	0	0	0	0	0
21	V3	0	1.008	-12.89	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	V3	0	1.01	-12.84	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	V3	0	1.008	-12.91	6.3	2.1	0	0	0	0	0	0	0
24	V3	0	0.999	-13.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	V4	0	0.982	-18.13	6.3	3.2	0	0	0	0	0	0	0.059
26	V5	0	0.959	-12.95	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	V5	0	0.982	-11.48	9.3	0.5	0	0	0	0	0	0	0
28	V5	0	0.997	-10.45	4.6	2.3	0	0	0	0	0	0	0
29	V5	0	1.01	-9.75	17	2.6	0	0	0	0	0	0	0
30	V4	0	0.962	-18.68	3.6	1.8	0	0	0	0	0	0	0
31	V4	0	0.936	-19.34	5.8	2.9	0	0	0	0	0	0	0
32	V4	0	0.949	-18.46	1.6	0.8	0	0	0	0	0	0	0
33	V4	0	0.947	-18.5	3.8	1.9	0	0	0	0	0	0	0
34	V3	0	0.959	-14.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35	V3	0	0.966	-13.86	6	3	0	0	0	0	0	0	0
36	V3	0	0.976	-13.59	0	0	0	0	0	0	0	0	0
37	V3	0	0.985	-13.41	0	0	0	0	0	0	0	0	0
38	V3	0	1.013	-12.71	14	7	0	0	0	0	0	0	0
39	V3	0	0.983	-13.46	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	V3	0	0.973	-13.62	0	0	0	0	0	0	0	0	0
41	V6	0	0.996	-14.05	6.3	3	0	0	0	0	0	0	0
42	V6	0	0.966	-15.5	7.1	4.4	0	0	0	0	0	0	0
43	V7	0	1.01	-11.33	2	1	0	0	0	0	0	0	0
44	V3	0	1.017	-11.86	12	1.8	0	0	0	0	0	0	0
45	V3	0	1.036	-9.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0
46	V3	0	1.05	-11.89	0	0	0	0	0	0	0	0	0
47	V3	0	1.033	-12.49	29.7	11.6	0	0	0	0	0	0	0
48	V3	0	1.027	-12.59	0	0	0	0	0	0	0	0	0
49	V3	0	1.036	-12.92	18	8.5	0	0	0	0	0	0	0
50	V3	0	1.023	-13.39	21	10.5	0	0	0	0	0	0	0
51	V3	0	1.052	-12.52	18	5.3	0	0	0	0	0	0	0
52	V5	0	0.98	-11.47	4.9	2.2	0	0	0	0	0	0	0
53	V5	0	0.971	-12.23	20	10	0	0	0	0	0	0	0.063
54	V5	0	0.996	-11.69	4.1	1.4	0	0	0	0	0	0	0
55	V5	0	1.031	-10.78	6.8	3.4	0	0	0	0	0	0	0
56	V6	0	0.968	-16.04	7.6	2.2	0	0	0	0	0	0	0
57	V6	0	0.965	-16.56	6.7	2	0	0	0	0	0	0	0

Tabela 7.6 Podaci o granama sistema IEEE 57b

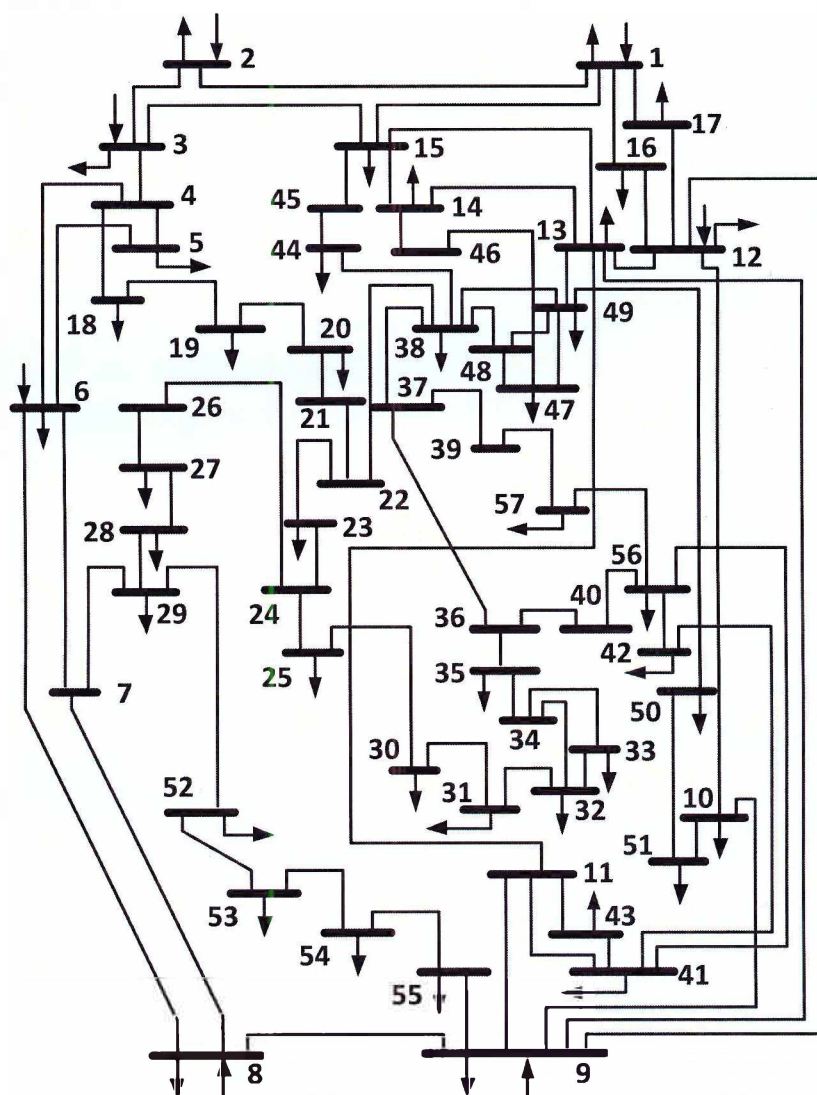
Pocetni čvor	Krajnji čvor	R [p.u.]	X [p.u.]	B [p.u.]
1	2	0.0083	0.028	0.129
2	3	0.0298	0.085	0.0818
3	4	0.0112	0.0366	0.038
4	5	0.0625	0.132	0.0258
4	6	0.043	0.148	0.0348
6	7	0.02	0.102	0.0276
6	8	0.0339	0.173	0.047
8	9	0.0099	0.0505	0.0548
9	10	0.0369	0.1679	0.044

7. DODATAK

Početni čvor	Krajnji čvor	R [p.u.]	X [p.u.]	B [p.u.]
9	11	0.0258	0.0848	0.0218
9	12	0.0648	0.295	0.0772
9	13	0.0481	0.158	0.0406
13	14	0.0132	0.0434	0.011
13	15	0.0269	0.0869	0.023
1	15	0.0178	0.091	0.0988
1	16	0.0454	0.206	0.0546
1	17	0.0238	0.108	0.0286
3	15	0.0162	0.053	0.0544
4	18	0	0.555	0
4	18	0	0.43	0
5	6	0.0302	0.0641	0.0124
7	8	0.0139	0.0712	0.0194
10	12	0.0277	0.1262	0.0328
11	13	0.0223	0.0732	0.0188
12	13	0.0178	0.058	0.0604
12	16	0.018	0.0813	0.0216
12	17	0.0397	0.179	0.0476
14	15	0.0171	0.0547	0.0148
18	19	0.461	0.685	0
19	20	0.283	0.434	0
21	20	0	0.7767	0
21	22	0.0736	0.117	0
22	23	0.0099	0.0152	0
23	24	0.166	0.256	0.0084
24	25	0	1.182	0
24	25	0	1.23	0
24	26	0	0.0473	0
26	27	0.165	0.254	0
27	28	0.0618	0.0954	0
28	29	0.0418	0.0587	0
7	29	0	0.0648	0
25	30	0.135	0.202	0
30	31	0.326	0.497	0
31	32	0.507	0.755	0
32	33	0.0392	0.036	0
34	32	0	0.953	0
34	35	0.052	0.078	0.0032
35	36	0.043	0.0537	0.0016
36	37	0.029	0.0366	0
37	38	0.0651	0.1009	0.002
37	39	0.0239	0.0379	0
36	40	0.03	0.0466	0
22	38	0.0192	0.0295	0
11	41	0	0.749	0
41	42	0.207	0.352	0
41	43	0	0.412	0
38	44	0.0289	0.0585	0.002
15	45	0	0.1042	0
14	46	0	0.0735	0
46	47	0.023	0.068	0.0032
47	48	0.0182	0.0233	0
48	49	0.0834	0.129	0.0048
49	50	0.0801	0.128	0
50	51	0.1386	0.22	0
10	51	0	0.0712	0
13	49	0	0.191	0
29	52	0.1442	0.187	0

7. DODATAK

Početni čvor	Krajnji čvor	R	X	B
		[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]
52	53	0.0762	0.0984	0
53	54	0.1878	0.232	0
54	55	0.1732	0.2265	0
11	43	0	0.153	0
44	45	0.0624	0.1242	0.004
40	56	0	1.195	0
56	41	0.553	0.549	0
56	42	0.2125	0.354	0
39	57	0	1.355	0
57	56	0.174	0.26	0
38	49	0.115	0.177	0.003
38	48	0.0312	0.0482	0
9	55	0	0.1205	0



Slika 7.3 Šematski prikaz IEEE 57b sistema

IEEE tipski sistem sa 118 čvorova

Tabela 7.7 Podaci o čvorovima sistema IEEE 118b

R. br. čvora	Nap. nivo	Tip čvora	U_i [p.u.]	θ_i [°]	P_i [MW]	Q_i [MVar]	P_i [MW]	Q_i [MVar]	U_i [p.u.]	Q_{max} [MVar]	Q_{min} [MVar]	G [p.u.]	B [p.u.]
1	V2	2	0.955	10.67	51	27	0	0	0.955	15	-5	0	0
2	V2	0	0.971	11.22	20	9	0	0	0	0	0	0	0
3	V2	0	0.968	11.56	39	10	0	0	0	0	0	0	0
4	V2	2	0.998	15.28	30	12	-9	0	0.998	300	-300	0	0
5	V2	0	1.002	15.73	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.4
6	V2	2	0.99	13	52	22	0	0	0.99	50	-13	0	0
7	V2	0	0.989	12.56	19	2	0	0	0	0	0	0	0
8	V1	2	1.015	20.77	0	0	-28	0	1.015	300	-300	0	0
9	V1	0	1.043	28.02	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	V1	2	1.05	35.61	0	0	450	0	1.05	200	-147	0	0
11	V2	0	0.985	12.72	70	23	0	0	0	0	0	0	0
12	V2	2	0.99	12.2	47	10	85	0	0.99	120	-35	0	0
13	V2	0	0.968	11.35	34	16	0	0	0	0	0	0	0
14	V2	0	0.984	11.5	14	1	0	0	0	0	0	0	0
15	V2	2	0.97	11.23	90	30	0	0	0.97	30	-10	0	0
16	V2	0	0.984	11.91	25	10	0	0	0	0	0	0	0
17	V2	0	0.995	13.74	11	3	0	0	0	0	0	0	0
18	V2	2	0.973	11.53	60	34	0	0	0.973	50	-16	0	0
19	V2	2	0.963	11.05	45	25	0	0	0.962	24	-8	0	0
20	V2	0	0.958	11.93	18	3	0	0	0	0	0	0	0
21	V2	0	0.959	13.52	14	8	0	0	0	0	0	0	0
22	V2	0	0.97	16.08	10	5	0	0	0	0	0	0	0
23	V2	0	1	21	7	3	0	0	0	0	0	0	0
24	V2	2	0.992	20.89	0	0	-13	0	0.992	300	-300	0	0
25	V2	2	1.05	27.93	0	0	220	0	1.05	140	-47	0	0
26	V1	2	1.015	29.71	0	0	314	0	1.015	1000	-1000	0	0
27	V2	2	0.968	15.35	62	13	-9	0	0.968	300	-300	0	0
28	V2	0	0.962	13.62	17	7	0	0	0	0	0	0	0
29	V2	0	0.963	12.63	24	4	0	0	0	0	0	0	0
30	V1	0	0.968	18.79	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	V2	2	0.967	12.75	43	27	7	0	0.967	300	-300	0	0
32	V2	2	0.964	14.8	59	23	0	0	0.963	42	-14	0	0
33	V2	0	0.972	10.63	23	9	0	0	0	0	0	0	0
34	V2	2	0.986	11.3	59	26	0	0	0.984	24	-8	0	0.14
35	V2	0	0.981	10.87	33	9	0	0	0	0	0	0	0
36	V2	2	0.98	10.87	31	17	0	0	0.98	24	-8	0	0
37	V2	0	0.992	11.77	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.25
38	V1	0	0.962	16.91	0	0	0	0	0	0	0	0	0
39	V2	0	0.97	8.41	27	11	0	0	0	0	0	0	0
40	V2	2	0.97	7.35	20	23	-46	0	0.97	300	-300	0	0
41	V2	0	0.967	6.92	37	10	0	0	0	0	0	0	0
42	V2	2	0.985	8.53	37	23	-59	0	0.985	300	-300	0	0
43	V2	0	0.978	11.28	18	7	0	0	0	0	0	0	0
44	V2	0	0.985	13.82	16	8	0	0	0	0	0	0	0.1
45	V2	0	0.987	15.67	53	22	0	0	0	0	0	0	0.1
46	V2	2	1.005	18.49	28	10	19	0	1.005	100	-100	0	0.1
47	V2	0	1.017	20.73	34	0	0	0	0	0	0	0	0
48	V2	0	1.021	19.93	20	11	0	0	0	0	0	0	0.15
49	V2	2	1.025	20.94	87	30	204	0	1.025	210	-85	0	0
50	V2	0	1.001	18.9	17	4	0	0	0	0	0	0	0
51	V2	0	0.967	16.28	17	8	0	0	0	0	0	0	0
52	V2	0	0.957	15.32	18	5	0	0	0	0	0	0	0
53	V2	0	0.946	14.35	23	11	0	0	0	0	0	0	0
54	V2	2	0.955	15.26	113	32	48	0	0.955	300	-300	0	0

7. DODATAK

R. br. čvora	Nap. nivo	Tip čvora	U_i [p.u.]	δ [°]	P_p [MW]	Q_p [MVar]	P_s [MW]	Q_s [MVar]	U_c [p.u.]	Q_{max} [MVar]	Q_{mi} [MVar]	G [p.u.]	B [p.u.]
55	V2	2	0.952	14.97	63	22	0	0	0.952	23	-8	0	0
56	V2	2	0.954	15.16	84	18	0	0	0.954	15	-8	0	0
57	V2	0	0.971	16.36	12	3	0	0	0	0	0	0	0
58	V2	0	0.959	15.51	12	3	0	0	0	0	0	0	0
59	V2	2	0.985	19.37	277	113	155	0	0.985	180	-60	0	0
60	V2	0	0.993	23.15	78	3	0	0	0	0	0	0	0
61	V2	2	0.995	24.04	0	0	160	0	0.995	300	-100	0	0
62	V2	2	0.998	23.43	77	14	0	0	0.998	20	-20	0	0
63	V1	0	0.969	22.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0
64	V1	0	0.984	24.52	0	0	0	0	0	0	0	0	0
65	V1	2	1.005	27.65	0	0	391	0	1.005	200	-67	0	0
66	V2	2	1.05	27.48	39	18	392	0	1.05	200	-67	0	0
67	V2	0	1.02	24.84	28	7	0	0	0	0	0	0	0
68	V1	0	1.003	27.55	0	0	0	0	0	0	0	0	0
69	V2	3	1.035	30	0	0	516.4	0	1.035	300	-300	0	0
70	V2	2	0.984	22.58	66	20	0	0	0.984	32	-10	0	0
71	V2	0	0.987	22.15	0	0	0	0	0	0	0	0	0
72	V2	2	0.98	20.98	0	0	-12	0	0.98	100	-100	0	0
73	V2	2	0.991	21.94	0	0	-6	0	0.991	100	-100	0	0
74	V2	2	0.958	21.64	68	27	0	0	0.958	9	-6	0	0.12
75	V2	0	0.967	22.91	47	11	0	0	0	0	0	0	0
76	V2	2	0.943	21.77	68	36	0	0	0.943	23	-8	0	0
77	V2	2	1.006	26.72	61	28	0	0	1.006	70	-20	0	0
78	V2	0	1.003	26.42	71	26	0	0	0	0	0	0	0
79	V2	0	1.009	26.72	39	32	0	0	0	0	0	0	0.2
80	V2	2	1.04	28.96	130	26	477	0	1.04	280	-165	0	0
81	V1	0	0.997	28.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
82	V2	0	0.989	27.24	54	27	0	0	0	0	0	0	0.2
83	V2	0	0.985	28.42	20	10	0	0	0	0	0	0	0.1
84	V2	0	0.98	30.95	11	7	0	0	0	0	0	0	0
85	V2	2	0.985	32.51	24	15	0	0	0.985	23	-8	0	0
86	V2	0	0.987	31.14	21	10	0	0	0	0	0	0	0
87	V3	2	1.015	31.4	0	0	4	0	1.015	1000	-100	0	0
88	V2	0	0.987	35.64	48	10	0	0	0	0	0	0	0
89	V2	2	1.005	39.69	0	0	607	0	1.005	300	-210	0	0
90	V2	2	0.985	33.29	78	42	-85	0	0.985	300	-300	0	0
91	V2	2	0.98	33.31	0	0	-10	0	0.98	100	-100	0	0
92	V2	2	0.993	33.8	65	10	0	0	0.99	9	-3	0	0
93	V2	0	0.987	30.79	12	7	0	0	0	0	0	0	0
94	V2	0	0.991	28.64	30	16	0	0	0	0	0	0	0
95	V2	0	0.981	27.67	42	31	0	0	0	0	0	0	0
96	V2	0	0.993	27.51	38	15	0	0	0	0	0	0	0
97	V2	0	1.011	27.88	15	9	0	0	0	0	0	0	0
98	V2	0	1.024	27.4	34	8	0	0	0	0	0	0	0
99	V2	2	1.01	27.04	0	0	-42	0	1.01	100	-100	0	0
100	V2	2	1.017	28.03	37	18	252	0	1.017	155	-50	0	0
101	V2	0	0.993	29.61	22	15	0	0	0	0	0	0	0
102	V2	0	0.991	32.3	5	3	0	0	0	0	0	0	0
103	V2	2	1.001	24.44	23	16	40	0	1.01	40	-15	0	0
104	V2	2	0.971	21.69	38	25	0	0	0.971	23	-8	0	0
105	V2	2	0.965	20.57	31	26	0	0	0.965	23	-8	0	0.2
106	V2	0	0.962	20.32	43	16	0	0	0	0	0	0	0
107	V2	2	0.952	17.53	28	12	-22	0	0.952	200	-200	0	0.06
108	V2	0	0.967	19.38	2	1	0	0	0	0	0	0	0
109	V2	0	0.967	18.93	8	3	0	0	0	0	0	0	0
110	V2	2	0.973	18.09	39	30	0	0	0.973	23	-8	0	0.06
111	V2	2	0.98	19.74	0	0	36	0	0.98	1000	-100	0	0
112	V2	2	0.975	14.99	25	13	-43	0	0.975	1000	-100	0	0

7. DODATAK

R. br. čvora	Nap. nivo	Tip čvora	U_i [p.u.]	θ [°]	P_s [MW]	Q_s [MVar]	P_t [MW]	Q_t [MVar]	U_n [p.u.]	Q_{max} [MVar]	Q_{min} [MVar]	G [p.u.]	B [p.u.]
113	V2	2	0.993	13.74	0	0	-6	0	0.993	200	-100	0	0
114	V2	0	0.96	14.46	8	3	0	0	0	0	0	0	0
115	V2	0	0.96	14.46	22	7	0	0	0	0	0	0	0
116	V2	2	1.005	27.12	0	0	-184	0	1.005	1000	-1000	0	0
117	V2	0	0.974	10.67	20	8	0	0	0	0	0	0	0
118	V2	0	0.949	21.92	33	15	0	0	0	0	0	0	0

Tabela 7.8 Podaci o granama sistema IEEE 118b

Početni čvor	Krajnji čvor	R [p.u.]	X [p.u.]	B [p.u.]
1	2	0.0303	0.0999	0.0254
1	3	0.0129	0.0424	0.01082
4	5	0.00176	0.00798	0.0021
3	5	0.0241	0.108	0.0284
5	6	0.0119	0.054	0.01426
6	7	0.00459	0.0208	0.0055
8	9	0.00244	0.0305	1.162
8	5	0	0.0267	0
9	10	0.00258	0.0322	1.23
4	11	0.0209	0.0688	0.01748
5	11	0.0203	0.0682	0.01738
11	12	0.00595	0.0196	0.00502
2	12	0.0187	0.0616	0.01572
3	12	0.0484	0.16	0.0406
7	12	0.00862	0.034	0.00874
11	13	0.02225	0.0731	0.01876
12	14	0.0215	0.0707	0.01816
13	15	0.0744	0.2444	0.06268
14	15	0.0595	0.195	0.0502
12	16	0.0212	0.0834	0.0214
15	17	0.0132	0.0437	0.0444
16	17	0.0454	0.1801	0.0466
17	18	0.0123	0.0505	0.01298
18	19	0.01119	0.0493	0.01142
19	20	0.0252	0.117	0.0298
15	19	0.012	0.0394	0.0101
20	21	0.0183	0.0849	0.0216
21	22	0.0209	0.097	0.0246
22	23	0.0342	0.159	0.0404
23	24	0.0135	0.0492	0.0498
23	25	0.0156	0.08	0.0864
26	25	0	0.0382	0
25	27	0.0318	0.163	0.1764
27	28	0.01913	0.0855	0.0216
28	29	0.0237	0.0943	0.0238
30	17	0	0.0388	0
8	30	0.00431	0.0504	0.514
26	30	0.00799	0.086	0.908
17	31	0.0474	0.1563	0.0399
29	31	0.0108	0.0331	0.0083
23	32	0.0317	0.1153	0.1173
31	32	0.0298	0.0985	0.0251
27	32	0.0229	0.0755	0.01926
15	33	0.038	0.1244	0.03194
19	34	0.0752	0.247	0.0632
35	36	0.00224	0.0102	0.00268

7. DODATAK

Početni čvor	Krajnji čvor	R	X	B
		[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]
35	37	0.011	0.0497	0.01318
33	37	0.0415	0.142	0.0366
34	36	0.00871	0.0268	0.00568
34	37	0.00256	0.0094	0.00984
38	37	0	0.0375	0
37	39	0.0321	0.106	0.027
37	40	0.0593	0.168	0.042
30	38	0.00464	0.054	0.422
39	40	0.0184	0.0605	0.01552
40	41	0.0145	0.0487	0.01222
40	42	0.0555	0.183	0.0466
41	42	0.041	0.135	0.0344
43	44	0.0608	0.2454	0.06068
34	43	0.0413	0.1681	0.04226
44	45	0.0224	0.0901	0.0224
45	46	0.04	0.1356	0.0332
46	47	0.038	0.127	0.0316
46	48	0.0601	0.189	0.0472
47	49	0.0191	0.0625	0.01604
42	49	0.0715	0.323	0.086
42	49	0.0715	0.323	0.086
45	49	0.0684	0.186	0.0444
48	49	0.0179	0.0505	0.01258
49	50	0.0267	0.0752	0.01874
49	51	0.0486	0.137	0.0342
51	52	0.0203	0.0588	0.01396
52	53	0.0405	0.1635	0.04058
53	54	0.0263	0.122	0.031
49	54	0.073	0.289	0.0738
49	54	0.0869	0.291	0.073
54	55	0.0169	0.0707	0.0202
54	56	0.00275	0.00955	0.00732
55	56	0.00488	0.0151	0.00374
56	57	0.0343	0.0966	0.0242
50	57	0.0474	0.134	0.0332
56	58	0.0343	0.0966	0.0242
51	58	0.0255	0.0719	0.01788
54	59	0.0503	0.2293	0.0598
56	59	0.0825	0.251	0.0569
56	59	0.0803	0.239	0.0536
55	59	0.04739	0.2158	0.05646
59	60	0.0317	0.145	0.0376
59	61	0.0328	0.15	0.0388
60	61	0.00264	0.0135	0.01456
60	62	0.0123	0.0561	0.01468
61	62	0.00824	0.0376	0.0098
63	59	0	0.0386	0
63	64	0.00172	0.02	0.216
64	61	0	0.0268	0
38	65	0.00901	0.0986	1.046
64	65	0.00269	0.0302	0.38
49	66	0.018	0.0919	0.0248
49	66	0.018	0.0919	0.0248
62	66	0.0482	0.218	0.0578
62	67	0.0258	0.117	0.031
65	66	0	0.037	0
66	67	0.0224	0.1015	0.02682
65	68	0.00138	0.016	0.638

7. DODATAK

Početni čvor	Krajnji čvor	R	X	B
		[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]
47	69	0.0844	0.2778	0.07092
49	69	0.0985	0.324	0.0828
68	69	0	0.037	0
69	70	0.03	0.127	0.122
24	70	0.00221	0.4115	0.10198
70	71	0.00882	0.0355	0.00878
24	72	0.0488	0.196	0.0488
71	72	0.0446	0.18	0.04444
71	73	0.00866	0.0454	0.01178
70	74	0.0401	0.1323	0.03368
70	75	0.0428	0.141	0.036
69	75	0.0405	0.122	0.124
74	75	0.0123	0.0406	0.01034
76	77	0.0444	0.148	0.0368
69	77	0.0309	0.101	0.1038
75	77	0.0601	0.1999	0.04978
77	78	0.00376	0.0124	0.01264
78	79	0.00546	0.0244	0.00648
77	80	0.017	0.0485	0.0472
77	80	0.0294	0.105	0.0228
79	80	0.0156	0.0704	0.0187
68	81	0.00175	0.0202	0.808
81	80	0	0.037	0
77	82	0.0298	0.0853	0.08174
82	83	0.0112	0.03665	0.03796
83	84	0.0625	0.132	0.0258
83	85	0.043	0.148	0.0348
84	85	0.0302	0.0641	0.01234
85	86	0.035	0.123	0.0276
86	87	0.02828	0.2074	0.0445
85	88	0.02	0.102	0.0276
85	89	0.0239	0.173	0.047
88	89	0.0139	0.0712	0.01934
89	90	0.0518	0.188	0.0528
89	90	0.0238	0.0997	0.106
90	91	0.0254	0.0836	0.0214
89	92	0.0099	0.0505	0.0548
89	92	0.0393	0.1581	0.0414
91	92	0.0387	0.1272	0.03268
92	93	0.0258	0.0848	0.0218
92	94	0.0481	0.158	0.0406
93	94	0.0223	0.0732	0.01876
94	95	0.0132	0.0434	0.0111
80	96	0.0356	0.182	0.0494
82	96	0.0162	0.053	0.0544
94	96	0.0269	0.0869	0.023
80	97	0.0183	0.0934	0.0254
80	98	0.0238	0.108	0.0286
80	99	0.0454	0.206	0.0546
92	100	0.0648	0.295	0.0472
94	100	0.0178	0.058	0.0604
95	96	0.0171	0.0547	0.01474
96	97	0.0173	0.0885	0.024
98	100	0.0397	0.179	0.0476
99	100	0.018	0.0813	0.0216
100	101	0.0277	0.1262	0.0328
92	102	0.0123	0.0559	0.01464
101	102	0.0246	0.112	0.0294



¹ Podatak o signaturi (lokaciji) može ispuniti biblioteka organizacione jedinice/Univerzitetska biblioteka

Prevod naslova disertacije na engleski jezik

OPTIMIZATION OF POWER SYSTEM STATE ESTIMATION BY APPLYING GENETIC ALGORITHMS ON VARIABLE NETWORK CONFIGURATION

Mentor i članovi komisija (za ocjenu i odbranu)

Komisija za ocjenu doktorske disertacije:

Prof. dr Ilija Vujošević

Prof. dr Nešo Mijušković

Prof. dr Igor Đurović (mentor)



Sažetak *

Sadržano u tekstu dokumenta.

Sažetak na engleskom (njemačkom ili francuskom) jeziku

Included in thesis.

Ključne riječi Elektroenergetski sistem, Estimacija stanja, Optimizacija, Metaheurističke tehnike

Ključne riječi na engleskom jeziku Power system, State estimation, Optimization, Metaheuristics

Naučna oblast/uža naučna oblast

Elektroenergetika

Naučna oblast/uža naučna oblast na engleskom jeziku

Power systems

Ostali podaci

* Ukoliko je predviđeni prostor za polja Sažetak, Sažetak na engleskom jeziku, Ključne riječi i Ključne riječi na engleskom jeziku nedovoljan, priloži

IZJAVA O KORIŠĆENJU

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku da u **Digitalni arhiv Univerziteta Crne Gore** unese doktorsku disertaciju pod naslovom

OPTIMIZACIJA ESTIMACIJE STANJA EES-a PRIMJENOM GENETSKIH ALGORITAMA

koja je moj autorski rad.

Doktorska disertacija, pohranjena u Digitalni arhiv Univerziteta Crne Gore, može se koristiti pod uslovima definisanim licencom Kreativne zajednice (Creative Commons), za koju sam se odlučio/la¹.

Autorstvo

Autorstvo – bez prerada

Autorstvo – dijeliti pod istim uslovima

Autorstvo – nekomercijalno

☒ Autorstvo – nekomercijalno – bez prerada

Autorstvo – nekomercijalno – dijeliti pod istim uslovima

Potpis doktoranda

Zoran Julijanić

U Podgorici

20/11/2019

¹ Odabrati (čekirati) jednu od šest ponuđenih licenci (kratak opis licenci dat je na poledini ovog priloga)

Autorstvo

Licenca sa najširim obimom prava korišćenja. Dozvoljavaju se prerade, umnožavanje, distribucija i javno saopštavanje djela, pod uslovom da se navede ime izvornog autora (onako kako je izvorni autor ili davalac licence odredio).

Djelo se može koristiti i u komercijalne svrhe.

Autorstvo – bez prerada

Dozvoljava se umnožavanje, distribucija i javno saopštavanje djela, pod uslovom da se navede ime izvornog autora (onako kako je izvorni autor ili davalac licence odredio). Djelo se ne može mijenjati, preoblikovati ili koristiti u drugom djelu.

Licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu djela.

Autorstvo – dijeliti pod istim uslovima

Dozvoljava se umnožavanje, distribucija i javno saopštavanje djela, pod uslovom da se navede ime izvornog autora (onako kako je izvorni autor ili davalac licence odredio). Ukoliko se djelo mijenja, preoblikuje ili koristi u drugom djelu, prerade se moraju distribuirati pod istom ili sličnom licencom.

Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu djela i prerada. Slična je softverskim licencama, odnosno licencama otvorenog koda.

Autorstvo – nekomercijalno

Dozvoljavaju se prerade, umnožavanje, distribucija i javno saopštavanje djela, pod uslovom da se navede ime izvornog autora (onako kako je izvorni autor ili davalac licence odredio).

Komercijalna upotreba djela nije dozvoljena.

Autorstvo – nekomercijalno – bez prerada

Licenca kojom se u najvećoj mjeri ograničavaju prava korišćenja djela. Dozvoljava se umnožavanje, distribucija i javno saopštavanje djela, pod uslovom da se navede ime izvornog autora (onako kako je izvorni autor ili davalac licence odredio). Djelo se ne može mijenjati, preoblikovati ili koristiti u drugom djelu.

Komercijalna upotreba djela nije dozvoljena.

Autorstvo – nekomercijalno – dijeliti pod istim uslovima

Dozvoljava se umnožavanje, distribucija, javno saopštavanje i prerada djela, pod uslovom da se navede ime izvornog autora (onako kako je izvorni autor ili davalac licence odredio). Ukoliko se djelo mijenja, preoblikuje ili koristi u drugom djelu, prerada se mora distribuirati pod istom ili sličnom licencom.

Djelo i prerade se ne mogu koristiti u komercijalne svrhe.