

UNIVERZITET U BEOGRADU
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Aleksandar S. Savić

**IZBOR TIPRA, LOKACIJE I PARAMETARA
FLEKSIBILNIH REGULACIONIH
UREĐAJA U ELEKTROENERGETSKIM
SISTEMIMA PRIMENOM
VIŠEKRITERIJUMSKE OPTIMIZACIJE**

doktorska disertacija

Beograd, 2013

UNIVERZITET U BEOGRADU
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Aleksandar S. Savić

**SELECTION OF THE TYPE, LOCATION
AND PARAMETERS OF FACTS
DEVICES IN THE ELECTRIC POWER
SYSTEMS USING MULTICRITERIA
OPTIMIZATION**

doctoral dissertation

Belgrade, 2013

PODACI O MENTORU I ČLANOVIMA KOMISIJE

Mentor:

Prof. dr Nikola Rajaković, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

Član komisije:

Prof. dr Dragan Tasić, redovni profesor, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet

Član komisije:

dr Predrag Stefanov, docent, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

Datum odbrane:

IZBOR TIPA, LOKACIJE I PARAMETARA FLEKSIBILNIH REGULACIONIH UREĐAJA U ELEKTROENERGETSKIM SISTEMIMA PRIMENOM VIŠEKRITERIJUMSKE OPTIMIZACIJE

Rezime

Tradicionalni načini upravljanja elektroenergetskim sistemima kao što su redispečing aktivnih i reaktivnih snaga proizvodnje kao i promena topologije mreže u današnje vreme nisu dovoljni za kvalitetno i pouzdano upravljanje sistemom. Konstantan rast potrošnje, razvoj tržišta električne energije, priključenje distribuiranih izvora električne energije, ekološki zahtevi i sl., nametnuli su potrebu za novim načinima upravljanja.

Jedan od savremenih načina za upravljanje sistemom je upotreba novih kontrolnih uređaja baziranih na primeni elemenata energetske elektronike velikih snaga. Ovi uređaji poznati su pod jedinstvenim nazivom FACTS (Flexible Alternate Current Transmission Systems) uređaji. Osnovna namena FACTS uređaja je povećanje kontrolabilnosti i prenosne sposobnosti sistema, odnosno direktna regulacija tokova snage željenim prenosnim koridorima, kao i regulacija napona odabranih čvorova u mreži. Ovi uređaji omogućavaju bolje iskorišćenje postojećih prenosnih vodova i odlaganje potrebe za izgradnjom novih. Pored toga što FACTS uređaji mogu da upravljaju tokovima aktivnih i reaktivnih snaga i naponskim prilikama u elektroenergetskoj mreži, oni imaju i pozitivan uticaj i na druge pokazatelje koje karakterišu rad prenosnog sistema. Imajući sve ovo u vidu i sa željom da se FACTS uređaji iskoriste na najefikasniji način, od posebne je važnosti izbor tipa, lokacije i parametara FACTS uređaja.

Cilj ove disertacije je uvođenje nove procedure za nalaženje optimalnog tipa, lokacije i parametara FACTS uređaja primenom višekriterijumske optimizacije. Osnovna prednost razvijene procedure je što omogućuje uključivanje proizvoljnog broja kriterijumskih funkcija. Na taj način mogu se obuhvatiti svi relevantni kriterijumi koji mogu uticati na izbor FACTS uređaja. Kao rezultat višekriterijumske optimizacije dobija se set optimalnih rešenja, za razliku od jednokriterijumske optimizacije gde se kao rezultat dobija jedno jedinstveno rešenje. Set optimalnih rešenja, generalno gledano, daje kompletniji opis optimizacionog problema, a konkretno kod izbora FACTS uređaja daje uvid u kontrolne mogućnosti ovih uređaja. Pored toga zbog postojanja više

kompromisnih optimalnih rešenja krajnjem korisniku je data veća sloboda kod izbora finalnog rešenja pri čemu on iz seta ponuđenih rešenja može da izabere ono koje njemu najviše odgovara. Međutim, zbog složenosti optimizacionog problema izbor konačnog rešenja iz velikog broja ponuđenih optimalnih rešenja može da bude veoma težak i nepraktičan. Ovo je posebno izraženo kada se razmatra veći broj kriterijumskih funkcija. Već kod tri kriterijumske funkcije, grafički prikaz dobijenih rešenja u 3D prostoru nije praktičan za odabir finalnog rešenja, a za slučaj više od tri kriterijumske funkcije ne postoji način da se dobijena rešenja adekvatno grafički prikažu. U okviru nove procedure razvijena je metoda za izbor finalnog kompromisnog rešenja koja ne favorizuje ni jednu od analiziranih kriterijumskih funkcija već na ravnopravan način uvažava uticaj svih kriterijumskih funkcija.

Kao matematički alat, za rešavanje višekriterijumskog optimizacionog problema, odabrana je optimizaciona tehnika evolutivnog tipa u literaturi poznata kao genetički algoritam sa sortiranjem prema dominaciji (algoritam NSGA-II). Algoritam NSGA-II je izabran jer predstavlja jednu od standardnih procedura za rešavanje problema višekriterijumske optimizacije. U ovoj disertaciji NSGA-II algoritam je dodatno unapređen tako što je uvedeno lokalno pretraživanje za članove populacije koji se nalaze na krajevima tekućeg Pareto fronta. Na taj način je povećana brzina i efikasnost pri nalaženju optimalnih rešenja.

Nova procedura za izbor FACTS uređaja ilustrovana je na dva realna inženjerska problema. Prvi problem se odnosi na određivanje optimalne lokacije i parametara FACTS uređaja u prenosnoj mreži. Proračun je izvršen na realnom sistemu elektroprivrede Republike Srbije sa ciljem da se dobije optimalan plan razvoja prenosne mreže uvođenjem samo regulacionih uređaja bez izgradnje novih vodova i transformatorskih stanica. Proračun je urađen za različite godine razvoja ovog sistema imajući u vidu povećanje nivoa opterećenja i planiranu izgradnju novih proizvodnih kapaciteta. Kao kriterijumi za izbor razmatrani su kako globalni pokazatelji rada elektroenergetske mreže, kao što su gubici aktivne snage u sistemu, tako i lokalni pokazatelji koji se odnose na nivo opterećenja prenosnih vodova i napone čvorova, pokazatelji sigurnosti, pokazatelji vezani za rad sistema u tržišnom okruženju i ekonomski pokazatelji. Nova procedura kroz pretraživanje velikog broja potencijanih varijanti i kroz uporednu analizu uticaja pojedinih tipova FACTS uređaja na analiziranu

mrežu daje konkretne predloge za FACTS uređaje čijom bi se ugradnjom na predložene lokacije ostvario plan razvoja prenosne mreže bez potrebe za izgradnjom novih prenosnih kapaciteta. Pored toga ugradnjom FACTS uređaja unapredile bi se performanse prenosne mreže imajući u vidu analizirane kriterijumske funkcije.

Drugi problem koji je obrađen u ovoj disertaciji odnosi se na nalaženje optimalne lokacije i parametara FACTS uređaja u distributivnoj mreži uz prisustvo distribuiranih izvora električne energije. Kod ovog proračuna osnovni kriterijum za izbor bilo je obezbeđivanje napajanje krajnjih potrošača kvalitetnom električnom energijom za širok dijapazon mogućih radnih režima uz uvažavanje svih pogonskih ograničenja. Proračun je urađen na realnoj srednjenaponskoj distributivnoj mreži koja napaja nekoliko sela u regionu Banata u Srbiji. Proračunom su dobijene konkretne loakcije za ugradnju FACTS uređaja u analiziranoj mreži.

Razvijena procedura za izbor FACTS uređaja u primeni na realne prenosne i distributivne mreže daje veoma dobre rezultate. Procedura pretražuje veliki broj potencijalnih rešenja i u procesu optimizacije daje rešenja koja su za analiziranu mrežu najefikasnija, imajući u vidu kriterijumske funkcije kojima je modelovan optimizacioni problem.

Ključne reči: Upravljanje prenosnim sistemom, FACTS uređaji, višekriterijumska optimizacija, genetički algoritam

Naučna oblast: Tehničke nauke – Elektrotehnika

Uža naučna oblast: Elektroenergetski sistemi

UDK: 621.3

SELECTION OF THE TYPE, LOCATION AND PARAMETERS OF FACTS DEVICES IN THE ELECTRIC POWER SYSTEMS USING MULTICRITERIA OPTIMIZATION

Abstract

In present days, traditional ways of controlling power systems such as re-dispatching of active and reactive power and changing the network topology, are not sufficient for quality and reliable system management. The constant growth of consumption, development of electricity market, connection of distributed generation, environmental requirements etc, imposed the need for new ways of system management.

One of the modern ways to control power systems is to use new control devices based on application of power electronics. These devices are known as Flexible Alternate Current Transmission Systems (FACTS) devices. The main purpose of FACTS devices is to increase controllability and capacity of the transmission system by controlling active and reactive line flow in desired transmission corridors and voltage control of the selected buses in the network. The use of FACTS devices in transmission systems enabled a better utilization of existing transmission lines, instead of constructing the new ones. Those devices have a positive influence on many parameters characterizing the operation of transmission networks. Bearing all this in mind and with the desire to take advantage of FACTS devices in the most efficient manner, proper choice of type, location and parameters of FACTS devices are particularly important.

The aim of this dissertation is to introduce a new procedure for finding the optimal type, location and parameters of FACTS devices by using multi-criteria optimization. The main advantage of this procedure is that it allows inclusion of any number of criteria functions. This way, we can cover all the relevant criteria that may influence the choice of FACTS devices. Result of multi-criteria optimization is a set of optimal solutions, as opposed to a single criterion optimization where we obtain only one solution. Set of optimal solutions, in general, provides a more complete description of the optimization problem. In particular, in the choice of FACTS devices, provides insight into the control features of the FACTS devices. In addition, set of optimal solutions enables the decision maker to choose a solution that seems fit. However, large number of solutions and large number of possible choices can be confusing, so selecting

the final choice may be quite difficult. This is particularly evident when large number of criterion functions is considered. For three criterion functions, it is not practical to select the final solution by graphical representation of the obtained solutions in a 3D space. In case of four and more criterion functions, adequate graphical representation of obtained solutions is not possible. With the new procedure, a method for the choice of a unique optimal solution from the set of solutions was developed, that does not favor any of the analyzed criteria functions, but equally respects the influence of all criteria functions.

Evolutionary optimization algorithm known as Nondominated Sorted Genetic Algorithm (NSGA-II) is selected as a mathematical tool for solving multi-criteria optimization problem. NSGA-II algorithm was chosen because it represents one of the standard procedures for solving multi-criteria optimization problems. In this dissertation, NSGA-II algorithm is further improved by introducing a local search for members of the population at the edges of the current Pareto front. This way, speed and efficiency in finding the optimal solutions are increased.

New procedure for selection of FACTS devices is illustrated on two realistic engineering problems. The first issue relates to the determination of the optimal location and parameters of FACTS devices in a transmission network. The calculation is done on the Republic of Serbia power system in order to obtain an optimal plan for transmission network by introducing only FACTS devices without building new transmission lines and substations. The calculation is done for different years of development of this system taking into account increase in the consumer load and planned construction of new production capacities. The following selection criteria were considered: system active power losses, transmission line load levels, bus voltages, security indicators, indicators related to the operation of the system in the market environment and economic indicators. New procedure through a searching of a large number of potential variants and comparative analysis of the impact of certain types of FACTS devices on the observed network provides specific proposals for installation of FACTS devices. Installation of FACTS devices at proposed locations would fulfill the development plan of the transmission network, without the need to build new transmission capacities. In addition, installation of FACTS devices would improve the performance of the transmission system by taking into account the analyzed criterion functions.

Second problem addressed in this dissertation refers to finding the optimal location and parameters of FACTS devices in a distribution network in presence of distributed power sources. In this calculation, the main selection criterion was to provide the quality electrical energy to the end users for a wide range of possible operating modes with respect to all operating limits. The calculation is performed on a real medium voltage distribution network which supplies several villages in the Banat region in Serbia. The calculation proposed the specific locations to install the FACTS devices in the analyzed network.

Implementation of developed procedures for selection of FACTS devices to the real transmission and distribution network gives very good results. The procedure searches a large number of potential solutions and provides the most efficient solutions for the analyzed network in optimization process, keeping in mind the criteria functions used to model the optimization problem.

Keywords: Control of transmission system, FACTS devices, multi-criteria optimization, Genetic algorithm

Scientific field: Technical science – Electrical engineering

Specific scientific field: Power systems

UDK: 621.3

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. FACTS UREĐAJI	8
2.1. Uvod	8
2.2. Statički kompenzator reaktivne snage (Static Var Compensator – SVC)	9
2.3. Statički sinhroni kompenzator (Static compensator – STATCOM)	18
2.4. Tiristorski kontrolisan redni kompenzator (Thyristor Controlled Series Compensator – TCSC)	27
2.5. Statički sinhroni redni kompenzator (Static Synchronous Series Compensator– SSSC)	36
2.6. Objedinjeni regulator tokova snaga (Unified Power Flow Controller)	42
2.7. Rezime	55
3. VIŠEKRITERIJUMSKA OPTIMIZACIJA	56
3.1. Uvod	56
3.2. Osnovni koncepti i definicije	58
3.2.1. Definicije pojmova	58
3.2.2. Pareto optimalnost	59
3.2.3. Efikasnost i dominacija	60
3.2.4. Kompromisno rešenje	61
3.2.5. Transformacija funkcija	62
3.3. Metode multikriterijumske optimizacije	63
3.3.1. Metode kod kojih se polazne pretpostavke koriste pre optimizacionog postupka	64
3.3.1.1. Metod težinskog globalnog kriterijuma (Weighted global criterion method)	65

3.3.1.2. Metod težinskih suma (Weighted sum method)	66
3.3.1.3. Leksikografski metod (Lexicographic method)	69
3.3.1.4. Težinski min-max metod (Weighted min-max method)	70
3.3.1.5. Eksponencijalni težinski kriterijum (Exponential weighted criterion)	70
3.3.1.6. Metod težinskog proizvoda (Weighted product method)	71
3.3.1.7. Metod ciljnog programiranja (Goal programming method)	71
3.3.1.8. Metod ograničene kriterijumske funkcije (Bounded objective function method)	73
3.3.1.9. Fizičko programiranje (Physical programming)	73
3.3.1.10. Rezime	74
3.3.2. Metode kod kojih se polazne pretpostavke koriste nakon optimizacionog postupka	76
3.3.2.1. Fizičko programiranje (Physical programming)	77
3.3.2.2. Metod normalnog (upravnog) graničnog preseka (Normal boundary intersection method)	78
3.3.2.3. Metod normalnih (upravnih) ograničenja (Normal constrained method)	79
3.3.2.4. Rezime	79
3.3.3. Metode koje ne koriste polazne pretpostavke	80
3.3.3.1. Metod globalnog kriterijuma	81
3.3.3.2. Nash-ova arbitraža i metod proizvoda kriterijumskih funkcija	82
3.3.3.3. Raoov metod (Rao's method)	83
3.3.3.4. Rezime	83
 4. EVOLUTIVNE METODE ZA VIŠEKRITERIJUMSKU OPTIMIZACIJU	 85
4.1. Uvod	85
4.2. Genetički algoritam za jednokriterijumsku optimizaciju	86
4.2.1. Poređenje sa tradicionalnim metodama	86
4.2.2. Motivacija iz prirode	87
4.2.3. Princip rada genetičkog algoritma	88

4.2.3.1. Kodiranje	89
4.2.3.2. Reprodukcijska	91
4.2.3.3. Ukrštanje	92
4.2.3.4. Mutacija	93
4.2.3.5. Kodiranje realnim brojevima i odgovarajući operatori	94
4.2.4. Mini primer proračuna	96
4.3. Genetički algoritmi za višekriterijumsku optimizaciju	98
4.3.1. Koncept dominacije	98
4.3.2. Osnovna struktura genetičkog algoritma za višekriterijumsku optimizaciju	100
4.3.3. Genetički algoritam sa vektorskom evaluacijom (Vector Evaluated Genetic Algorithm – VEGA)	103
4.3.4. Pozicioni Pareto Genetički algoritam (Niche Pareto Genetic Algorithm – NPGA)	104
4.3.5. Višekriterijumski genetički algoritam (Multiobjective Genetic Algorithm - MOGA)	105
4.3.6. Robusni Pareto evolutivni algoritam (Strength Pareto Evolutionary Algorithm - SPEA)	107
4.3.7. Genetički algoritam sa sortiranjem prema nedominaciji (Non-dominated Sorted Genetic Algorithm - NSGA-II)	110
4.3.8. Modifikacija NSGA-II algoritma	116
4.3.9. Particle swarm optimization (PSO) algoritam	123
4.3.10. Izbor kompromisnog rešenja	128
4.3.11. Nova metoda za izbor kompromisnog rešenja	130
4.3.12. Rezime	134
5. IZBOR TIPRA, LOKACIJE I PARAMETARA FACTS UREĐAJA	136
5.1. Uvod	136
5.2. Algoritam nove procedure za izbor tipra, lokacije i parametara FACTS uređaja	136
5.3. Primena nove procedure na izbor optimalnog tipra, lokacije i parametara FACTS uređaja u prenosnoj mreži	139

5.3.1. Izbor FACTS uređaja koji će se analizirati	140
5.3.2. Definisanje optimizacionog problema	141
5.3.3. Izbor scenarija za proračun	145
5.3.4. Rezultati proračuna	146
5.3.4.1. Rezultati proračuna za prvo analizirano stanje	147
5.3.4.2. Rezultati proračuna za ostala analizirana stanja	157
5.3.4.3. Uporedna analiza rezultata za razmatrana stanja	159
5.4. Primena nove procedure na izbor optimalnog tipa, lokacije i parametara FACTS uređaja u distributivnoj mreži	173
5.4.1. Opis izabrane test mreže	175
5.4.2. Vremenski profili potrošnje i proizvodnje distribuiranih izvora	177
5.4.2.1. Vremenski profil proizvodnje vetroturbina	178
5.4.2.2. Vremenski profil proizvodnje fotonaponskih panela	179
5.4.2.3. Vremenski profil potrošnje analizirane mreže	181
5.4.3. Definisanje optimizacionog problema	181
5.4.4. Rezultati proračuna	184
5.4.4.1. Rezultati za bazni proračun	185
5.4.4.2. Rezultati proračuna za prvi scenario	187
5.4.4.3. Rezultati proračuna za drugi scenario	191
5.4.4.4. Uporedna analiza dobijenih rezultata	195
5.5. Rezime	197
 6. ZAKLJUČAK	 198
 REFERENCE	 201
 BIOGRAFIJA AUTORA	 209

1. UVOD

Elektroenergetski sistem je najveći dinamički sistem kojeg je stvorio čovek. On po svojoj dimenziji daleko prevazilazi sve ostale dinamičke sisteme koje svakodnevno koristimo. Elektroenergetski sistemi nisu ograničeni administrativnim državnim granicama, a često se protežu i skoro celim kontinentima. Može se reći da ovakvi sistemi ne poznaju bilo kakve granice. Iako velikih dimenzija, u osnovi, cilj svakog elektroenergetskog sistema je jednostavan, a to je kontinualno napajanje krajnjih potrošača kvalitetnom električnom energijom. Elektroenergetski sistem u suštini možemo razložiti na tri podsistema: proizvodnju, prenos i distribuciju [1]. Svaki od ovih podsistema ima svoju specifičnu funkciju. Prvi podsystem obuhvata proizvodne kapacitete i njegov cilj je proizvodnja dovoljne količine električne energije. Prenosnim sistemom proizvedena električna se prenosi u distributivni sistem. Uloga distributivnog sistema je snabdevanje krajnjih potrošača električnom energijom.

Tradicionalni elektroenergetski sistemi organizovani su tako da imaju vertikalno integrisanu organizacionu strukturu. To u suštini znači da se podsistemima generisanja, prenosa i distribucije upravlja centralizovano. U takvim sistemima zahtevani nivo sigurnosti i pouzdanosti napajanja postiže se koordinisanim planiranjem razvoja sva tri podsistema, dok se u slučaju narušavanja pogonskih ograničenja pre svega preopterećenja prenosnih vodova, sistemom upravlja na tradicionalan način redispečingom aktivnih i reaktivnih snaga kao i promenom topologije mreže. Međutim, svakodnevni, sve veći zahtevi koji se nameću elektroenergetskim sistemima kao što su trend rasta potrošnje, razvoj tržišta električne energije, priključenje distribuiranih izvora električne energije kao što su vetrogeneratori i solarni paneli i sl., doveli su do toga da tradicionalni načini upravljanja karakteristični za vertikalno organizovane sisteme nisu dovoljni za kvalitetno upravljanje sistemom. Otuda se nameće potreba za novim, savremenijim načinima upravljanja sistemom.

Potrebe za novim načinima upravljanja posebno su izražene u deregulisanim elektroenergetskim sistemima. Kod ovakve organizacije elektroenergetskih sistema, mnogi problemi u radu kao što su preopterećenja i zagušenja prenosnih vodova, a

takođe i problemi sa ugaonom i naponskom stabilnošću postaju još izraženiji nego u slučaju vertikalno organizovanih sistema. Kod decentralizovanih sistema mehanizmi i mere koji treba da obezbede zadovoljavajuće tehničke karakteristike sistema i eliminisanje pomenutih problema u radu moraju da se prilagode novim zahtevima deregulisanog tržišta električne energije. Takve mere imaju za cilj da povećaju prenosne mogućnosti mreže boljim iskorišćenjem postojećih kapaciteta ili instalacijom novih prenosnih kapaciteta. Jedna od sve prisutnijih mogućnosti za upravljanje sistemom je uvođenje novih kontrolnih uređaja koji mogu da omoguće maksimalne transfere po određenim prenosnim koridorima ili maksimalni broj transakcija bez narušavanja pogonskih ograničenja [2]. Ovi novi kontrolni uređaji koji se koriste za unapređenje rada prenosnog sistema, bazirani su na primeni elemenata energetske elektronike velikih snaga i poznati su pod jedinstvenim nazivom FACTS (Flexible Alternate Current Transmission Systems) uređaji [3]. Osnovna namena FACTS uređaja je povećanje kontrolabilnosti i prenosne sposobnosti sistema, odnosno direktna regulacija tokova snage željenim prenosnim koridorima, kao i regulacija napona na odabranim čvorovima u mreži. Iako su FACTS uređaji svoju pravu primenu našli u decentralizovanim elektroenergetskim sistemima oni se mogu uspešno koristiti i u vertikalno organizovanim sistemima.

Upotreba FACTS uređaja u elektroenergetskim sistemima omogućava bolje iskorišćenje postojećih prenosnih vodova i odlaganje potrebe za izgradnjom novih. Pored toga što FACTS uređaji mogu da upravljaju tokovima aktivnih i reaktivnih snaga i naponskim prilikama u elektroenergetskoj mreži, oni imaju i pozitivan uticaj na druge pokazatelje koje karakterišu rad prenosnog sistema. Imajući sve ovo u vidu i sa željom da se FACTS uređaji iskoriste na najefikasniji način, od posebne je važnosti izbor tipa, lokacije i parametara FACTS uređaja. Razmatranju ove problematike usmereno je istraživanje kojim se bavi ova disertacija.

Problem izbora tipa, lokacije i parametara FACTS uređaja je veoma kompleksan i zaslužuje temeljnu analizu. Pre svega, veoma je važno utvrditi sve relevantne faktore koji mogu uticati na izbor. Zatim je potrebno sve te uticajne faktore matematičkim modelima prevesti u kriterijumske funkcije i na taj način kreirati optimizacioni model koji je potrebno rešiti nekom optimizacionom tehnikom.

Za rešavanja ovog problema u literaturi se mogu uočiti dva osnovna pristupa [4]. Kod prvog pristupa optimizacioni problem se modeluje preko jedne optimizacione funkcije, bilo da je ona jedinstvena, odnosno da predstavlja samo jedan kriterijum ili da je formirana agregacijom više kriterijumskih funkcija pomoću težinskih koeficijenata. Kod drugog pristupa problem se modeluje preko više kriterijumskih funkcija koje se simultano optimizuju. Osnovna slabost prvog pristupa je ta što se izbor lokacije i parametara uređaja svodi na samo jednu optimizacionu funkciju. Međutim, tehnički, ekonomski i ekološki kriterijumi u deregulisanom okruženju su veoma kompleksni, pa svođenje problema na samo jednu optimizacionu funkciju je neadekvatno i nesagledava sve potencijalne činioce. U opštem slučaju, potencijalne kriterijumske funkcije mogu biti različite po prirodi i međusobno kontradiktorne, pa formiranje jedne agregirane funkcije nije najbolje rešenje jer ona ne bi adekvatno obuhvatila uticaje svih kriterijumskih funkcija i svakako bi favorizovala neke od razmatranih kriterijumskih funkcija. Razlog za to je subjektivnost pri izboru težinskih koeficijenata pri formiranju agregirane kriterijumske funkcije. Ovaj problem može da se prevaziđe simultanom optimizacijom postavljenih kriterijumskih funkcija kojom se omogućava ravnopravan tretman svih kriterijumskih funkcija, a samim tim i obuhvatanje svih relevantnih faktora kod izbora tipa, lokacije i parametara FACTS uređaja. Kod simultane optimizacije više kriterijumskih funkcija kao rezultat optimizacije, umesto jedinstvenog rešenja, dobija se set optimalnih rešenja poznatih u literaturi i kao Pareto optimalna rešenja [5].

Problem izbora tipa, lokacije i parametara FACTS uređaja bio je predmet velikog broja naučnih radova u kojima su predloženi različiti načini za rešenje ovog optimizacionog problema. Mogu se sresti oba pomenuta pristupa rešavanju problema, odnosno modeli koji se rešavaju jednokriterijumskom optimizacijom ali i modeli kod kojih se simultano rešava više kriterijumskih funkcija. Takođe, korišteni su različiti kriterijumi izbora. Može se uočiti i veliki broj optimizacionih metoda koje su upotrebljene za rešavanje postavljenih optimizacionih problema. Tako je u [6] u cilju određivanja optimalne lokacije FACTS uređaja primenjen metod Lagranžovih multiplikatora. U istu svrhu u referencama [7, 8, 9] upotrebljena je “Particle Swarm Optimization” (PSO) metoda. Takođe u literaturi se mogu sresti radovi u kojima su za određivanje optimalne lokacije i parametara FACTS uređaja korišteni genetički algoritmi [10, 11, 12]. Dalje, u [13] upotrebljen je metod ciljnog programiranja uz

upotrebu simuliranog kaljenja. Mikrogenetički algoritam u kombinaciji sa fazi logikom upotrebljen je u [14] za određivanje kako optimalne lokacije, tako i tipa i parametara FACTS uređaja. Uvidom u literaturu može se primetiti da se za rešavanje problema optimalne lokacije i parametara FACTS uređaja koristi širok dijapazon različitih optimizacionih metoda. Takođe, ne može se reći da je neka optimizaciona metoda dominantno u upotrebi ili da je efikasnija od drugih.

Za određivanje optimalne lokacije i parametara FACTS uređaja klasičan pristup optimizacijom samo jedne kriterijumske funkcije srećemo u [8, 10, 14, 15, 16]. Sličan pristup nalazimo i u [7, 9, 12, 13, 17, 18, 19] gde je na osnovu više kriterijuma formirana jedinstvena sintetička, agregirana funkcija izborom težinskih faktora. U slučaju formiranja jedne sintetičke funkcije sam proces optimizacije isti je kao i u slučaju postojanja jedinstvene kriterijumske funkcije. I u jednom i drugom slučaju zadatak se svodi na optimizaciju jedne kriterijumske funkcije. Ovakav pristup daje određene rezultate ali svođenje izbora na samo jednu kriterijumsku funkciju je neadekvatno i nedovoljno imajući u vidu veliki broj kako tehničkih, tako i ekonomskih kriterijuma koji moraju da se uzmu u razmatranje. Iz tog razloga modelovanje problema izbora optimalne lokacije i parametara FACTS uređaja modelom višekriterijumske optimizacije omogućava uključivanje svih relevantnih i uticajnih faktora. U [20], [21] i [22] problem optimalne lokacije i parametara FACTS uređaja modelovan je kao višekriterijumski optimizacioni problem gde se sve kriterijumske funkcije optimizuju simultano. U [20] analizirane su dve kriterijumske funkcije: minimizacija aktivnih gubitaka u mreži i minimizacija devijacije napona. U [21] i [22] simultano su optimizovane tri kriterijumske funkcije. Pored minimizacije gubitaka i devijacije napona u [21] kao treći kriterijum uzeta je maksimizacija margina napona, dok je u [22] analiziran maksimalni prenosni kapacitet vodova.

Pregledom raspoložive literature mogu se uočiti određene slabosti i mane kod rešavanja problema izbora tipa, lokacije i parametara FACTS uređaja. Jedna od osnovnih mana je mali broj kriterijumskih funkcija kojima se modeluje optimizacioni problem i time se ne obuhvataju svi relevantni činioci koji mogu uticati na izbor. Često se u optimizacionom procesu vrši agregacija kriterijumskih funkcija pa se javlja problem adekvatnog izbora težinskih faktora. Još jedna slabost je ta što se tip FACTS uređaja najčešće bira apriori, pre samog optimizacionog postupka, bez uporedne analize

uticaja raspoloživih tipova FACTS uređaja na analiziranu mrežu na osnovu koji bih se dobio FACTS uređaj ili kombinacija FACTS uređaja koja je najefikasnija za razmatranu mrežu. U radovima u kojima je se u procesu optimizacije dobija set optimalnih rešenja ne predlaže se adekvatan način za izbor finalnog kompromisnog rešenja već se izbor prepušta krajnjem korisniku što za njega može predstavljati problem.

Cilj ove disertacije je uvođenje nove optimizacione procedure za nalaženje optimalnog tipa, lokacije i parametara FACTS uređaja primenom višekriterijumske optimizacije kojom bi se prevazišle pomenute slabosti i mane. Osnovna prednost razvijene procedure je što omogućuje uključivanje proizvoljnog broja kriterijumskih funkcija koje mogu biti mešovitog tipa. Kao rezultat višekriterijumske optimizacije dobija se set optimalnih rešenja, za razliku od jednokriterijumske optimizacije gde se kao rezultat dobija jedno jedinstveno rešenje. Ovo je osnovna prednost ali ujedno i mana ovakvog pristupa. Set optimalnih rešenja za razliku od jednog rešenja, generalno gledano daje kompletniji opis problema, a konkretno kod izbora FACTS uređaja daje uvid u kontrolne mogućnosti ovih uređaja. Pored toga zbog postojanja više ravnopravnih optimalnih rešenja krajnjem korisniku je data veća sloboda kod izbora finalnog rešenja pri čemu on iz seta ponuđenih rešenja može da izabere ono koje njemu najviše odgovara. Međutim, ako krajnji korisnik nije adekvatno upućen u sam optimizacioni problem izbor konačnog rešenja iz velikog broja ponuđenih optimalnih rešenja za njega može da bude veoma težak i nepraktičan. Ovo je posebno izraženo kada se razmatra veći broj kriterijumskih funkcija. Već kod tri kriterijumske funkcije, grafički prikaz dobijenih rešenja u 3D prostoru nije praktičan za odabir finalnog rešenja, a za slučaj više od tri kriterijumske funkcije ne postoji način da se dobijena rešenja adekvatno grafički prikažu. U okviru nove procedure izbor jedinstvenog optimalnog rešenja iz seta optimalnih rešenja nije prepušten krajnjem korisniku već je razvijena nova metoda za izbor finalnog kompromisnog rešenja koja ne favorizuje ni jednu od analiziranih kriterijumskih funkcija već na ravnopravan način uvažava uticaj svih kriterijumskih funkcija.

Primena višekriterijumske optimizacije u cilju određivanja tipa, optimalne lokacije i parametara FACTS uređaja, u ovoj disertaciji, ilustrovana je sa dva realna inženjerska problema. Prvi problem se odnosi na određivanje optimalne lokacije i parametara FACTS uređaja u prenosnoj mreži. Proračun je izvršen na realnom sistemu

elektroprivrede Republike Srbije sa ciljem da se dobije optimalan plan razvoja prenosne mreže uvođenjem samo regulacionih uređaja bez izgradnje novih vodova i transformatorskih stanica. Proračun je urađen za različite godine razvoja ovog sistema imajući u vidu povećanje nivoa opterećenja i planiranu izgradnju novih proizvodnih kapaciteta. Kao kriterijumi za izbor razmatrani su kako globalni pokazatelji rada elektroenergetske mreže, kao što su gubici aktivne snage u sistemu, tako i lokalni pokazatelji koji se odnose na nivo opterećenja prenosnih vodova i napone čvorova, pokazatelji sigurnosti, pokazatelji vezani za rad sistema u tržišnom okruženju i ekonomski pokazatelji. Nova procedura kroz pretraživanje velikog broja potencijanih varijanti i kroz uporednu analizu uticaja pojedinih tipova FACTS uređaja na analiziranu mrežu, daje konkretne predloge za FACTS uređaje čijom bi se ugradnjom na predložene lokacije ostvario plan razvoja prenosne mreže bez potrebe za izgradnjom novih prenosnih kapaciteta. Pored toga ugradnjom FACTS uređaja unapredile bi se performanse prenosne mreže imajući u vidu analizirane kriterijumske funkcije.

Drugi problem koji je obrađen u ovoj disertaciji odnosi se na nalaženje optimalne lokacije i parametara FACTS uređaja u distributivnoj mreži uz prisustvo distribuiranih izvora električne energije. Kod ovog proračuna osnovni kriterijum za izbor je obezbeđivanje napajanje krajnjih potrošača kvalitetnom električnom energijom za širok dijapazon mogućih radnih režima uz uvažavanje svih pogonskih ograničenja. Proračun je urađen na realnoj srednjenaponskoj distributivnoj mreži koja napaja nekoliko sela u regionu Banata u Srbiji.

Kao matematički alat, za rešavanje višekriterijumskog optimizacionog problema kod oba analizirana realna problema, odabrana je optimizaciona tehnika evolutivnog tipa u literaturi poznata kao genetički algoritam sa sortiranjem prema dominaciji (algoritam NSGA-II) [23]. Algoritam NSGA-II je izabran jer predstavlja jednu od standardnih metoda za rešavanje problema višekriterijumske optimizacije. Algoritam omogućava simultanu optimizaciju više kriterijumskih funkcija. Algoritam se oslanja na koncept evolucije u prirodi i pogodan je za proračune sa mešovitim kriterijumskim funkcijama, i sa različitim tipovima promenljivih (realne, cele, kontinualne, diskretne, logičke, itd.). Osnovne karakteristike NSGA-II algoritma su da koristi princip elitizma i da obezbeđuje mehanizam ravnomernog rasprostiranja rešenja. U ovoj disertaciji NSGA-II algoritam je dodatno unapređen tako što je uvedeno lokalno pretraživanje za

članove populacije koji se nalaze na krajevima tekućeg Pareto fronta. Na taj način je povećana brzina i efikasnost pri nalaženju optimalnih rešenja.

Disertacija se sastoji od 6 poglavlja. Nakon uvodnog poglavlja u drugom poglavlju dat je pregled osnovnih tipova FACTS uređaja. Date su zamenske šeme uređaja kao i osnovne karakteristike i funkcije. Pored toga, dati su načini za modelovanje ovih uređaja pri proračunima tokova snaga. Treće poglavlje posvećeno je višekriterijumskoj optimizaciji. U ovom poglavlju dati su koncepti i definicije osnovnih pojmova vezanih za višekriterijumsku optimizaciju. Takođe, dat je pregled klasičnih metoda koje se koriste za rešavanje problema modelovanih sa više kriterijumskih funkcija. Četvrto poglavlje obrađuje metode višekriterijumske optimizacije koje se zasnivaju na konceptu evolucije u prirodi. Dati su osnovni principi na kojima se zasnivaju ove metode, a takođe dat je i pregled najpoznatijih evolutivnih metoda višekriterijumske optimizacije. U ovom poglavlju dat je opis nove metode za izbor jedinstvenog kompromisnog rešenja. U petom poglavlju dat je prikaz razvijene procedure za određivanje optimalnog tipa, lokacije i parametara FACTS uređaja primenom višekriterijumske optimizacije. U ovom poglavlju prikazani su i rezultati proračuna za dva realna inženjerska problema. U šestom poglavlju dat je zaključak u kom su iznete prednosti koncepta višekriterijumske optimizacije i unapređenja koja se dobijaju predloženom procedurom. Konačno u sedmom poglavlju dat je pregled literature koja je upotrebljena prilikom izrade disertacije.

2. FACTS UREĐAJI

2.1. Uvod

Elektroenergetski sistemi u poslednjih dvadesetak godina pretrpeli su značajne promene. Tu se pre svega misli na način organizacije ovih sistema. U velikom broju zemalja sa centralizovane prešlo se na decentralizovanu (deregulisanu) organizaciju sistema. U skladu sa novim tržišnim zahtevima nastala je potreba za razvojem novih načina upravljanja sistemom. Intenzivan razvoj uređaja baziran na primeni elemenata energetske elektronike velikih snaga doveo je do formiranja nove grupe uređaja koji se mogu koristiti za regulaciju i upravljanje elektroenergetskim sistemima. Ovi uređaji su poznati pod jedinstvenim nazivom FACTS (Flexible AC Transmission Systems) uređaji. Osnovna namena FACTS uređaja se sastoji u sledećem [24]:

- upravljanje tokovima snaga,
- povećanje prenosnih mogućnosti mreže,
- upravljanje naponom,
- kompenzacija reaktivnih snaga,
- unapređenje ugaone i naponske stabilnosti sistema,
- unapređenje kvaliteta električne energije,
- smanjenje flikera,
- povezivanje distribuiranih izvora na sistem.

Imajući u vidu širok spektar mogućnosti FACTS uređaja, može se reći da oni sve više nalaze svoje mesto u savremenim elektroenergetskim sistemima. FACTS uređaji mogu se podeliti prema načinu povezivanja na prenosnu mrežu na:

- Otočne FACTS uređaja;
- Redne FACTS uređaje;
- Kombinovane FACTS uređaje.

Osnovni predstavnici otočnih FACTS uređaja su statički kompenzator reaktivne snage i statički sinhroni kompenzator. Kod rednih uređaja to su tiristorski kontrolisan redni kompenzator i statički sinhroni redni kompenzator. Od kombinovanih FACTS uređaja može se izdvojiti objedinjeni regulator tokova snaga.

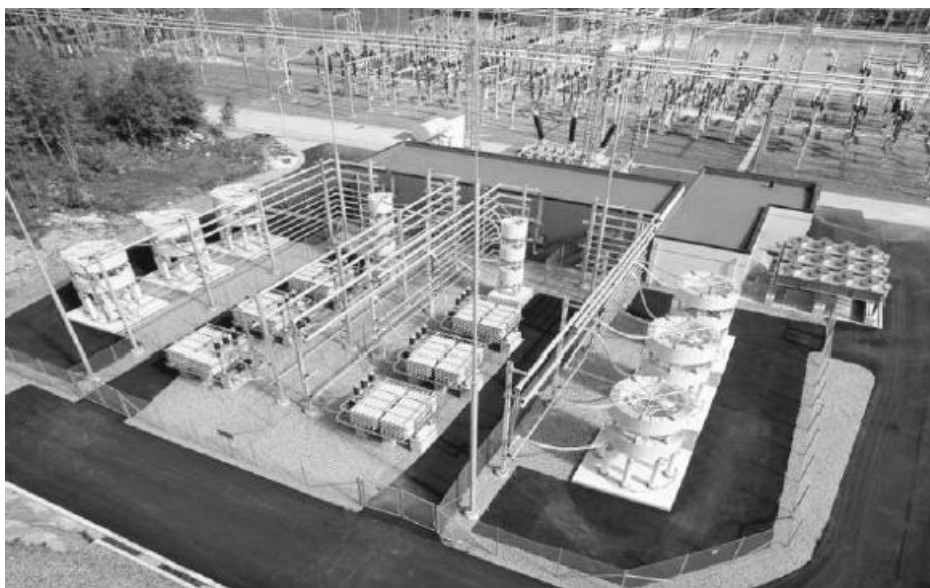
U tekstu koji sledi, za nabrojane tipove FACTS uređaja, biće dati principa rada, principijelne šeme kao i načini modelovanja ovih uređaja za proračune tokova snaga.

2.2. Statički kompenzator reaktivne snage (Static Var Compensator – SVC)

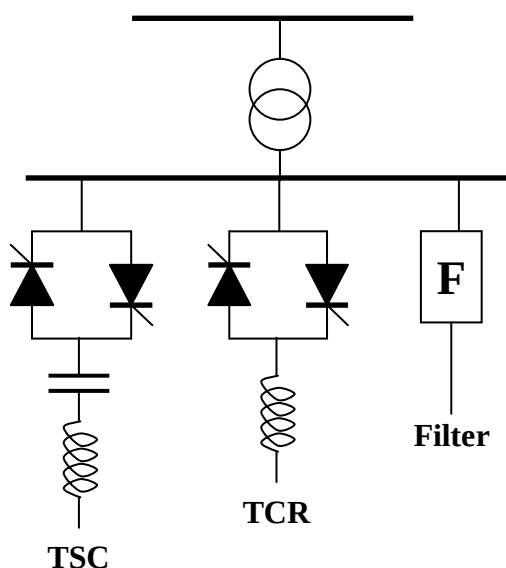
Statički kompenzator reaktivne snage (u daljem tekstu SVC) je prvi FACTS uređaj koji je razvijen i koji je našao širu primenu u praksi. Njegov razvoj je počeo početkom 70-tih godina prošlog veka i prva primena mu je bila za kompenzaciju reaktivne snage elektrolučnih peći. Pošto se radilo o velikom industrijskom potrošaču čija je potrošnja reaktivne snage stalno varirala, upotreba baterija kondenzatora konstantne snage za kompenzaciju reaktivne snage nije bila adekvatno rešenje. Ovaj problem je rešen uvođenjem faznih regulatora u sistem kompenzacije reaktivnih snaga. Zahvaljujući razvoju tiristora velikih snaga, iskustva upotrebe SVC-a u industrijske svrhe su prenesena na više naponske nivoe prenosnih mreža i tako je SVC postao kontinualno upravljani otočni kompenzator reaktivne snage. Godine 1979. instaliran je prvi SVC uređaj u prenosnoj mreži. Od tada ovaj uređaj je široko prihvaćen u celom svetu i postao je najpopularniji FACTS uređaj. Na Sl. 2.1 dat je izgled realnog postrojenja sa SVC uređajem.

SVC uređaj se dobija povezivanjem tiristorskog faznog regulatora na red sa kondenzatorima ili prigušnicama i sprežanjem ovakvih kola paralelno kao što je prikazano na Sl. 2.2. Tiristorski fazni regulator ima mogućnost regulacije struje kroz prigušnicu ili kondenzator. To se postiže paljenjem tiristora sa kašnjenjem u odnosu na početak periode talasa mrežnog napona. Gašenje tiristora se vrši prirodnom komutacijom pri prolasku struje kroz nulu. Tok manje efektivne vrednosti struje sa strane izvora napajanja se vidi kao povećana ekvivalentna impedansa. Za induktivne elemente ekvivalentno povećanje impedanse znači povećanje induktivnosti, odnosno smanjenje potrošnje reaktivne snage ($Q_{ind} = U^2 / \omega L$), dok za kapacitivne elemente ekvivalentno povećanje impedanse znači smanjenje kapacitivnosti, odnosno smanjenje

generisanja reaktivne snage ($Q_{cap} = \omega CU^2$). Sa stanovišta EES-a, SVC uređaj se može posmatrati kao promenljiva reaktansa, induktivno-kapacitivnog karaktera. Samim tim, pomoću SVC-a moguće je proizvoditi ili preuzimati iz mreže reaktivnu snagu i fino regulisati taj proces pošto se upravljanje vrši samo pomoću jedne upravljačke veličine, a to je ugao paljenja tiristora.

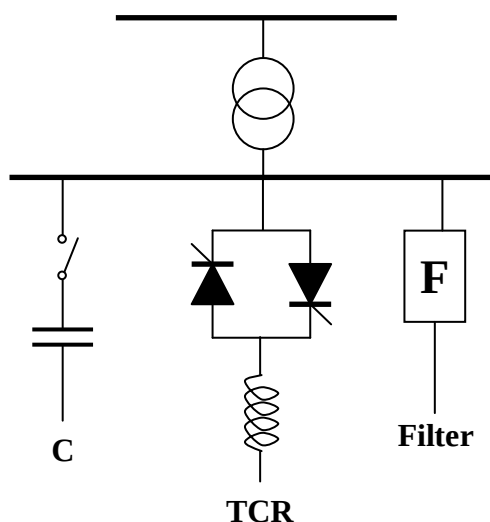


Sl. 2.1. Izgled realnog postrojenja sa SVC uređajem

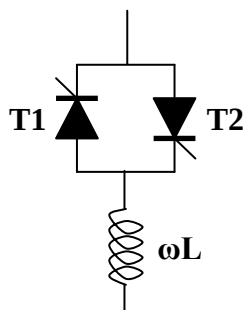


Sl. 2.2. SVC uređaj sa tiristorski upravljanim kapacitetom i induktivnošću

U praksi se koriste dve konfiguracije SVC uređaja, Prva konfiguracija, prikazana na Sl. 2.2. sadrži tiristorski kontrolisane prigušnice (TCR – *Thyristor Controlled Reactor*) i tiristorski prekidane kapacitivnosti (TCS – *Thyristor Switched Capacitor*). Druga konfiguracija prikazana na Sl. 2.3. sadrži tiristorski kontrolisane prigušnice i nepromenljive kondenzatorske baterije. Kod ove konfiguracije umesto upravljivih kapaciteta koriste se fiksne baterije kondenzatora, a fina regulacija generisanja reaktivne snage se vrši samo pomoću TCR-a. Ovo znatno pojednostavljuje upravljački algoritam SVC-a i smanjuje broj upotrebljenih tiristora. Pošto energetske pretvarači rade sa manjim naponima od sistemskih, onda se tiristorski prekidači vezuju na mrežu preko sprežnih energetskih transformatora.

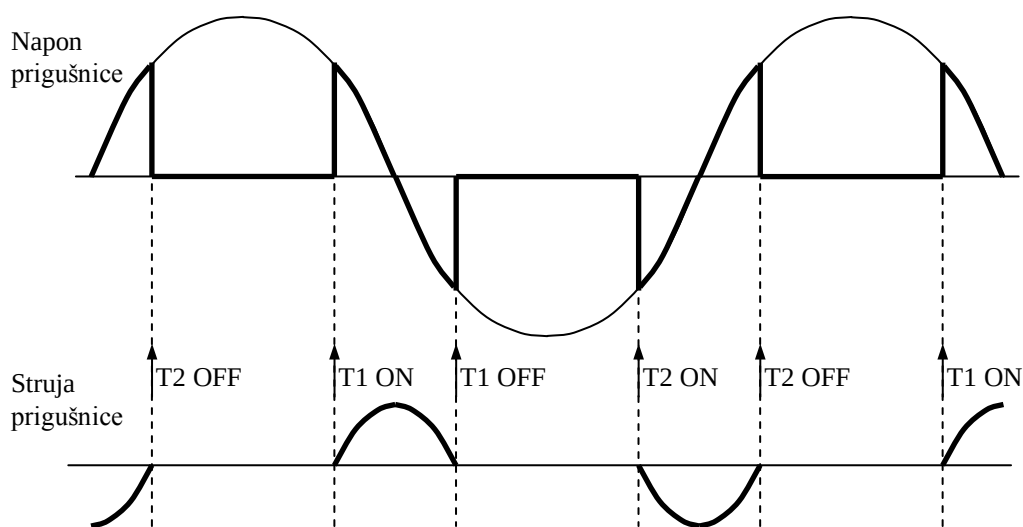


Sl. 2.3. SVC uređaj sa tiristorski upravljanim induktivnošću i konstantnim kapacitetom



Sl. 2.4. Tiristorski kontrolisana prigušnica (TCR)

Kod obe pomenute konfiguracije koristi se TCR pa je potrebno objasniti princip rada tog dela SVC-a. Ekvivalentna šema TCR-a data je na Sl. 2.4. Zbog prirodnog faznog pomeraja napona i struje prigušnice za 90° , paljenje tiristora se vrši upravo u opsegu od 90° do 180° jer u tom periodu traje polutalas struje. Paljenje tiristora T1 pri nekom uglu dovodi trenutnu vrednost napona napajanja na prigušnicu čija je struja nula i ona tek onda počinje da provodi (Sl. 2.5). Kada napon napajanja prolazi kroz nulu (ugao 180°), usled osobine samoindukcije, struja prigušnice dostiže maksimalnu vrednost. Nakon toga napon prigušnice menja polaritet, tj. napon tiristora postaje negativan, ali pošto struja prigušnice još uvek nije jednaka nuli, tiristor T1 nastavlja da provodi. Energija akumulirana u prigušnici se troši jer prigušnica teži da održi svoj fluks nepromenjenim. Kada struja prigušnice dostigne nulu T1 se gasi i kasnijim paljenjem tiristora T2 se ponavlja postupak. Sa dijagrama na Sl. 2.5. se vidi da je efektivna vrednost struje smanjena u odnosu na talas pune sinusoide.



Sl. 2.5. Dijagrami napona i struja TCR-a

Na osnovu dijagrama sa Sl. 2.5. i šeme SVC-a sa Sl. 2.3. može se izvesti izraz za ekvivalentnu reaktansu SVC-a koja se vidi sa strane mreže. Struja kroz TCR se dobija na osnovu Faradejevog zakona primenjenog na prigušnici.

$$U = L \frac{di}{dt} \Rightarrow i = \frac{1}{L} \int U(t) dt; \quad (2.1)$$

$$i_{TCR}(t) = \frac{1}{L} \int_{\alpha}^{\omega t} \sqrt{2}U \sin \omega t dt = \frac{\sqrt{2}U}{\omega L} (\cos \alpha - \cos \omega t), \quad \alpha < \omega t < 2\pi - \alpha, \quad (2.2)$$

pa je efektivna vrednost osnovnog harmonika struje TCR-a jednaka:

$$I_{TCRf1}(t) = \frac{U}{\omega L \pi} [2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha]. \quad (2.3)$$

Iz prethodne jednačine može se izraziti susceptansa TCR-a:

$$B_{TCR} = \frac{1}{\omega L \pi} [2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha]. \quad (2.4)$$

Konačno, uz uvažavanje susceptanse nepromenljivog kondenzatora ($B_C = \omega C$) dobija se ekvivalentna susceptansa SVC-a:

$$B_{SVC} = B_C - B_{TCR} = \frac{1}{X_C X_L} \left[X_L - \frac{X_C}{\pi} (2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha) \right]. \quad (2.5)$$

U prethodnom izrazu uvedene su smene: $X_L = \omega L$ i $X_C = 1/\omega C$.

Kod obe konfiguracije SVC-a (Sl. 2.2 i Sl. 2.3) paralelno postojećim elementima vezuju se i energetske filtere viših harmonika. Filteri su neophodni kad se radi sa TCR-om. Velika mana tiristorskih faznih regulatora je što generišu značajne vrednosti petog i sedmog harmonika. Njihove efektivne vrednosti idu i do 5 % vrednosti osnovnog harmonika. Pošto se radi o velikom uticaju na kvalitet električne energije upotreba filtera je neophodna. Energetski filteri su velikih snaga i zauzimaju puno prostora.

Sprezni transformator je klasični energetski transformator čija prividna snaga mora biti jednaka prividnoj snazi SVC-a. Prisustvo ovog transformatora unosi dodatnu reaktansu, ali se tu uglavnom radi o manjim vrednostima. Pored reaktanse postoji i određena otpornost koja je za red veličine manja.

Uređaj SVC se sa stanovišta prenosne mreže ponaša kao kontinualno promenljiva reaktansa, pa se takav model upotrebiti i u proračunima tokova snaga. Priključenje SVC-a na mrežu može, a i ne mora da poveća dimenziju modela za još jedan čvor ali definitivno dovodi do usložnjavanja proračuna tokova snaga. Pošto se SVC vezuje otačno na odabrani čvor, dolazi do promene ekvivalentne matrice admitansi nezavisnih čvorova sistema. Međutim, promena nije drastična i ogleda se samo u promeni admitanse koja se vidi sa sabirnice na koju je SVC priključen. Generalno, zbog prisustva FACTS uređaja može doći do promene tipa čvora, dok prisustvo nove grane, čak i ako je ona vezana prema neutralnoj tački povlači sa sobom i formiranje dodatnih jednačina injektiranja po aktivnoj i reaktivnoj snazi. U opštem slučaju, u tim

jednačinama mogu figurisati nove promenljive stanja, pa je potrebno proširiti listu osnovnih električnih veličina u proračunu.

Neka je jedan SVC priključen na čvor m posmatranog EES-a, preko spreznog transformatora [25]. Ako se pretpostavi da je konfiguracija SVC kao ona sa Sl. 2.3, onda su na čvor m redno povezani sprežni transformator impedanse $\underline{Z}_T$ i paralelna veza TCR-a i konstantne kapacitivnosti. Pošto je ekvivalentna admitansa TCR-a data jednačinom (2.4), postoje svi elementi da se model tokova snaga proširi jednačinama za SVC.

Ako je:

$$\begin{aligned}\underline{Z}_T &= R_T + jX_T; \\ X_{TCR} &= \frac{\pi X_L}{2(\pi - \alpha_{SVC}) + \sin 2\alpha_{SVC}}; \end{aligned} \quad (2.6)$$

onda sledi:

$$\begin{aligned}X_{SVC} &= \frac{X_C X_{TCR}}{X_C - X_{TCR}}, \\ X_{EQ} &= X_T + X_{SVC}, \quad R_{EQ} = R_T. \end{aligned} \quad (2.7)$$

Sada je ukupna admitansa grane sa sprežnim transformatorom i SVC uređajem jednaka:

$$\underline{Y}_{T-SVC} = G_{T-SVC} + jB_{T-SVC}, \quad (2.8)$$

gde je:

$$G_{T-SVC} = \frac{R_{EQ}}{R_{EQ}^2 + X_{EQ}^2}, \quad (2.9)$$

$$B_{T-SVC} = -\frac{X_{EQ}}{R_{EQ}^2 + X_{EQ}^2}. \quad (2.10)$$

Prilikom formiranja jednačina za proračune tokova snaga, jednačine za injektiranje aktivnih i reaktivnih snaga se formiraju i za čvor m koji je u osnovi potrošački (PQ) čvor. Priključenje SVC uređaja na čvor m , promeniće taj PQ čvor u PU čvor pošto je cilj SVC uređaja da održava napon na zadatoj vrednosti. Napon čvora m se kao poznata promenljiva eliminiše iz modela i umesto njega se kao nova promenljiva stanja uvodi ili admitansa SVC-a ili ugao paljenja tiristora faznog regulatora. U slučaju da struja SVC-a dostigne maksimalnu vrednost, onda više nema promene ekvivalentne

reaktanse SVC-a i čvor m se ponovo mora tretirati kao PQ čvor, odnosno napon tog čvora opet postaje aktuelna promenljiva stanja.

Jednačine injektiranja za čvor m su sada proširene zbog dodatne admitanse i date su narednim izrazima:

$$\begin{aligned} P_m &= (G_{mm} + G_{T-SVC})U_m^2 + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq m}}^n U_i U_m [G_{mi} \cos(\theta_m - \theta_i) + B_{mi} \sin(\theta_m - \theta_i)] \\ Q_m &= -(B_{mm} + B_{T-SVC})U_m^2 + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq m}}^n U_i U_m [G_{mi} \sin(\theta_m - \theta_i) - B_{mi} \cos(\theta_m - \theta_i)] \end{aligned} \quad ; \quad (2.11)$$

gde su:

m – čvor na koji je priključen SVC,

n – ukupan broj čvorova u sistemu.

Polazeći od činjenice da se SVC u mreži ponaša kao promenljiva admitansa moguće je uz pretpostavku da je vrednost konduktanse SVC-a konstantna uvesti susceptansu SVC-a kao novu nezavisnu promenljivu. Tada se može formirati sistem linearnih jednačina čiji je oblik dat sledećim izrazom [25]:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_m \\ \Delta Q_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_m}{\partial \theta_m} & 0 \\ \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_m}{\partial B_{T-SVC}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \theta_m \\ \Delta B_{T-SVC} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Dati sistem jednačina rešava se iterativnim putem:

$$\begin{bmatrix} \theta_m \\ B_{T-SVC} \end{bmatrix}^{(k+1)} = \begin{bmatrix} \theta_m \\ B_{T-SVC} \end{bmatrix}^{(k)} + \begin{bmatrix} \frac{\partial P_m}{\partial \theta_m} & 0 \\ \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_m}{\partial B_{T-SVC}} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \Delta P_m \\ \Delta Q_m \end{bmatrix}^{(k)}, \quad (2.13)$$

gde je:

$$\frac{\partial Q_m}{\partial B_{T-SVC}} = -U_m^2.$$

Prekoračenje maksimalno dozvoljene struje SVC-a znači dostizanje maksimalne ili minimalne susceptanse SVC-a, tako da se zadržava dostignuta vrednost, a dalje se u proračunu čvor m tretira kao PQ čvor.

Ako se uzme u obzir da konduktansa i susceptansa zavise od ugla paljenja tiristora α_{SVC} :

$$\begin{aligned} G_{T-SVC} &= G_{T-SVC}(\alpha_{SVC}) \\ B_{T-SVC} &= B_{T-SVC}(\alpha_{SVC}) \end{aligned} \quad (2.14)$$

moguće je izvesti malo složeniji model SVC-a u proračunima tokova snaga u kome će ugao paljenja biti nova nezavisna promenljiva [25]. Novi sistem jednačina dat je sledećim izrazom:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_m \\ \Delta Q_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_m}{\partial \theta_m} & 0 \\ \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_m}{\partial \alpha_{SVC}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \theta_m \\ \Delta \alpha_{SVC} \end{bmatrix}. \quad (2.15)$$

Rešenje prethodnog sistema jednačina, za slučaj da SVC radi u opsegu svojih mogućnosti, dobija se iterativnim putem:

$$\begin{bmatrix} \theta_m \\ \alpha_{SVC} \end{bmatrix}^{(k+1)} = \begin{bmatrix} \theta_m \\ \alpha_{SVC} \end{bmatrix}^{(k)} + \begin{bmatrix} \frac{\partial P_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_m}{\partial \alpha_{SVC}} \\ \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_m}{\partial \alpha_{SVC}} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \Delta P_m \\ \Delta Q_m \end{bmatrix}^{(k)}. \quad (2.16)$$

Elementi Jakobijana su u ovom slučaju:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_m}{\partial \alpha_{SVC}} &= U_m^2 \frac{\partial G_{T-SVC}}{\partial \alpha_{SVC}}, \\ \frac{\partial Q_m}{\partial \alpha_{SVC}} &= -U_m^2 \frac{\partial B_{T-SVC}}{\partial \alpha_{SVC}}. \end{aligned} \quad (2.17)$$

Jednačina (2.15) predstavlja deo sistema jednačina koje se odnose na injektiranje za sve čvorove osim balansno-referentnog čvora. Zbog jednostavnijeg prikaza promena u Jakobijevoj matrici modela za proračun tokova snaga sistema, čvor m (na koji je priključen SVC) je posebno izdvojen. To je prikazano na Sl. 2.6. Veličina m se može tumačiti i kao skup čvorova na koje je vezan jedan po jedan SVC uređaj. Za slučaj da se SVC modeluje preko promenljive susceptanse, oblik sistema jednačina i njegov red veličine se ne menja. Menja se samo tip promenljive vezane za SVC uređaj. Umesto ugla paljenja, promenljiva stanja postaje susceptansa.

Kriterijum dostizanja maksimalne struje SVC-a primenjuje se na identičan način kao i u slučaju kada se SVC posmatra samo kao promenljiva reaktansa. Sada se tekući ugao paljenja zadržava na trenutnoj vrednosti i za nju se računaju konduktansa i susceptansa koji kao fiksni parametri ulaze u proračun matrice admitansi mreže. Proračun se dalje vrši ponovnim uvođenjem napona čvora m kao promenljive stanja.

Na osnovu svega navedenog, može se reći da je ideja kompenzacije pomoću promenljive reaktanse dovedena na visok nivo upotrebom SVC-a. Uređaj SVC odlikuje puna varijabilnost, odnosno mogućnost proizvodnje ali i preuzimanja reaktivne snage iz mreže, kao i kontrolabilnost (upravljačka veličina je ugao paljenja tiristora). Ove osobine su omogućile fleksibilno upravljanje naponom u čvoru u kome je SVC priključen. Popravka napona u statičkim stacionarnim stanjima mreže znači pouzdaniji rad i tokove snaga u prihvatljivim granicama.

		Promenljive stanja za čvor m				
		$\theta_i \dots$	$U_j \dots$	$\theta_m \quad \alpha_{SVC}$		
Injektiranja u postojeće čvorove mreže	{	P_i	$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_i}$	$\frac{\partial P_i}{\partial U_j}$	$\vdots$	$\vdots$
		$\vdots$	$\frac{\partial Q_j}{\partial \theta_i}$	$\frac{\partial Q_j}{\partial U_j}$	$\vdots$	$\vdots$
		Q_j	$\frac{\partial Q_j}{\partial \theta_i}$	$\frac{\partial Q_j}{\partial U_j}$	$\vdots$	$\vdots$
		$\vdots$	$\frac{\partial Q_j}{\partial \theta_i}$	$\frac{\partial Q_j}{\partial U_j}$	$\vdots$	$\vdots$
Injektiranja aktivne i reaktivne snage za čvor m na koji je priključen SVC	{	P_m	$\dots$	$\dots$	$\frac{\partial P_m}{\partial \theta_m}$	$\frac{\partial P_m}{\partial \alpha_{SVC}}$
		$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\frac{\partial Q_m}{\partial \theta_m}$	$\frac{\partial Q_m}{\partial \alpha_{SVC}}$
		Q_m	$\dots$	$\dots$	$\frac{\partial Q_m}{\partial \theta_m}$	$\frac{\partial Q_m}{\partial \alpha_{SVC}}$
		$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\frac{\partial Q_m}{\partial \theta_m}$	$\frac{\partial Q_m}{\partial \alpha_{SVC}}$

Sl. 2.6. Promene Jakobijeve matrice nakon uključivanja SVC-a na čvor m

Za modelovanje SVC uređaja za proračun tokova snaga mogu se koristiti i jednostavniji modeli. Najjednostavniji je onaj gde se SVC uređaj modeluje kao idealan generator reaktivne snage u izabranom kontrolisanom čvoru i . Ovaj model može se predstaviti jednačinom:

$$Q_i = Q_{SVC} \quad (2.18)$$

U jednačini (2.18) veličina Q_i predstavlja reaktivnu snagu injektiranja u čvoru i , a Q_{SVC} snagu SVC uređaja. Potrebno je reći da snaga SVC uređaja može biti i negativna kada on radi u režimu preuzimanja reaktivne snage iz mreže.

Na kraju se može reći da pored svih dobrih karakteristika SVC uređaja on negativno utiče na kvalitet struja i napona u mreži zbog izrazito velikog generisanja 5-og i 7-og harmonika usled čega je neophodna ugradnja velikih energetske filtera. Drugi važniji nedostatak je taj da generisanje reaktivne snage ovog uređaja, kad su u pitanju maksimalne mogućnosti, zavisi od kvadrata napona, tako da SVC nije u potpunosti

nezavisan uređaj. Neki od pomenutih nedostataka su otklonjeni sledećom generacijom FACTS uređaja za otočnu kompenzaciju čiji je predstavnik STATCOM.

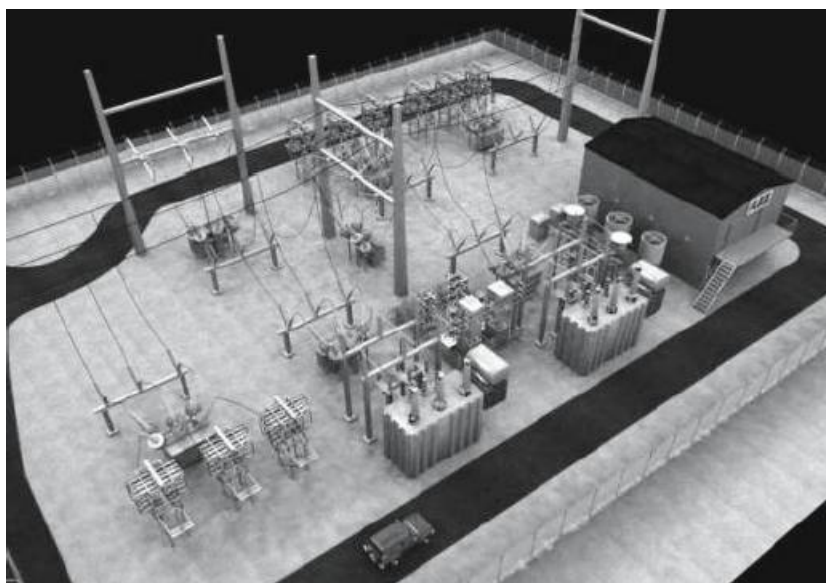
2.3. Statički sinhroni kompenzator (Static Compensator – STATCOM)

Nakon pronalaska SVC uređaja, sledeći logičan korak bila je šira upotreba energetske pretvarača kako bi se naponi i struje učinile što više kontrolabilnim. Uređaj SVC je omogućio da se, gledano sa strane mreže, kontinualno menja karakteristika jednog nepromenljivog elementa bilo da je u pitanju prigušnica ili kondenzator ali je prisustvo ovih pasivnih elemenata i dalje bilo neophodno sa svim svojim električnim i mehaničkim karakteristikama. Pravac daljeg razvoja FACTS uređaja je išao ka tome da se pokuša simulacija određenih reaktivnih elemenata umetanjem u mrežu napona ili struja koje bi ti elementi stvarali kada bi zaista bili priključeni. Time bi se eliminisala upotreba klasičnih reaktivnih elemenata i ne bi došlo do promene početne topologije elektroenergetske mreže. Koristeći ideju SVC-a i novih zadataka koje su se nametnuli FACTS uređajima nastao je statički sinhroni kompenzator (u daljem tekstu STATCOM). Prvi STATCOM uređaj pušten je u pogon 1999. godine. Na Sl. 2.7 dat je prikaz jedne transformatorske stanice sa STATCOM uređajem, dok je na Sl. 2.8 data principijelna šema STATCOM-a.

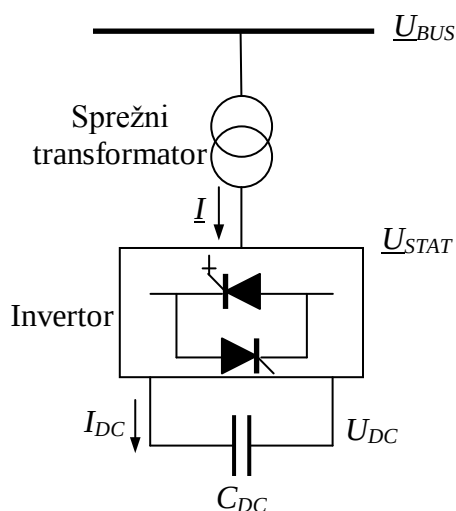
Osnovni deo STATCOM-a predstavlja punoupravljivi trofazni inverter koji je sa jednosmerne strane zatvoren kondenzatorom. Pomoću ovog invertora moguće je na naizmeničnoj strani generisati napon promenljive amplitude (u radnom opsegu napona invertora) i promenljivog faznog stava u odnosu na napon mreže u opsegu od $-\pi/2$ do $\pi/2$.

Generisanje naizmeničnog napona iz trofaznog mostnog invertora se vrši na više načina, a sve sa ciljem da bi se postigao signal što bliži sinusoidalnom. Invertori velikih snaga su do pre 20 godina bili isključivo tiristorski, bili su komplikovani po konstrukciji. Izlazni signali ovih invertora su bili takvi da su unosili neparne harmonike i time su negativno uticali na kvalitet napona mreže. Razvojem GTO (*Gate Turn Off*) tiristora i IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) tranzistora za velike radne struje i visoke napone, sve tehnike energetske elektronike su prenete i u FACTS uređaje. Zbog osobine da mogu da podnesu više napone, GTO tiristori su uzeli primat u konvertorskoj

tehnici FACTS uređaja. Za razliku od običnih tiristora koji prestaju da provode samo pri inverznom naponu i struji jednakoj nuli, GTO tiristori se gasе dovođenjem negativnog naponskog impulsa iste amplitude kao i impulsa za paljenje na gejt. Na Sl. 2.9 data je šema trofaznog mostnog invertora sa GTO tiristorima. Jedan od načina upravljanja invertorom jeste impulsno širinska modulacija ili PWM (*Pulse Width Modulation*) modulacija. Ovom modulacijom jednostavno se upravlja poluprovodničkim komponentama (paljenje i gašenje GTO tiristora).



Sl. 2.7. Transformatorska stanica sa STATCOM uređajem.



Sl. 2.8. Principijelna šema STACOM uređaja

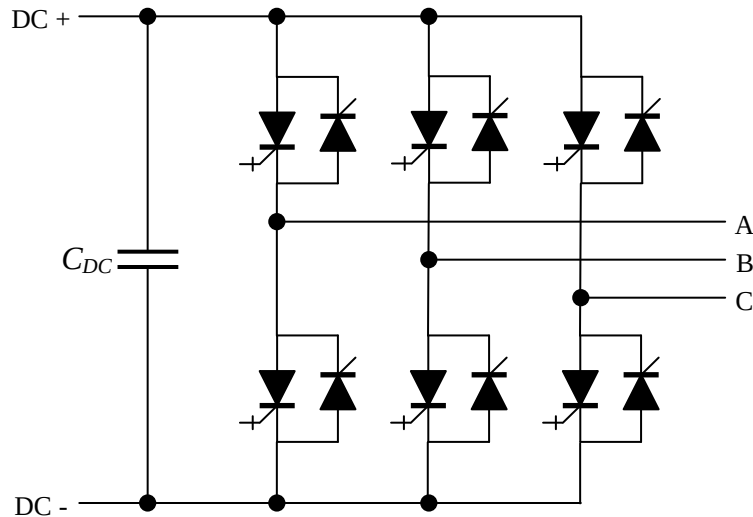
Drugi važan deo STATCOM-a jeste kondenzator u jednosmernom kolu invertora. U invertorskom režimu rada smer toka snage je od jednosmernog ka naizmeničnom kolu i bitna razlika je u tome što je samo aktivna snaga prisutna u oba kola dok je reaktivna snaga prisutna samo u naizmeničnom kolu. Izgleda apsurdno da sam konvertor generiše reaktivnu snagu jer iz jednosmernog kola dolazi samo mala aktivna snaga usled delimičnog pražnjenja kondenzatora, a pri tome nema reaktivnih elemenata u sebi. Da bi se čitava pojava objasnila potrebno je na drugi način sagledati procese u oba radna kola invertora.

Pri frekvenciji jednako nuli nema pojave reaktivne snage tako da ona ne protiče kroz kolo. U jednosmernom kolu postoji kondenzator, ali kapacitivnost (odnosno snaga) tog kondenzatora predstavlja svega nekoliko procenata kapacitivnosti fiksnih baterija ili kondenzatora SVC-a neophodnih da bi se proizveo isti efekat kompenzacije. Uloga tog kondenzatora je samo da održava referentni jednosmerni napon na ulazu u inverter. Taj kondenzator se u toku rada puni i prazni, a njegova dopuna se ostvaruje prostim faznim pomeranjem (kašnjenjem) napona STATCOM-a u odnosu na napon mreže. Pošto se u pitanju male vrednosti aktivnih snaga (reda veličine kW) za dopunu kondenzatora, radi se o veoma malom faznom raskoraku. Jednosmerni kondenzator se dimenzioniše tako da strujna izobličenja koja nastaju u invertoru usled komutacije ne izazivaju veći pad napona kondenzatora od dozvoljenog. To je oko 5 % nominalnog jednosmernog napona.

Reaktivna snaga ima fluktuirajući karakter i neprekidno se razmenjuje između reaktivnih elemenata. Otočno vezivanje invertora na sabirnice mreže predstavlja vezivanje novog reaktivnog elementa koji realno po svojim mehaničkim i električnim karakteristikama nije reaktivan. Stalnim promenama stanja prekidača ostvaruje se cirkulisanje reaktivne snage između faza (struja koja dolazi kroz jednu fazu vraća se kroz druge dve) što se sa strane mreže vidi kao fluktuacija reaktivnog elementa.

Inverter se na sabirnice mreže priključuje preko sprežnog transformatora. To je klasični energetska transformator. Ovakvo povezivanje invertora je neophodno s obzirom da su radni naponi komutacionih komponenata za red veličine manji od napona mreže. Prividna snaga sprežnog transformatora mora biti veća ili jednaka od prividne snage invertora STATCOM-a. Prisustvo ovog transformatora unosi određenu reaktansu u prenosnu mrežu, ali se tu radi o malim vrednostima. Procentualna reaktansa

transformatora je oko 10 %. Pored reaktanse postoji i otpornost u kolu transformatora koja je za red veličine manja.

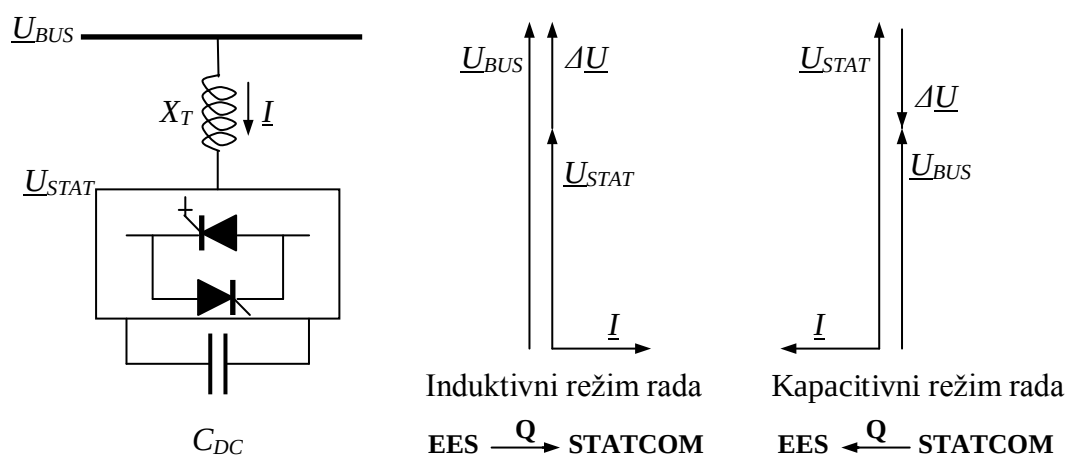


Sl. 2.9. Trofazni mostni inverter sa GTO tiristorima

Princip rada STACOM-a se najjednostavnije može objasniti pomoću fazorskih dijagrama gde su zbog jednostavnosti zanemarene sve otpornosti tako da su elementi električnog kola reaktivni. Posmatrajmo jednu fazu trofaznog sistema. Neka je dat fazor napona sabirnice $\underline{U}_{BUS}$. Inverter proizvodi naizmenični napon čiji se fazor $\underline{U}_{STAT}$ poklapa sa fazorom napona mreže. Neka su fazni stavovi oba napona jednaki nuli odnosno neka se fazori poklapaju sa faznom osom. Razlika napona $\Delta U = U_{BUS} - U_{STAT}$ koja nastaje na sprežnom transformatoru uzrokuje pojavu struje koja je fazno pomerena za $\pi/2$ u odnosu na napon ΔU . Ako je $U_{BUS} > U_{STAT}$ onda će fazor struje kasniti za $\pi/2$ u odnosu na $\underline{U}_{BUS}$, što se sa strane mreže vidi kao da je na te sabirnice priključen induktivni porošać. U suprotnom iako struja kasni za $\pi/2$ u odnosu na ΔU , ona prednjači za isti taj ugao u odnosu na fazor mreže tako da se sa strane mreže vidi kao da je na te sabirnice priključen kapacitivni potrošač. Na Sl. 2.10 prikazan je princip kompenzacije STATCOM-a i za induktivni i za kapacitivni režim rada.

U ovoj kratkoj analizi vidi se značaj upotrebe invertora za generisanje naizmeničnog napona jer je za održavanje određene kapacitivne struje potrebno samo održavati konstantnu razliku napona između mreže i invertora. Pošto je punoupravljivi

inverter u stanju da prati promene napona u mreži, time je postignuta nezavisnost STACOM-a u odnosu na prilike u mreži i ponašanje tog uređaja kao realnog strujnog generatora. U realnom radu da bi se nadoknadili gubici u invertoru i promene jednosmernog napona, faznim pomeranjem napona invertora za veoma mali ugao u odnosu na napon mreže postiže se dopuna kondenzatora ili njegovo pražnjenje. Ako $\underline{U}_{STAT}$ fazno kasni u odnosu na $\underline{U}_{BUS}$ vrši se dopuna kondenzatora odnosno povećavanje jednosmernog napona na njemu.



Sl. 2.10. Princip kompenzacije STATCOM-a

Proračun tokova snaga za mrežu koja sadrži STATCOM uređaj vrši se po sličnoj logici kao i za SVC uređaj [25]. Pošto je osnovna osobina STATCOM-a da je naponski nezavisan uređaj, on ima osobinu da u svom radnom opsegu održava napon sabirnica na koje je priključen na zadatoj vrednosti. Uređaj STATCOM se u opsegu svojih mogućnosti ponaša kao sinhroni kompenzator, tako da se sabirnice na koje je STATCOM priključen mogu tretirati kao PU čvor. Na granicama radnih mogućnosti STATCOM se ponaša kao strujni generator. U slučaju da STATCOM premaši maksimalno dozvoljenu vrednost tada se kompenzovane sabirnice mogu tretirati kao PQ čvor, pošto se u tom slučaju STATCOM ponaša kao otočno vezana impedansa. Ako se pretpostavi da je STATCOM priključen na čvor m preko spreznog transformatora admitanse $\underline{Y}_T = G_T + jB_T$, predajni kraj invertora može da se tumači kao novi čvor k koji je PQ tipa (Sl. 2.11). Napon čvora k će varirati u zavisnosti od toka reaktivne snage ka čvoru m sa ciljem da se napon čvora m održi na zadatoj vrednosti.

Usled dodavanja novog čvora k , uvode se nove jednačine injektiranja za taj čvor, dok se jednačine injektiranja po aktivnoj i reaktivnoj snazi za čvor m modifikuju:

$$P_m = G_{mm}U_m^2 + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq m,k}}^n U_i U_m [G_{mi} \cos(\theta_m - \theta_i) + B_{mi} \sin(\theta_m - \theta_i)] + U_m U_k [G_{mk} \cos(\theta_m - \theta_k) + B_{mk} \sin(\theta_m - \theta_k)] ; \quad (2.19)$$

$$Q_m = -B_{mm}U_m^2 + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq m,k}}^n U_i U_m [G_{mi} \sin(\theta_m - \theta_i) - B_{mi} \cos(\theta_m - \theta_i)] + U_m U_k [G_{mk} \sin(\theta_m - \theta_k) - B_{mk} \cos(\theta_m - \theta_k)] ; \quad (2.20)$$

$$P_k = G_{kk}U_k^2 + U_k U_m [G_{mk} \cos(\theta_k - \theta_m) + B_{mk} \sin(\theta_k - \theta_m)] ; \quad (2.21)$$

$$Q_k = -B_{kk}U_k^2 + U_k U_m [G_{mk} \sin(\theta_k - \theta_m) - B_{mk} \cos(\theta_k - \theta_m)] ; \quad (2.22)$$

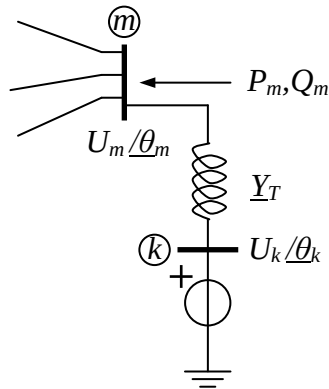
gde je:

m – čvor (ili skup čvorova) na koji je priključen STACOM (ili više njih)

n – ukupan broj čvorova sistema.

k – čvor (ili skup čvorova) na koji je priključen inverter STATCOM-a (odnosno više njih).

Potrebno je reći, da je element matrice admitansi na poziciji mk dobijen na osnovu parametara sprežnog transformatora: $Y_{mk} = G_{mk} + jB_{mk} = -(G_T + jB_T)$.



Sl. 2.11. Zamenska šema STATCOM-a u modelu za proračune tokova snaga

Najjednostavniji način da se uvede strujno injektiranje u model mreže za proračun tokova snaga je da se STATCOM posmatra kao poseban blok i da se kao parametar posmatra samo izlazna struja odnosno reaktivna snaga. Gubici aktivne snage

u STATCOM-u i sprežnom transformatoru mogu se zanemariti. U tom slučaju čvor k se eliminiše iz sistema zajedno sa granom sa sprežnim transformatorom. Čvor m se transformiše u PU čvor kod koga je injektiranje aktivne snage jednako 0 i poznat je napon u tom čvoru. U tom slučaju jednačina (2.20) koja se tiče injektiranja reaktivne snage se eliminiše iz sistema jednačina i u svakoj iteraciji proračunava se ugao napona u čvoru m kao i reaktivno injektiranje u tom čvoru. Pošto je STATCOM radijalno priključen na čvor m izračunato injektiranje reaktivne snage je jednako reaktivnoj snazi koju generiše STATCOM. Na osnovu toga se može proračunati struja injektiranja STATCOM-a kao:

$$\begin{aligned} \underline{I}_m &= \frac{Q_m}{U_m} \left[\cos\left(\theta_m - \frac{\pi}{2}\right) + j \sin\left(\theta_m - \frac{\pi}{2}\right) \right] \\ |\underline{I}_m| &= \frac{Q_m}{U_m} \end{aligned} \quad (2.23)$$

Ako je efektivna vrednost struje injektiranja manja od maksimalno dozvoljene struje STATCOM-a, proračun tokova snaga se nastavlja sa čvorom m kao PU čvorom. U slučaju da dođe do prekoračenja maksimalne struje injektiranja STATCOM-a, čvor m se proglašava za PQ čvor. Napon tog čvora prestaje da bude zadata veličina i uvodi se jednačina za reaktivno injektiranje.

Iako je STATCOM u ovoj metodi proračuna sveden na strujno injektiranje, moguće je na osnovu proračunate struje injektiranja, nezavisno od sistema jednačina, proračunati napon čvora k i gubitke reaktivne snage na sprežnom transformatoru:

$$\begin{aligned} \underline{U}_k &= \underline{U}_m - \underline{Y}_{km} \underline{I}_m; \\ \underline{S}_k &= \underline{U}_k \underline{I}_m^*; \\ Q_\gamma^{km} &= Q_k - Q_m. \end{aligned} \quad (2.24)$$

Detaljnije modelovanje STATCOM-a za proračune tokova snaga zahteva uvažavanje grane sprežnog transformatora i dodatnog čvora k koji je po prirodi PQ čvor sa poznatim aktivnim injektiranjem (približno jednako 0) i nepoznatim reaktivnim injektiranjem. Jednačinama (2.19) i (2.20) dodaju se jednačine (2.21) i (2.22) s namerom da se kompletira sistem koji opisuje STATCOM uređaj.

Uvođenjem jednačina (2.21) i (2.22) povećavaju se dimenzije sistema jednačina, ali se izbegava rekurzivni proračun koji bi se vršio naknadno u slučaju da se STATCOM modeluje kao blok. U četiri jednačine za aktivno i reaktivno injektiranje u

čvorovima m i k figurišu 4 nepoznate: U_k , θ_k , θ_m i Q_k . U čvoru m zadata je vrednost napona U_m tako da se taj čvor u proračunu tretira kao PQU čvor. Pošto injektiranje reaktivne snage Q_k ne figuriše ni u jednoj od preostale tri jednačine sistema osim u sopstvenoj, onda je ta jednačina suvišna i sistem je moguće zatvoriti sa tri jednačine injektiranja koje su date u matricnom obliku sledećim izrazima:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_m \\ \Delta P_k \\ \Delta Q_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_m}{\partial U_k} \\ \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k}{\partial U_k} \\ \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_m}{\partial U_k} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \theta_m \\ \Delta \theta_k \\ \Delta U_k \end{bmatrix}. \quad (2.25)$$

Iz jednačina (2.25) dobija se iterativna jednačina:

$$\begin{bmatrix} \theta_m \\ \theta_k \\ U_k \end{bmatrix}^{(n+1)} = \begin{bmatrix} \theta_m \\ \theta_k \\ U_k \end{bmatrix}^{(n)} + \begin{bmatrix} \frac{\partial P_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_m}{\partial U_k} \\ \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k}{\partial U_k} \\ \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_m}{\partial U_k} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \Delta P_m \\ \Delta P_k \\ \Delta Q_m \end{bmatrix}^{(n)} \quad (2.26)$$

Uslov koji se mora proveravati nakon svake iteracije je da struja STATCOM-a ne bude veća od maksimalne vrednosti:

$$I_{\max} > |I_k| = |Y_{kk}U_k + Y_{km}U_m|. \quad (2.27)$$

Sve dok struja STATCOM-a ne prelazi maksimalnu vrednost, STATCOM ima mogućnosti da injektira još reaktivne snage kako bi se napon čvora m održavao na nekoj zadatoj vrednosti. U slučaju da struja STATCOM-a premašuje maksimalnu vrednost čvor m se proglašava za PQ čvor, i u tom slučaju razmatra se kompletan sistem od 4 nelinearne jednačine sa 4 nepoznate:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_m \\ \Delta P_k \\ \Delta Q_m \\ \Delta Q_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_m}{\partial U_m} & \frac{\partial P_m}{\partial U_k} \\ \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k}{\partial U_m} & \frac{\partial P_k}{\partial U_k} \\ \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_m}{\partial U_m} & \frac{\partial Q_m}{\partial U_k} \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial U_m} & \frac{\partial Q_k}{\partial U_k} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \theta_m \\ \Delta \theta_k \\ \Delta U_m \\ \Delta U_k \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Nepoznate promenljive stanja iz prethodnih jednačina dobijaju se iterativnim putem:

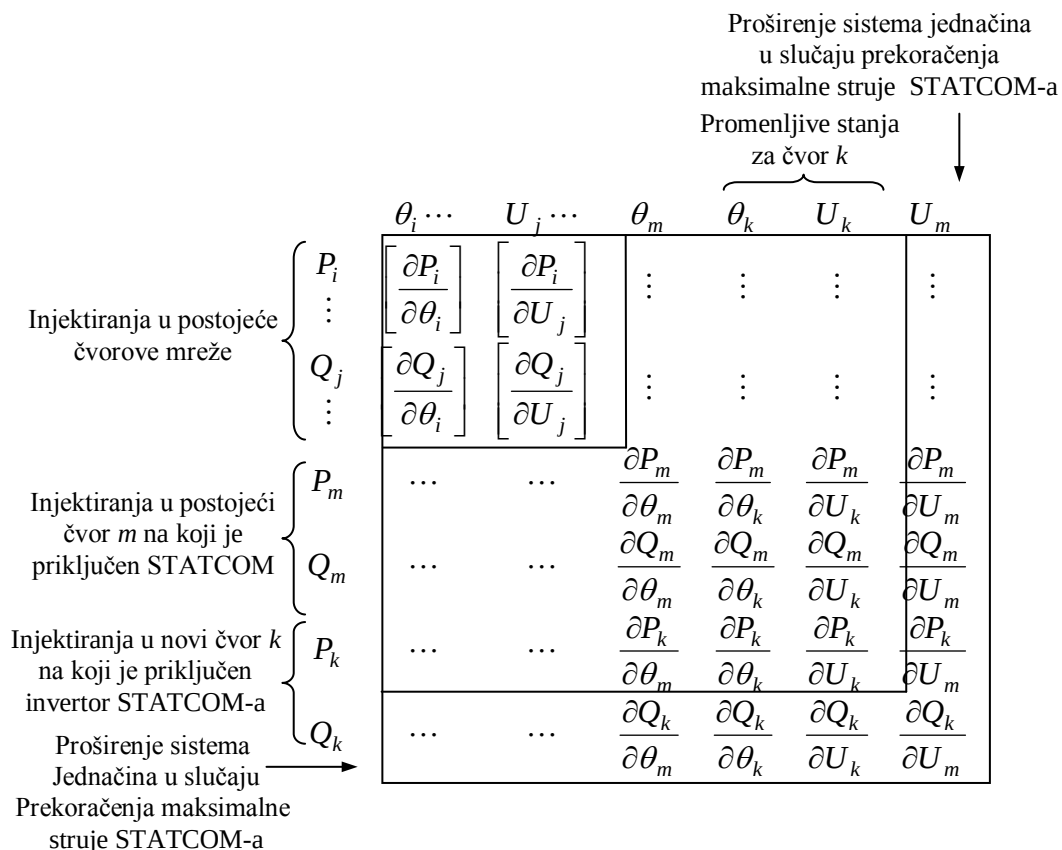
$$\begin{bmatrix} \theta_m \\ \theta_k \\ U_m \\ U_k \end{bmatrix}^{(n+1)} = \begin{bmatrix} \theta_m \\ \theta_k \\ U_m \\ U_k \end{bmatrix}^{(n)} + \begin{bmatrix} \frac{\partial P_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_m}{\partial U_m} & \frac{\partial P_m}{\partial U_k} \\ \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k}{\partial U_m} & \frac{\partial P_k}{\partial U_k} \\ \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_m}{\partial U_m} & \frac{\partial Q_m}{\partial U_k} \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial U_m} & \frac{\partial Q_k}{\partial U_k} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \Delta P_m \\ \Delta P_k \\ \Delta Q_m \\ \Delta Q_k \end{bmatrix}^{(n)} \quad (2.29)$$

Pošto se u maksimalnom režimu STATCOM ponaša kao strujni generator, reaktivna snaga koja se injektira u čvor k odgovara maksimalnoj reaktivnoj struji koja je konstantna. Zbog toga je potrebno na kraju svake iteracije proračunati injektiranje reaktivne snage na osnovu proračunatog napona čvora k i konstantne maksimalne struje STATCOM-a $I_{\max}$ prema jednačini

$$Q_k^{novo} = U_k I_{\max}. \quad (2.30)$$

Sa novim injektiranjem reaktivne snage se ulazi u sledeću iteraciju i ova vrednost se poredi sa proračunatim injektiranjem reaktivne snage prema izrazu (2.24). Injektirana reaktivna snaga treba da ima isti smer koji je imala struja STATCOM-a u trenutku kada je u proračunu dostignuto ograničenje po maksimalnoj struji.

Na Sl. 2.12 prikazana je ugradnja jednačina (2.26) odnosno (2.28) u celokupan sistem jednačina za proračune tokova snaga. Posebno su izdvojeni čvor m (na koji je vezan STATCOM) i čvor k (novi čvor koji je incidentan postojećem čvoru m), s namerom da se jasno prikažu promene i proširenja Jakobijeve matrice. Pojedini čvorovi m i k mogu biti zamenjeni skupovima čvorova ako se u sistem priključuje više STATCOM uređaja.

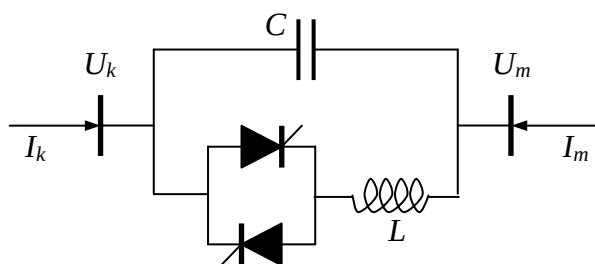
Sl. 2.12. Promena i proširenje Jakobijeve matrice posle ugradnje STATCOM-a u čvor m

2.4. Tiristorski kontrolisan redni kompenzator (Thyristor Controlled Series Compensator - TCSC)

Paralelno sa razvojem SVC uređaja za potrebe točne kompenzacije, fazni regulatori primenjeni su i na redne kondenzatore. Ideja koja je primenjena kod SVC-a sa paralelnom vezom baterije kondenzatora konstantnog kapaciteta i tiristorski kontrolisane prigušnice (TCR-a), primenjena je i u rednoj kompenzaciji, i na taj način je dobijen tiristorski kontrolisan redni kompenzator ili TCSC. Prvi TCSC uređaj pušten je u rad 1996. godine. Na Sl. 2.13 dat je prikaz postrojenja sa TCSC-om instaliranog u prenosnu mrežu. Principijelna šema uređaja TCSC data je na Sl. 2.14. Kondenzator u paralelnoj vezi sa Sl. 2.14 i ranije se koristio kod klasičnog rednog kompenzatora. Novina je upotreba TCR-a kako bi se efektivna reaktansa učinila kontinualno promenljivom.



Sl. 2.13. Prikaz postrojenja sa TCSC uređajem



Sl. 2.14. Principijelna šema uređaja TCSC

Pored pomenute, moguća je i druga konfiguracija kontinualno kontrolisane redne kompenzacije ako se iz TCSC-a samo izbací prigušnica. Time se dobija paralelna veza faznog regulatora i kondenzatora tako da se efektivna kapacitivnost menja povremenim kratkim spajanjem kondenzatora. Još jednostavnija primena ovakve konfiguracije jeste da se tiristorske sprege koriste kao elektronski prekidači za uključivanje ili isključivanje segmenata baterija. Ovaj uređaj se zbog toga zove tiristorski prekidan redni kompenzator ili TSSC (*Thyristor Switched Series Compensator*).

Elementi TCSC-a se dimenzionišu da podnesu visoke napone (i po nekoliko desetina kV) i radne struje od 1000 A do 3000 A [26]. Kapacitivnost baterije kondenzatora je preko 1 mF, dok je induktivnost prigušnice nekoliko mH. Paralelno sa kondenzatorom i TCR-om vezuje se metal oksidni varistor koji služi za zaštitu uređaja

od prenapona. Izbor parametara elemenata TCSC-a nije jednostavan kao što je to bio slučaj kod SVC-a.

Reaktansa kondenzatora kod TCSC-a je $X_C = 1/\omega_s C$, dok je induktivnost u tiristorskoj grani jednaka $X_L = \omega_s L$. U paralelnoj vezi ova dva elementa formiraju oscilatorno kolo sa rezonantnom frekvencijom:

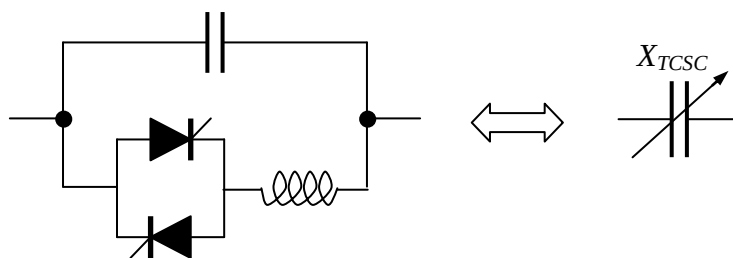
$$\omega_R = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_s \sqrt{\frac{-X_C}{X_L}}. \quad (2.31)$$

Na osnovu rezonantne frekvencije definiše se koeficijent rezonancije:

$$\lambda = \frac{\omega_R}{\omega_s} = \sqrt{\frac{-X_C}{X_L}}. \quad (2.32)$$

Ovaj koeficijent se kreće u opsegu od 2.5 do 4. To znači da je reaktansa prigušnice bar deset puta manja od reaktanse kondenzatora na nominalnoj frekvenciji sistema. Paralelna veza tiristorske grane sa prigušnicom i kondenzatora može se ekvivalentirati nekom prividnom reaktansom X_{TCSC} (Sl. 2.15) koja može da se definiše kao imaginarni deo odnosa kompleksnog napona kondenzatora i kompleksne struje kroz prigušnicu. Tu se misli na prvi harmonik struje. Referentna vrednost za reaktansu kompenzacije bi svakako trebalo da bude reaktansa kondenzatora jer je ona konstantna. U odnosu na tu reaktansu računa se faktor pojačanja (*boost factor*):

$$K_B = \frac{X_{TCSC}}{X_C}. \quad (2.33)$$

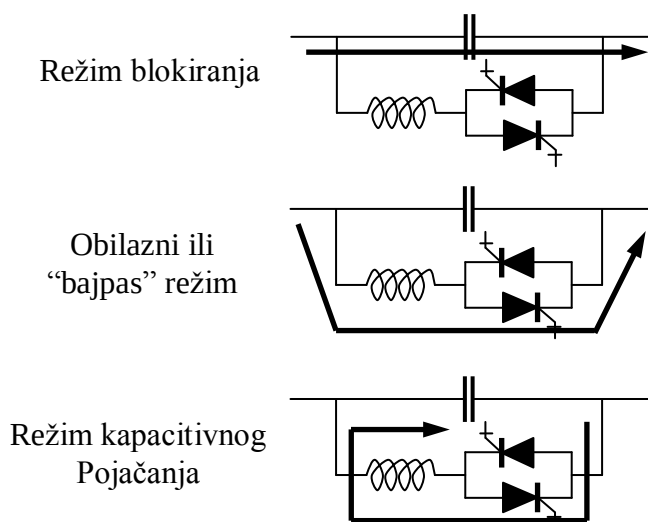


Sl. 2.15. Ekvivalentiranje TCSC uređaja promenljivom kapacitivnom reaktansom

Prema tome kako i kada se aktiviraju tiristori u tiristorskoj grani mogu se definisati tri radna režima u kojima TCSC radi. Ovi režimi prikazani su na Sl. 2.16. Ako su tiristori u tiristorskoj grani ugašeni, onda TCR nije u funkciji i sva struja prolazi kroz

kondenzator. Na taj način vrši se klasična redna kompenzacija pomoću kondenzatora. Ovakav režim rada naziva se režim blokiranja (*blocking mode*). Prividna reaktansa X_{TCSC} je jednaka X_C , a faktor pojačanja K_B jednak je jedinici. Talasi napona i struje su sinusoide međusobno fazno pomerene za $\pi/2$ pri sistemskoj učestanosti. U ovom režimu rada nema pojave viših harmonika.

U slučaju da se tiristori pale pri uglovima $\pi/2$ (u odnosu na trenutak početka sinusoide napona), tiristorska antiparalela se ponaša kao kratak spoj, tako da je sada prividna reaktansa jednaka paraleli reaktansi prigušnice i kondenzatora. Kako je reaktansa induktivnosti oko 10 puta manja od reaktanse kondenzatora to veći deo struje ide kroz prigušnicu. Time je na neki način kapacitivnost zaobiđena pa se ovaj radni režim naziva obilazni ili bajpas (*bypass mode*). U ovom režimu prividna reaktansa je u opsegu $X_L \approx X_{TCSC} \ll X_C$, a faktor pojačanja je K_B je značajno manji od jedan.



Sl. 2.16. Tri radna režima TCSC-a

Ako bi se tiristori palili u trenutku kada je sinusoida napona kondenzatora u opadanju ili u blizini nule, pojavila bi se struja pražnjenja od kondenzatora prema prigušnici, odnosno uspostaviće se oscilatorno kolo. Kroz kondenzator bi proticala veća struja (zbir radne struje dalekovoda i struje pražnjenja koja dolazi iz prigušnice) koja bi stvarala još veći radni napon, a on bi zajedno sa naponom polaznog kraja voda povećavao efekat redne kompenzacije. Struja kroz prigušnicu je impulsnog karaktera i suprotna je struji voda i ukupnoj struji kroz kondenzator. Talas napona je izobličen u

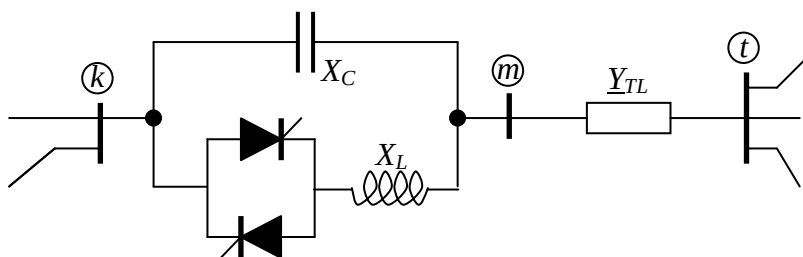
okolini maksimuma (dodatni vrh napona), ali se povećava efektivna vrednost osnovnog harmonika napona. Zbog načina funkcionisanja ovaj režim rada se naziva režim kapacitivnog pojačanja napona (*capacitive boost mode*). Sada je $X_{TCSC} > X_C$ jer je za istu radnu struju dalekovoda povećan napon na kondenzatoru pa je faktor pojačanja K_B veći od jedan i dat je relacijom [26]:

$$K_B = 1 + \frac{2}{\pi} \frac{\lambda^2}{\lambda^2 - 1} \left[\frac{2 \cos^2 \beta}{\lambda^2 - 1} (\lambda \tan \lambda \beta - \tan \beta) - \beta - \frac{\sin 2\beta}{\beta} \right] \quad (2.34)$$

gde je λ ranije pomenuti koeficijent rezonancije, a β ugao paljenja tiristora.

U praksi TCSC upravo radi u ovom radnom režimu jer se njime postiže najbolji efekat kompenzacije. Dobra strana režima kapacitivnog pojačanja je i u tome što TCSC sam sebi filtrira napon i izlaznu struju. Viši harmonici struje se zatvaraju u petlji sa paralelnim kondenzatorom (pošto je reaktansa kondenzatora višestruko manja) tako da samo treći i delimično peti harmonik napona izlaze iz TCSC-a.

Model proračuna tokova snaga za TCSC se kao i kod SVC-a zasniva na uvođenju ugla paljenja tiristora kao nove promenljive [25]. Na Sl. 2.17 data je ekvivalentna šema dalekovoda sa TCSC uređajem. Uređaj TCSC priključen je između čvorova k i m . Pre priključenja TCSC-a čvor k je bio početak dalekovoda, međutim, priključenjem TCSC-a čvor m je sada čvor koji predstavlja početak dalekovoda. Ceo TCSC uređaj treba posmatrati kao promenljivu reaktansu koja je redno priključena na dalekovod i ta reaktansa zavisi od ugla paljenja α_{TCSC} .



Sl. 2.17. Ekvivalentna šema dalekovoda sa TCSC-om

Za frekvenciju osnovnog harmonika može se dati izraz za ekvivalentnu reaktansu TCSC-a:

$$X_{TCSC} = -X_C + K_1[2(\pi - \alpha) + \sin(2(\pi - \alpha))] - K_2 \cos^2(\pi - \alpha)[\omega_r \cdot \operatorname{tg}(\omega_r(\pi - \alpha)) - \operatorname{tg}(\pi - \alpha)] \quad (2.35)$$

U prethodnom izrazu uvedene su sledeće smene:

$$K_1 = \frac{X_C + X_{LC}}{\pi}, \quad K_2 = \frac{4X_{LC}^2}{\pi X_L},$$

$$X_{LC} = \frac{X_C X_L}{X_C - X_L}, \quad \omega_r = \left(\frac{X_C}{X_L} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Na osnovu šeme sa Sl. 2.17 mogu se napisati izrazi za aktivne i reaktivne snage injektiranja za čvorove k i m .

$$P_k = G_{kk}U_k^2 + U_k U_m B_{km}(\alpha) \sin(\theta_k - \theta_m) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k, m}}^N U_k U_j [G_{kj} \cos(\theta_k - \theta_j) + B_{kj} \sin(\theta_k - \theta_j)]$$

$$Q_k = -B_{kk}(\alpha)U_k^2 - U_k U_m B_{km}(\alpha) \cos(\theta_k - \theta_m) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k, m}}^N U_k U_j [G_{kj} \sin(\theta_k - \theta_j) - B_{kj} \cos(\theta_k - \theta_j)] \quad (2.36)$$

$$P_m = G_{mm}U_m^2 + U_k U_m B_{km}(\alpha) \sin(\theta_m - \theta_k) + U_m U_t [G_{mt} \cos(\theta_m - \theta_t) + B_{mt} \sin(\theta_m - \theta_t)]$$

$$Q_m = -B_{mm}(\alpha)U_m^2 - U_k U_m B_{km}(\alpha) \cos(\theta_m - \theta_k) + U_m U_t [G_{mt} \sin(\theta_m - \theta_t) - B_{mt} \cos(\theta_m - \theta_t)] \quad (2.37)$$

gde su:

m, k – čvorovi (ili skupovi čvorova) na koje je priključen TCSC (odnosno više njih),
 N – ukupan broj čvorova sistema.

Pored ovih jednačina potrebno je navesti i jednačinu toka aktivne snage od čvora k do čvora m , pošto je pomoću TCSC-a moguće kontrolisati tok aktivne snage:

$$P_{km} = -U_m U_k B_{km}(\alpha) \sin(\theta_m - \theta_k). \quad (2.38)$$

U jednačinama (2.36)-(2.38) sopstvene konduktanse i susceptanse čvorova k i m zavise od admitansi ostalih grana koje su priključene na te čvorove dok je konduktansa TCSC-a zanemarena ($G_{km} = 0$). Oba incidentna čvora TCSC-a u opštem slučaju mogu biti PQ čvorovi. Na osnovu toga može se formirati sistem jednačina za određivanje nepoznatih promenljivih stanja. Ako se ceo TCSC uređaj posmatra kao promenljiva

susceptansa u određenih granicama, onda je potrebno uvesti tu susceptansu (B_{TCSC}) kao novu promenljivu stanja u sistem jednačina zajedno sa naponima i njihovim uglovima. Potreban skup jednačina i iterativna jednačina za njihovo rešavanje dati su narednim izrazima:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta P_m \\ \Delta P_{km} \\ \Delta Q_k \\ \Delta Q_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_k}{\partial B_{TCSC}} & \frac{\partial P_k}{\partial U_k} & \frac{\partial P_k}{\partial U_m} \\ \frac{\partial P_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_m}{\partial B_{TCSC}} & \frac{\partial P_m}{\partial U_k} & \frac{\partial P_m}{\partial U_m} \\ \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_{km}}{\partial B_{TCSC}} & \frac{\partial P_{km}}{\partial U_k} & \frac{\partial P_{km}}{\partial U_m} \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_k}{\partial B_{TCSC}} & \frac{\partial Q_k}{\partial U_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial U_m} \\ \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_m}{\partial B_{TCSC}} & \frac{\partial Q_m}{\partial U_k} & \frac{\partial Q_m}{\partial U_m} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \theta_k \\ \Delta \theta_m \\ \Delta B_{TCSC} \\ \Delta U_k \\ \Delta U_m \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

$$\begin{bmatrix} \theta_k \\ \theta_m \\ B_{TCSC} \\ U_k \\ U_m \end{bmatrix}^{(n+1)} = \begin{bmatrix} \theta_k \\ \theta_m \\ B_{TCSC} \\ U_k \\ U_m \end{bmatrix}^{(n)} + \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_k}{\partial B_{TCSC}} & \frac{\partial P_k}{\partial U_k} & \frac{\partial P_k}{\partial U_m} \\ \frac{\partial P_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_m}{\partial B_{TCSC}} & \frac{\partial P_m}{\partial U_k} & \frac{\partial P_m}{\partial U_m} \\ \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_{km}}{\partial B_{TCSC}} & \frac{\partial P_{km}}{\partial U_k} & \frac{\partial P_{km}}{\partial U_m} \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_k}{\partial B_{TCSC}} & \frac{\partial Q_k}{\partial U_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial U_m} \\ \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_m}{\partial B_{TCSC}} & \frac{\partial Q_m}{\partial U_k} & \frac{\partial Q_m}{\partial U_m} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta P_m \\ \Delta P_{km} \\ \Delta Q_k \\ \Delta Q_m \end{bmatrix}^{(n)} \quad (2.40)$$

Ograničenja koja je potrebno uvesti tiču se minimalne i maksimalne susceptanse. U slučaju prekoračenja gornje ili donje granice, za susceptansu se uzima vrednost koja odgovara narušenoj granici i dalje se proračun odvija na standardan način za proračun tokova snaga. Granične vrednosti susceptanse zavise od režima rada uređaja. Obično je to kapacitivni režim pa je u tom slučaju gornja granica $-B_C$ gde je B_C susceptansa kondenzatora. Donja granica je neka maksimalna radna susceptansa koja odgovara odabranom graničnom uglu paljenja tiristora.

Druga mogućnost je da se kao nova promenljiva stanja uvede ugao paljenja tiristora. U određenom opsegu ugla paljenja TCSC može da upravlja tokom aktivne snage. U tom slučaju sistem jednačina koji je potrebno rešiti dat je sledećom matričnom jednačinom.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta P_m \\ \Delta P_{km} \\ \Delta Q_k \\ \Delta Q_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_k}{\partial \alpha_{TCSC}} & \frac{\partial P_k}{\partial U_k} & \frac{\partial P_k}{\partial U_m} \\ \frac{\partial P_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_m}{\partial \alpha_{TCSC}} & \frac{\partial P_m}{\partial U_k} & \frac{\partial P_m}{\partial U_m} \\ \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_{km}}{\partial \alpha_{TCSC}} & \frac{\partial P_{km}}{\partial U_k} & \frac{\partial P_{km}}{\partial U_m} \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_k}{\partial \alpha_{TCSC}} & \frac{\partial Q_k}{\partial U_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial U_m} \\ \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_m}{\partial \alpha_{TCSC}} & \frac{\partial Q_m}{\partial U_k} & \frac{\partial Q_m}{\partial U_m} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \theta_k \\ \Delta \theta_m \\ \Delta \alpha_{TCSC} \\ \Delta U_k \\ \Delta U_m \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

Ako dođe do prekoračenja ugla paljenja tiristora, reaktansa TCSC-a se zadržava na poslednjoj vrednosti (vrednosti koja odgovara narušenoj granici za ugao) i proračun dalje teče na uobičajen način. Za rešavanje sistema jednačina (2.41) koristi se sledeća iterativna jednačina:

$$\begin{bmatrix} \theta_k \\ \theta_m \\ \alpha_{TCSC} \\ U_k \\ U_m \end{bmatrix}^{(n+1)} = \begin{bmatrix} \theta_k \\ \theta_m \\ \alpha_{TCSC} \\ U_k \\ U_m \end{bmatrix}^{(n)} + \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_k}{\partial \alpha_{TCSC}} & \frac{\partial P_k}{\partial U_k} & \frac{\partial P_k}{\partial U_m} \\ \frac{\partial P_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_m}{\partial \alpha_{TCSC}} & \frac{\partial P_m}{\partial U_k} & \frac{\partial P_m}{\partial U_m} \\ \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_{km}}{\partial \alpha_{TCSC}} & \frac{\partial P_{km}}{\partial U_k} & \frac{\partial P_{km}}{\partial U_m} \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_k}{\partial \alpha_{TCSC}} & \frac{\partial Q_k}{\partial U_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial U_m} \\ \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_m}{\partial \alpha_{TCSC}} & \frac{\partial Q_m}{\partial U_k} & \frac{\partial Q_m}{\partial U_m} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta P_m \\ \Delta P_{km} \\ \Delta Q_k \\ \Delta Q_m \end{bmatrix}^{(n)} \quad (2.42)$$

Na sličan način kao i kod prethodnih FACTS uređaja mogu se skicirati promene i proširenja u Jakobijevoj matrici za celokupan sistem koje nastaju usled dodatnih jednačina injektiranja za čvor m kao i jednačina za zahtevani tok aktivne snage po dalekovodu čiji je početni kraj novi čvor m . Promene u Jakobijevoj matrici usled dodavanja TCSC uređaja u prenosnu mrežu date su na Sl. 2.18. Sistem jednačina sa Sl. 2.18 može se proširiti i za slučaj kada imamo više TCSC uređaja. Tada indeksi čvorova k i m mogu predstavljati skupove susednih čvorova na koje su vezani TCSC uređaji. Naravno, za dati broj TCSC uređaja potrebno je dodati isto toliko jednačina za tokove aktivnih snaga po granama u kojima su priključeni uređaji.

		$\theta_i \dots$	$U_j \dots$	θ_k	U_k	Promenljive stanja za novi čvor m Nova promenljiva stanja ↓		α_{TCSC}
Injektiranja u postojeće čvorove mreže	P_i	$\left[\frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} \right]$	$\left[\frac{\partial P_i}{\partial U_j} \right]$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
	Q_j	$\left[\frac{\partial Q_j}{\partial \theta_i} \right]$	$\left[\frac{\partial Q_j}{\partial U_j} \right]$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
Injektiranja u postojeći čvor k na koji je priključen TCSC	P_k	$\dots$	$\dots$	$\frac{\partial P_k}{\partial \theta_k}$	$\frac{\partial P_k}{\partial U_k}$	$\frac{\partial P_k}{\partial \theta_m}$	$\frac{\partial P_k}{\partial U_m}$	$\frac{\partial P_k}{\partial \alpha_{TCSC}}$
	Q_k	$\dots$	$\dots$	$\frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k}$	$\frac{\partial Q_k}{\partial U_k}$	$\frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m}$	$\frac{\partial Q_k}{\partial U_m}$	$\frac{\partial Q_k}{\partial \alpha_{TCSC}}$
Injektiranja u novi čvor m na koji je priključen TCSC	P_m	$\dots$	$\dots$	$\frac{\partial P_m}{\partial \theta_k}$	$\frac{\partial P_m}{\partial U_k}$	$\frac{\partial P_m}{\partial \theta_m}$	$\frac{\partial P_m}{\partial U_m}$	$\frac{\partial P_m}{\partial \alpha_{TCSC}}$
	Q_m	$\dots$	$\dots$	$\frac{\partial Q_m}{\partial \theta_k}$	$\frac{\partial Q_m}{\partial U_k}$	$\frac{\partial Q_m}{\partial \theta_m}$	$\frac{\partial Q_m}{\partial U_m}$	$\frac{\partial Q_m}{\partial \alpha_{TCSC}}$
Tok aktivne snage od čvora k do čvora $m \longrightarrow$	P_{km}	$\dots$	$\dots$	$\frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_k}$	$\frac{\partial P_{km}}{\partial U_k}$	$\frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_m}$	$\frac{\partial P_{km}}{\partial U_m}$	$\frac{\partial P_{km}}{\partial \alpha_{TCSC}}$
		$\dots$	$\dots$	$\frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_k}$	$\frac{\partial P_{km}}{\partial U_k}$	$\frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_m}$	$\frac{\partial P_{km}}{\partial U_m}$	$\frac{\partial P_{km}}{\partial \alpha_{TCSC}}$

Sl. 2.18. Proširenje Jakobijeve matrice ugradnjom TCSC-a
u postojeći čvor k i novi umetnuti čvor m

Za potrebe proračuna uređaj TCSC može se modelovati i jednostavnijim modelom, na primer kao promenljiva reaktansa koja uzima vrednosti iz odgovarajućeg opsega. Pri tome se reaktansa redne veze TCSC uređaja i prenosnog voda može računati prema jednačini:

$$X_{ekv} = X_{TL} + X_{TCSC}, \quad (2.43)$$

gde je X_{line} reaktansa prenosnog voda, a X_{TCSC} reaktansa TCSC uređaja. S namerom da se izbegne nadkompenzacija prenosnog voda, vrednosti za reaktansu TCSC uređaja se ograničavaju i obično se uzimaju iz opsega $[-0.7X_{line}, 0.2X_{line}]$.

Uređaj TCSC je u potpunosti analogan uređaju SVC koji se koristi za otočnu kompenzaciju reaktivnih snaga. Tiristorski fazni regulator koji se koristi kod TCSC-a je po strukturi isti kao i kod SVC-a. Takođe, upravljačka logika kod oba uređaja je slična. Međutim, sama namena TCSC-a je značajno različita u odnosu na SVC. Uređaj TCSC u potpunosti rešava problem redne kompenzacije konceptom promenljive reaktanse. Mogućnost brze promene reaktanse omogućila je i upotrebu TCSC-a za prigušivanje

oscilacija u EES-u u havarijskim stanjima, tako da je on postao ravnopravan sa klasičnim stabilizatorima sistema koji se koriste uz pobudne sisteme sinhronih mašina.

Međutim, nedostatak koji je bio prisutan kod SVC-a javlja se i kod TCSC-a. Reaktivna redna kompenzacija TCSC-a u potpunosti je zavisna od radne struje kroz dalekovod koji je redno vezan na TCSC. Ako je mala struja kroz dalekovod, efekat kompenzacije biće mali. S druge strane vrlo velike struje kroz vod, koje mogu biti posledica nastalih kvarova, mogu da oštete komponente ako zaštitni varistor ili varničar ne odreaguju na vreme. Generisanje harmonika znatno je umanjeno u odnosu na SVC, ali je i dalje prisutno, pa je neophodan energetski filter petog harmonika.

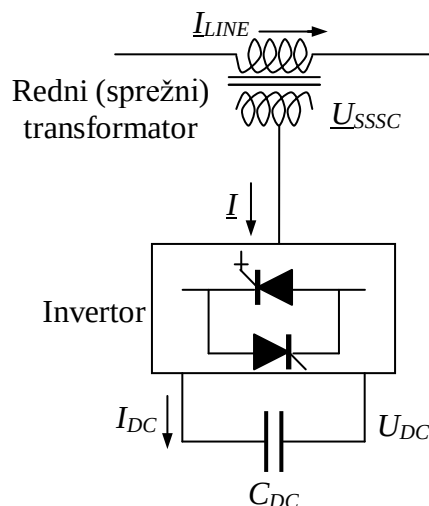
2.5. Statički sinhroni redni kompenzator (Static Synchronous Series Compensator – SSSC)

Koristeći istu ideju za razvoj STATCOM-a za otočnu kompenzaciju, napravljen je korak dalje u razvoju kontinualne redne kompenzacije pa je iz TCSC-a nastao uređaj veoma sličan STATCOM-u. Poput STATCOM-a ovaj uređaj sadrži trofazni mosni inverter koji je sa jednosmerne strane zatvoren kondenzatorom jednosmernog napona. Inverter je na energetsku mrežu povezan preko sprežnog transformatora. Razlika je u tome što je sprežni transformator svojom visokonaponskom stranom povezan redno na dalekovod. U praksi se ovo realizuje sa 3 monofazne jedinice.

Pošto je novi uređaj statički i sinhroni jer generiše napon koji je usklađen sa sistemskim, nazvan je statički sinhroni redni kompenzator ili SSSC (Static Synchronous Series Compensator). Principijelna šema SSSC-a data je na Sl. 2.19. Inverter koji se ugrađuje u SSSC po konstrukciji je identičan invertoru koji se koristi kod STATCOM-a, pa sva objašnjenja ranije navedena za invertore važe i ovde.

Sprežni transformator kod SSSC uređaja služi za umetanje napona čiji je fazor u kvadraturi sa fazorom struje dalekovoda. Kao i kod STATCOM-a, kondenzator na jednosmernoj strani invertora ne služi za generisanje reaktivne snage ili za virtuelno skraćivanje dalekovoda, već samo za održavanje približno konstantnog jednosmernog referentnog napona. Kako je formiranje naizmeničnog napona invertora nezavisno od električnih veličina prenosne mreže, tako je i umetnuti redni napon SSSC-a nezavisan u odnosu na radnu struju koja protiče kroz dalekovod. Zahvaljujući ovoj činjenici SSSC je

nezavisan u odnosu na mrežu i ovaj uređaj omogućava širi radni opseg redne kompenzacije nego što je to bio slučaj kod TCSC-a.



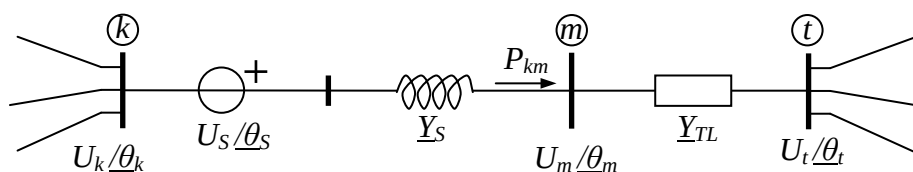
Sl. 2.19. Principijelna šema SSSC uređaja

Uređaj SSSC može da se koristi za upravljanje tokom aktivne snage na dalekovodu na koji je priključen, kao što je to bio slučaj sa TCSC-om. Treba napomenuti da se ne može nezavisno upravljati i tokom reaktivne snage, jer se on uspostavlja kao posledica toka aktivne snage. Umetanjem napona koji je u kvadraturi u odnosu na struju znači da SSSC ima samo jedan stepen slobode delovanja, tako da SSSC nema mogućnost simultanog zadavanja određenog željenog toka i aktivne i reaktivne snage po dalekovodu. Režimi prenosa snage dalekovodom su obično takvi da su naponi i struje fazno bliski bilo da se posmatra predajni ili prijemni kraj dalekovoda kao referentni. U tom slučaju umetanje fazora napona koji je normalan na struju povećaće fazni raskorak između napona na predajnom i prijemnom kraju dalekovoda. Povećanje faznog raskoraka manifestuje se kao promena toka aktivne snage po dalekovodu. Ugao fazora umetnutog napona u odnosu na fazor struje dalekovoda malo se razlikuje od 90° zbog gubitaka i zbog dopunjavanja i pražnjenja jednosmernog kondenzatora.

Teorijski, ako bi se injektirao napon koji nije pod uglom od 90° u odnosu na struju dalekovoda, to bi omogućilo da se direktno utiče na tokove aktivne i reaktivne snage, jer bi se pored faznog raskoraka između fazora predajnog i prijemnog napona

menjao i moduo napona na krajevima dalekovoda. Promena modula napona na jednom od krajeva dalekovoda je rezultat promene toka reaktivne snage po dalekovodu. Postavka takvog fazora rednog napona bi značila da se mora uspostaviti trajan tok neke aktivne i reaktivne snage kroz redni transformator, odnosno inverter. Pošto SSSC nema mogućnost preuzimanja aktivne snage na jednosmernoj strani, osim veoma malog iznosa za dopunu kondenzatora, nije moguće istovremeno uticati na tokove aktivne i reaktivne snage po dalekovodu. Naravno, ako bi se obezbedila mogućnost preuzimanja aktivne snage kroz jednosmerno kolo, pomoću SSSC-a bi bilo moguće menjati i tokove reaktivnih snaga.

Formiranje modela SSSC-a za proračun tokova snaga zahteva revidiranje postojećih jednačina za mrežu kao i uvođenje novih jednačina i novih promenljivih stanja [25]. Zamenska šema SSSC uređaja za potrebe proračuna tokova snaga data je na Sl. 2.20. Uređaj SSSC vezan je redno na vod između čvorova k i m . Pre ugradnje SSSC-a čvor k predstavljao je početni kraj dalekovoda. Nakon igradnje SSSC-a njegovu ulogu preuzima čvor m . Čvor m ujedno je i novonastali čvor kao posledica ugradnje SSSC-a. Sprezni redni transformator može se ekvivalentirati realnim naponskim generatorom, odnosno rednom vezom idealnog naponskog izvora napona $\underline{U}_S$ i redne admitanse transformatora $\underline{Y}_S = G_S + jB_S$. Regulisanje toka aktivne snage vrši se tako da zahtevani tok aktivne snage polazi od čvora m . Prijemni kraj dalekovoda vezan je za čvor t i to je jedini čvor incidentan čvoru m . Između njih je admitansa dalekovoda $\underline{Y}_{TL} = G_{TL} + jB_{TL}$.



Sl. 2.20. Zamenska šema SSSC-a u modelu za proračun tokova snaga

Čvorovi k i m mogu se klasifikovati u grupu PQ čvorova pošto na njih mogu biti priključeni potrošači, a na tim sabirnicama nemamo održavanje napona na zadatim vrednostima. Iako se formalno može uvesti i čvor desno od rednog naponskog izvora iz daljeg izlaganja se vidi da za tim nema potrebe. Prisustvo rednog napona u nekoj grani može se tumačiti prosto kao dodavanje ili oduzimanje rednog napona od bilo kojeg od

napona dva sistema sabirnica na koje je ta grana priključena. Prisustvo rednog napona u grani ne narušava topologiju mreže tako da se opet mogu napisati jednačine tokova snaga bazirane na metodi potencijala čvorova. Ako se redni napon dodaje na čvor k , onda će u izrazima figurisati umesto napona sabirnica k , zbir napona tih sabirnica i rednog napona. Na osnovu predloženog modela mogu se napisati jednačine injektiranja za čvorove k i m , kao i jednačina injektiranja rednog generatora:

$$\begin{aligned}\underline{S}_k &= \underline{U}_k \left(\underline{U}_k \underline{Y}_{kk} - \underline{U}_S \underline{Y}_{km} + \underline{U}_m \underline{Y}_{km} + \sum_{i=1, i \neq k, m}^N \underline{U}_i \underline{Y}_{ki} \right)^*; \\ \underline{S}_m &= \underline{U}_m (\underline{U}_m \underline{Y}_{mm} + \underline{U}_k \underline{Y}_{km} + \underline{U}_S \underline{Y}_{km} + \underline{U}_t \underline{Y}_{mt})^*; \\ \underline{S}_S &= \underline{U}_S (\underline{U}_m - \underline{U}_k - \underline{U}_S)^* \underline{Y}_{km}^*.\end{aligned}\quad (2.44)$$

Sređivanjem i razdvajanjem realnih i imaginarnih delova jednačina (2.44) dobijaju se jednačine injektiranja po aktivnim i reaktivnim snagama.

$$\begin{aligned}P_k &= G_{kk} U_k^2 - U_k U_S [G_{km} \cos(\theta_k - \theta_S) + B_{km} \sin(\theta_k - \theta_S)] + \\ &+ U_k U_m [G_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) + B_{km} \sin(\theta_k - \theta_m)] + \\ &+ \sum_{i=1, i \neq k, m}^N U_k U_i [G_{ki} \cos(\theta_k - \theta_i) + B_{ki} \sin(\theta_k - \theta_i)];\end{aligned}\quad (2.45)$$

$$\begin{aligned}Q_k &= -B_{kk} U_k^2 - U_k U_S [G_{km} \sin(\theta_k - \theta_S) - B_{km} \cos(\theta_k - \theta_S)] + \\ &+ U_k U_m [G_{km} \sin(\theta_k - \theta_m) - B_{km} \cos(\theta_k - \theta_m)] + \\ &+ \sum_{i=1, i \neq k, m}^N U_k U_i [G_{ki} \sin(\theta_k - \theta_i) - B_{ki} \cos(\theta_k - \theta_i)];\end{aligned}\quad (2.46)$$

$$\begin{aligned}P_m &= G_{mm} U_m^2 + U_m U_S [G_{km} \cos(\theta_m - \theta_S) + B_{km} \sin(\theta_m - \theta_S)] + \\ &+ U_m U_k [G_{km} \cos(\theta_m - \theta_k) + B_{km} \sin(\theta_m - \theta_k)] + \\ &+ U_m U_i [G_{mt} \cos(\theta_m - \theta_t) + B_{mt} \sin(\theta_m - \theta_t)];\end{aligned}\quad (2.47)$$

$$\begin{aligned}Q_m &= -B_{mm} U_m^2 + U_m U_S [G_{km} \sin(\theta_m - \theta_S) - B_{km} \cos(\theta_m - \theta_S)] + \\ &+ U_m U_k [G_{km} \sin(\theta_m - \theta_k) - B_{km} \cos(\theta_m - \theta_k)] + \\ &+ U_m U_t [G_{mt} \sin(\theta_m - \theta_t) - B_{mt} \cos(\theta_m - \theta_t)];\end{aligned}\quad (2.48)$$

gde su:

m, k – čvorovi (ili skupovi čvorova) na koje je priključen SSSC (odnosno više njih),
 N – ukupan broj čvorova sistema.

Iz jednačine injektiranja snaga za redni napon bitna je samo jednačina koja se odnosi na aktivnu snagu jer za nju postoji zadata vrednost koja je jednaka nuli, pošto je poznato da SSSC ne može preko rednog transformatora da razmenjuje aktivnu snagu.

Prema tome, ako se izdvoji realan deo proizvoda rednog napona i konjugovane struje kroz redni transformator dobija se sledeća jednačina za aktivnu snagu injektiranja rednog generatora:

$$P_S = -G_{km}U_S^2 + U_SU_m[G_{km}\cos(\theta_S - \theta_m) + B_{km}\sin(\theta_S - \theta_m)] - U_SU_k[G_{km}\cos(\theta_S - \theta_k) + B_{km}\sin(\theta_S - \theta_k)] \quad (2.49)$$

Preostaje još jedna jednačina koja se odnosi na tok aktivne snage od početne tačke dalekovoda, a potrebna je, pošto postoji zadata vrednost toka aktivne snage koju treba dostići na kraju proračuna. Do te jednačine može se doći preko struje SSSC-a i napona čvora m :

$$P_k = \Re\{U_m[(U_m - U_k - U_S)Y_{km}]^*\} \\ P_k = G_{km}U_m^2 - U_mU_k[G_{km}\cos(\theta_m - \theta_k) + B_{km}\sin(\theta_m - \theta_k)] - U_mU_S[G_{km}\cos(\theta_m - \theta_S) + B_{km}\sin(\theta_m - \theta_S)] \quad (2.50)$$

Za sve jednačine (2.45)-(2.50) Y_{kk} i Y_{mm} su sopstvene admitanse koje se vide iz čvorova k i m respektivno, dok je $Y_{km} = -Y_S$ i $Y_{mt} = -Y_{TL}$. Potrebno je reći da je sopstvena admitansa čvora k modifikovana pošto sada u zbir admitansi svih grana koje se susište u taj čvor ulazi i admitansa rednog sprežnog transformatora.

Jednačine (2.45)-(2.50) predstavljaju zatvoren sistem jednačina za modelovanje SSSC uređaja. Sve pomenute jednačine date su u matričnoj formi sledećim izrazom:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta P_m \\ \Delta P_{km} \\ \Delta P_S \\ \Delta Q_k \\ \Delta Q_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_S} & \frac{\partial P_k}{\partial U_S} & \frac{\partial P_k}{\partial U_k} & \frac{\partial P_k}{\partial U_m} \\ \frac{\partial P_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_S} & \frac{\partial P_m}{\partial U_S} & \frac{\partial P_m}{\partial U_k} & \frac{\partial P_m}{\partial U_m} \\ \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_S} & \frac{\partial P_{km}}{\partial U_S} & \frac{\partial P_{km}}{\partial U_k} & \frac{\partial P_{km}}{\partial U_m} \\ \frac{\partial P_S}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_S}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_S}{\partial \theta_S} & \frac{\partial P_S}{\partial U_S} & \frac{\partial P_S}{\partial U_k} & \frac{\partial P_S}{\partial U_m} \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_S} & \frac{\partial Q_k}{\partial U_S} & \frac{\partial Q_k}{\partial U_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial U_m} \\ \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_S} & \frac{\partial Q_m}{\partial U_S} & \frac{\partial Q_m}{\partial U_k} & \frac{\partial Q_m}{\partial U_m} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \theta_k \\ \Delta \theta_m \\ \Delta \theta_S \\ \Delta U_S \\ \Delta U_k \\ \Delta U_m \end{bmatrix} \quad (2.51)$$

Za proračun promenljivih stanja može se formirati iterativna šema data sledećim izrazom:

$$\begin{bmatrix} \theta_k \\ \theta_m \\ \theta_S \\ U_S \\ U_k \\ U_m \end{bmatrix}^{(n+1)} = \begin{bmatrix} \theta_k \\ \theta_m \\ \theta_S \\ U_S \\ U_k \\ U_m \end{bmatrix}^{(n)} + \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_S} & \frac{\partial P_k}{\partial U_S} & \frac{\partial P_k}{\partial U_k} & \frac{\partial P_k}{\partial U_m} \\ \frac{\partial P_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_S} & \frac{\partial P_m}{\partial U_S} & \frac{\partial P_m}{\partial U_k} & \frac{\partial P_m}{\partial U_m} \\ \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_S} & \frac{\partial P_{km}}{\partial U_S} & \frac{\partial P_{km}}{\partial U_k} & \frac{\partial P_{km}}{\partial U_m} \\ \frac{\partial P_S}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_S}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_S}{\partial \theta_S} & \frac{\partial P_S}{\partial U_S} & \frac{\partial P_S}{\partial U_k} & \frac{\partial P_S}{\partial U_m} \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_S} & \frac{\partial Q_k}{\partial U_S} & \frac{\partial Q_k}{\partial U_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial U_m} \\ \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_S} & \frac{\partial Q_m}{\partial U_S} & \frac{\partial Q_m}{\partial U_k} & \frac{\partial Q_m}{\partial U_m} \\ \frac{\partial \theta_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial \theta_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial \theta_k}{\partial \theta_S} & \frac{\partial \theta_k}{\partial U_S} & \frac{\partial \theta_k}{\partial U_k} & \frac{\partial \theta_k}{\partial U_m} \\ \frac{\partial \theta_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial \theta_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial \theta_m}{\partial \theta_S} & \frac{\partial \theta_m}{\partial U_S} & \frac{\partial \theta_m}{\partial U_k} & \frac{\partial \theta_m}{\partial U_m} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta P_m \\ \Delta P_{km} \\ \Delta P_S \\ \Delta Q_k \\ \Delta Q_m \end{bmatrix}^{(n)} \quad (2.52)$$

Jednačine (2.51) i (2.52) su samo deo sistema jednačina za celu mrežu. Nove promenljive stanja koje se računaju su moduo i ugao novog čvora m i moduo i ugao injektiranog napona $\underline{U}_S$. U odnosu na sistem jednačina modela mreže bez SSSC-a, za svaki priključeni SSSC sistem se proširuje za još četiri jednačine, dok se jednačine injektiranja za postojeći čvor k modifikuju zbog promene topologije usled priključenja uređaja. Na Sl. 2.21 prikazano je proširenje Jakobijevе matrice usled dodavanja SSSC uređaja.

		Promenljive stanja za novi čvor m				Promenljive stanja za redni transformator			
		$\theta_i \dots$	$U_j \dots$	θ_k	U_k	θ_m	U_m	θ_S	U_S
Injektiranja u postojeće čvorove mreže	P_i	$\left[\frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} \right]$	$\left[\frac{\partial P_i}{\partial U_j} \right]$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
	$\vdots$								
	Q_j	$\left[\frac{\partial Q_j}{\partial \theta_i} \right]$	$\left[\frac{\partial Q_j}{\partial U_j} \right]$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
	$\vdots$								
Injektiranja u postojeći čvor k na koji je priključen SSSC	P_k	...	...	Jakobijeva matrica iz jednačine (2.51) presložena prema datom redosledu promenljivih stanja i snaga injektiranja					
	Q_k	...	...						
Injektiranja u novi čvor m na koji je priključen SSSC	P_m	...	...						
	Q_m	...	...						
Injektiranje aktivne snage rednog transformatora	P_S	...	...						
Zahtevani tok aktivne snage od čvora k do čvora m	P_{km}	...	...						

Sl. 2.21. Proširenje Jakobijevе matrice ugradnjom SSSC-a
u postojeći čvor k i novi umetnuti čvor m

Proširenje Jakobijeve matrice se odnosi na samo jedan SSSC uređaj, mada se indeksi čvorova mogu tumačiti i kao skupovi čvorova na koji su priključeni SSSC uređaji. Bitno je napomenuti da je broj dodatnih jednačina za koje treba proširiti sistem četiri puta veći od broja ugrađenih SSSC uređaja.

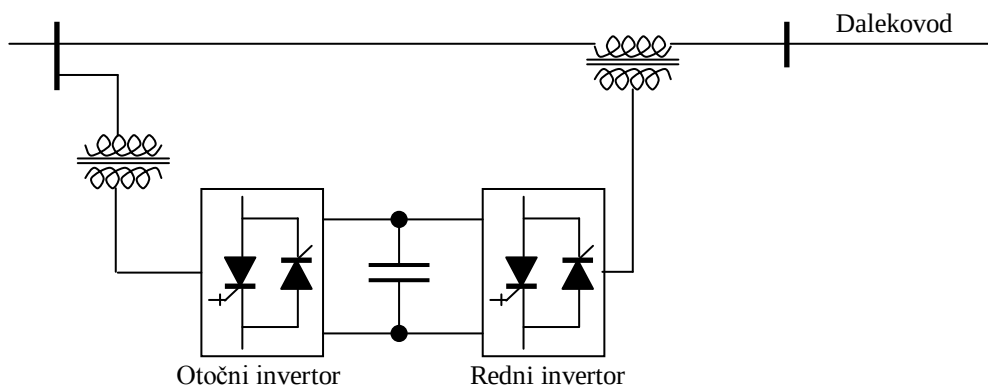
2.6. Objedinjeni regulator tokova snaga (Unified Power Flow Controller - UPFC)

Uvođenje konvertorske tehnike u razvoj FACTS uređaja omogućilo je veoma fleksibilnu kompenzaciju, bilo da se radi o rednoj ili otočnoj kompenzaciji. Dva uređaja veoma slična po sastavu su se izdvojila kao osnovni FACTS uređaji: STATCOM za otočnu kompenzaciju i SSSC za rednu kompenzaciju. Pored toga što svaki od ovih uređaja može da radi samostalno, ista priroda jednosmernih kola omogućila je njihovo sprezanje.

Dalji razvoj FACTS uređaja kretao se u smeru nalaženja uređaja koji bi u potpunosti bio nezavisan od prilika u mreži, a koji bi sa druge strane bio sposoban da upravlja svim bitnim električnim veličinama. U tu svrhu iskorištena je ideja jednog uređaja starije generacije, transformatora za pomeranje faze (*Phase-shift transformer*). Ovaj uređaj u osnovi je mehanički uređaj čija je osnovna namena bila upravljanje tokom aktivne snage po prenosnom vodu na koji je priključen. Upravljanje tokom aktivne snage vrši se kontrolom ugaonog pomeraja između predajnog i prijemnog kraja na vodu. U osnovi, transformator za pomeranje faze sastoji se od jednog pobudnog transformatora koji se vezuje otočno na predajni kraj dalekovoda i rednog transformatora koji se vezuje na početku dalekovoda iza pobudnog transformatora. Upravljanje faznim raskorakom napona na krajevima voda vrši se injektiranjem napona rednog transformatora. Klasična transformacija napona putem elektromagnetske indukcije može se zameniti transformacijom napona pomoću ispravljačko invertorske sprege (*Back to Back*). Otočni kompenzator STATCOM može zameniti pobudni transformator, dok se SSSC pomoću spreznog transformatora vezuje redno na dalekovod. Iako se on može vezati bilo gde na vodu, praksa je da to bude u fizičkoj

bizini STATCOM-a. Pošto i STATCOM i SSSC imaju invertore potrebno je samo izvršiti njihovo sprezanje preko jednosmernih kola.

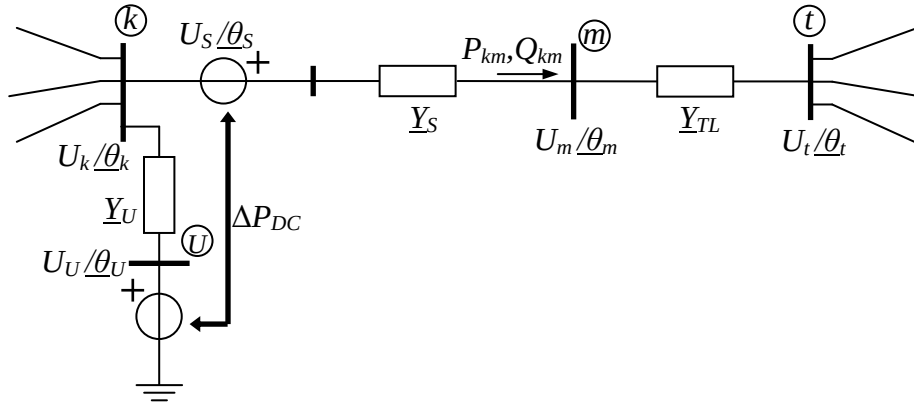
Ovakva sprega omogućila je SSSC-u da zadrži mogućnost upravljanja tokovima snaga po vodu na koji je priključen. Takođe, STATCOM-u koji je priključen na predajni kraj dalekovoda nije uskraćena mogućnost reaktivne kompenzacije tog čvora. Pošto je spregom ova dva uređaja objedinjeno upravljanje svim električnim veličinama koje se tiču jednog dalekovoda ovaj novi uređaj je nazvan objedinjeni regulator tokova snaga ili UPFC (*Unified Power Flow Controler*). Jednopolna šema UPFC-a data je na Sl. 2.22.



Sl. 2.22. Opšta jednofazna šema UPFC uređaja

Modelovanje UPFC-a za proračune tokova snaga vrši se po istom principu kao i za sve prethodno opisane FACTS uređaje [25,27]. Pošto UPFC uređaj predstavlja spregu STATCOM-a i SSSC-a, kod modelovanja korišćena je ista logika kao i za ta dva uređaja ali uz uvažavanje dodatnih uslova koje nameće UPFC uređaj.

Zamenska šema UPFC-a u modelu za proračun tokova snaga data je na Sl. 2.23. Uređaj UPFC rednim kolom priključen je na početak dalekovoda, a otočnom granom na početni čvor dalekovoda. Zbog umetanja rednog transformatora UPFC-a početni kraj dalekovoda nije više u čvoru k nego u novom čvoru m . Redni transformator koje se sada nalazi između čvorova k i m modeluje se preko idealnog naponskog izvora i admitanse $\underline{Y}_S$. Otočno na čvor k priključen je drugi idealni naponski izvor, koji odgovara STATCOM-u, preko admitanse $\underline{Y}_U$ drugog spreznog transformatora.



Sl. 2.23. Zamenska šema UPFC-a u modelu za proračun tokova snaga

Čvor m je novi početni čvor dalekovoda koji je modelovan admitansom $\underline{Y}_{TL}$, dok je na kraju dalekovoda čvor t koji je dalje povezan sa proizvoljnim brojem čvorova. Novi čvorovi kojima se proširuje model su čvorovi U i m koji se mogu klasifikovati kao PQ čvorovi. Prema logici primenjenoj kod modelovanja STATCOM-a, čvor k svrstava se u PQU čvorove pošto je taj čvor naponski regulisan. U slučaju da struja otočne grane pređe zadatu maksimalnu vrednost, onda i čvor k postaje PQ čvor. Na osnovu zamenske šeme sa Sl. 2.23 mogu se napisati jednačine injektiranja za sve čvorove:

$$\begin{aligned}
 P_k = & G_{kk}U_k^2 - U_kU_S[G_{km}\cos(\theta_k - \theta_S) + B_{km}\sin(\theta_k - \theta_S)] + \\
 & + U_kU_m[G_{km}\cos(\theta_k - \theta_m) + B_{km}\sin(\theta_k - \theta_m)] + \\
 & + U_kU_U[G_{kU}\cos(\theta_k - \theta_U) + B_{kU}\sin(\theta_k - \theta_U)] + \\
 & + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k, m, U}}^N U_kU_i[G_{ki}\cos(\theta_k - \theta_i) + B_{ki}\sin(\theta_k - \theta_i)];
 \end{aligned} \tag{2.53}$$

$$\begin{aligned}
 Q_k = & -B_{kk}U_k^2 - U_kU_S[G_{km}\sin(\theta_k - \theta_S) - B_{km}\cos(\theta_k - \theta_S)] + \\
 & + U_kU_m[G_{km}\sin(\theta_k - \theta_m) - B_{km}\cos(\theta_k - \theta_m)] + \\
 & + U_kU_U[G_{kU}\sin(\theta_k - \theta_U) - B_{kU}\cos(\theta_k - \theta_U)] + \\
 & + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k, m, U}}^N U_kU_i[G_{ki}\sin(\theta_k - \theta_i) - B_{ki}\cos(\theta_k - \theta_i)];
 \end{aligned} \tag{2.54}$$

$$\begin{aligned}
 P_m = & G_{mm}U_m^2 + U_mU_S[G_{km}\cos(\theta_m - \theta_S) + B_{km}\sin(\theta_m - \theta_S)] + \\
 & + U_mU_k[G_{km}\cos(\theta_m - \theta_k) + B_{km}\sin(\theta_m - \theta_k)] + \\
 & + U_mU_t[G_{mt}\cos(\theta_m - \theta_t) + B_{mt}\sin(\theta_m - \theta_t)];
 \end{aligned} \tag{2.55}$$

$$\begin{aligned}
 Q_m = & -B_{mm}U_m^2 + U_mU_S[G_{km}\sin(\theta_m - \theta_S) - B_{km}\cos(\theta_m - \theta_S)] + \\
 & + U_mU_k[G_{km}\sin(\theta_m - \theta_k) - B_{km}\cos(\theta_m - \theta_k)] + \\
 & + U_mU_t[G_{mt}\sin(\theta_m - \theta_t) - B_{mt}\cos(\theta_m - \theta_t)];
 \end{aligned} \tag{2.56}$$

gde su:

m, k – čvorovi (ili skupovi čvorova) na koje je priključen UPFC (odnosno više njih),
 N – ukupan broj čvorova sistema.

Što se tiče otočne grane, u model se uključuju jednačine i po aktivnom i po reaktivnom injektiranju. Aktivno injektiranje se vezuje za tok snage kroz jednosmerno kolo STATCOM-a, a reaktivno injektiranje je bitno zbog održavanja napona u čvoru k . Te dve jednačine date su sledećim izrazima:

$$\begin{aligned}
 P_U &= G_{UU}U_U^2 + U_UU_k[G_{kU}\cos(\theta_U - \theta_k) + B_{kU}\sin(\theta_U - \theta_k)]; \\
 Q_U &= -B_{UU}U_U^2 + U_UU_k[G_{kU}\sin(\theta_U - \theta_k) - B_{kU}\cos(\theta_U - \theta_k)];
 \end{aligned} \tag{2.57}$$

Redna grana UPFC-a injektira i aktivnu i reaktivnu snagu, međutim, zbog bilansa snaga kroz jednosmerno kolo koje spreže SSSC i STATCOM, uvodi se samo jednačina za aktivnu snagu:

$$\begin{aligned}
 P_S = & -G_{km}U_S^2 - U_SU_k[G_{km}\cos(\theta_S - \theta_k) + B_{km}\sin(\theta_S - \theta_k)] + \\
 & + U_SU_m[G_{km}\cos(\theta_S - \theta_m) + B_{km}\sin(\theta_S - \theta_m)];
 \end{aligned} \tag{2.58}$$

Ako se pretpostavi da UPFC upravlja tokovima aktivne i reaktivne snage, potrebno je u model uneti i ove jednačine da bi se proračunom dostigle zadate vrednosti. Ove snage se računaju na osnovu napona čvora m i struje kroz rednu granu UPFC-a.

$$\begin{aligned}
 \underline{S}_{km} &= \underline{U}_m[(\underline{U}_m - \underline{U}_k - \underline{U}_S)\underline{Y}_{km}]^*; \\
 P_{km} &= G_{km}U_m^2 - U_mU_k[G_{km}\cos(\theta_m - \theta_k) + B_{km}\sin(\theta_m - \theta_k)] - \\
 & - U_mU_S[G_{km}\cos(\theta_m - \theta_S) + B_{km}\sin(\theta_m - \theta_S)]; \\
 Q_{km} &= -B_{km}U_m^2 - U_mU_k[G_{km}\sin(\theta_m - \theta_k) - B_{km}\cos(\theta_m - \theta_k)] - \\
 & - U_mU_S[G_{km}\sin(\theta_m - \theta_S) - B_{km}\cos(\theta_m - \theta_S)];
 \end{aligned} \tag{2.59}$$

Poslednja jednačina koju treba uneti u model je jednačina bilansa aktivne snage za jednosmerno kolo. Bez obzira na smer toka snage, aktivna snaga jednosmernog kola STATCOM-a jednaka je aktivnoj snazi jednosmernog kola SSSC-a ako se zanemare gubici. To se može opisati sledećom jednačinom:

$$\Delta P_{DC} = P_U - P_S = 0. \tag{2.60}$$

U prethodno navedenim izrazima važi da je $\underline{Y}_{km} = -\underline{Y}_S$, $\underline{Y}_{kU} = -\underline{Y}_U$ i $\underline{Y}_{mt} = -\underline{Y}_{TL}$.

Za određivanje nepoznatih promenljivih stanja može se formirati iterativna šema data jednačinom (2.61). Ova jednačina se odnosi na radni režim u kojem su tokovi snaga i predajni napon kontrolisane veličine.

$$\begin{bmatrix} \theta_k \\ \theta_m \\ \theta_U \\ \theta_S \\ U_m \\ U_U \\ U_S \end{bmatrix}^{(n+1)} = \begin{bmatrix} \theta_k \\ \theta_m \\ \theta_U \\ \theta_S \\ U_m \\ U_U \\ U_S \end{bmatrix}^{(n)} + \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_U} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_S} & \frac{\partial P_k}{\partial U_m} & \frac{\partial P_k}{\partial U_U} & \frac{\partial P_k}{\partial U_S} \\ \frac{\partial P_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_m} & 0 & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_S} & \frac{\partial P_m}{\partial U_m} & 0 & \frac{\partial P_m}{\partial U_S} \\ \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_m} & 0 & \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_S} & \frac{\partial P_{km}}{\partial U_m} & 0 & \frac{\partial P_{km}}{\partial U_S} \\ \frac{\partial P_{DC}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_{DC}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_{DC}}{\partial \theta_U} & \frac{\partial P_{DC}}{\partial \theta_S} & \frac{\partial P_{DC}}{\partial U_m} & \frac{\partial P_{DC}}{\partial U_U} & \frac{\partial P_{DC}}{\partial U_S} \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_U} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_S} & \frac{\partial Q_k}{\partial U_m} & \frac{\partial Q_k}{\partial U_U} & \frac{\partial Q_k}{\partial U_S} \\ \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_m} & 0 & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_S} & \frac{\partial Q_m}{\partial U_m} & 0 & \frac{\partial Q_m}{\partial U_S} \\ \frac{\partial Q_{km}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_{km}}{\partial \theta_m} & 0 & \frac{\partial Q_{km}}{\partial \theta_S} & \frac{\partial Q_{km}}{\partial U_m} & 0 & \frac{\partial Q_{km}}{\partial U_S} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta P_m \\ \Delta P_{km} \\ \Delta P_{DC} \\ \Delta Q_k \\ \Delta Q_m \\ \Delta Q_{km} \end{bmatrix}^{(n)} \quad (2.61)$$

Nakon svake iteracije potrebno je proveravati ograničenja po struji za otočnu granu i ograničenja po naponu za čvor m . U slučaju da dođe do prekoračenja maksimalno dozvoljne struje otočne grane, čvor k prestaje da bude PQU čvor, a na čvoru U zadržava se maksimalno injektiranje struje STATCOM-a. Na kraju svake iteracije potrebno je proračunati novo injektiranje reaktivne snage pomoću napona čvora U i maksimalne struje STATCOM-a koja je u kvadraturi sa tim naponom, prema izrazu (2.62). Injektirana reaktivna snaga treba da ima isti smer koji je imala struja STATCOM-a u trenutku kada je u proračunu dostignuto ograničenje po maksimalnoj struji.

$$Q_U^{novo} = U_U I_{\max}. \quad (2.62)$$

U ovom slučaju iterativna jednačina (2.63) proširena je za još jednu jednačinu u odnosu na iterativnu jednačinu (2.61). U slučaju naponskog prekoračenja u čvoru m , ograničava se dalje upravljanje rednim naponom što se manifestuje kao zamrzavanje tokova snaga na zatečenoj vrednosti.

Upravljanje naponom u čvoru u kom je priključena otočna grana UPFC-a kao i upravljanje tokovima aktivne i reaktivne snage po vodu na koji je on priključen

predstavlja osnovni kontrolni režim UPFC uređaja. Međutim, to nije i jedini kontrolni radni režim u kome UPFC može da radi. Zbog svojih naprednih mogućnosti, odnosno objedinjenih karakteristika klasičnih elemenata EES-a (regulacioni transformator, redna kompenzacija, transformatori za pomeranje faze) UPFC može da vrši pojednačno upravljanje kako modulom tako i faznim stavom napona. U daljem tekstu biće opisani modeli za proračun tokova snaga u slučajevima kada UPFC radi u režimima regulacije modula napona predajnog kraja dalekovoda, redne kompenzacije na predajnom kraju dalekovoda, i faznog pomeranja ugla napona predajnog kraja dalekovoda. Za sve pomenute režime koristiće se zamenska šema sa Sl. 2.23 pa sva objašnjenja i jednačine koje slede odnosiće se na tu šemu.

$$\begin{bmatrix} \theta_k \\ \theta_m \\ \theta_U \\ \theta_S \\ U_k \\ U_m \\ U_U \\ U_S \end{bmatrix}^{(n+1)} = \begin{bmatrix} \theta_k \\ \theta_m \\ \theta_U \\ \theta_S \\ U_k \\ U_m \\ U_U \\ U_S \end{bmatrix}^{(n)} + \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_U} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_S} & \frac{\partial P_k}{\partial U_k} & \frac{\partial P_k}{\partial U_m} & \frac{\partial P_k}{\partial U_U} & \frac{\partial P_k}{\partial U_S} \\ \frac{\partial P_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_m} & 0 & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_S} & \frac{\partial P_m}{\partial U_k} & \frac{\partial P_m}{\partial U_m} & \frac{\partial P_m}{\partial U_U} & \frac{\partial P_m}{\partial U_S} \\ \frac{\partial \theta_k}{\partial P_{km}} & \frac{\partial \theta_m}{\partial P_{km}} & 0 & \frac{\partial \theta_S}{\partial P_{km}} & \frac{\partial U_k}{\partial P_{km}} & \frac{\partial U_m}{\partial P_{km}} & \frac{\partial U_U}{\partial P_{km}} & \frac{\partial U_S}{\partial P_{km}} \\ \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_m} & 0 & \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_S} & \frac{\partial P_{km}}{\partial U_k} & \frac{\partial P_{km}}{\partial U_m} & \frac{\partial P_{km}}{\partial U_U} & \frac{\partial P_{km}}{\partial U_S} \\ \frac{\partial \theta_k}{\partial P_{DC}} & \frac{\partial \theta_m}{\partial P_{DC}} & \frac{\partial \theta_U}{\partial P_{DC}} & \frac{\partial \theta_S}{\partial P_{DC}} & \frac{\partial U_k}{\partial P_{DC}} & \frac{\partial U_m}{\partial P_{DC}} & \frac{\partial U_U}{\partial P_{DC}} & \frac{\partial U_S}{\partial P_{DC}} \\ \frac{\partial P_{DC}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_{DC}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_{DC}}{\partial \theta_U} & \frac{\partial P_{DC}}{\partial \theta_S} & \frac{\partial P_{DC}}{\partial U_k} & \frac{\partial P_{DC}}{\partial U_m} & \frac{\partial P_{DC}}{\partial U_U} & \frac{\partial P_{DC}}{\partial U_S} \\ \frac{\partial \theta_k}{\partial Q_k} & \frac{\partial \theta_m}{\partial Q_k} & \frac{\partial \theta_U}{\partial Q_k} & \frac{\partial \theta_S}{\partial Q_k} & \frac{\partial U_k}{\partial Q_k} & \frac{\partial U_m}{\partial Q_k} & \frac{\partial U_U}{\partial Q_k} & \frac{\partial U_S}{\partial Q_k} \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_U} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_S} & \frac{\partial Q_k}{\partial U_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial U_m} & \frac{\partial Q_k}{\partial U_U} & \frac{\partial Q_k}{\partial U_S} \\ \frac{\partial \theta_k}{\partial Q_m} & \frac{\partial \theta_m}{\partial Q_m} & 0 & \frac{\partial \theta_S}{\partial Q_m} & \frac{\partial U_k}{\partial Q_m} & \frac{\partial U_m}{\partial Q_m} & \frac{\partial U_U}{\partial Q_m} & \frac{\partial U_S}{\partial Q_m} \\ \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_m} & 0 & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_S} & \frac{\partial Q_m}{\partial U_k} & \frac{\partial Q_m}{\partial U_m} & \frac{\partial Q_m}{\partial U_U} & \frac{\partial Q_m}{\partial U_S} \\ \frac{\partial \theta_k}{\partial Q_{km}} & \frac{\partial \theta_m}{\partial Q_{km}} & 0 & \frac{\partial \theta_S}{\partial Q_{km}} & \frac{\partial U_k}{\partial Q_{km}} & \frac{\partial U_m}{\partial Q_{km}} & \frac{\partial U_U}{\partial Q_{km}} & \frac{\partial U_S}{\partial Q_{km}} \\ \frac{\partial Q_{km}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_{km}}{\partial \theta_m} & 0 & \frac{\partial Q_{km}}{\partial \theta_S} & \frac{\partial Q_{km}}{\partial U_k} & \frac{\partial Q_{km}}{\partial U_m} & \frac{\partial Q_{km}}{\partial U_U} & \frac{\partial Q_{km}}{\partial U_S} \\ \frac{\partial \theta_k}{\partial Q_U} & 0 & \frac{\partial \theta_U}{\partial Q_U} & 0 & \frac{\partial U_k}{\partial Q_U} & 0 & \frac{\partial U_U}{\partial Q_U} & 0 \\ \frac{\partial Q_U}{\partial \theta_k} & 0 & \frac{\partial Q_U}{\partial \theta_U} & 0 & \frac{\partial Q_U}{\partial U_k} & 0 & \frac{\partial Q_U}{\partial U_U} & 0 \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta P_m \\ \Delta P_{km} \\ \Delta P_{DC} \\ \Delta Q_k \\ \Delta Q_m \\ \Delta Q_{km} \\ \Delta Q_U \end{bmatrix}^{(n)} \quad (2.63)$$

Regulacija modula napona, koja se inače vrši pomoću regulacionih transformatora, može se vršiti i pomoću UPFC-a tako što će se na napon čvora k dodati redni napon $\underline{U}_S$ takav da napon u čvoru m bude u fazi sa naponom u čvoru k ali veći ili manji po modulu. Napon u čvoru m (predajni kraj dalekovoda) postaje unapred određen, tako da pored čvora k , koji je PQU tipa zbog rada STATCOM-a, čvor m takođe postaje čvor PQU tipa. Fazni stavovi oba napona su izjednačeni tako da se dve zavisne promenljive veličine U_m i θ_m eliminišu iz sistema jednačina pošto su unapred poznate. U modelu za proračun tokova snaga, za ovaj slučaj, jednačine (2.55)-(2.58) i (2.60) su iste s tim da je potrebno uneti modifikaciju da je $\theta_m = \theta_k$. Jednačina za tok aktivne snage kroz jednosmerno kolo UPFC-a neophodna je pošto i u ovom radnom režimu postoji tok aktivne snage kroz njega. Cilj ovog radnog režima UPFC-a nije upravljanje

tokovima snaga, pa se jednačine (2.59) izostavljaju. Izabrane jednačine formiraju sistem iz koga se može izvesti iterativna jednačina za proračun tokova snaga za radni režim u kome UPFC vrši regulaciju modula napona predajnog napona dalekovoda. Ova iterativna šema data je jednačinom (2.64). U ovoj jednačini moduli napona U_k i U_m su poznate veličine, a važi da je $\theta_k = \theta_m$.

$$\begin{bmatrix} \theta_k \\ \theta_U \\ \theta_S \\ U_U \\ U_S \end{bmatrix}^{(n+1)} = \begin{bmatrix} \theta_k \\ \theta_U \\ \theta_S \\ U_U \\ U_S \end{bmatrix}^{(n)} + \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_U} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_S} & \frac{\partial P_k}{\partial U_U} & \frac{\partial P_k}{\partial U_S} \\ \frac{\partial P_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_U} & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_S} & \frac{\partial P_m}{\partial U_U} & \frac{\partial P_m}{\partial U_S} \\ \frac{\partial P_{DC}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_{DC}}{\partial \theta_U} & \frac{\partial P_{DC}}{\partial \theta_S} & \frac{\partial P_{DC}}{\partial U_U} & \frac{\partial P_{DC}}{\partial U_S} \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_U} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_S} & \frac{\partial Q_k}{\partial U_U} & \frac{\partial Q_k}{\partial U_S} \\ \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_U} & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_S} & \frac{\partial Q_m}{\partial U_U} & \frac{\partial Q_m}{\partial U_S} \\ \frac{\partial \theta_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial \theta_k}{\partial \theta_U} & \frac{\partial \theta_k}{\partial \theta_S} & \frac{\partial \theta_k}{\partial U_U} & \frac{\partial \theta_k}{\partial U_S} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta P_m \\ \Delta P_{DC} \\ \Delta Q_k \\ \Delta Q_m \end{bmatrix}^{(n)} \quad (2.64)$$

U slučaju dostizanja maksimalne struje STATCOM-a unutar UPFC-a, modifikacija jednačine (2.64) vrši se na isti način kao i modifikacija jednačine (2.61) u jednačinu (2.63). U slučaju nemogućnosti postizanja zahtevanog napona U_m zbog ograničenja rednog napona U_S ili sistemskog ograničenja po minimalnom i maksimalnom naponu u mreži, čvor m prestaje da bude PQU čvor i postaje čvor PQ tipa. U tom slučaju moduo rednog napona se zadržava na svojoj graničnoj vrednosti (bilo da je ona maksimalna ili minimalna) ili na poslednjoj proračunatoj vrednosti. Iterativna jednačina za ovaj slučaj koji obuhvata dostizanje ograničenja i kod redne i kod otočne grane ima sledeći oblik:

$$\begin{bmatrix} \theta_k \\ \theta_U \\ \theta_S \\ U_k \\ U_m \\ U_U \end{bmatrix}^{(n+1)} = \begin{bmatrix} \theta_k \\ \theta_U \\ \theta_S \\ U_k \\ U_m \\ U_U \end{bmatrix}^{(n)} + \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_U} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_S} & \frac{\partial P_k}{\partial U_k} & \frac{\partial P_k}{\partial U_m} & \frac{\partial P_k}{\partial U_U} \\ \frac{\partial P_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_U} & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_S} & \frac{\partial P_m}{\partial U_k} & \frac{\partial P_m}{\partial U_m} & \frac{\partial P_m}{\partial U_U} \\ \frac{\partial P_{DC}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_{DC}}{\partial \theta_U} & \frac{\partial P_{DC}}{\partial \theta_S} & \frac{\partial P_{DC}}{\partial U_k} & \frac{\partial P_{DC}}{\partial U_m} & \frac{\partial P_{DC}}{\partial U_U} \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_U} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_S} & \frac{\partial Q_k}{\partial U_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial U_m} & \frac{\partial Q_k}{\partial U_U} \\ \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_U} & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_S} & \frac{\partial Q_m}{\partial U_k} & \frac{\partial Q_m}{\partial U_m} & \frac{\partial Q_m}{\partial U_U} \\ \frac{\partial \theta_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial \theta_k}{\partial \theta_U} & \frac{\partial \theta_k}{\partial \theta_S} & \frac{\partial \theta_k}{\partial U_k} & \frac{\partial \theta_k}{\partial U_m} & \frac{\partial \theta_k}{\partial U_U} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta P_m \\ \Delta P_{DC} \\ \Delta Q_k \\ \Delta Q_m \\ \Delta Q_U \end{bmatrix}^{(n)} \quad (2.65)$$

Kompenzacija pomoću UPFC-a umetanjem napona pod pravim uglom u odnosu na struju dalekovoda je funkcija koju inače vrši SSSC uređaj. Pošto je SSSC sastavni deo UPFC-a, fizički je potrebno rastaviti jednosmerno kolo unutar UPFC-a čime je onemogućen tok aktivne snage kroz njega, odnosno onemogućeno je injektiranje rednog napona koji je u fazi sa strujom dalekovoda. Sve jednačine tokova snaga koje važe pojedinačno za STATCOM i SSSC u ovom režimu rada se ponavljaju.

Režim pomeranja faze napona predajnog kraja dalekovoda (čvor m sa Sl. 2.23) u odnosu na napon čvora k predstavlja treći radni režim u kome UPFC funkcioniše kao *phase-shift* transformator sa kontinualnom promenom faze. Moduli napona čvorova m i k trebali bi biti jednaki, a razlika faznih stavova ovih napona treba da bude određeni ugao σ koji izaziva zahtevani tok snage po dalekovodu. Pošto ugao između napona nije fizička veličina sa kojom se u praksi manipuliše, prirodnije je u sistem jednačina koje opisuju ovaj režim rada uvrstiti jednačinu za zahtevani tok aktivne snage po dalekovodu (jednačina 2.59). Sistem jednačina za ovaj režim formira se pomoću jednačina (2.55)-(2.60) uz uslov da je $U_k = U_m$. Pošto se zbog rada STACOM-a čvor k posmatra kao PQU čvor, zbog uslova jednakosti modula napona, čvor m takođe postaje PQU čvor. Iterativna jednačina za radni režim pomeranja faze napona predajnog kraja dalekovoda data je izrazom (2.66). U ovoj jednačini moduli napona U_k i U_m su poznate i međusobno jednake veličine.

$$\begin{bmatrix} \theta_k \\ \theta_m \\ \theta_S \\ \theta_U \\ U_S \\ U_U \end{bmatrix}^{(n+1)} = \begin{bmatrix} \theta_k \\ \theta_m \\ \theta_S \\ \theta_U \\ U_S \\ U_U \end{bmatrix}^{(n)} + \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_S} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_U} & \frac{\partial P_k}{\partial U_S} & \frac{\partial P_k}{\partial U_U} \\ \frac{\partial P_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_S} & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_U} & \frac{\partial P_m}{\partial U_S} & \frac{\partial P_m}{\partial U_U} \\ \frac{\partial P_{DC}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_{DC}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_{DC}}{\partial \theta_S} & \frac{\partial P_{DC}}{\partial \theta_U} & \frac{\partial P_{DC}}{\partial U_S} & \frac{\partial P_{DC}}{\partial U_U} \\ \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_S} & \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_U} & \frac{\partial P_{km}}{\partial U_S} & \frac{\partial P_{km}}{\partial U_U} \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_S} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_U} & \frac{\partial Q_k}{\partial U_S} & \frac{\partial Q_k}{\partial U_U} \\ \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_S} & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_U} & \frac{\partial Q_m}{\partial U_S} & \frac{\partial Q_m}{\partial U_U} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta P_m \\ \Delta P_{DC} \\ \Delta P_{km} \\ \Delta Q_k \\ \Delta Q_m \end{bmatrix}^{(n)} \quad (2.66)$$

Dostizanje maksimalne struje STATCOM-a će transformisati čvor k iz PQU tipa u čvor PQ tipa, ali pošto je uslov da napon čvora m bude unapred određen, ovaj čvor ostaje PQU tipa. Kao i za prethodne radne režime iteativna jednačina se modifikuje

dodatnom jednačinom injektirana aktivne snage u čvor U . Ova iterativna šema data je jednačinom (2.67).

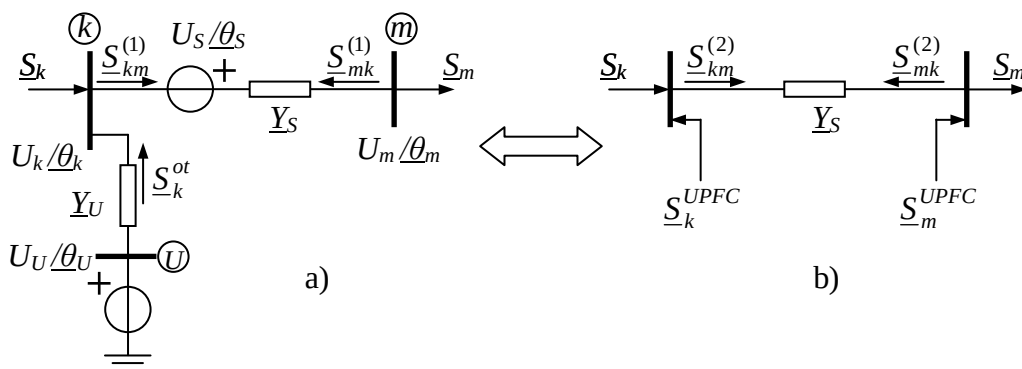
$$\begin{bmatrix} \theta_k \\ \theta_m \\ \theta_S \\ \theta_U \\ U_k \\ U_S \\ U_U \end{bmatrix}^{(n+1)} = \begin{bmatrix} \theta_k \\ \theta_m \\ \theta_S \\ \theta_U \\ U_k \\ U_S \\ U_U \end{bmatrix}^{(n)} + \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_S} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_U} & \frac{\partial P_k}{\partial U_k} & \frac{\partial P_k}{\partial U_S} & \frac{\partial P_k}{\partial U_U} \\ \frac{\partial P_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_S} & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_U} & \frac{\partial P_m}{\partial U_k} & \frac{\partial P_m}{\partial U_S} & \frac{\partial P_m}{\partial U_U} \\ \frac{\partial P_{DC}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_{DC}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_{DC}}{\partial \theta_S} & \frac{\partial P_{DC}}{\partial \theta_U} & \frac{\partial P_{DC}}{\partial U_k} & \frac{\partial P_{DC}}{\partial U_S} & \frac{\partial P_{DC}}{\partial U_U} \\ \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_S} & \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_U} & \frac{\partial P_{km}}{\partial U_k} & \frac{\partial P_{km}}{\partial U_S} & \frac{\partial P_{km}}{\partial U_U} \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_S} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_U} & \frac{\partial Q_k}{\partial U_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial U_S} & \frac{\partial Q_k}{\partial U_U} \\ \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_S} & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_U} & \frac{\partial Q_m}{\partial U_k} & \frac{\partial Q_m}{\partial U_S} & \frac{\partial Q_m}{\partial U_U} \\ \frac{\partial Q_U}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_U}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_U}{\partial \theta_S} & \frac{\partial Q_U}{\partial \theta_U} & \frac{\partial Q_U}{\partial U_k} & \frac{\partial Q_U}{\partial U_S} & \frac{\partial Q_U}{\partial U_U} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta P_m \\ \Delta P_{DC} \\ \Delta P_{km} \\ \Delta Q_k \\ \Delta Q_m \\ \Delta Q_U \end{bmatrix}^{(n)} \quad (2.67)$$

Na Sl. 2.24 prikazan je princip proširivanja Jakobijeve matrice sistema jednačinama nakon ugradnje UPFC uređaja. Pretpostavlja se da UPFC radi u standardnom režimu rada odnosno kada kontroliše napon i tokove snaga po dalekovodu na koji je priključen. Poslednja vrsta i kolona prikazane su opciono za slučaj da struja STATCOM-a dostigne maksimalnu vrednost pre postizanja zadate vrednosti napona čvora k . Iako Sl. 2.24 pokazuje proširenje sistema jednačina u slučaju ugradnje samo jednog UPFC uređaja, relevantni indeksi mogu se zameniti skupovima čvorova na koje je vezano više UPFC uređaja. Svakom ugrađenom UPFC uređaju pripadaju odgovarajuće jednačine koje ga modeluju. Za slučaj standardnog režima rada UPFC uređaja, pod punim opterećenjem otočne grane, za svaki ugrađeni UPFC potrebno je proširiti Jakobijan sa novih šest jednačina.

Pored opisanog modela UPFC uređaja za proračun tokova snaga u literaturi se mogu sresti i neki drugi modeli [25,28,29]. Oni su proizašli iz potrebe da se model UPFC uređaja za proračun tokova snaga pojednostavi i prilagodi konkretnom proračunu. Jedan od takvih modela je i model UPFC uređaja preko snaga injektiranja. Osnovna ideja ovog modela je da se idealni izvori u rednoj i otočnoj grani u zamenskoj šemi sa Sl. 2.23 zamene odgovarajućim snagama injektiranja u čvorovima priključenja UPFC uređaja kao što je ilustrovano na Sl. 2.25.

		Promenljive stanja za novi čvor m		Promenljive stanja za otočni i redni transformator		Dodatna promenljiva stanja u slučaju maks. opterećenja STATCOM-a					
		$\theta_i \dots$	$U_j \dots$	θ_k	θ_m	U_m	θ_S	U_S	θ_U	U_U	U_k
Injektiranja u postojeće čvorove mreže	P_i	$\left[\frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} \right]$	$\left[\frac{\partial P_i}{\partial U_j} \right]$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
	Q_j	$\left[\frac{\partial Q_j}{\partial \theta_i} \right]$	$\left[\frac{\partial Q_j}{\partial U_j} \right]$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
Injektiranja u postojeći čvor k na koji je priključen UPFC	P_k	$\dots$	$\dots$	Jakobijeva matrica iz jednačine (2.61) presložena prema datom redosledu promenljivih stanja i snaga injektiranja							
	Q_k	$\dots$	$\dots$								
Injektiranja u novi čvor m na koji je priključen UPFC	P_m	$\dots$	$\dots$								
	Q_m	$\dots$	$\dots$								
Zahtevani tok aktivne i reaktivne snage od čvora k do čvora m	P_{km}	$\dots$	$\dots$								
	Q_{km}	$\dots$	$\dots$								
Balans snaga jednosmernog kola UPFC-a	P_{DC}	$\dots$	$\dots$								
Dodatna jednačina za slučaj maksimalnog opterećenja STATCOM-a	Q_U	$\dots$	$\dots$								

Sl. 2.24. Proširenje Jakobijeve matrice ugradnjom UPFC-a
u postojeći čvor k i novi umetnuti čvor m



Sl. 2.25. Model UPFC uređaja preko injektiranja

Prema šemi sa Sl. 2.25a, za bilanse snaga u čvorovima k i m važe relacije:

$$\underline{S}_k = \underline{S}_{km}^{(1)} - \underline{S}_k^{ot}; \quad (2.68)$$

$$\underline{S}_m = -\underline{S}_{mk}^{(1)}. \quad (2.69)$$

Na sličan način, prema šemi sa Sl. 2.25b dobijaju se sledeće relacije:

$$\underline{S}_k = \underline{S}_{km}^{(2)} - \underline{S}_k^{UPFC}; \quad (2.70)$$

$$\underline{S}_m = \underline{S}_m^{UPFC} - \underline{S}_{mk}^{(2)}. \quad (2.71)$$

Veličine $\underline{S}_k$ i $\underline{S}_m$ predstavljaju snage na ulazu i izlazu iz UPFC uređaja i kod oba modela one moraju biti iste. Prema tome, izjednačavanjem odgovarajućih jednačina dobijaju se relacije za snage injektiranja kod ekvivalentnog modela.

$$\underline{S}_k^{UPFC} = \underline{S}_{km}^{(2)} - \underline{S}_{km}^{(1)} + \underline{S}_k^{ot}; \quad (2.72)$$

$$\underline{S}_m^{UPFC} = \underline{S}_{mk}^{(2)} - \underline{S}_{mk}^{(1)}. \quad (2.73)$$

Zamenom odgovarajućih izraza za snage u jednačini (2.72), za injektiranje u čvoru k dalje se dobija:

$$\underline{S}_k^{UPFC} = \underline{U}_k [(\underline{U}_k - \underline{U}_m) \underline{Y}_S]^* - \underline{U}_k [(\underline{U}_k - \underline{U}_m + \underline{U}_S) \underline{Y}_S]^* + \underline{U}_k [(\underline{U}_U - \underline{U}_k) \underline{Y}_U]^*. \quad (2.74)$$

Sređivanjem prethodne jednačine i razdvajanjem realnog i imaginarnog dela konačno se dobijaju izrazi za aktivnu i reaktivnu snagu injektiranja u čvoru k :

$$\begin{aligned} P_k^{UPFC} = & -U_k^2 G_U - U_k U_S [G_S \cos(\theta_k - \theta_S) + B_S \sin(\theta_k - \theta_S)] \\ & + U_k U_U [G_U \cos(\theta_k - \theta_U) + B_U \sin(\theta_k - \theta_U)]; \end{aligned} \quad (2.75)$$

$$\begin{aligned} Q_k^{UPFC} = & U_k^2 B_U - U_k U_S [G_S \sin(\theta_k - \theta_S) - B_S \cos(\theta_k - \theta_S)] \\ & + U_k U_U [G_U \sin(\theta_k - \theta_U) - B_U \cos(\theta_k - \theta_U)]. \end{aligned} \quad (2.76)$$

Izrazi za aktivnu i reaktivnu snagu injektiranja u čvoru m dobijaju se na sličan način:

$$\underline{S}_m^{UPFC} = \underline{U}_m [(\underline{U}_m - \underline{U}_k) \underline{Y}_S]^* - \underline{U}_m [(\underline{U}_m - \underline{U}_k - \underline{U}_S) \underline{Y}_S]^*. \quad (2.77)$$

Sređivanjem se dobija:

$$P_m^{UPFC} = U_m U_S [G_S \cos(\theta_m - \theta_S) + B_S \sin(\theta_m - \theta_S)]; \quad (2.78)$$

$$Q_m^{UPFC} = U_m U_S [G_S \sin(\theta_m - \theta_S) - B_S \cos(\theta_m - \theta_S)]. \quad (2.79)$$

Da bi ovaj model bio kompletan potrebno je uvažiti i jednačinu balansa aktivne snage između rednog i otočnog invertora.

Snaga otočnog invertora sa Sl. 2.23 može se izračunati prema sledećoj relaciji:

$$\underline{S}_U = \underline{U}_U \underline{I}_U^* = \underline{U}_U [(\underline{U}_U - \underline{U}_k) \underline{Y}_U]^*. \quad (2.80)$$

Sređivanjem se dobijaju izrazi za aktivnu i reaktivnu snagu otočnog invertora:

$$P_U = U_U^2 G_U - U_U U_k [G_U \cos(\theta_U - \theta_k) + B_U \sin(\theta_U - \theta_k)] \quad (2.81)$$

$$Q_U = -U_U^2 B_U - U_U U_k [G_U \sin(\theta_U - \theta_k) - B_U \cos(\theta_U - \theta_k)] \quad (2.82)$$

Na sličan način može se izračunati i snaga rednog invertora:

$$\underline{S}_S = \underline{U}_S \underline{I}_S^* = \underline{U}_S [(\underline{U}_k - \underline{U}_m + \underline{U}_S) \underline{Y}_S]^* \quad (2.83)$$

Sređivanjem se dobijaju izrazi za aktivnu i reaktivnu snagu rednog invertora:

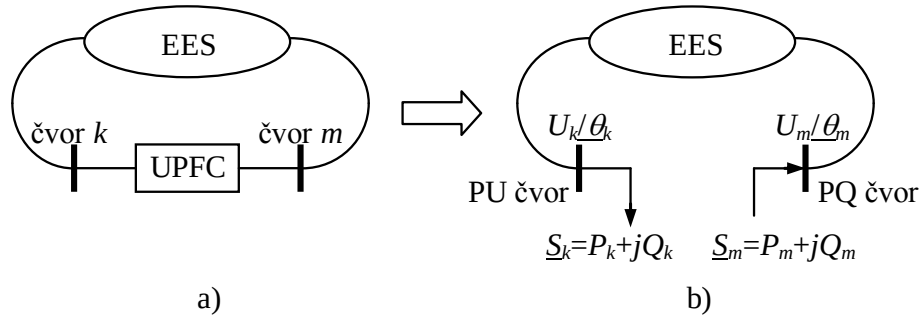
$$P_S = U_S^2 G_S + U_S U_k [G_S \cos(\theta_S - \theta_k) + B_S \sin(\theta_S - \theta_k)] - \\ - U_S U_m [G_S \cos(\theta_S - \theta_m) + B_S \sin(\theta_S - \theta_m)] \quad (2.84)$$

$$Q_S = -U_S^2 B_S + U_S U_k [G_S \sin(\theta_S - \theta_k) - B_S \cos(\theta_S - \theta_k)] - \\ - U_S U_m [G_S \sin(\theta_S - \theta_m) - B_S \cos(\theta_S - \theta_m)] \quad (2.85)$$

Jednačinu balansa aktivne snage između rednog i otočnog invertora je prema tome:

$$\Delta P_{DC} = P_S - P_U = 0. \quad (2.86)$$

Jedan od jednostavnijih modela UPFC uređaja, pogodan za sekvencijalne proračune tokova snaga, je model kod koga se UPFC uređaj predstavlja kao crna kutija ("black box") povezana između odabranih čvorova k i m kao na Sl. 2.26a [16]. Ako se pretpostavi da otočni inverter radi u režimu upravljanja naponom, a serijski inverter u režimu upravljanja tokovima snaga, onda se gledano sa strane sistema čvor k može posmatrati kao PU čvor, a čvor m kao PQ čvor kao što je dato na Sl. 2.26b. Osnovna suština ovog modela sastoji se u tome da nije neophodno uključivanje unutrašnjih promenljivih UPFC uređaja (U_U , θ_U , U_S , θ_S) u proračun tokova snaga. Ove veličine mogu da se izračunaju naknadno, nakon izvršenog proračuna tokova snaga. Da bi se unutrašnje promenljive UPFC uređaja mogle izračunati potrebno je izvesti izraze za snage $\underline{S}_k$ i $\underline{S}_m$ sa Sl. 2.26b.



Sl.2.26. Modela UPFC uređaja preko crne kutije

Snaga $\underline{S}_k$ je ukupna snaga koja iz mreže ulazi u UPFC uređaj, dok je $\underline{S}_m$ snaga koja se ima na izlazu UPFC uređaja. To je faktički snaga koja teče po vodu na koji je UPFC uređaj priključen. U cilju određivanja izraza za snage $\underline{S}_k$ i $\underline{S}_m$ može se iskoristiti bilo koji od modela sa Sl. 2.25.

Prema modelu sa Sl. 2.25a, imajući u vidu usvojene smerove, ima se:

$$\underline{S}_k = \underline{S}_{km}^{(1)} - \underline{S}_k^{ot}; \quad (2.87)$$

$$\underline{S}_m = -\underline{S}_{mk}^{(1)}. \quad (2.88)$$

Daljim razvojem izraza za snagu $\underline{S}_k$ dobija se:

$$\underline{S}_k = \underline{U}_k [(\underline{U}_k - \underline{U}_m + \underline{U}_S) \underline{Y}_S]^* - \underline{U}_k [(\underline{U}_U - \underline{U}_k) \underline{Y}_U]^*. \quad (2.89)$$

Konačno sredjivanjem prethodnog izraza i razdvajanjem realnog i imaginarnog dela dobija se:

$$\begin{aligned} P_k = & U_k^2 G_S + U_k^2 G_U - U_k U_m [G_S \cos(\theta_k - \theta_m) + B_S \sin(\theta_k - \theta_m)] \\ & + U_k U_S [G_S \cos(\theta_k - \theta_S) + B_S \sin(\theta_k - \theta_S)] \\ & - U_k U_U [G_U \cos(\theta_k - \theta_U) + B_U \sin(\theta_k - \theta_U)] \end{aligned} \quad (2.90)$$

$$\begin{aligned} Q_k = & -U_k^2 B_S - U_k^2 B_U - U_k U_m [G_S \sin(\theta_k - \theta_m) - B_S \cos(\theta_k - \theta_m)] \\ & + U_k U_S [G_S \sin(\theta_k - \theta_S) - B_S \cos(\theta_k - \theta_S)] \\ & - U_k U_U [G_U \sin(\theta_k - \theta_U) - B_U \cos(\theta_k - \theta_U)] \end{aligned} \quad (2.91)$$

Izraz za snagu $\underline{S}_m$ dobijaju se na sličan način:

$$\underline{S}_m = -\underline{U}_m [(\underline{U}_m - \underline{U}_k - \underline{U}_S) \underline{Y}_S]^*. \quad (2.92)$$

Posle sređivanja se dobija:

$$\begin{aligned} P_m = & -U_m^2 G_S + U_m U_k [G_S \cos(\theta_m - \theta_k) + B_S \sin(\theta_m - \theta_k)] \\ & + U_m U_S [G_S \cos(\theta_m - \theta_S) + B_S \sin(\theta_m - \theta_S)] \end{aligned} \quad (2.93)$$

$$\begin{aligned} Q_m = & U_m^2 B_S + U_m U_k [G_S \sin(\theta_m - \theta_k) - B_S \cos(\theta_m - \theta_k)] \\ & + U_m U_S [G_S \sin(\theta_m - \theta_S) - B_S \cos(\theta_m - \theta_S)] \end{aligned} \quad (2.94)$$

Ovim jednačinama potrebno je pridružiti i jednačinu (2.86), odnosno jednačinu po balansu aktivne snage između rednog i otočnog invertora

Sve veličine neophodne za proračun unutrašnjih promenljivih UPFC uređaja (U_k, θ_k za čvor k i U_m, θ_m za čvor m) mogu se dobiti iz proračuna tokova snaga specificiranjem odgovarajućih vrednosti za pojedine veličine u čvorovima k i m ,

odnosno $P_k=P_{spec}$ i $U_k=U_{spec}$ za PU čvor k i $P_m=P_{spec}$ i $Q_m=Q_{spec}$ za PQ čvor m . Veličine P_{spec} , Q_{spec} i U_{spec} predstavljaju zadate (željene) vrednosti kontrolisanih promenljivih od strane UPFC uređaja. Veličine P_{spec} i Q_{spec} predstavljaju željeni tok snaga po vodu na koji je priključen UPFC uređaj, dok U_{spec} predstavlja željenu vrednost napona u čvoru k . Na osnovu rečenog, unutrašnje promenljive UPFC uređaja mogu se izračunati iterativnim putem rešavanjem sistema jednačina koji se dobija izjednačavanjem izraza (2.86), (2.91), (2.93) i (2.94) sa odgovarajućim vrednostima:

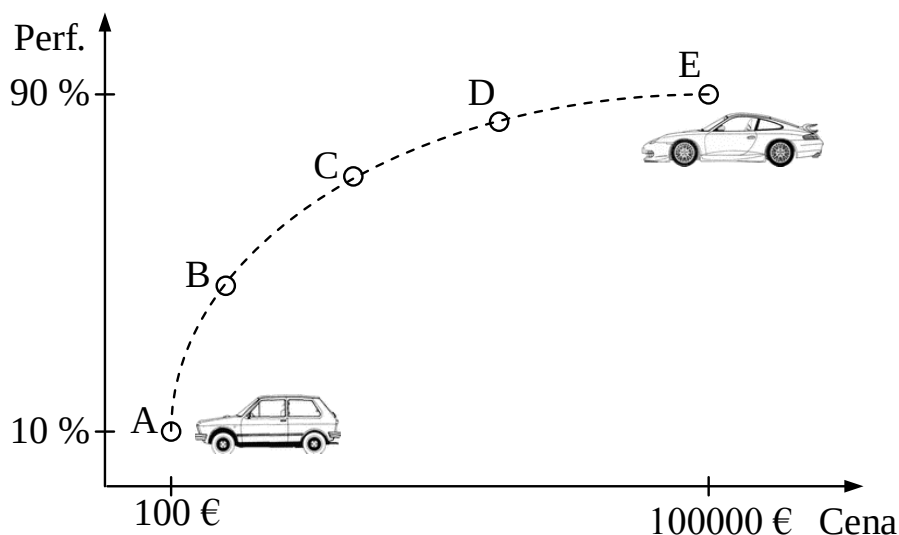
2.7. Rezime

U ovom poglavlju dat je pregled osnovnih tipova FACTS uređaja. Težište je stavljeno na njihove modele za proračune u elektroenergetskim sistemima. Pored složenijih modela, za pojedine uređaje dati su i pojednostavljeni modeli. U principu izbor modela zavisi pre svega od vrste i namene proračuna. Na primer, kod sekvencijalnih proračuna mogu se primeniti jednostavniji modeli jer su obično ovakvi modeli manje računarski zahtevni. Naravno, primena jednostavnijih modela ima smisla ako u konkretnom proračunu daju dovoljno dobre rezultate u poređenju sa složenijim modelima.

3. VIŠEKRITERIJUMSKA OPTIMIZACIJA

3.1. Uvod

Mnogi optimizacioni problemi sa kojim se danas sreću inženjeri su takvi da se ne mogu modelovati samo jednom kriterijumskom funkcijom. Sveobuhvatniji pristup ovakvim složenim problemima neumitno vodi do formiranja više kriterijumskih funkcija kojim se kvalitetnije opisuje zadati problem. Sa višekriterijumskom optimizacijom se često, svesno ili ne, srećemo i u svakodnevnom životu. Npr. kod kupovine nekog proizvoda često pravimo kompromis između cene i kvaliteta (performansi) proizvoda. Na Sl. 3.1 ilustrovan je primer višekriterijumske optimizacije sa kojom se srećemo pri kupovini automobila. Dilema je da li kupiti jeftiniji model slabijih performansi ili skuplji sa boljim performansama. Tu imamo dve kriterijumske funkcije koje moramo optimizovati, a to su cena automobila i njegove performanse. Svako ko se našao u ovakvoj situaciji morao je da pravi kompromis između ove dve kriterijumske funkcije.

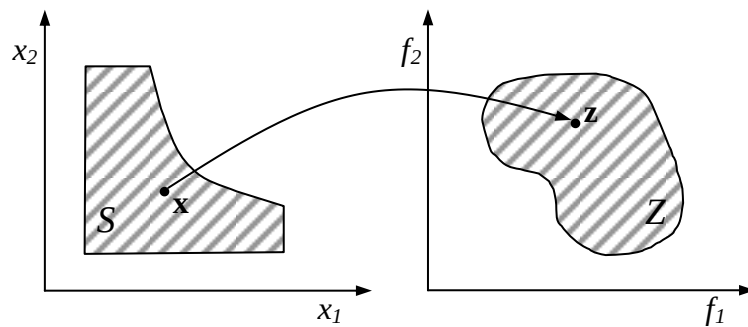


Sl. 3.1. Primer višekriterijumske optimizacije

Višekriterijumska optimizacija mogla bi da se definiše kao proces sistematske i simultane optimizacije skupa kriterijumskih funkcija. Pored kriterijumskih funkcija u opštem slučaju postoje i ograničenja koja sva dopustiva rešenja (kao i optimalno rešenje) moraju zadovoljiti. Imajući sve ovo u vidu jedan opšti višekriterijumski optimizacioni problem može se opisati sledećim jednačinama:

$$\begin{array}{lll}
 \text{Min / Max} & f_m(x), & m = 1, 2, \dots, M; \\
 \text{p.o.:} & g_j(x) \geq 0, & j = 1, 2, \dots, J; \\
 & h_k(x) = 0, & k = 1, 2, \dots, K; \\
 & x_i^{(D)} \leq x_i \leq x_i^{(G)}, & i = 1, 2, \dots, N.
 \end{array} \quad (3.1)$$

Rešenje optimizacionog problema $\mathbf{x}$ je vektor upravljačkih promenljivih dimenzije N $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_N]^T$. Rešenja koja zadovoljavaju ograničenja tipa jednakosti (h_k) i nejednakosti (g_j) kao i ograničenja po granicama za pojedine promenljive čine dopustiv prostor upravljačkih promenljivih S . Jedna od veoma bitnih razlika između jednokriterijumske i višekriterijumske optimizacije je ta što kod višekriterijumske optimizacije kriterijumske funkcije čine višedimenzionalni prostor koji se može nazvati kriterijumski prostor Z . Za svako rešenje u prostoru upravljačkih promenljivih postoji tačka u kriterijumskom prostoru koju možemo opisati sa $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \mathbf{z} = [z_1 \ z_2 \ \dots \ z_M]^T$. Preslikavanje između dva pomenuta prostora podrazumeva preslikavanje između N -dimenzionalnog vektora upravljačkih promenljivih i M -dimenzionalnog vektora kriterijumskih funkcija. Na Sl. 3.2 ilustrovana su ova dva prostora i preslikavanje između njih za slučaj dve promenljive i dve kriterijumske funkcije.



Sl. 3.2. Prikaz prostora upravljačkih promenljivih i odgovarajućeg prostora kriterijumskih funkcija

Pre nego što bude dat pregled metoda pri rešavanju problema višekriterijumake optimizacije u daljem tekstu biće dati osnovni koncepti i definicije kod višekriterijumske optimizacije [30]. Sve definicije su date za slučaj kada se radi o minimizaciji kriterijumskih funkcija.

3.2. Osnovni koncepti i definicije

3.2.1. Definicije pojmova

Višekriterijumska optimizacija originalno je nastala iz tri oblasti: teorije ekonomije, teorije igre i teorijske matematike. Samim tim, mnogi termini i fundamentalne ideje potiču iz ovih oblasti.

Preferencije (polazne pretpostavke, informacije, prioriteti). Preferencije ukazuju inženjeru na šta treba da obrati pažnju u prostoru kriterijumskih funkcija, odnosno, koje su tačke od interesa. Generalno gledano, problem kriterijumske optimizacije može se rešavati na tri različita načina u zavisnosti od momenta kada inženjer koristi polazne pretpostavke (preferencije) kod pojedinih kriterijumskih funkcija u toku optimizacionog procesa:

- pre optimizacione procedure,
- posle optimizacione procedure,
- nikad.

Kod metoda kod kojih se polazne pretpostavke koriste nakon optimizacione procedure, inženjer preferencije primenjuje direktno na set potencijalnih rešenja. Na taj način finalno rešenje egzaktno reflektuje njegove polazne pretpostavke. Kod metoda kod kojih se polazne pretpostavke koriste pre same optimizacione metode, inženjer mora unapred da kvantifikuje polazne pretpostavke (preferencije). U ovom smislu preferencije se uglavnom koriste kod određivanja relativnog uticaja pojedinih kriterijumskih funkcija.

Funkcija preferencija. Funkcija preferencija je abstraktna funkcija u prostoru kriterijumskih funkcija koja opisuje polazne pretpostavke.

Funkcija uticaja. U smislu višekriterijumske optimizacije individualna funkcija uticaja definiše se za svaki kriterijum i predstavlja relativnu važnost kriterijuma. Funkcija uticaja U predstavlja integraciju individualnih funkcija korisnosti i teži da kroz matematičku predstavu modeluje polazne pretpostavke (preferencije) za pojedine kriterijume. Funkcija korisnosti prvenstveno se koristi da aproksimira funkciju preferencija koja se tipično teško može izraziti u matematičkoj formi.

Globalna kriterijumska funkcija. Globalna kriterijumska funkcija je skalarna funkcija koja predstavlja kombinaciju više kriterijumskih funkcija. Ona nužno ne uključuje funkcije uticaja i preferencija.

Teorija igre. Prema tradicionalnoj interpretaciji teorije igre, igra predstavlja situaciju konflikta ili saradnje između najmanje dva igrača sa različitim strategijama ili potezima. Teorija igre predstavlja višekriterijumsku optimizaciju sa više inženjera koji donose odluke i od kojih svaki kontroliše određene promenljive. Ako bi svi igrači saradivali rezultat bi bio isti kao kada bi samo jedan igrač odlučivao u višekriterijumskoj optimizaciji.

3.2.2. Pareto optimalnost

Za razliku od jednokriterijumske optimizacije, kod problema višekriterijumske optimizacije uglavnom nemamo jedno globalno rešenje i često je neophodno odrediti set tačaka koje sve zadovoljavaju definiciju optimuma. Uobičajeni koncept kod definisanja optimalne tačke je Pareto optimalnost [31] koja se definiše na sledeći način:

Definicija 1. *Pareto optimalnost: Tačka $\mathbf{x}^* \in \mathbf{X}$ je Pareto optimalna ako i samo ako ne postoji druga tačka $\mathbf{x} \in \mathbf{X}$, takva da je $\mathbf{F}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{F}(\mathbf{x}^*)$ i $F_i(\mathbf{x}) < F_i(\mathbf{x}^*)$ za najmanje jednu kriterijumsku funkciju.*

Pojedine veličine imaju sledeće značenje:

$\mathbf{X}$ - dopustivi prostor upravljačkih promenljivih,

$\mathbf{x}$ - vektor upravljačkih promenljivih (tačka u prostoru upravljačkih promenljivih)

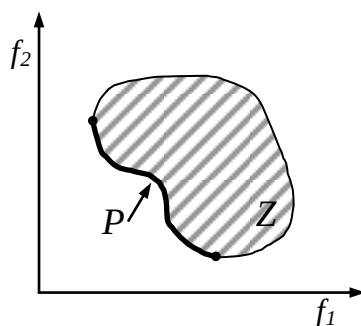
$\mathbf{F}$ - vektor kriterijumskih funkcija (tačka u prostoru kriterijumskih funkcija)

Sve Pareto optimalne tačke (Pareto front) leže na granici dopustivog prostora kriterijumskih funkcija $\mathbf{Z}$. Na Sl. 3.3 je dat prikaz Pareto fronta P za slučaj minimizacije dve kriterijumske funkcije. Često se raznim algoritmima dobijaju rešenja koja nisu

Pareto optimalna ali mogu da zadovoljavaju druge kriterijume pa su u tom pogledu značajna za praktične primene. U skladu sa tim može se definisati slaba Pareto optimalnost.

Definicija 2. Slaba Pareto optimalnost: Tačka $\mathbf{x}^* \in \mathbf{X}$ je Pareto optimalna ako i samo ako ne postoji druga tačka $\mathbf{x} \in \mathbf{X}$, takva da je $\mathbf{F}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{F}(\mathbf{x}^*)$.

Tačka je slabo Pareto optimalna ako ne postoji druga tačka koja ne poboljšava sve kriterijumske funkcije simultano. S druge strane, tačka je Pareto optimalna ako ne postoji druga tačka koja poboljšava bar jednu kriterijumsku funkciju, a da pri tom ne degradira ostale kriterijumske funkcije. Pareto optimalne tačke su slabo Pareto optimalne tačke ali slabo Pareto optimalne tačke nisu Pareto optimalne.



Sl. 3.3. Prikaz Pareto fronta za slučaj dve kriterijumske funkcije.

3.2.3. Efikasnost i dominacija

Efikasnost je sledeći osnovni koncept kod višekriterijumske optimizacije koji se definiše na sledeći način [32]:

Definicija 3. Efikasnost i neefikasnost: Tačka $\mathbf{x}^* \in \mathbf{X}$ je efikasna ako i samo ako ne postoji druga tačka $\mathbf{x} \in \mathbf{X}$, takva da je $\mathbf{F}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{F}(\mathbf{x}^*)$, sa najmanje jednom strogom nejednakošću $F_i(\mathbf{x}) < F_i(\mathbf{x}^*)$. U protivnom, tačka $\mathbf{x}^*$ je neefikasna.

Za nedominirajuće i dominirajuće tačke može se dati sledeća definicija [32]:

Definicija 4. Nedominirajuće i dominirajuće tačke: Vektor kriterijumskih funkcija $\mathbf{F}(\mathbf{x}^*) \in \mathbf{Z}$ je nedominirajući ako i samo ako ne postoji drugi vektor $\mathbf{F}(\mathbf{x}) \in \mathbf{Z}$, takav da je $\mathbf{F}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{F}(\mathbf{x}^*)$, sa najmanje jednom strogom nejednakošću $F_i(\mathbf{x}) < F_i(\mathbf{x}^*)$. U protivnom vektor $\mathbf{F}(\mathbf{x}^*)$ je dominirajući.

Za sve praktične primene definicije 3 i 4 su iste. Međutim, efikasnost se tipično odnosi na vektor upravljačkih veličina, dok se dominacija odnosi na vektor kriterijumskih funkcija.

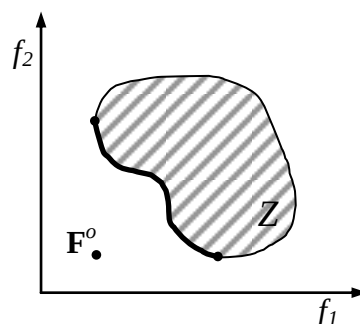
Definicija Pareto opimalnosti je slična onoj za efikasnost pa se Pareto optimalna tačka u prostoru kriterijumskih funkcija često posmatra i kao nedominirajuća tačka. Može se reći da je Pareto optimalnost neznatno različiti specijalni slučaj efikasnosti ali je ova razlika irelevantna kod praktičnih primena.

3.2.4. Kompromisno rešenje

Alternativa ideji Pareto optimalnosti i efikasnosti koja vodi ka rešenju u jednoj tački, je ideja kompromisnog rešenja. Ona podrazumeva minimizaciju razlike između potencijalne optimalne tačke i utopia tačke. Utopia tačka ili idealna tačka definiše se na sledeći način [33]:

Definicija 5. *Utopia tačka: Tačka $\mathbf{F}^o \in \mathbf{Z}^k$ je utopia tačka ako i samo ako je za svako $i=1,2,\dots,k$, $F_i^o = \min_x \{F_i(\mathbf{x}) \mid \mathbf{x} \in \mathbf{X}\}$.*

Na Sl. 3.4 dat je prikaz utopia tačke $\mathbf{F}^o$ za slučaj dve kriterijumske funkcije



Sl. 3.4. Prikaz utopia tačke za slučaj dve kriterijumske funkcije

Generalno gledano utopia tačka je nedostižna pa otuda i ovaj naziv za nju. Sledeće najbolje rešenje je tačka koja je što je moguće bliža utopia tački. Takvo rešenje naziva se kompromisno rešenje i ono je Pareto optimalno. Otežavajući faktor kod ideje

kompromisnog rešenja je definisanje reči blizu. To se u suštini svodi na minimizaciju Euklidovog rastojanja $N(\mathbf{x})$ koje se definiše na sledeći način:

$$N(\mathbf{x}) = |\mathbf{F}(\mathbf{x}) - \mathbf{F}^o| = \sqrt{\sum_1^k [F_i(\mathbf{x}) - F_i^o]^2}. \quad (3.2)$$

U slučaju da različite kriterijumske funkcije imaju različite jedinice Euklidovo rastojanje ne može da se primeni kod određivanja rastojanja od utopia tačke. U tom slučaju kriterijumske funkcije je potrebno transformisati tako da budu bezdimenzionalne.

3.2.5. Transformacija funkcija

U cilju doslednog poređenja između raznih metoda podrazumeva se da se kriterijumske funkcije kojim je modelovan neki problem ne menjaju. Međutim, u mnogim slučajevima transformacija originalnih kriterijumskih funkcija daje određene prednosti. Jedna od njih je pomenuta u prethodnom poglavlju. Ovde će biti prezentovane neke osnovne metode za transformaciju kriterijumskih funkcija.

Prvi pristup može se opisati sledećom jednačinom [34]:

$$F_i^{trans} = \frac{F_i(\mathbf{x})}{|F_i^{max}|}, \quad (3.3)$$

što rezultira bezdimenzionalnom kriterijumskom funkcijom sa gornjim limitom 1 (ili -1) i neograničenim donjim limitom. Podrazumeva se da je $F_i^{max} \neq 0$. Postoje dva pristupa kod određivanja F_i^{max} . Kod prvog F_i^{max} se definiše kao $F_i^{max} = \max_{1 \leq j \leq k} F_i(\mathbf{x}_j^*)$, gde je $\mathbf{x}_j^*$ tačka koja minimizira j -tu kriterijumsku funkciju. Tačka $\mathbf{x}_j^*$ je najviša tačka Pareto optimalnog seta u prostoru upravljačkih promenljivih, a $\mathbf{F}(\mathbf{x}_j^*)$ je najviša tačka Pareto optimalnog seta u prostoru kriterijumskih funkcija. Kod drugog pristupa imenilac u jednačini (3.3) može se odrediti kao apsolutni maksimum funkcije $F_i(\mathbf{x})$ ili njegova aproksimativna vrednost na osnovu inženjerskog iskustva.

Naredna metoda za transformaciju funkcija može se opisati jednačinom [35]:

$$F_i^{trans}(\mathbf{x}) = \frac{F_i(\mathbf{x}) - F_i^o}{F_i^o}. \quad (3.4)$$

Ovim pristupom takođe dobijamo bezdimenzionalnu kriterijumsku funkciju. Međutim, u ovom slučaju donji limit $F_i^{trans}(\mathbf{x})$ je ograničen vrednošću 0, dok je gornji limit neograničen. Jednačina (3.4) se može shvatiti i kao relativna devijacija kriterijumske funkcije.

Sledeći metod je varijacija prethodnog i može se opisati jednačinom [36]:

$$F_i^{trans}(\mathbf{x}) = \frac{F_i(\mathbf{x})}{F_i^o}, \quad F_i^o > 0. \quad (3.5)$$

I ovaj pristup vodi bezdimenzionalnoj kriterijumskoj funkciji kod koje je donji limit ograničen sa 1.

Najrobusniji način transformacije kriterijumskih funkcija, imajući u vidu njihov originalni opseg, dat je sledećom jednačinom [36]:

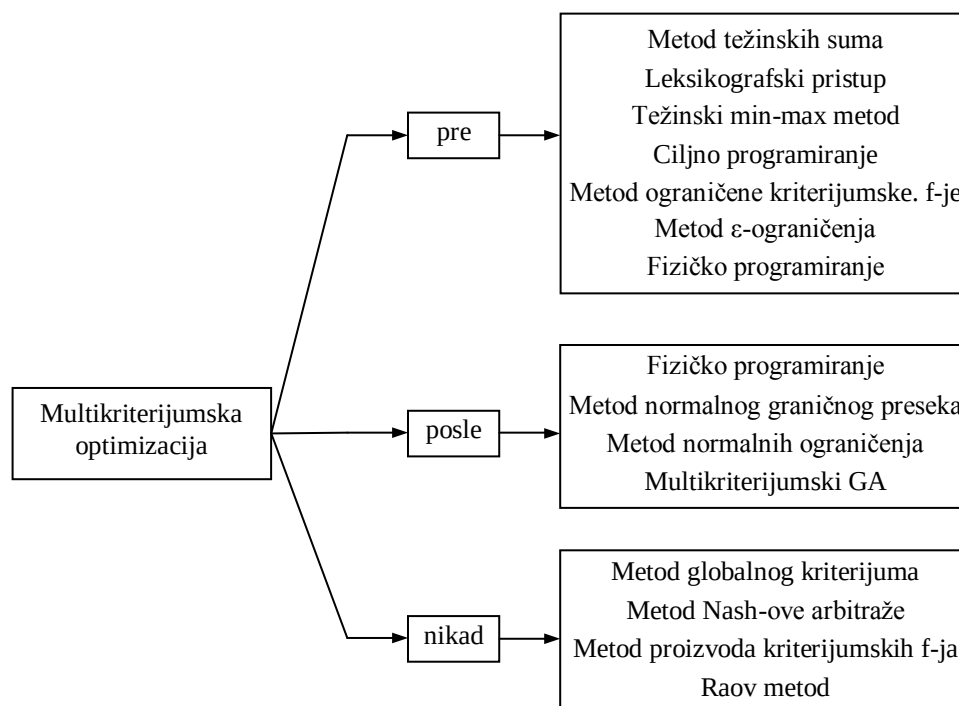
$$F_i^{trans}(\mathbf{x}) = \frac{F_i(\mathbf{x}) - F_i^o}{F_i^{\max} - F_i^o}. \quad (3.6)$$

Ovaj pristup u suštini predstavlja normalizaciju kriterijumskih funkcija. U ovom slučaju $F_i^{trans}(\mathbf{x})$, generalno gledano, uzima vrednosti između 0 i 1, mada to zavisi i od tačnosti i metode kojim su određene veličine $F_i^{\max}$ i F_i^o .

Ponekad je komplikovno ali i kompjuterski zahtevno određivanje utopia tačke koja se koristi u gore izloženim metodama za transformaciju funkcija. Zbog toga se često ova tačka određuje aproksimacijom.

3.3. Metode višekriterijumske optimizacije

Kao što je u prethodnom tekstu pomenuto metode za rešavanje optimizacionih problema definisanih sa više kriterijumskih funkcija mogu se svrstati u tri kategorije i to u zavisnosti u kom momentu se koriste polazne pretpostavke (preferencije) u odnosu na pojedine kriterijumske funkcije. Na Sl. 3.5 dat je pregled metoda po pojedinim kategorijama.



Sl. 3.5. Pregled metoda višekriterijumske optimizacije po kategorijama u zavisnosti kada se koriste polazne pretpostavke

3.3.1. Metode kod kojih se polazne pretpostavke koriste pre optimizacionog postupka

Metode iz ove kategorije omogućavaju korisniku da odredi polazne pretpostavke (prioritete, preferencije) koje mogu biti primenjene na takav način da daju relativnu važnost pojedinim objektivnim funkcijama. U većinu ovih metoda inkorporirani su parametri odnosno razni koeficijenti, eksponenti, i sl. Ovi parametri služe da se njihovim podešavanjem izraze polazne pretpostavke i predikcije od strane inženjera koji rešava zadati problem. Takođe, kontinualna promena parametara omogućava dobijanje kompletnog Pareto optimalnog seta rešenja.

Razmatranje više od jedne kriterijumske funkcije u optimizacionom problemu uvodi dodatne stepene slobode. Iako su ovi stepeni slobodi ograničeni, matematička teorija ukazuje na set rešenja za razliku od samo jednog optimalnog rešenja.

Polazne pretpostavke i predikcije od strane inženjera neumitno uvode u problem dodatna ograničenja. Uobičajeni pristup kod uvođenja ovih ograničenja svodi se na

formiranje funkcije uticaja o kojoj je ranije bilo reči. Većina formulacija u ovom poglavlju bazirana je na različitim funkcijama uticaja.

U tekstu koji sledi biće dat kratak pregled metoda iz ove kategorije.

3.3.1.1. Metod težinskog globalnog kriterijuma (Weighted global criterion method)

Jedna od metoda koja se najčešće primenjuje kod višekriterijumske optimizacije je metoda globalnog kriterijuma. Kod ove metode sve kriterijumske funkcije se kombinuju tako da formiraju samo jednu kriterijumsku funkciju. Iako globalni kriterijum može biti funkcija koja nije u korelaciji sa polaznim postavkama, težinski globalni kriterijum je tip funkcije uticaja kod koje se parametri koriste da modeluju polazne pretpostavke i predikcije. Jedan od najčešćih načina za formiranje ovakvih funkcija uticaja je preko težinske eksponencijane sume:

$$U = \sum_{i=1}^k w_i [F_i(\mathbf{x})]^p, \quad F_i(\mathbf{x}) > 0 \quad \forall i \quad (3.7)$$

$$U = \sum_{i=1}^k [w_i F_i(\mathbf{x})]^p, \quad F_i(\mathbf{x}) > 0 \quad \forall i \quad (3.8)$$

Uobičajeno proširenje predhodne dve jednačine dato je narednim jednačinama:

$$U = \left\{ \sum_{i=1}^k w_i [F_i(\mathbf{x}) - F_i^o]^p \right\}^{\frac{1}{p}}, \quad (3.9)$$

$$U = \left\{ \sum_{i=1}^k w_i^p [F_i(\mathbf{x}) - F_i^o]^p \right\}^{\frac{1}{p}}. \quad (3.10)$$

U prethodnim jednačinama $\mathbf{w}$ je vektor težinskih faktora koji se zadaje od strane inženjera tako da je $\sum_{i=1}^k w_i = 1$ i $\mathbf{w} > 0$. Kod većine metoda koje uključuju težinske faktore za kriterijumske funkcije, postavljanje jednog ili više težinskih faktora na vrednost 0 može rezultirati slabom Pareto optimalnošću. Generalno gledano relativna vrednost težinskih faktora reflektuje relativnu važnost kriterijumskih funkcija.

Sumu argumenata u jednačinama (3.9) i (3.10) možemo posmatrati na dva načina: kao transformaciju orginalne kriterijumske funkcije ili kao komponente funkcije

rastojanja koja minimizira rastojanje između tačke rešenja i utopia tačke u prostoru kriterijumskih funkcija. Zbog ovakve interpretacije ovaj metod se često zove i *metod utopia tačke* ili *metod kompromisnog programiranja* jer inženjer pravi kompromis između finalnog rešenja i utopia tačke. U cilju efikasnijeg proračuna ili u slučajevima kada je nezavisni minimum kriterijumskih funkcija nedostižan, utopia tačka može da se aproksimira vektorom $\mathbf{z}$, koji se naziva željena (referentna, ciljna) tačka. U ovom slučaju funkcija U se naziva *funkcija uspeha*. Pretpostavljajući da je vektor težinskih koeficijenata $\mathbf{w}$ konstantan, ako važi $\mathbf{z} \notin \mathbf{Z}$ onda minimizacija jednačina (3.9) i (3.10) obezbeđuje potrebne i dovoljne uslove za Pareto optimalnost [37]. To znači da bilo koja Pareto optimalna tačka može biti uhvaćena koristeći različite referentne tačke, sve dok se referentne tačke ne nalaze u dopustivom kriterijumskom prostoru $\mathbf{Z}$. Međutim, ovo nije praktičan način za određivanje kompletnog seta Pareto optimalnih rešenja. Pre rešavanja problema, često je nemoguće odrediti da li neka referentna tačka $\mathbf{z}$ pripada ili ne kriterijumskom prostoru $\mathbf{Z}$.

Može se izvršiti kratka analiza vezana za parametre u prethodnim jednačinama. Ako bi u proračunima varirali samo parametar p , a ostale parametre držali na fiksnim vrednostima to bi obično vodilo limitiranom broju Pareto optimalnih rešenja u relativno maloj okolini. U protivnom, ako bi uzeli fiksnu vrednost za parametar p , a sistematski menjali težinske faktore, to bi vodilo ka dobijanju adekvatnog seta Pareto rešenja. U jednačinama (3.8) i (3.10) upotreba većih vrednosti za parametar p povećala bi efektivnost metode u dobijanju kompletnog Pareto optimalnog seta rešenja [38].

3.3.1.2. Metod težinskih suma (Weighted sum method)

Ovo je takođe jedna od čestih metoda kod rešavanja problema višekriterijumske optimizacije. Suština ove metode može se iskazati jednačinom:

$$U = \sum_{i=1}^k w_i F_i(\mathbf{x}). \quad (3.11)$$

Ovo je u stvari forma jednačina (3.7) i (3.8) gde je parametar $p=1$. Ako su svi težinski faktori pozitivni minimum jednačine (3.11) je Pareto optimalan, odnosno minimizacija jednačine (3.11) je dovoljna za Pareto optimalnost. Ovo se lako može dokazati. Pretpostavimo da dopustivi vektor upravljačkih veličina $\mathbf{a}$ minimizira funkciju

F za datu kombinaciju težinskih faktora i da on nije Pareto optimalan. Zatim, neka postoji vektor $\mathbf{b}$ koji dominira nad vektorom $\mathbf{a}$, odnosno takav da važi, $F_1(\mathbf{b}) < F_1(\mathbf{a})$ i $F_i(\mathbf{b}) \leq F_i(\mathbf{a})$ za $i = 2, \dots, k$. Prema tome važi $F(\mathbf{b}) < F(\mathbf{a})$, što je u kontradikciji da je $F(\mathbf{a})$ minimum. Međutim, potrebno je reći da sama formulacija ne obezbeđuje potrebne uslove za Pareto optimalnost.

Jedna od modifikacija ove metode je metod parcijalnih težinskih suma kod koga se originalne kriterijumske funkcije grupišu u podgrupe se zajedničkim karakteristikama. Od svake podgrupe se formira nezavisna kriterijumska funkcija sa svojim težinskim faktorima. Na ovaj način redukuje se početni broj kriterijumskih funkcija.

Različito tumačenje teorijskog i praktičnog značenja težinskih faktora može dovesti do toga da proces njihovog intuitivnog izbora bude veoma neefikasan. Iz tog razloga razvijeno je više sistematskih pristupa izboru težinskih faktora. Kod *metode rangiranja* različite kriterijumske funkcije se rangiraju po važnosti. Poslednja funkcija po važnosti dobija težinski faktor 1, dok se celobrojni težinski faktori sa adekvatnim inkrementom dodeljuju ostalim, bolje rangiranim, funkcijama. Sličan pristup se koristi i kod *metode kategorizacije* gde se različite kriterijumske funkcije grupišu u kategorije kao što su “veoma važna”, “manje važna” i sl. Kod *metode rejtinga* inženjer dodeljuje nezavisne vrednosti svakoj kriterijumskoj funkciji u zavisnosti od njene relativne važnosti. Ovakav pristup daje više od uobičajenog značenja svakom od težinskih faktora. *Metod poređenja parova funkcija* omogućuje sistematski način za vrednovanje kriterijumskih funkcija poređenjem istovremeno dve po dve funkcije. Na ovoj osnovi razvijena je *metoda sopstvenih vrednosti* za određivanje težinskih koeficijenata koja podrazumeva $k(k-1)/2$ poređenja dve po dve kriterijumske funkcije. Ovde je k ukupan broj kriterijumskih funkcija. Na ovaj način dobija se matrica komparacije i sopstvene vrednosti ove matrice predstavljaju težinske koeficijente. Pored pomenutih metoda koriste se i metode kod kojih se težinski koeficijenti računaju na osnovu utopija tačke, a takođe i metode koje uključuju “fuzzy” logiku.

Metod težinskih suma u sebi krije nekoliko slabosti. Pre svega to je pravilan i adekvatan izbor težinskih koeficijenata. Uprkos tome što postoji veliki broj metoda, izbor težinskih koeficijenata a priori ne garantuje da će se dobiti rešenje koje je prihvatljivo. Olakšavajuća okolnost je ta što se proračun može ponoviti sa novim težinskim koeficijentima.

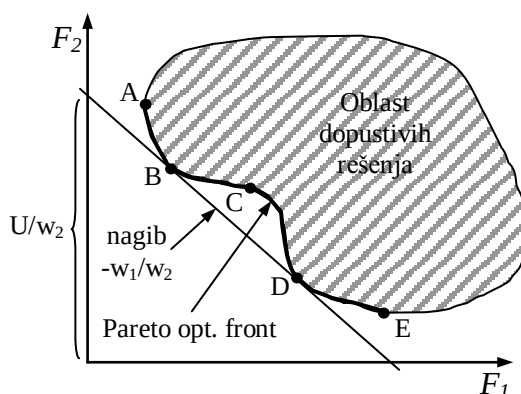
Drugi problem kod ove metode je taj što je nemoguće dobiti rešenja na nekonveksnim delovima Pareto fronta u prostoru kriterijumskih funkcija. Ovo je ilustrovano na Sl. 3.6 gde je uzet primer minimizacije dve kriterijumske funkcije. Za konstantne težinske koeficijente w_1 i w_2 jednačina koju treba minimizirati ima sledeći oblik:

$$U = w_1 F_1(\mathbf{x}) + w_2 F_2(\mathbf{x}). \quad (3.12)$$

Prethodna jednačina može da se napiše u obliku:

$$F_2(\mathbf{x}) = -\frac{w_1}{w_2} F_1(\mathbf{x}) + \frac{U}{w_2}. \quad (3.13)$$

Ovo je u stvari prava definisana nagibom $-w_1/w_2$ i odsečkom na F_2 -osi U/w_2 u prostoru kriterijumskih funkcija (Sl. 3.6). Grafički gledano, optimizacioni proces odgovara translatornom pomeranju ove prave nadole sve dok nema dopustivih rešenja ispod prave i dok postoji bar jedno dopustivo rešenje na samoj pravoj. Na Sl. 3.6 to su tačke B i D. Međutim, sa slike se takođe vidi da se tačke na nekonveksnom delu Pareto optimalnog fronta (tačke između B i D) ne mogu dobiti ni jednom kombinacijom težinskih koeficijenata. To je upravo jedan od glavnih nedostataka metode težinskih suma. Potrebno je još reći da se ostale tačke, odnosno tačke na konveksnim delovima Pareto optimalnog fronta, mogu dobiti odgovarajućim kombinacijama težinskih koeficijenata.



Sl. 3.6. Grafička interpretacija metoda težinskih suma

Poslednji nedostatak ove metode koji treba naglasiti je taj da variranjem težinskih koeficijenata, dosledno i kontinualno, ne garantuje ravnomernu distribuciju Pareto optimalnih tačaka i kompletnu reprezentaciju Pareto optimalnog seta rešenja.

3.3.1.3. Leksikografski metod (Lexicographic method)

Kod leksikografskog metoda, kriterijumske funkcije se aranžiraju prema važnosti. Na taj način se dobija lista funkcija prema prioritetu. Optimizacioni problem koji treba rešiti može se iskazati jednačinom:

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{x} \in X} F_i(\mathbf{x}) \\ p.o.: F_j(\mathbf{x}) \leq F_j(\mathbf{x}_j^*), \quad j=1,2,\dots,i-1, \quad i>1, \quad i=1,2,\dots,k. \end{aligned} \quad (3.14)$$

U datoj jednačini, indeks i predstavlja poziciju funkcije u listi prioriteta, a $F_j(\mathbf{x}_j^*)$ predstavlja optimum j -te kriterijumske funkcije izračunat u j -toj iteraciji. Nakon prve iteracije ($j=1$), veličina $F_j(\mathbf{x}_j^*)$ nije obavezno ista kao nezavisan minimum $F_j(\mathbf{x})$, jer se uvode nova ograničenja iz iteraciju u iteraciju.

Jedna od varijacija ovog metoda sastoji se u uvođenju ograničenja datog jednačinom:

$$F_j(\mathbf{x}) \leq \left(1 + \frac{\delta_j}{100}\right) F_j(\mathbf{x}_j^*), \quad j=1,2,\dots,i, \quad i>1. \quad (3.15)$$

Za razliku od jednačine (3.14), jednačina (3.15) predstavlja relaksirana ograničenja dobijena povećavanjem desne strane nejednakosti za određeni procenat veličine $F_j(\mathbf{x}_j^*)$. Veličina δ_j leži u opsegu $[0,100]$. Variranjem veličine δ_j ograničenja se mogu pooštavati i na taj način generisati različite Pareto optimalne tačke.

Kod još jedne varijacije leksikografskog metoda ograničenja su formulisana na način dat jednačinom:

$$F_j(\mathbf{x}) \leq F_j(\mathbf{x}_j^*) + \delta_j. \quad (3.16)$$

U ovom slučaju veličina δ_j je pozitivna tolerancija koja se određuje od strane inženjera. Ako tolerancija raste, dopustivi prostor određen kriterijumskim funkcijama se širi. Ovo smanjuje ostljivost konačnog rešenja od procesa inicijalnog rangiranja

kriterijumskih funkcija. Gore opisane varijacije kombinuju karakteristike leksikografske metode i metode ε -ograničenja koja će biti opisana u daljem tekstu.

3.3.1.4. Težinski min-max metod (Weighted min-max method)

Težinski min-max metod može se iskazati sledećom jednačinom:

$$U = \max_i \left\{ w_i [F_i(\mathbf{x}) - F_i^o(\mathbf{x})] \right\}. \quad (3.17)$$

Uobičajeni pristup rešavanju postavljenog problema sastoji se u uvođenju dodatnog nepoznatog parametra λ , tako da se dolazi do nove formulacije:

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{x} \in X, \lambda} \quad & \lambda \\ \text{p.o.: } & w_i [F_i(\mathbf{x}) - F_i^o(\mathbf{x})] - \lambda \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, k. \end{aligned} \quad (3.18)$$

Potrebno je reći da povećanje broja ograničenja neminovno povećava i kompleksnost problema.

Ranije je rečeno, kod metode težinskog globalnog kriterijuma, da povećanje parametra p može povećati efektivnost metode kod dobijanja kompletnog Pareto optimalnog seta rešenja. Težinski min-max metod dat jednačinom (3.17) predstavlja limes jednačine (3.10) kada parametar p teži beskonačnoj vrednosti. Prema tome jednačina (3.17) obezbeđuje kompletan Pareto optimalni set rešenja variranjem težinskih koeficijenata, odnosno obezbeđuje potrebne uslove za Pareto optimalnost. Međutim, to su dovoljni uslovi za slabu Pareto optimalnost. U slučaju da je rešenje jedinstveno ono je tada Pareto optimalno.

3.3.1.5. Eksponencijalni težinski kriterijum (Exponential weighted criterion)

Kao odgovor na nemogućnost metode težinskih suma da dostigne tačke na nekonveksnim delovima Pareto optimalnog fronta razvijen je eksponencijalni težinski kriterijum [38] koji se opisuje jednačinom:

$$U = \sum_{i=1}^k (e^{pw_i} - 1) \cdot e^{pF_i(\mathbf{x})}, \quad (3.19)$$

gde argumenti sume predstavljaju individualne funkcije uticaja za $F_i(\mathbf{x})$. Iako velike vrednosti parametra p mogu dovesti do numeričkih problema, minimizacija jednačine (3.19) obezbeđuje potrebne i dovoljne uslove za Pareto optimalnost.

3.3.1.6. Metod težinskog proizvoda (Weighted product method)

U nameri da se funkcijama različitog reda veličine omogući ravnopravan uticaj, a da se pri tome izbegne transformacija originalne kriterijumske funkcije, može se posmatrati sledeća formulacija:

$$U = \prod_{i=1}^k [F_i(\mathbf{x})]^{w_i} . \quad (3.20)$$

gde težinski koeficijenti w_i predstavljaju relativan uticaj pojedinih kriterijumskih funkcija. Potrebno je reći da se ova metoda u praksi retko koristi, a razlog je nelinearnost funkcije uticaja U što može dovesti do teškoća u proračunu.

3.3.1.7. Metod ciljnog programiranja (Goal programming method)

Ciljno programiranje je optimizacioni metod kod koga se svakoj kriterijumskoj funkciji $F_j(\mathbf{x})$ zadaje određen cilj b_j [39]. Zatim se ukupno odstupanje od zadatih ciljeva $\sum_{j=1}^k |d_j|$ minimizira, gde d_j predstavlja odstupanje j -te kriterijumske funkcije od cilja b_j . U cilju modelovanja apsolutnih vrednosti, odstupanje d_j se deli na pozitivne i negativne delove tako da je $d_j = d_j^+ - d_j^-$, pri čemu važi $d_j^+ \geq 0$, $d_j^- \geq 0$ i $d_j^+ d_j^- = 0$. Sami tim važi da je $|d_j| = d_j^+ + d_j^-$. Veličine d_i^+ i d_i^- predstavljaju podbačaj i prebačaj, respektivno, u smislu postizanja zadatog cilja. Imajući sve rečeno u vidu, optimizacioni problem može da se formuliše na sledeći način:

$$\begin{aligned}
 & \min_{\mathbf{x} \in X, d^+, d^-} \sum_{i=1}^k (d_i^+ + d_i^-) \\
 & p.o.: F_j(\mathbf{x}) + d_j^+ - d_j^- = b_j, \quad j = 1, 2, \dots, k, \\
 & d_j^+, d_j^- \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, k, \\
 & d_j^+ d_j^- = 0, \quad j = 1, 2, \dots, k.
 \end{aligned} \tag{3.21}$$

U slučaju da nemamo druge informacije za zadati cilj se uzima utopia tačka, odnosno $b_j = F_j^o$. U tom slučaju jednačina (3.21) je teoretski slična kompromisnom programiranju i može se posmatrati kao tip metode globalnog kriterijuma [40]. Treba reći, da uprkos popularnosti i primeni u mnogim oblastima, metoda ciljnog programiranja ne garantuje dobijanje Pareto optimalnih rešenja. Pored toga dodatne promenljive i ograničenja tipa jednakosti u jednačini (3.21) mogu, kod problema velike dimenzionalnost, dovesti to teškoća u proračunu.

Postoji nekoliko varijacija ciljnog programiranja. *Težinsko ciljno programiranje* je podklasa ciljnog programiranja kod koga se težinski faktori dodeljuju odstupanjima pojedinih kriterijumskih funkcija od ciljne vrednosti. *Leksikografsko ciljno programiranje* je metod sličan leksikografskom metodu kod koga se odstupanja $|d_j| = d_j^+ + d_j^-$ kriterijumskih funkcija sortiraju prema prioritetu i minimiziraju na način opisan kod leksikografskog metoda. Obe pomenute varijacije ne garantuju dobijanje Pareto optimalnih rešenja. Rešenja mogu biti Pareto optimalna samo pod određenim uslovima.

Napredno ciljno programiranje [41] je računski gledano brže i efikasnije od klasičnog ciljnog programiranja. Ova metoda se zasniva na težinskom min-max pristupu i može se opisati sledećom jednačinom:

$$\begin{aligned}
 & \min_{\mathbf{x} \in X, \lambda} \lambda \\
 & p.o.: F_i(\mathbf{x}) - w_i \lambda \leq b_i, \quad i = 1, 2, \dots, k,
 \end{aligned} \tag{3.22}$$

gde su w_i težinski faktori koji ukazuju na relativnu važnost pojedinih kriterijumskih funkcija, a λ neograničeni skalar sličnog značenja kao u jednačini (3.18).

3.3.1.8. Metod ograničene kriterijumske funkcije (Bounded objective function method)

Kod metode ograničene kriterijumske funkcije vrši se minimizacija najvažnije kriterijumske funkcije $F_s(\mathbf{x})$. Sve ostale kriterijumske funkcije se koriste da formiraju dodatna ograničenja [41]:

$$l_i \leq F_i(\mathbf{x}) \leq \varepsilon_i, \quad i=1,2,\dots,k, \quad i \neq s. \quad (3.23)$$

Veličine l_i i ε_i , u prethodnoj jednačini, predstavljaju donju i gornju granicu kriterijumske funkcije $F_i(\mathbf{x})$, respektivno. U suštini veličina l_i nije od preterane koristi, osim kad namera proračuna nije minimizacija već postizanje cilja ili dobijanje rešenja u opsegu vrednosti kriterijumske funkcije $F_i(\mathbf{x})$.

Iz prethodne metode proizašla je metoda ε -ograničenja kod koje je veličina l_i isključena [42]. Kod ove metode sistematska varijacija veličine ε_i kao rezultat daje set Pareto optimalnih rešenja. Međutim, neprimerena selekcija veličine $\varepsilon \in R^k$ može rezultirati formulacijom bez dopustivih rešenja. Generalni matematički pristup za selekciju veličine ε_i dat je jednačinom:

$$F_i(x_i^*) \leq \varepsilon_i \leq F_s(x_i^*). \quad (3.24)$$

Ako postoji, rešenje kod metode ε -ograničenja je slabo Pareto optimalno i bilo koja slabo Pareto optimalna tačka može se dobiti ako je dopustiva oblast konveksna i ako su sve kriterijumske funkcije eksplicitno kvazi konveksne [43]. Ako je rešenje jedinstveno onda je svakako Pareto optimalno. Međutim, treba reći da se jedinstvenost rešenja teško može verifikovati čak i u slučaju kada je problem konveksan, a $F_s(\mathbf{x})$ striktno konveksna funkcija.

3.3.1.9. Fizičko programiranje (Physical programming)

Fizičko programiranje vrši preslikavanje kriterijumskih funkcija, ciljeva i polaznih postavki na funkciju uticaja. Ovaj metod obezbeđuje način za inkorporaciju polaznih postavki bez korišćenja relativnih težinskih faktora [44].

Kriterijumske funkcije, ograničenja i ciljevi se tretiraju podjednako kao merni model. Generalno gledano, inženjer formira pojedinačnu funkciju uticaja (funkciju klase) $\bar{F}_i[F_i(\mathbf{x})]$ za svaki merni model. Tipovi mernih modela se vezuju za odgovarajuće tipove funkcija uticaja proizašlih iz osnovne forme, kao što su monotono rastuća, monotono opadajuća i sl. Zatim, za svaki merni model inženjer zadaje numerički opseg koji odgovara različitom stepenu polaznih postavki (željene, tolerantne, neželjene, itd). Ovi opsezi uključuju granice veličina mernog modela i modeluju se kao dodatna ograničenja. Zbog načina na koji se formiraju funkcije klase, fizičko programiranje je u stanju da efektno optimizira kriterijumske funkcije koje se značajno razlikuju u redu veličine. Zahtevi za formiranje različitih opsega veličina za svaki merni model mogu da se posmatraju na dva načina. S jedne strane to nam govori da fizičko programiranje zahteva familijarnost između kriterijumskih funkcija i ograničenja. S druge strane fizičko programiranje omogućava efektanu upotrebu raspoloživih informacija.

Individualne funkcije uticaja (funkcije klase) formiraju kombinovanu funkciju uticaja na način dat jednačinom:

$$F_a(\mathbf{x}) = \log \left\{ \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \bar{F}_i[F_i(\mathbf{x})] \right\}, \quad (3.25)$$

gde veličina m predstavlja broj mernih modela koji se razmatra.

Pokazuje se da fizičko programiranje obezbeđuje dovoljne uslove za Pareto optimalnost [45]. Potrebno je reći da je fizičko programiranje superiorno u odnosu na metod težinskih suma kod nalaženja kompletnog Pareto optimalnog seta rešenja.

3.3.1.10. Rezime

Veliki broj metoda, izloženih u ovom poglavlju, nameće pitanje koja je od njih najbolja. Na žalost, na ovo pitanje se ne može dati adekvatan odgovor. Međutim, metode koje obezbeđuju i potrebne i dovoljne uslove za Pareto optimalnost se preporučuju. Kada je cilj proračuna dobijanje samo jednog rešenja, prednosti dobijanja samo Pareto optimalnih rešenja (koristeći formulacije koje obezbeđuju dovoljne uslove) su jasne. Međutim, i obezbeđivanje potrebnih uslova za Pareto optimalnost ima takođe svoje prednosti. Metode sa ovim osobinama su mnogo efikasnije u reflektovanju

polaznih postavki i preferenci od formulacija koje ne obezbeđuju potrebne uslove odnosno koje mogu da ispuste neke tačke. Ovo je zbog toga što su sve Pareto tačke matematički slične, pri čemu se neke tačke izdvajaju od ostalih usled početnih postavki od strane korisnika. Samim tim nema razloga da se isključe neke tačke kao potencijalna rešenja. Nepotrebno isključivanje pojedinih tačaka, kod nekih metoda, može da udalji inženjera od rešenja koja najbolje reflektuju njegove polazne postavke.

Sada se nameće novo pitanje. Koju od metoda koje obezbeđuju i potrebne i dovoljne uslove za Pareto optimalnost koristiti. Odgovor na ovo pitanje, u određenoj meri, zavisi od toga koliko je inženjer sposoban da što preciznije aproksimira funkciju preferencija. Fizičko programiranje u ovom pogledu je veoma efikasno. Za razliku od težinskih koeficijenata koji predstavljaju najjednostavniju formu individualne funkcije uticaja, fizičko programiranje omogućava inženjeru da kreira mnogo kompleksnije i tačnije individualne funkcije uticaja za svaku kriterijumsku funkciju.

Metoda eksponencijalnog težinskog kriterijuma obezbeđuje i potrebne i dovoljne uslove za Pareto optimalnost. Međutim ona uključuje dodatni parametar p . Izbor ovog parametra predstavlja dodatnu teškoću kod proračuna.

Formulacija sa funkcijom uspeha takođe može da obezbedi potrebne i dovoljne uslove za Pareto optimalnost sve dok se željena (referentna) tačka nalazi van dopustivog kriterijumskog prostora. Ovo je tačno bez obzira da li su težinski koeficijenti uključeni ili ne. Referentna tačka može se koristiti kao nezavisan parametar kod ove metode. Sistematska varijacija željene tačke u nameri da se odredi kompletan set Pareto optimalnih rešenja je nepraktična jer željena tačka ne sme da pripada dopustivom kriterijumskom prostoru što često nije moguće utvrditi. Iz tog razloga ova metoda pre može da se svrsta u metode koje ne koriste polazne postavke i preferencije, pod uslovom da se ne koriste težinski koeficijenti. Može se reći da se željena tačka najefektnije koristi samo kao aproksimacija utopia tačke.

Većina metoda u ovom poglavlju dozvoljava korisniku da formira funkcije uticaja izborom parametara koji se koriste kod odgovarajuće metode. Metod ograničene kriterijumske funkcije kao i mnogo robusniji metod ε -ograničenja odstupaju od ove ideje. Umesto zahteva za težinskim faktorima ili za sortiranjem kriterijumskih funkcija ove metode uvode ograničenja za kriterijumske funkcije. Međutim, vektor ε može da se posmatra i kao set parametara, a ne kao set ograničenja za kriterijumske funkcije.

Dosledno variranje ovih parametara teoretski može dovesti do kompletnog seta Pareto optimalnih rešenja, iako se mogu javiti teškoće u izboru parametara koji omogućavaju dopustivo rešenje. Potrebno je još naglasiti da se različiti tipovi parametara, kod raznih metoda, mogu koristiti da reprezentuju različite tipove polaznih postavki i preferencija. Samim tim, priroda tih preferencija (ciljevi, relativna važnost kriterijumskih funkcija, limiti, itd) može da diktira koji je pristup rešavanju zadatog problema najpodesniji.

Metoda fizičkog programiranja zauzima veoma važno mesto u oblasti višekriterijumske optimizacije. Ova metoda omogućava korisniku zadavanje velike količine informacija. Prednost fizičkog programiranja leži u tome što ona relativno efektno odslikava polazne postavke i preferencije, a to je posledica toga što korisnik mora da obezbedi mnogo informacija. Što se više informacija omogući to će se preferencije preciznije predstaviti.

Neke metode kao što je metoda težinskih suma omogućavaju unos samo male količine informacija o polaznim postavkama. Ovo ne mora da bude veliki nedostatak jer mogu postojati slučajevi kod kojih su polazne informacije ograničene ili one jednostavno ne postoje. Takođe, može da se desi da inženjer ne zna tačno šta želi, pa takav scenario ne opravdava upotrebu metoda koje koriste dodatne informacije. U ekstremnom slučaju inženjer može da nema nijednu polaznu informaciju pa su u tom slučaju metode koje ne koriste polazne informacije daleko prikladnije. Prema tome diskusija o efektnosti preslikavanja polaznih informacija podrazumeva da one postoje, ali to ne mora uvek da bude slučaj. S druge strane ako korisnik raspolaže sa određenom količinom informacija, one mogu da budu presudne kod izbora metode koja će se koristiti.

3.3.2. Metode kod kojih se polazne pretpostavke koriste nakon optimizacionog postupka

U mnogim praktičnim primerima korisnik ne može eksplicitno da izrazi funkciju preferencija, odnosno ne može na adekvatan način da u optimizacioni proces inkorporira i polazne informacije. U tom slučaju mnogo je efektnije da se korisniku omogući izbor između seta rešenja. Algoritmi kod ove grupe metoda se u suštini koriste za određivanje seta Pareto optimalnih rešenja. Ove metode koriste polazne informacije

nakon optimizacionog postupka, odnosno može se reći da koriste princip prvo generiši, pa onda izaberi rešenje.

Upotreba metoda sa težinskim koeficijentima je uobičajeni način za dobijanje Pareto optimalnog seta rešenja. Sve ove metode podrazumevaju više sekvencijalnu optimizaciju sa doslednom varijacijom parametara metode. Kada se ove metode koriste da obezbede samo jedno Pareto optimalno rešenje, podrazumeva se da su polazne pretpostavke uključene u set ulaznih parametara. S druge strane kada korisnik želi set Pareto optimalnih rešenja to podrazumeva varijaciju ulaznih parametara. U ovom slučaju, važno je obezbediti dovoljne uslove za Pareto optimalnost ali takođe i način za dobijanja svih Pareto optimalnih tačaka. Međutim, niz proračuna sa doslednim variranjem težinskih faktora ne garantuje dobijanje adekvatne predstave kompletnog Pareto seta optimalnih rešenja niti dobru distribuciju tačaka na Pareto optimalnom frontu. To je pokazano u prethodnom poglavlju. Treba još naglasiti da iako formulacija teoretski omogućava dovoljne uslove za Pareto optimalnost ne postoji precizan način za izbor parametara u cilju dobijanja samo Pareto optimalnih tačaka. Iz tog razloga, razvijeni su određeni algoritmi koji pronalaze set Pareto optimalnih rešenja koji precizno reprezentuje kompletan Pareto set.

3.3.2.1. Fizičko programiranje (Physical programming)

Iako je inicijalno razvijeno za optimizacione probleme kod kojih se polazne postavke koriste pre samog optimizacionog postupka, fizičko programiranje može biti vrlo efikasno u dobijanju Pareto optimalnih tačaka koje adekvatno reprezentuju kompletan Pareto set optimalnih rešenja, pa čak i u slučajevima kada Pareto optimalni front nije konveksan. Kao što je ranije rečeno, kod fizičkog programiranja korisnik, odnosno inženjer koji rešava optimizacioni problem, zadaje set konstanti koje opisuju numeričke opsege kriterijumskih funkcije i ograničenja. Ovi opsezi su vezani za različite tipove polaznih informacija (željene, tolerantne, neželjene, itd). Ovo se radi za svaki merni model, što rezultuje jedinstvenom funkcijom uticaja. U cilju reprezentovanja kompletnog Pareto optimalnog fronta razvijen je algoritam koji sistematski modifikuje ove konstante gde ih posmatra više kao matematičko sredstvo, a

ne kao sliku polaznih postavki [45]. Kako se konstante menjaju, konture funkcije uticaja krstare kriterijumskim prostorom hvatajući različite Pareto optimalne tačke.

3.3.2.2. Metod normalnog (upravnog) graničnog preseka (Normal boundary intersection method)

Kao odgovor na nedostatke metode sume težinskih koeficijenata razvijena je metoda upravnog (normalnog) graničnog preseka [46]. Ova metoda obezbeđuje način za dobijanje ravnomerno distribuiranih Pareto optimalnih tačaka, adekvatnim variranjem vektora parametara $\mathbf{w}$ od strane korisnika, čak i u slučajevima kada Pareto optimalni front nije konveksan. Ovak pristup može da se opiše sledećom jednačinom:

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{x} \in \mathbf{X}, \lambda} \lambda \\ p.o.: \Phi \mathbf{w} + \lambda \mathbf{n} = \mathbf{F}(\mathbf{x}) - \mathbf{F}^o. \end{aligned} \quad (3.26)$$

U prethodnoj jednačini veličina Φ predstavlja kvadratnu matricu reda k kod koje je i -ta kolona formirana od vektora $\mathbf{F}(\mathbf{x}_i^*) - \mathbf{F}^o$, gde je $\mathbf{F}(\mathbf{x}_i^*)$ vektor kriterijumskih funkcija izračunat za minimum i -te kriterijumske funkcije $\mathbf{x}_i^*$. Dijagonalni elementi matrice Φ jednaki su nuli. Veličina $\mathbf{w}$ predstavlja vektor skalara tako da važi $\sum_{i=1}^k w_i = 1$ i $\mathbf{w} \geq 0$. Veličina $\mathbf{n}$ se naziva kvazi normalni vektor i računa se kao $\mathbf{n} = -\Phi \mathbf{e}$, gde je $\mathbf{e} \in R^k$ vektor kolona jedinica u kriterijumskom prostoru. Pošto su svi članovi matrice Φ pozitivni, negativni znak kod vektora $\mathbf{n}$ osigurava da on bude usmeren prema kriterijumskom prostoru. Zahvaljujući vektoru $\mathbf{n}$ ovaj metod ima osobinu da je za bilo koje $\mathbf{w}$ tačka rešenja nezavisna u odnosu na to kako su kriterijumske funkcije skalirane. Ako se vektor $\mathbf{w}$ sistematski modifikuje rešenja jednačine (3.26) vode ka ravnomernoj distribuciji Pareto optimalnih tačaka koje dobro reprezentuju kompletan Pareto set optimalnih rešenja.

Tehnički gledano ovaj metod nalazi delove granice kriterijumskog prostora $\mathbf{Z}$ koji sadrži Pareto optimalne tačke. Međutim, metod može rezultirati i tačkama koje nisu Pareto optimalne jer ne obezbeđuje dovoljne uslove za Pareto optimalnost. Ovo ne mora nužno da bude mana jer takve tačke mogu pomoći kreiranju “mekše” aproksimacije Pareto fronta.

3.3.2.3. Metod normalnih (upravnih) ograničenja (Normal constrained method)

Metod normalnih ograničenja predstavlja alternativu prethodnoj metodi uz neka unapređenja [47]. Kada se koristi sa normalizovanim kriterijumskim funkcijama i sa Pareto filterom, koji eliminiše rešenja koja nisu Pareto optimalna, ovaj pristup kao rezultat daje set ravnomerno raspoređenih Pareto optimalnih tačaka u kriterijumskom prostoru. U stvari, metod uvek vodi ka Pareto optimalnim rešenjima. U daljem tekstu dat je opis algoritma ove metode.

Pre svega određuje se utopia tačka i njene komponente se koriste za normalizaciju kriterijumskih funkcija koristeći jednačinu (3.6). Individualni minimumi normalizovanih kriterijumskih funkcija formiraju vrh nečega što bi mogli nazvati utopia hiper-površ u kriterijumskom prostoru. Uzorak ravnomerno distribuiranih tačaka na utopia hiper-površi određuje se linearnom kombinacijom vrhova sa adekvatnim variranjem težinskih koeficijenata u kriterijumskom prostoru. Korisnik mora da specificira koliko tačaka želi za adekvatnu predstavu Pareto optimalnog seta. Zatim se svaka tačka iz uzorka projektuje na Pareto optimalnu površinu, odnosno na granicu dopustivog kriterijumskog prostora, rešavanjem pojedinačnog jednokriterijumskog optimizacionog problema. Ovaj problem podrazumeva minimizaciju jedne normalizovane kriterijumske funkcije sa dodatnim ograničenjima tipa nejednakosti. Pod određenim nepovoljnim okolnostima opisani metod može generisati rešenja koja nisu Pareto optimalna, pa se iz tog razloga koristi Pareto filter da ispravi potencijalne greške. Algoritam Pareto filtra pretražuje i briše dominirajuća rešenja. Ovo se radi poređenjem svakog potencijalnog rešenja sa svim ostalim potencijalnim rešenjima. Sva nedominirajuća rešenja se odbacuju. Slična procedura se koristi kod genetičkih algoritama o kojima će biti reči u daljem tekstu.

3.3.2.4. Rezime

Metode u ovoj sekciji omogućavaju korisniku da vidi opcije pre nego što donese odluku. Kod ovih metoda ne razmatra se koja je objektivna funkcija važnija od druge

već koje je rešenje najprikladnije. Izbor može biti urađen u odnosu na prostor upravljačkih veličina ili u odnosu na prostor kriterijumskih funkcija, odnosno finalno rešenje može biti izabrano ili na osnovu vrednosti upravljačkih veličina ili na osnovu vrednosti kriterijumskih funkcija. Pored toga, sva potencijalna rešenja se korisniku mogu prezentovati u grafičkoj ili tabelarnoj formi. Grafička prezentacija rešenja generalno je limitirana trodimenzionalnim prostorom. Čak i trodimenzionalni prikaz Pareto površine može biti nepregledan. U slučaju prikaza rešenja u tabelarnoj formi, izbor jedinstvenog rešenja može biti neprijatan posao, pogotovo ako se radi o relativno velikom broju kriterijumskih funkcija, promenljivih ili potencijalnih rešenja. Samim tim ove metode su najpodesnije za probleme sa relativno malim brojem kriterijumskih funkcija.

U smislu računarskih zahteva i u smislu prezentacije rezultata korisniku, inženjer često mora da odluči koliko tačaka treba koristiti za prezentaciju Pareto optimalnog seta. S jedne strane, proračun sa mnogo tačaka zahteva dodatno kompjutersko vreme ali omogućuje jasniju i kompletniju predstavu Pareto optimalnog fronta. S druge strane, proračun sa manje tačaka ne zahteva puno računarskih resursa i prikaz Pareto rešenja u tabelarnoj formi može biti mnogo podesniji za upotrebu, ali takav proračun može da rezultira nekompletnom predstavom Pareto seta.

Ovoj grupi metoda pripadaju i genetički algoritmi koji takođe omogućavaju određivanje Pareto optimalnog seta rešenja za kasniju analizu i izbor finalnog rešenja na osnovu polaznih postavki. Genetičkim algoritmima, kasnije u ovom radu, biće posvećena posebna pažnja.

3.3.3. Metode koje ne koriste polazne pretpostavke

Često korisnik, kod nekog optimizacionog problema, ne može konkretno da definiše šta želi. Ova sekcija daje opis metoda koje ne zahtevaju polazne postavke, preferencije i informacije. Većina ovih metoda predstavlja pojednostavljenje metoda opisanih u sekciji 3.3.1., tipično bez upotrebe raznih parametara koji se koriste kod ovih metoda. Samim tim ono što je rečeno u sekciji 3.3.1. može takođe da se primeni i u ovoj sekciji.

3.3.3.1. Metod globalnog kriterijuma

Osnovna ideja koja stoji iza većine metoda globalnog kriterijuma je upotreba eksponencijalne sume koja se formira postavljanjem svih težinskih koeficijenata u jednačinama (3.7) i (3.8) na vrednost 1. Ovo vodi jedinstvenoj funkciji $F_g(\mathbf{F})$. Međutim, primarna formulacija globalnog kriterijuma koja se može redukovati na mnoge druge formulacije data je jednačinama (3.9) i (3.10) sa svim težinskim koeficijentima postavljenim na vrednost 1. Varijacije u odnosu na ovaj osnovni model globalnog kriterijuma date su u daljem tekstu.

Tehnike za dobijanje informacija na osnovu sličnosti sa idealnim rešenjem

Kada se formira mera udaljenosti između određenih tačaka, ponekad je neophodno tražiti tačku koja nije samo najbliža utopia tački, već i najudaljenija od neke neželjene tačke. Tehnike za dobijanje informacija na osnovu sličnosti sa idealnim rešenjem koriste ovaj pristup i one su u stvari oblik kompromisnog programiranja [48]. Za utopia tačku može se reći da predstavlja *pozitivno idealno* rešenje. S druge strane, vektor u kriterijumskom prostoru koji je sastavljen od najgorih ili najnepoželjnijih rešenja kriterijumskih funkcija može se nazvati *negativnim idealnim* rešenjem. *Funkcija sličnosti* se formira kao funkcija koja je obrnuto proporcionalna udaljenosti od pozitivno idealnog rešenja i direktno proporcionalna udaljenosti od negativnog idealnog rešenja. Zatim se ovako formirana funkcija maksimizuje.

Metod suma kriterijumskih funkcija

Kada se formulacija data jednačinom (3.7) koristi uz $p=1$ i $\mathbf{w} = 1$, kao rezultat se dobija prosta suma kriterijumskih funkcija. Ovo nije samo specijalan slučaj metode globalnog kriterijuma, već i specijalan slučaj metode težinskih suma. Termin metod suma kriterijumskih funkcija uveden je da se naglasi fundamentalni pristup koji uvek pruža Pareto optimalna rešenja.

Min-max metod

Osnovna min-max formulacija može se iskazati jednačinom:

$$\min_{\mathbf{x} \in \mathbf{X}} \max_i [F_i(\mathbf{x})]. \quad (3.27)$$

Jedan od pristupa rešavanju postavljenog problema, posmatra jednačinu (3.27) kao jednu kriterijumsku funkciju gde $\max_i [F_i(\mathbf{x})]$ predstavlja vrednost kriterijumske funkcije u tački $\mathbf{x}$ [35].

Kod ove metode koristi se i formulacija slična onoj datoj jednačinom (3.18) uz uvođenje dodatnih ograničenja poput $(F_i(\mathbf{x}) - F_i^o) / F_i^o - \lambda \leq 0$ [49].

U nameri da se izbegnu dodatna ograničenja i diskontinuitet jednačine (3.27) razvijena je sledeće aproksimacije:

$$F_g(\mathbf{x}) = \frac{1}{c} \ln \left[\sum_{i=1}^k e^{c F_i(\mathbf{x})} \right], \quad (3.28)$$

$$F_g(\mathbf{x}) = c \log \left[\sum_{i=1}^k e^{F_i(\mathbf{x})/c} \right]. \quad (3.29)$$

Veličina c u gornjim jednačinama naziva se kontrolni parametar. Mada fizičko značenje veličine c nije najjasnije, ona generalno kontroliše tačnost kojom jednačine (3.28) i (3.29) aproksimiraju jednačinu (3.15). Tačnost se povećava ako c teži beskonačnosti kod jednačine (3.28), odnosno kada teži nuli kod jednačine (3.29).

3.3.3.2. Nash-ova arbitraža i metod proizvoda kriterijumskih funkcija

Nash-ova arbitraža je pristup koji je nastao iz teorije igre. Na osnovu aksioma fer igre, Nash je predložio da rešenje arbitražnog problema bude maksimum proizvoda koristi svih igrača odnosno učesnika [50]. U ovom slučaju funkcija uticaja uvek ima nenegativne vrednosti, a ima vrednost nula u odsustvu saradnje, odnosno ako ne dođe do postizanja dogovora. U smislu matematičke formulacije kod koje se individualne kriterijumske funkcije minimiziraju, metod podrazumeva maksimizaciju sledećeg globalnog kriterijuma [51]:

$$F_g(\mathbf{x}) = \prod_{i=1}^k [s_i - F_i(\mathbf{x})], \quad (3.30)$$

gde je $s_i \geq F_i(\mathbf{x})$. Za veličinu s_i se uzima gornja granica i -te funkcije. Na taj način se garantuje da je $\mathbf{F}(\mathbf{x}) < \mathbf{s}$. Ovo obezbeđuje da jednačina (3.30) vodi ka Pareto optimalnoj tački. Alternativno, vrednost s_i može se odrediti i kao vrednost i -te kriterijumske

funkcije u početnoj tački i u tom slučaju mora se dodati ograničenje $F_i(\mathbf{x}) \leq s_i$ kako bi se obezbedila Pareto optimalnost. U svakom slučaju, rešenje kod ovog pristupa, bilo u smislu teorije igre ili u smislu višekriterijumske optimizacije zavisi od vrednosti veličine s_i i jednačina (3.30) teži da značajno unapredi kriterijumske funkcije tako da budu što dalje od vrednosti s_i .

3.3.3.3. Raov metod (Rao's method)

Raov metod zasniva se na upotrebi globalnog kriterijuma tipa proizvoda datog jednačinom (3.30) [52]. Kod ovog metoda najpre se minimizuje sledeća super kriterijumska funkcija:

$$SU = \prod_{i=1}^k [1 - F_i^{norm}(\mathbf{x})], \quad (3.31)$$

gde je $F_i^{norm}(\mathbf{x})$ normalizovana i -ta kriterijumska funkcija sa vrednostima između nula i jedan, takva da je $F_i^{norm} = 1$ najgore moguće rešenje. Zatim se formira Pareto optimalna funkcija FC , kao bilo koja skalarna kriterijumska funkcija koja vodi ka Pareto optimalnom rešenju. Parametri koji su inkorporirani u skalarnu kriterijumsku funkciju se uzimaju kao upravljačke promenljive. Konačno, nova kriterijumska funkcija $KRIT = FC - SU$ se minimizira.

3.3.3.4. Rezime

Iako ova sekcija pokriva nekoliko različitih pristupa, u osnovi postoje dve fundamentalne formulacije: eksponencijalna suma i proizvod kriterijumskih funkcija. Metod suma kriterijumskih funkcija i min-max metod su specijalni slučajevi formulacije sa eksponencijalnim sumama. Većina ostalih pristupa, koji ne zahtevaju polazne informacije, jednostavno predstavljaju varijacije ovih pomenutih fundamentalnih formulacija.

Metod globalnog kriterijuma, kao forma eksponencijalnih suma, je opšti pristup, lak za korišćenje. Kod ovog metoda može se razmatrati značaj veličine eksponenta. Različite vrednosti p u stvari stvaraju situaciju kao da se radi sa polaznim postavkama,

pa se na taj način doprinosi dizajniranju funkcije uticaja. Međutim, rad sa polaznim postavkama tipično se svodi na ukazivanje na relativnu važnost pojedinih funkcija.

Metod proizvoda kriterijumskih funkcija i Nash-ova arbitražna šema omogućavaju pristupe koji ne zahtevaju ozbiljnu transformaciju kriterijumskih funkcija. Međutim, one uvode nelinearnosti, a samim tim to komplikuje proračun. Ovi pristupi su često inkorporirani sa drugim algoritmima kao što je Raov metod.

4. EVOLUTIVNE METODE ZA VIŠEKTERIJUMSKU OPTIMIZACIJU

4.1. Uvod

Evolutivni (genetički) algoritmi, u suštini, oponašaju koncept evolucije u prirodi u svojim pretraživačkim i optimizacionim procedurama. Evolutivne metode postale su popularne poslednjih godina uz konstantan razvoj novih algoritama i teorijskih dostignuća. Jedna od oblasti u kojima su evolutivne metode postale posebno popularne je višekriterijumska optimizacija. Kod problema višekriterijumske optimizacije imamo dve ili više funkcija koje treba optimizovati. Kako su te funkcije najčešće kontradiktorne jedna drugoj to ne postoji jedinstveno rešenje, pa se mora naći set kompromisnih rešenja odnosno Pareto set optimalnih rešenja. Glavna motivacija za upotrebu evolutivnih metoda za rešavanje problema višekriterijumske optimizacije leži u tome što ovi algoritmi rade sa setom potencijalnih rešenja (populacijom) što omogućava nalaženje više članova Pareto optimalnog seta u samo jednom proračunu. Kod klasičnih metoda za tako nešto treba uraditi seriju odvojenih proračuna jer su one koncipirane tako da rade samo sa jednim potencijalnim rešenjem. Pored toga, evolutivne metode su manje osetljive na oblik i kontinualnost Pareto fronta, odnosno lako izlaze na kraj sa isprekidanim i nekonveksnim Pareto frontom. Za druge metode ovo mogu biti ozbiljni problemi pri proračunu.

Pre pregleda evolutivnih metoda za višekriterijumsku optimizaciju, u narednoj sekciji biće dat prikaz genetičkog algoritma za jednokriterijumsku optimizaciju u cilju što boljeg razumevanja evolutivnog koncepta kod ovih metoda. Osnovni principi, pojmovi i operatori koji se koriste kod genetičkih algoritama za jednokriterijumsku optimizaciju koriste se i kod genetičkih algoritama za višekriterijumsku optimizaciju.

4.2. Genetički algoritam za jednokriterijumsku optimizaciju

Kao što je već rečeno, genetički algoritam je metod za pretraživanje i optimizaciju koji se zasniva na principima evolucije i genetike. Genetički algoritam započinje pretraživanje sa proizvoljno odabranim setom rešenja odnosno hromozoma najčešće kodiranih kao binarni string. Ovakav skup hromozoma naziva se populacija. Za svaki hromozom proračunava se odgovarajuća vrednost koja je u relaciji sa kriterijumskom funkcijom optimizacionog problema. Za ovu vrednost u literaturi se koristi termin *fitnes* koji je preuzet iz engleskog jezika. Nakon toga, od tekuće populacije sa hromozomima formira se nova populacija koristeći tri operatora koji podsećaju na genetičke operatore u prirodi: reprodukcija (selekcija), ukrštanje i mutacija. Genetički algoritam funkcioniše kao iterativni postupak uz primenu pomenuta tri operatora u svakoj generaciji sve dok se ne ispuní uslov za zaustavljanje proračuna. Genetički algoritam je, proteklih godina, uspešno primenjen na širokom dijapazonu optimizacionih problema zahvaljujući jednostavnosti i mogućnostima.

4.2.1. Poređenje sa tradicionalnim metodama

Tradicionalne metode za pretraživanje i optimizaciju odlikuju brojne poteškoće kod rešavanja kompleksnih optimizacionih problema. U slučaju optimizacionih problema koji nisu tipski, konvencionalne metode često ne mogu da se primene.

Tradicionalne optimizacione metode mogu se podeliti u dve grupe: direktne i gradijentne metode. Kod direktnih metoda u optimizacionom postupku koriste se samo kriterijumska funkcija i ograničenja, dok se kod gradijentnih metoda koriste prvi i/ili drugi izvodi objektivnih funkcija i ograničenja u cilju pretraživanja. Direktne metode su po pravilu spore i zahtevaju veliki broj proračunavanja kriterijumske funkcije u cilju postizanja konvergencije. Međutim, ove metode se mogu bez prevelikih modifikacija koristiti kod velikog broja problema. S druge strane, gradijentne metode brzo postižu konvergenciju ali nisu efikasne kod problema koji su opisani nediferencijabilnim i nekontinualnim funkcijama. Neki od zajedničkih problema sa kojima se susreću obe grupe tradicionalnih optimizacionih metoda su:

- Konvergencija ka optimalnom rešenju zavisi od izbora inicijalnog rešenja.

- Mnoge metode imaju tendenciju zaglavljivanja na suboptimalnim rešenjima.
- Algoritmi efikasni kod jednog tipa problema nisu nužno efikasno kod drugačijih tipova problema.
- Algoritmi nisu efikasni kod problema koji, pored ostalih, imaju i diskretne promenljive.

Iz navedenih razloga vidi se da se tradicionalne metode ne mogu koristiti uspešno za sve optimizacione probleme pa su iz tih razloga razvijene nove metode koje mogu da prevaziđu nedostatke tradicionalnih metoda. Jedna od njih je metoda genetičkog algoritma.

4.2.2. Motivacija iz prirode

Većina biologa veruje da se osnovna pokretačka sila evolucije u prirodi zasniva na Darvinovom principu opstanka vrsta putem prirodnog odabiranja. U većini situacija u prirodi važe dva jednostvna principa:

1. Ako je u procesu razmnožavanja nastala nadprosečna jedinka, ona će živeti duže nego prosečna jedinka i prema tome imaće više šanse da stvori potomstvo sa karakteristikama boljih od prosečnih.
2. S druge strane, ako nastane jedinka ispod proseka, ona će živeti kraće i biće eliminisana iz populacije.

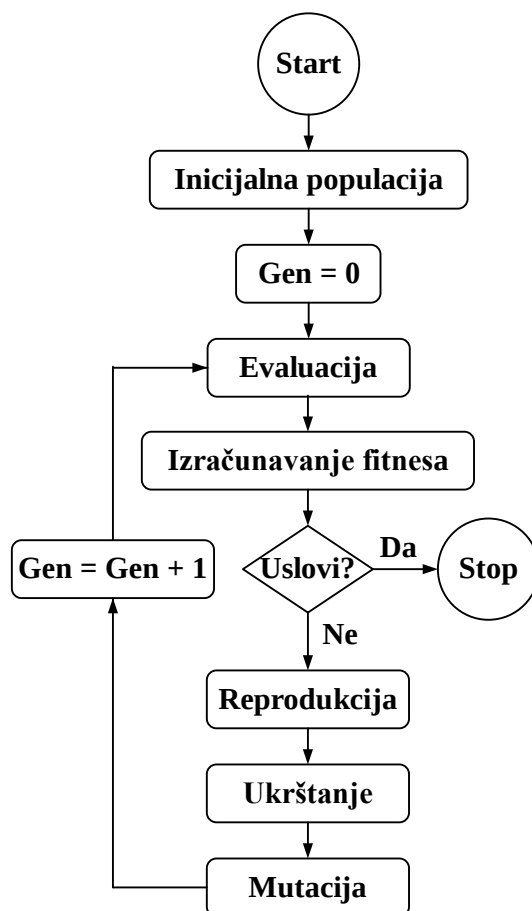
Priznati biolog Richard Dawkins u svojim knjigama [53,54], koristeći Darvinovu teoriju, objasnio je mnoge činjenice iz evolucije. On je pokazao da je visoko drveće u planinama u toku ranog perioda evolucije bilo visoko samo oko pola metra. Ako bi u procesu razmnožavanja jedno stablo proizvelo jedinku samo nekoliko santimetara višu od ostalih stabala, ova jedinka bi imala priliku da dobije više sunca i kiše, a takođe da privuče više insekata u procesu oprašivanja od ostalih stabala. Imajući ovo u vidu ova srećna jedinka imaće duži život i što je mnogo važnije, proizvešće više jedinki sličnih sebi, odnosno jedinke koje su više od proseka. U narednom periodima ovakve jedinke će se proširiti po raspoloživoj teritoriji. S druge strane, ako u procesu genetskog razmnožavanja nastane jedinka niža od ostalih, ona neće imati priliku da u

punoj meri uživa u blagodatima kao susedne jedinke. Ovakva jedinka će, prema tome, živeti kraće.

U genetičkom algoritmu osobine evolucije u prirodi predstavljene su genetičkim operatorima. Genetički algoritam je, u suštini, apstraktni prikaz kompleksne genetike u prirodi i procesa prirodne selekcije. U narednom tekstu biće dat prikaz genetičkog algoritma koji se koristi za rešavanje optimizacionih problema. Pored toga što je genetički algoritam jednostavan, on je robustan i može da se primeni na rešavanja mnogih optimizacionih problema iz raznih oblasti.

4.2.3. Princip rada genetičkog algoritma

Genetički algoritam je iterativna optimizaciona procedura. Umesto rada sa jednim rešenjem u svakoj iteraciji, genetički algoritam radi sa skupom rešenja odnosno populacijom, u svakoj iteraciji. Princip rada ovog algoritma dat je na Sl. 4.1.



Sl. 4.1. Princip rada genetičkog algoritma

Genetički algoritam počinje procesom pretraživanja sa slučajno izabranom populacijom rešenja. Rešenja kod genetičkog algoritma se predstavljaju (kodiraju) stringom fiksne dužine. O samom procesu kodiranja biće više reči u daljem tekstu. Ako uslov za zaustavljanje iterativnog procesa nije zadovoljen, tri različita operatora: reprodukcija, ukrštanje i mutacija se primenjuju u cilju dobijanja nove populacije. Jedna iteracija sa ova tri operatora je poznata kao generacija. Pošto je predstava rešenja kod ovog algoritma slična hromozomu u prirodi, a operatori genetičkog algoritma su slični genetičkim operatorima u prirodi ova optimizaciona procedura nazvana je genetički algoritam. U daljem tekstu biće govora o načinu kodiranja rešenja i o genetičkim operatorima [55].

4.2.3.1. Kodiranje

Kodiranje rešenja ili hromozoma je prvo pitanje koje se nameće kod rešavanja nekog optimizacionog problema metodom genetičkog algoritma. Način kodiranja pre svega zavisi od kompleksnosti problema koji se rešava. Najčešći načini kodiranja su: binarno kodiranje i kodiranje realnim brojevima. Ovi načini kodiranja su uspešno primenjeni na mnogim problemima. U tekstu koji sledi biće najpre date osnove binarnog kodiranja kao i prikaz osnovnih operatora pri binarnom kodiranju, a nakon toga prikaz kodiranja realnim brojevima i odgovarajući operatori.

Binarno kodiranje je tip kodiranja koji se najčešće primenjuje zbog toga što je ovaj tip kodiranja najjednostavniji. Kod binarnog kodiranja sve varijable se kodiraju kao binarni string fiksne dužine. Na primer, naredni binarni string predstavlja problem sa N promenljivih:

$$\underbrace{11010}_{x_1} \underbrace{1000110}_{x_2} \underbrace{101}_{x_3} \cdots \underbrace{1010}_{x_N}$$

Proizvoljna promenljiva x_i kodirana sa substringom dužine l_i , pa je prema tome ukupan broj binarnih predstava ove promenljive 2^{l_i} . Donja granica za ovu promenljivu $x_i^{\min}$ predstavljena je substringom (00...0), dok je gornja granica $x_i^{\max}$ predstavljena substringom (11...1). Bilo koji drugi string s_i može se dekodirati u promenljivu x_i prema sledećoj jednačini:

$$x_i = x_i^{\min} + \frac{x_i^{\max} - x_i^{\min}}{2^{l_i} - 1} DV(s_i), \quad (4.1)$$

gde je $DV(s_i)$ dekodirana vrednost substringa s_i i ona u stvari predstavlja decimalnu predstavu binarnog broja. Dužina substringa l_i određena je na osnovu tačnosti koja se želi za promenljivu. Primera radi, ako se želi tačnost od tri decimalna mesta za i -tu promenljivu, ukupan broj binarnih predstava ove promenljive mora biti $(x_i^{\max} - x_i^{\min})/0.001$. Imajući ovo u vidu, potrebna dužina substringa može se izračunati prema jednačini:

$$l_i = \log_2 \left(\frac{x_i^{\max} - x_i^{\min}}{\varepsilon_i} \right), \quad (4.2)$$

gde parametar ε_i predstavlja željenu tačnost za i -tu promenljivu. Ukupna dužina stringa sa N promenljivih je prema tome $l = \sum_{i=1}^N l_i$. Predstava rešenja binarnim stringom oponaša hromozom u prirodi koji predstavlja skup gena.

U inicijalnoj populaciji binarni string sa l bita formira se na proizvoljan način, pri čemu je verovatnoća pojave bita 0 ili 1 na svakoj od l pozicija ista. Kada je binarni string formiran, iz njega se izdvaja prvih l_1 bita na osnovu kojih se izračunava pripadajuća promenljiva x_1 prema jednačini (4.1) i prema izabranoj donjoj i gornjoj granici za promenljivu x_1 . Nakon toga iz stringa se izdvaja narednih l_2 bita i izračunava se promenljiva x_2 . Ovaj proces se nastavlja sve dok se iz kompletnog binarnog stringa ne dobije svih N promenljivih. Prema tome, binarni string dužine l predstavlja kompletno rešenje sa N promenljivih. Kada su vrednosti svih promenljivih poznate može se izračunati kriterijumska funkcija $f(x_1, x_2, \dots, x_N)$.

Kod genetičkog algoritma, svakom stringu, bilo da je kreiran u inicijalnoj populaciji ili u nekoj od narednih generacija, potrebno je dodeliti odgovarajuću vrednost (fitnes) koja je u relaciji sa vrednošću objektivne funkcije. Za optimizacioni problem gde se traži maksimum kriterijumske funkcije fitnes vrednost za string može da bude jednaka vrednosti kriterijumske funkcije za string. Kod minimizacije cilj je nalaženje rešenja sa minimalnom vrednošću kriterijumske funkcije. Prema tome, fitnes vrednost može se računati kao recipročna vrednost od vrednosti objektivne funkcije tako da rešenje sa manjom vrednošću kriterijumske funkcije ima veću fitnes vrednost.

Uobičajeno je da se kod minimizacije između fitness vrednosti i vrednosti kriterijumske funkcije koristi relacija data sledećom jednačinom:

$$Fitness = \frac{1}{1 + f(x_1, x_2, \dots, x_N)}. \quad (4.3)$$

Kodiranje promenljivih u formi binarnog stringa u sebi nosi brojne prednosti. Ovakvo kodiranje omogućava distanciranje samog proračuna od aktuelnog problema u smislu da algoritam radi sa stringom odgovarajuće dužine koji reprezentuje određeni broj promenljivih posmatranog problema. Prema tome, isti računarski program za genetički algoritam može da se koristi za različite optimizacione probleme, pri čemu se samo menja definicija binarnog stringa. Ovo omogućava da genetički algoritam ima primenu na širok dijapazon problema.

4.2.3.2. Reprodukcija

Reprodukcija ili selekcija je obično prvi operator koji se vrši nad populacijom. Reprodukcijskom se vrši izbor dobrih hromozoma iz populacije i formira se grupa hromozoma za dalje razmnožavanje, odnosno primenu ostalih operatora. Za ove izabrane hromosome koristi se i termin roditelji. Postoje različiti operatori reprodukcije ali suština je u tome da se iz osnovne populacije biraju nadprosečni hromozomi koji formiraju grupu za dalje razmnožavanje. U praksi se najčešće koristi *proporcionalni* operator selekcije, gde se izbor hromozoma iz tekuće populacije vrši prema verovatnoći koja je proporcionalna fitnessu tog hromozoma. Drugim rečima, i -ti hromozom u populaciji se bira sa verovatnoćom proporcionalnom sa f_i (fitnessom za taj hromozom). Pošto je veličina populacije u osnovnom obliku genetičkog algoritma nepromenljiva, kumulativna verovatnoća za sve hromosome u populaciji mora da bude jednaka jedinici.

Prema tome, verovatnoća izbora i -tog hromozoma je $f_i / \sum_{j=1}^N f_j$ gde je N veličina

populacije. Jedan od načina da se ostvari proporcionalna selekcija je korišćenje principa ruleta. Točak ruleta se podeli na N segmenata pri čemu veličina pojedinih segmenata zavisi od verovatnoće izbora za pojedine hromosome po principu što je veća verovatnoća, veći je segment. Ako je, na primer, verovatnoća izbora za jedan hromozom 10 %, njegov segment imaće veličinu 10-og dela punog kruga. Točak ruleta se okreće N

puta i pri svakom okretanju bira se po jedan hromozom pri čemu se formira N hromozoma koji predstavljaju grupu za razmnožavanje. Koristeći gore opisani mehanizam za selekciju, očekuje se da i -ti hromozom bude kopiran $f_i / \bar{f}$ puta u grupu za razmnožavanje, gde je $\bar{f}$ srednja vrednost fitnesa za populaciju.

Pored gore opisanog operatora selekcije često se koristi i *turnirski* operator selekcije. Primena ovog operatora je vrlo jednostavna. Iz tekuće populacije, po slučajnom izboru, uzimaju se dva hromozoma i bira se bolji od njih prema fitnes vrednosti. Ako se operator primeni sistematski, najbolji hromozom biće kopiran u grupu za razmnožavanje tačno dva puta. Važno je naglasiti da za ovaj operator reprodukcije nije potrebno računati fitnes već poređenje hromozoma može da se vrši na osnovu vrednosti kriterijumske funkcije. Na primer, kod minimizacije, od dva hromozoma biramo onaj koji ima manju vrednost kriterijumske funkcije.

4.2.3.3. Ukrštanje

Operator ukrštanja primenjuje se na grupu hromozoma dobijenu u procesu reprodukcije. Kao i kod reprodukcije postoji više različitih operatora ukrštanja. Bez obzira na to, suština ovog operatora je da se po slučajnom izboru odabiraju dva hromozoma koja vrše razmenu svojih delova. Kod operatora ukrštanja u jednoj tački, oba hromozoma se presecaju na određenom mestu pri čemu hromozomi razmenjuju delove stringa desno od tačke preseka i na taj način formiraju dva nova hromozoma kao što je prikazano na narednoj ilustraciji:

$$\begin{array}{l}
 \text{Roditelj 1} \quad 1 \quad 1 \quad 0 \quad 1 \quad 1 \mid 0 \quad 0 \\
 \text{Roditelj 2} \quad 0 \quad 1 \quad 1 \quad 0 \mid 1 \quad 1
 \end{array}
 \Rightarrow
 \begin{array}{l}
 1 \quad 0 \quad 1 \quad 1 \mid 1 \quad 1 \quad \text{Dete 1} \\
 0 \quad 1 \quad 1 \quad 0 \mid 0 \quad 0 \quad \text{Dete 2}
 \end{array}$$

Mesto ukrštanja dva hromozoma se bira po principu slučajnog izbora. To nam ne garantuje da će svi novonastali hromozomi biti bolji od hromozoma u tekućoj populaciji. To ne treba da brine jer će se u narednoj generaciji operatorima selekcije veća šansa dati boljim hromozomima dok će lošiji nestati iz populacije.

Kod operatora ukrštanja u dve tačke po principu slučajnog izbora biraju se dva mesta presecanja u hromozomima i sadržaj hromozoma između te dva tačke se razmenjuje između hromozoma kao što je dato na narednoj ilustraciji:

$$\begin{array}{l} \text{Roditelj 1} \quad 1 \quad 1 \quad 0 \mid 1 \quad 1 \mid 0 \quad 0 \\ \text{Roditelj 2} \quad 0 \quad 1 \mid 1 \quad 0 \mid 1 \quad 1 \end{array} \Rightarrow \begin{array}{l} 1 \quad 0 \mid 1 \quad 0 \mid 0 \quad 0 \quad \text{Dete 1} \\ 0 \quad 1 \mid 1 \quad 1 \mid 1 \quad 1 \quad \text{Dete 2} \end{array}$$

Ova ideja se može proširiti i na operator ukrštanja u više tačaka. Ekstremni slučaj bio bi operator uniformnog ukrštanja. Kod ovog operatora svaki bit iz oba roditeljska hromozoma u nove hromozome bi se selektovao sa verovatnoćom 0.5. Princip je dat na sledećoj ilustraciji:

$$\begin{array}{l} \text{Roditelj 1} \quad 1 \quad 1 \quad 0 \quad \underline{1} \quad 1 \quad \underline{0} \quad \underline{0} \\ \text{Roditelj 2} \quad \underline{0} \quad \underline{1} \quad 1 \quad \underline{0} \quad 1 \quad 1 \end{array} \Rightarrow \begin{array}{l} 0 \quad 1 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \text{Dete 1} \\ 1 \quad 0 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad \text{Dete 2} \end{array}$$

Na prethodnoj ilustraciji bitovi markirani crticom formiraju prvi hromozom dok neoznačeni bitovi formiraju drugi novonastali hromozom.

Značajno je reći da svrha operatora ukrštanja dvostruka. Glavna namena ovog operatora je pretraživanje prostora u cilju nalaženja optimalnog rešenja. Druga svrha je ta da se u tom procesu pretraživanja sačuvaju informacije sadržane u roditeljskim hromozomima iz razloga što su roditeljski hromozomi primeri dobrih hromozoma dobijenih u procesu reprodukcije. Kod operatora ukrštanja u jednoj tački pretraživanje nije intenzivno ali maksimum informacija iz roditeljskih hromozoma je sačuvano. S druge strane kod operatora uniformnog ukrštanja pretraživanje je veoma intenzivno ali se iz roditeljskih hromozoma prenosi veoma malo informacija. U nameri da se sačuvaju prethodno dobijeni dobri hromozomi, operator ukrštanja se ne primenjuje na sve članove populacije. Ako se usvoji verovatnoća ukrštanja p_c onda se operator ukrštanja primenjuje na $100 \cdot p_c$ % hromozoma, dok se ostalih $100 \cdot (1 - p_c)$ % hromozoma jednostavno kopira u novu populaciju. Iako se za hromozome koji se prepisuju direktno u novu populaciju mogu izabrati najbolji obično se izbor vrši stohastički.

4.2.3.4. Mutacija

Operator mutacije je uglavnom zadužen za pretraživački aspekt genetičkog algoritma i pored toga što se primenjuje u maloj meri. Suština operatora mutacije je da menja bit 1 u bit 0 i obrnuto u hromozomu i to sa malom verovatnoćom mutacije. Princip mutacije dat je na narednoj ilustraciji:

$$1 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad \Rightarrow \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 1 \quad 0$$

U prethodnom primeru peti gen u hromozomu promenio je svoju vrednost sa 0 na 1 i na taj način je kreiran novi hromozom. Potreba za mutacijom ogleda se u nameri da se postigne raznovrsnost u populaciji. Ako se, na primer, u nekom hromozomu na određenoj poziciji ima bit 1, a za optimalno rešenje je potrebno da na tom mestu bude bit 0, operatorom mutacije se to može postići, za razliku od operatora ukrštanja koji to ne bi mogao da ostvari. Operator mutacije omogućava da se uz određenu verovatnoću bit 1 promeni u bit 0. Prema tome, za lokalno unapređenje rešenja, mutacija je veoma korisna.

Nakon što se reprodukcija, ukrštanje i mutacija primene na celu populaciju, jedna generacija genetičkog algoritma je kompletirana. Ova tri operatora su jednostavna i lako razumljiva. Operator reprodukcije vrši selekciju dobrih hromozoma, a operator ukrštanja vrši rekombinaciju dva po dva hromozoma s ciljem dobijanja još boljih hromozoma. Operator mutacije menja hromozom na lokalnom nivou u nadi da će se dobiti bolji hromozom, odnosno bolje rešenje. Potrebno je naglasiti da bez obzira kakvi hromozomi nastaju u procesu ukrštanja i mutacije, procesom reprodukcije u narednu generaciju prolaze dobri hromozomi, dok loši hromozomi nestaju iz populacije.

4.2.3.5. Kodiranje realnim brojevima i odgovarajući operatori

Pored binarnog kodiranja, za širok dijapazon problema postoji potreba za kodiranjem rešenja realnim brojevima. Sledeća ilustracija daje primer ovakvog kodiranja.

$$\underbrace{1.23}_{x_1} \underbrace{146.4}_{x_2} \underbrace{2.3}_{x_3} \cdots \underbrace{10.6}_{x_N}$$

Na gore prikazani način modelovan je problem sa N realnih promenljivih. Sa ovakvim kodiranjem standardni operatori reprodukcije, opisani ranije, mogu da se koriste bez problema. Međutim, operatori ukrštanja i mutacije za binarno kodiranje ne mogu da se primene i na populaciju kodiranu realnim brojevima. Za realne promenljive koriste se simulirani binarni operator ukrštanja i polinomni operator mutacije [56]. Primena simuliranog binarnog operatora ukrštanja na dva roditeljska hromozoma p_1 i p_2 vrši se u tri koraka:

Korak 1: Bira se veličina u po slučajnom izboru tako da važi $u \in [0,1]$.

Korak 2: Računa se veličina β_q prema jednačini:

$$\beta_q = \begin{cases} (2u)^{\frac{1}{\eta_c+1}} & \text{ako je } u \leq 0.5 \\ \left(\frac{1}{2(1-u)}\right)^{\frac{1}{\eta_c+1}} & \text{ako je } 0.5 < u < 1 \end{cases} \quad (4.4)$$

Korak 3: Računaju se dva nova rešenja prema jednačinama:

$$c_1 = 0.5[(1 + \beta_q)p_1 + (1 - \beta_q)p_2], \quad (4.5)$$

$$c_2 = 0.5[(1 - \beta_q)p_1 + (1 + \beta_q)p_2]. \quad (4.6)$$

U koraku 2 veličina η_c predstavlja distribicioni indeks koji kontroliše rasprostranjenost rešenja. Ova veličina se obično bira iz opsega $[1,10]$.

Primena polinomnog operatora mutacije na rešenja dobijena ukrštanjem takođe se vrši u tri koraka:

Korak 1: Bira se veličina r po slučajnom izboru tako da važi $r \in [0,1]$.

Korak 2: Računa se veličina $\bar{\delta}$ prema jednačini:

$$\bar{\delta} = \begin{cases} (2r)^{\frac{1}{(\eta_m+1)}} - 1 & \text{ako je } r < 0.5 \\ 1 - [2(1-r)]^{\frac{1}{(\eta_m+1)}} & \text{ako je } r \geq 0.5 \end{cases} \quad (4.7)$$

Korak 3: Računa se novo mutirano rešenje u odnosu na rešenje c dobijeno operatorima ukrštanja, prema jednačini:

$$c' = c + (x^{(u)} - x^{(l)})\bar{\delta}, \quad (4.8)$$

gde su $x^{(u)}$ i $x^{(l)}$ gornja i donja granica za promenljivu x .

U koraku 2 veličina η_m predstavlja distribicioni indeks koji kontroliše odstupanje mutiranog rešenja c' u odnosu na rešenje c . Ova veličina se obično bira iz opsega $[10,100]$.

Primenom gore opisanih operatora dobija se nova populacija za dalje proračune. Potrebno je naglasiti da su opisani operatori samo jedna od mogućih varijanti za operatore ukrštanja i mutacije kod kodiranja realnim brojevima. U praksi se koriste i drugi operatori. U suštini korisnik može prema potrebi i prema zahtevima datog problema sam da kreira operatore. Pri tome je neophodno voditi računa da ti operatori poseduju osobine koje će dovesti do rešenja postavljenog problema. Takođe, treba reći da nije nužno da sve promenljive u hromozomu budu kodirane na isti način. Izbor načina kodiranja pre svega zavisi od problema koji se rešava tako da ne postoje prepreke da se deo promenljivih u hromozomu kodira binarno, a preostali deo preko realnih brojeva. Ovako kodiranje je ponekad praktičnije i može brže dovesti do rešenja.

4.2.4. Mini primer proračuna

Principi genetičkog algoritma opisani u prethodnom tekstu su jednostavni i lako razumljivi. Bez obzira na to, iznenađujuće je kako tako jednostavni operatori i mehanizmi imaju veliki potencijal za pretraživanje. Kroz naredni jednostavni primer biće pokazano kako genetički algoritam radi. Optimizacioni problem je dat narednom jednačinom:

$$\begin{array}{l} \max \sin(x) \\ \text{uz uslov } 0 \leq x \leq \pi \end{array} \quad (4.9)$$

Potrebno je naći maksimum funkcije $\sin(x)$ uz data ograničenja po promenljivoj x . Za prikaz promenljive x u opsegu $[0, \pi]$ upotrebiće se binarno kodiranje stringom dužine 5, tako da string (00000) predstavlja rešenje $x=0$, a string (11111) predstavlja rešenje $x=\pi$. Preostalih 30 stringova uniformno mapiraju opseg $[0, \pi]$. Proračun će se izvršiti sa populacijom sa četiri hromozoma. Upotrebiće se proporcionalan operator selekcije, operator ukrštanja u jednoj tački sa verovatnoćom $p_c=1$ i neće se koristiti operator mutacije ($p_m=0$). Proračun počinje formiranjem inicijalne populacije od četiri hromozoma po principu slučajnog izbora. Zatim se primenjuju operatori genetičkog algoritma kao što je prikazano u Tabeli 4.1.

Tabela 4.1. Rezultati proračuna mini primera (prvi deo Tabele 4.1)

Inicijalna populacija						
Stringovi	DV	x	$f(x)$	f_i/f_{sr}	BKS	Selektovani stringovi
0 1 0 0 1	9	0.912	0.791	1.39	1	0 1 0 0 1
1 0 1 0 0	20	2.027	0.898	1.58	2	1 0 1 0 0
0 0 0 0 1	1	0.101	0.101	0.18	0	1 0 1 0 0
1 1 0 1 0	26	2.635	0.485	0.85	1	1 1 0 1 0
			f_{sr}	0.569		

Tabela 4.1. Rezultati proračuna mini primera (drugi deo Tabele 4.1)

Sel. stringovi	TU	Nova populacija			
		Stringovi	DV	x	$f(x)$
0 1 0 0 1	3	0 1 0 0 0	8	0.811	0.725
1 0 1 0 0	3	1 0 1 0 1	21	2.128	0.849
1 0 1 0 0	2	1 0 0 1 0	18	1.824	0.968
1 1 0 1 0	2	1 1 1 0 0	28	2.838	0.299
					f_{sr} 0.710

Prvi string (01001) se dokodira i dobija se vrednost 9. Ova vrednost odgovara rešenju $x=0.912$, dok je odgovarajuća vrednost kriterijumske funkcije $\sin(0.912)=0.791$. Na identičan način vrši se proračun i za ostala tri stringa. Prema proporcionalnoj šemi reprodukcije na osnovu vrednosti kriterijumske funkcije, proračunava se očekivani broj kopija pojedinih stringova koji ulaze u grupu selektovanih stringova. Ti podaci su dati u koloni 5 prvog dela Tabele 4.1. Pošto se radi o decimalnim vrednostima u koloni 6 su date adekvatne celobrojne vrednosti (BKS – broj kopiranih stringova). Kolona 7 prvog dela Tabele 4.1 predstavlja grupu selektovanih stringova koji su spremni za dalje proračune odnosno za primenu operatora ukrštanja. Može se primetiti da treći string u inicijalnoj populaciji ima veoma malu vrednost kriterijumske funkcije u odnosu na prosek vrednosti kriterijumskih funkcija cele populacije pa je on operatorom selekcije eliminisan iz daljeg razmatranja. S druge strane, drugi string u inicijalnoj populaciji je dobar string pa je on selektovan dva puta. Mesto ukrštanja kod operatora ukrštanja odabrano je po principu slučajnog izbora. Ukrštanje kod prva dva stringa izvršeno je na poziciji 3, a kod druga dva na poziciji 2, kao što je i dato u drugoj koloni drugog dela Tabele 4.1 (TU – tačka ukrštanja). Operatorom ukrštanja dobijena su četiri nova stringa prikazana u trećoj koloni donje tabele. Kako nije primenjen operator mutacije nijedan bit kod ova četiri nova stringa nije promenio vrednost. Prema tome u trećoj koloni

predstavljena je populacija na kraju jednog ciklusa GA operatora. Svi stringovi ove populacije su dekodirani, mapirani i izračunate su odgovarajuće vrednosti kriterijumske funkcije. Izračunate veličine date su u 4, 5 i 6 koloni drugog dela Tabele 4.1. Ovim je završena jedna generacija simulacije genetičkog algoritma. Kod nove populacije prosek vrednosti kriterijumskih funkcija iznosi 0.71 što je značajno poboljšanje u odnosu na inicijalnu populaciju. Može se reći da i pored toga što svi operatori rade po principu slučajnog izbora, genetički algoritam pomoću ova tri operatora predstavlja metodu za direktno pretraživanje koja uglavnom rezultira poboljšanjem rešenja iz generaciju u generaciju.

4.3. Genetički algoritmi za višekriterijumsku optimizaciju

Kao što je ranije rečeno kod genetičkih algoritama za višekriterijumsku optimizaciju koriste se isti pojmovi, principi i operatori kao i kod genetičkih algoritama za jednokriterijumsku optimizaciju. Međutim, koncept *dominacije*, koji za jednokriterijumsku optimizaciju ne igra nikakvu ulogu, za genetičke algoritme za višekriterijumsku optimizaciju ima poseban značaj. Ovaj koncept već je definisan u sekciji 3.2.3. ali će se ovde dati dodatna pojašnjenja.

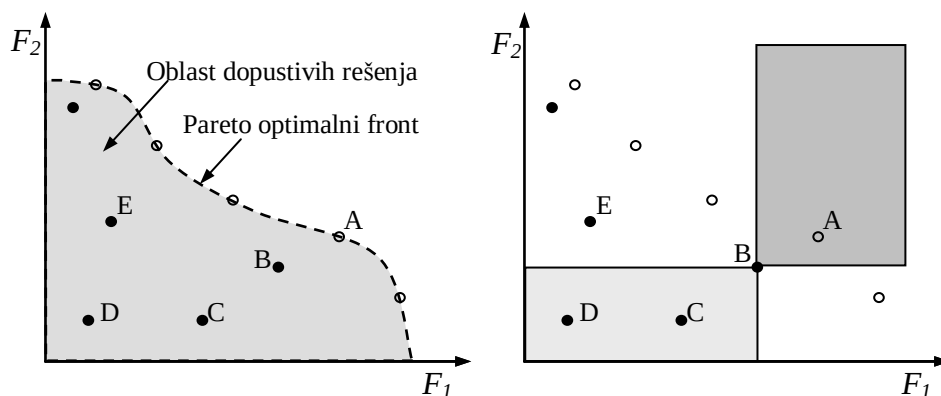
4.3.1. Koncept dominacije

Kod jednokriterijumske optimizacije, set dopustivih rešenja kompletno je uređen prema kriterijumskoj funkciji F . Drugim rečima, za dva rešenja koja pripadaju prostoru upravljačkih veličina $(\mathbf{a}, \mathbf{b} \in \mathbf{X})$ važi $F(\mathbf{a}) \geq F(\mathbf{b})$ ili $F(\mathbf{b}) \geq F(\mathbf{a})$. Cilj jednokriterijumske optimizacije, na primer, je nalaženje jednog ili više rešenja koji maksimiziraju funkciju F . Međutim, kada je više kriterijumskih funkcija uključeno, situacija se menja. Generalno gledano, set dopustivih rešenja nije kompletno, već parcijalno uređen [57]. Ovo je ilustrovano na Sl. 4.2 levo gde je razmatrana maksimizacija dve kriterijumske funkcije F_1 i F_2 . Rešenje predstavljeno tačkom $\mathbf{B}$ je bolje od rešenja predstavljenog tačkom $\mathbf{C}$ jer u tački $\mathbf{B}$ vrednosti obe kriterijumske funkcije su veće nego u tački $\mathbf{C}$. Ovakvo poređenje važi i kada imamo unapređenje samo jedne funkcije kao što je slučaj kod tačaka $\mathbf{C}$ i $\mathbf{D}$. Obe tačke imaju jednaku vrednost za

kriterijumsku funkciju F_2 dok tačka **C** ima veću vrednost kriterijumske funkcije F_1 od tačke **D**. Samim tim, rešenje predstavljeno tačkom **C** je bolje od rešenja koje predstavlja tačka **D**. Međutim, kada se porede rešenja predstavljena tačkama **B** i **E** ne možemo reći koje je od ovih rešenja bolje. Rešenje predstavljeno tačkom **B** ima veću vrednost kriterijumske funkcije F_1 od rešenja datog tačkom **E**, ali rešenje dato tačkom **E** ima bolju vrednost kriterijumske funkcije F_2 od rešenja datog tačkom **B**. Prema tome, za dva vektora upravljačkih veličina **a** i **b**, kod višekriterijumske optimizacije imamo tri mogućnosti: $F(\mathbf{a}) \geq F(\mathbf{b})$, $F(\mathbf{b}) \geq F(\mathbf{a})$ i $F(\mathbf{a}) \not\geq F(\mathbf{b}) \wedge F(\mathbf{b}) \not\geq F(\mathbf{a})$. U cilju klasifikovanja rešenja koristi se pojam *dominacije*. Za dva vektora upravljačkih veličina **a** i **b** važi sledeća definicija koncepta dominacije:

$$\begin{aligned} \mathbf{a} > \mathbf{b} \text{ (a dominira nad b)} & \quad \text{akko } F(\mathbf{a}) > F(\mathbf{b}) \\ \mathbf{a} \succeq \mathbf{b} \text{ (a slabo dominira nad b)} & \quad \text{akko } F(\mathbf{a}) \geq F(\mathbf{b}) \\ \mathbf{a} \sim \mathbf{b} \text{ (a je indiferentno za b)} & \quad \text{akko } F(\mathbf{a}) \not\geq F(\mathbf{b}) \wedge F(\mathbf{b}) \not\geq F(\mathbf{a}). \end{aligned} \quad (4.10)$$

Data definicija važi za slučaj maksimizacije dve kriterijumske funkcije. Definicija za slučaj minimizacije funkcija je analogna.



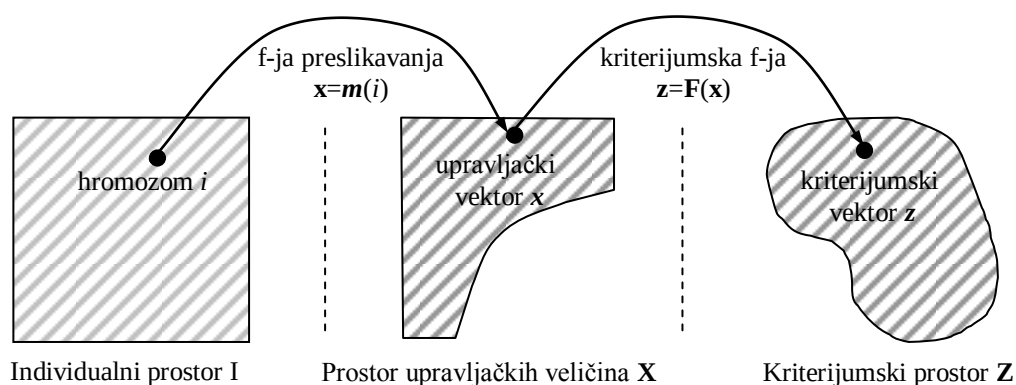
Sl. 4.2. Ilustrativni primer Pareto optimalnosti u kriterijumskom prostoru (levo) i moguće relacije između rešenja u kriterijumskom prostoru (desno)

Na Sl. 4.2 (desno) data je ilustracija odnosa između rešenja u kriterijumskom prostoru. Kao referentno rešenje izabrano je rešenje predstavljeno tačkom **B**. Svetlo sivi pravougaonik predstavlja region u kriterijumskom prostoru koji je dominirajući od strane rešenja predstavljenog tačkom **B**, odnosno sva rešenja u ovom regionu su lošija od tačke **B**. S druge strane, tamno sivim pravougaonikom predstavljen je region u

kriterijumskom prostoru čija pripadajuća rešenja dominiraju nad rešenjem predstavljenim tačkom **B**. Drugim rečima sve tačke iz ovog regiona bolje su od tačke **B**. Za sva ostala rešenja u kriterijumskom prostoru koja ne pripadaju osenčenim pravougonicima kažemo da su indiferentna u odnosu na rešenje dato tačkom **B**.

4.3.2. Osnovna struktura genetičkog algoritma za višekriterijumsku optimizaciju

U ovoj sekciji biće prikazana osnovna struktura jednog genetičkog algoritma, odnosno kako se od početne populacije sastavljene od binarno kodiranih hromozoma dolazi do populacije koja predstavlja finalno rešenje višekriterijumske optimizacije. Na Sl. 4.3 data je relacija između individualnih članova populacije, prostora upravljačkih veličina i kriterijumskog prostora.

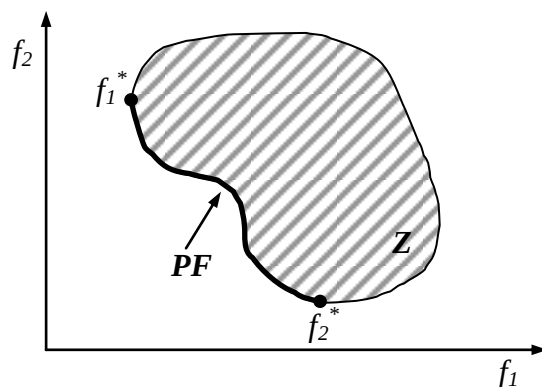


Sl. 4.3. Relacija između individualnog prostora, prostora upravljačkih veličina i kriterijumskog prostora.

Genetički algoritam polazi od individualnog člana populacije (hromozoma) $i \in \mathbf{I}$ koji se obično binarno kodira. Funkcijom preslikavanja m hromozom i se dekodira u upravljački vektor $x = m(i)$. Primenom kriterijumske funkcije F na upravljački vektor x dobija se odgovarajući vektor u kriterijumskom prostoru $z = F(x)$ na osnovu koga se računa vrednost fitnesa koji odgovara hromozomu i .

Kao rezultat višekriterijumske optimizacije dobija se set optimalnih rešenja, odnosno Pareto optimalna rešenja ili Pareto front. Radi ilustracije, Na Sl. 4.4, u prostoru

kriterijumskih funkcija, prikazan je Pareto front PF za slučaj minimizacije dve kriterijumske funkcije f_1 i f_2 . Na Sl. 4.4 posebno su naznačene minimalne vrednosti pojedinih kriterijumskih funkcija f_1^* i f_2^* , a takođe je označen i dopustivi prostor kriterijumskih funkcija Z . Pareto front se prostire po ivici prostora Z između tačaka f_1^* i f_2^* i na slici je prikazan punom linijom. U suštini Pareto front čine optimalna rešenja koja se nalaze na ovoj liniji. Osnovna osobina Pareto fronta je ta da se bilo koje rešenje koje pripada Pareto frontu ne može poboljšati u odnosu na jednu kriterijumsku funkciju bez degradacije u odnosu na drugu kriterijumsku funkciju. Pošto se Pareto front sastoji od velikog broja rešenja mogu se definisati dva osnovna cilja višekriterijumske optimizacije [5], a to su određivanje seta rešenja koja su nalaze u blizini Pareto optimalnog fronta, kao i njihovo uniformno rasprostiranje po ovom frontu.



Sl. 4.4. Ilustracija Pareto fronta za slučaj minimizacije dve kriterijumske funkcije

Populacija $\mathbf{P}$ na nekoj iteraciji t označena je simbolom $\mathbf{P}_t$, a simbol “+” predstavlja operator unije skupova. Bazna struktura genetičkog algoritma odvijala bi se po sledećoj šemi:

Ulaz: N – veličina populacije
 T – maksimalni broj generacija
 p_c – verovatnoća ukrštanja
 p_m – verovatnoća mutacije

Izlaz: $\mathbf{A}$ – nedominirajući set rešenja

Korak 1. Inicijalizacija: Inicijalizovati $\mathbf{P}_0 = \emptyset$ i $t = 0$. Za svako $i = 1, \dots, N$:

- a) Izabrati hromozom $i \in \mathbf{I}$ u skladu sa nekom verovatnoćom distribucije.
- b) Dodati novi hromozom populaciji $\mathbf{P}_0 = \mathbf{P}_0 + \{i\}$.

Korak 2. Određivanje fitnessa: Za svaki hromozom $i \in \mathbf{P}_t$ određuje se dekodirani vektor upravljačkih veličina $\mathbf{x} = m(i)$, kao i vektor kriterijumskih funkcija $\mathbf{z} = \mathbf{F}(\mathbf{x})$. Na kraju se računa skalarna vrednost fitnessa za hromozom i $\mathbf{F}(i)$.

Korak 3. Selekcija: Inicijalizovati $\mathbf{P}' = \emptyset$. Za svako $i = 1, \dots, N$:

- a) Izabrati jedan hromozom $i \in \mathbf{P}_t$ u skladu sa izabranom šemom selekcije i prema vrednosti fitnessa za taj hromozom $\mathbf{F}(i)$.
- b) Dodati novi hromozom populaciji $\mathbf{P}'$, $\mathbf{P}' = \mathbf{P}' + \{i\}$.

Privremena populacija $\mathbf{P}'$ predstavlja skup hromozoma za razmnožavanje.

Korak 4. Ukrštanje: Inicijalizovati $\mathbf{P}'' = \emptyset$. Za svako $i = 1, \dots, N/2$:

- a) Izabrati dva hromozoma $i, j \in \mathbf{P}'$ i ukloniti ih iz populacije $\mathbf{P}'$.
- b) Priminiti izabrani operator ukrštanja na hromozome i i j . Kao rezultat dobija se potomstvo, odnosno dva nova hromozoma $k, l \in \mathbf{I}$.
- c) Dodati hromozome k i l populaciji $\mathbf{P}''$ sa verovatnoćom p_c . U protivnom dodati hromozome i i j populaciji $\mathbf{P}''$.

Korak 5. Mutacija: Inicijalizovati $\mathbf{P}''' = \emptyset$. Za svaki hromozom $i \in \mathbf{P}''$:

- a) Priminiti operator mutacije na hromozom i sa verovatnoćom p_m . Kao rezultat dobija se hromozom $j \in \mathbf{I}$.
- b) Dodati novi hromozom populaciji $\mathbf{P}'''$, $\mathbf{P}''' = \mathbf{P}''' + \{j\}$.

Korak 6. Završetak: Nova iteracija, $\mathbf{P}_{t+1} = \mathbf{P}'''$ i $t = t + 1$. Ako je $t \geq T$ ili ako je zadovoljen neki drugi kriterijum za zaustavljanje onda $\mathbf{A} = m(\mathbf{P}_t)$.
U protivnom ide se na Korak 2.

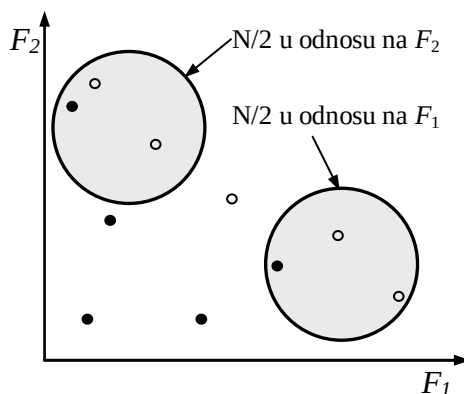
Potrebno je naglasiti da prethodni algoritam ne prikazuje genetički algoritam u njegovoj najgeneralnijoj formi. Na primer nije nužno da veličina populacije bude ograničena ili da kod ukrštanja učestvuju samo dva hromozoma. U svakom slučaju opisani algoritam daje dobru sliku za razumevanje kako genetički algoritmi rade. U tekstu koji sledi biće opisani neki od genetičkih algoritama za višekriterijumsku optimizaciju.

4.3.3. Genetički algoritam sa vektorskom evaluacijom (Vector Evaluated Genetic Algorithm – VEGA)

Metod VEGA predložen je od strane Schaffer-a [58]. Osnovna osobina ove metode je da je pretraživanje bazirano na populaciji i da koncept Pareto dominacije nije direktno inkorporiran u proces selekcije. U osnovi VEGA predstavlja jednostavni genetički algoritam sa modifikovanim mehanizmom selekcije. U svakoj generaciji generiše se više podpopulacija primenom proporcionalnog operatora selekcije u odnosu na pojedine kriterijumske funkcije. Drugim rečima, za problem sa k kriterijumskih funkcija, generiše se k podpopulacija veličine N/k , gde je N veličina celokupne populacije. Ovako formirane podpopulacije se zajedno mešaju formirajući celokupnu populaciju veličine N nad kojom se primenjuju genetički operatori ukrštanja i mutacije. Ovaj mehanizam je grafički predstavljen na Sl. 4.5 gde je dat primer za dve kriterijumske funkcije.

VEGA ima nekoliko problema, od kojih je najozbiljniji taj da je selekciona šema u suprotnosti sa konceptom Pareto dominacije. Ako na primer u populaciji postoji hromozom čijim se dekodiranjem dobija dobro kompromisno rešenje za sve kriterijumske funkcije ali koje nije najbolje u pogledu ni jedne od kriterijumskih funkcija on će biti odbačen. Međutim, takav bi hromozom trebalo sačuvati u populaciji jer ono daje rešenje koje je Pareto optimalno. Schaffer je predložio neka rešenja za ovaj problem. Ova rešenja se svode na primenu šema selekcije na bazi određenog iskustva,

za razliku od tradicionalnih šema selekcije koje se vrše prema slučajnom izboru. U svakom slučaju, činjenica da concept Pareto dominacije kod ove metode nije direktno primenjen ostaje njen glavni nedostatak.

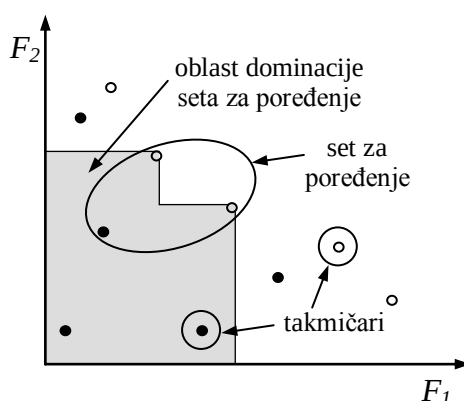


Sl. 4.5. Ilustracija metode VEGA

4.3.4. Pozicioni Pareto Genetički algoritam (Niche Pareto Genetic Algorithm – NPGA)

Horn, Nafploitis i Goldberg su autori ove metode [59]. Ova metoda koristi turnirsku selekcionu šemu baziranu na Pareto dominaciji. Algoritam kod metode NPGA funkcioniše na sledeći način. Na početku svakog selekcionog procesa, po principu slučajnog izbora, iz populacije se izdvaja tzv. *set za poređenje* koji se sastoji od zadatog broja hromozoma t_{dom} . Iz populacije se zatim po slučajnom izboru biraju dva hromozoma, odnosno dva takmičara u turnirskoj selekciji, pri čemu se pobednik turnira bira po sledećoj proceduri. Oba izabrana hromozoma porede se sa članovima seta za poređenje po principu dominacije respektujući kriterijumske funkcije. Ako je jedan od njih nedominirajući, a drugi dominirajući onda se bira onaj koji je nedominirajući. Međutim, Ako su oba ili nedominirajuća ili dominirajuća onda se za svaki od njih računa “niche” broj. Termin “niche” kod genetičkih algoritama predstavlja grupu tačaka koje su bliske jedna drugoj u prostoru kriterijumskih funkcija. Niche broj se računa jednostavnim prebrojavanjem tačaka u populaciji koji se nalaze unutar neke zadate udaljenosti δ_{share} od posmatranog člana populacije. Hromozom sa manjim niche brojem se selektuje kao pobednik turnira.

Princip selekcije kod ove metode dat je na Sl. 4.6 na primeru maksimizacije dve kriterijumske funkcije. Na slici je označen izabrani set za poređenje kao i oblast nad kojom ovaj set dominira. Prikazana su i dva izabrana takmičara, člana populacije. U odnosu na oblast dominacije seta za poređenje, član označen punim kružićem je dominirajući, a član označen praznim kružićem je nedominirajući pa on izlazi kao pobednik turnirske selekcije.



Sl. 4.6. Princip selekcije kod metode NPGA

Pošto se dominacija računa poređenjem pojedinih članova populacije sa slučajno izabranim delom populacije zadate veličine t_{dom} , to uspeh ovog algoritma zavisi u velikoj meri od parametra t_{dom} . Loš izbor ovog parametra može dovesti do toga da se ne nađe pravi nedominirajući set Pareto optimalnih rešenja. Ako izaberemo malu vrednost za t_{dom} ovo može rezultirati sa samo nekoliko nedominirajućih tačaka u populaciji. S druge strane ako izaberemo veliku vrednost za t_{dom} to može dovesti do prevremene konvergencije. Prema tome pri izboru ovog parametra treba obratiti posebnu pažnju. Takođe, može se izvršiti više proračuna uz varijaciju ovog parametra.

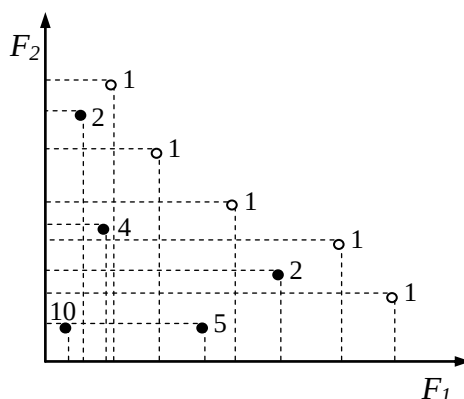
4.3.5. Višekriterijumski genetički algoritam (Multiobjective Genetic Algorithm - MOGA)

Tvorci ove metode su Fonseca i Fleming [60]. Kod ove metode rang određenog hromozoma odgovara broju hromozoma tekuće populacije koji nad njim dominiraju.

Primera radi, neka je dat hromozom i na generaciji t nad kojim dominira $p_i^{(t)}$ hromozoma tekuće populacije. Rang hromozoma i računa se prema sledećoj jednačini:

$$\text{rang}(i,t) = 1 + p_i^{(t)}. \quad (4.11)$$

Za sve nedominirajući hromozome usvaja se rang 1, dok se dominirajući hromozomi penaliziraju prema jednačini (4.11). Princip određivanja ranga pojedinih hromozoma kod ove metode dat je na Sl. 4.7 na primeru maksimizacije dve kriterijumske funkcije. Tačke označene praznim kružićima su nedominirajuće tačke, odnosno ne postoje tačke koje nad njima dominiraju. Rang ovih tačaka je 1. Tačke označene punim kružićima su tačke nad kojima dominira izvestan broj drugih tačaka. Pored tih tačaka upisan je njihov rang.



Sl. 4.7. Princip određivanja ranga hromozoma kod metode MOGA

Određivanje vrednosti fitnesa za članove populacije vrši se na sledeći način:

- Populacija se sortira prema rangu pojedinih hromozoma.
- Za svaki hromozom određuje se fitnes interpolacijom od najboljeg (rang 1) do najgoreg, prema nekoj funkciji koja je obično linearna.
- Za hromozome koji imaju identičan rang računa se prosečna vrednost fitnesa pa se svim hromozomima tog ranga dodeljuje ta prosečna vrednost. Na ovaj način globalna vrednost fitnesa za populaciju održava se na konstantnoj vrednosti. Ova procedura se zove i deljenje fitnesa.

Na osnovu izračunatih vrednosti fitnesa za svaki član populacije grupa za razmnožavanje, za narednu generaciju, formira se prema odabranoj selekcionoj šemi.

4.3.6. Robusni Pareto evolutivni algoritam (Strength Pareto Evolutionary Algorithm - SPEA)

Ova metoda je razvijena od strane Zitzler-a i Thiele-a [61]. Metoda je zamišljena kao način za integraciju različitih evolutivnih algoritama za višekriterijumsku optimizaciju. Može se reći da ova metoda pripada drugoj generaciji evolutivnih algoritama jer koristi princip *elitizma* za razliku od prethodno opisanih metoda. Elitizam se najjednostavnije može definisati kao strategija kod koje se određen broj najboljih članova populacije kopira (prenosi) u narednu generaciju. Elitizam može značajno da unapredi performanse genetičkog algoritma, jer ga štiti od gubitka najboljih rešenja u procesu ukrštanja i mutacije. Metod SPEA, u cilju elitizma, koristi arhivu, odnosno pomoćnu populaciju koja sadrži prethodno određena nedominirajuća rešenja. Ova arhiva se zove *eksterni nedominirajući set*. U svakoj generaciji, nedominirajući članovi se kopiraju u eksterni nedominirajući set. Vrednovanje pojedinih članova, kako eksterne tako i tekuće populacije, vrši se određivanjem vrednosti fitnesa. Proračun se najpre vrši za članove eksternog seta. Određivanje fitnesa za pojedine članove je slično procesu rangiranja kod metode MOGA pošto je njegova vrednost proporcionalna broju rešenja nad kojima posmatrani član dominira. Na osnovu vrednosti fitnesa za članove eksternog seta vrši se proračun vrednosti fitnesa i za članove tekuće populacije. Procedura određivanja vrednosti fitnesa, odnosno princip rangiranja, za članove eksterne i tekuće populacije može se opisati sledećim algoritmom:

Ulaz: $\mathbf{P}_t$ – tekuća populacija

$\bar{\mathbf{P}}_t$ – eksterni set

$\bar{N}$ – veličina populacije

Izlaz: F – vrednost fitnesa

Korak 1. Svakom hromozomu eksterne populacije $i \in \bar{\mathbf{P}}_t$ dodeljuje se realna vrednost $S(i) \in [0,1]$, koja se zove snaga (“strength”); Vrednost $S(i)$

je proporcionalna broju članova populacije $j \in P_t$ za koje $m(i) \succeq m(j)$:

$$S(i) = \frac{|\{j | j \in P_t \wedge m(i) \succeq m(j)\}|}{\bar{N} + 1}. \quad (4.12)$$

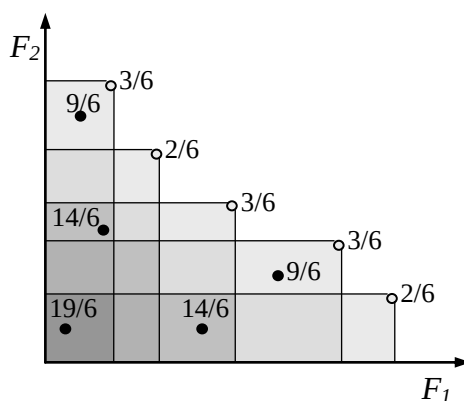
Vrednost fitnessa za član i jednak je njegovoj snazi $F(i) = S(i)$.

Korak 2. Vrednost fitnessa za hromozom tekuće populacije $j \in P_t$ računa se kao

suma snaga svih članova eksternog seta $i \in \bar{P}_t$ čiji upravljački vektori slabo dominiraju nad $m(j)$. Ukupnoj sumi dodaje se vrednost 1 s namerom da se obezbedi da članovi eksterne populacije $\bar{P}_t$ imaju bolju vrednost fitnessa od članova populacije P_t (manje vrednosti fitnessa odgovaraju većoj verovatnoći selekcije):

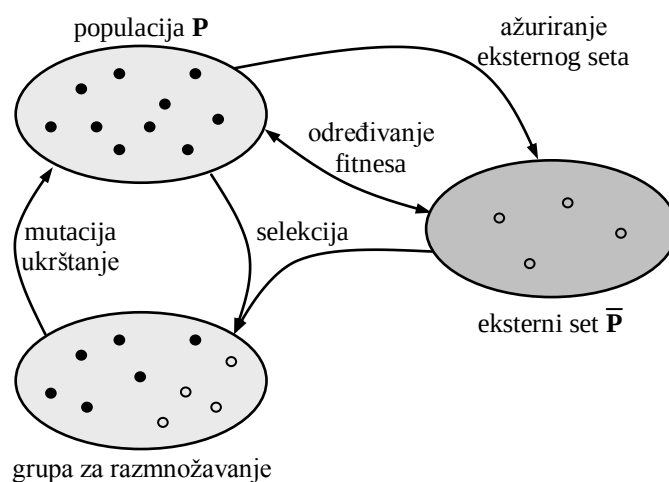
$$F(j) = 1 + \sum_{i \in \bar{P}_t, m(i) \succeq m(j)} S_i. \quad (4.13)$$

U cilju razumevanja principa rangiranja kod metode SPEA na Sl. 4.8 dat je primer rangiranja za slučaj maksimizacije dve kriterijumske funkcije. Tačke označene praznim kružićima (ukupno 5 tačaka) predstavljaju nedominirajuće tačke i one čine eksterni nedominirajući set. Kriterijumski prostor nad kojim ove tačke, odnosno njihovi upravljački vektori dominiraju podeljen je na odgovarajuće pravougaonike na Sl. 4.8. Princip senčenja na Sl. 4.8 je takav da što je oblast tamnija to nad njom dominira veći broj članova eksternog seta. Vrednost fitnessa, odnosno rang članova eksternog seta proporcionalan je broju članova tekuće populacije nad kojima pojedine tačke eksternog seta dominiraju. Kao što se sa Sl. 4.8 vidi, neki članovi eksternog seta dominiraju nad dva člana tekuće populacije (rang 2/6), a neki nad tri člana tekuće populacije (rang 3/6). Nakon određivanja ranga za eksterni set, rang se određuje i za članove tekuće populacije (tačke predstavljene punim kružićima). Primera radi odrediće se rang za član koji se nalazi u donjem levom uglu, odnosno u oblasti koja je osenčena najtamnijom nijansom. Nad ovim članom tekuće populacije dominiraju svi članovi eksterne populacije pa se rang ovog člana računa kao $1 + 3 \cdot 3/6 + 2 \cdot 2/6 = 19/6$. Na sličan način računa se rang i ostalih članova tekuće populacije.



Sl. 4.8. Princip rangiranja kod metode SPEA

Nakon određivanja vrednosti fitnesa, odnosno rangiranja članova eksterne i tekuće populacije pristupa se selekciji. Selekcija se vrši po principu da članovi sa manjim rangom imaju veću verovatnoću da budu selektovani u grupu za razmnožavanje. Na Sl. 4.9 šematski je prikazana glavna petlja algoritma SPEA metode.



Sl. 4.9. Osnovni koraci algoritma metode SPEA

Na početku svake iteracije ažurira se eksterni set i po potrebi se redukuje tako da njegova veličina ne pređe maksimalnu veličinu $\bar{N}$. U narednom koraku članovima eksterne $\bar{P}$ i tekuće P populacije dodeljuju se vrednosti fitnesa. Sledeći korak predstavlja fazu selekcije koja se primenjuje na uniju dve populacije $\bar{P} + P$ u cilju formiranja grupe za dalje razmnožavanje. Kao selekcionni operator može, na primer, da

se primeni turnirska selekcija. Konačno nad grupom za razmnožavane primenjuju se operatori ukrštanja i mutacije na uobičajeni način. Opisanim postupkom dobijena je nova generacija. Postupak se ponavlja dok se ne zadovolji usvojeni kriterijum za zaustavljanje.

4.3.7. Genetički algoritam sa sortiranjem prema nedominaciji (Non-dominated Sorted Genetic Algorithm - NSGA-II)

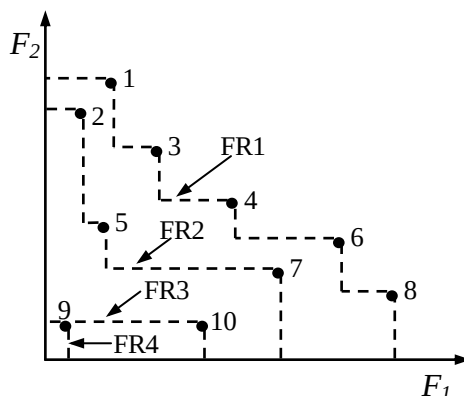
Autori NSGA-II metode su Deb i ostali [5,23]. Ona predstavlja unapređenu verziju metode NSGA [62]. NSGA-II metoda za nalaženje Pareto optimalnih rešenja kod višekriterijumske optimizacije ima tri osnovne karakteristike:

1. Koristi princip elitizma.
2. Obezbeđuje mehanizam ravnomernog rasprostiranja rešenja na Pareto frontu.
3. Zadržava rešenja u populaciji nad kojim ne dominiraju druga rešenja.

Algoritam NSGA-II metode odvija se na sledeći način. Najpre se generiše osnovna populacija $\mathbf{P}_t$ koja se sastoji od N članova, odnosno N potencijalnih rešenja optimizacionog problema. Na osnovu populacije $\mathbf{P}_t$, generiše se, koristeći uobičajene genetičke operatore (selekcija, ukrštanje i mutacija) nova populacija $\mathbf{Q}_t$. Dve populacije $\mathbf{P}_t$ i $\mathbf{Q}_t$ se kombinuju i zajedno formiraju novu populaciju $\mathbf{R}_t$ dimenzije $2N$. Nakon toga se postupkom sortiranja prema konceptu Pareto dominacije vrši klasifikacija članova (rešenja) unutar populacije $\mathbf{R}_t$ sa ciljem formiranja nove populacije. Za svako rešenje u populaciji $\mathbf{R}_t$ vrši se, prema konceptu Pareto dominacije, poređenje sa ostalim rešenjima u populaciji. Na ovaj način se utvrđuje da li pojedina rešenja dominiraju ili ne u odnosu na ostala rešenja. Princip klasifikacije odnosno sortiranja članova populacije $\mathbf{R}_t$ dat je na Sl. 4.10 na primeru maksimizacije dve kriterijumske funkcije sa populacijom od 10 članova.

Ona rešenja nad kojima ne dominira nijedan član u populaciji nazivaju se nedominirajuća rešenja prvog nivoa. Na Sl. 4.10 to su rešenja 1, 3, 4, 6 i 8. Za ova rešenja se može reći da leže na najboljem frontu (FR1), odnosno na frontu nad kojim ne dominiraju preostali članovi populacije. Ako se rešenja iz prvog dominantnog fronta za trenutak eliminišu i ako se na preostala rešenja primeni princip sortiranja prema

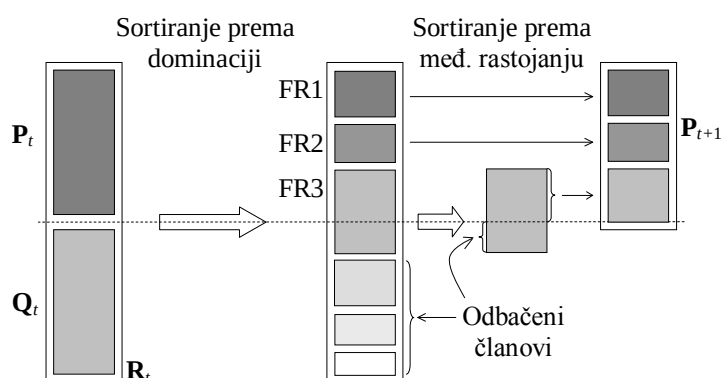
dominaciji dobija se sledeći dominantni front (FR2). Njega formiraju rešenja 2, 5 i 7. Postupak se nastavlja sve dok se ne obrade sva rešenja u populaciji. Na Sl. 4.10 prikazan je dati set od 10 rešenja klasifikovanih u 4 dominantna fronta (FR1-FR4).



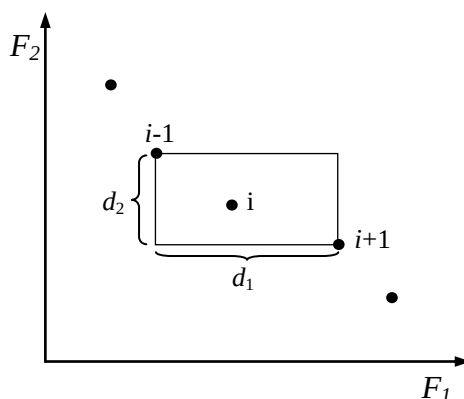
Sl. 4.10. Primena koncepta dominacije kod metode NSGA-II

Nakon što je izvršeno sortiranje prema dominaciji nova populacija se popunjava rešenjima koja pripadaju pojedinim frontovima. Popunjavanje nove populacije počinje sa prvim najboljim frontom, nastavlja se sa drugim najboljim frontom itd. Pošto tekuća populacija ima $2N$ rešenja jasno je da se ne mogu svi članovi smestiti u N raspoloživih mesta u novoj populaciji. Frontovi koji ne mogu da se smeste u novu populaciju jednostavno se brišu. Poslednji front koji ulazi u novu populaciju može da ima više članova od preostalih mesta u novoj populaciji. U cilju izbora potrebnog broja rešenja iz poslednjeg fronta koji ulazi u novu populaciju nad rešenjima iz ovog fronta vrši se sortiranje prema međusobnoj udaljenosti. Ovakvo sortiranje omogućava izbor rešenja koja se ravnomerno prostiru na tom frontu. Princip sortiranja kod metode NSGA-II prikazan je šematski na Sl. 4.11. Sa slike se vidi da u narednu generaciju direktno ulaze frontovi FR1 i FR2. Veličina fronta FR3 je veća od potrebnog broja pa članovi ovog fronta ulaze u proceduru sortiranja prema međusobnoj udaljenosti. Ovaj princip prikazan je na Sl. 4.12. Za svako rešenje u frontu FR3 izračunava se, za sve kriterijumske funkcije, njegova ukupna udaljenost do susednih rešenja. Za slučaj dve kriterijumske funkcije na Sl. 4.12 u formi pravougaonika prikazano je ukupno rastojanje člana razmatranog fronta i do njemu susednih članova $i-1$ i $i+1$. Stranica pravougaonika d_1 predstavlja udaljenost člana i do susednih članova za kriterijumsku funkciju F_1 , a

stranica d_2 za kriterijumsku funkciju F_2 . Sortiranje članova fronta vrši se prema srednjoj vrednosti udaljenosti člana i od susednih članova za pojedine kriterijumske funkcije, odnosno prema vrednosti $(d_1+d_2)/2$ i to počev od člana sa najvećom udaljenošću do člana sa najmanjom udaljenošću. Na ovaj način se obezbeđuje ravnomerna raspoređenost rešenja po frontu jer međusobno bliska rešenja nemaju šansu da uđu u novu populaciju. Na ovaj način dobijena je nova populacija $\mathbf{P}_{t+1}$ sa kojom idemo u narednu iteraciju. Procedura se nastavlja sve dok se ne ispuni neki od zadatih kriterijuma za zaustavljanje. To je obično maksimalni broj generacija.



Sl. 4.11. Princip sortiranja kod metode NSGA-II



Sl. 4.12. Princip sortiranja prema međusobnom rastojanju

Za razliku od metode SPEA gde se princip elitizma ostvaruje čuvanjem najboljih rešenja u eksternoj populaciji, kod metode NSGA-II elitizam se obezbeđuje tako što u proces selekcije pored populacije $\mathbf{Q}_t$ formirane primenom genetičkih operatora ulazi i

tekuća populacija $\mathbf{P}_t$. Na ovaj način čuvaju se najbolji članovi iz tekuće populacije i ne može se desiti da oni u procesu ukrštanja i mutacije nestanu iz populacije.

Prethodno opisana procedura izložena je za slučaj kada ne razmatramo ograničenja. Kada se uvedu ograničenja suštinski se ne menja ništa. Menja se samo definicija dominacije između dva rešenja. U prisustvu ograničenja pojedino rešenje može biti ili dopustivo ili nedopustivo. Poredeći dva proizvoljna rešenja mogu se desiti tri slučaja:

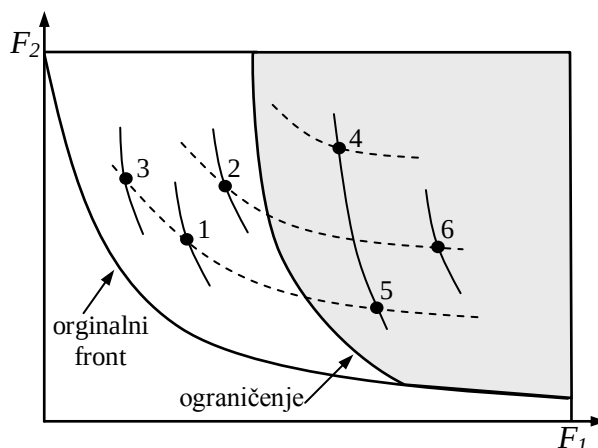
- a) oba rešenja su dopustiva,
- b) jedno je dopustivo, a drugo nije i
- c) oba rešenja su nedopustiva.

Imajući ovo u vidu definicija dominacije između dva rešenja može da se proširi.

Definicija: Za rešenje $\mathbf{x}^{(i)}$ kažemo da dominira nad rešenjem $\mathbf{x}^{(j)}$ ako je neki od sledeća tri uslova ispunjen.

1. Rešenje $\mathbf{x}^{(i)}$ je dopustivo, a rešenje $\mathbf{x}^{(j)}$ nije.
2. Oba rešenja $\mathbf{x}^{(i)}$ i $\mathbf{x}^{(j)}$ su nedopustiva, ali rešenje $\mathbf{x}^{(i)}$ je u manjoj meri narušilo ograničenja.
3. Oba rešenja $\mathbf{x}^{(i)}$ i $\mathbf{x}^{(j)}$ su dopustiva i rešenje $\mathbf{x}^{(i)}$ dominira nad rešenjem $\mathbf{x}^{(j)}$ na uobičajeni način.

Navedena promena u definiciji dominacije dovodi do minimalnih promena u opisanom algoritmu NSGA-II metode. Suština ovih promena ilustrovana je na Sl. 4.13 gde je prikazan slučaj minimizacije dve kriterijumske funkcije uz prisustvo ograničenja. Dopustiv prostor definisan je ograničenjima i označen je sivom površinom. Takođe, na slici su prikazani nedominirajući frontovi za populaciju od 6 članova. U odsustvu ograničenja nedominirajući frontovi bi bili redom (1,3,5), (2,6) i (4). Ovi frontovi su na slici obeleženi isprekidanom linijom. Međutim, u prisustvu ograničenja frontovi bi bili redom (4,5), (6), (2), (1) i (3). U ovom slučaju prvi nedominirajući front je sastavljen od najboljih dopustivih rešenja u populaciji i sva druga dopustiva rešenja leže na boljem nedominirajućem frontu od rešenja koja nisu dopustiva.



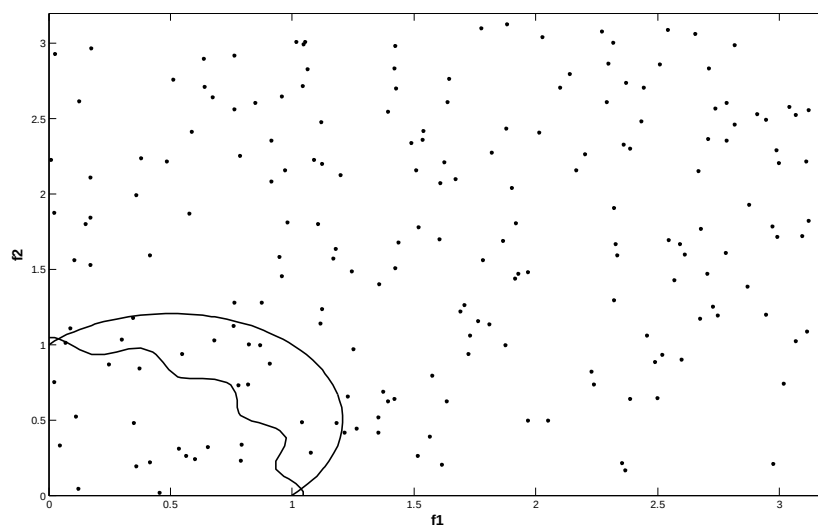
Sl. 4.13. Nedominirajući frontovi u prisustvu ograničenja

U nameri da se pokaže kako metoda NSGA-II funkcioniše u prisustvu ograničenja urađena je simulacija na konkretnom optimizacionom problemu iz literature [56]. Problem je definisan sledećom jednačinom:

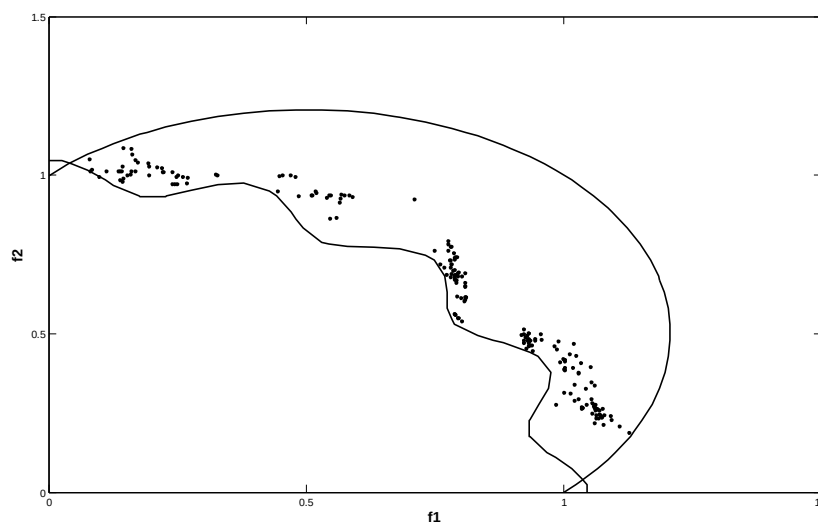
$$\begin{aligned}
 & \text{Min } f_1(\mathbf{x}) = x_1, \\
 & \text{Min } f_2(\mathbf{x}) = x_2, \\
 & p.o.: x_1^2 + x_2^2 - 1 - 0.1 \cos\left(16 \arctan \frac{x_1}{x_2}\right) \geq 0, \\
 & (x_1 - 0.5)^2 + (x_2 - 0.5)^2 \leq 0.5, \\
 & 0 \leq x_1 \leq \pi, \\
 & 0 \leq x_2 \leq \pi.
 \end{aligned} \tag{4.14}$$

Proračun je izvršen za populaciju od 200 članova i za 200 generacija. Za verovatnoću kod operatora ukrštanja i mutacije usvojene su vrednosti 0.9 i 0.25 respektivno. Pri proračunu promenljive su kodirane realnim brojevima. Na slikama Sl. 4.14 - 4.16 dat je rezultat proračuna. Na Sl. 4.14 data je početna populacija od koje je proračun počeo. Punim linijama nacrtana su ograničenja, a prostor oivičen ovim linijama predstavlja dopustiv prostor. Na Sl. 4.15 dato je stanje proračuna nakon 5 generacija. Sa ove slike se vidi da se već nakon 5 generacija svi članovi populacije nalaze u dopustivom prostoru. Konačno na Sl. 4.16 prikazan je krajnji rezultat optimizacije nakon 200 generacija. Vidi se da je proračunom postignuta dobra pokrivenost i ravnomerna rasprostranjenost rešenja na Pareto optimalnom frontu što je i jedan od glavnih ciljeva višekriterijumske optimizacije. Pored toga vidi se i prednost ovakve metode u odnosu na klasične metode jer su nadjena rešenja i na nekonveksnim delovima

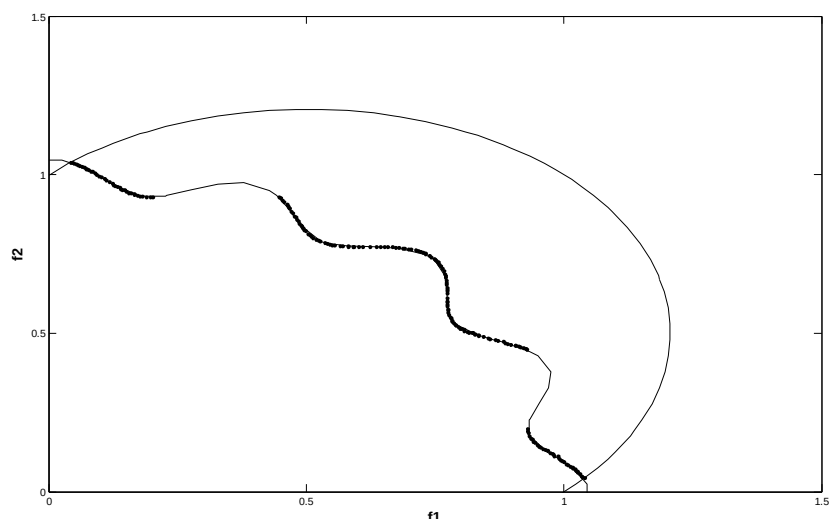
Pareto fronta. Kod većine klasičnih metoda za višekriterijumsku optimizaciju to često nije moguće.



Sl. 4.14. Rezultat proračuna za optimizacioni problem dat jednačinom (4.14),
početna populacija



Sl. 4.15. Rezultat proračuna za optimizacioni problem dat jednačinom (4.14),
stanje nakon 5 generacija



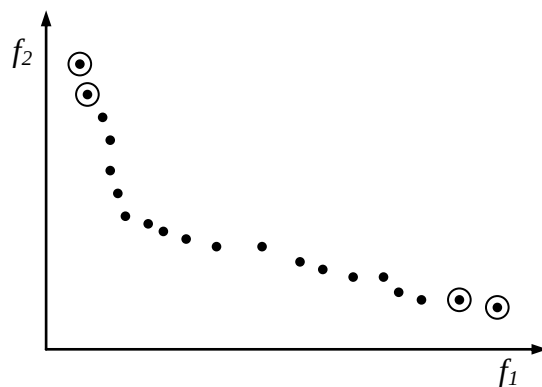
Sl. 4.16. Rezultat proračuna za optimizacioni problem dat jednačinom (4.14),
konačna populacija nakon 200 generacija

4.3.8. Modifikacija NSGA-II algoritma

Kao što je već rečeno jedan od glavnih pokazatelja kvaliteta dobijenih optimalnih rešenja je njihova dobra rasprostranjenost po Pareto frontu. Dobra rasprostranjenost rešenja u velikoj meri određuje konačna rešenja u Pareto frontu. Međutim, određivanje Pareto fronta sa dobro rasprostranjenim rešenjima može da bude veoma sporo. Generalno gledano, rešenja koja se nalaze na krajevima Pareto fronta mogu biti daleko od inicijalne (početne) populacije, pa je potrebno mnogo više generacija da bi se ona pronašla, za razliku od rešenja koja su locirana u centralnom delu Pareto fronta. Pronalaženje ovih rešenja može da bude indikator da je prostor kriterijumskih funkcija dobro pretražen i da je dobijeni set optimalnih rešenja blizu pravog Pareto fronta. U cilju boljeg pretraživanja prostora kriterijumskih funkcija i bržeg postizanja zadovoljavajućeg rešenja sa manjim brojem generacija NSGA-II algoritam, u ovoj disertaciji, je dodatno modifikovan i unapređen. Suština modifikacije ogleda se u uvođenju lokalnog pretraživanja za članove tekućeg Pareto fronta koji se nalaze na njegovim krajevima. Na ovaj način postiže se brže “rastezanje” rešenja po Pareto frontu, pri čemu se zadovoljavajuće rešenje dobija za manje generacija.

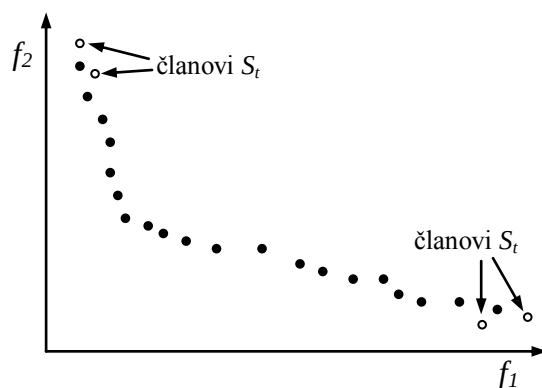
Kod uvedene modifikacije na tekućoj generaciji pored populacija P_t i Q_t formira se i populacija S_t dimenzije N_s , primenom lokalnog pretraživanja. Lokalno pretraživanje se vrši primenom operatora mutacije na izabrane članove populacije P_t locirane na

krajevima tekućeg Pareto fronta. Na Sl. 4.17 na primeru optimizacije dve kriterijumske funkcije dat je princip selekcije članova populacije P_t za primenu lokalnog pretraživanja. Kandidati za selekciju nalaze se na krajevima Pareto fronta i označeni su zaokruživanjem.



Sl. 4.17. Princip selekcije članova populacije P_t za primenu lokalnog pretraživanja

Primenom operatora mutacije na selektovane članove populacije P_t dobijaju se novi hromozomi koji formiraju populaciju S_t . Na Sl. 4.18 prikazani su članovi nove populacije S_t dobijeni mutacijom izabranih članova populacije P_t . Dimenzija nove populacije S_t zavisi od broja selektovanih članova populacije P_t i ne treba da bude prevelika, jer to može da uspori proračun. Veličina populacije S_t do 10 % od veličine populacije P_t neće previše usporiti proračun, a može doprineti postizanju zadovoljavajućeg rešenja za manji broj generacija.



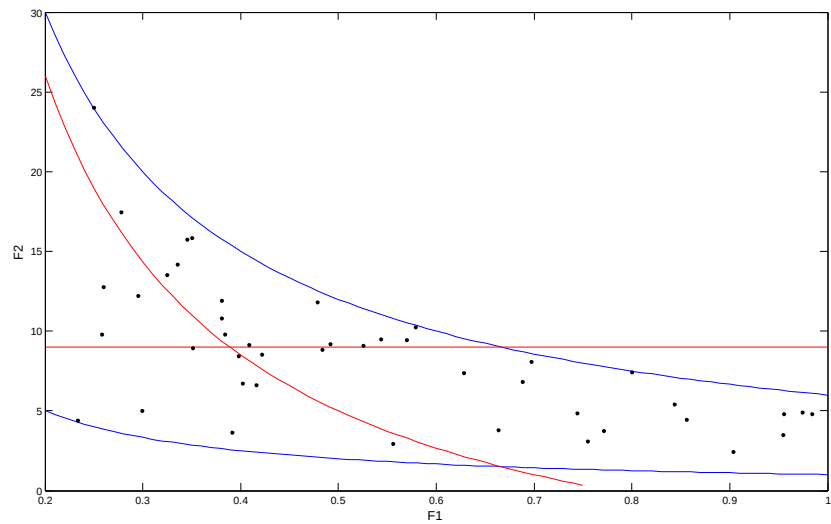
Sl. 4.18. Članovi nove populacije S_t dobijeni lokalnim pretraživanjem

Nakon formiranja populacije S_t tri populacije P_t , Q_t i S_t se kombinuju formirajući novu populaciju R_t dimenzije $2N+N_S$. Sada se primenom koncepta sortiranja prema dominaciji formira nova populacija P_{t+1} dimenzije N , koja je spremna za narednu generaciju. Ova procedura se nastavlja iz generacije u generaciju sve dok se ne dostigne željeni broj generacija i konačno se dobije set optimalnih rešenja. Može se naglasiti da svakom rešenju iz seta optimalnih rešenja odgovara jedna tačka u prostoru kriterijumskih funkcija.

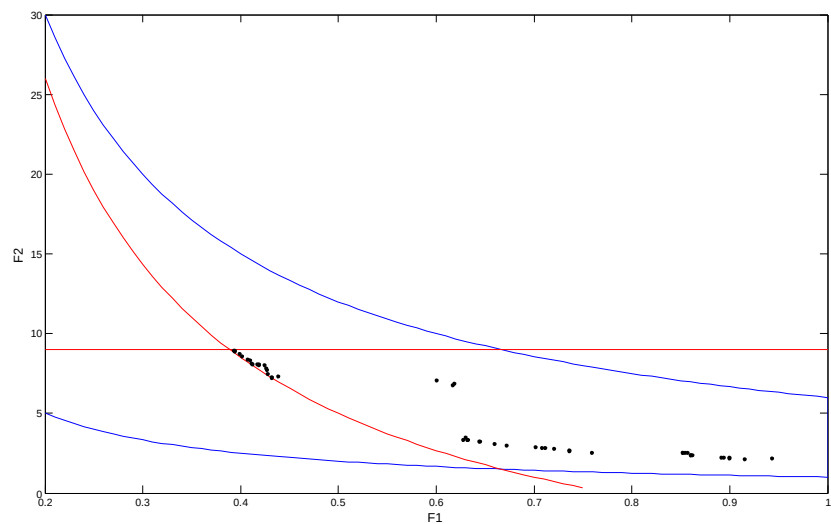
S ciljem da se pokažu prednosti predložene modifikacije, na dva optimizaciona problema iz literature [56], izvršena je uporedna analiza rezultata proračuna sa i bez predložene modifikacije. Osnovna karakteristika prvog problema je ta da ima konveksan Pareto front. Ovaj problem je definisan sledećim jednačinama.

$$\begin{aligned} \text{Min } f_1(\mathbf{x}) &= x_1, \\ \text{Min } f_2(\mathbf{x}) &= \frac{1+x_2}{x_1}, \\ \text{p.o.: } x_2 + 9x_1 &\geq 6, \\ -x_2 + 9x_1 &\geq 1, \\ 0,1 \leq x_1 &\leq 1, \\ 0 \leq x_2 &\leq 5. \end{aligned} \tag{4.15}$$

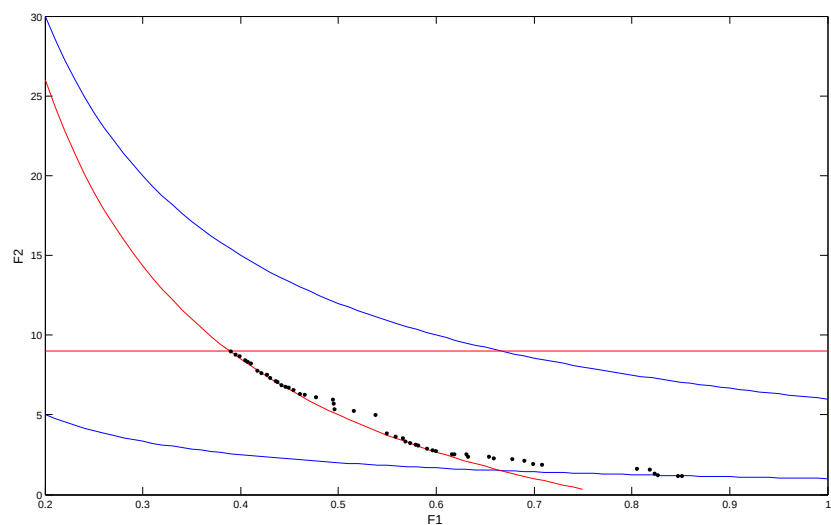
Za ovaj optimizacioni problem izvršen je proračun sa populacijom od 50 članova. Na Sl. 4.19 data je početna populacija formirana slučajnim izborom promenljivih x_1 i x_2 u okviru dopustivog opsega. Na Sl. 4.20, 4.21 i 4.22 dati su rezultati višekriterijumske optimizacije nakon 10, 30 i 50 generacija, za slučaj bez predloženog lokalnog pretraživanja. Na Sl. 4.23 i 4.24. dati su rezultati optimizacije nakon 10 i 30 generacija sa lokalnim pretraživanjem. Pored rešenja predstavljenih tačkama na graficima su date krive koje predstavljaju ograničenja i koje određuju dopustiv prostor. Sa grafika se vidi da se već nakon 10 generacija sa lokalnim pretraživanjem dobijaju značajno bolji rezultati u poređenju sa proračunom bez lokalnog pretraživanja za isti broj generacija. Može se uočiti bolja rasprostranjenost rešenja, a takođe rešenja su bliža Pareto frontu. Kod proračuna sa lokalnim pretraživanjem već sa 30 generacija rešenja dostižu Pareto front uključujući i tačke na samim krajevima Pareto fronta. Kod proračuna bez lokalnog pretraživanja za to je potrebno 50 generacija.



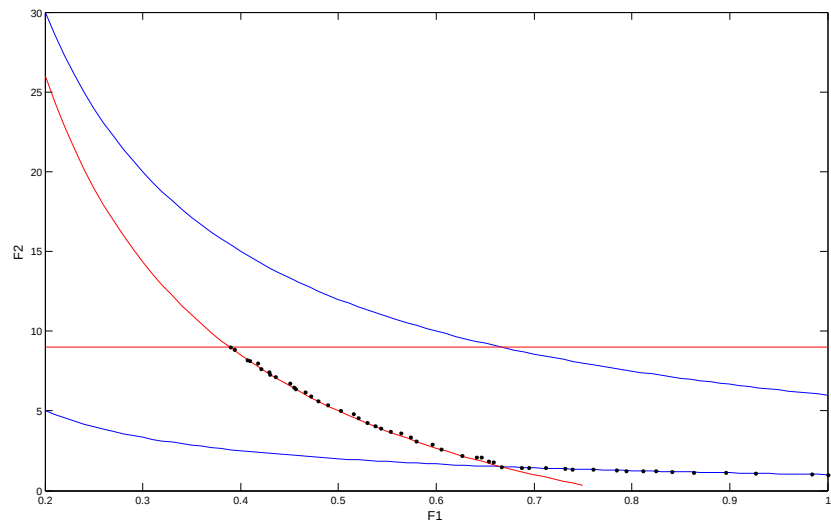
4.19. Početna populacija



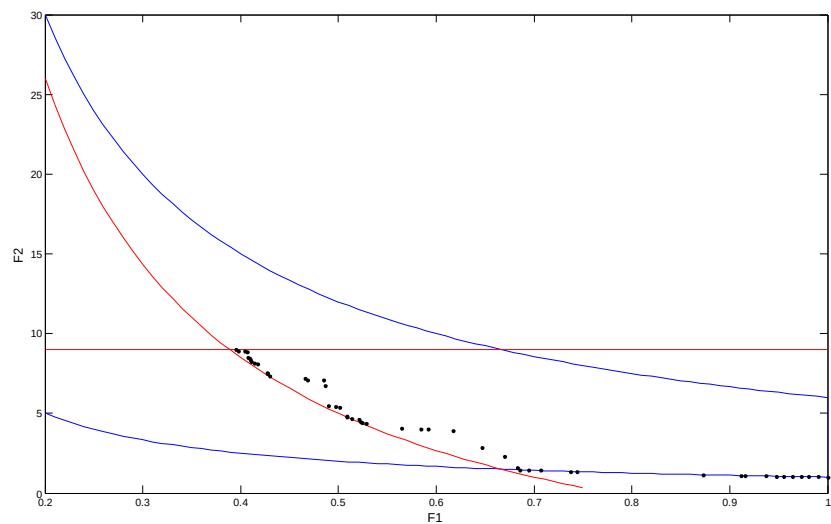
4.20. Rezultat posle 10 generacija (bez lokalnog pretraživanja)



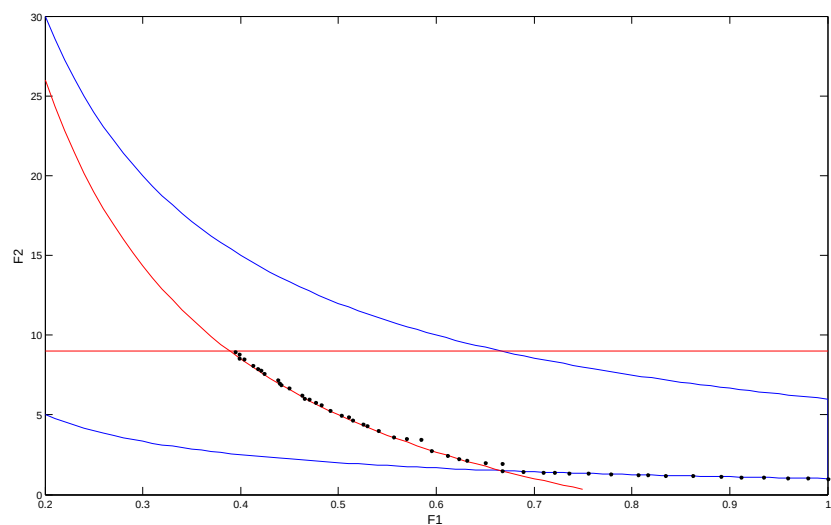
4.21. Rezultat posle 30 generacija (bez lokalnog pretraživanja)



4.22. Rezultat posle 50 generacija (bez lokalnog pretraživanja)

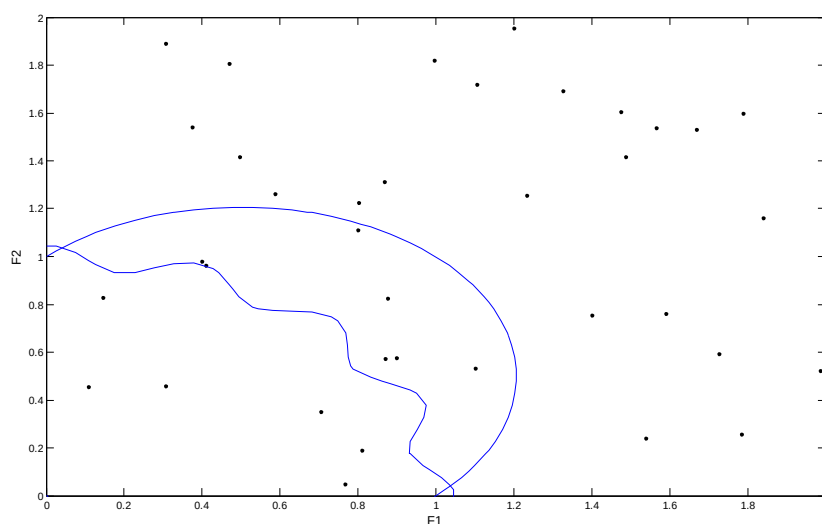


4.23. Rezultat posle 10 generacija (sa lokalnim pretraživanjem)

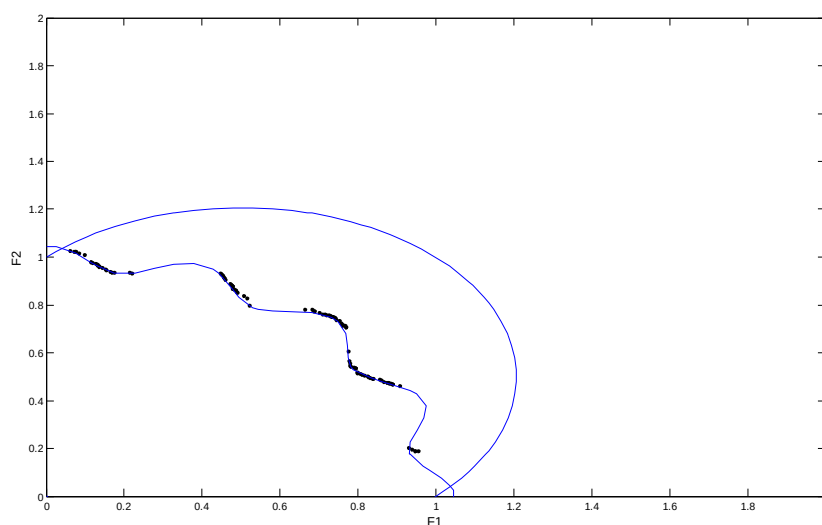


4.24. Rezultat posle 30 generacija (sa lokalnim pretraživanjem)

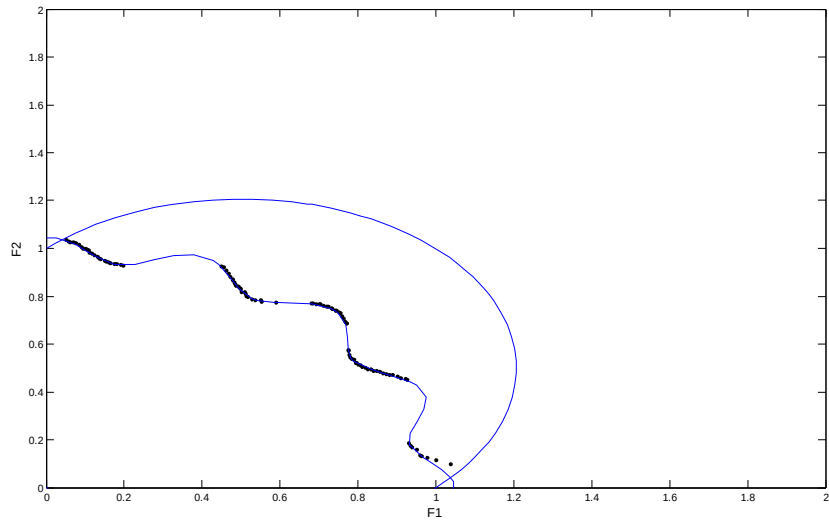
Kao drugi optimizacioni problem za uporedni analizu uzet je problem dat jednačinom (4.14). Ovaj optimizacioni problem je kompleksniji od prethodnog jer Pareto front nije konveksan što u značajnoj meri komplikuje proračun. Proračun je izvršen sa populacijom od 100 članova i to za oba slučaja, sa i bez predložene modifikacije. Na Sl. 4.25 data je početna populacija dobijena slučajnim izborom promenljivih x_1 i x_2 uzimajući u obzir njihove dopustive granice. Na Sl. 4.26, 4.27 i 4.28 dati su rezultati optimizacije nakon 20, 40 i 60 generacija za slučaj bez lokalnog pretraživanja. Na Sl. 4.29 i 4.30 dati su rezultati proračuna nakon 20 i 40 generacija sa predloženim lokalnim pretraživanjem.



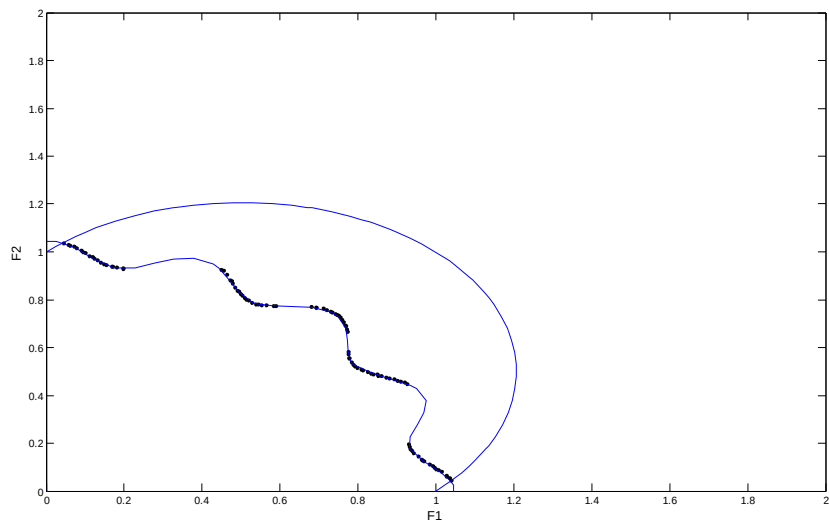
4.25. Početna populacija



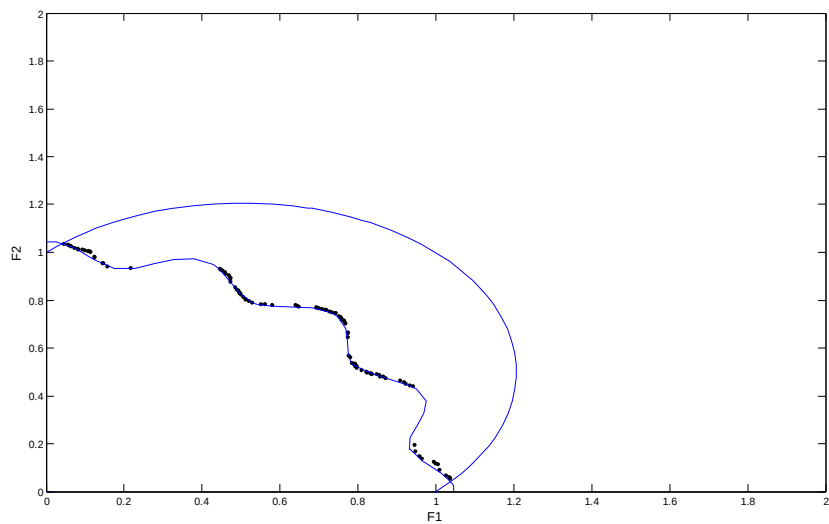
4.26. Rezultat posle 20 generacija (bez lokalnog pretraživanja)



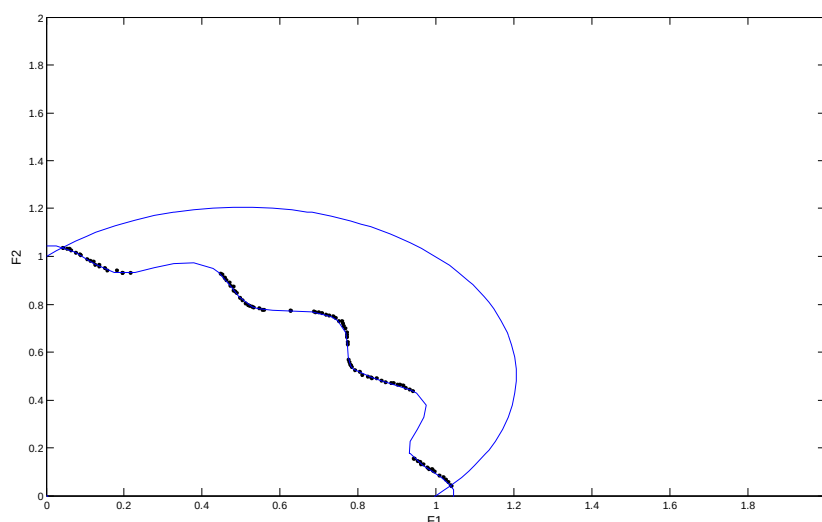
4.27. Rezultat posle 40 generacija (bez lokalnog pretraživanja)



4.28. Rezultat posle 60 generacija (bez lokalnog pretraživanja)



4.29. Rezultat posle 20 generacija (sa lokalnim pretraživanjem)



4.30. Rezultat posle 40 generacija (sa lokalnim pretraživanjem)

Kao i u prethodnom primeru i ovde se može uočiti bolja rasprostranjenost rešenja kod proračuna sa lokalnim pretraživanjem kada se porede rezultati sa istim brojem generacija. Kod proračuna sa lokalnim pretraživanjem za 40 generacija rešenja dostižu Pareto front uključujući i krajnje tačke. Kod proračuna bez uvedene modifikacije za to je potrebno 60 generacija.

4.3.9. Particle swarm optimization (PSO) algoritam

Algoritam PSO ne pripada klasi evolutivnih metoda jer ne koristi genetičke operatore. Međutim, ovaj algoritam je baziran na populaciji i na sličan način pretražuje prostor kao i evolutivne metode. Iz tih razloga u narednom tekstu biće dat prikaz ove optimizacione metode. Idejni tvorci PSO metode su J. Kennedy i R. C. Eberhart [63]. Osnovnu motivaciju za razvoj ove metode pronašli su u društvenom ponašanju raznih tipova organizama poput roja pčela, jata ptica i sl. Ako se na primer posmatra jato ptica koje menja svoj položaj vođeno instiktom za hranu. Sve ptice u jatu traže hranu na nekom prostoru. Vrlo je verovatno da će jato ptica slediti onu pticu koja je osetila ili pronašla dobar izvor hrane. Međutim, svaka ptica pojedinačno u sebi ma instinkt kojim želi za sebe pronaći još bolji izvor hrane, a da bi to postigla ona se nakratko odvaja od jata. Eventualnim pronalaskom boljeg hranilišta, ova ptica pomaže celom jatu jer će se ostale ptice preseliti na bolje hranilište.

PSO metoda vrši pretraživanje prostora na osnovu populacije u kojoj jedinke menjaju svoje pozicije u prostoru. Svaka jedinka predstavlja potencijalno rešenje $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$, gde je D dimenzija prostora za pretraživanje. Jedinka i u okviru populacije poznaje:

a) svoju najbolju poziciju $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})$, odnosno najbolju poziciju koju je ova jedinka posetila u toku kretanja prostorom i u kojoj ima najbolju vrednost fitnesa,

b) globalnu najbolju poziciju $P_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gD})$, odnosno poziciju najbolje jedinke za koju se ima najbolja vrednost fitnesa u okviru cele populacije,

c) svoju trenutnu brzinu $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$ koja određuje promenu pozicije.

Jednačina (4.16) koja sledi, koristi ove informacije da izračuna ažuriranu brzinu za svaku jedinku u narednom iterativnom koraku. Jednačina (4.17) ažurira poziciju za svaku jedinku u prostoru za pretraživanje.

$$v_{id}^{k+1} = \omega v_{id}^k + c_1 r_1 (p_{id} - x_{id}^k) + c_2 r_2 (p_{gd} - x_{id}^k), \quad (4.16)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1}, \quad (4.17)$$

gde je:

d – indeks dimenzije prostora za pretraživanje, $d=1,2,\dots,D$;

i – indeks jedinke u populaciji, $i=1,2,\dots,N$;

N – broj jedinki u populaciji;

k – indeks iteracije;

ω – faktor inercije koji se koristi za kontrolu pretraživanja prostora i obično se uzima da je $0 \leq \omega \leq 1,2$;

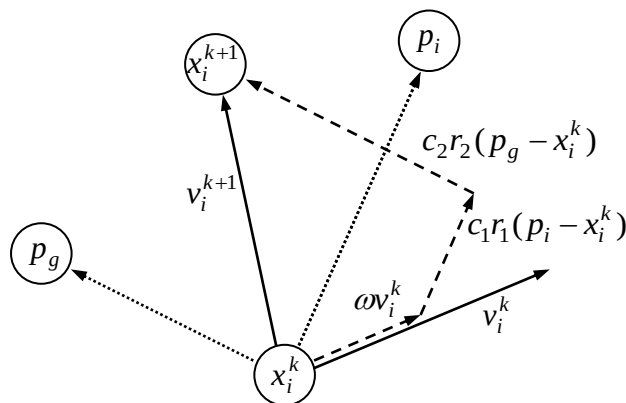
c_1 – koeficijent koji predstavlja stepen poverenja u najbolje rešenje do kojeg je došla pojedina čestica i uzima se $0 \leq c_1 \leq 2$;

c_2 – koeficijent koji predstavlja stepen poverenja u globalno najbolje rešenje i uzima se $0 \leq c_2 \leq 2$;

r_1, r_2 – slučajni brojevi koji se uzimaju iz opsega $[0,1]$.

Na Sl. 4.31 data je ilustracija PSO algoritma modelovanog jednačinama (4.16) i (4.17). Radi jednostavnosti prikaz je dat u dvodimenzionalnom prostoru. Sa slike se

jasno vidi da novi, ažurirani položaj jedinke ne zavisi samo od najbolje pozicije jedinke i najbolje pozicije u okviru cele populacije već i od veličine parametara.



Sl. 4.31. Grafička ilustracija PSO algoritma

PSO metoda pre svega je razvijena za rešavanje problema jednokriterijumske optimizacije ali se idejni koncept ove metode može primeniti i na rešavanje problema višekriterijumske optimizacije. Osnovna forma PSO metode ima neka ozbiljna ograničenja po pitanju primene na probleme višekriterijumske optimizacije. Kod PSO algoritma pozicija jedinke se modifikuje samo na osnovu sopstvene najbolje pozicije i globalno najbolje pozicije. U tekućoj iteraciji za slučaj da je nova pozicija bolja od stare pozicije posmatane jedinke vrši se ažuriranje sopstvene najbolje vrednosti posmatrane jedinke. Međutim, nema razmene informacija sa ostalim jedinkama u okviru populacije, osim što svaka jedinka ima pristup globalno najboljoj poziciji. Kod višekriterijumske optimizacije razmena informacija između pojedinih članova populacije je od presudne važnosti jer se na taj način stvara mehanizam za usmeravanje populacije ka Pareto optimalnom frontu. Da bi se PSO metoda primenila na rešavanje višekriterijumskih optimizacionih problema bilo je neophodno izvršiti modifikaciju osnovne optimizacione šeme. U literaturi se može sresti veliki broj različitih pristupa ovom problemu. U [64] dat je sveobuhvatan pregled različitih pristupa i modifikacija osnovnog PSO algoritma u cilju što efikasnije primene ove tehnike za rešavanje optimizacionih problema modelovanih sa više kriterijumskih funkcija.

Od mnoštva različitih modifikacija PSO algoritma, za ilustracije primene PSO metode na višekriterijumsku optimizaciju izabrana je MOPSO metoda [65]. Njeni autori u Carlos Coello i Maximino Lechuga. Ova modifikacija se zasniva na ideji postojanja

externe arhive u koju sva jedinka memoriše svoju najbolju poziciju na kraju svake iteracije. Ažuriranje externe arhive se vrši na osnovu vrednosti objektivne funkcije svake od jedinki. Svaka od jedinki koristi eksternu arhivu za izbor lidera koji će biti nosilac pretraživanja. Razvijen je takav mehanizam da svaka od jedinki može izabrati različitog lidera. Ovaj mehanizam je baziran na generisanju hiperkocki na koje se deli prostor za pretraživanje. Algoritam MOPSO može se opisati sledećim koracima:

1. Inicijalizacija početne populacije. U okviru ovog koraka formira po slučajnom izboru populacija (POP) za zadatim brojem jedinki (N_{pop}): $POP(i)$, $i=1, \dots, N_{pop}$.
2. Inicijalizacija brzine za svaku od jedinki: $VEL(i)$, $i=1, \dots, N_{pop}$.
3. Vrš se evaluacija za svaku od jedinki iz populacije POP .
4. U externu arhivu EXT se smeštaju pozicije jedinki koje čine nedominirajući vektor.
5. U prostoru za pretraživanje generišu se hiperkocke. Za svaku jedinku, na osnovu vrednosti kriterijumskih funkcija određuje se pripadnost pojedinim hiperkockama.
6. Za svaku jedinku vrši se inicijalizacija njene najbolje pozicije: $PBEST(i) = POP(i)$, $i=1, \dots, N_{pop}$. Ove vrednosti takođe se smeštaju u externu arhivu.
7. Počinje iterativni postupak koji traje zadati broj iteracija.

a) Izračunava se brzina svake od jedinki prema sledećoj jednačini:

$$VEL(i) = WVEL(i) + R_1(PBEST(i) - POP(i)) + R_2(EXT(h) - POP(i)) \quad (4.18)$$

gde je:

W – faktor inercije za koji je usvojena vrednost $W=0,4$;

R_1 i R_2 – slučajni brojevi iz opsega $[0,1]$;

$PBEST(i)$ – najbolja pozicija koju je imala jedinka i ;

$POP(i)$ – tekuća vrednost jedinke i ;

$EXT(h)$ – vrednost koja se uzima iz eksterne memorije.

Izbor indeksa h vrši se na sledeći način. Hiperkockama koje sadrže više od jedne jedinke dodeljuje se fitnes koji se dobija deljenjem nekog broja većeg od 1 sa brojem jedinki koje one sadrže. Ovo ima za cilj da smanji fitnes hiperkocki koje sadrže više jedinki. Na osnovu dobijenih fitnes vrednost vrši se selekcija po principu točka ruleta i bira se hiperkocka iz koje će se uzeti odgovarajuća jedinka. Iz izabrane kocke po principu slučajnog izbora selektuje se jedinka koja će igati ulogu lidera.

b) Ažurira se pozicija jedinke na osnovu brzine izračunate u prethodnom koraku prema sledećoj jednačini.

$$POP(i) = POP(i) + VEL(i) \quad (4.19)$$

Jednačine (4.18) i (4.19) su slične osnovnim jednačinama PSO algoritma (4.16) i (4.17) pa je osnovni koncept PSO metode sačuvan. Pošto u opštem slučaju jedinke mogu biti višedimenzionalne, brzina i pozicija svake jedinke računa se za sve njene dimenzije kao i kod jednačina (4.16) i (4.17).

c) Proveriti da li se jedinke nalaze izvan svojih granica, odnosno sprečiti generisanje rešenja koja ne leže u dopustivom prostoru.

d) Vršiti se evaluacija za svaku od jedinki iz populacije POP .

e) Vršiti se ažuriranje sadržaja eksterne arhive EXT . Ovo podrazumeva smeštanje svih nedominirajućih lokacija u eksternu arhivu. Lokacije iz eksterne arhive nad kojima se dominira se eliminišu iz procesa. Pošto je veličina eksterne arhive ograničena prilikom popunjavanja arhive prednost se daje onim jedinkama koje se nalaze u manje “nastanjenim” regionima, odnosno zonama gde je prostorno manje jedinki.

f) Vršiti se ažuriranje najbolje pozicije za pojedine jedinke. U slučaju da je tekuća pozicija posmatrane jedinke bolja od one koja je smeštena u memoriju vrši se ažuriranje prema jednačini $PBEST(i) = POP(i)$. Kriterijum za poređenje trenutne pozicije jedinke i pozicije iz memorije je Pareto dominacija. U slučaju da nad

tekućom pozicijom dominira pozicija iz memorije onda se zadržava vrednost iz memorije. U protivnom tekuća pozicija zamenjuje onu iz memorije. Konačno ako su po principu dominacije obe pozicije ravnopravne, odnosno ni jedna ne dominira nad drugom selekcija se vrši po slučajnom izboru.

g) Brojač iteracija se povećava za jedan.

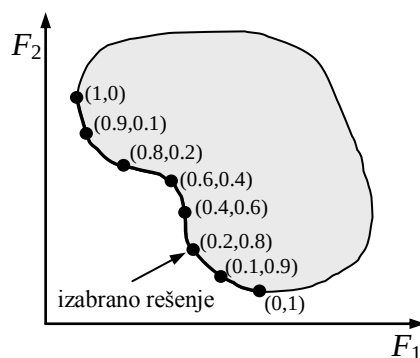
Kao rezultat MOPSO metode dobija se set optimalnih rešenja koji optimizuje zadate kriterijumske funkcije.

4.3.10. Izbor kompromisnog rešenja

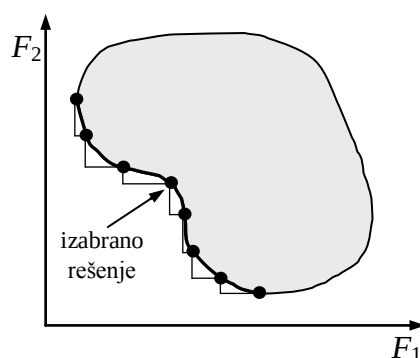
Postojanje velikog broja kompromisnih rešenja, dobijenih u procesu višekriterijumske optimizacije, bez sumnje je korisno inženjeru kod izbora jedinstvenog rešenja. Međutim, nameće se pitanje koje rešenje izabrati. Koncentrisanje na određeni region Pareto optimalnog fronta na osnovu nekih predefinisanih informacija, a bez kompletnog razmatranja svih kompromisnih opcija nije baš poželjno. Iako kod izbora jedinstvenog rešenja često glavnu ulogu igra subjektivni osećaj ovde će se dati neke post optimizacione tehnike koje služe za izbor jedinstvenog kompromisnog rešenja [56].

Kod metode *pseudo težinskih koeficijenata* dobijenim kompromisnim rešenjima dodeljuju se pseudo težinski koeficijenti bazirani na njihovom položaju na Pareto frontu. Nakon što se svakom rešenju dodeli pseudo težinski faktor bira se ono rešenje koje je najbliže želji inženjera (ili njegovom originalnom izboru). Na Sl. 4.32 ilustrovana je ova procedura na primeru minimizacije dve kriterijumske funkcije.

Kod metode *odnosa dobitka i gubitka* za svako dobijeno kompromisno rešenje najpre se identifikuju susedna rešenja u odnosu na sve pravce u kriterijumskom prostoru. Nakon toga se u odnosu na susedna rešenja računaju dobiti u odnosu na jednu kriterijumsku funkciju, odnosno gubici u odnosu na ostale kriterijumske funkcije. Za sva dobijena kompromisna rešenja izračunava se odnos dobitaka i gubitaka. Od svih dobijenih kompromisnih rešenja bira se ono koje ima najveći odnos dobitaka i gubitaka. Na Sl. 4.33 ilustrovana je ova procedura na primeru minimizacije dve kriterijumske funkcije.



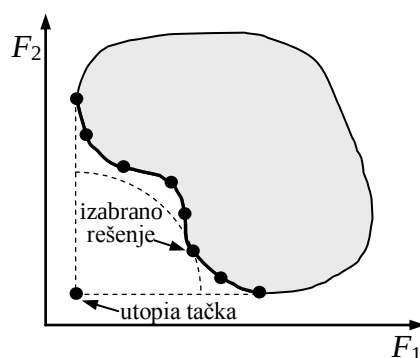
Sl. 4.32. Ilustracija metode pseudo težinskih koeficijenata



Sl. 4.33. Ilustracija metode odnosa dobitka i gubitka

Metoda kompromisnog programiranja kod koje se rešenje bira na osnovu minimalne udaljenosti od idealne ili utopia tačke takođe može da se koristi kod izbora jedinstvenog rešenja iz seta dobijenih kompromisnih rešenja. Definicija utopia tačka data je u sekciji 3.2.4. dok je o kompromisnom programiranju bilo reči u sekciji 3.3.1.1. U slučaju minimizacije svih kriterijumskih funkcija utopia tačka odgovara minimalnoj vrednosti svih kriterijumskih funkcija. U opštem slučaju, kroz optimizacionu proceduru ova tačka se ne može dostići, iz razloga što su kriterijumske funkcije često kontradiktorne jedna u odnosu na drugu pa tako minimum jedne kriterijumske funkcije nije istovremeno i minimum druge ili drugih kriterijumskih funkcija. Na Sl. 4.34 ilustrovana je ova procedura izbora kompromisnog rešenja na primeru minimizacije dve kriterijumske funkcije.

Iako se gore opisane metode mogu primeniti na svaki višekriterijumski optimizacioni problem, u praksi, rešenje se često bira na osnovu specifičnih informacija višeg nivoa od strane inženjera koji rešava postavljeni problem. Često te informacije nisu tehničke prirode. U svakom slučaju prisustvo velikog broja kompromisnih rešenja inženjeru može olakšati izbor jedinstvenog rešenja. Uvid u kompletan Pareto front omogućava inženjeru da poredi rešenja iz pojedinih segmenata Pareto fronta i da sa većom dozom sigurnosti izabere pravo rešenje.



Sl. 4.34. Ilustracija metode kompromisnog programiranja

4.3.11. Nova metoda za izbor kompromisnog rešenja

Postojanje velikog broja ravnopravnih optimalnih rešenja krajnjem korisniku daje veću slobodu kod izbora finalnog rešenja pri čemu on iz seta ponuđenih rešenja može da izabere ono koje njemu najviše odgovara. Međutim, u slučaju optimizacije većeg broja kriterijumskih funkcija izbor finalnog rešenja može biti težak zadatak. Glavni razlog za to je nemogućnost adekvatne grafičke predstave dobijenih rešenja u slučaju kada je broj kriterijumskih funkcija veći od tri, pa krajnji korisnik nije u mogućnosti da dobije kvalitetan uvid u dobijene rezultate. Eventualni tabelarni prikaz rezultata optimizacije mogao bi da sadrži veliki broj podataka pa ni to ne bi dalo jasnu sliku o dobijenim rezultatima. Iz tih razloga u ovoj disertaciji predložena je nova metoda za izbor jedinstvenog kompromisnog rešenja [66]. Ova metoda, u osnovi, predstavlja kompromis između dva različita kriterijuma za izbor.

Prvi kriterijum je izbor jedinstvenog optimalnog rešenja na osnovu najmanje udaljenosti do utopia tačke. Ovaj kriterijum je opisan u prethodnoj sekciji. Najkraća

udaljenost do utopia tačke je korektan kriterijum i predstavlja dobar kompromis za sve kriterijumske funkcije pri analizi dobijenih optimalnih rešenja i izbor jedinstvenog rešenja.

S druge strane, kod specifičnog optimizacionog problema kao što je recimo izbor lokacije i parametara FACTS uređaja, rešenje koje omogućuje najbolje unapređenje performansi analizirane prenosne mreže, uz uvažavanje razmatranih kriterijumskih funkcija može biti izabrano kao jedinstveno optimalno rešenje. Imajući to u vidu, za izbor jedinstvenog optimalnog rešenja može da se upotrebi kriterijum maksimalne udaljenosti od bazne tačke. Bazna tačka predstavlja stanje u prenosnoj mreži pre instalacije FACTS uređaja i njene koordinate se mogu odrediti na osnovu vrednosti razmatranih kriterijumskih funkcija pre instalacije FACTS uređaja.

Imajući u vidu činjenicu da analizirane kriterijumske funkcije mogu biti različite po prirodi, neophodno je izvršiti njihovu normalizaciju da bi izračunavanje udaljenosti od utopia tačke i bazne tačke imalo smisla. Za normalizaciju vrednosti kriterijumskih funkcija, koje odgovaraju dobijenom setu optimalnih rešenja, može se upotrebiti jednačina (3.6) pri čemu se za vrednosti koordinata utopia tačke mogu uzeti minimalne vrednosti pojedinih kriterijumskih funkcija. Prema tome normalizovana vrednost i -te kriterijumske funkcije za k -to optimalno rešenje može se izračunati prema sledećoj jednačini:

$$f_{ik}^{norm} = \frac{f_{ik} - f_i^{\min}}{f_i^{\max} - f_i^{\min}}, \quad (4.20)$$

gde je:

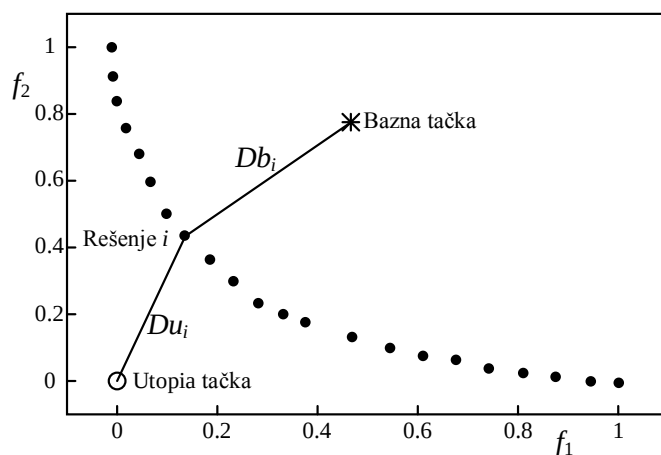
f_{ik} – vrednost i -te kriterijumske funkcije za k -to rešenje,

$f_i^{\min}$ – minimalna vrednost i -te kriterijumske funkcije,

$f_i^{\max}$ – maksimalna vrednost i -te kriterijumske funkcije,

Dobijene vrednosti kriterijumskih funkcija za set optimalnih rešenja nakon normalizacije nalaze se u opsegu $[0,1]$. Sa ovakvom normalizacijom, utopia tačka ima sve koordinate jednake nuli i samim tim u normalizovanom prostoru kriterijumskih funkcija locirana je u koordinatnom početku. Normalizacija bazne tačke može se izvršiti takođe primenom jednačine (4.20).

Nakon normalizacije za sva rešenja iz seta optimalnih rešenja mogu se izračunati udaljenosti od utopia i bazne tačke. Na Sl. 4.35 za slučaj dve kriterijumske funkcije u normalizovanom prostoru kriterijumskih funkcija dat je prikaz udaljenosti od utopia tačke (Du) i bazne tačke (Db) za jedno rešenje iz seta optimalnih rešenja.



Sl. 4.35. Prikaz udaljenosti od utopia i bazne tačke za proizvoljno rešenje

U slučaju izbora jedinstvenog rešenja, generalno gledano, ni za jedan od dva predložena kriterijuma za izbor ne može se reći da je bolji od drugog, odnosno da jedan od njih čini bolji kompromis između kriterijumskih funkcija. Međutim, izbor jedinstvenog optimalnog rešenja može se izvršiti uvažavanjem oba predložena kriterijuma. U tom slučaju neophodno je rešiti optimizacioni problem dat sledećom jednačinom:

$$\begin{array}{l} \min_i Du_i \\ \max_i Db_i \end{array} \quad i = 1, \dots, N, \quad (4.21)$$

gde je:

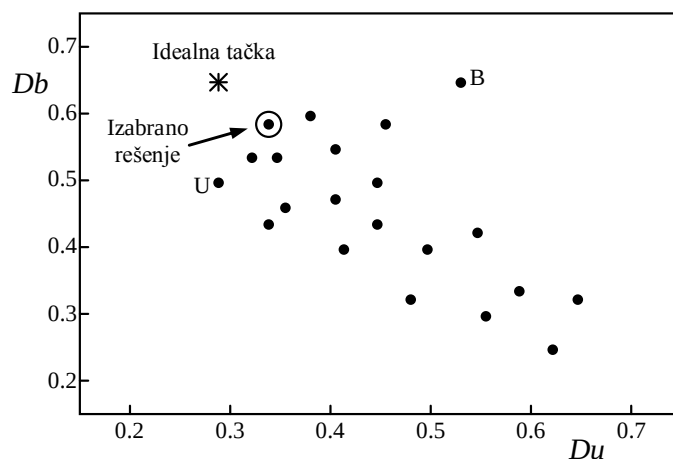
Du_i – rastojanje i -tog rešenja do utopia tačke,

Db_i – rastojanje i -tog rešenja do bazne tačke,

N – ukupan broj rešenja u setu optimalnih rešenja.

Za optimizacioni problem dat jednačinom (4.21) može se reći da predstavlja kompromis između dva kriterijuma za izbor. Izračunata rastojanja do utopia tačke (Du_i) i bazne tačke (Db_i) za pojedinačna rešenja predstavljaju koordinate u Du - Db koordinatnom sistemu. Prema tome svakom od rešenja iz seta optimalnih rešenja odgovara po jedna tačka u takvom koordinatnom sistemu. Rešenje koje je najbliže idealnoj tački može biti

izabrano kao jedinstveno optimalno rešenje. Idealna tačka u $Du-Db$ ravni može da se definiše kao tačka u kojoj istovremeno imamo minimalnu udaljenost od utopia tačke i maksimalnu udaljenost od bazne tačke uzimajući u obzir ceo set optimalnih rešenja. Može se reći da idealna tačka odgovara idealnom slučaju kod koga su oba kriterijuma data jednačinom (4.21) u potpunosti zadovoljena. Zbog prirode razmatranih kriterijumskih funkcija, koje su u opštem slučaju kontradiktorne, nije realno očekivati da će bilo koja tačka u $Du-Db$ ravni biti jednaka idealnoj tački. Iz tog razloga, za jedinstveno optimalno rešenje bira se rešenje, odnosno tačka najbliža idealnoj tački. Na Sl. 4.36 dat je prikaz rešenja u $Du-Db$ ravni i princip izbora jedinstvenog rešenja za slučaj optimizacije dve kriterijumske funkcije. Rešenje sa slike označeno slovom **U** je rešenje koje ima minimalnu udaljenost do utopia tačke, dok rešenje označeno sa **B** ima maksimalnu udaljenost od bazne tačke. Ova dva rešenja bila bi izabrana kao jedinstvena optimalna rešenja po jednom, odnosno drugom kriterijumu izbora. Ova dva rešenja ujedno određuju koordinate idealne tačke. Kao što je već rečeno za izabrano rešenje uzimamo ono koje je najbliže idealnoj tački. Na ovaj način vršimo kompromis između dva kriterijuma za izbor.



Sl. 4.36. Prikaz rešenja u $Du-Db$ ravni i princip izbora jedinstvenog rešenja

Ova metoda (u daljem tekstu $Du-Db$ metoda) omogućava grafičku prezentaciju dobijenih rešenja u ravni, što nije slučaj kod višekriterijumske optimizacije sa većim broj analiziranih kriterijumskih funkcija. Koristeći grafičku predstavu dobijena rešenja mogu se porediti, a takođe se može sprovesti i analiza osetljivosti.

Predložena metoda nije koncipirana samo za upotrebu na konkretnom optimizacionom problemu kao što je izbor tipa, lokacije i parametara FACTS uređaja. Ona se lako može prilagoditi velikom broju optimizacionih problema iz područja elektroenergetike ali i iz drugih naučnih oblasti.

4.3.12. Rezime

Evolutivne metode za rešavanje problema višekriterijumske optimizacije pripadaju grupi metoda koje polazne postavke, informacije i preferencije koriste nakon optimizacionog postupka. Jedan od ciljeva ovih metoda je nalaženje kompletnog Pareto optimalnog seta rešenja u samo jednom proračunu. U tom smislu ove metode predstavljaju odličnu alternativu klasičnim metodama opisanim u poglavlju 3. Kod tih metoda za nalaženje više rešenja potrebno je izvršiti isto toliko proračuna. Nalaženje seta rešenja u samo jednom proračunu je i jedna od glavnih vrlina evolutivnih metoda. To je prednost i sa aspekta izbora jedinstvenog kompromisnog rešenja jer onaj koji odlučuje o izboru rešenja ima širok dijapazon rešenja i njemu samo preostaje da izabere rešenje koje najbolje odslikava njegove želje.

Ovo nije jedina prednost evolutivnih metoda. Za razliku od klasičnih metoda, evolutivne metode lako izlaze na kraj sa različitim tipovima kriterijumskih funkcija i funkcija ograničenja jer ne zahtevaju informacije o gradijentu funkcija. Takođe, upotreba promenljivih različitih tipova (realne, celobrojne, kontinualne, diskretne, logičke, itd.) ne predstavlja nikakvu prepreku za evolutivne metode. Pored ovoga ove metode krasi i fleksibilnost u pogledu modelovanje jer se bez velikih problema mogu dodati nove, a takođe ukloniti ili modifikovati postojeće kriterijumske funkcije i ograničenja. Od vrlina treba još istaći da su evolutivne metode relativno robusne metode.

Evolutivne metode imaju i određene mane. Iako ove metode obezbeđuju potrebne i dovoljne uslove za Pareto optimalnost rešenja ne može se dokazati da su dobijena rešenja optimizacionog postupka ujedno i globalna rešenja, odnosno da je dobijen set rešenja pravi Pareto optimalni set rešenja. Takođe, kod ovih metoda generalno postoji problem dobijanja takvih rešenja koja su ravnomerno rasprostranjena

po Pareto frontu. Neke evolutivne metode sa ovim problemom bolje izlaze na kraj od drugih.

Još jedna mana evolutivnih metoda tiče se pojma konvergencije. Kod ovih metoda ne postoji pouzdan način za utvrđivanje da li je postignuta konvergencija kod optimizacionog postupka. To je posledica prirode ovih metoda. Kod evolutivnih metoda proračun uglavno traje zadati broj iteracija (generacija), za razliku od klasičnih metoda gde se proračun može završiti ili dostignutom konvergencijom ili dostignutim maksimalnim brojem iteracija.

Na kraju treba reći da su evolutivne metode po pravilu kompjuterski zahtevne u smislu da proračuni traju relativno dugo u poređenju sa klasičnim metodama. Međutim, ovo i nije velika mana s obzirom da su računari iz dana u dan sve brži i moćniji.

5. NOVA PROCEDURA ZA IZBOR TIPa, LOKACIJE I PARAMETARA FACTS UREĐAJA

5.1. Uvod

Problem izbora tipa, lokacije i parametara FACTS uređaja u ovoj disertaciji modelovan je kao višekriterijumski optimizacioni problem. Razlog za to je namera da se kod izbora obuhvati što veći broj relevantnih kriterijuma koji mogu uticati na pravilan izbor FACTS uređaja. U nastavku poglavlja biće dat algoritam optimizacione procedure za rešavanje problema izbora tipa, lokacije i parametara FACTS uređaja. Procedura za izbor FACTS uređaja biće primenjena na dva realna inženjerska problema.

5.2. Algoritam nove procedure za izbor tipa, lokacije i parametara FACTS uređaja

Na samom početku potrebno je izabrati one tipove FACTS uređaja koji će se analizirati. Izbor pre svega zavisi od problema koji se rešava.

U sledećem koraku potrebno je definisati optimizacioni problem koji se razmatra. To podrazumeva formiranje kriterijumskih funkcija i funkcija ograničenja. Kod formiranja kriterijumskih funkcija od presudne važnosti je da se obuhvati što više relevantnih faktora koji mogu uticati na pravilan izbor FACTS uređaja. U ovom koraku formiraju se i funkcije ograničenja kojima treba modelovati sva pogonska ograničenja. Tek uz uvažavanje svih ograničenja rezultati dobijeni optimizacijom imaju fizički smisao. Ovaj korak je veoma važan jer izbor kriterijumskih funkcija u najvećoj meri određuje rezultate optimizacije tako da se ovom koraku mora dati posebna pažnja.

Nova procedura za izbor optimalnog tipa, lokacije i parametara FACTS uređaja je zamišljena tako da se kroz proces optimizacije određuju optimalna lokacija i parametri FACTS uređaja. Izbor optimalnog tipa ili tipova FACTS uređaja za razmatranu mrežu vrši se kroz obradu različitih scenarija koji podrazumevaju upotrebu različitih FACTS uređaja ili njihovu kombinaciju. Razlog za ne uključivanje tipa

FACTS uređaja direktno u optimizacioni proces je način rešavanja postavljenog optimizacionog problema. Višekriterijumski optimizacioni problemi kod kojih se vrši simultana optimizacija kriterijumskih funkcija po pravilu se rešavaju metodama koje su bazirane na populaciji. Jedna populacija se sastoji od članova ili hromozoma kojim se kodiraju upravljačke veličine. Kod NSGA-II metode pomoću koje je izvršena simultana optimizacija kriterijumskih funkcija hromozomi u populaciji kodiraju se binarnim brojevima. Na primer kod proračuna sa dva SVC uređaja jedan hromozom se kodira sa četiri veličine. To su dve lokacije za uređaje i njihova dva parametra odnosno reaktivne snage Q_{SVC} . Kod neke druge kombinacije FACTS uređaja hromozomi se kodiraju na sasvim drugi način. Recimo kod proračuna sa 2 UPFC uređaja jedan hromozom se kodira sa 8 veličina. To su dve lokacije za UPFC uređaj i po tri upravljačke veličine (P_{spec} , Q_{spec} i U_{spec}) za svaki uređaj. Jasno je da ovakva dva hromozoma nemaju istu formu i po pravilu nisu iste dužine. Samim tim primena operatora ukrštanja na ovakva dva hromozoma je nemoguća jer bi se kao rezultat dobila dva hromozoma koja ništa ne predstavljaju i nisu reprezent ni jednog od dva scenarija. Uključivanje tipa FACTS uređaja u optimizacioni proces kod metoda koje nisu evolutivnog tipa takođe predstavlja problem. Primera radi kod PSO metode, opisane u sekcije 4.3.9, broj upravljačkih promenljivih u optimizacionom procesu definiše dimenzionalnost članova populacije. Za različite FACTS uređaje broj upravljačkih promenljivih je različit pa bi samim tim članovi populacije kod PSO metode imali različite dimenzije za različite kombinacije FACTS uređaja. Pošto se kod PSO metode nova pozicija za proizvoljni član populacije računa na osnovu najbolje sopstvene i najbolje globalne pozicije to postojanje članova populacije različitih dimenzija nije dozvoljeno. Iz svih navedenih razloga uvođenje tipa FACTS uređaja u simultani optimizacioni proces zajedno sa lokacijom i parametrima je praktično nemoguće, pa se zbog toga generiše određeni broj scenarija, koji će se analizirati. Postojanje različitih scenarija, a samim tim i rezultata optimizacije za različite tipove FACTS uređaja omogućava poređenje uticaja pojedinih FACTS uređaja na razmatranu mrežu i izbor najbolje kombinacije.

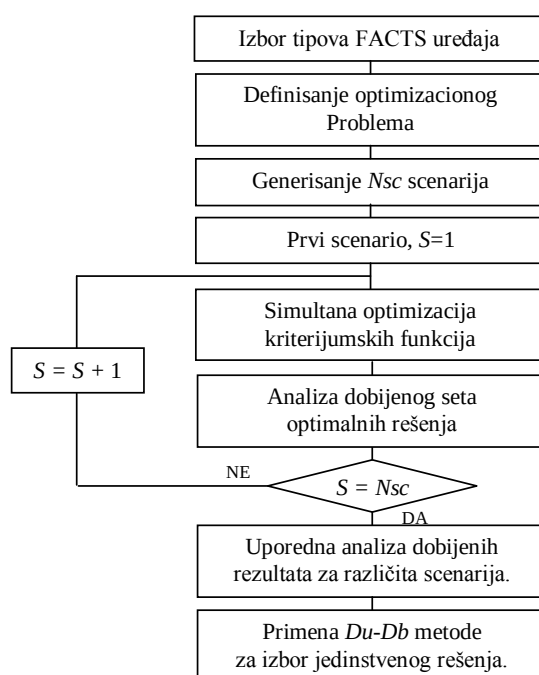
U narednom koraku za izabrani scenario vrši se simultana optimizacija kriterijumskih funkcija uz uvažavanja svih postavljenih ograničenja. Za optimizaciju kriterijumskih funkcija upotrebljen je NSGA-II algoritam koji je modifikovan i

unapređen na način opisan u sekciji 4.3.8. Kao rezultat simultane optimizacije kriterijumskih funkcija dobija se set optimalnih rešenja odnosno Pareto set.

U sledećem koraku, vrši se analiza dobijenog seta kompromisnih rešenja za izabrani scenario i eventualni izbor jedinstvenog kompromisnog rešenja za taj scenario primenom nove *Du-Db* metode opisane u sekciji 4.3.11. Izbor jedinstvenog kompromisnog rešenja u ovoj fazi optimizacione procedure ima smisla ako se favorizuje neki od scenarija.

Nakon proračuna za sva scenarija vrši se uporedna analiza dobijenih rezultata. Kako se kod svih scenarija rešava isti optimizacioni problem to se dobijeni setovi rešenja za pojedina scenarija mogu grupisati u jedinstven set. Tako dobijeni jedinstveni set optimalnih rešenja predstavlja rezultat optimizacije gde je u optimizacioni proces, kroz različita scenarija, uključen i tip FACTS uređaja. Na ovako dobijeni set optimalnih rešenja može se primeniti princip dominacije s namerom da u njemu ostanu samo nedominirajuća rešenja. Nakon toga primenom *Du-Db* metode može se izabrati jedinstveno kompromisno rešenje, odnosno konkretan predlog za ugradnju FACTS uređaja u analiziranoj mreži.

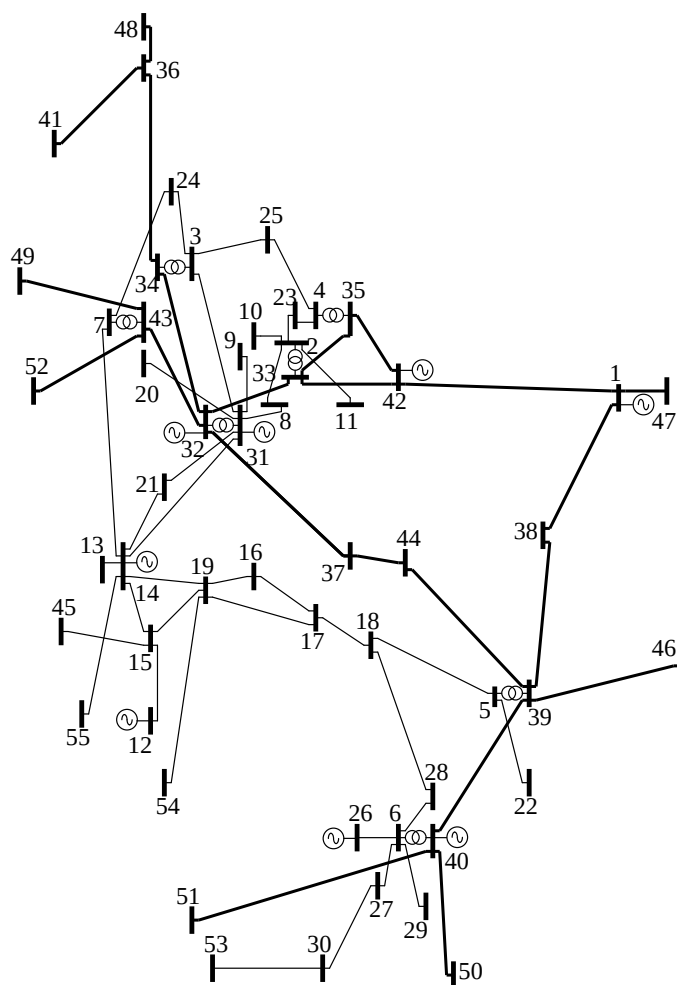
Imajući u vidu gore navedeno, nova procedura za izbor tipa, lokacije i parametara FACTS uređaja može se ilustrovati algoritmom toka datim na Sl. 5.1.



Sl. 5.1. Algoritam nove procedure za izbor FACTS uređaja

5.3. Primena nove procedure na izbor optimalnog tipa, lokacije i parametara FACTS uređaja u prenosnoj mreži

Kao test sistem za primenu razvijene optimizacione procedure izabrana je prenosna mreža elektroprivrede Republike Srbije. U razmatranje su uzeti naponski nivoi 400 kV i 220 kV. Jednofazna šema test sistema data je na Sl. 5.2. Izabrani test sistem ima 55 čvorova, 61 prenosni vod, 7 transformatorskih stanica i 8 generatora. Prenosni vodovi naponskog nivoa 400 kV na Sl. 5.2 nacrtani su debljim, a prenosni vodovi naponskog nivoa 220 kV tanjim linijama. Ukupna instalisana snaga generatora ovog sistema iznosi oko 8900 MVA. Mreža ima dovoljno veliku dimenzionalnost da razvijena procedura može da pokaže svoju superiornost pri pretraživanju velikog broja potencijalnih varijanti kod ugradnje FACTS uređaja.



Sl. 5.2. Test sistem

Za odabranu mrežu izvršeno je planiranje razvoja ugradnjom FACTS uređaja imajući u vidu trend rasta potrošnje i uvođenje novih proizvodnih kapaciteta. Trend rasta potrošnje preuzet je iz Studije perspektivnog razvoja prenosne mreže do 2020 (2025) godine [67]. Usvojen je srednji trend rasta potrošnje od 7 % za vremenski interval od 5 godina. Takođe, iz pomenute Studije preuzeti su i podaci o planiranim novim proizvodnim kapacitetima i načinima njihovog priključenja na postojeći prenosni sistem. Analizirana su sledeća četiri stanja perspektivnog razvoja sistema.

1. Bazno radno stanje. Ovo radno stanje odgovara baznoj godini izrade Studije [67]

2. Prognozirano radno stanje za 2015 godinu. Kod ovog stanja snage potrošnje su povećane shodno usvojenom trendu rasta u odnosu na bazno stanje. Kod ovog stanja nije razmatrano uvođenje novih proizvodnih kapaciteta.

3. Prognozirano radno stanje za 2020 godinu. Snage potrošnje za ovo radno stanje povećane su za dodatnih 7 %. Pri tome, na mrežu je priključen novi proizvodni kapacitet. To je termoelektrana Kolubara B sa dva agregata od po 320 MW. Ova elektrana je priključena na postojeći vod Obrenovac - Kragujevac. Na Sl. 5.2 to je vod 32-37. Priključenjem elektrane uvodi se novi čvor 56, a od postojećeg voda 32-37 nastaju dva voda 32-56 i 37-56.

4. Prognozirano radno stanje za 2025 godinu. Razlika ovog stanja u odnosu na prethodno je u povećanju potrošnje bez uvođenja novih proizvodnih kapaciteta.

Potrebno je naglasiti da je osnovni cilj primene procedure za izbor optimalnog tipa, lokacije i parametara FACTS uređaja plan razvoja razmatranog prenosnog sistema bez izgradnje novih prenosnih kapaciteta

5.3.1. Izbor FACTS uređaja koji će se analizirati

Za potrebe proračuna i analize odabrana su tri tipa FACTS uređaja. Prvi razmatrani uređaj je objedinjeni regulator tokova snaga odnosno UPFC uređaj. UPFC uređaj je izabran zbog njegovih univerzalnih kontrolnih mogućnosti. Kao što je ranije rečeno, ovaj uređaj ima sposobnost da upravlja tokovima aktivnih i reaktivnih snaga po izabranom prenosnom vodu, a istovremeno omogućava upravljanje naponom u izabranom čvoru. Kontrolne mogućnosti ovog uređaja značajno prevazilaze kontrolne

moćnosti drugih jednostavnijih FACTS uređaja. Pored UPFC uređaja odabrani su statički kompenzator reaktivne snage (SVC) kao tipičan predstavnik otočnih i tiristorski kontrolisan redni kompenzator (TCSC) kao tipičan predstavnik rednih FACTS uređaja. Uloga SVC uređaja u prenosnoj mreži je da davanjem ili preuzimanjem reaktivne snage upravlja naponom u čvoru u kome je instaliran. S druge strane TCSC uređaj promenom reaktanse prenosnog voda u koji je instaliran omogućava upravljanje tokovima snaga. Iako SVC i TCSC uređaji imaju slabije upravljačke mogućnosti od UPFC uređaja oni su uključeni u analizu s ciljem da se vidi da li više ovakvih uređaja instalirano pojedinačno ili zajedno mogu da postignu slične ili pak bolje efekte u mreži u poređenju sa slučajem kada koristimo samo UPFC uređaje.

Za potrebe proračuna, za izabrane FACTS uređaje, usvojeni su jednostavniji modeli opisani u poglavlju 2. Razlog za to je potreba za velikim brojem sekvencijalnih proračuna tokova snaga u okviru optimizacionog postupka pa bi kompletni modeli FACTS uređaja u značajnoj meri opteretili proračun. Tako je UPFC uređaj modelovan “black box” modelom opisanom u sekciji 2.6. Uređaj SVC modelovan je kao idealan izvor reaktivne snage, dok je TCSC uređaj modelovan promenljivom reaktansom. Ovi modeli su opisani u sekcijama 2.2 i 2.4.

5.3.2. Definisane optimizacionog problema

Definisane optimizacionog problema podrazumeva pre svega izbor relevantnih kriterijuma i na osnovu njih formiranje adekvatnih kriterijumskih funkcija koje je potrebno optimizovati. Pored toga potrebno je u obzir uzeti sva pogonska ograničenja koja se odnose kako na prenosnu mrežu tako i na same FACTS uređaje.

Optimizacioni problem izbora FACTS uređaja modelovan je sa četiri kriterijumske funkcije. Ove kriterijumske funkcije su odabrane s namerom da obuhvate sve faktore koji karakterišu sistem u normalnom radnom režimu uz obuhvatanje osnovnih eksploatacionih pokazatelja i kriterijuma sigurnosti. Razmatrani su kako tehnički, tako i ekonomski pokazatelji.

Prva kriterijumska funkcija predstavlja ukupne gubitke aktivne snage (Džulovi gubici) u prenosnoj mreži. Ova kriterijumska funkcija data je sledećom jednačinom:

$$f_1 = \sum_{l_B=1}^{L_B} P_{l_B}^L, \quad (5.1)$$

gde su:

$P_{l_B}^L$ – gubici aktivne snage u grani $l_B=1,2,...,L_B$;

L_B – ukupan broj grana u prenosnoj mreži.

Gubici aktivne snage su globalni pokazatelj za prenosnu mrežu i zbog toga se ova kriterijumska funkcija često koristi kod različitih optimizacionih problema.

Druga kriterijumska funkcija se odnosi na nivoe opterećenja prenosnih vodova i data je jednačinom:

$$f_2 = \sum_{l=1}^L \omega_l \left(\frac{S_l}{S_{Rl}} \right)^2 + \sum_{k=1}^K \mu_k \left(\frac{S_k}{S_{Rk}} \right)^2, \quad (5.2)$$

gde je:

L – ukupan broj prenosnih vodova u mreži,

K – ukupan broj vodova u mreži koji su opterećeni iznad dozvoljenog prenosnog kapaciteta,

ω_l – penalizacioni faktor za prenosni vod l ,

μ_k – penalizacioni faktor za vod k koji je opterećen iznad dozvoljenog prenosnog kapaciteta,

S_l i S_k – prividne snage prenosnih vodova l i k ,

S_{Rl} i S_{Rk} – dozvoljeni prenosni kapacitet vodova l i k .

Uvođenje kriterijumske funkcije f_2 ima za cilj obezbeđenje sigurnosti prenosne mreže. Moderan prenosni sistem koncipiran je po sigurnosnom principu $(n-1)$. To znači da sistem mora imati dovoljnu sigurnosnu marginu da normalno funkcioniše čak iako dođe do ispada nekog elementa. Minimizacijom kriterijumske funkcije f_2 vrši se rasterećenje najopterećenijih vodova i povećanje rezerve u prenosu. U tu svrhu penalizacioni faktori za pojedine vodove izabrani su prema nivou opterećenja vodova za bazno radno stanje tako što su najopterećenijim vodovima dodeljeni faktori sa višim vrednostima za razliku od slabije opterećenih vodova. Konkretno, vrednosti za penalizacione faktore ω_l izabrane su prema šemi datoj sledećom jednačinom:

$$\omega_l = \begin{cases} 5, & S_l/S_{Rl} > 0.6 \\ 2, & 0.4 < S_l/S_{Rl} \leq 0.6 \\ 1, & 0.2 < S_l/S_{Rl} \leq 0.4 \\ 0, & 0 < S_l/S_{Rl} \leq 0.2 \end{cases} \quad (5.3)$$

Drugi član kriterijumske funkcije f_2 ima za cilj dodatnu penalizaciju vodova koji su opterećeni iznad dozvoljenog prenosnog kapaciteta. Na taj način se penališe preopterećenje vodova iznad dozvoljenog nivoa. U skladu sa tim, penalizacionim faktorima μ_l dodeljene se adekvatno visoke vrednosti. Konkretno za sve vodove opterećene iznad dozvoljenog prenosnog kapaciteta za penalizacioni faktor μ_l usvojena je vrednost 100.

Treća kriterijumska funkcija predstavlja sumu kvadrata odstupanja napona čvorova mreže i data je jednačinom:

$$f_3 = \sum_{i=1}^{N_B} (U_i - U_d)^2, \quad (5.4)$$

gde je:

U_i – napon čvora i u relativnim jedinicama, $i=1,2,...,N_B$,

U_d – željeni ili nominalni napon,

N_B – ukupan broj čvorova u sistemu.

Uvođenjem ove kriterijumske funkcije se obezbeđuje da se instaliranjem FACTS uređaja minimizuje devijacija napona u čvorovima, odnosno da se popravi naponska slika u sistemu.

Četvrta kriterijumska funkcija modeluje troškove instalacije FACTS uređaja i data je jednačinom:

$$f_4 = \sum_{i=1}^{N_{FACTS}} C_i^{FACTS} S_i \cdot 0,001 \text{ [milion US\$]} \quad (5.5)$$

gde su:

C_i^{FACTS} – troškovi instalacije i -tog FACTS uređaja [US\$/kvar],

S_i – radni opseg i -tog FACTS uređaja u [Mvar],

N_{FACTS} – broj instaliranih FACTS uređaja u mreži.

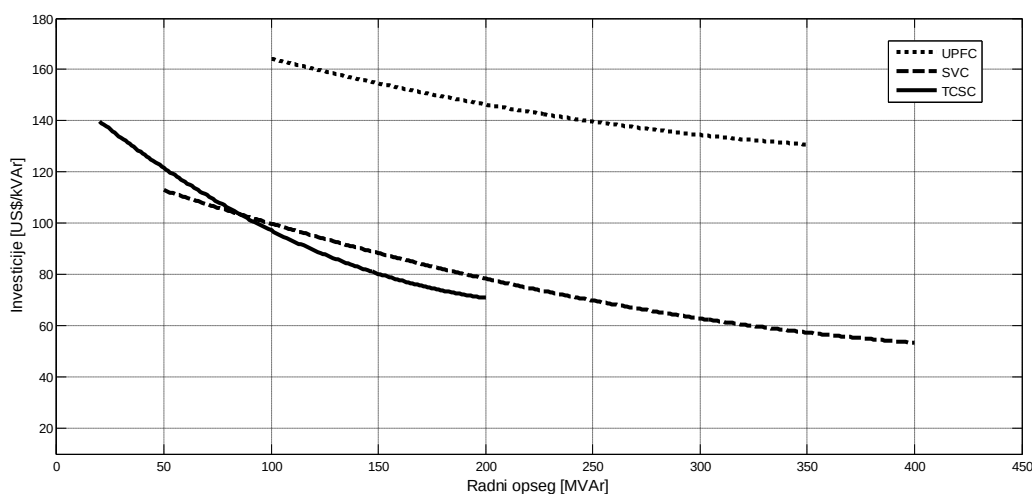
Troškovi instalacije C_i^{FACTS} zavise od tipa FACTS uređaja i uzeti su iz Siemens-ove baze kao što je navedeno u [7]. Za razmatrane tipove FACTS uređaja troškovi instalacije su dati sledećim jednačinama:

$$\text{UPFC: } C_i^{UPFC} = 0,0003S_i^2 - 0,2691S_i + 188,2 \text{ [US$/kvar]} \quad (5.6)$$

$$\text{SVC: } C_i^{SVC} = 0,0003S_i^2 - 0,3051S_i + 127,38 \text{ [US$/kvar]} \quad (5.7)$$

$$\text{TCSC: } C_i^{TCSC} = 0,0015S_i^2 - 0,713S_i + 153,75 \text{ [US$/kvar]} \quad (5.8)$$

Jednačine (5.6) – (5.8) date su grafički na Sl. 5.3.



Sl. 5.3. Troškovi instalacije za razmatrane tipove FACTS uređaja

Razlog za uvođenje kriterijumske funkcije f_4 je obuhvatanje ekonomskog aspekta. Namera je da se minimizacijom ove funkcije izabere rešenje sa što manjim investicionim troškovima.

Potrebno je naglasiti da pojedini tipovi FACTS uređaja imaju uticaj na određene karakteristike prenosne mreže koji su u relaciji sa odgovarajućim kriterijumskim funkcijama. Na primer SVC uređaj generisanjem ili preuzimanjem reaktivne snage iz mreže vrši upravljanje naponom u čvoru u kome je instaliran. Pored tog čvora SVC utiče i na napone ostalih čvorova u mreži. Svakako se može reći da SVC uređaj ima najveći uticaj na kriterijumsku funkciju f_3 od svih razmatranih kriterijumskih funkcija. Uređaj TCSC ima mogućnost kontrole aktivnih snaga pa je uticaj ovog uređaja na kriterijumsku funkciju f_2 sigurno veći nego uticaj na kriterijumsku funkciju f_3 . S druge strane UPFC uređaj ima univerzalne kontrolne mogućnosti pa se može reći da ima

značajan uticaj na prve tri kriterijumske funkcije, ali je najskuplji od svih razmatranih uređaja. Ako bi se pomenuti FACTS uređaji kontrolisali tako da se ne razmatra njihov uticaj na ostale čvorove i grane u mreži, kontrolne akcije koje bi bile logične za grane i čvorove u kojima su uređaji instalirani mogli bi dovesti do preopterećenja drugih grana u mreži ili do neprihvatljivih vrednosti napona u drugim čvorovima. Pored toga, ako su uređaji locirani blizu jedan drugom, kontrolna akcija na jednom uređaju može dovesti do kontra akcije na drugom uređaju. To može izazvati konfliktnu situaciju između uređaja što se može loše odraziti na prenosnu mrežu. Iz ovih razloga koordinisano upravljanje uređajima je neophodno, a ono se vrši uvođenjem globalnih kriterijuma u optimizacioni proces. Simultana optimizacija predloženih kriterijumskih funkcija omogućava maksimalno iskorišćenje kontrolnih mogućnosti svih FACTS uređaja i izbegavanje potencijalnih konfliktnih situacija.

U optimizacioni postupak uključena su sledeća ograničenja:

- Ograničenja balansa aktivnih i reaktivnih snaga u svim čvorovima mreže (jednačine tokova snaga);
- Ograničenja donjih i gornjih granica za napone u svim čvorovima mreže;
- Ograničenja dozvoljenih opterećenja transformatora;
- Ograničenja proizvodnje reaktivne snage agregata u mreži;
- Pogonska ograničenja FACTS uređaja.

Ovim je optimizacioni problem u potpunosti definisan i svodi se na simultanu minimizaciju date četiri kriterijumske funkcije uz uvažavanje navedenih ograničenja.

5.3.3. Izbor scenarija za proračun

Planiranje razvoja prenosne mreže podrazumeva proračune sa različitim tipovima FACTS uređaja. Is tih razloga formirana je lista scenarija za proračun data u Tabeli 5.1. Namera je da se kroz različita scenarija vidi uticaj pojedinih tipova FACTS uređaja na performanse mreže i da se da predlog za optimalni izbor tipa ili eventualno kombinacije tipova FACTS uređaja za analiziranu mrežu. Jedan scenario može da podrazumeva upotrebu samo jednog FACTS uređaja, više FACTS uređaja istog tipa ili kombinaciju više tipova FACTS uređaja. Na primer scenario broj 2 iz Tabele 5.1 podrazumeva proračun sa dva UPFC uređaja, dok se kod scenarija broj 8 proračun vrši

sa jednim SVC i jednim TCSC uređajem. Sa izabranim FACTS uređajima ulazi se u proces optimizacije s ciljem nalaženja optimalne lokacije i optimalnih parametara FACTS uređaja. Potrebno je naglasiti da je jedan od razloga za ovakav izbor scenarija namjera da se utvrdi da li se UPFC uređaj može zameniti drugim, jeftinijim FACTS uređajima, a da pritom pozitivni uticaj na performanse mreže ostane isti ili pak bolji nego u slučaju ugradnje UPFC uređaja.

Tabela 5.1. Odabrani scenariji za proračun

Broj	Scenario
1	1 UPFC
2	2 UPFC
3	1TCSC
4	2TCSC
5	1 SVC
6	2 SVC
7	3 SVC
8	1TCSC+1SVC
9	2TCSC+1SVC
10	1TCSC+2SVC
11	2TCSC+2SVC
12	1TCSC+1SVC +1UPFC

5.3.4. Rezultati proračuna

Za sva četiri potencijalna stanja analizirane mreže, imajući u vidu predložena scenarija iz Tabele 5.1, primenjena je predložena optimizaciona procedura u cilju nalaženja optimalne lokacije i parametara FACTS uređaja. Izvršeno je ukupno $4 \times 12 = 48$ proračuna. Svi proračuni izvršeni su sa populacijom od 80 članova (hromozoma) i trajali su 1000 generacija. Svaki član populacije dobijen je binarnim kodiranjem potencijalne lokacije i odgovarajućih veličina FACTS uređaja u skladu sa predloženim modelima. Kod UPFC uređaja pored potencijalne lokacije binarno su kodirane veličine P_{spec} , Q_{spec} i U_{spec} . Veličine P_{spec} i Q_{spec} su ciljne vrednosti aktivne i reaktivne snage na vodu na koji je priključen UPFC uređaj, a U_{spec} predstavlja željenu vrednost napona u čvoru u koji je priključen UPFC uređaj. Kod SVC uređaja pored potencijalne lokacije binarno je kodirana reaktivna snaga SVC uređaja (Q_{SVC}), koja prema usvojenom modelu, predstavlja i jedini parametar uređaja koji se optimizuje. Konačno, kod TCSC

uređaja binarno su kodirane potencijalna lokacija i reaktansa TCSC uređaja (X_{TCSC}). Kod UPFC uređaja uvedena su sledeća pogonska ograničenja:

- Ograničenje po naponu rednog invertora ($-0,1 \text{ r.j.} \leq U_S \leq 0,1 \text{ r.j.}$);
- Ograničenje po naponu otočnog invertora ($0,9 \text{ r.j.} \leq U_U \leq 1,1 \text{ r.j.}$);
- Ograničenje po struji otočnog invertora ($I_U \leq 3 \text{ r.j.}$).

Kod SVC uređaja uvedeno je ograničenje po reaktivnoj snazi ($Q_{SVC} \leq 3 \text{ r.j.}$), a kod TCSC uređaja ograničenje po reaktansi ($-0,7X_{line} \leq X_{TCSC} \leq 0,2X_{line}$), gde je X_{line} reaktansa prenosnog voda na koji se locira TCSC uređaj.

Pored pogonskih ograničenja FACTS uređaja uvažena su i pogonska ograničenja prenosne mreže. Osim posebnih ograničenja za pojedine elemente (dozvoljena opterećenja transformatora, proizvodne mogućnosti generatora), usvojena su i dozvoljena odstupanja napona u svim čvorovima mreže od $\pm 10\%$ od nominalne vrednosti.

Proračuni su u izvršeni u sistemu relativnih jedinica. Za baznu snagu usvojena je vrednost 100 MVA, za bazne vrednosti napona usvojene su nominalne vrednosti napona, odnosno 220 kV i 400 kV.

Za određeno radno stanje i tekući scenario, za svaki član populacije, izvršen je proračun tokova snaga Newton-Raphson-ovom metodom i na osnovu njega, za datu lokaciju i parametre FACTS uređaja kodirane tim članom populacije, dobijene su vrednosti kriterijumskih funkcija. Na osnovu tih vrednosti primenom NSGA-II metode formirana je populacija za narednu generaciju. Kao što je rečeno, proračuni kod svih scenarija trajali su 1000 generacija. Nakon proračuna kao rezultat optimizacionog postupka za svaki scenario je dobijen set optimalnih rešenja.

5.3.4.1. Rezultati proračuna za prvo analizirano stanje

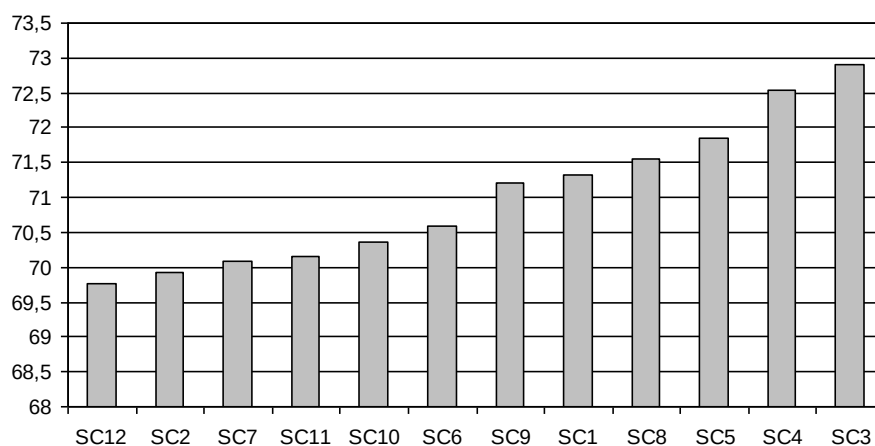
Kao ilustracija dobijenih rezultata za prvo analizirano stanje u Tabeli 5.2 date su minimalne i maksimalne vrednosti kriterijumskih funkcija za dobijeni set optimalnih rešenja za sve predložene scenarije. Ovi podaci predstavljaju opsege u kojima se nalaze vrednosti kriterijumskih funkcija, a što je još važnije pokazuju regulacione mogućnosti pojedinih FACTS uređaja. Potrebno je naglasiti da minimalne vrednosti kriterijumskih

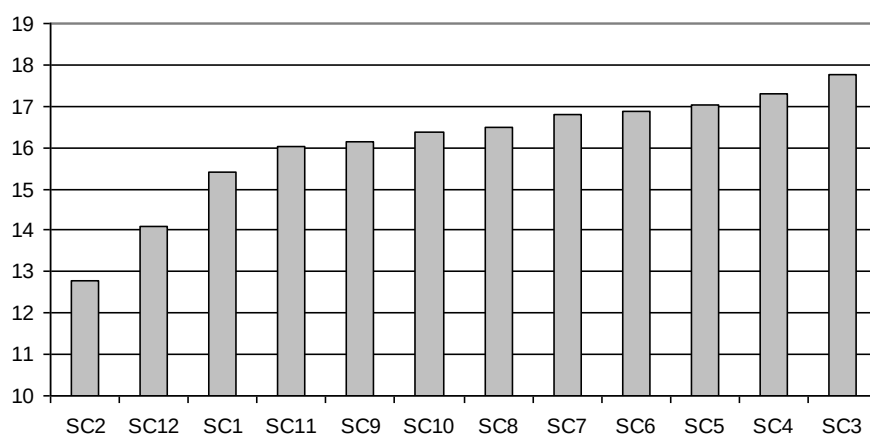
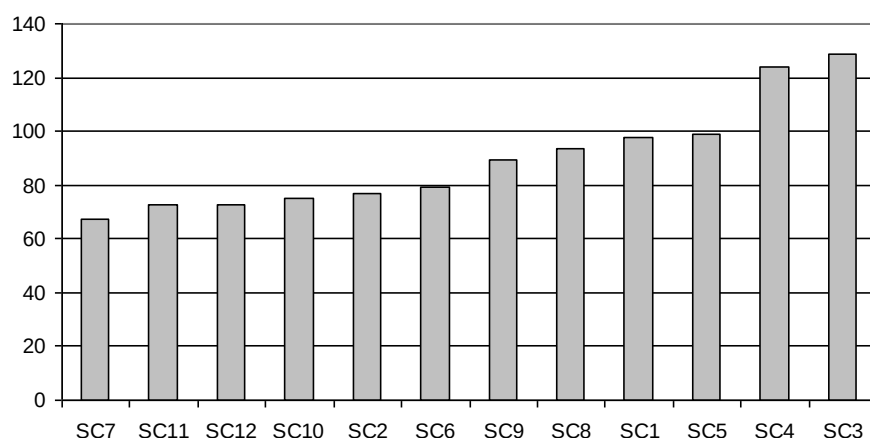
funkcija definišu utopia tačku u prostoru kriterijumskih funkcija za odgovarajući scenario. Pored ovih podataka u Tabeli 5.2 su dati i podaci o baznim vrednostima kriterijumskih funkcija, odnosno o vrednostima kriterijumskih funkcija pre ugradnje FACTS uređaja. Ovi podaci definišu baznu tačku odnosno stanje u mreži pre ugradnje FACTS uređaja. Kod optimizacionog postupka uvedeno je još jedno ograničenje koje se odnosi na bazne vrednosti kriterijumskih funkcija. Naime proračun je tako koncipiran da vrednosti kriterijumskih funkcija, za sva dobijena rešenja, budu manje od baznih vrednosti. Bez ovog ograničenja, u procesu optimizacije, može da se desi da značajno poboljšanje jedne kriterijumske funkcija dovede do degradacije ostalih kriterijumskih funkcija i da kod pojedinih rešenja za neke kriterijumske funkcije imamo lošiji rezultat od bazne vrednosti. Uvođenjem gornjih granica za kriterijumske funkcije obezbeđujemo da dobijena rešenja budu po svim ili bar jednoj kriterijumskoj funkciji bolja od bazne tačke. Na osnovu podataka iz Tabele 5.2 vidi se da su kod svih scenarija maksimalne vrednosti kriterijumskih funkcija dostigle bazne vrednosti. Drugim rečima u procesu optimizacije pored ostalih rešenja dobijeno je i rešenje koje odgovara baznoj tački, odnosno stanju pre ugradnje uređaja. Ovo je potvrda dobre rasprostranjenosti rešenja u prostoru kriterijumskih funkcija. To je jedan od osnovnih ciljeva višekriterijumske optimizacije. Pretraga kompletnog prostora sa svim potencijalnim rešenjima.

Grafički prikaz minimalnih vrednosti iz Tabele 5.2 za prve tri kriterijumske funkcije dat je na slikama Sl. 5.4, 5.5 i 5.6. Ovakav prikaz ima za cilj da pokaže kakav je uticaj pojedinih scenarija, odnosno kombinacija FACTS uređaja, na pojedinačne kriterijumske funkcije. Može se uočiti da su po pitanju prve dve kriterijumske funkcije scenariji 2 i 12 dominantni. To je očekivano jer se kod ova dva scenarija koriste UPFC uređaji koji mogu da upravljaju tokovima snaga u mreži te na taj način mogu da utiču na smanjenje gubitaka aktivne snage i na ravnomerniju raspodelu tokova snaga po prenosnim vodovima. Kod treće kriterijumske funkcije najbolji rezultati se postižu sa sedmim scenarijom. Kod ovog scenarija koriste se tri SVC uređaja koji generisanjem reaktivne snage svakako pozitivno deluju na naponsku sliku prenosne mreže. Sa datih dijagrama može se videti i to da scenarija sa jednim FACTS uređajem nisu konkurenta scenarijima sa dva ili više FACTS uređaja. To je i očekivano, mada zanimljivo je da peti scenario (jedan SVC uređaj) ima bolje rezultate kod sve tri kriterijumske funkcije u poređenju sa trećim i četvrtim scenarijom (jedan odnosno dva TCSC uređaja).

Tabela 5.2. Minimalne i maksimalne vrednosti kriterijumskih funkcija za dobijeni set optimalnih rešenja za sve predložene scenarije za prvo radno stanje

Proračun		f_1	f_2	$f_3 \cdot 10^{-3}$	f_4
Bazni		73.153	18.127	134.115	-
Scenario 1	min	71.313	15.425	97.787	0.328
	max	73.153	18.111	134.115	42.292
Scenario 2	min	69.924	12.773	76.885	0.996
	max	73.153	18.125	134.115	82.383
Scenario 3	min	72.899	17.748	128.746	0.002
	max	73.153	18.127	134.115	6.605
Scenario 4	min	72.531	17.301	124.062	0.072
	max	73.153	18.127	134.115	16.261
Scenario 5	min	71.850	17.024	98.950	0
	max	73.153	18.127	134.115	18.855
Scenario 6	min	70.589	16.882	79.088	0
	max	73.153	18.127	134.115	37.710
Scenario 7	min	70.088	16.805	67.364	0
	max	73.153	18.127	134.115	56.135
Scenario 8	min	71.551	16.506	93.573	0.018
	max	73.152	18.127	134.115	28.525
Scenario 9	min	71.204	16.153	89.086	0.001
	max	73.153	18.127	134.115	35.411
Scenario 10	min	70.350	16.375	74.955	0.018
	max	73.153	18.127	134.115	47.366
Scenario 11	min	70.162	16.034	72.578	0.008
	max	73.153	18.127	134.115	54.054
Scenario 12	min	69.770	14.112	72.930	0.008
	max	73.152	18.112	134.113	70.103

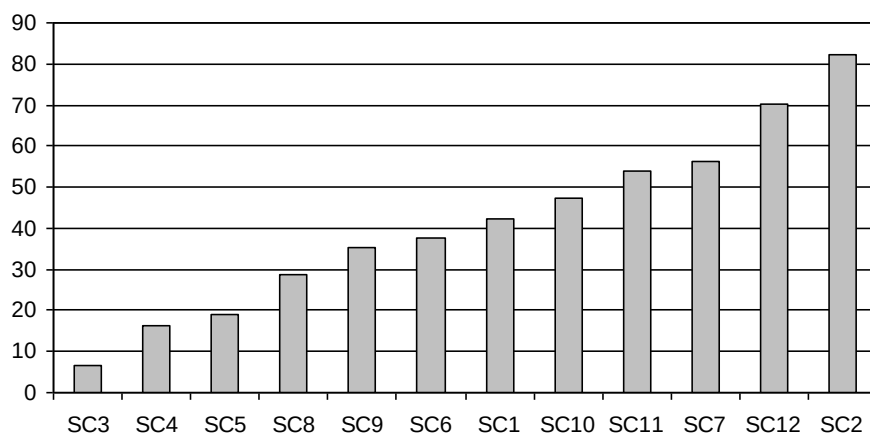
Sl. 5.4. Minimalne vrednosti kriterijumske funkcije f_1 po scenarijima

Sl. 5.5. Minimalne vrednosti kriterijumske funkcije f_2 po scenarijimaSl. 5.6. Minimalne vrednosti kriterijumske funkcije f_3 po scenarijima

Na Sl. 5.7, na osnovu podataka iz Tabele 5.2, date su maksimalne vrednosti kriterijumske funkcije f_4 , odnosno investicija za pojedina scenarija. Podaci su sortirani prema rastućim vrednostima. Kao što je očekivano scenarija sa UPFC uređajima imaju značajno veće maksimalne vrednosti za investicije od ostalih scenarija.

U cilju dobijanja kompletnije slike o dobijenim rezultatima optimizacije u tekstu koji sledi za neke od scenarija biće dati kompletni podaci o dobijenim rešenjima. U Tabeli 5.3, za prvi scenario odnosno za slučaj kada se vrši optimizacija lokacije i parametara za jedan UPFC uređaj, dati su podaci o dobijenim rešenjima. U Tabeli 5.3 prikazno je samo 10 od 80 dobijenih rešenja. Od podataka u tabeli dati su optimalna lokacija, odnosno vod na koji se ugrađuje UPFC uređaj, zatim specificirane veličine

P_{spec} , Q_{spec} i U_{spec} . U nastavku date su vrednosti kriterijumskih funkcija ($f_1 - f_4$), napon rednog invertra U_S i napon otočnog invertra U_U . Konačno u poslednjoj koloni dati su podaci o struji otočnog invertora I_U . Svi podaci za snage, napone i struju iz Tabele 5.3 dati su u relativnim jedinicama u odnosu na usvojene bazne vrednosti.

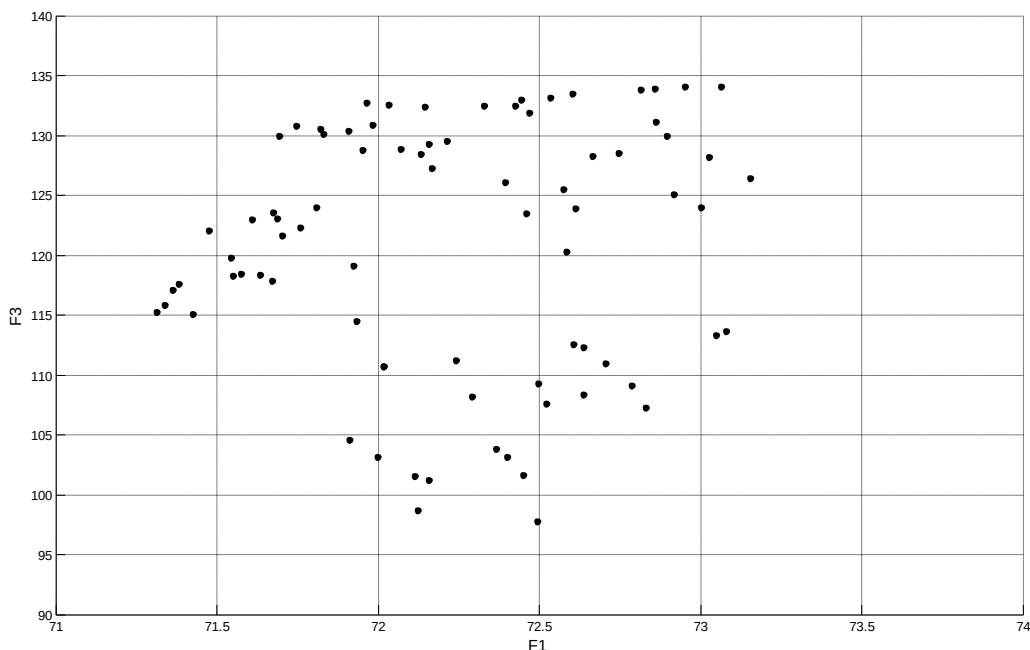


Sl. 5.7. Maksimalne vrednosti kriterijumske funkcije f_4 po scenarijima

Dobijeni rezultati ne mogu se adekvatno prikazati u grafičkom obliku u prostoru kriterijumskih funkcija jer imamo četiri kriterijumske funkcije. Ilustracije radi na Sl. 5.8 data je projekcija dobijenog seta optimalnih rešenja na ravan $f_1 - f_3$, za prvi scenario.

Tabela 5.3. Podaci za 10 odabranih rešenja za slučaj prvog scenarija

Vod	P_{spec}	Q_{spec}	U_{spec}	f_1	f_2	$f_3 \cdot 10^{-3}$	f_4	U_S	U_U	I_U
2-8	0.314	0.806	1.026	71.314	15.774	115.272	41.140	0.056	1.041	2.995
2-8	0.314	0.771	1.011	71.474	15.800	122.054	29.478	0.061	1.021	1.996
8-2	-0.613	0.501	1.032	71.746	15.584	130.757	22.056	0.082	1.039	1.369
5-18	0.953	0.525	1.039	71.912	17.881	104.596	31.119	-0.017	1.049	2.079
8-2	-0.196	2.554	1.011	71.933	16.225	114.515	38.051	0.076	1.025	2.757
5-18	1.311	0.537	1.018	72.290	17.600	108.213	24.422	0.057	1.026	1.569
5-18	1.041	0.894	1.032	72.451	17.794	101.614	32.816	0.054	1.043	2.239
5-18	1.106	0.994	1.060	72.495	17.757	97.787	42.292	0.036	1.075	3.000
5-18	1.487	0.736	1.012	72.830	17.463	107.267	24.611	0.095	1.020	1.593
8-31	-1.686	-0.754	1.050	73.047	15.425	113.339	41.084	-0.062	1.065	2.922

Sl. 5.8. Projekcija dobijenog seta optimalnih rešenja na ravan $f_1 - f_3$, za prvi scenario.

I za ostale scenarije podaci se mogu prezentovati na sličan način. Primera radi za sedmi scenario, odnosno optimizaciju lokacije i parametara za tri SVC uređaja, u Tabeli 5.4 dato je 10 odabranih rešenja od ukupno 80. Od podataka u tabeli su dati optimalna lokacija, odnosno čvorovi u koje je optimalno ugraditi SVC uređaje, reaktivna snaga SVC uređaja (Q_{SVC}) i vrednosti svih kriterijumskih funkcija ($f_1 - f_4$). Reaktivna snaga SVC uređaja data je u relativnim jedinicama u odnosu na baznu snagu.

U Tabeli 5.5 za deseti scenario, odnosno optimizaciju lokacije i parametara za jedan TCSC uređaj i dva SVC uređaja, dat je prikaz podataka za 10 odabranih rešenja iz seta od 80 optimalnih rešenja. Od podataka su date optimalne lokacije, odnosno vod ako je u pitanju TCSC uređaj ili čvor ako se radi o SVC uređaju. U narednim kolonama date su informacije o tipu uređaja i o parametrima uređaja. U slučaju SVC uređaja to je reaktivna snaga (Q_{SVC}), a u slučaju TCSC uređaja reaktansa tog uređaja (X_{TCSC}). Reaktivna snaga SVC uređaja data je u relativnim jedinicama, dok je podatak o reaktansi TCSC uređaja dat u odnosu na reaktansu voda na koji se ugrađuje TCSC uređaj. Konačno u poslednje četiri kolone dati su podaci o kriterijumskim funkcijama.

Tabela 5.4. Podaci za 10 odabranih rešenja za slučaj sedmog scenarija

Rešenje	Čvor	Q_{SVC}	f_1	f_2	$f_3 \cdot 10^{-3}$	f_4
1	2	3.000	70.088	16.805	77.328	45.312
	25	0.997				
	5	2.211				
2	2	3.000	70.208	16.822	72.749	47.578
	25	0.997				
	5	2.962				
3	2	3.000	70.274	16.832	70.904	50.124
	25	1.372				
	5	2.962				
4	2	3.000	70.320	16.838	75.148	45.662
	17	0.874				
	5	2.613				
5	8	2.906	70.519	16.851	76.799	45.515
	17	0.886				
	5	2.613				
6	17	0.721	71.137	17.705	81.417	38.847
	25	1.372				
	5	2.909				
7	2	2.977	72.302	17.072	72.172	47.292
	25	0.991				
	18	2.891				
8	44	0.000	72.712	17.124	114.268	18.848
	17	0.000				
	23	2.997				
9	2	3.000	73.144	17.208	67.364	54.257
	25	2.249				
	18	2.968				
10	39	0.000	73.153	18.127	134.116	0.000
	33	0.000				
	17	0.000				

Na osnovu dobijenog seta optimalnih rešenja za pojedina scenarija može se izabrati jedinstveno optimalno rešenje. Izbor jedinstvenog rešenja u ovoj fazi optimizacione procedure ima smisla ako se unapred odaberu neka scenarija kao potencijalna rešenja za ugradnju FACTS uređaja. U tom slučaju namera je da se za ta scenarija odredi jedinstveno rešenje, odnosno optimalna lokacija i parametri za odabrane uređaje.

Tabela 5.5. Podaci za 10 odabranih rešenja za slučaj desetog scenarija

Rešenje	Lok.	Tip	Q_{SVC}	X_{TCSC}	f_1	f_2	$f_3 \cdot 10^{-3}$	f_4
1	34-32	TCSC		-0.700	70.350	16.916	91.499	47.366
	2	SVC	3.000					
	39	SVC	3.000					
2	37-32	TCSC		-0.440	70.494	16.670	84.832	42.203
	2	SVC	3.000					
	5	SVC	2.065					
3	19-14	TCSC		-0.378	70.912	16.568	80.227	38.558
	2	SVC	2.982					
	5	SVC	2.824					
4	19-14	TCSC		-0.501	71.247	16.479	83.533	37.357
	8	SVC	2.812					
	5	SVC	2.531					
5	19-14	TCSC		-0.700	71.620	16.375	84.101	36.001
	2	SVC	3.000					
	5	SVC	2.065					
6	19-14	TCSC		-0.501	71.784	17.058	97.841	25.513
	8	SVC	0.771					
	5	SVC	2.065					
7	3-24	TCSC		-0.691	71.880	17.008	115.378	19.427
	2	SVC	3.000					
	34	SVC	0.000					
8	19-14	TCSC		-0.700	72.052	16.774	92.467	29.988
	2	SVC	1.428					
	5	SVC	2.065					
9	34-32	TCSC		-0.700	72.787	17.133	74.955	47.366
	2	SVC	3.000					
	18	SVC	3.000					
10	21-31	TCSC		0.004	73.152	18.127	134.115	0.018
	2	SVC	0.000					
	3	SVC	0.000					

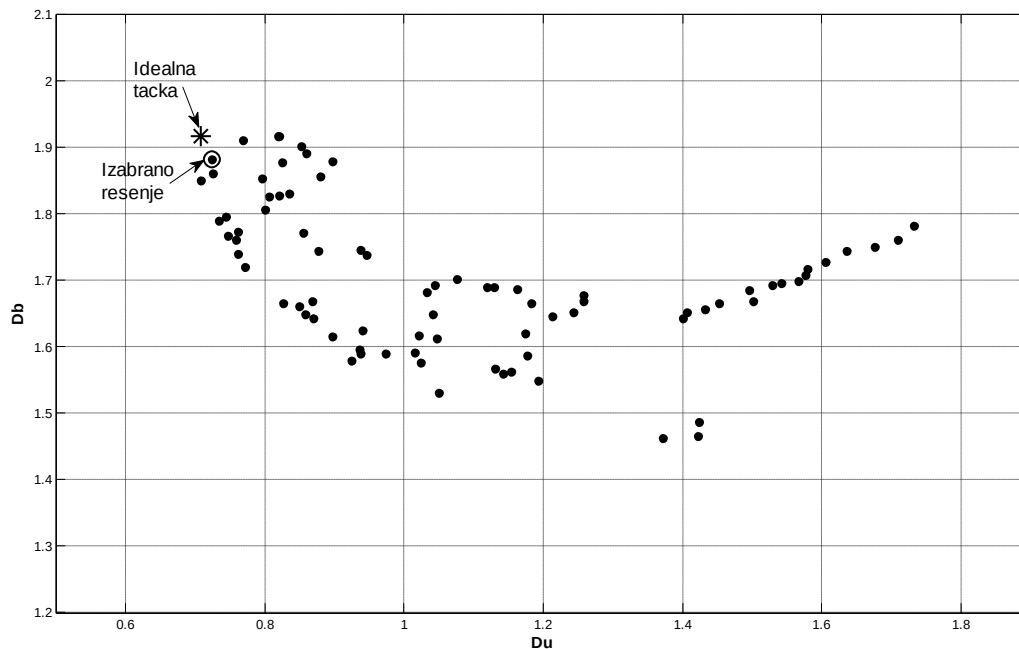
Set optimalnih rešenja krajnjem korisniku daje široku mogućnost izbora ali izbor jedinstvenog rešenja nije ni malo lak zadatak. Problem izbora finalnog rešenja je posebno izražen kod simultane optimizacije većeg broja kriterijumskih funkcija kao što je slučaj kod postavljenog optimizacionog problema kod koga se vrši simulatna optimizacija 4 kriterijumske funkcije. Kod ovakvog slučaja dobijeni rezultati ne mogu da se adekvatno prikažu grafički. Projekcije rezultata na pojedine ravni kao što je to na primer urađeno na Sl. 5.8 takođe ne daju potpunu sliku o rezultatima optimizacionog problema. Prikaz rezultata tabelarno daje potpune informacije o dobijenim rezultatima ali kao takav prilično je nepraktičan. Krajnji korisnik teško može da izađe na kraj sa

tolikom količinom podataka i da na kraju odabere zadovoljavajuće kompromisno rešenje. Međutim, izbor finalnog kompromisnog rešenja može da se izvrši primenom *Du-Db* metode opisane u poglavlju 4.3.11. Istovremenom minimizacijom udaljenosti do utopia tačke, i maksimizacijom udaljenosti od bazne tačke za sva dobijena rešenja može se izabrati rešenje koje predstavlja kompromis između ova dva kriterijuma za izbor. Za sve analizirane scenarije bazna tačka je ista i podaci o njoj su dati u Tabeli 5.2, osim podatka za četvrtu kriterijumsku funkciju koja predstavlja investicije. Za ovu kriterijumsku funkciju, za baznu vrednost arbitrarno je uzeta vrednost od 100 miliona \$. Ova vrednost može da se tumači kao vrednost maksimalnih investicija predviđenih za razvoj mreže ugradnjom regulacionih uređaja. Za koordinate utopia tačke, za pojedina scenarija, uzete su minimalne vrednosti kriterijumskih funkcija date u Tabeli 5.2. Primenom *Du-Db* metode za sva analizirana scenarija izabrana su finalna kompromisna rešenja. Podaci o ovim rešenjima za nekoliko odabranih scenarija dati su u Tabeli 5.6. Pored broja scenarija dati su podaci o tipu FACTS uređaja koji figurišu u određenom scenariju i dobijenoj optimalnoj lokaciji. U slučaju UPFC i TCSC uređaja lokacija je definisana sa dva čvora koji predstavljaju krajeve voda na koji se ovi uređaji priključuju. Primera radi lokacija 8-2 za UPFC uređaj govori da se taj uređaj priključuje na vod 8-2 kod čvora 8. U nastavku, date su relevantne veličine za pojedine FACTS uređaje. Za UPFC su dati podaci o specificiranim veličinama P_{spec} , Q_{spec} i U_{spec} . Za SVC uređaj data je reaktivna snaga tog uređaja Q_{SVC} , a za TCSC uređaj reaktansa tog uređaja X_{TCSC} gledana relativno u odnosu na reaktansu voda na koji se priključuje ovaj uređaj. Konačno u poslednjim kolonama Tabele 5.6 dati su podaci o vrednostima kriterijumskih funkcija.

Radi ilustracije *Du-Db* metode na Sl. 5.9 dat je prikaz dobijenih rešenja u *Du-Db* ravni za sedmi scenario. Svaka tačka na grafiku na Sl. 5.9 predstavlja jedno dobijeno optimalno rešenje od ukupno 80 koliko se dobija u procesu optimizacije. Koordinate tačaka predstavljaju njihove udaljenosti od utopia i bazne tačke. Na Sl. 5.9 posebno je naznačena idealna tačka. To je fiktivna tačka čije koordinate odgovaraju minimalnom rastojanju od utopia tačke i maksimalnom rastojanju od bazne tačke. Optimalno rešenje najbliže ovoj tački uzima se kao finalno izabrano rešenje. Na Sl. 5.9 ovo rešenje je posebno naznačeno.

Tabela 5.6. Podaci o izabranim rešenjima za odabrane scenarije

Scen.	Tip	Lok.	P_{spec}	Q_{spec}	U_{spec}	Q_{SVC}	X_{TCSC}	f_1	f_2	$f_3 \cdot 10^{-3}$	f_4
1	UPFC	2-8	0.718	0.490	0.996			71.982	15.721	130.909	13.850
2	UPFC	2-8	0.431	0.695	1.016			70.516	15.210	94.398	56.299
	UPFC	5-18	1.199	0.572	1.014						
7	SVC	2				2.971		70.409	16.856	82.756	37.989
	SVC	25				0.214					
	SVC	5				2.246					
10	TCSC	19-14					-0.364	70.848	16.565	87.069	35.059
	SVC	2				2.982					
	SVC	5				1.827					
11	TCSC	19-14					-0.421	70.875	16.214	86.416	41.372
	TCSC	37-32					-0.700				
	SVC	8				2.525					
	SVC	5				2.038					
12	TCSC	37-32					-0.699	70.371	15.046	95.715	45.507
	SVC	5				2.126					
	UPFC	2-8	0.683	0.889	1.000						

Sl. 5.9. Ilustracija $Du-Db$ metode

5.3.4.2. Rezultati proračuna za ostala analizirana stanja

Za ostala stanja rezultati dobijeni optimizacijom mogu se prezentovati na sličan način kao i za prvo stanje. Ovde će se dati samo minimalne i maksimalne vrednosti kriterijumskih funkcija za pojedinačna stanja i razmatrane scenarije. Ovi podaci su dati u Tabelama 5.7, 5.8 i 5.9. Ovi podaci pokazuje regulacione mogućnosti pojedinih FACTS uređaja ili njihove kombinacije imajući u vidu razmatrana scenarija. Pored ovih podataka date su i vrednosti kriterijumskih funkcija pre ugradnje FACTS uređaja odnosno vrednosti koje odgovaraju baznom stanju.

Tabela 5.7. Minimalne i maksimalne vrednosti kriterijumskih funkcija za dobijeni set optimalnih rešenja za sve predložene scenarije za drugo radno stanje

Proračun		f_1	f_2	$f_3 \cdot 10^{-3}$	f_4
Bazni		76.556	19.510	146.055	
Scenario 1	min	74.552	16.495	105.780	0.037
	max	76.555	19.403	146.052	42.697
Scenario 2	min	72.879	13.583	82.932	0.708
	max	76.554	19.506	146.028	84.163
Scenario 3	min	76.234	19.031	139.880	0.001
	max	76.556	19.510	146.055	6.605
Scenario 4	min	75.766	18.534	134.044	0.002
	max	76.556	19.510	146.055	16.261
Scenario 5	min	75.057	18.234	107.340	0
	max	76.556	19.510	146.055	18.855
Scenario 6	min	73.579	18.054	85.613	0
	max	76.556	19.510	146.055	37.710
Scenario 7	min	72.937	17.960	71.801	0
	max	76.556	19.510	146.055	56.565
Scenario 8	min	74.732	17.667	101.438	0.001
	max	76.556	19.510	146.055	28.511
Scenario 9	min	74.264	17.214	95.956	0.002
	max	76.556	19.510	146.055	35.350
Scenario 10	min	73.310	17.501	80.177	0.001
	max	76.556	19.510	146.055	47.651
Scenario 11	min	73.029	17.082	78.285	0.008
	max	76.556	19.510	146.053	54.780
Scenario 12	min	72.744	14.927	78.783	0.071
	max	76.556	19.507	146.048	69.428

Tabela 5.8. Minimalne i maksimalne vrednosti kriterijumskih funkcija za dobijeni set optimalnih rešenja za sve predložene scenarije za treće radno stanje

Proračun		f_1	f_2	$f_3 \cdot 10^{-3}$	f_4
Bazni		87.950	22.207	163.844	
Scenario 1	min	85.478	18.883	116.581	0.022
	max	87.944	22.175	163.842	42.571
Scenario 2	min	83.406	15.610	92.008	0.833
	max	87.949	22.203	163.581	83.843
Scenario 3	min	87.413	21.542	155.963	0.002
	max	87.950	22.207	163.844	6.605
Scenario 4	min	86.604	20.995	149.029	0.0606
	max	87.950	22.207	163.843	16.261
Scenario 5	min	85.718	20.722	118.855	0
	max	87.950	22.207	163.844	18.855
Scenario 6	min	84.033	20.471	95.085	0
	max	87.950	22.207	163.844	37.710
Scenario 7	min	83.244	20.355	80.339	0
	max	87.950	22.207	163.844	56.565
Scenario 8	min	85.411	20.048	111.473	0.001
	max	87.950	22.207	163.844	28.577
Scenario 9	min	84.827	19.448	105.181	0.067
	max	87.949	22.205	163.843	35.349
Scenario 10	min	83.689	19.847	90.183	0.068
	max	87.950	22.207	163.843	47.403
Scenario 11	min	83.140	19.261	85.743	0.002
	max	87.950	22.207	163.844	55.319
Scenario 12	min	83.289	16.826	86.877	0.236
	max	87.950	22.207	163.837	70.582

Kao i kod prvog stanja i ovde se mogu na sličan način analizirati dobijeni rezultati. Za odabrano radno stanje i scenario u okviru njega može se *Du-Db* metodom predložiti jedinstveno kompromisno rešenje.

Tabela 5.9. Minimalne i maksimalne vrednosti kriterijumskih funkcija za dobijeni set optimalnih rešenja za sve predložene scenarije za četvrto radno stanje

Proračun		f_1	f_2	$f_3 \cdot 10^{-3}$	f_4
Bazni		96.889	24.465	182.103	
Scenario 1	min	93.818	20.732	128.566	0.019
	max	96.889	24.066	182.102	42.379
Scenario 2	min	91.447	17.106	102.178	1.778
	max	96.889	24.465	182.102	84.225
Scenario 3	min	96.194	23.625	172.590	0.002
	max	96.889	24.465	182.103	6.605
Scenario 4	min	95.109	23.011	164.168	0.002
	max	96.889	24.465	182.103	16.261
Scenario 5	min	94.017	22.757	131.486	0
	max	96.889	24.465	182.103	18.855
Scenario 6	min	92.101	22.429	105.852	0
	max	96.889	24.465	182.103	37.710
Scenario 7	min	91.131	22.259	88.371	0
	max	96.889	24.465	182.103	56.550
Scenario 8	min	93.629	21.905	123.056	0.002
	max	96.889	24.465	182.103	28.511
Scenario 9	min	92.879	21.258	116.107	0.049
	max	96.889	24.465	182.103	35.852
Scenario 10	min	91.681	21.641	98.964	0.039
	max	96.888	24.465	182.100	47.366
Scenario 11	min	90.958	21.000	93.983	0.098
	max	96.889	24.464	182.096	54.616
Scenario 12	min	91.281	18.457	96.253	0.136
	max	96.888	24.461	182.005	70.496

5.3.4.3. Uporedna analiza rezultata za razmatrana stanja

Ranije je rečeno da su u proces optimizacije uključeni lokacija i parametri FACTS uređaja. Tip FACTS uređaja nije direktno uključen u optimizacioni proces već je analiziran kroz odabrana scenarija. Međutim, određivanje optimalnog FACTS uređaja ili kombinacije FACTS uređaja za razmatranu mrežu može se izvršiti grupisanjem dobijenih rezultata za različita scenarija u jedan jedinstveni set optimalnih rešenja. Za izabrano stanje kao rezultat optimizacije za određeni scenario dobija se set od 80 optimalnih rešenja. Za svih 12 scenarija proračun polazi od istog stanja i u procesu optimizacije vrši se simultana optimizacija istih kriterijumskih funkcija uz uvažavanje istih pogonskih ograničenja. Iz tih razloga dobijena rešenja za sva scenarija

mogu se grupisati u jedinstven set optimalnih rešenja. Broj rešenja u ovako formiranom jedinstvenom setu iznosi $12 \times 80 = 960$. Na ovako dobijeni set rešenja potrebno je primeniti princip dominacije s ciljem da u njemu ostanu samo nedominirajuća rešenja odnosno ona rešenja nad kojima niko nema dominaciju. Na ovakav način za razmatrano stanje, dobija se set kompromisnih rešenja, odnosno Pareto front, koji je odličan reprezent optimizacionog postupka kod koga bi u procesu optimizacije pored lokacije i parametara bio uključen i tip FACTS uređaja. U Tabeli 5.10 za sva četiri stanja sistema dati su podaci o učešću pojedinih scenarija u jedinstvenom Pareto frontu nakon objedinjavanja rešenja za sve scenarije. Nakon primene principa dominacije iz jedinstvenog seta od 960 rešenja izbacuje se dosta rešenja. I pored toga, redukovani set ima dovoljno veliki broj rešenja i može se sa sigurnošću reći da on predstavlja veoma kvalitetan rezultat optimizacionog postupka kod koga su u proces optimizacije uključene različite kombinacije FACTS uređaja, njihove lokacije i parametri. Na osnovu podataka iz Tabele 5.10 mogu se uočiti scenarija koja se po broju preostalih rešenja izdvajaju od drugih. To su scenarija 6, 7, 10 i 12. S druge strane najlošiji rezultati imaju se kod trećeg scenarija odnosno ugradnje jednog TCSC uređaja. To je bilo i očekivano jer ugradnja samo jednog TCSC uređaja ima mali uticaj na izabrane kriterijumske funkcije pa ovaj scenario ne predstavlja pravu konkurenciju ostalim scenarijima.

Tabela 5.10. Učešće pojedinih scenarija u jedinstvenom setu rešenja za sva četiri stanja

	Stanje 1	Stanje 2	Stanje 3	Stanje 4
SC1	19	19	25	11
SC2	42	48	44	24
SC3	3	2	2	9
SC4	28	15	8	30
SC5	62	43	36	38
SC6	68	61	40	59
SC7	65	53	43	53
SC8	39	26	27	43
SC9	26	21	21	30
SC10	49	46	47	40
SC11	40	44	43	39
SC12	61	61	63	66
Ukupno	502	439	399	442

Za sva četiri stanja analizom dobijenih jedinstvenih setova kompromisnih rešenja mogu se izabrati ona scenarija koja za analiziranu mrežu predstavljaju optimalno rešenje. U tu svrhu može se upotrebiti *Du-Db* metoda za izbor jedinstvenog kompromisnog rešenja. Za primenu ove metode potrebno je odrediti koordinate baznih i utopia tačaka za četiri razmatrana stanja. Podaci o koordinatama za bazne tačke već su eksplicitno dati u tabelama 5.2, 5.7, 5.8 i 5.9. Iz ovih tabela mogu se dobiti i koordinate utopia tačaka kao minimalne vrednosti pojedinih kriterijumskih funkcija uzimajući u obzir sva scenarija. Sve potrebne koordinate za bazne i utopia tačke za sva četiri radna stanja date su pregledno u Tabeli 5.11. Za četvrtu kriterijumsku funkciju, za baznu vrednost arbitrarno je uzeta vrednost od 100 miliona \$ kao maksimalna vrednost investicija predviđenih za razvoj mreže ugradnjom FACTS uređaja.

Tabela 5.11. Koordinate baznih i utopia tačaka za četiri radna stanja.

Stanje	tačka	f_1	f_2	$f_3 \cdot 10^{-3}$	f_4
1	bazna	73.153	18.127	134.115	100
	utopia	69.770	12.773	67.364	0
2	bazna	76.556	19.510	146.055	100
	utopia	72.744	13.583	71.801	0
3	bazna	87.950	22.207	163.844	100
	utopia	83.140	15.610	80.339	0
4	bazna	96.889	24.465	182.103	100
	utopia	90.958	17.106	88.371	0

U Tabelama 5.12-5.15 dati su rezultati primene *Du-Db* metode za sva četiri stanja. U cilju što kompletnije analize u tabelama nisu data samo najbolja rešenja već prvih 10 rešenja dobijenih primenom ove metode. Na slikama Sl. 5.10-5.13 za sva četiri stanja dat je prikaz svih rešenja u *Du-Db* ravni. Sa zvezdicom je obeležena idealna tačka, a najbolje rešenje je obeleženo kružićem. Raspodela rešenja u *Du-Db* ravni je veoma slična za sva četiri stanja. Sa datih grafika može se uočiti veliki broj rešenja koja su prilično daleko od idealne tačke i kao takva nisu dobri kandidati za konačan izbor.

Tabela 5.12. Prvih 10 rešenja sortiranih prema *Du-Db* metodi za prvo radno stanje

Sc.	Tip	Lok.	P_{spec}	Q_{spec}	U_{spec}	Q_{SVC}	X_{TCSC}	f_1	f_2	$f_3 \cdot 10^{-3}$	f_4
12	TCSC	25-4					-0.140	70.221	15.576	86.957	50.569
	SVC	5				2.642					
	UPFC	2-8	0.361	0.759	1.014						
7	SVC	2				2.976		70.166	16.819	80.779	41.618
	SVC	25				0.619					
	SVC	5				2.091					
12	TCSC	34-32					-0.675	69.974	15.528	82.525	60.300
	SVC	5				2.642					
	UPFC	2-8	0.361	0.759	1.015						
12	TCSC	38-1					-0.020	70.428	15.389	84.786	52.172
	SVC	5				2.965					
	UPFC	2-8	0.736	0.754	1.015						
12	TCSC	37-32					-0.699	70.372	15.046	95.715	45.507
	SVC	5				2.126					
	UPFC	2-8	0.683	0.889	1.000						
7	SVC	2				3.000		70.088	16.805	77.592	45.160
	SVC	25				0.991					
	SVC	5				2.182					
12	TCSC	3-25					-0.141	70.121	15.440	84.970	58.010
	SVC	5				2.220					
	UPFC	2-8	0.507	0.877	1.025						
7	SVC	2				3.000		70.088	16.805	77.328	45.312
	SVC	25				0.997					
	SVC	5				2.211					
12	TCSC	37-32					-0.474	70.330	15.162	84.023	59.103
	SVC	5				2.965					
	UPFC	2-8	0.736	0.759	1.015						
7	SVC	2				2.971		70.409	16.856	82.756	37.989
	SVC	25				0.214					
	SVC	5				2.246					

Tabela 5.13. Prvih 10 rešenja sortiranih prema *Du-Db* metodi za drugo radno stanje

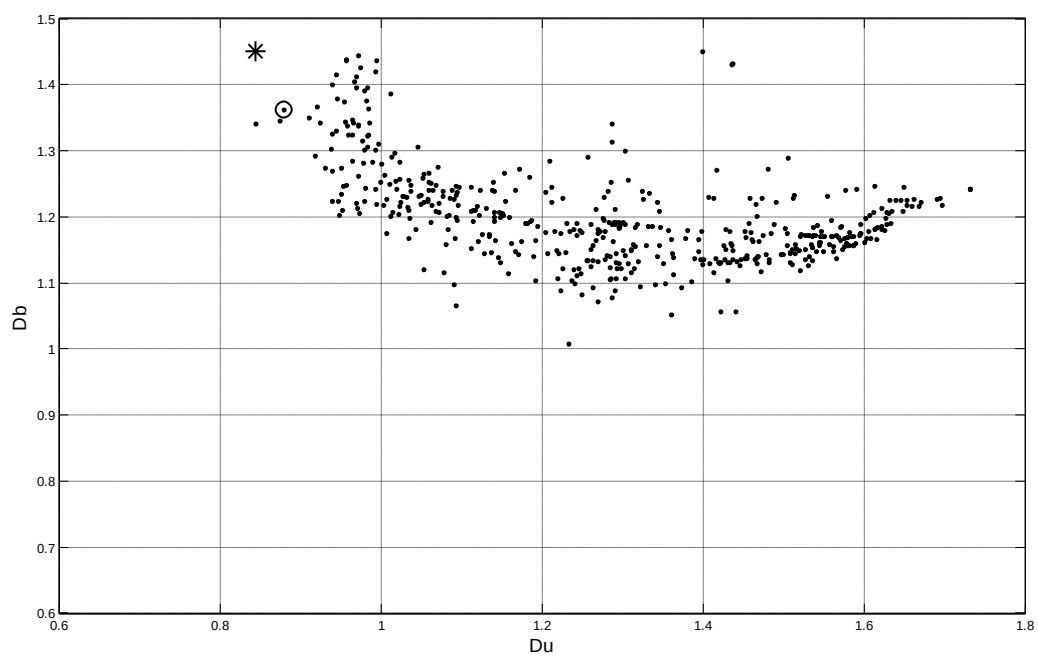
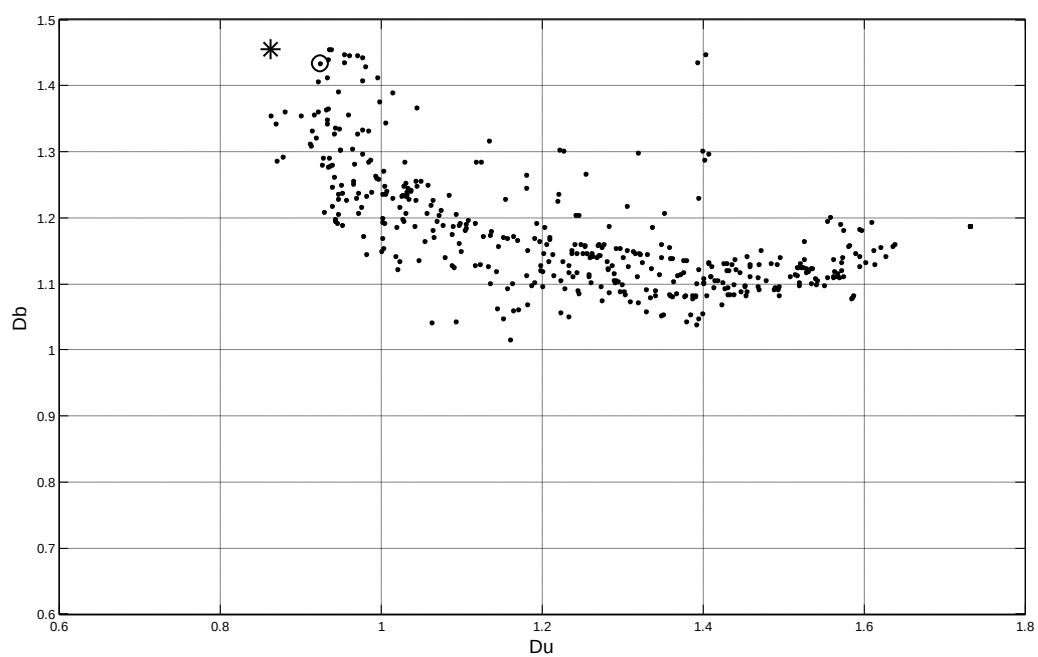
Scen.	Tip	Lok.	Q_{SVC}	X_{TCSC}	f_1	f_2	$f_3 \cdot 10^{-3}$	f_4
7	SVC	2	2.988		73.032	17.994	84.618	43.368
	SVC	5	2.440					
	SVC	25	0.672					
7	SVC	2	3.000		72.939	17.976	82.085	46.357
	SVC	5	2.440					
	SVC	25	1.032					
7	SVC	2	2.812		72.986	18.008	83.639	44.970
	SVC	5	2.440					
	SVC	25	0.915					
7	SVC	2	3.000		72.937	17.975	81.659	46.867
	SVC	5	2.440					
	SVC	25	1.103					
7	SVC	2	3.000		73.232	18.024	85.596	40.983
	SVC	5	2.651					
	SVC	25	0.361					
7	SVC	2	2.610		73.106	18.062	86.348	42.339
	SVC	5	2.440					
	SVC	25	0.672					
7	SVC	2	2.988		73.005	17.985	79.737	49.230
	SVC	5	2.440					
	SVC	25	1.478					
7	SVC	2	2.718		73.037	18.021	80.958	48.295
	SVC	5	2.446					
	SVC	25	1.437					
11	TCSC	15-19		-0.106	73.336	17.486	91.127	42.144
	TCSC	37-32		-0.699				
	SVC	5	2.123					
	SVC	2	2.997					
7	SVC	2	2.718		73.076	18.025	78.321	49.459
	SVC	5	2.821					
	SVC	25	1.449					

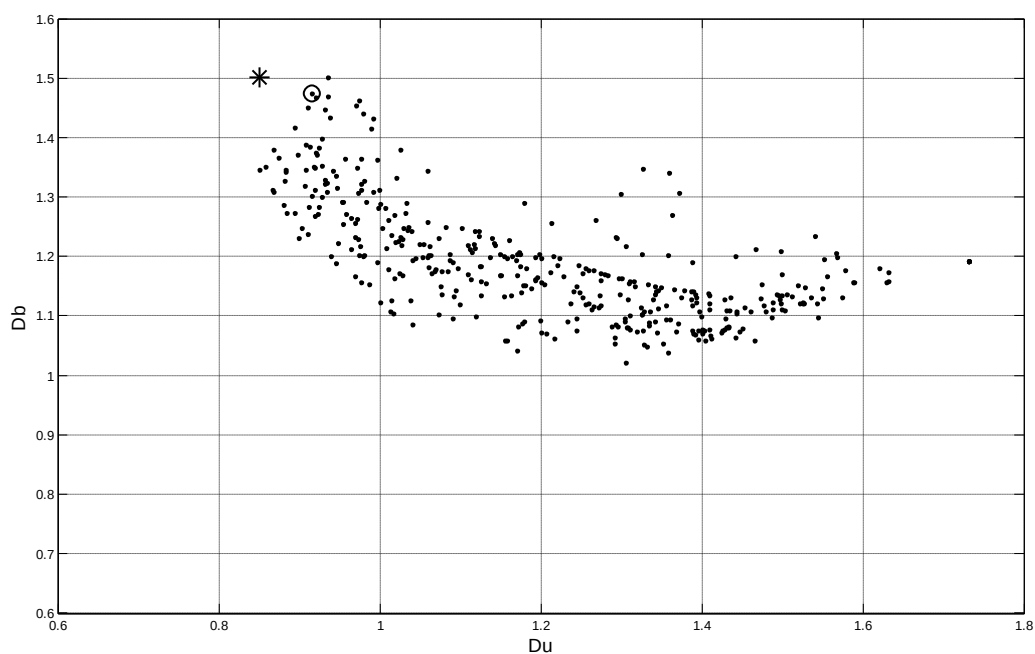
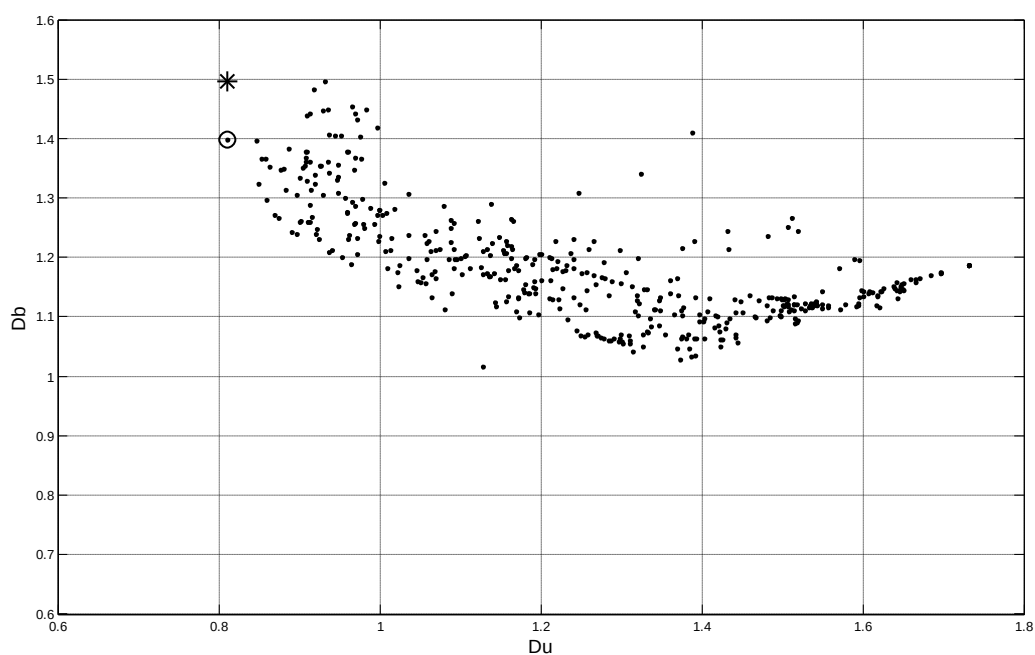
Tabela 5.14. Prvih 10 rešenja sortiranih prema $Du-Db$ metodi za treće radno stanje

Scen.	Tip	Lok.	Q_{SVC}	X_{TCSC}	f_1	f_2	$f_3 \cdot 10^{-3}$	f_4
7	SVC	25	0.663		83.401	20.432	90.400	44.862
	SVC	5	2.985					
	SVC	2	3.000					
7	SVC	25	0.463		83.537	20.455	92.572	42.807
	SVC	5	2.930					
	SVC	2	3.000					
7	SVC	17	0.748		83.469	20.435	89.603	45.565
	SVC	5	2.965					
	SVC	2	3.000					
7	SVC	25	1.217		83.244	20.400	86.718	49.054
	SVC	5	2.930					
	SVC	2	3.000					
7	SVC	25	1.217		83.422	20.377	88.076	49.024
	SVC	5	2.918					
	SVC	8	3.000					
11	TCSC	38-1		-0.113	83.526	20.030	96.923	46.334
	TCSC	37-56		-0.700				
	SVC	5	2.625					
	SVC	2	3.000					
7	SVC	25	1.217		83.371	20.413	93.477	46.752
	SVC	5	2.179					
	SVC	2	3.000					
11	TCSC	34-32		-0.560	83.472	19.923	89.896	55.319
	TCSC	37-56		-0.637				
	SVC	5	2.988					
	SVC	2	2.997					
7	TCSC	37-56		-0.700	83.904	19.847	98.531	43.367
	SVC	8	3.000					
	SVC	5	2.648					
11	TCSC	38-1		-0.113	83.639	20.137	99.186	45.232
	TCSC	37-56		-0.700				
	SVC	5	2.625					
	SVC	2	2.595					

Tabela 5.15. Prvih 10 rešenja sortiranih prema Du-Db metodi za četvrto radno stanje

Sc.	Tip	Lok.	P_{spec}	Q_{spec}	U_{spec}	Q_{SVC}	X_{TCSC}	f_1	f_2	$f_3 \cdot 10^{-3}$	f_4
12	TCSC	37-56					-0.693	91.637	19.716	118.725	54.147
	SVC	5				3.000					
	UPFC	8-31	-0.941	-0.320	1.00						
10	TCSC	37-56					-0.700	91.872	21.641	106.424	44.315
	SVC	8				3.000					
	SVC	5				3.000					
7	SVC	2				3.000		91.203	22.379	97.775	47.459
	SVC	25				0.971					
	SVC	5				2.994					
11	TCSC	37-56					-0.700	91.407	21.686	99.326	54.532
	TCSC	34-32					-0.565				
	SVC	5				2.886					
	SVC	2				2.988					
7	SVC	2				2.812		91.454	22.467	102.312	44.027
	SVC	25				0.642					
	SVC	5				2.924					
7	SVC	2				3.000		91.132	22.360	94.953	50.060
	SVC	25				1.346					
	SVC	5				3.000					
7	SVC	8				2.812		91.369	22.329	99.226	49.173
	SVC	25				1.393					
	SVC	5				2.742					
11	TCSC	37-56					-0.700	91.056	22.236	103.958	50.652
	TCSC	38-1					-0.410				
	SVC	5				3.000					
	SVC	2				3.000					
11	TCSC	37-56					-0.672	91.763	21.521	104.961	51.673
	TCSC	39-44					-0.621				
	SVC	5				3.000					
	SVC	2				3.000					
10	TCSC	37-56					-0.700	91.984	21.650	111.059	42.724
	SVC	8				3.000					
	SVC	5				2.437					

Sl. 5.10. Prikaz svih rešenja u $Du-Db$ ravni za prvo radno stanjeSl. 5.11. Prikaz svih rešenja u $Du-Db$ ravni za drugo radno stanje

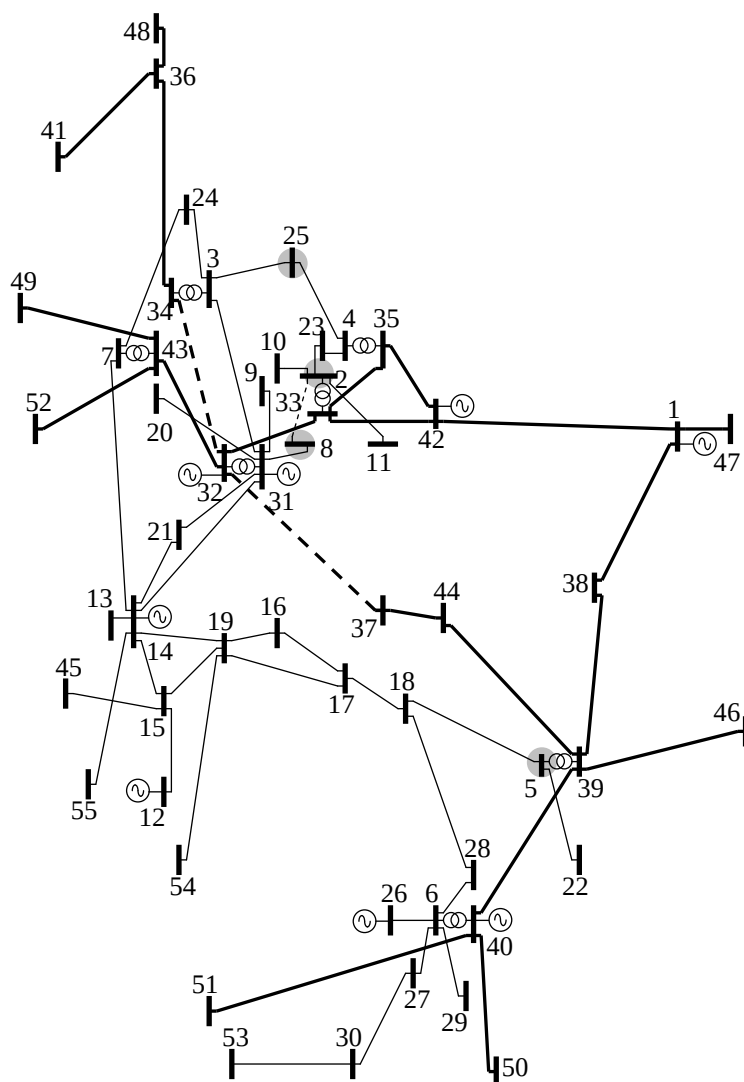
Sl. 5.12. Prikaz svih rešenja u Du - Db ravni za treće radno stanjeSl. 5.13. Prikaz svih rešenja u Du - Db ravni za četvrto radno stanje

Analizom rezultata iz Tabela 5.12-5.15 može se uočiti nekoliko dominantnih scenarija kao rešenje za izbor tipa FACTS uređaja. To su scenarija 7, 11 i 12. Pored

toga može se uočiti relativno mali broj potencijalnih lokacija za FACTS uređaje iako se radi o rezultatima za četiri stanja mreže. Prema tome može se sa sigurnošću reći da predložene lokacije za FACTS uređaje ujedno ukazuju na iste slabe tačke u prenosnoj mreži bez obzira što se radi o rezultatima za četiri različite etape razvoja. Logično je da se FACTS uređaji ugrađuju tamo gde je prenosna mreža slaba.

Od dobijenih lokacija mogu se izdvojiti čvorovi 2, 5, 8 i 25. Na Sl. 5.14 ovi čvorovi su posebno naznačeni sivim površinama. Veliki broj rešenja predviđa ugradnju SVC i UPFC uređaja u ovim čvorovima što ukazuje na lošu naponsku sliku u tim čvorovima. Ugradnja FACTS uređaja u ovim čvorovima koji bi injektirali reaktivnu snagu značajno bi popravila naponsku sliku cele mreže ali bi pozitivno uticala i na ostale pokazatelje.

Kao kritične tačke u regulaciji tokova snaga izdvajaju se vodovi 2-8, 34-32, 37-32 i 37-56. Ovi vodovi su na Sl. 5.14 označeni isprekidanim linijama. I ove lokacije mogu da ukažu na slabe tačke u mreži. To su prenosni vodovi koji su značajno opterećeni pa se ugradnjom FACTS uređaja vrši njihovo rasterećenje i ravnomernija raspodela tokova snaga u mreži. Predložene lokacije ukazuju i na postojanje kontura odnosno paralelnih puteva za prenos snage gde je raspodela snaga takva da se deo snage zatvara u samoj konturi ili je neravnomerna tako da pojedini vodovi postaju preopterećeni. Pored toga povećavaju se gubici snage i povećava se pad napona. Ugradnjom FACTS uređaja na ove vodove izvršila bi se pravilnija raspodela tokova snaga. Primera radi prenosni vod 37-32 je slabo opterećen vod nominalnog napona 400 kV. Taj vod ima dužinu od skoro 100 km. Postojanje 400 kV voda koji je slabo opterećen nije ekonomski opravdano. U velikom broju dobijenih rešenja predlaže se instalacija TCSC uređaja koji bi izvršio rednu kompenzaciju te na taj način smanjio električnu dužinu tog voda. To ukazuje da lošu raspodelu snaga u tom delu mreže tj. da se snaga prenosi drugim vodovima nižeg naponskog nivoa. Potrebno je naglasiti da su prenosni vodovi 37-32 i 37-56 u stvari isti vodovi. Vod 37-56 je nastao od voda 37-32 priključenjem novog proizvodnog kapaciteta Kolubare B.



Sl. 5.14. Test sistem sa posebno označenim kritičnim lokacijama.

Imajući sve ovo u vidu na osnovu dobijenih rezultata za sva četiri stanja mogu se predložiti konkretna rešenja za ugradnju FACTS uređaja u razmatranoj prenosnoj mreži. Rešenje koje se izdvaja od ostalih pripada sedmom scenariju, a podrazumeva ugradnju tri SVC uređaja u čvorove 2, 5 i 25. Instalisanе snage ovih uređaja ne razlikuju se mnogo za sva četiri radna stanja. Snage SVC uređaja u čvorovima 2 i 5 su veoma blizu ili su tačno na svojim zadatim maksimalnim vrednostima od 3 r.j. odnosno 300 Mvara. Snaga SVC uređaja u čvoru 25 kreće se oko 1 r.j. odnosno 100 Mvara. Prema tome jedno od predloženih rešenja bi bilo ugradnja dva SVC uređaja snage po 300 Mvar u čvorove 2 i 5 i jednog SVC uređaja snage 100 Mvara u čvor 25. Pored ovoga mogu se predložiti i neka druga rešenja. To može na primer da bude kombinacija dva SVC i dva

TCSC uređaja. U tom slučaju SVC uređaji bi se priključili na čvorove 2 i 5 sa instalisanim snagama po 300 Mvar. Jedan TCSC uređaj bi se priključio na vod 37-32 sa stepenom kompenzacije reaktanse voda od 70 %. Drugi TCSC uređaj bi se priključio na vod 34-32 sa stepenom kompenzacije reaktanse voda od 50 %. Predložena rešenja data su pregledno u Tabeli 5.16.

Tabela 5.16. Predložena rešenja

Resenje	Tip	Lok.	Q_{SVC}	X_{TCSC}
1	SVC	2	3.000	
	SVC	5	3.000	
	SVC	25	1.000	
2	TCSC	37-32		-0.700
	TCSC	34-32		-0.500
	SVC	2	3.000	
	SVC	5	3.000	

U svakom slučaju predloženom procedurom za različite faze razvoja prenosne mreže Republike Srbije, uz uvažavanje rasta opterećenja i izgradnje novih proizvodnih kapaciteta, dobijeni su konkretni predlozi za ugradnju FACTS uređaja. Time je dobijen optimalan plan razvoja prenosne mreže koji ne zahteva izgradnju novih prenosnih kapaciteta.

Za jedinstvene setove optimalnih rešenja za sva četiri razmatrana stanja može da se uradi i jedna dodatna analiza. Iz setova se mogu izdvojiti rešenja za koja se imaju minimalne vrednosti pojedinačnih kriterijumskih funkcija. Namera je da se vidi koje kombinacije FACTS uređaja imaju najveći uticaj na pojedinačne kriterijumske funkcije. U Tabelama 5.17-5.19 dat je pregled rešenja za koja se imaju minimalne vrednosti kriterijumskih funkcija f_1 , f_2 i f_3 i to za sva četiri razmatrana stanja. U datim tabelama za sva rešenja su dati kompletni podaci o tipu, lokacijama i parametrima. Pored minimalnih vrednosti razmatrane kriterijumske funkcije date su vrednosti i ostalih kriterijumskih funkcija.

Tabela 5.17. Rešenja koja odgovaraju minimalnoj vrednosti kriterijumske funkcije f_1

St.	Tip	Lok.	P_{spec}	Q_{spec}	U_{spec}	Q_{SVC}	X_{TCSC}	f_1	f_2	$f_3 \cdot 10^{-3}$	f_4
1	TCSC	38-1					-0.464	69,770	15,860	85,183	63,426
	SVC	5				2.126					
	UPFC	2-8	0.308	0.877	1.025						
2	TCSC	39-38					-0.408	72,744	16,984	91,522	65,034
	SVC	5				2.320					
	UPFC	2-8	0.296	0.947	1.025						
3	TCSC	38-1					-0.564	83,140	20,602	96,192	49,718
	TCSC	37-56					-0.700				
	SVC	5				2.625					
	SVC	2				3.000					
4	TCSC	38-1					-0.621	90,958	22,546	103,618	50,524
	TCSC	37-56					-0.700				
	SVC	5				3.000					
	SVC	2				3.000					

Tabela 5.18. Rešenja koja odgovaraju minimalnoj vrednosti kriterijumske funkcije f_2

St.	Tip	Lok.	P_{spec}	Q_{spec}	U_{spec}	f_1	f_2	$f_3 \cdot 10^{-3}$	f_4
1	UPFC	8-31	-0.337	0.003	1.025	73,074	12,773	113,792	46,978
	UPFC	19-15	-2.437	0.091	1.020				
2	UPFC	8-31	-0.754	-0.490	1.037	76,445	13,583	119,122	50,193
	UPFC	19-15	-2.507	-0.003	1.019				
3	UPFC	8-31	-0.935	-0.754	1.037	87,724	15,610	137,261	48,308
	UPFC	19-15	2.524	0.701	1.042				
4	UPFC	8-31	-1.317	-1.328	1.046	96,720	17,106	145,516	55,209
	UPFC	19-15	-2.531	0.062	1.014				

Tabela 5.19. Rešenja koja odgovaraju minimalnoj vrednosti kriterijumske funkcije f_3

Stanj.	Tip	Lok.	Q_{SVC}	f_1	f_2	$f_3 \cdot 10^{-3}$	f_4
1	SVC	2	3.000	73,144	17,208	67,364	54,257
	SVC	25	2.249				
	SVC	18	2.968				
2	SVC	2	3.000	76,548	18,450	71,801	56,138
	SVC	25	2.836				
	SVC	18	3.000				
3	SVC	2	3.000	84,618	20,603	80,339	56,565
	SVC	25	3.000				
	SVC	5	3.000				
4	SVC	5	2.812	95,320	23,962	88,371	55,941
	SVC	25	3.000				
	SVC	18	2.947				

Na osnovu rezultata iz Tabele 5.17 vidi se da najveći uticaj na kriterijumsku funkciju f_1 , odnosno gubitke aktivne snage u prenosnoj mreži, imaju kombinacije FACTS uređaja koje odgovaraju scenarijima 11 i 12. Za prva dva stanja to je scenario 12. Kod oba ova stanja dobijaju se gotovo identične lokacije FACTS uređaja. Razlika je samo kod lokacije za TCSC uređaj ali se i tu radi o dva susedna voda. Vrednosti parametara FACTS uređaja u oba slučaja su veoma bliske. Za treće i četvrto stanje reč je o scenariju 11. U oba slučaja radi se o identičnim lokacijama. Pored toga i parametri FACTS uređaja su veoma bliski. Može se reći da su za sva četiri stanja dobijena rešenja veoma slična jer se radi o gotovo istim lokacijama za FACTS uređaje. Uređaj UPFC koji se javlja u prva dva stanja praktično je zamenjen sa kombinacijom jednog SVC i jednog TCSC uređaja kod druga dva stanja.

U slučaju kriterijumske funkcije f_2 , za sva četiri stanja dobija se ista kombinacija FACTS uređaja koja odgovara drugom scenariju, odnosno ugradnji 2 UPFC uređaja. Iz Tabele 5.18 se vidi da su lokacije UPFC uređaja identične za sva četiri radna stanja. Kriterijumska funkcija f_2 odnosi se na nivoe opterećenja prenosnih vodova pa je bilo za očekivati da će scenario sa UPFC uređajima koji imaju najbolje kontrolne mogućnosti dati najbolje rezultate.

Rešenja koja odgovaraju minimalnim vrednostima kriterijumske funkcije f_3 data su u Tabeli 5.19. Za sva četiri stanja dobija se ista kombinacija FACTS uređaja. U pitanju je scenario 7, odnosno ugradnja 3 SVC uređaja. Za sva četiri stanja radi se o gotovo identičnim lokacijama za SVC uređaje. Očekivano, reaktivne snage injektiranja svih SVC uređaja su blizu ili jednake maksimalnim snagama od 300 Mvar. Ovaki rezultati su očekivani pošto se kriterijumska funkcija f_3 odnosi na devijaciju napona u mreži, a uticaj reaktivnih snaga na naponske prilike u mreži je veliki.

Može se reći da su rešenja iz Tabela 5.17-5.19. koja odgovaraju minimalnim vrednostima pojedinih kriterijumskih funkcija manje konkurentna drugim rešenjima. Minimalna vrednost jedne kriterijumske funkcije ne znači istovremeno i dobar rezultat za ostale kriterijumske funkcije. Pored toga rešenja koja minimizuju samo jednu kriterijumsku funkciju po pravilu su skupa rešenja. Kod takvih rešenja FACTS uređaji su obično na svojim maksimalnim regulacionim mogućnostima, a to povlači i veće investicije.

Na osnovu podataka iz Tabela 5.17-5.19 može se uočiti da se lokacije za FACTS uređaje za data rešenja, u velikoj meri poklapaju sa kritičnim lokacijama koje su identifikovane kod izbora jedinstvenog kompromisnog rešenja. To je potvrda da su predložene lokacije za FACTS uređaje pravilno izabrane i da predložena konkretna rešenja imaju puni smisao.

5.4. Primena nove procedure na izbor optimalnog tipa, lokacije i parametara FACTS uređaja u distributivnoj mreži

Višekriterijumska optimizacija može se uspešno primeniti i na druge optimizacione probleme u elektroenergetici. U tekstu koji sledi višekriterijumska optimizacija biće primenjena na određivanje optimalne lokacije i parametara FACTS uređaja u distributivnoj mreži sa značajnim prisustvom distribuirane proizvodnje.

Distributivne mreže su razvijane u skladu sa tradicionalnim, centralizovanim konceptom elektroenergetskih sistema u kojem je proizvodnja bila centralizovana, a distributivna mreža pasivna sa radijalnom topologijom. Tokovi aktivnih snaga u tradicionalnoj distributivnoj mreži su bili jednosmerni i definisani potrošnjom. Upravljanje naponima vršeno je regulacionim transformatorima i klasičnim baterijama kondenzatora za popravku faktora snage. Međutim, koncept današnjih distributivnih mreža je takav da se distribuirane proizvođačke jedinice kao što su vetroturbine ili solarne elektrane u sve većoj meri priključuju na distributivnu mrežu [68], [69]. Savremena distributivna mreža je aktivna, a tokovi snaga dvosmerni i definisani potrošnjom i proizvodnjom distribuiranih proizvođačkih jedinica. Priključenjem ovakve proizvodnje na distributivnu mrežu menjaju se gubici snage i naponi čvorova [70], [71]. Glavni negativni efekti u pogledu naponskih prilika su posledica intermitentnosti proizvodnje vetroturbina i solarnih elektrana. Proizvodnja električne energije vetroturbina zavisi od brzine vetra, dok proizvodnja električne energije solarnih elektrana direktno zavisi od insolacije. Vremenske promene brzine vetra i insolacije uzrokuju intermitentnost snage koju injektiraju ovi izvori u distributivnu mrežu, što ima za posledicu poremećaj naponske slike u svim čvorovima distributivne mreže [71], [72].

Da bi se vremenski profil napona čvorova održavao u prihvatljivim granicama neophodno je upravljati reaktivnim snagama u distributivnoj mreži. U uslovima

povećane potrošnje u distributivnoj mreži i slabe proizvodnje distribuiranih proizvođačkih jedinica potrebno je generisati reaktivnu snagu, kako bi se kompenzovali padovi napona usled tokova snage potrošnje. Kada su resursi vetra i sunca povoljni, vetrogeneratori i solarne elektrane generišu aktivnu snagu što može imati za posledicu povećanje napona čvorova u distributivnoj mreži. Ukoliko je snaga proizvodnje distribuiranih izvora velika, a potrošnja u distributivnoj mreži mala, mogu se javiti problemi sa previsokim naponima u pojedinim čvorovima distributivne mreže. U ovakvim uslovima potrebno je apsorbovati reaktivnu snagu, kako bi se smanjili naponi u čvorovima.

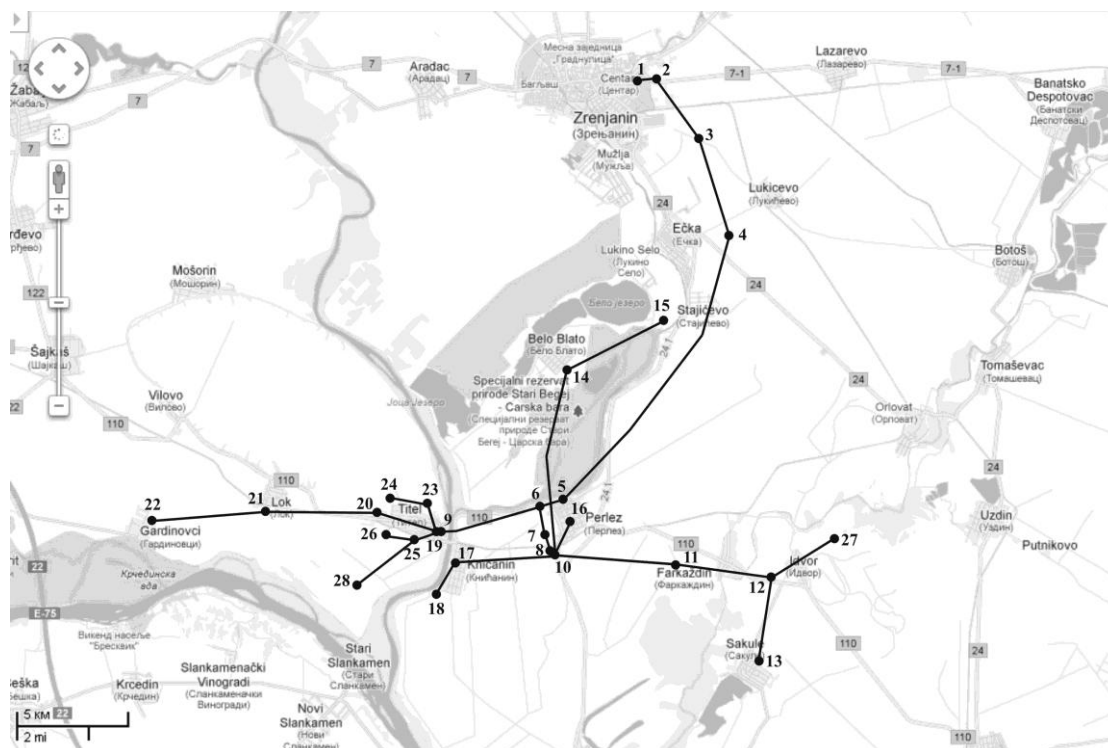
S obzirom da proizvodnja vetroturbina i solarnih elektrana može biti jako intermitentna, na primer u uslovima nestabilnog vetra ili oblačnosti, to može uzrokovati odstupanja napona koja nisu prihvatljiva za potrošače, a mogu dovesti i do isključenja pojedinih distribuiranih izvora, kao što su vetroturbine. Da bi se naponska odstupanja kontrolisala potrebno je vršiti brzu dinamičku kontrolu reaktivnih snaga u distributivnoj mreži. Upotreba FACTS uređaja, kao što je SVC, u distributivnoj mreži s ciljem poboljšanja naponskih profila je efikasno rešenje [73-78]. Kod priključenja većih generatorskih jedinica uglavnom se FACTS uređaji priključuju na mestu priključenja elektrane na distributivnu mrežu [75]. U uslovima disperzovane proizvodnje, sa velikim brojem jedinica instalisane snage od nekoliko kilovata do nekoliko megavata, koje se priključuju u različitim čvorovima u distributivnoj mreži, koncept postavljanja FACTS uređaja u tački priključenja svake distribuirane proizvođačke jedinice nije tehnički i ekonomski opravdan. U takvim uslovima potrebno je optimizovati sistem za kontrolu i upravljanje tokovima reaktivnih snaga. Razvijena procedura ovde je primenjena za nalaženje optimalnog broja, lokacije i instalisane snage SVC uređaja u slaboj distributivnoj mreži sa velikim brojem disperzovanih vetroturbina i fotonaponskih panela. Za implementaciju razvijene optimizacione procedure odabrana je realna distributivna mreža u regionu Banata u Srbiji. Motivacija za izbor ove mreže za analizu i proračun sastoji se u sledećem. Mreža napaja ruralno područje i ima veliki broj dugačkih deonica tako da su naponske prilike u ovakvoj mreži prilično loše. Mreža se nalazi u području gde imamo resurse vetra i sunca koji se mogu adekvatno iskoristiti pa izgradnjom distribuiranih izvora energije i priključivanjem na ovakvu mrežu može doći do značajnih kolebanja napona zbog intermitentnog karaktera proizvodnje

distribuiranih izvora. Iz ovih razloga ova mreža je veoma pogodna za analizu jer se na njoj može prikazati pun potencijal razvijene procedure za nalaženje optimalnih lokacija SVC uređaja u cilju poravke naponskog profila u mreži uz zadovoljenje razmatranih kriterijuma i pogonskih ograničenja. U narednoj sekciji biće dat detaljan opis analizirane mreže.

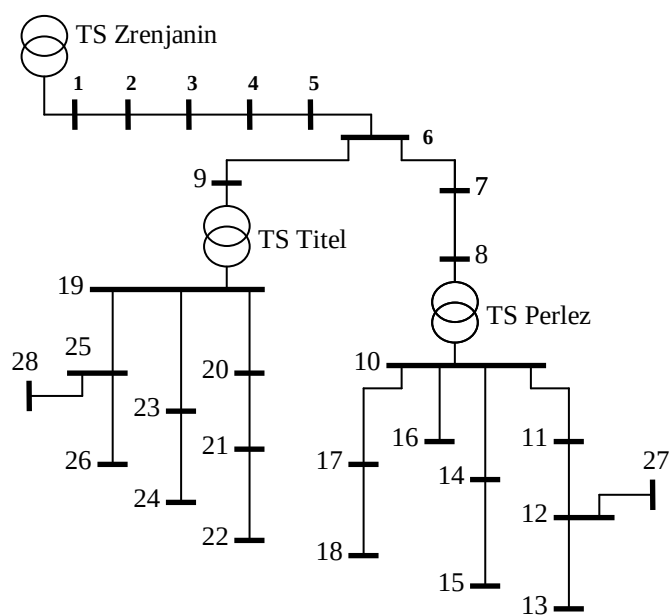
5.4.1. Opis izabrane test mreže

Izabrana mreža je srednjenaponska (35 kV, 20 kV i 10 kV) distributivna mreža koja napaja nekoliko sela u regionu Banata u Srbiji. Mreža je prikazana na geografskoj podlozi na Sl. 5.15 dok je na Sl. 5.16 prikazana njena topološka struktura. Distributivna mreža je radijalna i napaja se iz čvora 1 gde se nalazi TS 110/35 kV. Svi vodovi su nadzemni i izvedeni su sa provodnicima različitih poprečnih preseka. Pored napojnog transformatora u TS Zrenjanin u mreži se nalaze još dva transformatora. U TS Titel nalazi se transformator prenosnog odnosa 35/20 kV/kV, a u TS Perlez transformator prenosnog odnosa 35/10 kV/kV.

Analizirani region Banata poseduje tehnički iskoristive resurse vetra i sunca [79], [80]. Raspoloživi resursi i postojeći regulatorni okvir za subvenciju proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora u Srbiji daje ekonomsku opravdanost za perspektivan razvoj projekata vetroturbina i solarnih elektrana u analiziranom regionu [81]. U ovom primeru pretpostavljen je scenario masovnog korišćenja fotonaponskih panela montiranih na krov i priključenih na niskonaponsku mrežu, kao i više solarnih elektrana manjih snaga koje su priključene u čvorove srednjenaponske mreže. Pored disperzovanih solarnih elektrana, pretpostavljeno je da su na distributivnu mrežu, u čvorovima 13 i 27, priključena dva vetrogeneratora. U Tabeli 5.20 dat je pregled injektiranja snaga u svim čvorovima mreže, kao i maksimalna i minimalna aktivna snaga potrošnje.



Sl. 5.15. Distributivna mreža prikazana na geografskoj podlozi



Sl. 5.16. Topološka struktura distributivne mreže

Tabela 5.20. Maksimalna (P_{POTmax}) i minimalna (P_{POTmin}) aktivna snage potrošnje i instalisana snaga distribuiranih izvora priključenih u čvorovima mreže date na Sl. 5.15

Čvor	P_{SPmax} [MW]	P_{VGmax} [MW]	P_{POTmax} [MW]	P_{POTmin} [MW]
1	-	-	-	-
2	-	-	-	-
3	-	-	-	-
4	-	-	-	-
5	0.5	-	-	-
6	-	-	-	-
7	-	-	-	-
8	-	-	-	-
9	0.8	-	-	-
10	-	-	-	-
11	0.6	-	0.8694	0.5990
12	-	-	0.8026	0.5530
13	1.0	3	1.0032	0.6912
14	0.8	-	0.6688	0.4608
15	0.8	-	0.6688	0.4608
16	1.5	-	1.3376	0.9216
17	1.0	-	0.8026	0.5530
18	0.8	-	0.5350	0.3686
19	1.5	-	-	-
20	1.2	-	1.0944	0.7540
21	0.6	-	0.5472	0.3770
22	1.0	-	0.5472	0.3770
23	0.8	-	0.8208	0.5655
24	-	-	0.8208	0.5655
25	-	-	1.0944	0.7540
26	1.0	-	0.5472	0.3770
27	-	3	-	-
28	3	-	-	-

5.4.2. Vremenski profili potrošnje i proizvodnje distribuiranih izvora

Naponi u čvorovima distributivne mreže direktno su uslovljeni tokovima aktivnih i reaktivnih snaga kroz priključne vodove. Tokovi aktivnih snaga su diktirani vremenskim dijagramima potrošnje i proizvodnje. Aktivne snage injektiranja su direktno zavisne od snage primarnog energenta (brzine vetra i solarnog zračenja) i praktično su nezavisne od naponskih prilika u mreži. Snage potrošnje mogu biti u izvesnoj meri zavisne od napona u potrošačkim čvorovima u zavisnosti od karaktera

potrošnje. Za potrebe ove analize pretpostavljeno je da su snage potrošnje nezavisne od napona. Vremenski dijagrami aktivnih snaga potrošnje i proizvodnje distribuiranih izvora su promenljivi u vremenu, pa su i naponi u čvorovima sistema promenljivi. Dakle, naponske prilike su rezultat sučeljavanja dijagrama snaga potrošnje i proizvodnje. Fluktuacije vetra i solarnog zračenja mogu se posmatrati u različitim vremenskim intervalima: sekunde, minuti, časovi, dani, sezone, godine. U ovom primeru analizirane su 10-minutne varijacije.

5.4.2.1. Vremenski profil proizvodnje vetroturbina

Vremenski profil proizvodnje električne snage vetroturbine definisan je profilom brzine vetra i krivom snage vetroturbine. Veliki proizvođači vetroturbina daju aktuelne krive snage njihovih proizvoda kao tehnički podatak. Ove krive se obično daju za standardnu gustinu vazduha ($\rho_0=1,225 \text{ kg/m}^3$). Da bi se odredila snaga proizvodnje vetroturbine u 10-minutnom intervalu neophodno je poznavati aktuelnu gustinu vazduha i brzinu vetra na visini osovine izabrane turbine. Ukoliko je merna visina različita od visine vetroturbine potrebno je izvršiti ekstrapolaciju mernih podataka na visinu osovine vetroturbine [82, 83]. Proračun odgovarajuće efektivne brzine vetra računa se primenom sledeće jednačine [84]:

$$V_{eff\ t} = V_t \left(\frac{\rho_t}{\rho_0} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (5.9)$$

gde je ρ_t aktuelna gustina vazduha na visini rotora, a V_t merena ili estimirana brzina vetra. Električna snaga vetroturbine za svaki 10-minutni interval estimirana je prema sledećoj jednačini:

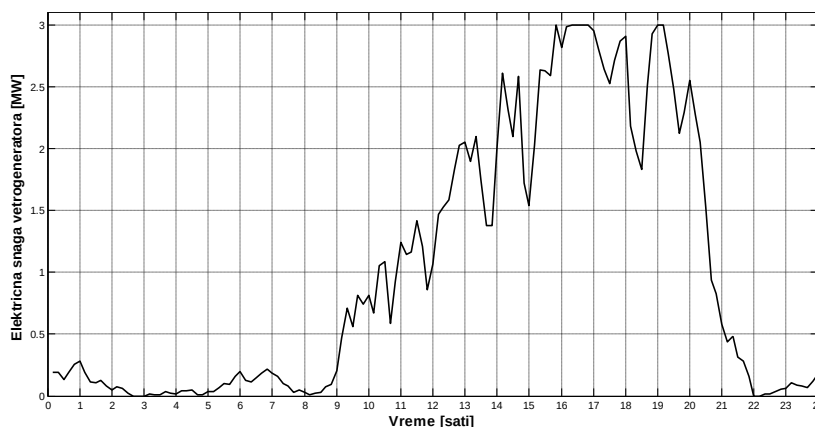
$$P_t = P_{power\ curve}(V_{eff\ t}), \quad (5.10)$$

gde je $P_{power\ curve}(V_{eff\ t})$ standardna kriva snage vetroturbine za standardnu gustinu vazduha ($\rho_0=1,225 \text{ kg/m}^3$).

Potrebno je reći da estimacija snage proizvodnje data jednačinama (5.9) i (5.10) odgovara vetroturbanama koje se upravljaju zakretanjem lopatica ("pitch-controlled"). Za vetroturbine upravljane profilom lopatica ("stall-controlled") prvo se računa izlazna snaga na osnovu date krive snage za estimiranu brzinu vetra V_t . Zatim se izlazna snaga koriguje prema sledećoj jednačini [84]:

$$P_t = P_{powecurve}(V_t) \frac{\rho_t}{\rho_0}. \quad (5.11)$$

U ovoj analizi korišćeni su jednogodišnji merni podaci o brzini vetra koji su mereni u ciljnom regionu u neposrednoj blizini lokacija vetroagregata. Na osnovu statističke analiza mernih podataka o brzini vetra, odabran je karakterističan dan. Koristeći relacije (5.9) i (5.10) i standardnu krivu snage za vetroagregat Vestas V112, 3 MW estimiran je vremenski dijagram proizvodnje vetroturbine, koji je prikazan na Sl. 5.17.



Sl. 5.17: Vremenski dijagram proizvodnje vetrogeneratora za karakterističan dan

5.4.2.2. Vremenski profil proizvodnje fotonaponskih panela

Procena dijagrama proizvodnje fotonaponskih panela je vršena na osnovu merenja solarne iradijacije i temperature ambijenta. Pretpostavljeno je da su svi fotonaponski paneli južno orjentisani, pod fiksnim nagibnim uglom. Takođe je pretpostavljeno da su paneli čisti i da imaju sisteme za MPPT ("Maximum power point tracking"). Snaga koju fotonaponski panel injektira u distributivnu mrežu (P_{PVt}) za svaki 10-minutni interval estimirana je u skladu sa sledećom relacijom [85]:

$$P_{PVt} = \eta_{inv} P_{PVSTC} \frac{I_{PVt}}{I_{STC}} \cdot (1 + \alpha_{TPV} (T_{PVt} - T_{STC})) = \eta_{inv} P_{PVSTC} \frac{I_{PVeqt}}{I_{STC}} \quad (5.12)$$

gde je:

P_{PVSTC} – deklarirana snaga fotonaponskog panela pri standardnim uslovima;

I_{PVt} – solarne iradijacije na površini fotonaponskog panela u 10-minutnom intervalu t ;

I_{STC} – solarne iradijacije koja odgovara standardnim uslovima ($I_{STC}=1000 \text{ W/m}^2$);

I_{PVeqt} – ekvivalentna solarna iradijacija;

η_{inv} – stepen iskorišćenja invertora;

α_{TPV} – temperaturni koeficijent promene snage fotonaponskih panela, tipično je

$\alpha_{TPV} = -0,5 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$;

T_{STC} – temperatura panela pri standardnim uslovima ($T_{STC} = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$);

T_{PVt} – temperatura panela u 10-minutnom intervalu t , koja je estimirana prema sledećoj relaciji [85]:

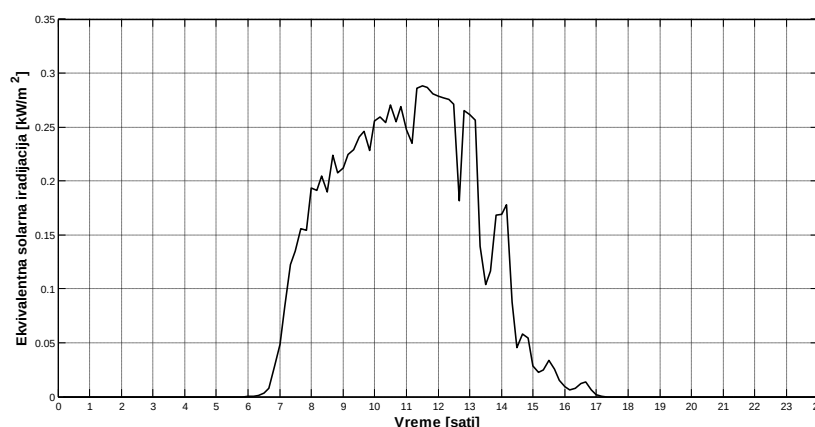
$$T_{PVt} = T_{amb\ t} + \left(\frac{NOCT - 20}{800} \right) \cdot I_{PVt}, \quad (5.13)$$

gde je:

$T_{amb\ t}$ – izmerena temperatura ambijenta u desetominutnom intervalu t .

NOCT (“Normal Operation Cell Temperature”) – temperatura ćelije modula kada je temperaturu ambijenta $20 \text{ } ^\circ\text{C}$, solarna iradijacija 0.8 kW/m^2 i brzina vetra 1 m/s . Ovaj parametar se standardno dobija od proizvođača fotonaponskih panela.

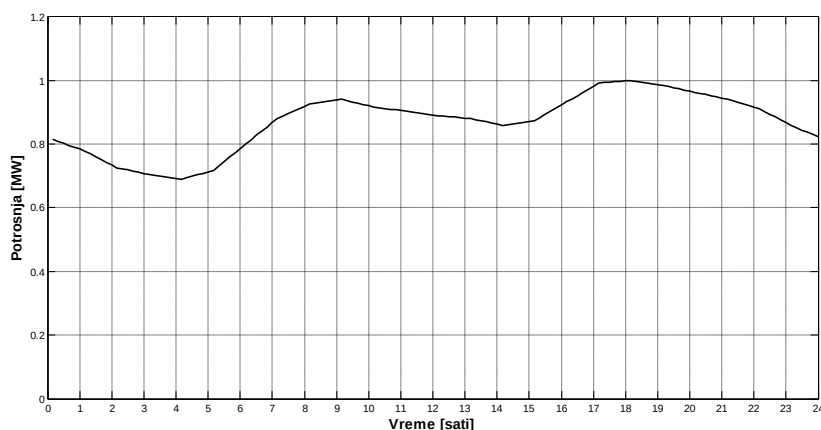
U ovoj analizi korišćeni su merni podaci o ambijentalnoj temperaturi i horizontalnoj iradijaciji, koji su mereni u ciljnom regionu u trajanju od jedne godine. Proračun solarne iradijacije na površini fotonaponskog panela (I_{PVt}) izvršen je na osnovu merenja horizontalne solarne iradijacije za svaki 10-minutni interval t . Ovi proračuni se mogu naći u literaturi koja se bavi solarnim resursima, kao što je [85]. Na osnovu statističke analiza mernih podataka o solarnoj iradijaciji, odabran je reprezentativan dan. Na Sl. 5.18 prikazan je vremenski dijagram ekvivalentne solarne iradijacije (I_{PVeqt}) za tipičan dan u analiziranom ciljnom regionu.



Sl. 5.18: Vremenski dijagram ekvivalentne solarne iradijacije za karakterističan dan.

5.4.2.3. Vremenski profil potrošnje analizirane mreže

U cilju dobijanja vremenskog profila potrošnje izvršena su desetominutna merenja aktivnih snaga u čvoru 1 analizirane mreže u kojem se nalazi napojna TS 110/35 kV/kV. Na osnovu izmerenih vrednosti potrošnje izvršena je statistička analiza i odabran karakteristični dan u godini. Oko 90 % potrošnje u analiziranoj mreži su domaćinstva, tako da je pretpostavljeno da su profili potrošnje u svim potrošačkim čvorovima isti. Na Sl. 5.19 prikazan je relativni profil potrošnje aktivne snage koji karakteriše analizirani konzum. Na osnovu izvršenih merenja za faktor snage potrošnje usvojena je vrednost 0,95. Dijagrami potrošnje aktivne snage u proizvoljnom potrošačkom čvoru i su dobijeni skaliranjem dijagrama na Sl. 5.19 u skladu sa odnosom maksimalne snage potrošnje konzuma u čvoru i prema zbirnoj maksimalnoj snazi konzuma u analiziranoj mreži. Dijagrami potrošnje reaktivne snage u pojedinim čvorovima dobijeni su na sličan način imajući u vidu usvojeni faktor snage od 0,95.



Sl. 5.19: Relativni vremenski profil potrošnje analizirane mreže

5.4.3. Definisane optimizacionog problema

Distribuirani izvori, zbog karaktera svoje proizvodnje koja zavisi od promena solarne iradijacije i brzine vetra, uzrokuju vremensko kolebanje napona. Upravljanje naponskim prilikama u distributivnoj mreži može se efikasno vršiti kontrolom tokova reaktivnih snaga [86]. Injektiranjem (ili apsorbovanjem) reaktivne snage u pogodnom čvoru u sistemu može se direktno uticati na napone u čvorovima sistema, pri čemu taj

uticaj generalno slabi sa udaljenošću od mesta injektiranja. Kontrolom injektiranja reaktivne snage u distributivnoj mreži mogu se u izvesnoj meri kompenzovati kolebanja napona u čvorovima. Kao efikasan sistem za dinamičku kontrolu reaktivne snage injektiranja u nekom čvoru izabran je SVC uređaj. Imajući to u vidu, zadatak optimizacije je određivanje optimalne lokacije i snage SVC uređaja sa ciljem unapređenja naponskog profila distributivne mreže.

Problem određivanja lokacije i parametara SVC uređaja modelovan je sa tri kriterijumske funkcije. Kao prva kriterijumska funkcija (f_1) izabrana je maksimalna vrednost standardne devijacije napona u mreži:

$$f_1 = \max_i \sigma_i, \quad (5.14)$$

gde je σ_i standardna devijacija napona u čvoru i , koja je definisana sledećom relacijom:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{T-1} \sum_{t=1}^T (U_i^t - U_{di})^2}, \quad (i=1, \dots, N), \quad (5.15)$$

gde je:

U_i^t – napon u čvoru i u vremenskom intervalu t ,

U_{di} – željeni ili nominalni napon u čvoru i ,

T – broj vremenskih intervala (vremenski horizont)

N – broj čvorova u mreži.

U ovoj analizi je za vremenski interval t odabran period od $t=10$ min, što predstavlja rezoluciju mernih podataka o brzini vetra i solarnoj iradijaciji. Vremenski horizont posmatranja je $T=1$ dan, odnosno 144 10-minutnih intervala. Vrednosti napona U_{di} , ($i=1, \dots, N$) mogu se fiksirati na nominalnu vrednost ili nezavisno zadavati za svaki čvor u opsegu dozvoljenih vrednosti odstupanja od nazivne vrednosti.

Razlog za formiranje ovakve kriterijumske funkcije leži u ideji da se optimalnim lociranjem SVC uređaja popravi kvalitet napona u čvorovima distributivne mreže.

Kao druga kriterijumska funkcija (f_2) izabrana je suma instalisanih snaga SVC uređaja:

$$f_2 = \sum_{k=1}^M Q_{svc}^k, \quad (5.16)$$

gde je:

Q_{svc}^k – instalisana snaga SVC uređaja lociranog u čvoru k ,

M – ukupan broj SVC uređaja.

Izbor ovakve kriterijumske funkcije ima za cilj da se optimalnim lociranjem SVC uređaja popravi naponska slika u mreži ali uz što manju instalisanu snagu SVC uređaja.

Za treću kriterijumsku funkciju izabrani su gubici aktivne energije:

$$f_3 = \sum_{k=1}^T P_{gub}^k t, \quad (5.17)$$

gde su:

P_{gub}^k – gubici aktivne snage u vremenskom intervalu t ,

t – vremenski interval ($t = 10$ minuta),

T – broj vremenskih intervala (vremenski horizont).

Ova kriterijumska funkcija je izabrana sa namerom da se optimalnim izborom lokacije i snage SVC uređaja smanje gubici aktivne energije u distributivnoj mreži.

Imajući u vidu definisane kriterijumske funkcije, optimizacioni problem može se opisati sledećom jednačinom:

$$\min(f_1, f_2, f_3). \quad (5.18)$$

Pri tome, moraju se ispoštovati sledeća ograničenja:

- Ograničenja po balansu aktivnih i reaktivnih snaga u svim čvorovima mreže (jednačine tokova snaga);
- Ograničenja po donjim i gornjim granicama za napone u svim čvorovima mreže;
- Pogonska ograničenja SVC uređaja.

Za rešavanje postavljenog optimizacionog problema može se u potpunosti primeniti razvijena optimizaciona procedura višekriterijumske optimizacije. U procesu optimizacije vrši se simultana minimizacija maksimalne devijacije napona u mreži, minimizacija potrebne instalisane snage SVC uređaja i minimizacija gubitaka aktivne energije. Kao rezultat optimizacije dobija se set optimalnih rešenja koji predstavljaju optimalne lokacije SVC uređaja koje minimizuju analizirane kriterijumske funkcije.

Za rešavanje postavljenog optimizacionog zadatka, kao i u prethodnom primeru, odabran je NSGA-II algoritam. Za primenu NSGA-II algoritma urađeno je binarno kodiranje potencijalne lokacije kao i instalisane snage SVC uređaja. Kod proračuna tokova snaga čvor u kojem je instaliran SVC uređaj modelovan je kao PU čvor kod

koga je aktivna snaga generisanja jednaka 0, dok je napon jednak nekoj željenoj vrednosti za taj čvor. To može da bude nominalna vrednost ili neka druga vrednost u okviru dozvoljenih granica za napone. Donja i gornja granica za reaktivnu snagu generisanja definisane su kodiranom instalisanom snagom SVC uređaja (Q_{SVC}) tako da važi da je $Q_{min} = -Q_{SVC}$, a $Q_{max} = Q_{SVC}$. U slučaju da se u proračunu naruši neka od ovih granica, reaktivna snaga generisanja se fiksira na vrednost koja odgovara narušenoj granici i u tom slučaju čvor se tretira kao PQ čvor, pri čemu napon tog čvora može da varira u okviru dozvoljenih granica. Za napon napojnog čvora 1 uzeta je vrednost od 1,05 r.j. odnosno vrednost za 5 % veća od nominalne. Razlog za to je namera da se kompenzuju veliki padovi napona koji se javljaju u mreži usled opterećenih dugačkih deonica.

5.4.4. Rezultati proračuna

Za analiziranu distributivnu mrežu izvršena su tri proračuna:

1. Bazni proračun, odnosno proračun bez SVC uređaja;
2. Proračun sa ugradnjom jednog SVC uređaja (prvi scenario)
3. Proračun sa ugradnjom dva SVC uređaja (drugi scenario)

Za analiziranu mrežu i definisane karakteristične dijagrame potrošnje (Sl. 5.19 i Tabela 5.20), kao i karakteristične vremenske dijagrame generisanja snage distribuiranih izvora (Sl. 5.17, Sl. 5.18 i Tabela 5.20) izvršen je proračun tokova snaga za bazno stanje i dva scenarija ugradnje SVC uređaja za svaki desetominutni interval karakterističnog dana. Na osnovu sprovedenih proračuna utvrđene su varijacije napona u svim čvorovima sistema i proračunate odgovarajuće vrednosti devijacije napona, shodno relaciji (5.15). Pored proračuna za sve desetominutne intervale u toku analiziranog karakterističnog dana, odnosno za 144 različita radna stanja distributivne mreže, izvršen je i proračun efektivnih vrednosti napona za dva ekstremna, ali realno moguća režima. Za prvi ekstremni radni režim uzet je slučaj da nema proizvodnje iz distribuiranih izvora, a da je pri tom potrošnja u mreži maksimalna. Za drugi režim uzet je slučaj da je proizvodnja distribuiranih izvora maksimalna, a da je potrošnja u mreži minimalna. U prvom režimu, zbog maksimalne potrošnje bez dodatne proizvodnje, imaju se minimalni naponi u čvorovima, tako da može biti ugrožena donja granica

dozvoljenog napona. U drugom režimu, zbog maksimalne proizvodnje distribuiranih izvora i minimalnih zahteva potrošnje, može doći do povišenja napona iznad dozvoljenih vrednosti. Rezultati proračuna za dva ekstremna slučaja neće biti uključeni u optimizacioni proces već će poslužiti u postoptimizacionoj analizi za verifikaciju dobijenih rešenja. Potrebno je reći da su za potrebe analize usvojena dozvoljena naponska odstupanja $\pm 10\%$ od nominalne vrednosti. U tekstu koji sledi dati su rezultati za sva tri navedena proračuna.

5.4.4.1. Rezultati za bazni proračun

Sa namerom da se dobije kompletna slika pozitivnog uticaja ugradnje SVC uređaja u distributivnu mrežu prvo je analiziran slučaj bez ugradnje SVC uređaja. To je u stvari bazni proračun jer će dobijeni rezultati poslužiti za poređenje sa rezultatima u prvom i drugom scenariju.

Za svaki desetominutni interval karakterističnog dana izvršeni su proračuni tokova snaga. Na osnovu dobijenih rezultata izračunata je standardna devijacija napona za sve čvorove mreže. Rezultati proračuna dati su u drugoj koloni Tabele 5.21. Najveća devijaciju napona javlja se u čvoru 27 i iznosi 3.17% , a zatim u čvoru 13 gde iznosi 3.16% . Ovo je bilo očekivano, jer su u ovim čvorovima priključene vetroelektrane sa relativno velikim instalisanim snagama.

Pored proračuna standardne devijacije napona urađen je proračun naponskih odstupanja za dva ekstremna slučaja. U uslovima maksimalne potrošnje kada nema proizvodnje iz distribuiranih izvora mogu se javiti niski naponi u udaljenim čvorovima pa može biti ugrožena donja dozvojena granica po naponu. Sa druge strane, u uslovima minimalne snage potrošnje i maksimalne snage proizvodnje distribuiranih izvora naponi u čvorovima sistema mogu biti značajno iznad nominalne vrednosti. Rezultati proračuna napona u slučaju ova dva ekstremna režima rada, za slučaj bez ugradnje SVC uređaja (bazni proračun), su dati u poslednje dve kolone Tabele 5.21. Minimalne vrednosti napona odgovaraju prvom ekstremnom režimu, a maksimalne drugom ekstremnom režimu. Može se uočiti da je u velikom broju čvorova došlo do narušavanja dozvoljenih granica od $\pm 10\%$, pri čemu se najviši napon javlja u čvoru 27, a najniži napon u čvoru 22. Dobijeni rezultati pokazuju da kolebanja napona u distributivnim mrežama sa

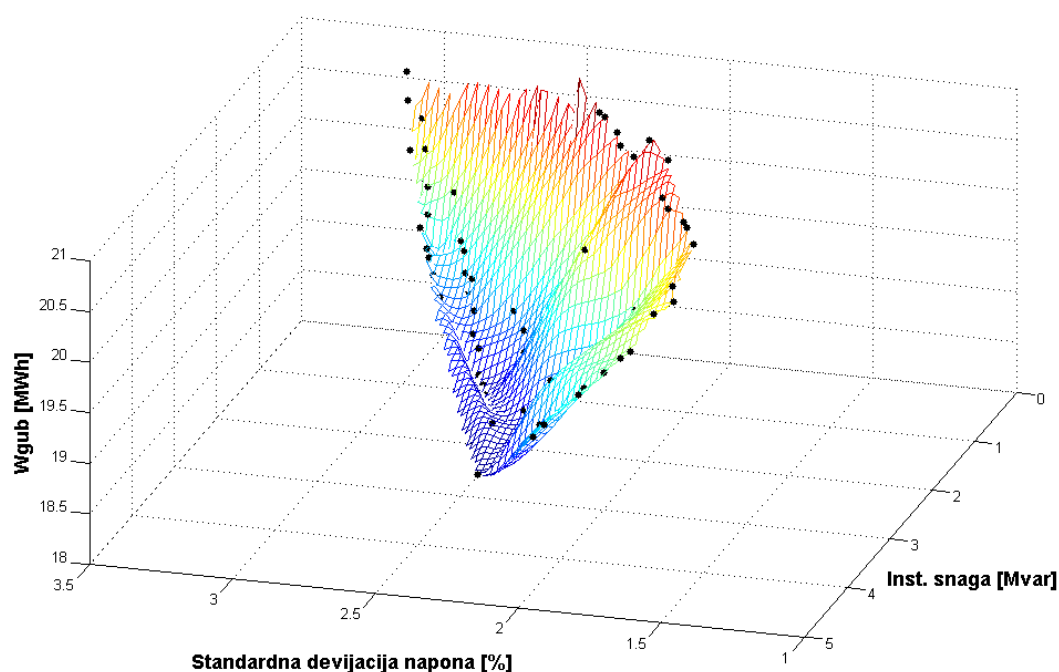
distribuiranim izvorima mogu biti velika i da je generalno, u slučaju slabih mreža i značajnog generisanja distribuiranih izvora, neophodno instalirati uređaje za kontrolu reaktivnih snaga u mreži. Imajući u vidu intermitentnost generisanja distribuiranih izvora problem održavanja napona u propisanim granicama pomoću regulacionih transformatora postaje tehnički neprihvatljiv zbog potreba za čestim menjanjem pozicije u regulacionih odcepa transformatora. Samim tim ugradnja SVC uređaja se nameće kao adekvatno rešenje za upravljanje naponima u mreži.

Tabela 5.21. Standardna devijacija napona po čvorovima za karakteristični dan i maksimalna odstupanja napona u čvorovima za slučaj bez SVC uređaja

Čvor	Standardna Devijacija [%]	Minimalni napon [%]	Maksimalni napon [%]
1	0	105.00	105.00
2	0.09	104.42	105.01
3	0.48	101.73	104.96
4	0.67	100.00	104.62
5	1.91	91.35	104.48
6	2.17	89.63	104.52
7	2.26	89.07	104.58
8	2.28	88.99	104.59
9	2.39	87.67	104.13
10	2.48	90.06	108.61
11	2.62	89.64	109.00
12	3.00	88.94	110.14
13	3.16	88.62	110.61
14	2.51	89.65	108.46
15	2.52	89.44	108.40
16	2.50	89.75	108.50
17	2.50	89.75	108.51
18	2.52	89.59	108.46
19	2.53	89.26	108.24
20	2.66	87.86	107.79
21	2.80	86.44	107.38
22	2.89	85.74	107.24
23	2.58	88.22	107.75
24	2.62	86.83	106.97
25	2.85	87.18	108.06
26	2.97	86.25	107.87
27	3.17	88.94	110.79
28	3.05	87.18	108.75

5.4.4.2. Rezultati proračuna za prvi scenario

Za prvi scenario, odnosno ugradnju jednog SVC uređaja, izvršena je optimizacija sa ciljem nalaženja optimalne lokacije SVC uređaja ali tako da se unaprede naponske prilike u mreži sa što manjom instalisanom snagom SVC uređaja i sa što manjim gubicima aktivne energije. Proračun je izvršen sa populacijom od 60 članova i trajao je 200 generacija. Kao rezultat optimizacije dobijen je set od 60 optimalnih rešenja. Potebno je naglasiti da su sva rešenja dopustiva, odnosno da zadovoljavaju postavljena ograničenja. Tu se pre svega misli na ograničenja po naponu u svim čvorovima pri čemu je usvojeno da je dozvoljeno odstupanje napona $\pm 10\%$ od nominalne vrednosti. Pored toga usvojeno je da maksimalna instalisana snaga SVC uređaja ne bude veća od 5 Mvar-a. Sva rešenja zadovoljavaju i ovo ograničenje. Grafička predstava seta optimalnih rešenja u prostoru kriterijumskih funkcija data je na Sl. 5.20. Pošto se imaju tri kriterijumske funkcije prikaz je urađen u 3D prostoru. Pored dobijenih rešenja na grafiku je nacrtana i površ kojom je aproksimiran Pareto front i koja daje bolji uvid u dobijena rešenja.



Sl. 5.20. Grafički prikaz seta optimalnih rešenja za slučaj sa jednim optimalno lociranim SVC uređajem

U Tabeli 5.22 dati su kompletni podaci o svim rešenjima sa Sl. 5.20, a to su optimalna lokacija i instalisana snaga SVC uređaja, maksimalna standardna devijacija napona u analiziranoj mreži kao i gubici aktivne energije u mreži. Za svih 60 rešenja dobijenih u procesu optimizacije izračunate su minimalne i maksimalne vrednosti napona koje se javljaju u mreži za analizirani karakteristični dan za slučaj dva ekstremna režima generisanja i potrošnje. Ove vrednosti su date u poslednje dve kolone Tabele 5.22.

Tabela 5.22: Podaci o rešenjima sa Sl. 5.20 za slučaj ugradnje jednog SVC uređaja

Reš.	Čvor za SVC	Snaga SVC [Mvar]	Max. Dev. Napona [%]	W_{gub} [MWh]	U_{min} [%]	U_{max} [%]
1	11	3.42	1.69	20.35	89.53	105.67
2	11	3.34	1.70	20.31	89.46	105.76
3	11	3.28	1.72	20.43	89.40	105.82
4	11	3.53	1.74	20.27	89.64	105.55
5	17	2.60	1.75	20.51	88.69	106.52
6	17	2.48	1.78	20.60	88.57	106.65
7	11	3.73	1.80	19.98	89.83	105.34
8	17	2.45	1.80	20.64	88.54	106.69
9	11	3.80	1.82	19.93	89.89	105.27
10	17	2.41	1.86	20.74	88.50	106.73
11	11	3.86	1.87	19.81	89.96	105.21
12	17	2.35	1.89	20.81	88.44	106.79
13	17	2.06	1.91	21.04	88.13	107.13
14	11	4.13	1.92	19.71	90.20	105.01
15	11	3.95	1.93	19.68	90.04	105.12
16	14	2.52	1.96	19.76	88.60	106.59
17	17	2.02	1.99	21.19	88.09	107.18
18	14	1.82	2.01	20.70	87.87	107.55
19	11	4.36	2.01	19.50	90.42	105.00
20	11	4.47	2.03	19.42	90.49	105.00
21	17	4.11	2.06	19.36	90.16	105.00
22	14	1.67	2.09	20.83	87.70	107.96
23	15	3.42	2.12	19.46	89.45	105.60
24	14	1.60	2.15	20.89	87.63	108.12
25	14	1.53	2.17	20.97	87.55	108.32
26	13	2.22	2.18	20.15	88.28	106.96
27	14	1.49	2.22	21.09	87.51	108.42
28	14	1.48	2.24	21.13	87.49	108.46
29	19	3.04	2.27	18.72	91.17	108.15
30	19	2.99	2.28	18.73	91.11	108.21

Tabela 5.22: Podaci o rešenjima sa Sl. 5.20 za slučaj ugradnje jednog SVC uređaja
(drugi deo tabele)

Reš.	Čvor za SVC	Snaga SVC [Mvar]	Max. Dev. Napona [%]	W_{gub} [MWh]	U_{min} [%]	U_{max} [%]
31	19	2.73	2.31	18.76	90.85	108.47
32	20	3.59	2.35	18.53	91.64	107.47
33	23	2.91	2.40	18.69	90.97	108.19
34	19	2.07	2.42	18.99	90.14	109.16
35	19	1.90	2.44	19.12	89.95	109.33
36	19	1.71	2.50	19.20	89.73	109.54
37	20	2.25	2.52	18.63	90.32	108.85
38	20	2.13	2.55	18.66	90.19	108.97
39	20	2.01	2.58	18.69	90.06	109.09
40	23	1.86	2.60	18.87	89.89	109.25
41	23	1.72	2.64	18.94	89.73	109.40
42	23	1.55	2.66	19.09	89.55	109.57
43	23	1.36	2.70	19.30	89.33	109.77
44	20	1.39	2.71	19.18	89.38	109.74
45	20	1.29	2.74	19.30	89.26	109.85
46	23	1.19	2.75	19.47	88.95	109.94
47	20	1.12	2.77	19.53	89.06	110.02
48	21	1.47	2.80	19.14	89.43	109.54
49	20	0.88	2.83	19.88	88.54	110.28
50	21	1.29	2.85	19.25	89.24	109.73
51	21	1.16	2.88	19.36	89.10	109.87
52	21	1.10	2.90	19.41	89.03	109.93
53	21	0.92	2.92	19.66	88.74	110.12
54	24	1.04	2.93	19.58	88.52	109.97
55	21	0.79	2.94	19.86	88.42	110.26
56	21	0.63	2.97	20.14	87.98	110.44
57	21	0.49	3.00	20.38	87.63	110.59
58	22	0.61	3.03	20.11	87.92	110.40
59	24	0.41	3.07	20.49	86.88	110.62
60	22	0.29	3.09	20.71	87.08	110.74

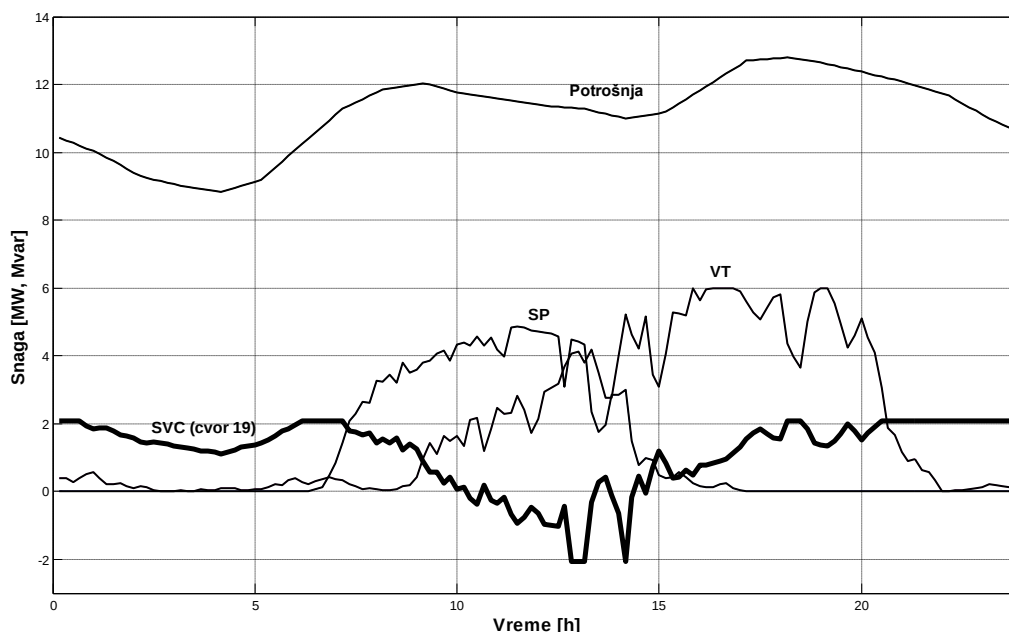
Optimizacioni problem u ovom primeru primene nove procedure za izbor FACTS uređaja modelovan je sa 3 kriterijumske funkcije. Iako imamo jednu kriterijumsku funkciju manje nego u prethodnom primeru, grafički i tabelarni prikaz dobijenih rešenja i u ovom primeru nije pregledan pa izbor jedinstvenog kompromisnog

rešenja nije jednostavan. Međutim, i ovde se može primeniti razvijena *Du-Db* metoda za izbor jedinstvenog optimalnog rešenja. Za primenu ove metode potrebno je definisati koordinate bazne i utopia tačke. Za koordinate utopia tačke usvojene su minimalne vrednosti pojedinih kriterijumskih funkcija koje su dobijene proračunom. Za koordinate bazne tačke usvojene su vrednosti kriterijumskih funkcija za slučaj pre ugradnje SVC uređaja. Za snagu SVC (druga kriterijumska funkcija) usvojena je vrednost od 5 Mvar koja predstavlja zadatu maksimalnu vrednost snage SVC uređaja. Koordinate bazne i utopia tačke date su u Tabeli 5.23.

Tabela 5.23: Koordinate bazne i utopia tačke za slučaj ugradnje jednog SVC uređaja

Krit. funkcija	f_1 [%]	f_2 [Mvar]	f_3 [MWh]
Utopia tačka	1.69	0.29	18.53
Bazna tačka	3.17	5.00	21.42

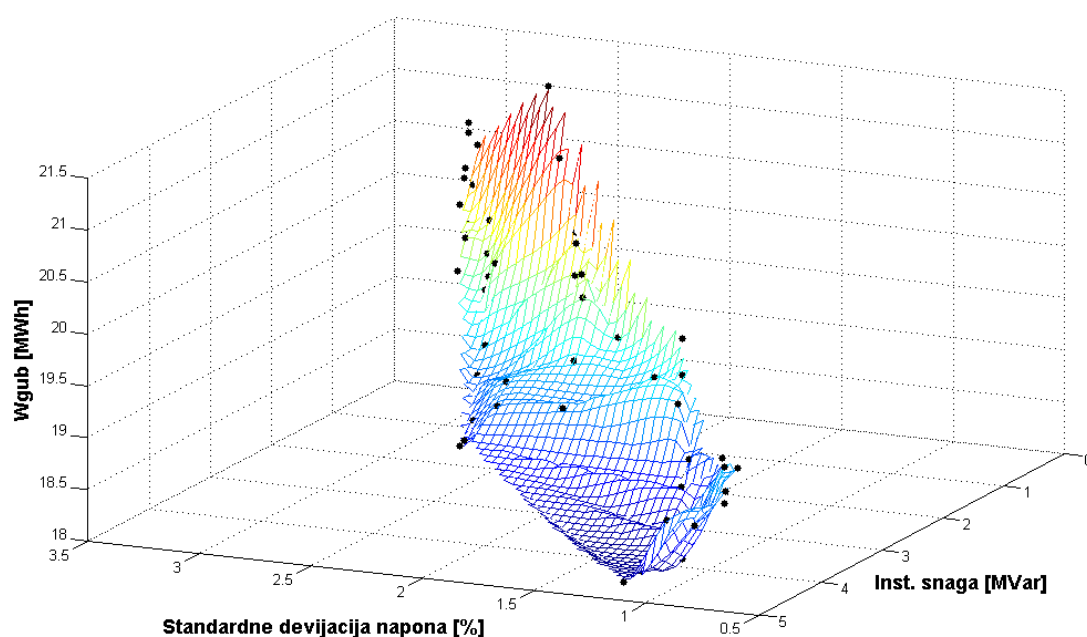
Primenom *Du-Db* metode na rešenja iz Tabele 5.22, imajući u vidu koordinate utopia i bazne tačke, dobija se jedinstveno kompromisno rešenje. To je rešenje broj 34. Podaci o ovom rešenju dati su u Tabeli 5.22. SVC uređaj bi se instalirao u čvor 19, a njegova snaga bi bila 2.07 Mvar. Na osnovu podataka iz tabele se vidi da izabrano rešenje zadovoljava i po pitanju dva ekstremna režima, odnosno naponi ostaju u dozvoljenim granicama pri ugradnji SVC uređaja i za dva ekstremna režima. Ovo je dodatna verifikacija izabranog rešenja. Za ovo izabrano rešenje, na Sl. 5.21 prikazana je promena srednjih desetominutnih aktivnih snaga injektiranja distribuiranih izvora i reaktivne snage SVC uređaja u toku karakterističnog dana. Oznakom SP obeležena je ukupna aktivna snaga fotonaponskih panela, a oznakom VT ukupna aktivna snaga vetroturbina. Sa Sl. 5.21 se vidi da u periodima dana kada se ima manja proizvodnja iz distribuiranih izvora SVC uređaj radi u režimu generisanja reaktivne snage, dok u periodima dana kada imamo značajnu proizvodnju iz distribuiranih izvora SVC uređaj radi u režimu apsorpcije reaktivne snage iz mreže.



Sl. 5.21. Prosečna 10-minutna injektirana aktivna snaga distribuiranih izvora i reaktivna snaga SVC uređaja za izabrano rešenje u toku karakterističnog dana.

5.4.4.3. Rezultati proračuna za drugi scenario

Kod drugog scenarija, odnosno proračuna sa dva SVC uređaja sprovedena je ista optimizaciona procedura kao i u slučaju jednog SVC uređaja. I ovde se dobija set od 60 optimalnih rešenja. Sva rešenja su dopustiva i zadovoljavaju postavljena ograničenja. U ovom proračunu usvojeno je da ukupna instalisana snaga dva SVC uređaja ne bude veća od 5 Mvar. Grafička predstava seta optimalnih rešenja u prostoru kriterijumskih funkcija data je na isti način kao i u slučaju ugradnje jednog SVC uređaja i prikazana je na Sl. 5.22. U Tabeli 5.24 dati su kompletni podaci za rešenja sa Sl. 5.22. U Tabeli su pored ostalih veličina date lokacije i pojedinačne snage za oba SVC uređaja kao i njihova zbirna snaga. Kao i u slučaju ugradnje jednog SVC uređaja, i ovde su za svih 60 rešenja dobijenih u procesu optimizacije izračunate minimalne i maksimalne vrednosti napona koje se javljaju u mreži za slučaj dva ekstremna režima generisanja i potrošnje. Podaci dobijenih ovim proračunima dati su u poslednje dve kolone Tabele 5.24.



Sl. 5.22. Set optimalnih rešenja za slučaj sa dva optimalno locirana SVC uređaja

Tabela 5.24: Podaci o rešenjima sa Sl. 5.22 za slučaj ugradnje dva SVC uređaja

Reš.	Čvor za SVC1	Snaga SVC1 [Mvar]	Čvor za SVC2	Snaga SVC2 [Mvar]	Max. Dev. Napona [%]	Ukupna inst. snaga [Mvar]	W_{gub} [MWh]	U_{min} [%]	U_{max} [%]
1	19	2.50	27	2.00	0.79	4.50	18.85	92.42	105.00
2	19	2.50	27	2.43	0.81	4.93	18.77	92.77	105.00
3	19	2.50	27	1.93	0.81	4.42	18.94	92.36	105.00
4	25	2.17	27	1.93	0.90	4.10	19.04	91.97	105.00
5	19	1.79	27	1.96	0.94	3.75	18.92	91.66	105.00
6	16	1.61	25	3.15	0.98	4.76	18.72	92.67	105.49
7	16	2.23	20	2.05	1.04	4.28	18.18	92.17	105.00
8	16	1.68	25	1.83	1.12	3.51	18.59	91.45	105.91
9	15	2.35	20	2.48	1.15	4.83	18.11	92.67	105.00
10	15	2.35	20	2.17	1.16	4.52	18.11	92.37	105.00
11	15	2.23	20	1.78	1.18	4.02	18.14	91.89	105.00
12	15	2.33	25	1.56	1.18	3.89	18.30	91.88	105.00
13	16	1.47	25	1.56	1.20	3.03	18.74	93.40	106.72
14	16	2.31	20	1.46	1.24	3.77	18.27	91.80	105.00
15	15	1.80	20	1.78	1.24	3.59	18.22	91.52	105.64
16	15	1.80	20	1.61	1.27	3.42	18.25	91.34	105.83
17	15	1.49	25	1.78	1.32	3.27	18.50	91.22	106.36
18	15	1.50	20	1.61	1.35	3.11	18.37	91.07	106.54
19	16	1.45	20	1.46	1.39	2.91	18.64	93.49	106.89
20	15	1.45	20	1.45	1.41	2.89	18.45	93.94	106.85

Tabela 5.24: Podaci o rešenjima sa Sl. 5.22 za slučaj ugradnje dva SVC uređaja

(drugi deo tabele)

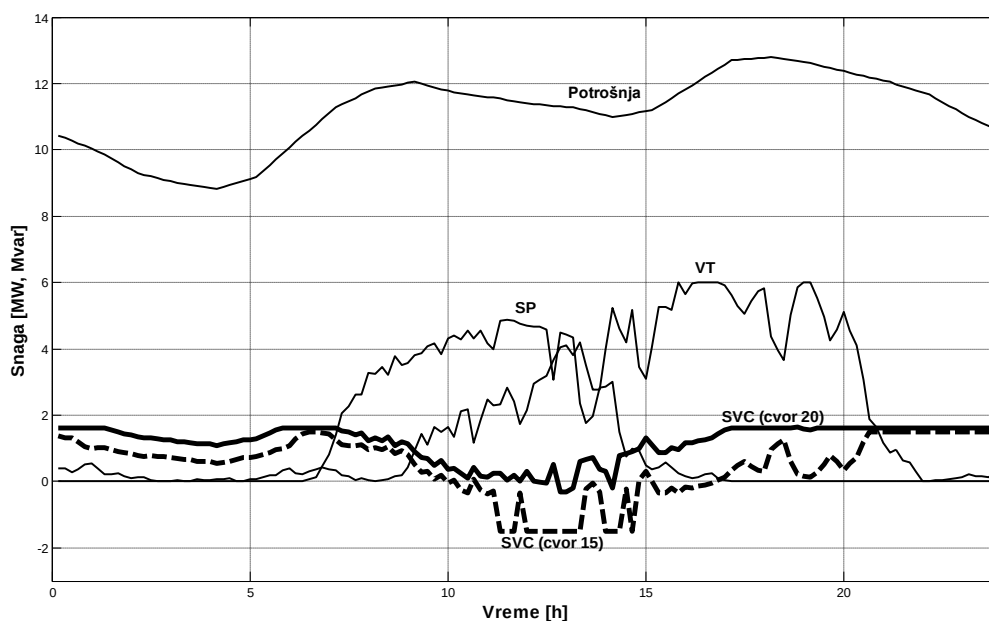
Reš.	Čvor za SVC1	Snaga SVC1 [Mvar]	Čvor za SVC2	Snaga SVC2 [Mvar]	Max. Dev. Napona [%]	Ukupna inst. snaga [Mvar]	W_{gub} [MWh]	U_{min} [%]	U_{max} [%]
21	15	1.36	25	1.25	1.47	2.61	18.70	93.94	107.28
22	15	1.97	25	0.62	1.52	2.60	19.04	89.65	106.54
23	18	1.72	25	0.59	1.58	2.31	19.22	89.32	107.21
24	16	1.60	25	0.49	1.64	2.09	19.49	88.94	107.69
25	16	1.80	20	0.63	1.67	2.43	19.21	89.77	107.00
26	15	1.52	26	0.75	1.82	2.27	18.98	89.51	107.39
27	21	0.76	18	1.60	1.91	2.37	18.89	90.12	107.21
28	15	1.25	21	0.54	2.01	1.79	19.32	89.19	108.30
29	15	2.03	22	0.52	2.05	2.56	18.87	89.95	106.40
30	15	1.56	22	0.44	2.15	2.00	19.12	89.26	107.62
31	15	1.58	22	0.13	2.19	1.72	19.64	88.22	107.93
32	15	1.58	22	0.05	2.21	1.64	19.83	87.85	106.51
33	15	1.34	24	0.31	2.26	1.65	19.47	88.18	108.31
34	15	1.35	24	0.15	2.28	1.50	19.76	87.75	108.48
35	18	1.41	28	0.00	2.30	1.41	20.04	87.41	108.44
36	15	1.30	25	0.00	2.33	1.30	20.10	87.29	108.68
37	19	2.50	27	0.00	2.35	2.50	18.80	90.60	108.71
38	19	2.18	27	0.00	2.40	2.18	18.92	90.26	109.03
39	20	1.02	20	1.79	2.42	2.82	18.55	90.89	108.28
40	24	0.02	23	1.10	2.46	1.12	20.73	88.77	110.06
41	25	2.13	21	0.54	2.47	2.67	18.44	92.99	108.40
42	20	1.02	20	1.39	2.49	2.41	18.60	90.48	108.69
43	23	0.85	24	0.00	2.58	0.86	21.32	88.08	110.31
44	20	0.17	20	1.60	2.64	1.77	18.80	89.80	109.34
45	20	1.02	20	0.53	2.67	1.55	19.02	89.56	109.57
46	24	0.04	25	1.16	2.72	1.20	19.68	92.29	109.96
47	24	0.00	23	1.15	2.76	1.15	19.53	88.84	109.99
48	20	1.02	20	0.17	2.77	1.19	19.41	89.14	109.95
49	20	0.00	23	1.02	2.80	1.02	19.70	88.50	110.13
50	23	0.85	24	0.00	2.84	0.85	19.96	88.07	110.31
51	24	0.00	24	1.09	2.91	1.09	19.53	88.67	109.91
52	20	0.00	26	0.94	2.92	0.94	19.80	88.28	110.09
53	21	0.76	19	0.00	2.95	0.76	19.90	88.34	110.29
54	20	0.00	21	0.59	2.98	0.59	20.19	87.89	110.48
55	19	0.00	21	0.43	3.01	0.43	20.52	87.47	110.66
56	24	0.04	24	0.63	3.02	0.67	20.01	87.58	110.34
57	24	0.00	22	0.54	3.04	0.54	20.22	87.75	110.46
58	24	0.00	22	0.50	3.04	0.50	20.31	87.64	110.51
59	19	0.00	22	0.35	3.07	0.35	20.59	87.24	110.67
60	20	0.00	22	0.31	3.08	0.31	20.67	87.13	110.72

I kod ovog scenarija za izbor jedinstvenog kompromisnog rešenja može se primeniti *Du-Db* metoda. Koordinate bazne tačke su iste kao i za slučaj ugradnje jednog SVC uređaja. Za koordinate utopia tačke i u ovom slučaju su uzete minimalne vrednosti kriterijumskih funkcija koje se dobijene u procesu optimizacije. Koordinate ovih tačka date su u Tabeli 5.25.

Tabela 5.25: Koordinate bazne i utopia tačke za slučaj ugradnje dva SVC uređaja

Krit. funkcija	f_1 [%]	f_2 [Mvar]	f_3 [MWh]
Utopia tačka	0.79	0.31	18.11
Bazna tačka	3.17	5.00	21.42

Primenom *Du-Db* metode na rešenja iz Tabele 5.24, kao izabrano rešenje dobija se rešenje broj 18. Podaci o ovom rešenju se nalaze u Tabeli 5.24. Ovo rešenje podrazumeva ugradnju jednog SVC uređaja snage 1.5 Mvar u čvor 15 i drugog SVC uređaja snage 1.61 Mvar u čvor 20. Izabrano rešenje zadovoljava i po pitanju naponskih ograničenja za dva ekstremna slučaja proizvodnje i potrošnje. Za izabrano rešenje na Sl. 5.23 prikazana je promena srednjih desetominutnih aktivnih snaga injehtiranja distribuiranih izvora i reaktivne snage SVC uređaja u toku karakterističnog dana.



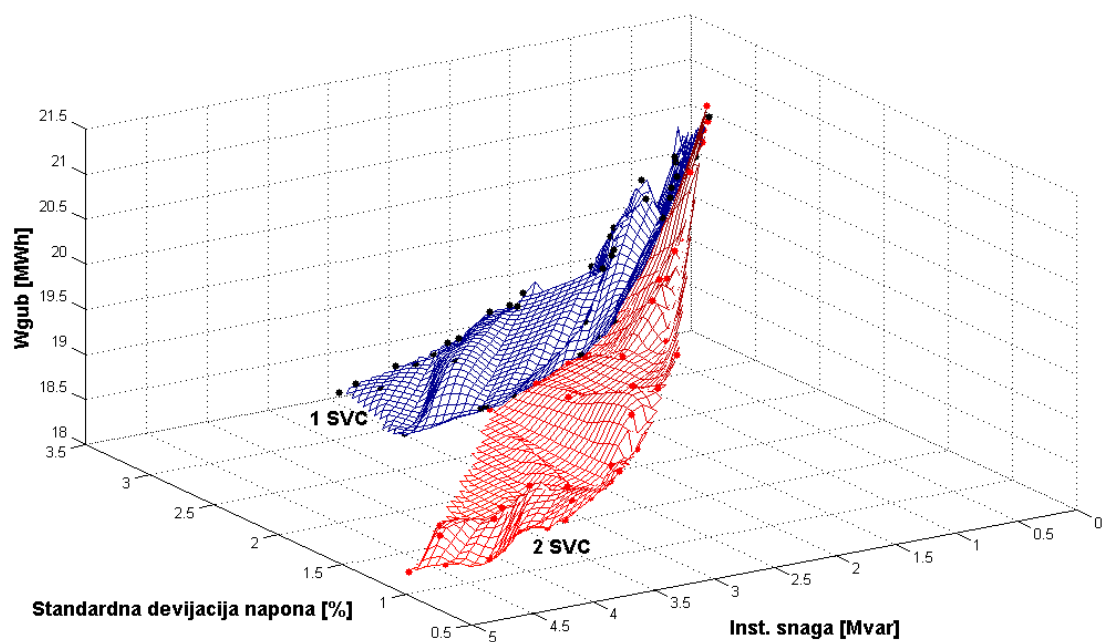
Sl. 5.23. Prosečna 10-minutna injehtirana aktivna snaga distribuiranih izvora i reaktivna snaga SVC uređaja instaliranih u čvorovima 15 i 20 u toku karakterističnog dana.

5.4.4.4. Uporedna analiza dobijenih rezultata

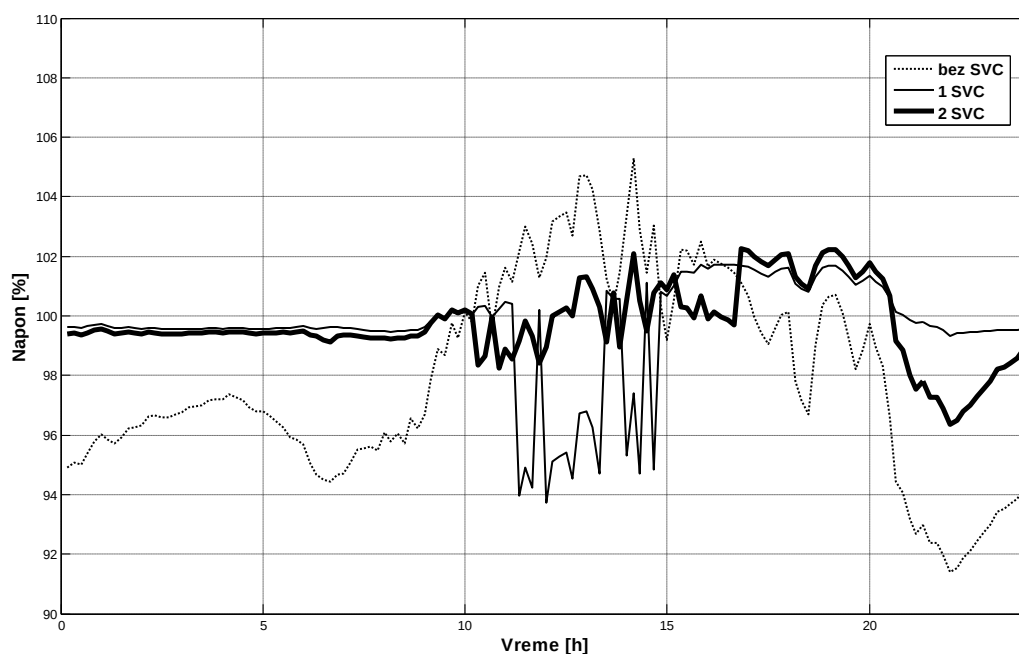
Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da su SVC uređaji vrlo efikasni u pogledu smanjenja kolebanja napona u čvorovima složene distributivne mreže sa disperzovanom intermitentnim elektranama. Takođe, ugradnjom SVC uređaja značajno se redukuju gubici aktivne energije u mreži. U pogledu broja uređaja, uvidom u Tabele 5.22 i 5.24 može se zaključiti da se sa dva SVC mogu postići daleko bolji efekti nego sa jednim uređajem. Primera radi, ako uporedimo rešenje 1 prikazano u Tabeli 5.22 za jedan SVC i rešenje 13 za dva SVC-a, dato u Tabeli 5.24, vidimo da sa jednim uređajem dostižemo devijaciju od 1.69 %, dok sa dva uređaja, koji imaju značajno manju zbirnu instalisanu snagu, dostiže devijacija napona u najugroženijem čvoru od 1.2 %. U cilju analize na Sl. 5.24 prikazana su uporedo dobijena optimalna rešenja za oba scenarija ugradnje SVC uređaja. Grafik sa Sl. 5.24 predstavlja zajednički prikaz grafika sa Sl. 5.20 i Sl. 5.22. Na grafiku sa Sl. 5.24 jasno se vidi da je površina na kojoj se nalaze rešenja za slučaj ugradnje dva SVC uređaja značajno ispod površine koja odgovara slučaju sa jednim SVC uređajem. To je jasna ilustracija u kojoj su meri rešenja sa dva SVC uređaja bolja od rešenja sa jednim SVC uređajem.

Ugradnjom SVC uređaja popravljaju se naponski profil u mreži bilo da se radi o jednom ili dva uređaja. Radi ilustracije u kojoj meri je ugradnja dva SVC uređaja bolja od ugradnje jednog SVC uređaja na Sl. 5.25 prikazane su srednje desetominutne vrednosti napona u najugroženijem čvoru za karakterističan dan za različite scenarije. Kao najugroženiji čvor izabran je čvor 27. Ovaj čvor je imao maksimalnu devijaciju napona za slučaj bez ugradnje SVC uređaja. Za poređenje uzeto je rešenje 1 u slučaju jednog SVC uređaja i rešenje 13 u slučaju dva SVC uređaja. Sa slike se vidi da se postavljanjem dva SVC uređaja u različitim čvorovima mreže obezbeđuje manje kolebanje i veća uniformnost efektivne vrednosti napona.

Potrebno je naglasiti, da za razliku od problema izbora FACTS uređaja u prenosnoj mreži ovde nije izvršeno grupisanje dobijenih setova optimalnih rešenja za različita scenarija u jedan jedinstveni set. Razlog za to je postojanje samo dva scenarija koja mogu lako da se porede i samim tim izabere onaj scenario koji za datu mrežu postiže bolje efekte. U ovom slučaju to je drugi scenario.



Sl. 5.24. Uporedni prikaz dobijenih optimalnih rešenja za slučajeve sa jednim i sa dva optimalno locirana SVC uređaja.



Sl. 5.25. Naponi u najugroženijem čvoru za slučaj bez SVC-a, sa jednim SVC-om (rešenje 1) i 2 SVC-a (rešenje 13)

5.5. Rezime

Nova procedura za određivanje optimalnog tipa, lokacije i parametara FACTS uređaja, u ovoj disertaciji, primenjena je na dva realna optimizaciona problema. Prvi se odnosio na optimizacioni problem razvoja prenosne mreže ugradnjom FACTS uređaja u prenosnoj mreži. Drugi problem se odnosio na izbor optimalne lokacije i parametara SVC uređaja u distributivnoj mreži. Pošto se u oba slučaja radi o mrežama većih dimenzija razvijena procedura pokazala je pun potencijal u pogledu pretraživanja velikog broja potencijalnih rešenja optimizacionog problema. Kao rezultat optimizacije dobijen je set optimalnih rešenja koji predstavlja kompromis između razmatranih kriterijumskih funkcija. Na osnovu dobijenog seta optimalnih rešenja novom metodom za izbor jedinstvenog kompromisnog rešenja dati su konkretni predlozi za rešenja optimizacionih problema za oba razmatrana slučaja. Imajući sve u vidu može se reći da je razvijena procedura adekvatan način za rešavanje optimizacionih problema ovakvog tipa.

6. ZAKLJUČAK

Zahtevi koji se nameću savremenim elektroenergetskim sistemima kao što su rast konzuma, razvoj tržišta električne energije, priključenje distribuiranih izvora električne energije, zaštita životne sredine i sl., doveli su do toga da tradicionalni načini planiranja i upravljanja nisu dovoljni za održiv razvoj sistema. Zbog toga je nastala potreba za novim načinima upravljanja sistemom.

Jedan od savremenih načina upravljanja je upotreba novih kontrolnih uređaja poznatih po jedinstvenom nazivu FACTS (Flexible Alternating Current Transmission System) uređaji. Osnovna namena FACTS uređaja je povećanje kontrolabilnosti i prenosne sposobnosti sistema. To se ostvaruje regulacijom tokova snaga po zadatim prenosnim koridorima, a takođe i regulacijom napona u izabranim čvorovima u sistemu. U nameri da se pozitivni efekti ugradnje FACTS uređaja iskoriste na najbolji način, od posebne je važnosti pravilan izbor tipa, lokacije i parametara FACTS uređaja. U cilju rešavanja ovog problema u okviru ove disertacije razvijena je nova procedura za izbor optimalnog tipa, lokacije i parametara FACTS uređaja.

Glavna novina kod razvijene procedure, u odnosu na postojeće, je ta da se optimizacioni problem izbora tipa, lokacije i parametara FACTS uređaja može modelovati sa proizvoljnim brojem kriterijumskih funkcija. Time je omogućeno obuhvatanje svih relevantnih faktora koji mogu uticati na pravilan izbor FACTS uređaja. Kod izbora kriterijumskih funkcija ne postoje nikakva ograničenja. One mogu biti mešovite sa različitim tipovima promenljivih (realne, cele, kontinualne, diskretne, logičke itd.). U nameri da se u procesu optimizacije sve kriterijumske funkcije ravnomerno tretiraju, izvršena je višekriterijumska optimizacija koja omogućava simultanu (istovremenu) optimizaciju svih analiziranih kriterijumskih funkcija. Od velikog broja metoda višekriterijumske optimizacije izbor je pao na NSGA-II (Nondominated Sorted Genetic Algorithm) metod. Ovo je standardan metod za rešavanje problema višekriterijumske optimizacije. Za potrebe optimizacije u ovoj disertaciji ovaj metod je dodatno unapređen uvođenjem lokalnog pretraživanja za

članove populacije koji se nalaze na rubnim delovima tekućeg Pareto fronta. Na taj način povećana je efikasnost pri određivanju optimalnih rešenja.

Kao rezultat višekriterijumske optimizacije dobija se set optimalnih rešenja. Izbor jedinstvenog kompromisnog rešenja iz dobijenog seta optimalnih rešenja može da predstavlja problem, pogotovo kada se optimizacioni problem modeluje sa više kriterijumskih funkcija. U okviru razvijene procedure, izbor jedinstvenog kompromisnog rešenja nije prepušten krajnjem korisniku, već je predložena nova metoda za izbor. Ova metoda predstavlja kompromis između dva različita kriterijuma za izbor. Prvi kriterijum je izbor jedinstvenog optimalnog rešenja na osnovu najmanje udaljenosti do utopia tačke, a drugi kriterijum je izbor rešenja koje u najvećoj meri popravља performanse analizirane mreže imajući u vidu razmatrane kriterijumske funkcije. Razvijena metoda ravnopravno tretira sve kriterijumske funkcije i ne zavisi od broja analiziranih kriterijumskih funkcija.

Razvijena procedura omogućava i uporednu analizu uticaja pojedinih tipova ili kombinacije tipova FACTS uređaja na analiziranu mrežu i na osnovu nje predlaže onu kombinaciju FACTS uređaja koja za datu mrežu postiže najbolje efekte u pogledu na analizirane kriterijumske funkcije.

Razvijena procedura testirana je na dva realna problema. Prvi se odnosio na planiranje razvoja prenosne mreže Elektroprivrede Srbije izborom optimalnog tipa, lokacija i parametara FACTS uređaja. Analizirane su različite faze razvoja prenosne mreže uz uvažavanje trenda rasta potrošnje i izgradnju novih proizvodnih kapaciteta. Optimizaciona procedura ukazala je na slabe tačke u prenosnoj mreži i dala konkretne predloge za FACTS uređaje čijom bi se ugradnjom izbegla potreba za izgradnjom novih prenosnih kapaciteta.

Procedura je testirana i na drugom realnom problemu, a to je nalaženje optimalne lokacije i parametara FACTS uređaja u distributivnoj mreži sa većim brojem distribuiranih izvora kao što su vetroturbine i solarni paneli. Vremenske promene brzine vetra i insolacije uzrokuju intermitentnost snaga koju ovi izvori injektiraju u distributivnu mrežu. Ovo ima za posledicu poremećaj naponskih profila u čvorovima mreže što direktno utiče na kvalitet napajanja krajnjih potrošača. Da bi se naponska odstupanja kontrolisala, potrebno je vršiti brzu dinamičku kontrolu reaktivnih snaga u distributivnoj mreži. Efikasan način za to je upotreba FACTS uređaja. Tu se nameće

pitiranje optimalne lokacije i snage FACTS uređaja u cilju kontrolisanja napona u svim čvorovima mreže. Imajući u vidu prirodu problema, od postojećih FACTS uređaja, izbor je pao na SVC uređaj. Kao rezultat primene razvijene procedure, dobijene su optimalne lokacije SVC uređaja i njihova potrebna instalisana snaga. Proračun je izvršen za slučaj ugradnje jednog i za slučaj ugradnje dva SVC uređaja. Dobijeni rezultati pokazuje da upotreba SVC uređaja na optimalna način u značajnoj meri popravlja naponski profil u analiziranoj distributivnoj mreži.

Razvijena procedura za izbor tipa, lokacije i parametara FACTS uređaja u primeni na realne prenosne i distributivne mreže daje veoma dobre rezultate. Ona omogućava optimizaciju proizvoljnog broja kriterijumskih funkcija što omogućava razmatranje svih relevantnih faktora koji mogu uticati na izbor. Takođe procedura predlaže jedinstveno kompromisno rešenje koje se bira iz seta optimalnih rešenja. Prednost razvijene procedure posebno se vidi kod mreža velike dimenzionalnosti. Traženje optimalne lokacije za FACTS uređaje u takvim mrežama, bez adekvatnog optimizacionog postupka, ne bi dalo kompletan pregled svih potencijalnih varijanti i dobijena rešenja ne bi bila u potpunosti adekvatna. U okviru procedure pretražuje se veliki broj potencijalnih rešenja i u procesu optimizacije dobijaju se rešenja koja su za analiziranu mrežu najefikasnija, imajući u vidu kriterijumske funkcije kojima je modelovan optimizacioni problem.

Razvijena procedura nije primenjiva samo na probleme koji su analizirani u ovoj disertaciji. Ona se uspešno može primeniti na širok dijapazon problema iz energetike, a takođe i na probleme iz drugih naučnih oblasti.

LITERATURA

- [1] Nikola Rajaković: Analiza elektroenergetskih sistema I, Elektrotehnički fakultet Beograd, Akademska Misao, Beograd 2002.
- [2] J. Momoh, L. Mili, Economic Market Design and Planning for Electric Power Systems, IEEE Press, Wiley, Hoboken, New Jersey, USA, 2010.
- [3] N.G. Hingorani and L. Gyugyi, Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission System, Wiley, New York, NY, USA, 1999.
- [4] A. Abraham, L. Jain, R. Goldberg, Evolutionary Multiobjective Optimization - Theoretical Advances and Applications, Springer, London 2005.
- [5] K. Deb, Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms, Wiley, Chichester, UK 2001.
- [6] W. Fang and H.W. Ngan, "Optimizing Location of Unified Power Flow Controllers Using Method of Augmented Lagrange Multipliers", *Proc. Inst. Elect. Eng. Gen. Transm. Distrib.*, Vol. 146, No. 5, pp. 428-434, Sep. 1999.
- [7] M. Saravanan, S.M.R. Slochanal, P. Venkatesh and J. P. S. Abraham, "Application of Particle Swarm Optimization Technique for Optimal Location of FACTS Devices Considering Cost of Installation and System Loadability", *Electric Power Systems Research*, Vol. 77, pp. 276-283, 2007.
- [8] H.I. Shaheen, G.I. Rashed, S.J. Cheng, "Optimal Location and Parameters Setting of Unified Power Flow Controller Based on Evolutionary Optimization Techniques, " Power Engineering Society General Meeting, 2007.
- [9] S.T. Jaya Christa, P. Venkatesh, "Application of Particle Swarm Optimization for Optimal Placement of Unified Power Flow Controllers in Electrical Systems with Line Outages," Conference on Computational Intelligence and Multimedia Applications, 2007. International Conference on , vol.1, no., pp.119-124, 13-15 Dec. 2007.
- [10] S. Gerbex, R. Cherkaoui, A. J. Germond, "Optimal Location of Multi-Type FACTS Devices in a Power System by Means of Genetic Algorithms", *IEEE Trans. on Power System*, Vol. 16, No. 3, pp. 537 - 544, Aug. 2001.

-
- [11] H.C. Leung and T.S. Chung, "Optimal Placement of FACTS Controller in Power System by a Genetic-Based Algorithm", *Proc. IEEE Int. Conf. Power Electronics Drive Systems*, pp. 833-836, 1999.
- [12] D. Arabkhaburi, A. Kazemi, M. Yari, J. Aghaei, "Optimal Placement of UPFC in Power Systems Using Genetic Algorithm," *Industrial Technology*, 2006. ICIT 2006. IEEE International Conference on , pp.1694-1699, 15-17 Dec. 2006.
- [13] M. Gitizadeh, M. Kalantar, "A novel approach for optimum allocation of FACTS devices using multi-objective function, *Energy Conversion and Management*", Volume 50, Issue 3, March 2009, Pages 682-690.
- [14] J. Baskaran, V. Palanisamy, "Optimal Location of FACTS Devices in a Power System Solved by a Hybrid Approach", *Nonlinear Analysis*, Vol. 65, pp. 2094-2102, 2006.
- [15] J.A. Dominguez-Navarro, J.L. Bernal-Agustin, A. Diaz, et al., "Optimal Parameters of FACTS Devices in Electric Power Systems Applying Evolutionary Strategies", *Electrical Power and Energy Systems* Vol. 29, pp. 83–90, 2007.
- [16] W. Shao, V. Vittal, "LP Based OPF for Corrective FACTS Control to Relieve Overloads and Voltage Violations", *IEEE Trans. on Power System*, Vol. 21, No. 4, pp. 1832-1839, Nov. 2006.
- [17] S. Sutha, N. Kamaraj, "Optimal Location of Multi Type Facts Devices for Multiple Contingencies Using Particle Swarm Optimization", *International Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 2008.
- [18] F. Aminifar, M. Fotuhi-Firuzabad, A. Khodaei, S.O. Faried, "Optimal Placement of Unified Power Flow Controllers (UPFCs) Using Mixed-Integer Non-Linear Programming (MINLP) Method", *Power & Energy Society General Meeting*, 2009. PES '09. IEEE.
- [19] G. Glanymann, G. Andersson, "Coordinated Control of FACTS Devices Based on Optimal Power Flow", *Proc. of the 37th Annual North American Power Symposium*, pp. 141- 148, 2005.
- [20] I. Marouani, T. Guesmi, H. Abdallah, A. Ouali, "Application of a multiobjective evolutionary algorithm for optimal location and parameters of FACTS devices considering the real power loss in transmission lines and voltage deviation buses," 6th

International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices, pp.1-6, 23-26 March 2009.

[21] R. Benabid, M. Boudour, M.A. Abido, "Optimal location and setting of SVC and TCSC devices using non-dominated sorting particle swarm optimization", *Electric Power System Research* 79 (2009) 1668-1677.

[22] A. Savić, P. Stefanov, Nikola Rajaković, "Optimal Location of UPFC Devices Using Multi-Objective Optimization", *MEDPOWER Conference*, Nov. 2008, electronic issue.

[23] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, T. Meyarivan, A Fast and Elitist Multiobjective Genetic algorithm: NSGA-II, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol.6, No.2, (2002) 182–197.

[24] X.P. Zhang, C. Rehtanz, B. Pal, *Flexible AC Transmission Systems: Modeling And Control*, Springer, Germany, 2006.

[25] E. Acha, C.R.F. Esquivel, H.A. Perez, C.A. Camacho, *FACTS: Modelling and Simulation in Power Networks*, John Wiley and Sons LTD, Chichester, United Kingdom, 2004.

[26] Y.H. Song, A.T. Jones (as editors), *Flexible AC Transmission Systems (FACTS)*, The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom, November 1999.

[27] N.P. Padhy, M.A. Abdel Moamen, Power flow control and solutions with multiple and multi-type FACTS devices, *Electric Power Systems Research* 74 (2005) 341–351.

[28] J. Arrillaga, N.R. Watson, *Computer Modeling of Electrical Power Systems*, Wiley, London, UK. 2001.

[29] A. Nabavi-Niaki, M.R. Iravani, "Steady-State and Dynamic Models of Unified Power Flow Controller (UPFC) for Power System Studies", *IEEE Trans. On Power System*, Vol. 11, No. 4, pp. 1937-1943, Nov. 1996.

[30] R.T. Marler, J.S. Arora, Survey of multi-objective optimization methods for engineering, Published online 23 March 2004, Springer-Verlag 2004

[31] V. Pareto, *Manuale di Economica Politica*, Societa Editrice Libreria, 1906, Milan; translated into English by A.S. Schwier as *Manual of Political Economy*, edited by A.S. Schwier and A.N. Page, 1971. New York: A.M. Kelley.

- [32] R.E. Steuer, Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation, and Application, 1989, Malabar: Robert E. Krieger Publishing.
- [33] T.L.Vincent, W.J. Grantham,,: Optimality in Parametric Systems, 1981, New York, John Wiley and Sons.
- [34] K.A. Proos, G.P. Steven, O.M. Querin, Y.M. Xie, Multicriterion evolutionary structural optimization using the weighted and the global criterion methods. AIAA Journal, 2001, Vol. 39, p.p.2006–2012.
- [35] A. Osyczka, An approach to multicriterion optimization problems for engineering design, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1978, Vol. 15, p.p.309–333.
- [36] J. Koski, R. Silvennoinen, Norm methods and partial weighting in multicriterion optimization of structures. International Journal for Numerical Methods In Engineering, 1987, Vol. 24, p.p.1101–1121.
- [37] A.P. Wierzbicki, A methodological approach to comparing parametric characterizations of efficient solutions. In: Fandel,G.; Grauer, M.; Kurzhanski, A.; Wierzbicki, A.P. (eds.) Large-Scale Modeling and Interactive Decision Analysis, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, 1986, No. 273, pp.27–45. Berlin: Springer-Verlag.
- [38] T.W. Athan, P.Y. Papalambros, A note on weighted criteria methods for compromise solutions in multi-objective optimization. Eng. Optim., 1996, Vol. 27, p.p.155–176.
- [39] A. Charnes, W.W. Cooper, R.O. Ferguson, Optimal estimation of executive compensation by linear programming. Management Science, 1955, Vol.1, p.p.138–151.
- [40] C. Romero, M. Tamiz, D.F. Jones, Goal programming, compromise programming and reference point method formulations: linkages and utility interpretations, The Journal of the Operational Research Society, 1998, Vol. 49, p.p.986–991.
- [41] C.-L. Hwang, A.S.M. Masud, Multiple objective decision making, methods and applications: a state-of-the-art survey. In: Beckmann, M.; Kunzi, H.P. (eds.) Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, 1979, No. 164. Berlin: Springer-Verlag.

- [42] Y.Y. Haimes, L.S. Lasdon, D.A. Wismer, On a bicriterion formulation of the problems of integrated system identification and system optimization. IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics, 1971, SMC-1, p.p.296–297.
- [43] P. Ruiz-Canales, A. Rufian-Lizana, A characterization of weakly efficient points, Mathematical Programming, 1995, Vol. 68, p.p.205–212.
- [44] A. Messac, Physical programming: effective optimization for computational design. AIAA Journal, 1996, Vol. 34, p.p.149–158.
- [45] A. Messac, C. Puemi-Sukam, E. Melachrinoudis, Mathematical and pragmatic perspectives of physical programming. AIAA Journal, 2001, Vol. 39, p.p.885–893.
- [46] I. Das, J.E. Dennis, Normal-boundary intersection: a new method for generating the Pareto surface in nonlinear multicriteria optimization problems. SIAM Journal on Optimization, 1998, Vol. 8, p.p.631–657.
- [47] A. Messac, A. Ismail-Yahaya, C.A. Mattson, The normalized normal constraint method for generating the Pareto frontier. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2003, Vol. 25, p.p.86–98.
- [48] C.-L. Hwang, Y.-J. Lai, T.-Y. Liu, A new approach for multiple objective decision making, Computers & Operations Research, 1993, Vol. 20, p.p.889–899.
- [49] M.P. Bendsoe, N. Olhoff, J.E. Taylor, A variational formulation for multicriteria structural optimization, Journal of Structural Mechanics, 1984, Vol.11, p.p.523–544.
- [50] J. Nash, The bargaining problem. Econometrica, 1950, Vol. 18, p.p.155–162.
- [51] P.D. Straffin, Game Theory and Strategy, 1993 Washington, DC, The Mathematical Association of America.
- [52] S.S. Rao, Game theory approach for multiobjective structural optimization. Computers & Structures, 1987, Vol. 25, p.p.119–127.
- [53] R. Dawkins, The Selfish Gene, 1976, New York, Oxford University Press.
- [54] R. Dawkins, The Blind Watchmaker, 1986, New York, Penguin Books.
- [55] K. Deb, *Genetic Algorithms for Optimization*, KanGAL Report, Indian Institute of Technology, Kanpur, India
- [56] K. Deb, *Single and Multi-objective Optimization Using Evolutionary Computation Genetic Algorithms: NSGA-II*, KanGAL Report Number 2004002, Indian Institute of Technology, Kanpur, India.
- [57] V. Pareto, *Cours D'Economie Politique*, 1896, Volume 1. Lausanne: F. Rouge.

- [58] J.D. Schaffer, Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms. In *Genetic Algorithms and their Applications: Proceedings of the First International Conference on Genetic Algorithms*, pp. 93–100, Hillsdale, NJ, 1985. Lawrence Erlbaum.
- [59] J. Horn, N. Nafpliotis, D.E. Goldberg, A niched pareto genetic algorithm for multiobjective optimization. In *Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation, IEEE World Congress on Computational Intelligence*, volume 1, pp. 82–87, Piscataway, NJ, June 1994. IEEE Service Center.
- [60] C.M. Fonseca, P.J. Fleming, Genetic algorithms for multiobjective optimization: Formulation, discussion and generalization. In Forrest, S (ed), *Proceedings of the Fifth International Conference on Genetic Algorithms*, pp. 416–423, San Mateo, CA, 1993. Morgan Kaufmann Publishers.
- [61] E. Zitzler, L. Thiele, Multiobjective evolutionary algorithms: A comparative case study and the strength pareto approach. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 3(4):257–271, November 1999.
- [62] N. Srinivas, K. Deb, Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms. *Evolutionary Computation*, 2(3):221–248, Fall 1994.
- [63] J. Kennedy, R. Eberhart, Particle Swarm Optimization, Proceedings of the Fourth IEEE International Conference on Neural Networks, Perth, Australia. IEEE Service Center (1995) 1942-1948.
- [64] M. Reyes-Sierra, C.A.C. Coello, Multi-Objective Particle Swarm Optimizers: A Survey of the State-of-the-Art, *International Journal of Computational Intelligence Research*, Vol. 2, No. 3. (2006)
- [65] C.A.C. Coello, M.S. Lechuga, MOPSO: a proposal for multiple objective particle swarm optimization, Proceedings of Congress on Evolutionary Computation (CEC'2002), Vol.2, IEEE Press (2002) 1051-1056.
- [66] A. Savić, P. Stefanov, New Method for Optimal Location and Parameters Setting of UPFC Devices Using Multi-Criteria Optimization, *International Review Of Electrical Engineering – IREE*, 2012, Vol.7, No.4, pp.5051-5060.
- [67] Studija perspektivnog razvoja prenosne mreže Srbije do 2020 (2025) godine, Elektrotehnički institut “Nikola Tesla”, 2007.

- [68] J. K. Kaldellis, D. Zafirakis, The wind energy (r)evolution: A short review of a long history, *Renewable Energy* 36 (2011).
- [69] F. Dincer, Overview of the photovoltaic technology status and perspective in Turkey, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011) 3768–3779.
- [70] A. G. Marinopoulos, M. C. Alexiadis, P. S. Dokopoulos, Energy losses in a distribution line with distributed generation based on stochastic power flow, *Electric Power Systems Research* 81 (2011) 1986– 1994.
- [71] J. V. Paatero, P. D. Lund, Effects of large-scale photovoltaic power integration on electricity distribution networks, *Renewable Energy* 32 (2007) 216–234.
- [72] D. Jakus, R. Goic, J. Krstulovic, The impact of wind power plants on slow voltage variations in distribution networks, *Electric Power Systems Research* 81 (2011) 589–598.
- [73] M. Kenan Dosoglu, A. Ozturk, Investigation of different load changes in wind farm by using FACTS devices, *Advances in Engineering Software* 45 (2012) 292–300.
- [74] D. Ramirez, S. Martinez, F. Blazquez, C. Carrero, Use of STATCOM in wind farms with fixed-speed generators for grid code compliance, *Renewable Energy* 37 (2012) 202-212.
- [75] N. Aouzellag Lahaçani , D. Aouzellag, B. Mendil, Static compensator for maintaining voltage stability of wind farm integration to a distribution network, *Renewable Energy* 35 (2010) 2476 -2482.
- [76] N.A. Lahacani, D. Aouzellag, B. Mendil, Contribution to the improvement of voltage profile in electrical network with wind generator using SVC device, *Renewable Energy* 35 (2010) 243–248.
- [77] M.A. Bhaskar, S.S. Dash, R.M. Joe Jerry, A.M. Tamheed, S.Laksshman, S.Aravindan, Application of Integrated Wind Energy Conversion System (WECS) and Photovoltaic (PV) Solar Farm as STATCOM to Regulate Grid Voltage During Night Time, *Energy Procedia* 14 (2012) 1536 – 1541.

- [78] M. Oshiro, K. Tanaka, A. Uehara, T. Senjyu, Y. Miyazato, A. Yona, T. Funabashi, Optimal voltage control in distribution systems with coordination of distribution installations, *Electrical Power and Energy Systems* 32 (2010) 1125–1134.
- [79] Ž. Đurišić, J. Mikulović, Assessment of the Wind Energy Resource in the South Banat Region, Serbia, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 16 (2012), pp. 3014–3023. ISSN 1364-0321, IF 4.595.
- [80] D. Z. Djurdjevic, Perspectives and assessments of solar PV power engineering in the Republic of Serbia, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011) 2431–2446.
- [81] M. Tešić, F. Kiss, Z. Zavargo, Renewable energy policy in the Republic of Serbia, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011) 752–758.
- [82] E. Firtin, O. Guler, S. A. Akdag, Investigation of wind shear coefficients and their effect on electrical energy generation, *Applied Energy* 88 (2011).
- [83] Ž. Đurišić, J. Mikulović, A model for vertical wind speed data extrapolation for improving wind resource assessment using WAsP, *Renewable Energy* 41 (2012), 407–411.
- [84] A.W. Dahmouni, M.B. Salah, F. Askri, C. Kerkeni, S.B. Nasrallah, Assessment of wind energy potential and optimal electricity generation in Borj-Cedria, Tunisia, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011) 815–820.
- [85] G. M. Masters, *Renewable and Efficient Electric Power Systems*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2004.
- [86] V. Calderaro, G. Conio, V. Galdi, A. Piccolo, Reactive power control for improving voltage profiles: A comparison between two decentralized approaches, *Electric Power Systems Research* 83 (2012) 247–254.

BIOGRAFIJA AUTORA

Aleksandar S. Savić rođen je 23.7.1970. godine u Ljuboviji gde je stekao osnovno obrazovanje. Srednju školu je završio u Srebrenici (Republika Srpska) i tako stekao zvanje tehničara elektrotehnike. Sve razrede osnovne i srednje škole završio je sa odličnim uspehom i sa najvišim ocenama. Elektrotehnički fakultet u Beogradu upisao je 1989. godine i posle odsluženog vojnog roka 1990. godine otpočeo sa studijama. Diplomirao je 1995. godine na Energetskom odseku kao prvi u generaciji sa prosečnom ocenom 9,27 i ocenom 10 na diplomskom ispitu. Od strane Elektrotehničkog fakulteta nagrađen je kao student generacije Energetskog odseka 1995. godine. Postdiplomske studije na profilu Elektroenergetske mreže i sistemi upisao je 1995. godine. Sve predviđene predmete položio je sa visokim ocenama. Magistarsku tezu pod naslovom "Planiranje razvoja distributivnih mreža kombinatornom metodom" odbranio je 16.11.1999. godine i time stekao VII/2 stepen stručne spreme.

Od oktobra 1995. zaposlen je na Elektrotehničkom fakultetu, a 28. novembra iste godine izabran je u zvanje asistenta-pripravnika na Katedri za Elektroenergetske sisteme. Na istoj Katedri dana 12.1.2000. godine izabran je u zvanje asistenta.

U dosadašnjem radu na fakultetu bio je angažovan u nastavi iz predmeta Analiza elektroenergetskih sistema 1 i 2, Planiranje elektroenergetskih sistema, Eksploatacija elektroenergetskih sistema i Praktikum iz Analize elektroenergetskih sistema. Takođe je učestvovao u izvođenju laboratorijskih vežbi iz više predmeta. Pored nastavnih aktivnosti učestvovao je u izradi više studija, elaborata i naučnih projekata. Koautor je jednog udžbenika, jednog rada publikovanog u međunarodnom časopisu, dva rada publikovanih na međunarodnim konferencijama i više radova publikovanih na domaćim konferencijama.

U studentskim anketama za svoj rad u nastavi dobijao je vrlo visoke ocene. Dobitnik je Povelje Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu u znak priznanja i zahvalnosti za neprekidan 15.-godišnji uspešan rad na Fakultetu.

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписани-а Александар С. Савић

број индекса _____

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Избор типа, локације и параметара флексибилних регулационих уређаја
у електроенергетским системима применом вишекритеријумске оптимизације

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

Потпис докторанда

У Београду, 23.4.2013.

A. Savic

Прилог 2.

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

Име и презиме аутора Александар С. Савић

Број индекса _____

Студијски програм _____

Наслов рада Избор типа, локације и параметара флексибилних регулационих уређаја
у електроенергетским системима применом вишекритеријумске оптимизације

Ментор Проф. др Никола Рајаковић, редовни професор

Потписани/а Александар С. Савић

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

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

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

Потпис докторанда

У Београду, 23.4.2013.

A. Sabut

Прилог 3.

Изјава о коришћењу

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

Избор типа, локације и параметара флексибилних регулационих уређаја у електроенергетским системима применом вишекритеријумске оптимизације

која је моје ауторско дело.

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

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

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

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

Потпис докторанда

У Београду, 23.4.2013.

Л. Савић