

Univerzitet Crne Gore
Elektrotehnički fakultet, Podgorica



STEVAN RAKOČEVIĆ

**KOORDINISANA ALOKACIJA I
DIMENZIONISANJE DISTRIBUIRANIH IZVORA
ELEKTRIČNE ENERGIJE I UREĐAJA ZA
FLEKSIBILAN PRENOS ELEKTRIČNE ENERGIJE
U RADIJALNOJ DISTRIBUTIVNOJ MREŽI**

-MASTER RAD-

Podgorica, jun 2022. godine

PODACI I INFORMACIJE O KANDIDATU

Ime i prezime: Stevan Rakočević

Datum i mjesto rođenja: 13.08.1998. godine, Nikšić, Crna Gora

Naziv završenog studijskog programa i godina diplomiranja: Energetika i automatika, 2020. godine

INFORMACIJE O MASTER RADU

Naziv osnovnih studija: Energetika i automatika, smjer Automatika i industrijska elektrotehnika

Naslov master rad: Koordinisana alokacija i dimenzionisanje distribuiranih izvora električne energije i uređaja za fleksibilan prenos električne energije u radijalnoj distributivnoj mreži

Fakultet/Akademija na kojem je rad odbranjen: Elektrotehnički fakultet, Podgorica

UDK, OCJENA I ODBRANA MASTER RADA

Datum prijave master rada: 06.04.2022.

Datum sjednice Vijeća univerzitetske jedinice na kojoj je prihvaćena tema: 26.05.2022.

Komisija za ocjenu teme i podobnosti kandidata:

Prof. dr Saša Mujović

Doc. dr Martin Čalasan

Prof. dr Vladan Vujačić

Mentor: Doc. dr Martin Čalasan

Komisija za ocjenu rada:

Prof. dr Saša Mujović

Doc. dr Martin Čalasan

Prof. dr Vladan Vujačić

Komisija za odbranu rada:

1. Prof. dr Saša Mujović

2. Doc. dr Martin Čalasan

3. Prof. dr Vladan Vujačić

Datum odbrane: _____

Datum promocije: _____

Ime i prezime autora: Stevan Rakočević, BSc

ETIČKA IZJAVA

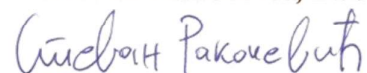
U skladu sa članom 22 Zakona o akademskom integritetu i članom 20 Pravila studiranja na master studijama, pod krivičnom i materijalnom odgovornošću, izjavljujem da je master rad pod naslovom

"Koordinisana alokacija i dimenzionisanje distribuiranih izvora električne energije i uređaja za fleksibilan prenos električne energije u radijalnoj distributivnoj mreži"

moje originalno djelo.

Podnosilac izjave,

Stevan Rakočević, BSc



U Podgorici, dana 06.06.2022. godine

Lista korišćenih skraćenica

AA	Affine Arithmetic
ABC	Artificial Bee Colony
ALGA	Augmented Lagrangian Genetic Algorithm
ALO	Ant Lion Optimization
AML	Algebraic Modeling Language
AMPSO	Adaptive Multi-objective Parallel Seeker Optimization
APSO	Adaptive Particle Swarm Optimization
ASOA	Adaptive Seeker Optimization Algorithm
BOA	Brain-storm Optimization Alogrithm
BPSO	Binary Particle Swarm Optimization
DG	Distributed Generator
ELPSO	Enhanced Leader Particle Swarm Optimization
EPSO	Evoloutionary Particle Swarm Optimization
ET	Evidence Theory
FACTS	Flexible Alternating Current Transmission System
FPA	Flower Pollination Algorithm
GA	Genetic Algorithm
GAMS	General Algebraic Modeling System
GSA	Gravitational Search Algorithm
GSO	Group Search Optimization
HGPSO	Hybrid Genetic Particle Swarm Optimization
MCS	Monte-Carlo Simulation
MINLP	Mixed-Integer None-Linear Programming
MIQCP	Mixed-Integer Qudratic Constrained Programming
MVO	Multi-Verse Optimization
NGHSA	Novel Global Harmony Search Algorithm
NLP	None-Linear Programming
OPF	Optimal Power Flow
PSO	Particle Swarm Optimization
PPSO	Phasor Particle Swarm Optimization
PSOCFA	Phasor Particle Swarm Optimization with Consticted Factor Approach
RVSI	Revamp Voltage Stability Indicator
SFLA	Shaffled Frog Leap Algorithm
SVC	Static VAR Compensator
TCSC	Thyristor-Controlled Series Compensator
THD	Total Harmonic Distortion
TLBO	Teacher-Learninng Based Optimization
UPFC	Unified Power Factor Controller
WOA	Whale Optimization Algorithm

Predgovor

Istraživanje ovog master rada je motivisano nizom problema sa kojima se suočavaju savremene distributivne mreže. Jedan od njih je rapidan porast konzuma koji dovodi do velikog napreznja prenosnih vodova i povećanja gubitaka u prenosu, što posljedično utiče i na smanjenje efikasnosti distributivnih mreža. Pored toga, optimizacija rada distributivnih mreža je neophodna kako bi se smanjila proizvodnja iz konvencionalih elektrana koje kao primarni izvor energije koriste fosilna goriva. Na taj način se doprinosi smanjenju emisije štetnih gasova koji imaju negativan uticaj po životnu sredinu.

Efikasno rješenje prethodno navedenih problema su distribuirani izvori električne energije (distribuirani generatori). Distribuirani generatori predstavljaju decentralizovane proizvodne jedinice, koje se izgrađuju blizu potrošačkih područja, čime se znatno poboljšava efikasnost prenosa električne energije i rasterećuje proizvodnja iz konvencionalnih elektrana. Pošto se za proizvodnju iz distribuiranih generatora najčešće koriste obnovljivi izvori (npr. energija vjetra i sunca) smanjuju se emisije štetnih gasova u atmosferu. Međutim, intermitentan karakter proizvodnje iz obnovljivih izvora može dovesti do fluktuacije snage, a samim tim i pogoršanja naponskih prilika u mreži. Zato je neophodno uz distribuirane generatore implementirati dodatne uređaje, kao što su kompenzatori reaktivne energije, koji omogućavaju kontrolu napona u sabirnicama i povećanje stabilnosti sistema.

U savremenim elektroenergetskim sistemima (ESS) dolazi do sve češće primjene uređaja za fleksibilan prenos električne energije (FACTS). Ovi uređaji predstavljaju kompenzatore reaktivne energije kod kojih se kontrola izlazne reaktivne snage zasniva na kontroli uključivanja energetskih poluprovodničkih komponenti (tiristori, GTO, IGBT, MOSFET, itd). Ipak, potpuni potencijal i distribuiranih generatora i FACTS uređaja se može ostvariti jedino ako se pronađu njihove optimalne lokacije priključivanja na mrežu, kao i optimalne vrijednosti izlazne aktivne i reaktivne snage, respektivno.

Cilj istraživanja ovog rada je pronalaženje metoda za pojedinačno i koordinisano alociranje i dimenzionisanje distribuiranih generatora i FACTS uređaja u radikalnoj distributivnoj mreži. Glavni fokus istraživanja je na pronalaženju optimalne lokacije i snage koja će dovesti do minimalnih gubitaka u prenosu. Takođe, osvrt je napravljen i na analizi pojedinačnog i zbirnog uticaja koji navedeni uređaji imaju na naponske prilike i tokove aktivnih i reaktivnih snaga u distributivnoj mreži. Dodatno, pošto je optimizacioni problem modelovan u softverskom paketu GAMS, i riješen primjenom njegovog ugrađenog BONMIN solvera, ovaj rad teži i da promoviše ovaj softverski paket kao efikasan alat za rješavanje kompleksnih problema u savremenim EES.

Izvod rada

Ovaj rad se bavi rješavanjem problema koordinisanog i optimalnog alociranja i dimenzionisanja distribuiranih generatora (DG) i uređaja za fleksibilan prenos električne energije (FACTS) u radijalnoj distributivnoj mreži. Iz grupe FACTS uređaja razmatraju se statički kompenzatori reaktivne snage (SVC) i tiristorski kontrolisani redni kompenzatori (TCSC). Primarni fokus optimalne alokacije DG i FACTS je minimizacija ukupnih gubitaka u mreži, dok se u analizi rezultata razmatra i uticaj navedenih uređaja na naponske prilike i tokove snaga u mreži.

Optimizacioni problem je modelovan korišćenjem mješovito-cjelobrojnog nelinearnog programiranja (MINLP). Nelinearno programiranje obuhvata formulaciju optimalnih tokova snaga, dok su cjelobrojne promjenjive iskorišćene za pronalaženje optimalnog mjesta priključivanja i optimalne izlazne snage DG i FACTS. Kao okruženje za modelovanje problema odabran je softverski paket GAMS, dok je problem riješen primjenom GAMS-ovog ugrađenog BONMIN solvera.

Simulacija predložene metode izvršena je na IEEE 33-čvornoj testnoj mreži. Razmatrani su slučajevi pojedinačne alokacije DG, SVC i TCSC i koordinisana alokacija DG i navedenih FACTS uređaja. Pored simulacionih rezultata na osnovu broja iteracija, vremena izvršavanja i broja čvorova napravljena je evaluacija numeričkih performansi BONMIN solvera. Dodatno, predloženi BONMIN solver je u slučajevima alokacije DG i koordinacije DG i TCSC upređen sa metaheurističkim i hibridnim algoritmima iz dostupne literature. Poređenje je izvršeno prema kriterijumima minimalne vrijednosti gubitaka i numeričkim performansama metoda.

Sumiranje prezentovanih rezultata dovelo je do zaključka da koordinisana alokacija i dimenzionisanje DG i FACTS doprinosi značajnom smanjivanju gubitaka, pri čemu optimalno priključivanje navedenih uređaja ima pozitivan uticaj na naponske prilike i tokove snaga. Takođe, zaključeno je da je za smanjivanje gubitaka u razmatranoj radijalnoj distributivnoj mreži mnogo efikasnije optimalno koordinisanje DG i TCSC. Rezultati pokazuju da koordinacija DG i FACTS daje značajno bolje rezultate u odnosu na pojedinačnu alokaciju istih. U poređenju sa metaheurističkim i hibridnim algoritmima, predloženi BONMIN solver daje bolje rezultate u pogledu minimalne vrijednosti gubitaka. Što se tiče poređenja sa aspekta numeričkih performansi, uzimajući u obzir manu metaheurističkih metoda da daju različito rješenje nakon svakog pokretanja programa, zaključeno je da je za adekvatno poređenje neophodno znati broj pokretanja programa.

Ključne riječi: BONMIN solver, distribuirani izvori, GAMS, radijalna distributivna mreža, FACTS.

Abstract

This paper addresses the problem of coordinated and optimal allocation and sizing of distributed generators (DG) and flexible alternating current transmission devices (FACTS) in the radial distribution network. Static reactive power compensators (SVCs) and thyristor controlled line compensators (TCSCs) are considered from the group of FACTS devices. The primary focus of the optimal allocation of DG and FACTS is the minimization of total losses in the network, while the analysis of the results also considers the impact of these devices on voltage profile and power flows in the network.

The optimization problem was modeled using mixed-integer nonlinear programming (MINLP). Nonlinear programming involves the formulation of optimal power flows, while integer variables are utilized to find the optimal connection point and the optimal output power of DG and FACTS. The GAMS software package was chosen as the problem modeling environment, while the problem was solved using GAMS's built-in BONMIN solver.

The simulation of the proposed method was performed on an IEEE 33-node test network. Cases of individual allocation of DG, SVC and TCSC and coordinated allocation of DG and listed FACTS devices are considered. In addition to the simulation results based on the number of iterations, execution time and number of nodes, an evaluation of the numerical performance of the BONMIN solver was performed. In addition, the proposed BONMIN solver in the cases of DG allocation and coordination of DG and TCSC has been improved with metaheuristic and hybrid algorithms from the available literature. The comparison was performed according to the criteria of minimum loss value and numerical performance of the method.

Summarizing the presented results led to the conclusion that the coordinated allocation and sizing of DG and FACTS contributes to a significant reduction in losses, while the optimal location of these devices has a positive impact on voltage profile and power flows. Also, it was concluded that optimal coordination of DG and TCSC is much more effective for reducing losses in the addressed radial distribution network. The results show that the coordination of DG and FACTS gives significantly better results in relation to their individual allocation. Compared to metaheuristic and hybrid algorithms, the proposed BONMIN solver gives better results in terms of minimum loss value. Regarding the comparison from the aspect of numerical performance, taking into account the flaw of metaheuristic methods to give a different solution after each program start, it was concluded that for an adequate comparison it is necessary to know the number program runs.

Keywords: BONMIN solver, distributed generation, GAMS, radial distribution network, FACTS.

Veliku zahvalnost dugujem mentoru Doc. dr Martinu Čalasanu za nesebičnu pomoć i vrijeme koje je izdvojio tokom izrade mog master rada. Posebno sam mu zahvalan i na ulozi koju je imao prilikom mog naučno-istraživačkog rada.

Neizmjernu zahvalnost dugujem mojoj porodici za pruženu ljubav i podršku bez koje ne bih bio ovdje.

Stevan Rakočević

Sadržaj

1. Uvod	1
2. Distribuirani izvori električne energije	6
2.1. Definicija i osnovne karakteristike	6
2.2. Tehnologije distribuiranih izvora	7
2.2.1. Fotonaponski paneli	7
2.2.2. Vjetrogeneratori	9
2.2.3. Mikroturbine	10
2.2.4. Gorivne ćelije	11
2.3. Prednosti i nedostaci integracije distribuiranih izvora	12
3. Uređaji za fleksibilan prenos električne energije	14
3.1. Razvoj tehnologije FACTS uređaja	14
3.2. Statički kompenzator reaktivne snage	15
3.2.1. Konfiguracija i princip rada SVC	16
3.2.2. Matematički model SVC	17
3.3. Tiristorski kontrolisan redni kompenzator	18
3.3.1. Konfiguracija i princip rada TCSC	19
3.3.2. Matematički model TCSC	20
3.4. Prednosti i nedostaci integracije FACTS uređaja	21
4. Matematička formulacija problema	23
4.1. Optimalni tokovi snaga	23
4.1.1. Funkcija cilja	24
4.1.2. Ograničenja	24
4.2. Mješovito-cjelobrojno nelinearno programiranje	25
4.2.1. Matematička definicija MINLP	25
4.2.2. Sastavni elementi MINLP algoritama	26
4.3. MINLP formulacija problema optimalne alokacije i dimenzionisanja DG i FACTS	28
5. Softverski paket GAMS	30
5.1. Elementi okruženja GAMS-a	30
5.1.1. Skupovi	31

5.1.2. Podaci	31
5.1.3. Promjenjive	33
5.1.4. Jednačine	33
5.1.5. Iskazi	34
5.1.6. Izlaz	35
5.2. Ugrađeni BONMIN solver	35
5.2.1. Branch-and-bound algoritam	36
6. Simulacioni rezultati	38
6.1. Optimalna alokacija i dimezionisanje DG	38
6.2. Optimalno alociranje i dimezionisanje SVC i TCSC	40
6.3. Koordinisana alokacija i dimezionisanje DG i SVC	42
6.4. Koordinisana alokacija i dimezionisanje DG i TCSC	44
6.5. Numerička analiza BONMIN solvera	46
6.5.1. Poređenje sa metahurističkim i hibridnim algoritmima	48
7. Zaključak	49
Literatura	51
Prilog 1. Osnovni podaci o IEEE 33-čvornoj testnoj mreži	57

1. Uvod

Distributivna mreža predstavlja dio elektroenergetskog sistema koji spaja podsistem prenosa i podsistem potrošača. U odnosu na prenosne mreže, razlikuje se po topologiji i nižem naponskom nivo. Distributivne mreže se najčešće sreću u radijalnoj konfiguraciji, sa predefinisanim smjerom toka snage od distributivnih trafostanica do krajnjih korisnika, a ponekad i u prstenastoj konfiguraciji gdje postoje najmanje dvije putanje snage od trafostanice do krajnjih korisnika. Primarni naponski nivo distributivnih mreža kreće se u opsegu od 0.4 kV do 35 kV, pri čemu su u Crnoj Gori zastupljene distributivne mreže naponskog nivoa 0.4, 10 i 35 kV.

Prvobitno zamišljena infrastruktura distributivnih mreža se sve više mijenja u novijem dobu. Razlog za to predstavlja potreba da se odgovori na aktuelne probleme, kao što su rapidan rast konzuma, koji je neizostavna propratna pojava razvoja društva, i tranzicija ka proizvodnji električne energije iz alternativnih izvora, koja je motivisana štetnim dejstvima i iscrpljivosti fosilnih goriva kao konvencionalnog izvora električne energije. Tehnologije koje se nameću kao rješenje prethodno navedenih problema su distribuirani izvori električne energije (distribuirani generatori, eng. *Distributed Generation* - DG). Razvoj ovih decentralizovanih proizvodnih jedinica omogućio je proizvodnju električne energije u blizini ili neposrednoj lokaciji konzuma, što doprinosi smanjivanju gubitaka snage i efikasnijem prenosu električne energije do krajnjih korisnika. Dodatno, ove proizvodne jedinice su malih nazivnih snaga i najčešće proizvode električnu energiju iz obnovljivih izvora, što ih čini jeftinijim za izvođenje i pogodnijim za zaštitu životne sredine u odnosu na konvencionalne elektrane velikih nazivnih snaga.

Međutim, interminentni karakter proizvodnje iz obnovljivih izvora električne energije može dovesti do problema, pogotovo sa aspekta regulacije napona u mreži. Stoga su neophodni dodatni uređaji za optimizaciju rada, naročito u mrežama sa visokim stepenom penetracije obnovljivih izvora. Jedan od načina za unapređivanje performansi ovakvih mreža je implementacije uređaja za kompenzaciju reaktivne snage. Ovi uređaji direktno kontrolišu tokove reaktivne snage u prenosnim vodovima, čime se ostvaruje mogućnost regulacije napona što dovodi do stabilnijih naponskih prilika u mreži i doprinosi sveobuhvatno efikasnijem prenosu električne energije kroz smanjivanje gubitaka i povećanjem kapaciteta prenosnih vodova. Konvencionalni kompenzatori obuhvataju uređaje kao što su baterije kondenzatora, sinhroni kompenzatori i regulacioni transformatori, dok je razvoj energetskih poluprovodničkih komponenti doveo do šire primjene uređaja za fleksibilan prenos električne energije (eng. *Flexible Alternating Current Transmission System* - FACTS), kao što su statički kompenzator, tiristorski kontrolisan redni kompenzator, statički sinhroni kompenzator i kompenzator za popravku faktora snage.

Kako bi benefiti prethodno navedenih uređaja bili vidljivi neophodno je pronaći njihovo optimalno mjesto priključivanja i optimalno ih dimenzionisati sa aspekta izlazne snage. Haotično i neplansko priključivanje neće imati zanačajan uticaj na poboljšanje performansi mreže. Štaviše, u nekim slučajevima može doći i do pogoršanja trenutnog stanja sistema. Stoga je oblast razvijanja metoda za optimalno alociranje i dimenzionisanja uređaja kao što su DG i FACTS stekla veliku popularnost i nalazi se u fokusu naučne javnosti.

Optimalno lociranje obnovljivih DG sa ciljem minimizacije totalne harmonijske distorzije (THD), gubitaka snage i ukupne cijene električne energije proizvedne iz ovih jedinica predstavljeno je u [1] gdje je problem riješen korišćenjem *Particle Swarm Optimization* (PSO) algoritma. PSO algoritam je takođe predložen za lociranje DG u radijalnoj distributivnoj mreži, sa ciljem smanjivanja gubitaka snage, od strane autora u [2]. *Phasor PSO* (PPSO) algoritam je predložen od strane autora u [3], gdje je cilj alokacije DG bio smanjivanje gubitaka i poboljšanje naponskih prilika u mreži. Poboljšanje globalne opteretivosti distributivne mreže postignuto je optimalnim lociranjem DG korišćenjem PSO algoritma sa restriktivnim faktorom (PSOCFA) u [4]. U [5] autori se bave alokacijom različitih tipova DG korišćenjem *Bracktracking Search Optimization algoritma* (BSOA), pri čemu je cilj minimizacija gubitaka snage i devijacije napona. Cost-optimizacija mikromreže u dvije faze, kroz implementaciju DG, izvršena je korišćenjem *Group Search Optimization* (GSO) algoritma u [6]. Modifikovna verzija ovoga algoritma, pod nazivom *Dominated GSO* (DGSO), iskorišćena je za pronalaženje optimalnih lokacija DG u [7], čime se postižu bolje karakteristike na strani potrošača. Poboljšanje performansi sistema postignuto je optimalnim lociranjem DG u [8] gdje su autori koristili *Ant Lion Optimization algoritam* (ALOA), dok su mogućnosti predložene metode testirane na različitim distributivnim mrežama. U [9] problem optimalne alokacije obnovljivih DG sa ciljem minimizacije gubitaka snage u radijalnoj distributivnoj mreži modelovan je kao *Nonlinear Mixed-integer constrained problem*, a zatim riješen upotrebom *Augmented Lagrangian Genetic algoritma* (ALGA). Sličan problem je riješen u [10] primjenom skoro razvijenog *Multi-Verse Optimization* (MVO) algoritma. *Multi-objective interval decision making* i *Bi-layer optimization method*, koje su bazirane na *D-S evidance teoriji* (ET) i *Genetic algoritmu* (GA), autori su primijenili u [11] za traženje optimalne lokacije DG, uzimajući u obzir nesigurnosti u mreži koje su modelovane korišćenjem *Affine Arithmetic* (AA) pristupa. Alokacija obnovljivih DG sa ciljem minimizacije gubitaka i ukupnih troškova priključivanja ovih uređaja, predstavljeno je u [12] gdje autori kao rješenje predlažu paralelno korišćenje *Monte-Carlo simulacije* (MCS) i *Non-Dominated Sorting Genetic algoritma* tipa dva (NGSA-II) realizovanom u programskom okviru *Open CL*. MCS je takođe predložen u [13], gdje se autori bave planiranjem inteligentne distributivne mreže kroz optimalno lociranje DG na bazi solarne, vjetro i energije talasa. U [14] predstavljena je upotreba *Hybrid Genetic Particle Swarm Optimization* (HGPSO) pri traženju optimalnog mjesta priključivanja, proizvodnog kapaciteta i ukupnog broja DG jedinica. Kombinacija *Binary PSO* i *Shuffled Frog Leap algoritma* (BPSO-SLFA) iskorišćena je za rješavanje problema koordinisanog lociranja DG i rekonfiguracije mreže u [15]. *Hibridni GA-PSO algoritam* iskorišćen je u [16], dok je *Shuffled Bat algoritam* (Sh-BAT) primjenjen u [17]. Pronalaženje optimalnog mjesta priključivanja DG uzimajući u obzir različite slučajeve stanja konzuma, autori su postigli korišćenjem hibridnog *Parameter Improved PSO – sequential quadratic programming* (PIPSO-SQP) algoritma u [18]. Optimalno lociranje DG i baterija kondenzatora primjenom hibridnog *Harmony Search algoritma* i *Particle Artificial Bee Colony* (HSA-PABC) sa ciljem smanjivanja gubitaka predstavljeno je od strane autora u [19].

Pregled primjene PSO algoritma za optimalno lociranje FACTS uređaja u prenosnoj mreži, predstavljen je od strane autora u [20]. PSO je iskorišćen i u [21, 22] za alokaciju i podešavanje parametara SVC i TCSC, s ciljem postizanja željenog prigušenje oscilacija u sistemu i kontrole tokova reaktivnih snaga, respektivno. Sličan problem je riješen u [23] primjenom modifikacije PSO algoritma, pod nazivom *Non-dominated Sorting PSO* (NSPSO), gdje je pokazano da FACTS uređaji doprinose boljoj statičkoj stabilnosti napona, manjoj devijaciji napona i gubicima snage. Distribuirani TCSC optimalno su pozicionirani sa ciljem regulisanja zagušenja u prenosnim vodovima korišćenjem *Enhanced Leader PSO* (ELPSO) u [24]. Alokacija SVC sa ciljem poboljšanja naponskih prilika u mreži sa visokim stepenom penetracije solarnih panela i vjetrogeneratora izvršeno je u [25] primjenom GA, dok je isti problem riješen u [26] primjenom BPSO algoritma, pri čemu su u ovom referatu autori

razmatrali mrežu koja sadrži isključivo solarne generatore. GA se predlaže od strane autora u [27] za alokaciju SVC sa ciljem koordinisanog smanjivanja gubitaka i poboljšanja naponskih prilika, dok je grafički interfejs baziran na ovom algoritmu iskorišćen za analizu uticaja različitih tipova FACTS uređaja na opteretivost mreže u [28]. Optimalno lociranje SVC, TCSC i UPFC, sa ciljem smanjivanja gubitaka i troškova rada ovih uređaja, izvršeno je u [29] primjenom *Whale Optimization algoritma* (WOA). Konvencionalni Njutn-Rapsonov metod predložen je od strane autora u [30, 31], pri čemu je u oba referata cilj bio pronalaženje mjesta priključivanja SVC koje će dovesti do poboljšanja naponskih prilika u mreži. U [32] SVC je lociran sa ciljem smanjivanja gubitaka snage u mreži sa vjetrogeneratorskim jedinicama, korišćenjem GAMS-ovog CONOPT solvera. Optimalna alokacija SVC, uzimajući u obzir različite nivoe potrošnje, autori su modelovali kao *Mixed-Integer Non-Linear Programming* (MINLP) problem, a zatim ga riješili primjenom *Branch-and-Bound* (B&B) algoritma u [33]. Više-ciljna alokacija SVC i TCSC primjenom *Brainstrom Optimization algoritma* (BOA) predstavljena je u [34]. GSA je primjenjen u [35, 36] za optimalno lociranje SVC i TCSC sa ciljem smanjivanja gubitaka snage i TCSC u deregulisanom sistemu, respektivno. U [37] optimalna mjesta priključivanja paralelnih kompenzatora, SVC i STATCOM, dobijena su primjenom *Novel Global Harmony Search algoritma* (NGHSA). *Adaptive Seeker Optimization algoritam* (ASOA) primjenjen je u [38] za smanjivanje gubitaka aktivne i reaktivne snage i poboljšanje naponskih prilika, kroz optimalnu alokaciju TCSC, dok isti autori prelažu primjenu *Adaptive Multiobjective Parallel Seeker Optimization* (AMPSO) algoritma za lociranje TCSC sa ciljem smanjivanja troškova proizvodnje električne energije u [39]. Povećanje kapaciteta prenosnih vodova, kroz alokaciju TCSC primjenom *Flower Pollination algoritma* (FPA), predstavljeno je u [40]. U [41] napravljeno je poređenje *Teacher-Learning Based Optimization* (TLBO), *Artificial Bee Colony* (ABC) i PSO algoritama za rješavanje problema optimalnog lociranja TCSC. Koordinacija TCSC i transformatora za zakretanje faze, u prisustvu vjetrogeneratora, primjenom *Bi-level optimizacije* predstavljeno je u [42]. Optimalno mjesto priključivanje SVC i TCSC određeno je primjenom tri algoritma - PSO, *Adaptive PSO* (APSO) i EPSO u [43], dok autori u [44] za rješavanje istog problema predlažu *Mixed-Integer Quadratic Constrained Programming* (MIQCP) metod. *Mult-Objective TLBO* (MOTLBO) algoritam iskorišćen je za koordinaciju SVC i TCSC u mreži sa vjetrogeneratorima, pritom uzimajući u obzir veliki broj nesigurnosti, od strane autora u [45]. Sveobuhvatan pregled problema iz oblasti optimalnog lociranja FACTS uređaja, kao i različitih algoritama koji se koriste za njihovo reješavanje predstavljeni su u [46].

Određeni broj autora predlaže koordinaciju DG i FACTS, radi poboljšanja performansi distributivnih mreža. U [47] autori su napravili pregled radova iz navedene oblasti, odakle se može vidjeti da se najčešće predlaže koordinacija DG jedinica i STATCOM uređaja u IEEE 33-čvornoj mreži. ALOA je primjenjen za koordinisanu alokaciju DG i TCSC sa ciljem minimizacije gubitaka u [48]. Metod pod nazivom *Revamp Voltage Stability Indicator* (RVSI) iskorišćen je za koordinaciju DG i SVC u [49], pri čemu je za rješavanje optimalnih tokova snaga iskorišćen softver *Electrical Transient Analyzer Program* (ETAP). Autori u [50] bavili su se optimalnom koordinacijom DG i TCSC, sa ciljem smanjivanja gubitaka snage, primjenom BSA i GA. U [51] koordinacija DG i FACTS sa ciljem smanjivanja cijene gubitaka snage, kao i cijene ugradnje DG i FACTS uređaja izvršena je primjenom *Tabu search algoritma*, pri čemu su njegove performanse testirane na mreži koja sadrži 300 čvorova.

Iz predstavljenog pregleda literature mogu se izvući sljedeći zaključci:

- Autori najčešće predlažu upotrebu metaheurističkih algoritama, kao i hibridnih metoda, za rješavanje problema optimalne pojedinačne ili koordinisane alokacije DG i FACTS,

- Veliki broj radova iz oblasti lociranja DG sa ciljem smanjivanja gubitaka snage razmatra radijalne distributivne mreže, dok se sa druge strane može primjetiti da autori rijetko razmatraju problem optimalne alokacije SVC i TCSC u istim,
- Dodatno, iako je problem koordinacije DG i STATCOM u radijalnoj distributivnoj popularan u dostupnoj literaturi, autori rijetko razmatraju koordinisanu alokaciju DG i SVC, odnosno DG i TCSC.

Predmet istraživanja ovog rada je razvoj metoda za pojedinačnu i koordinisanu alokaciju i dimenzionisanje DG i FACTS uređaja u radijalnoj distributivnoj mreži. Iz grupe FACTS uređaja razmatraju se SVC i TCSC. Glavni cilj priključivanja prethodno navedenih uređaja je smanjivanje ukupnih gubitaka aktivne snage u distributivnoj mreži. Međutim, osim toga, u radu se analizira uticaj ovih uređaja na naponske prilike u sabirnicama, kao i na kapacitet vodova sa aspekta prenosa aktivne i reaktivne snage. Model optimizacionog problema formulisan je korišćenjem MINLP u softverskom paketu GAMS, dok je za rješavanje istog predložen GAMS-ov ugrađeni BONMIN solver.

Rezultati simulacije dobijeni su na IEEE 33-čvornoj radijalnoj testnoj mreži gdje su razmatrani slučajevi pojedinačne alokacije DG, SVC i TCSC, kao i koordinisane alokacije istih. Takođe, biće predstavljena numerička analiza performansi BONMIN solvera. Performanse predložene metode ocjenjene su na osnovu tri parametra: broj iteracija, vrijeme izvršavanja i broj čvorova. U slučaju optimalne alokacije DG rezultati dobijeni predloženim BONMIN solverom se porede sa rezultatima dobijenim sljedećim metaheurističkim i hibridnim metodama: PSO [3], PPSO [3], PSOCFA [4], BSOA [5], ALOA [8], PIPSO-SQP [18], HSA-PABC [19], ALGA [10] i Sh-BAT [17], dok se za slučaj optimalne koordinacije DG i TCSC dobijeni rezultati porede sa: GA [50], BSA [50] i ALOA [48]. Poređenje predložene i literaturnih metoda izvršeno je prema kriterijumu minimalnih gubitaka i numeričkih performansi.

Ovaj rad se sastoji od sedam Poglavlja, Literature i jednog Priloga:

- U drugom poglavlju izloženi su osnovni pojmovi vezani za DG. Napravljen je pregled postojećih tehnologija distribuirane proizvodnje, sa akcentom na fotonaponske panele, vjetrogeneratore, mikroturbine i gorivne ćelije, kao najpopularnijim predstavnicima DG u savremenim distributivnim mrežama. Takođe, osvrt je napravljen i na prednosti i nedostatke integracije DG u savremenim distributivnim ESS.
- U trećem poglavlju definisan je pojam FACTS uređaja kao i istorijat razvoja ove tehnologije. Dalje, izložene su zamjenske šeme, principi rada, radne karakteristike i matematički modeli SVC i TCSC. Na kraju poglavlja predstavljene su prednosti i nedostaci integracije FACTS uređaja u distributivnim EES.
- U četvrtom poglavlju izložena je matematička formulacija problema optimalne alokacije i dimenzionisanja DG i FACTS. Predstavljena je matematička definicija optimalnih tokova snaga, na kojima se zasniva osnovni matematički proračun problema. Osvrt je napravljen na MINLP i osnovne karakteristike MINLP algoritama, nakon čega je prezentovan predloženi postupak MINLP formulacije problema.
- U petom poglavlju opisani su osnovni elementi GAMS-ovog okruženja. Takođe, date su osnovne karakteristike BONMIN solvera integrisanog u GAMS-u i izložen pseudo kod algoritma.
- U šestom poglavlju izloženi su rezultati brojnih proračuna tj. simulacija optimalne lokacije FACTS i DG u distributivnim EES. Nakon analize rezultata dobijenih predloženim BONMIN solverom napravljena je numerička evaluacija njegovih performansi. Takođe, u ovom poglavlju napravljeno je poređenje između predložene metode i metaheurističkih i hibridnih algoritama.

- U sedmom poglavlju dat je zaključak, nakon čega je izložen popis korišćene literature. U prilogu 1 date su osnovni podaci o IEEE 33-čvornoj testnoj mreži.

2. Distribuirani izvori električne energije

Tradicionalni elektroenergetski sistemi (ESS) su konfigurisani tako da se električna energija proizvodi u elektranama velikih instalisanih snaga, nagon čega se posredstvom prenosne mreže ista transportuje do distributivnog sistema. Prema tome, tradicionalna distributivna mreža je pasivna i ima za zadatak da preraspodjeli i dostavi energiju do krajnjih korisnika, pri čemu je smjer toka energije u najvećem broju slučajeva jasno definisan - od distributivne trafostanice prema konzumu. Međutim, današnje vrijeme svjedoči tranziciji proizvodnje energije iz konvencionalnih elektrana na proizvodnju iz distribuiranih izvora, pri čemu su dominantne tehnologije zasnovane na obnovljivoj energiji, konkretno na upotrebi fotonaponskih panela i vjetrogeneratora [52]. Pošto se distribuirani izvori priključuju u blizini potrošačkih centara jasno je da njihova integracija značajno mijenja i usložnjava infrastrukturu savremene distributivne mreže. Ona postaje aktivan podsistem ESS-a, koji pored samih distribuiranih generatora, sačinjavaju moduli energetske elektronike za priključivanje i kontrolu distribuiranih izvora, kao i uređaji za skladištenje električne energije i kompenzaciju reaktivne energije, koji značajno poboljšavaju performanse mreža sa integrisanim distribuiranim izvorima.

Ovo poglavlje je posvećeno definisanju pojma distribuiranih izvora, izlaganju osnovnih karakteristika, prednosti i nedostataka primjene distribuiranih izvora električne energije. Takođe, napravljen je osvrt na osnovne tehnologije distribuiranih izvora, sa akcentom na one izvore koji nalaze najveću primjenu u savremenim distributivnim sistemima.

2.1. Definicija i osnovne karakteristike

Distribuirani izvori električne energije predstavljaju decentralizovane proizvodne jedinice koje su direktno priključene na distributivnu mrežu [52-54]. Mjesto priključivanja izvora varira te može biti na samoj strani konzuma ili u njegovoj neposrednoj blizini. Prilikom definisanje ove tehnologije proizvodnje, ravnopravno sa pojmom distribuirani izvori koriste se i pojmovi: distribuirani generatori, decentralizovana proizvodnja ili ugrađena (eng. *embedded*) proizvodnja. Bitno je napomenuti da je česta greška prilikom definisanja distribuiranih izvora njihovo ekvivalentiranje sa obnovljivim izvorima električne energije. Iako se rad najpopularnijih distribuiranih izvora bazira na energiji sunca i vjetra, postoji niz drugih tehnologija koje se zasnivaju na konverziji električne energije iz ostalih, konvencionalnih ili nekonvencionalnih izvora.

Pored činjenice da se direktno priključuju na distributivnu mrežu, primarne karakteristike koje razdvajaju distribuirane izvore od centralizovanih proizvodnih jedinica su naponski nivo i instalisana snaga. Najčešći naponski nivoi distribuiranih izvora su: 10, 20 i 35 kV, dok postoje i izvori koji se mogu direktno priključiti i na 0.4 kV mrežu. Što se tiče instalisane snage distribuiranih izvora, konkretan opseg snage koji svrstava izvor u distribuirani nije jednoznačno definisan [52]. Na primjer, *Elektroenergetski istraživački institut (Electric Power Research Institute - EPRI)* definiše da se snaga distribuiranih izvora kreće u opsegu od 1 kW do 50 MW. Sa druge strane, *Međunarodni savjet za velike električne mašine (CIGRE)*, definiše distribuirani izvor kao proizvodnu jedinicu izlazne snage u opsegu od 50 kW do 100 MW. Bez

obzira na različite definicije od strane relevantnih institucija, može se reći da se prema kriterijumu izlazne snage, distribuirani izvori dijele u četiri primarne kategorije [52-53]:

- *mikro izvori*: snage 1 W – 5 kW,
- *mali izvori*: snage 5 kW – 5 MW,
- *srednji izvori*: snage 5 MW – 50 MW i
- *veliki izvori*: snage veće od 50 MW.

2.2. Tehnologije distribuiranih izvora

U praksi se primjenjuju različite tehnologije distribuiranih izvora. Najčešća podjela distribuiranih izvora je prema tipu primarnog izvora koji se koristi za dobijanje električne energije [53]:

1. *sistemi na bazi fosilnih goriva*: gasne mikroturbine i dizel/gasni recipročni motori,
2. *sistemi na bazi elektrohemijskih reakcija*: gorivne ćelije,
3. *sistemi na bazi obnovljivih izvora*: fotonaponski paneli, vjetrogeneratori, male hidroelektrane, elektrane na biomasu i geotermalnu energiju.

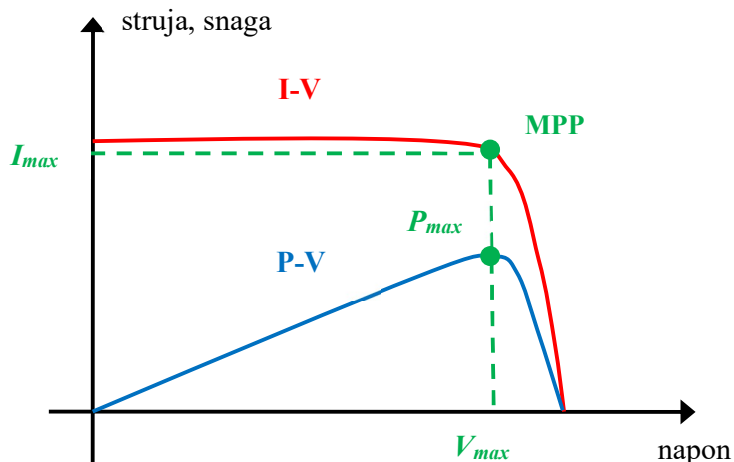
Iako je podjela prema primarnom izvoru energije najznačajnija, tehnologije distribuiranih izvora se razlikuju i prema tome da li se za konverziju u električnu energiju koriste obrtne električne mašine (sinhrone ili asinhrone) ili uređaji bez obrtnih djelova (fotonaponski paneli, gorivne ćelije). Takođe, različitost tehnologije ogleda se i u tome da li se za priključivanje na mrežu koriste uređaji energetske elektronike (DC-DC konvertori, invertori, itd.)

U nastavku poglavlja, biće izloženi osnovni podaci o fotonaponskim panelima, vjetrogeneratorima, mikroturbinama i gorivnim ćelijama, kao najčešće implementiranim tehnologijama distribuiranih izvora električne energije.

2.2.1. Fotonaponski paneli

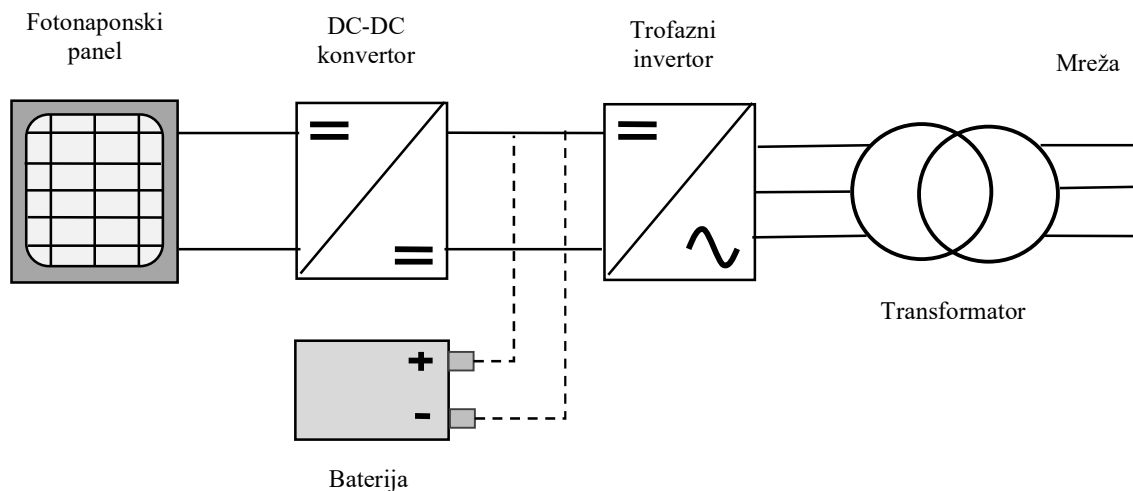
Fotonaponski panel se sastoji od velikog broja redno i paralelno povezanih fotonaponskih ćelija. Svaka ćelija je napravljena od poluprovodničkog materijala (najčešće silicijuma) koja u kontaktu sa fotonima iz sunčeve svjetlosti na svom izlazu daje jednosmjerni napon, shodno principu fotoelektričnog efekta. Kao i ćelije, fotonaponski paneli mogu biti vezani redno i paralelno sa ciljem povećanja izlazne struje i napona, respektivno.

Svaki fotonaponski panel se opisuje sa strujno-naponskom ($I-V$) karakteristikom [54]. Izgled $I-V$ karakteristike proizvoljnog panela prikazan je na slici 2.2.1.1. Oblik ove karakteristike zavisi od više faktora: broja fotonaponskih ćelija/panela, sunčeve insolacije, temperature panela, poluprovodničkih karakteristika ćelija, itd. Najvažnija tačka na $I-V$ karakteristici sa aspekta eksploatacije fotonaponskih panela jeste tačka maksimalne snage (eng. *Maximum Power Point* - MPP). U ovoj tački proizvod napona i struje, odnosno snaga, je maksimalna. Ako se u toku eksploatacije, radna tačka panela poklopi sa MPP, to znači da se za konkretne uslove rada postiže maksimalna iskorišćenost panela. Pored $I-V$, za opisivanje panela koristi se i snaga-napon ($P-V$) karakteristika, čiji je izgled za proizvoljni panel prikazan na slici 2.2.1.1 [54].



Slika 2.2.1.1. I-V i P-V karakteristike fotonaponskog panela.

Fotonaponski paneli se u distributivnim mrežama mogu naći u dvije varijante: priključeni na mrežu (eng. *on-grid*) ili samostalni (eng. *standalone*) [54]. Opšta konfiguracija *on-grid* fotonaponskih sistema prikazana je na slici 2.2.1.2. Kao što se može primjetiti, panel se na mrežu priključuje pomoću DC-DC konvertora (čopera) i trofaznog invertora. Uloga DC-DC konvertora je da prilagodi vrijednost jednosmjernog napona panela, dok je zadatak invertora da DC napon čopera pretvori u naizmjenični, trofazni napon, kako bi se omogućilo priključivanje panela na distributivnu mrežu. Transformator na izlazu iz invertora služi da podigne ili snizi naponski nivo u zavisnosti od zahtjeva distributivnog sistema. Takođe, na samom izlazu iz čopera, neki *on-grid* fotonaponski sistemi sadrže i bateriju za skadištenje električne energije. Pored prikazane konfiguracije postoji niz drugih *on-grid* fotonaponskih sistema [55].



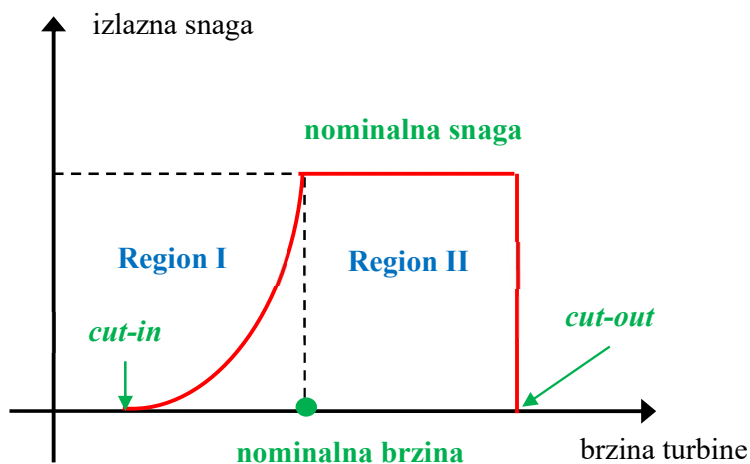
Slika 2.2.1.2. Konfiguracija *on-grid* fotonaponskog sistema.

Što se tiče *standalone* fotonaponskih sistema, za razliku od *on-grid* sistema, oni se ne priključuju na mrežu već zasebno napajaju potrošače kao što su: akumulatorske baterije, električni motori i pumpe, ili u nekim slučajevima poslovne i stambene objekte. Konfiguracija ovih sistema je skoro identična onoj prikazanoj na slici 2.2.1.2, pri čemu se u slučaju napajanja čisto DC potrošača, trofazni invertor i transformator mogu u potpunosti izostaviti.

2.2.2. Vjetrogeneratori

Vjetrogeneratori predstavljaju sisteme za konverziju kinetičke energije vjetra u električnu energiju. Centralne komponente vjetrogeneratorskog sistema su: vjetroturbina, mehanički prenosnik i električni generator [54]. Uloga vjetro turbine je da konvertuje kinetičku energiju vjetra u mehaničku, nakon čega se brzina obrtanja osovine podešava mehaničkim prenosnikom. Na kraju se podsredstvom generatora mehanička energija pretvara u električnu i predaje mreži.

Sa aspekta eksploatacije vjetrogeneratora od velikog značaja je zavisnost izlazne snage od brzine obrtanja turbine [54]. Izgled navedene karakteristike prikazan je na slici 2.2.2.1. Kao što se može vidjeti, karakteristika je podjeljena na dva regiona. *Region I* je region za brzine turbine ispod nominalne vrijednosti, pri čemu u ovom regionu izlazna snaga eksponencijalno raste sa povećanjem brzine. Jako bitna tačka ovog regiona je *cut-in* brzina, odnosno minimalna radna brzina vjetroturbine. Za brzine ispod *cut-in* vrijednosti, turbina je zakočena, a razlog je nefikasnost u konverziji kinetičke energije vjetra u električnu energiju. *Region II* je region konstantne nominalne snage i važi za vrijednosti brzine od nominalne do *cut-out* brzine. *Cut-out* brzina je maksimalna vrijednost radne brzine vjetrogeneratora. Za sve brzine veće od ove vrijednosti turbina je zakočena kako bi se spriječilo razlijetanje vjetrogeneratorskog sistema.

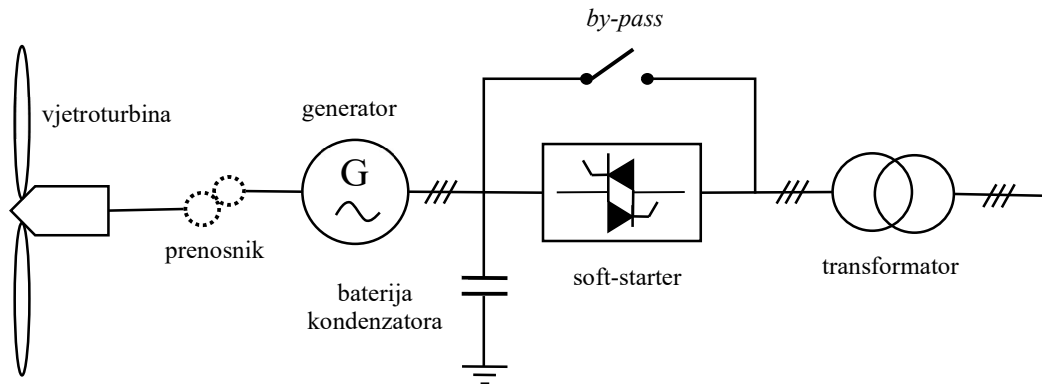


Slika 2.2.2.1. Izlazna snaga vjetrogeneratora u zavisnosti od brzine turbine.

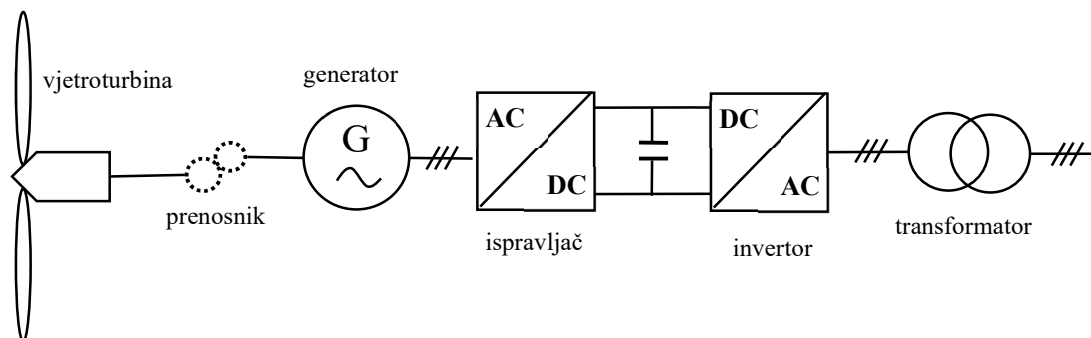
Postoji više različitih konfiguracija vjetrogeneratorskih sistema, pri čemu se one mogu svrstati u dvije kategorije - konfiguracije za fiksne brzine vjetra i konfiguracije za promjenjive brzine vjetra [56]. Na slici 2.2.2.2. prikazan je najčešće korišćen tip konfiguracije za fiksne brzine vjetra, u literaturi poznat kao Danski tip vjetroturbine. U okviru ove konfiguracije, kao generator se koristi kavezna asinhrona mašina, koja se preko transformatora direktno spaja na mrežu. U početku kavezna mašina radi kao motor, pri čemu se njeno zalijetanje vrši pomoću *soft-startera*. Sljedeći korak je kratkospajanje pomoću *by-pass* prekidača, nakon čega mašina prelazi u generatorski režim rada. Ova konfiguracija zahtjeva kompenzaciju reaktivne energije, za šta se koristi baterija kondenzatora priključena na izvode generatora.

Kod konfiguracija za promjenjivu brzinu vjetra, turbina se reguliše sa promjenom brzine vjetra tako da se postigne maksimalna snaga [56]. Primjer ovakve konfiguracije prikazan je na slici 2.2.2.3. Mašina koja se koristi kao generator može biti prosta sinhrona mašina ili sinhrona mašina sa permanentnim magnetima, dok se u nekim slučajevima kao generator koristi i kavezna asinhrona mašina. Ovakva konfiguracija zahtjeva prisustvo dva konvertora: ispravljača i invertora. Pošto pri promjeni brzine vjetra dolazi do promjene učestanosti napona mašine,

jasno je da on neće odgovarati nazivnoj učestanosti mreže. Stoga se generisani napon prvo pod sredstvom ispravljača pretvara u jednosmjerni, a zatim inverterom ponovo u naizmjenični gdje mu se podešava vrijednost učestanosti. U ovom slučaju nijesu potrebni dodatni kompenzatori reaktivne energije, već kompenzaciju preuzima sami konvertor.



Slika 2.2.2.2. Vjetrogeneratorski sistem za fiksne brzine vjetra.



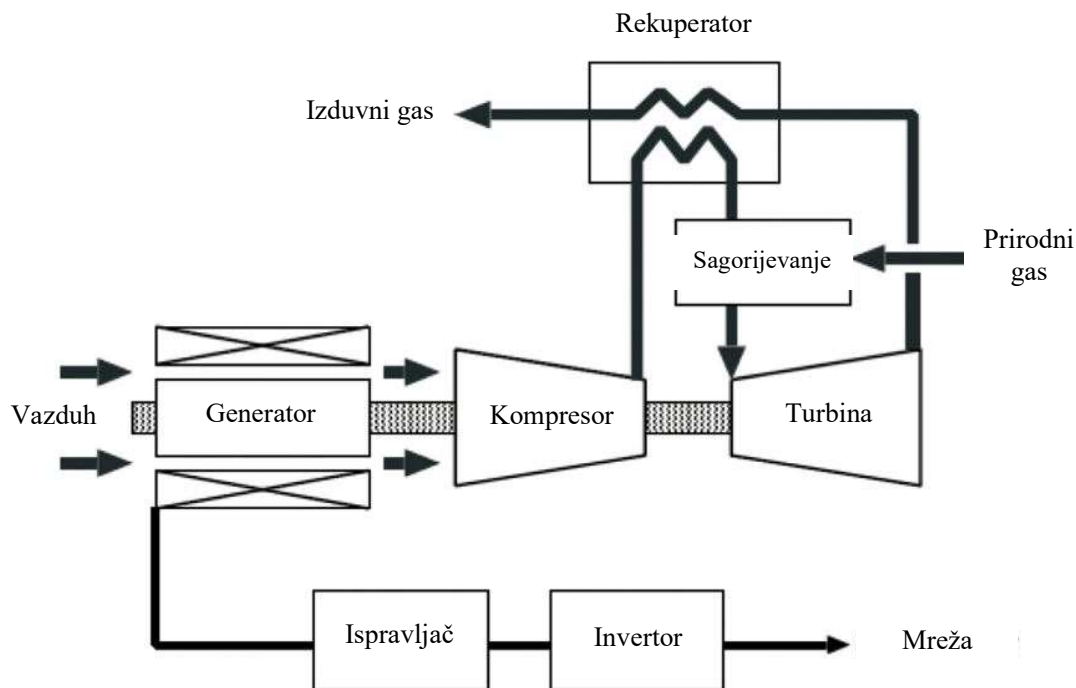
Slika 2.2.2.3. Vjetrogeneratorski sistem za promjenjive brzine vjetra.

2.2.3. Mikroturbine

Gasne mikroturbine spadaju u grupu distribuiranih izvora čija se proizvodnja zasniva na upotrebi fosilnih goriva. Za pogon generatora koristi se gasna turbina, pri čemu se kao gorivo u procesu sagorijevanja koristi prirodni gas. Ovo značajno smanjuje nivo štetnih materija koje se generišu prilikom proizvodnje, što čini ovu tehnologiju prihvatljivijom po životnu sredinu. Mikroturbine se pokazuju kao siguran i dosta jeftin izvor napajanja, koji najčešću primjenu nalazi u rezervnom napajanju objekata, kao što su bolnice, supermarketi, hoteli, itd [53]. Takođe, sama konfiguracija ovih sistema nudi mogućnost simultane proizvodnje električne i toplotne energije.

Na slici 2.2.3.1 prikazani su sastavni elementi mikroturbinskog sistema [57]. Princip rada ovog sistema je sljedeći. Kompresor uzima vazduh iz okoline nakon čega na izlazu daje vazduh pod pritiskom. Povećavanje temperature vazduha pod pritiskom vrši se pomoću izduvniha gasova turbine u rekuperatoru. Zagrijani vazduh pod pritiskom se dalje miješa sa prirodnim gasom nakon čega nastupa proces sagorijevanja. Gasovi sagorijevanja pokreću lopatice gasne turbine, te se energija gasa pretvara u kinetičku. Shodno konfiguraciji sa slike 2.2.3.1, turbina služi za pogon generatora i kompresora. Pošto učestanost napona generatora ne odgovara

nominalnoj učestanosti sistema, koristi se energetske konverter (ispravljač i inverter) za podešavanje učestanosti napona prije priključivanja na mrežu.



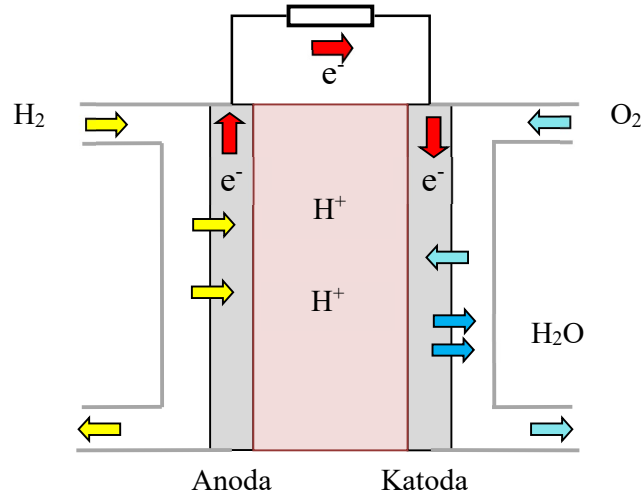
Slika 2.2.3.1. Konfiguracija mikroturbinskog sistema.

2.2.4. Gorivne ćelije

Gorivne ćelije služe za direktnu konverziju hemijske energije u električnu i toplotnu energiju. Suštinski, slično električnim baterijama, gorivne ćelije koriste elektrohemijску reakciju između vodonika i kiseonika za generisanje DC napona na svom izlazu [53]. Bitna razlika u odnosu na električne baterije je što gorivne ćelije zahtjevaju neprekidan izvor kiseonika i vodonika kako bi održavale hemijsku reakciju.

Sastavni dio svake gorivne ćelije su anoda i katoda, između kojih se nalazi sloj elektrolita. Postoje različiti tipovi gorivnih ćelija, pri čemu se one prema tipu elektrolita dijele na: ćelije sa membranom za razmjenu protona, alkalne, oksidne, karbonatne i ćelije sa elektrolitom od fosforne kiseline [58]. Unutrašnjost gorivne ćelije sa elektrolitom u vidu membrane za razmjenu protona prikazana je slici 2.2.4.1. Sa strane anode dovodi se vodonik, dok se sa strane katode prirodnim putem dovodi vazduh, koji u sebi sadrži kiseonik i primjesu ostalih gasova. Katalizom na strani anode dolazi do rastavljanja vodonika na protone i elektrone. Elektroni se zadržavaju na anodi, dok protoni kroz elektrolit putuju ka katodi. Ukoliko se električno kolo između anode i katode zatvori (slika 2.2.4.1), dolazi do proticanja jednosmjerne struje. Bitno je napomenuti da elektrohemijška reakcija vodonika i kiseonika dovodi do oslobađanja velikih količina toplote, kao i kondenzacije na strani katode.

Pošto gorivne ćelije na izlazu generišu jednosmjerni napon, odnosno struju, za njihovo priključivanje na mrežu neophodno je koristiti module energetske elektronike, prije svega inverter koji će transformisati jednosmjerni napon u naizmjenični. Na taj način energetske elektronika omogućava da se energija generisana u gorivnoj ćeliji preda distributivnom sistemu.



Slika 2.2.4.1. Gorivna ćelija sa elektrolitom u vidu membrane za razmjenu protona.

2.3. Prednosti i nedostaci integracije distribuiranih izvora

Kao što je prethodno naglašeno, integracija distribuiranih izvora ima niz prednosti, pri čemu su najznačajnije [52, 53]:

1. *Smanjivanje gubitaka u prenosu* – pošto se distribuirani izvori direktno priključuju na distributivnu mrežu, jasno je da za prenos energije nije neophodna kompleksna mreža dalekovoda kao što je to slučaj sa centralizovanim izvorima, što posljedično dovodi i do smanjivanja gubitaka u prenosu,
2. *Povećanje prenosnog kapaciteta distributivnih vodava* – proizvodnja iz distribuiranih izvora snabdijeva energijom potrošače u svojoj blizini. Na taj način se vodovi u području od distributivne trafostanice do mjesta priključivanja distribuiranog izvora rasterćuju prenos dijela energije, čime se povećava njihov prenosni kapacitet,
3. *Smanjivanje štetnog uticaja na životnu sredinu* – integracija distribuiranih izvora čija se proizvodnja zasniva na obnovljivoj energiji, nema štetan uticaj na životnu sredinu. Dodatno, ukoliko integracija ovih izvora dovodi do smanjivanja proizvodnje iz centralizovanih elektrana čije se funkcionisanje bazira na sagorijevanju fosilnih goriva, značajno se može redukovati emisija CO₂ i ostalih štetnih gasova u atmosferu,
4. *Sigurnost napajanja* – ukoliko usljed kvara dođe do prekida napajanja u jednom dijelu ili čitavoj distributivnoj mreži, distribuirani izvor se može iskoristiti za napajanje konzuma. Da bi prethodno bilo moguće, mora se voditi računa da izvor ima dovoljan proizvodni kapacitet i da je, u slučaju napajanja čitavog sistema, moguć ostrvski režim rada.

Međutim, priča o integraciji distribuiranih izvora nije kompletna ukoliko se ne napravi osvrt na neke poteškoće koje prate implementaciju ove proizvodne tehnologije. Neki od nedostataka integracije distribuiranih izvora su sljedeći [60, 61]:

1. *Intermitentan karakter proizvodnje* – konkretna karakteristika se odnosi na izvore bazirane na energiji sunca i vjetra. Opšte je poznato da se sunčeva insolacija i brzina vjetra mijenjaju u toku dana, što posljedično dovodi do fluktuacije snage proizvedene iz fotonaponskih panela i vjetrogeneratora. U distributivnim mrežama sa

velikim stepenom penetracije obnovljivih izvora, interminenta proizvodnja može izazvati niz problema, koji uključuju prevelike oscilacije napona i frekvencije u mreži, a posljedično i nestabilnost distributivnog sistema,

2. *Izbor lokacije za priključivanje distribuiranog izvora* – ukoliko se lokacija za priključivanje distribuiranog izvora ne odabere pravilno, postoji rizik od povećanja gubitaka u prenosu i pogoršanje naponskih prilika. Stoga je rješavanje problema optimalnog lociranja distribuiranih izvora izuzetno važno za njihovu integraciju u savremenim distributivnim sistemima,
3. *Poteškoće prilikom kontrolisanja distribuiranih izvora* – kontrolisanje rada distribuiranih izvora predstavlja dosta izazovan zadatak, naročito u slučaju kada se zahtjeva ostvrski režim istih. U ostvrskom režimu rada od izvora se pored proizvodnje aktivne snage, očekuje i regulacije napona i frekvencije u čitavoj mreži, što zahtjeva upotrebu najsavremenih kontrolera.

3. Uređaji za fleksibilan prenos električne energije

Priroda većine potrošača u ESS-u je takva da za normalno funkcionisanje pored aktivne energije zahtjevaju određene količine reaktivne energije. Stoga je za pravilan rad sistema neophodno vršiti kontrolu toka i kompenzaciju reaktivne snage.

Cilj kompenzacije reaktivne snage može se posmatrati sa aspekta potrošača i sa aspekta naponskih prilika [59]. Sa aspekta potrošača, cilj kompenzacije je postizanje što je moguće boljeg faktora snage, dok je sa aspekta naponskih prilika cilj smanjivanje fluktuacija napona u određenim kritičnim tačkama sistema.

Za kompenzaciju reaktivne snage koristi se širok dijapazon uređaja. Konvencionalne tehnike kompenzacije uključuju priključivanje serijskih i paralelnih kondenzatorskih baterija, sinhronih kompenzatora i mehanički upravljivih transformatora za zakretanje faze, kao i kontrolu reaktivne energije iz proizvodnih jedinica koje sadrže sinhrogeneratore (npr. hidroelektrane). Međutim, neki od nedostataka konvencionalnih uređaja za kompenzaciju reaktivne snage su fiksirana kompenzacija, rezonansa, kao i spor odziv na promjene u sistemu [59].

Razvoj tehnike doveo je do sve veće primjene uređaja za fleksibilan prenos električne energije (eng. *Flexible Alternating Current Transmission Systems* – FACTS), koji spadaju u grupu kompenzatora čiji se rad zasniva na primjeni uređaja energetske elektronike. Princip rada FACTS uređaja omogućava kompenzaciju reaktivne energije u induktivnom ili kapacitivnom režimu, kao i brz odziv na dinamiku ESS-a, što ih čini snažnim rješenjem niza problema u savremenim prenosnim i distributivnim mrežama.

U ovom poglavlju biće napravljen osvrt na tok razvoja FACTS uređaja, nakon čega će biti opisan princip rada statičkog kompenzatora reaktivne snage i tiristorski kontrolisanog rednog kompenzatora, kao FACTS uređaja čija se optimalna alokacija i dimenzionisanje razmatraju u ovom radu.

3.1. Razvoj tehnologije FACTS uređaja

Razvoj tehnologije FACTS uređaja direktno je uslovljen razvojem komponenti energetske elektronike. Trenutno stanje tehnologije je takvo da ovi uređaji imaju mogućnost prenosa snage u opsegu od svega desetak kVA pa sve do nekoliko stotina MVA [60].

Tok razvoja FACTS uređaja može se podjeliti na dvije faze. U prvaj fazi razvoja, pojavljuju se uređaji koji sadrže reaktivni element, kondenzator i/ili kalem, dok se kontrola toka reaktivne snage vrši upotrebom klasičnih ili GTO tiristora. U ovu grupu FACTS uređaja ubrajaju se [60]:

- Tiristorski kontrolisana prigušnica (eng. *Thyristor Controlled Reactor* – TCR),
- Tiristorski uklopljiv kondenzator (eng. *Thyristor Switched Capacitor* – TSC),
- Tiristorski uklopljiva prigušnica (eng. *Thyristor Switched Reactor* – TSR),
- Statički kompenzator reaktivne snage (eng. *Static Var Compensator* – SVC),

- Tiristorski upravljivi serijski kompenzator (eng. *Thyristor Controlled Series Compensation* – TCSC),
- Tiristorski upravljiv zakretni transformator (eng. *Thyristor Controlled Phase Shifting Transformer* – TCPST),
- Tiristorski upravljiv regulator faznog ugla (eng. *Thyristor Controlled Phase Angle Regulator* – TCPAR).

Kod prve generacije uređaja jako je bitno napraviti razliku između uklopljivih i kontrolisanih uređaja. Kada se kaže da je uređaj uklopljiv, tada se tiristor koristi kao običan prekidač, odnosno, uređaj može biti priključen na mrežu ili isključen sa iste. U slučaju kontrolisanih uređaja, tiristor se koristi kao ventil, odnosno kontrolisanjem ugla okidanja tiristora postiže se skoro kontinualna regulacija reaktivne snage.

U drugoj fazi dolazi do razvoja uređaja dosta kompleksnije konstrukcije. Klasični kalem se mijenja sa serijskim ili paralelnim transformatorima, dok se umjesto tiristora najčešće primjenjuju serijski, odnosno paralelni, mosni konvertori sa energetskim tranzistorima. Drugoj generaciji FACTS pripadaju sljedeći uređaji [60]:

- Statički sinhroni kompenzator (eng. *STATic Synchronous COMpensator* – STATCOM),
- Statički sinhroni serijski kompenzator (eng. *Static Synchronous Series Compensator* – SSSC),
- Univerzalni regulator toka snage (eng. *Unified Power Flow Controller* – UPFC),
- Regulator toka snage između vodova (eng. *Interline Power Flow Controller* – IPFC).

3.2. Statički kompenzator reaktivne snage

Statički kompenzator reaktivne snage (SVC) predstavlja prvi konstruisani FACTS uređaj. Naziv statički potiče od činjenice da ovaj uređaj ne sadrži rotirajuće elektromehaničke komponente. SVC se priključuje paralelno na mrežu i na svom izlazu daje kapacitivnu ili induktivnu reaktivnu snagu, sa ciljem kontrolisanja određenih parametara ESS-a.

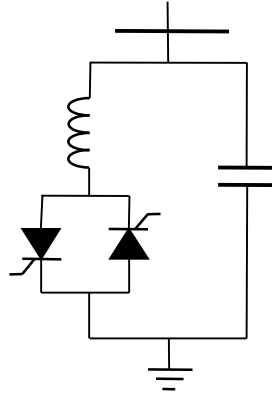
SVC nalazi široku primjenu u savremenom ESS-u. Konkretno u distributivnim sistemima SVC se koristi za [61]:

- stabilizaciju napona na kraju dugih distributivnih vodova,
- smanjivanje oscilacija napona na sabirnicama,
- smanjivanje gubitaka u prenosu kroz redukovanje reaktivne snage koja se prenosi distributivnim vodom,
- uravnotežavanje asimetričnih opterećenja, itd.

Takođe, bitno je napomenuti da SVC nalazi svoju primjenu u industrijskim distributivnim sistemima. Jedan primjer su elektrolučne peći, kod kojih sa povećanjem struje električnog luka dolazi do značajnog pogoršanja faktora snage. Radi zaštite cjelokupnog sistema na koji je priključeno postrojenje, SVC se ugrađuje da svojim brzim djelovanjem kompenzuje uticaj električnog luka i poboljša faktor snage.

3.2.1. Konfiguracija i princip rada SVC

Najčešće korišćena konfiguracija SVC prikazana je na slici 3.2.1.1 [61]. U suštini ovakva konfiguracija sastoji se od paralelne veze kondenzatorske baterije fiksne kapacitivnosti i tiristorski kontrolisane prigušnice (TCR).

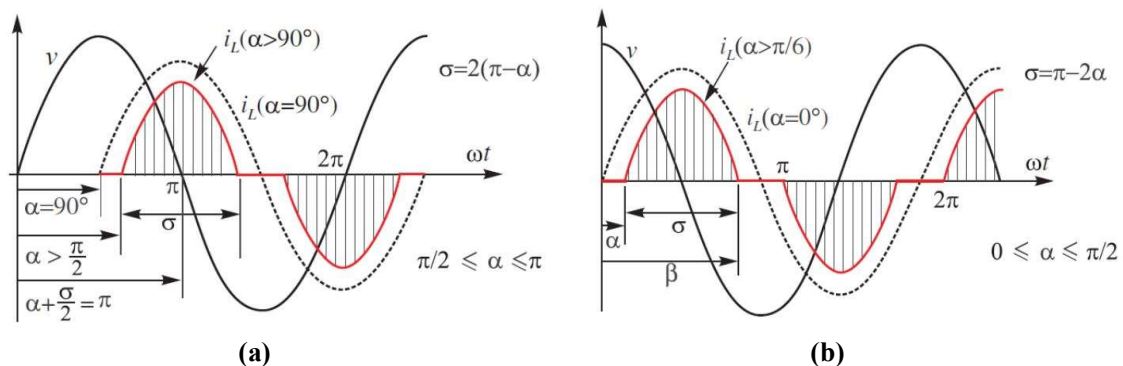


Slika 3.2.1.1. Ekvivalentno električno kolo SVC.

Princip rada SVC je sljedeći. Pošto je kondenzator fiksne kapacitivnosti, jasno je da on injektira konstantnu kapacitivnu struju, odnosno snagu. To znači da se kontrola reaktivne snage SVC može ostvariti regulisanjem induktivne struje TCR-a. Regulacija struje TCR-a se ostvaruje kroz regulaciju ugla uključivanja tiristora (α), pri čemu je u toku jedne poluperiode aktivan jedan, a u toku sljedeće poluperiode drugi tiristor. U literaturi su poznate dva pristupa u određivanju trenutka dovođenja okidnog signala na tiristor [61]:

1. *trenutak prolaska pozitivnog poluciklusa napona kroz nulu* – ugao okidanja se nalazi u opsegu, $90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$, pri čemu se puno provođenje ostvaruje za $\alpha = 90^\circ$, dok se blokiranje tiristora ostvaruje za $\alpha = 180^\circ$,
2. *trenutak kada napon dostiže maksimalnu vrijednost* – ugao okidanja se nalazi u opsegu $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$, pri čemu se puno provođenje i blokiranje tiristora ostvaruje za uglove $\alpha = 0^\circ$ i $\alpha = 90^\circ$, respektivno.

Talasni oblici napona i struje TCR-a za dva različita pristupa dovođenja okidnog signala prikazani su na slici 3.2.1.2.a i b, respektivno [61].

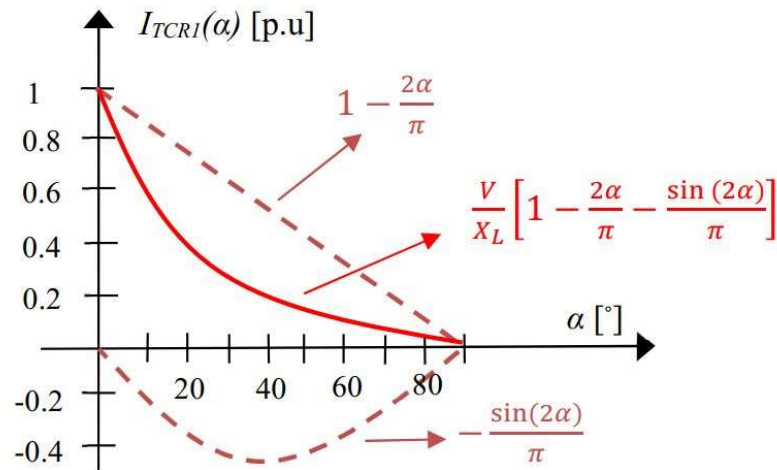


Slika 3.2.1.2. Talasni oblici napona i struja TCR-a.

Zavisnost osnovnog harmonika struje TCR-a od ugla uključivanja tiristora može se opisati sljedećim izrazom [61]:

$$I_{TCR1} = \frac{V}{X_L} \left[1 - \frac{2\alpha}{\pi} - \frac{\sin(2\alpha)}{\pi} \right] \quad (3.2.1.1)$$

gdje X_L predstavlja reaktansu prigušnice, dok je V napon TCR-a. Posmatrajući jednačinu (3.2.1.1) jasno je da sa povećanjem ugla α dolazi do smanjivanja induktivne struje TCR-a i obratno. Na slici 3.2.1.3 prikazana je zavisnost osnovnog harmonika struje TCR-a od ugla uključivanja tiristora, gdje se jasno uočava da je struja maksimalna (1 p.u) za $\alpha = 0^\circ$, nakon čega opada do nule za vrijednost ugla $\alpha = 90^\circ$.



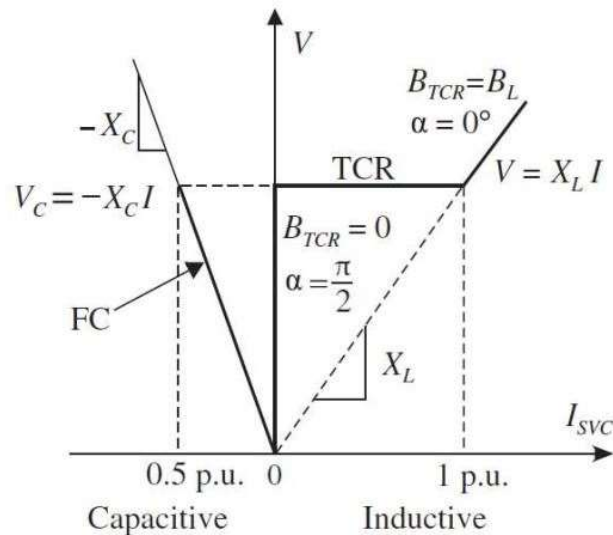
Slika 3.2.1.3. Zavisnost osnovnog harmonika struje TCR-a od ugla α .

Iz predstavljene analize, zaključuje se da povećanje ugla α uvodi SVC u kapacitivni režim rada, pošto se struja TCR-a smanjuje (slika 3.2.1.3). Suprotno, sa smanjenjem ugla α pojačava se dejstvo struje TCR-a, prigušnica apsorbira reaktivnu snagu kondenzatora, što dovodi do smanjivanja kapacitivnog efekta SVC. Odnosno, za male vrijednosti ugla α SVC radi u induktivnom režimu. Prethodno se grafički predstavlja radnom karakteristikom SVC, koja je prikazana na slici 3.2.1.4 [61]. Karakteristika fiksnog kondenzatora predstavljena je pravom nagiba $-X_C$, dok se karakteristika TCR-a prikazuje pravom nagiba X_L . Nagib karakteristike TCR-a se mijenja sa promjenom ugla α što je u skladu sa promjenom vrijednosti struje u zavisnosti od ugla α .

3.2.2. Matematički model SVC

Za matematičko modelovanje SVC najčešće se polazi od modela promjenjive susceptanse. Ekvivalentna susceptansa SVC, shodno konfiguraciji sa slike 3.2.1.1, predstavlja zbir susceptanse TCR-a (B_{TCR}) i susceptanse fiksnog kondenzatora (B_C):

$$B_{SVC}(\alpha) = B_{TCR}(\alpha) + B_C \quad (3.2.1.2)$$



Slika 3.2.1.4. Radna (I - V) karakteristika SVC.

Susceptansa kondenzatora se izražava kao $B_C = -\omega C$, gdje je C fiksna kapacitivnost kondenzatora. Susceptansa TCR-a se mijenja sa promjenom ugla uključivanja tiristora, pri čemu se ova zavisnost matematički opisuje sljedećim izrazom:

$$B_{TCR}(\alpha) = B_{MAX} \left[1 - \frac{2\alpha}{\pi} - \frac{\sin(2\alpha)}{\pi} \right], \quad (3.2.1.3)$$

gdje je $B_{MAX} = 1/\omega L$ maksimalna vrijednost susceptanse TCR-a. Jednačina (3.2.1.3) dobija se prostim dijeljenjem izraza za struju TCR-a (3.2.1.1) sa naponom V , odakle se zaključuje da je promjena B_{TCR} u zavisnosti od promjene ugla α identična promjeni struje TCR-a.

Konačno, izlazna reaktivna snaga SVC se opisuje jednačinom (3.2.1.4), gdje je V_i napon sabirnice i na koju je priključen SVC. Posmatrajući jednačine (3.2.1.2 – 3.2.1.4) zaključuje se sljedeće. U kapacitivnom režimu rada SVC važi da je $B_{TCR} < B_C$. To znači da je susceptansa SVC negativnog predznaka, pa je snaga Q_{SVC} pozitivna, odnosno, SVC injektira reaktivnu snagu u mrežu. Suprotno, u induktivnom režimu rada, odnos susceptansi je $B_{TCR} > B_C$. Samim tim, susceptansa SVC je pozitivnog predznaka, a snaga Q_{SVC} negativnog, pa u ovom režimu rada SVC apsorbira reaktivnu snagu iz mreže.

$$Q_{SVC}(\alpha) = -V_i^2 B_{SVC}(\alpha). \quad (3.2.1.4)$$

3.3. Tiristorski kontrolisan redni kompenzator

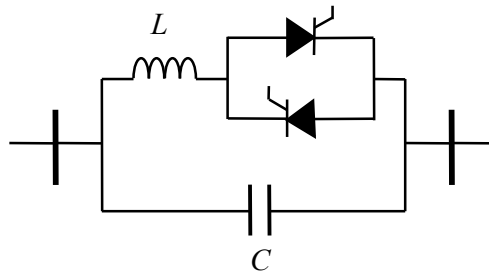
Tiristorski kontrolisan redni kompenzator (TCSC) predstavlja najčešće korišćen redni FACTS uređaj. U odnosu na popularni metod „umetanja“ redne baterije kondenzatora, priključivanje TCSC predstavlja mnogo skuplju varijantu redne kompenzacije. Međutim, činjenica da TCSC pored kapacitivnosti sadrži tiristorski kontrolisanu prigušnicu, omogućava skoro kontinualnu rednu kompenzaciju reaktivne snage, u kapacitivnom i induktivnom režimu rada, što čini ovaj uređaj superiornijim u odnosu na rednu bateriju kondenzatora [62].

TCSC se u distributivnim sistemima najčešće priključuje sa ciljem [62]:

- poboljšanja prenosnog kapaciteta voda,
- poboljšanja naponskog profila i ugaone stabilnosti mreže,
- prigušenja oscilacija snage i optimizacije njene preraspodjele između paralelnih vodova, itd.

3.3.1. Konfiguracija i princip rada TCSC

TCSC je konfigurisan kao i SVC, što znači da se sastoji od paralelne veze kondenzatorske baterije fiksne kapacitivnosti i TCR-a. Iz tog razloga se često i literaturi za TCSC koristi naziv redni SVC. Ekvivalentno električno kolo TCSC prikazano je na slici 3.3.1.1 [62].



Slika 3.3.1.1. Ekvivalentno električno kolo TCSC.

Princip rada TCSC se zasniva na kontroli ugla uključivanja tiristora, čime se mijenja reaktansa TCR-a, a samim tim i ekvivalentna reaktansa TCSC. Prije same analize principa rada TCSC bitno je napomenuti da se ovaj uređaj uvijek konfigurira tako da je reaktansa prigušnice manja od reaktanse baterije kondenzatora. Neka su $X_L = \omega L$ i $X_C = 1/\omega C$, reaktanse prigušnice i kondenzatora, respektivno. Ekvivalentna reaktansa TCSC, zanemarujući ulogu tiristora, biće:

$$X_{TCSC} = -\frac{X_L X_C}{X_L - X_C} = \frac{1}{\frac{1}{X_L} - \frac{1}{X_C}}. \quad (3.3.1.1)$$

Posmatrajući izraz (3.3.1.1) može se zaključiti sljedeće:

- Ako je $X_L > X_C$, ekvivalentna reaktansa TCSC je kapacitivnog karaktera,
- Ako je $X_L < X_C$, ekvivalentna reaktansa TCSC je induktivnog karaktera,
- Ako je $X_L = X_C$, nastupa režim rezonance, odnosno ekvivalentna reaktansa TCSC ima beskonačno veliku vrijednost.

Konkrento, zavisnost ekvivalentne reaktanse TCR-a od ugla α se opisuje sljedećom relacijom [62]:

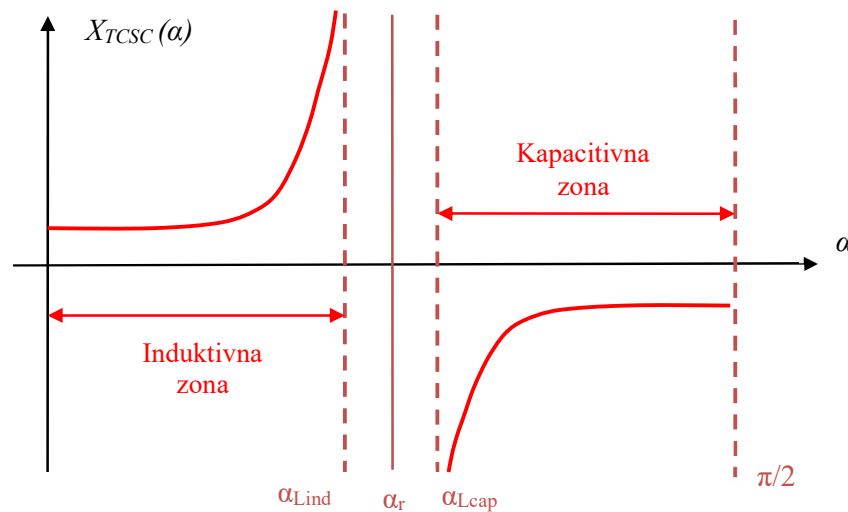
$$X_L = \omega L \frac{\pi}{\pi - 2\alpha - \sin(2\alpha)}. \quad (3.3.1.2)$$

Na osnovu jednačine (3.3.1.2) i prethodno izloženih zaključaka, može se izvesti sljedeća analiza režima rada TCSC:

- Kada je ugao $\alpha = 0^\circ$, tiristori kontinualno provode pa je reaktansa TCR-a mnogo manja od reaktanse kondenzatora, odnosno, ekvivalentna reaktansa TCSC ima induktivan karakter. Ako se ugao α povećava, dolazi do povećanja reaktanse TCR-a. Međutim, pošto je ona i dalje manja od reaktanse kondenzatora sa povećanjem ugla α dolazi do povećanja induktivnog efekta.

- Ukoliko je ugao $\alpha = 90^\circ$, tiristori su blokirani, pa je reaktansa TCR-a beskonačno velika. To znači da je ekvivalentna reaktansa TCSC jednaka reaktansi kondenzatora, pa je njen karakter čisto kapacitivan. Ako se ugao α smanjuje, reaktansa TCR-a se povećava. Međutim, kako je reaktansa kondenzatora veća od reaktanse kalema, sa povećanjem ugla α dolazi do povećanja kapacitivnog karaktera reaktanse TCSC.

Bitno je napomenuti da za svaki TCSC uređaj postoji ugao α_r za koji nastupa rezonansa. Kako bi se izbjegao režim rezonanse, uvijek se definiše opseg uglova oko ugla α_r unutar koga TCSC ne smije da radi [62]. To znači da je opseg vrijednosti uglova uključivanja u induktivnom režimu $0 \leq \alpha < \alpha_{Lind}$, dok je opseg uglova uključivanja u kapacitivnom režimu $\alpha_{Lcap} \leq \alpha < 90^\circ$, gdje su α_{Lind} i α_{Lcap} maksimalne vrijednosti ugla uključivanja u kapacitivnom i induktivnom režimu, respektivno. Zavisnost reaktanse TCSC od ugla uključivanja α prikazana je na slici 3.3.1.2.



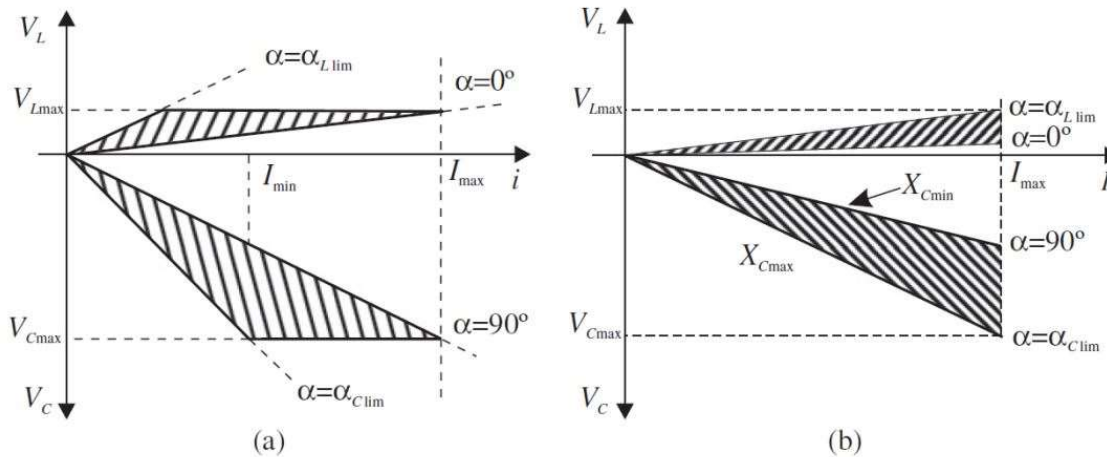
Slika 3.3.1.2. Zavisnost reaktanse TCSC od ugla uključivanja α .

Radna karakteristika TCSC prikazan je na slici 3.3.1.3, gdje se razlikuju dva moda kompenzacije [62]. Prvi je mod kompenzacije napona, prikazan $I-V$ karakteristikomna slici 3.3.1.3.a. U ovom modu ugao α se reguliše tako da napon bude konstantan i maksimalan i u induktivnom i kapacitivnom režimu. $I-V$ karakteristika drugog moda data je na slici 3.3.1.3.b, i on se naziva mod kompenzacije reaktanse. U ovom modu ugao α se reguliše tako da induktivna, odnosno kapacitivna, reaktansa TCSC bude maksimalna, za bilo koju vrijednost napona i struje.

3.3.2. Matematički model TCSC

Konkretna matematička relacija za opisivanje reaktanse TCSC nije jednoznačno definisana. Prema preporukama CIGRE-a, za matematičko modelovanje TCSC može se koristiti sljedeća relacija [62]:

$$X_{TCSC} = \frac{\pi X_L}{(\sigma - \sin(\sigma)) + \pi \frac{X_L}{X_T}}, \quad (3.3.2.1)$$



Slika 3.3.1.3. Radan (I - V) karakteristika TCSC u modu kompenzacije (a) napona (b) reaktanse.

gdje je X_T fiksna reaktansa, dok je $\sigma = 2\pi - 2\alpha$. Pored izraza (3.3.2.1), za definisanje reaktanse TCSC koristi se i jednačina (3.3.2.2) [62]:

$$X_{TCSC} = X_C \frac{V_C(\alpha)}{I_{line}}, \quad (3.3.2.2)$$

gdje je $V_C(\alpha)$ napon na kondenzatoru i I_{line} linijska struja voda.

Bitno je spomenuti da postoji ograničenje u stepenu kompenzacije TCSC. U literaturi se nalazi podatak da se priključivanjem TCSC maksimalno može kompenzovati do 75% reaktanse voda. Iz tog razloga se u većini naučnih publikacija reaktansa TCSC računa na sljedeći način [35, 36, 38, 40]:

$$X_{TCSC} = k \times X_{ij}, \quad (3.3.2.3)$$

pri čemu je k koeficijent kompenzacije, dok je X_{ij} reaktansa voda između čvorova i i j . Ukoliko je $k < 0$, TCSC radi u kapacitivnom režimu i smanjuje reaktansu voda. Sa druge strane, ako je $k > 0$, TCSC radi u induktivnom režimu, gdje doprinosi povećanju reaktanse voda.

3.4. Prednosti i nedostaci integracije FACTS uređaja

Integracija FACTS uređaja u savremenim ESS daje značajan doprinos sa aspekta poboljšanja performansi sistema. Neke od najznačajnijih prednosti priključivanja FACTS su sljedeće [60-62]:

1. *Mogućnost upravljanja tokovima snaga* – FACTS uređaji injektiranjem/apsorbiranjem reaktivne snage ili kompenzacijom reaktanse voda, direktno utiču na tokove reaktivnih snaga. Taj uticaj se ogleda ili u preraspodjeli tokova reaktivnih snaga ili u kompenzaciji značajnih količina reaktivne snage, što posljedično dovodi do povećanja prenosnog kapaciteta i smanjivanja gubitaka u prenosu.
2. *Povećanje sigurnosti sistema* – priključivanjem paralelnih i rednih FACTS uređaja, pomjera se prirodna granica prelazne stabilnosti sistema. Naime, na taj način se

povećava maksimalno moguće opterećenje sistema, kao i oblast stabilnog rada sistema.

3. *Kontrola napona* – upravljanjem tokovima reaktivne snage direktno se utiče na vrijednost napona u čvorovima. FACTS uređaji omogućavaju širok dijapazon kompenzacije, što omogućava efikasnu kontrolu napona, naročito prilikom velikih promjena opterećenja.
4. *Brzina odziva* – pošto se FACTS uređaji zasnivaju na primjeni elemenata energetske elektronike, oni omogućavaju jako brz odziv na promjene dinamike sistema. Takođe, pošto ne sadrže mehaničke uklopne elemente, FACTS uređaji nemaju problema sa nepovoljnim prelaznim procesima prilikom uklapanja, odnosno isklapanja uređaja sa mreže.

Pored navedenih prednosti, integracija FACTS uređaja u ESS-u ima i sljedeće nedostatke [60-62]:

1. *Viši harmonici* – FACTS, kao sistemi čiji se princip rada snažno oslanja na uređajima energetske elektronike, predstavljaju generatore viših harmonika. Povećana koncentracija viših harmonika dovodi do povećanih gubitaka u sistemu i komponentama istog, smanjenja kvaliteta električne energije, itd.
2. *Visoka cijena integracije* – visoka cijena samih komponenti energetske elektronike, kao i implementiranje upravljanja i potrebnih filtara za smanjivanje uticaja viših harmonika, čine FACTS uređaje mnogo skupljom tehnologijom kompenzacije u odnosu na klasične kompenzatore reaktivne snage.

4. Matematička formulacija problema

Dinamika savremenih distributivnih sistema učinila je rješavanje problema optimizacije ključnim faktorom daljeg razvoja u ovoj oblasti. Konkretno, najpopularniji optimizacioni problemi u distributivnim mrežama uključuju: optimalnu alokaciju i dimenzionisanje uređaja, optimalnu rekonfiguraciju mreže i sintezu kontrolera koji će optimalno koordinirati rad svih uređaja priključenih na mrežu, sa ciljem što efikasnijeg upravljanja distributivnim sistemima [63].

Inicijalni korak prilikom rješavanja optimizacionih problema je njihova matematička formulacija. Kroz modelovanje optimizacionog problema praktični problem se transformiše u matematički, pri čemu je cilj pronaći optimalno rješenje problema pod zadatim uslovima [63]. To znači da je za formulaciju problema neophodno: definisati skup promjenjivih i matematičkih relacija koje ih povezuju, definisati funkciju cilja i set matematičkih ograničenja koja moraju biti ispunjena u toku procesa rješavanja problema. U velikom broju optimizacionih problema koji se tiču ESS početna tačka je definisanje problema optimalnih tokova snaga. Nakon toga se u skladu sa prirodom konkretnog optimizacionog problema, vrši modifikacija jednačina optimalnih tokova snaga kako bi se nakon rješavanja problema odredila: optimalna snaga i lokacija priključnih uređaja, optimalna preraspodjela proizvodnje generatorskih jedinica, optimalna konfiguracija mreže, itd.

U ovom poglavlju predstavljen je matematički model optimalnih tokova snaga i MINLP formulacija problema optimalne alokacije i dimenzionisanja DG i FACTS uređaja.

4.1. Optimalni tokovi snaga

Optimalni tokovi snaga (eng. *Optimal Power Flow* - OPF) definišu se kao optimizacioni problem gdje se kroz određivanje: tokova aktivnih i reaktivnih snaga kroz vodove, vrijednosti i faznih stavova napona u sabirnicama i snage proizvodnje generatorskih jedinica ima za cilj minimizacija određene funkcije cilja. Zbog prirode matematičkih relacija koje ga opisuju OPF spada u grupu kompleksnih, nelinearnih i nekonveksnih optimizacionih problema.

Prvi put rješavanje OPF-a dobija na značaju 1960. godine, kao sastavni korak prilikom optimizacije ekonomskog dispečinga ESS-a [64]. Međutim, uvođenje satne proizvodnje generatorskih jedinica i potrošnje konzuma, kao i činjenica da OPF predstavlja osnovu prilikom rješavanja optimizacija koje uključuju optimalno alociranje i dimenzionisanje savremenih tehnologija, dovelo je do dodatnog usložnjavanja i povećanja važnosti rješavanja ovog problema.

Opšti matematički zapis OPF-a dat je relacijama (4.1.1 – 4.1.3) [64-66]:

$$\min (F(\bar{x}, \bar{u})), \quad (4.1.1)$$

$$g(\bar{x}, \bar{u}) = 0, \quad (4.1.2)$$

$$h(\bar{x}, \bar{u}) \leq 0, \quad (4.1.3)$$

gdje su: $F(\bar{x}, \bar{u})$ funkcija cilja koju je potrebno minimizovati, $g(\bar{x}, \bar{u})$ funkcija koja opisuje ograničenja tipa jednakosti, $h(\bar{x}, \bar{u})$ – funkcija koja opisuje ograničenja tipa nejednakosti, \bar{x} vektor zavisnih varijabli (generisana reaktivna snaga, naponi na sabirnicama) i \bar{u} vektor kontrolnih varijabli (pozicija odcjepa regulacionog transformatora, reaktivna snaga kompenzatora reaktivne snage, generisana aktivna snaga, i drugo).

4.1.1. Funkcija cilja

Izbor adekvatne funkcije cilja OPF-a zavisi prvenstveno od razmatranog optimizacionog problema. Neke od najčešće korišćenih funkcija cilja u dostupnoj literaturi su [64]: smanjivanje ukupnih gubitaka snage, smanjivanje devijacije napona u sabirnicama, smanjivanje emisije CO₂, minimizacija troškova proizvodnje generatorskih jedinica, kao i troškova rada kompenzatora reaktivne snage. Takođe, funkcija cilja može predstavljati kombinaciju jedne ili više prethodno navedenih funkcija, pri čemu se tada govori o više-ciljnom OPF-u.

Konkretno, u ovom radu cilj pronalaženja optimalne lokacije i snage DG i FACTS uređaja je smanjivanje ukupnih gubitaka u radijalnoj distributivnoj mreži, koji se računaju shodno relaciji (4.1.1.1) [67]:

$$P_{loss} = \frac{G_{ij}}{2} [V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos(\theta_j - \theta_i)], \quad (4.1.1.1)$$

pri čemu su: P_{loss} ukupni gubici aktivne snage u sistemu, G_{ij} provodnost prenosnog voda između sabirnica i i j , V_i i V_j efektivne vrijednosti napona u sabirnicama i i j , respektivno, θ_i i θ_j fazni stavovi napona u sabirnicama i i j , respektivno.

4.1.2. Ograničenja

Generalno, prilikom rješavanja OPF-a za ograničenja tipa jednakosti uzimaju se balasne jednačine aktivnih i reaktivnih snaga, koje su date relacijama (4.1.2.1) i (4.1.2.2), respektivno [67]:

$$P_{Gi} - P_{Li} - V_i \sum_{j=1}^{N_b} V_j [G_{ij} \cos(\delta_{ij}) + B_{ij} \sin(\delta_{ij})] = 0, \quad (4.1.2.1)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Li} - V_i \sum_{j=1}^{N_b} V_j [G_{ij} \sin(\delta_{ij}) - B_{ij} \cos(\delta_{ij})] = 0, \quad (4.1.2.2)$$

gdje su P_{Gi} i Q_{Gi} aktivna i reaktivna snaga generatora priključenog na sabirnicu i , respektivno, P_{Li} i Q_{Li} aktivna i reaktivna snaga potrošača priključenog na sabirnicu i , respektivno, B_{ij} susceptansa prenosnog voda između sabirnica i i j , δ_{ij} razlika između faznih stavova napona u sabirnicama i i j .

Što se tiče ograničenja tipa nejednakosti ona obično obuhvataju uslove koji moraju biti ispunjeni kako bi elektroenergetski sistem pravilno funkcionisao. Prilikom rješavanja OPF-a u ovom radu razmatraju se sljedeća ograničenja tipa nejednakosti [67]:

- Efektivna vrijednost i fazni stav napona u sabirnicama ne smiju izaći iz definisanog opsega:

$$V_{min} < V_i < V_{max} , \quad (4.1.2.3)$$

$$\theta_{min} < \theta_i < \theta_{max} , \quad (4.1.2.4)$$

- Generatorske jedinice imaju ograničen proizvodni kapacitet, sa aspekta aktivne i reaktivne snage:

$$P_{Gmin} < P_{Gi} < P_{Gmax} , \quad (4.1.2.5)$$

$$Q_{Gmin} < Q_{Gi} < Q_{Gmax} , \quad (4.1.2.6)$$

- Vodovi imaju ograničen prenosni kapacitet:

$$P_{ijmin} < P_{ij} < P_{ijmax} , \quad (4.1.2.7)$$

$$Q_{ijmin} < Q_{ij} < Q_{ijmax} . \quad (4.1.2.8)$$

4.2. Mješovito-cjelobrojno nelinearno programiranje

Mješovito-cjelobrojno nelinearno programiranje (eng. *Mixed-Integer Non-Linear Programming* – MINLP) predstavlja klasu optimizacionih problema kod kojih određene promjenjive imaju isključivo cijelobrojne vrijednosti, dok su funkcija cilja i prostor pretraživanja (ograničenja) opisani nelinearnim funkcijama [68]. Cjelobrojni promjenjive se najčešće koriste za opisivanje neke logike, fiksnih promjena ili diskretnih funkcija, dok se nelinearne funkcije koriste za matematičko modelovanje ponašanja realnih sistema.

MINLP problemi su veoma zahtjevni za rješavanje pošto kombinuju kompleksnost optimizacije nad cijelobrojnim promjenjivima i rad sa nelinearnim funkcijama. Čak i ako bi se funkcije linearizovale, što bi svelo MINLP na mješovito-cjelobrojno linearno programiranje (eng. *Mixed-Integer Linear Programming* – MILP), problem bi se i dalje klasifikovao kao NP-težak [68]. Takođe, bitno je napomenuti da priroda MINLP čini neke od problema praktično nerješivim, pa je velika pažnja usmjerena na dizajniranje različitih metoda za rješavanje istih.

U nastavku poglavlja biće izloženi definicija MINLP i sastavni elementi metoda za rješavanje ove klase problema. Detaljnije informacije o MINLP solveru koji je predložen u ovom radu biće izložene u narednoj glavi.

4.2.1. Matematička definicija MINLP

Algebarska definicija MINLP problema može se predstaviti sljedećim setom jednačina [68]:

$$z_{MINLP} = \min (f(x)) \quad (4.2.1.1)$$

$$g_j(x) \leq 0, \forall j \in J, \quad (4.2.1.2)$$

$$x \in X, x_I \in \mathbb{Z}^{|I|}, \quad (4.2.1.3)$$

gdje su: z_{MINLP} funkcija cilja MINLP problema, $f : X \rightarrow \mathbb{R}$ i $g_j : X \rightarrow \mathbb{R}$ nelinearne, diferencijabilne funkcije, X poliedarski podskup skupa \mathbb{R}^n , x cijelobrojna promjenjiva, J

indeks skupa nelinearnih ograničenja, I indeks skupa cijelobrojnih promjenjivih i C indeks skupa kontinualnih promjenjivih.

Pretpostavlja se da je skup cijelobrojnih promjenjivih X ograničen sa vrijednostima L_I i U_I , koje predstavljaju donju i gornju granicu skupa, respektivno. U najvećem broju slučajeva, cijelobrojne promjenjive su diskretne, te za njih važi da je $x_i \in \{0, 1\} \forall i \in I$ [68].

Prilikom definisanja MINLP potrebno je specificirati da li se radi o konveksnom ili nekonveksnom problemu. Ova osobina optimizacionih problema zavisi prvestveno od funkcija cilja f i ograničenja g_j . Realna funkcija se smatra konveksnom ukoliko se prava povučena između bilo koje dvije tačke na grafu funkcije ne nalazi ispod samog grafa. Najpozantiji primjeri konveksnih funkcija su kvadratna i eksponencijalna funkcija.

Posmatrajući relacije (4.1.1.1) i (4.1.2.1 - 4.1.2.2) jasno je da su funkcija cilja i ograničenja OPF-a nekonveksne funkcije. Shodno tome, problem optimalne alokacije i dmenzionisanja DG i FACTS koji se prezentuje u ovom radu spada u grupu nekonveksnih MINLP problema. Međutim, radi jednostavnosti definisanja elemenata koji su sastavni dio svih postojećih MINLP algoritama, u nastavku se podrazumjeva konveksnost nelinearnih funkcija.

4.2.2. Sastavni elementi MINLP algoritama

Osnovna ideja svih MINLP algoritama sastoji se u generisanju i ažuriranju ograničenja na optimalnu vrijednost funkcije cilja. Pravilo je da se donja granica generiše rješavanjem „relaksiranog“ MINLP problema, dok se gornja granica generiše iz vrijednosti izvodljivog rješenja problema [68].

Iako se MINLP algoritmi razlikuju u pogledu postupka kojim se dolazi do optimalnog rješenja, koncepti linearizacije i rješavanja podproblema zajednički su za sve postojeće algoritme.

4.2.2.1. Linearizacija

U najvećem broju slučajeva funkcija cilja MINLP problema je nelinearna. To može dovesti do pojave optimalnog rješenja u tački koja se nalazi u unutrašnjosti konveksnog luka skupa optimalnih rješenja problema [68].

Jedan od načina za rješavanje navedenog problema je linearizacija funkcije cilja, uvođenjem pomoćne promjenive η , dok se stvarna funkcija cilja transformiše u ograničenje. Prethodno se matematički izražava na sljedeći način [68]:

$$z_{MINLP} = \min(\eta) \quad (4.2.2.1.1)$$

$$f(x) \leq \eta, \quad (4.2.2.1.2)$$

$$g_j(x) \leq 0, \forall j \in J, \quad (4.2.2.1.3)$$

$$x \in X, x_i \in \mathbb{Z}^{|I|}, \quad (4.2.2.1.4)$$

Pored linearizacije funkcije cilja, veliki broj MINLP algoritama pronalazi optimalno rješenje kroz simultanu linearizaciju funkcije cilja i funkcija ograničenja u jednoj tački. Pretpostavljajući da su funkcija cilja f i funkcija ograničenja g_j konveksne i diferencijabilne, moguće je postaviti sljedeći set nejednakosti [68]:

$$f(\hat{x}) + \nabla f(\hat{x})^T(x - \hat{x}) \leq f(x) \quad (4.2.2.1.5)$$

$$g_j(\hat{x}) + \nabla g_j(\hat{x})^T(x - \hat{x}) \leq g_j(x) \quad (4.2.2.1.6)$$

gdje je \hat{x} proizvoljna tačka u kojoj se vrši linearizacija. Nejednačine (4.2.2.1.5 - 4.2.2.1.6) važe za svako $j \in J$ i za svaku tačku $\hat{x} \in \mathbb{R}^n$. Pozivajući se na relacije (4.2.2.1.2) i (4.2.2.1.3), prethodno definisane nejednakosti se mogu zapisati u linearnom obliku kao:

$$f(\hat{x}) + \nabla f(\hat{x})^T(x - \hat{x}) \leq \eta \quad (4.2.2.1.7)$$

$$g_j(\hat{x}) + \nabla g_j(\hat{x})^T(x - \hat{x}) \leq 0 \quad (4.2.2.1.8)$$

Relacije (4.2.2.1.7) i (4.2.2.1.8) su u literaturi poznate kao i linearna „relaksacija“ MINLP (eng. *linear relaxations of MINLP*) [68]. Linearizacija funkcija ograničenja g_j aproksimira region izvodljivih rješenja MINLP problema, dok linearizacija funkcije cilja služi za njeno „pod-estimiranje“, odnosno, za postavljanje donje granice optimalne vrijednosti.

4.2.2.2. Rješavanje podproblema

Primarna karakteristika MINLP algoritama je rastavljanje primarnog optimizacionog problema na podprobleme. Konkretno, za veliki broj MINLP algoritama, najvažniji podproblem je nelinearna (NLP) relaksacija. Ako su l_I i u_I donja i gornja granica cjelobrojne promjenjive x_I , respektivno, tada se NLP relaksacija matematički izražava sljedećim relacijama [68]:

$$z_{NLPR} = \min (f(x)) \quad (4.2.2.2.1)$$

$$g_j(x) \leq 0, \forall j \in J, \quad (4.2.2.2.2)$$

$$x \in X, \quad l_I \leq x_I \leq u_I, \quad (4.2.2.2.3)$$

Vrijednost z_{NLPR} u jednačini (4.2.2.2.1) predstavlja rješenje podproblema, koja se postavlja kao donja granica optimalnog rješenja MINLP problema (4.2.1.1).

U specifičnom slučaju kada je vrijednost cijelobrojne promjenjive fiksna $l_I = u_I = \hat{x}_I$, nastupa rješavanje fiksnog NLP podproblema [68]:

$$z_{NLP} = \min (f(x)) \quad (4.2.2.2.4)$$

$$g_j(x) \leq 0, \forall j \in J, \quad (4.2.2.2.5)$$

$$x \in X, \quad x_I = \hat{x}_I, \quad (4.2.2.2.6)$$

Ukoliko fiksni NLP podproblem ima izvodljivo rješenje z_{NLP} , ta se vrijednost uzima za gornju granicu optimalnog rješenja MINLP problema (4.2.1.1).

Ako rješenje fiksnog NLP podproblema ne postoji, tada NLP solver rješava podproblem za provjeru izvodljivosti (eng. *feasibility subproblem*). Primjer takvog podproblema prikazan je jednačinama (4.2.2.2.7) i (4.2.2.2.8):

$$z_{NLPF} = \min \left(\sum_{j=1}^m \omega_j g_j(x)^+ \right) \quad (4.2.2.2.7)$$

$$x \in X, \quad x_I = \hat{x}_I, \quad (4.2.2.2.8)$$

gdje funkcija $g_j(x)^+ = \max\{0, g_j(x)\}$ mjeri odstupanje nelinearnog ograničenja $\omega_j \geq 0$.

4.3. MINLP formulacija problema optimalne alokacije i dimenzionisanja DG i FACTS

Odabir optimalne lokacije i optimalne izlazne snage DG i FACTS vrši se sa ciljem postizanja optimalne vrijednosti funkcije cilja. Stoga je za pronalaženje optimalne lokacije priključivanja i optimalne vrijednosti snage uređaja potrebno riješiti modifikovani OPF u kojem su uvršteni i matematički modeli razmatranih uređaja.

Neka su P_{DG} i Q_{SVC} aktivna i reaktivna snaga DG i SVC, respektivno. Ukoliko su ovi uređaji priključeni na neku proizvoljnu sabirnicu i , tada oni direktno utiču na bilans aktivnih i reaktivnih snaga, pa se jednačine (4.1.2.1 – 4.1.2.2) sada zapisuju na sljedeći način:

$$P_{Gi} + P_{DG} - P_{Li} - V_i \sum_{j=1}^{N_b} V_j [G_{ij} \cos(\delta_{ij}) + B_{ij} \sin(\delta_{ij})] = 0, \quad (4.3.1)$$

$$Q_{Gi} + Q_{SVC} - Q_{Li} - V_i \sum_{j=1}^{N_b} V_j [G_{ij} \sin(\delta_{ij}) - B_{ij} \cos(\delta_{ij})] = 0. \quad (4.3.2)$$

Što se tiče TCSC, on se priključuje redno sa prenosnim vodom. Ako je X_{TCSC} reaktansa TCSC, tada se njegovim priključivanjem između čvorova i i j mijenjaju otočni parametri voda shodno sljedećim relacijama:

$$G_{ij} = \frac{R_{ij}}{R_{ij}^2 + (X_{ij} + X_{TCSC})^2}, \quad (4.3.3)$$

$$B_{ij} = \frac{X_{ij} + X_{TCSC}}{R_{ij}^2 + (X_{ij} + X_{TCSC})^2}. \quad (4.3.4)$$

Nakon definisanja modifikovanog OPF-a, problem optimalne, pojedinačne ili koordinisane, alokacije i dimenzionisanja DG, SVC i TCSC moguće je riješiti pomoću nekog NLP algoritma. Prvo bi se odabrala fiksna lokacija priključivanja uređaja, nakon čega slijedi rješavanje modifikovanog OPF-a. Kao rezultat dobiju se optimalne snage DG i SVC, optimalna reaktansa TCSC i optimalna vrijednost funkcije cilja. Nakon što se razmotri svaki mogući slučaj mjesta priključivanja navedenih uređaja, vrši se odabir one lokacije koja daje minimalnu vrijednost funkcije cilja.

Glavni nedostatak prethodnog metoda je vrijeme izvršavanja optimizacije. Naime, što je veći broj čvorova i grana u mreži, raste broj potencijalnih lokacija za priključivanje uređaja. Samim tim raste i broj iteracija u kojima se rješava OPF, što čini pojedinačnu ili koordinisanu alokaciju više uređaja vremenski prezahtjevnom, a u nekim slučajevima prekično nerješivom.

Iz tog razloga u ovom radu se predlaže MINLP formulacija problema. Ideja je proširivanje do sada izloženih jednačina OPF-a sa sljedećim setom ograničenja:

$$P_{DG}(i) \leq P_{DG_{max}} \cdot L_{DG}(i) \cdot M_{DG}(i) / M_{max}, \quad (4.3.5)$$

$$Q_{SVC}(i) \leq Q_{SVC_{max}} \cdot L_{SVC}(i) \cdot M_{SVC}(i) / M_{max}, \quad (4.3.6)$$

$$X_{TCSC}(i, j) \leq k \cdot X_{ij} \cdot L_{TCSC}(i, j) \cdot M_{TCSC}(i, j) / M_{max}, \quad (4.3.7)$$

U relacijama (4.3.5 – 4.3.7), $L_{DG}(i)$, $L_{SVC}(i)$ i $L_{TCSC}(i, j)$ predstavljaju binarne promjenjive kojima se modeluje logika priključivanja uređaja na mrežu. Ukoliko promjenjiva ima vrijednost 1, DG i SVC su priključeni u čvoru i , odnosno TCSC je priključen u grani između čvorova i i j . Ako je vrijednost binarne promjenjive 0, razmatrani uređaj nije priključen na datoj lokaciji. Cjelobrojne promjenjive $M_{DG}(i)$, $M_{SVC}(i)$ i $M_{TCSC}(i, j)$ uzimaju vrijednost u rasponu od 0 do M_{max} , i služe za diskretizaciju procesa optimalnog dimenzionisanja DG, SVC i TCSC.

Uvođenjem binarnih promjenjivljih zaobilazi se „ručno“ priključivanje uređaja na mrežu i izbjegava iterativno rješavanje OPF-a. Odnosno, prepušta se da MINLP algoritam odredi optimalnu lokaciju priključivanja uređaja kako bi se minimizovala zadata fukcija cilja. Diskretizacija procesa optimalnog dimenzionisanja ima za cilj relaksiranje pretraživanja optimalne snage, odnosno reaktanse, razmatranih uređaja.

Bitno je napomenuti da se prilikom rješavanja optimalne alokacije i dimenzionisaja najčešće razmatra fiksni broj uređaja priključenih na mrežu. Pošto vrijednost 1 na mjestu i , odnosno i, j , binarnih promjenjivih (4.3.5 – 4.3.7) znači da je uređaj priključen na mrežu, fiksiranje broja uređaja postiže se kroz ograničavanje vrijednosti sume promjenjivih $L_{DG}(i)$ i $L_{SVC}(i)$ po svim čvorovima i , odnosno vrijednosti sume promjenjive $L_{TCSC}(i, j)$ po svim granama i, j . Prethodno se matematički definiše na sljedeći način:

$$sum(i, L_{DG}(i)) = N_{DG}, \quad (4.3.8)$$

$$sum(i, L_{SVC}(i)) = N_{SVC}, \quad (4.3.9)$$

$$sum(i, j, L_{TCSC}(i, j)) = N_{TCSC}, \quad (4.3.10)$$

pri čemu su N_{DG} , N_{SVC} i N_{TCSC} , brojevi priključenih DG, SVC i TCSC, respektivno.

5. Softverski paket GAMS

U periodu od 1950. do 1960. napravljen je značajan iskorak u razvoju softverskih alata za rješavanje kompleksnih problema matematičkog programiranja [69]. Međutim, jako mali broj istih našao je svoju praktičnu primjenu. Glavni razlog je činjenica da je u toku procesa modelovanja mnogo više vremena bilo potrebno za spremanje podataka i generisanje izlaznog izvještaja, nego za sam proces rješavanja problema.

Konkretno, procedura modelovanja se sastojala od detaljne analize i sortiranje podataka, nakon čega bi uslijedilo pisanje programskog koda koji bi transformisao podatke u formu koja je prikladna za odabrani jezik matematičkog programiranja. Ovo je značajno usložnjavalo proces modelovanja, pri čemu je u slučaju modela koji zahtjevaju veliki broj ulaznih podataka bilo teško pronaći učestale greške koje su se pojavljivale u programskom kodu za transformaciju podataka [69].

General Algebraic Modeling Systems – GAMS predstavlja softverski alat za matematičko modelovanje i rješavanje optimizacionih problema, koji je dizajniran sa ciljem prevazilaženja prethodno navedenih poteškoća u matematičkom programiranju. GAMS se sastoji od korisničkog interfejsa, sopstvenog jezika za algebarsko modelovanje (eng. *Algebraic Modeling Language* – AML), kao i od velikog broja ugrađenih solvera za rješavanje problema. Neke od prednosti GAMS-a u odnosu na prethodno dizajnirane softverske alate su [69]:

- nudi programski jezik visokog nivoa koji omogućava kompaktno predstavljanje kompleksnih optimizacionih modela,
- reprezentacija modela je u potpunosti nezavisna od metoda rješavanja,
- omogućava nedvosmisleno definisanje algebarskih relacija,
- transformacije podataka su definisane algebarski i koncizno, pri čemu se sve informacije potrebne za razumijevanje modela mogu naći u jednom dokumentu.

U ovom poglavlju biće opisani osnovni elementi GAMS-ovog okruženja i njegov ugrađeni BONMIN solver.

5.1. Elementi okruženja GAMS-a

Sastavni elementi GAMS-ovog okruženja koji služe za pisanje programskog koda su [69]:

1. *Skupovi* – osnovni gradivni blokovi koji služe za definisanje indeksa u algebarskoj reprezentaciji modela,
2. *Podaci* – pojam koji se odnosi na numeričke podatke: skalare, parametre i tabele,
3. *Promjenjive* – entiteti čije su vrijednosti nepoznate sve dok se optimizacioni problem ne riješi,
4. *Jednačine* – služe za definisanje matematičkih relacija modela,
5. *Iskaz modela* – služi za grupisanje svih jednačina u jedinstven model,
6. *Iskaz za rješavanje* – zahtjeva od GAMS-a da riješi prethodno definisani model,

7. *Izlaz* – tekstualni dokument koji sadrži podatke o: vrijednostima promjenjivih, vrijednosti funkcije cilja, performansama odabranog solvera, itd.

U nastavku poglavlja navedeni elementi biće detaljnije pojašnjeni.

5.1.1. Skupovi

Unutar GAMS-a skupovi (eng. *sets*) ekvivalentni su indeksima u algebri i predstavljaju osnovne gradivne blokove u svakom programskom kodu [69]. Pošto skup čini niz stavki njima se može istovremeno upravljati, pri čemu su uključene operacije kao što su sabiranje, prolazak kroz petlju, itd.

Skupovi u GAMS-u mogu biti jednostavni, dimanički, „*singelton*“, višedimenzioni i univerzalni [69]. Pošto su za pisanje programskog koda u ovom radu isključivo korišćeni jednostavni skupovi isti se razmatraju u nastavku poglavlja.

Primjer deklarisanja prostog skupa u GAMS-u predstavljen je kodom 5.1.1.1. Ključna riječ `Set` označava da deklarirani element predstavlja skup, nakon čega slijedi ime skupa u konkretnom primjeru `E`. Nakon definisanja naziva skupa opciono je moguće u vidu stringa napisati opis ili komentar koji dodatno pojašnjava definisani skup (kod 5.1.1.1). Elementi skupa definišu se unutar kosih zagrada, pri čemu se svaki novi element odvaja zarezom. U kodu 5.1.1.1 elementi skupa `E` su `a`, `b`, `c`, `d`.

Kod 5.1.1.1.

```
Set E "opis, komentar" / a, b, c, d /;
```

Elementi skupa ne moraju biti zasebno definisani, već se skup može definisati kao sekvenca [69]. Za sekvencioniranje se koristi operator `*` čime se zaobilazi potreba za zasebnim unošenjem svakog elementa skupa. U okviru koda 5.1.1.2 deklariran je sekvencirani skup `t`, koji predstavlja vremenski interval od 24 časa. Skup `t` sadrži ukupno 24 elementa: `t1`, `t2`, `t3`, ... `t24`.

Sekvenca se formira tako što GAMS posmatra razlike između prvog i posljednjeg elementa skupa. Ukoliko je razlika numerička, dolazi do automatskog formiranja rastućeg, ili opadajućeg, niza elemenata. Ukoliko postoji ne-numerička razlika između početnog i krajnjeg elementa skupa, sekvenca se neće formirati i GAMS prijavljuje grešku.

Kod 5.1.1.2.

```
Set t "vrijeme" / t1 * t24 /;
```

5.1.2. Podaci

Kao što je prethodno naglašeno pojam podaci se isključivo odnosi na numeričke podatke koji se u GAMS-vom okruženju definišu u vidu skalara, parametara ili tabela.

Skalar predstavlja zasebnu numeričku vrijednost koja nije definisana na nekom skupu [69]. U kodu 5.1.2 definisan je skalar `g` koji predstavlja gravitacionu konstantnu. Nakon ključne riječi `Scalar` navodi se ime skalara i opciono opis ili komentar. Numerička vrijednost skalara unosi se unutar kosih zagrada, kao što je i prikazano u kodu 5.1.2.1.

Kod 5.1.2.1.

```
Scalar g "gravitaciona konstanta" / 9.81 /;
```

Parametar u GAMS-u predstavlja numeričku listu vrijednosti koja može biti definisana na jednom ili više skupova [69]. Primjer deklarisanja parametra u GAMS-u prikazan je u okviru koda 5.1.2.2. Ključna riječ je `Parameter`, nakon čega se definiše ime parametra i skupovi na kojima je isti definisan. Vrijednosti parametra za konkretne članove skupa upisuju se unutar kosih zagrada.

Konkretno u kodu 5.1.2.2, parametar `plate` definisan je na skupu `zaposleni`. Ako se za konkretan član skupa ne specificira vrijednost parametra, GAMS automatski na tom mjestu upisuju vrijednost 0. U kodu 5.1.2.3 prikazana je deklaracija identičanog parametara, samo što je ovoga puta isti definisan na dva skupa: `zaposleni` i `sektor`.

Kod 5.1.2.2.

```
Set zaposleni / Marko, Jelena /;

Parameter plate(zaposleni) /
  Marko 500
  Jelena 1000 /;
```

Kod 5.1.2.3.

```
Set zaposleni / Marko, Jelena /;
Set sektor / transport, finansije /;

Parameter plate(zaposleni, sektor) /
  Marko .transport 500
  Jelena .finansije 1000 /;
```

Tabela se koristi za prikazivanje tabelarno orijentisanih numeričkih podataka, koji su definisani na dva ili više skupova [69]. Ključna riječ u GAMS-u za definisanje ovog tipa podatka je `Table`, dok se, za razliku od parametara, vrijednosti tabele za konkretne elemente skupa ne definišu unutar kosih zagrada. Primjer tabele `platna_lista`, koja je deklarirana na skupovima `zaposleni` i `atribut`, predstavljen je u kodu 5.1.2.4.

Kod 5.1.2.4.

```
Set zaposleni / Marko, Jelena /;
Set atribut / prisustvo, plata /;

Table platna_lista(zaposleni, atribut)
  prisustvo plata
  Marko 100 500
  Jelena 100 1000
;
```

Prilikom deklarisanja tabele u GAMS-u neophodno je voditi računa o sljedećem [69]:

- tabela mora imati makar dvije dimenzije, odnosno, neophodno je da tabela bude definisana na makar dva skupa,

- za razliku od skupova, skalara i parametara, samo jedan element tipa tabele može biti inicijalizovan nakon ključne riječi `Table`,
- pozicije numeričkih vrijednosti u jednoj koloni moraju se poklapati sa pozicijom naziva iste,
- konkretna kolona se može pojaviti samo jednom u tabeli,
- elementi koji čine jedan red tabele moraju biti u istoj liniji.

5.1.3. Promjenjive

Promjenjive kao elementi GAMS-ovog okruženja predstavljaju sastavni dio matematičke formulacije problema, pri čemu njihove vrijednosti nijesu poznate do samog kraja izvršavanja programskog koda. Ključne riječi koje se koriste prilikom deklarisanja osnovnih tipovi promjenjivih u GAMS-u su [69]:

- `Variables` – realne promjenjive koje uzimaju vrijednost od $-\infty$ do $+\infty$,
- `Integer Variables` – cjelobrojne promjenjive, uzimaju diskretne vrijednosti od 0 do $+\infty$,
- `Binary Variables` – binarna promjenjiva koja može imati vrijednost 0 ili 1.

Primjer deklaracije prethodno navedenih tipova promjenjivih dat je u okviru koda 5.1.3.1. Iz prikazanog koda može se uočiti da promjenjive mogu biti deklarisanje na jednom ili više skupova ($e(i)$ i $u(i, j)$), kao i da promjenjive ne moraju biti deklarisanje ni na jednom skupu (k).

Kod 5.1.3.1.

```
Set i / i1 * i10 /;
Set j / j1 * j10 /;

Variable u(i,j);
Binary Variable e(i);
Integer Variable k;
```

Manipulacija sa vrijednostima promjenjivih u GAMS-ovom okruženju može se izvršiti tako što se uz naziv promjenjive koriste sljedeći sufiksi [69]:

- `.lo` – definiše minimalnu vrijednost promjenjive,
- `.up` – definiše maksimalnu vrijednost promjenjive,
- `.fx` – fiksiranje vrijednosti promjenjive,
- `.l` – omogućava pristup trenutnoj vrijednosti promjenjive,
- `.m` – definiše marginalnu vrijednost promjenjive.

5.1.4. Jednačine

Jednačine služe za algebarsku reprezentaciju funkcije cilja i nelinearnih ograničenja u GAMS-ovom okruženju. Sastavni elementi jednačina su matematički operatori, skupovi, podaci i naravno promjenjive.

GAMS-ovo okruženje sadrži sljedeće operatore za definisanje relacija između lijeve i desne strane jednačine [69]:

- =e= operator jednakosti,
- =l= operator manji od (lijeva strana mora biti manja od desne),
- =g= operator veće od (lijeva strana mora biti veća od desne).

Pored navedenih operatora GAMS podržava i operatore osnovnih matematičkih operacija: +, -, *, i /.

Prilikom definisanja jednačina razdvaja se programski kod za deklaraciju i kod u kojem se zapisuje konkretna algebarska reprezentacija jednačine. Ključna riječ u GAMS-u za deklarisanje jednačine je `Equation`, nakon čega se definiše naziv jednačine. Primjer deklarisanja i zapisivanje sistema jednačina sa četiri nepoznate dat je u kodu 5.1.4.1.

Kod 5.1.4.1.

```
Variables x1, x2, x3, OF;
Equations eq1, eq2, eq3, eq4;

eq1 .. x1+2*x2 =g= 3;
eq2 .. x3+x2 =g= 5;
eq3 .. x1+x3 =e= 5;
eq4 .. x1+3*x2+3*x3 =e= OF;
```

U kodu 5.1.4.1 predstavljen je slučaj kada promjenjive nijesu difisane na nekom skupu. Ukoliko bi to bio slučaj, nakon naziva jednačine u dijelu koda za algebarsko definisanje neophodno je dodati njen domen. Domen se definiše tako što se svi skupovi nad kojim su definisane promjenjive koje čine jednačinu postave unutar zagrade [69]. Primjer jednačine sa definisanim domenom dat je u okviru koda 5.1.4.2.

Kod 5.1.4.2.

```
eq1(i,j) .. x3(i,j) = x1(i,j) + 2*x2(i,j);
```

5.1.5. Iskazi

Kao što je naglašeno na početku poglavlja u GAMS-u postoje dva tipa iskaza: iskaz modela i iskaz za rješavanje. Iskaz modela služi za grupisanje definisanih jednačina u jedinstven model, dok iskaz za rješavanje zahtjeva od GAMS-a da riješi prethodno definisani optimizacioni model [69].

Primjer deklaracije iskaza modela dat je kodom 5.1.5.1. Nakon ključne riječi `Model` slijedi definisanje naziva modela. Jednačine koje će biti uključene u okviru model definišu se nakon naziva unutar kosih zagrada. Svaka jednačina može biti navedena posebno (`primjer1`), pri čemu postoji ključna riječ `all` kojom se sve prethodno definisane jednačine uključuju u model (`primjer2`).

Kod 5.1.5.1.

```
Model primjer1 / eq1, eq2, eq3 /;
Model primjer2 / all /;
```

U kodu 5.1.5.2 dat je primjer deklaracije iskaza za rješavanje modela. Nakon ključne riječi `Solve` daje se naziv modela koji je potrebno riješiti. Nakon toga slijedi ključna riječ `using` i definisanje tipa modela. U slučaju programskog koda 5.1.5.2 tip modela je linearna (eng. *Linear Programming* – LP), međutim GAMS podržava i druge tipove kao što su: NLP, MILP, MINLP, itd. Na kraju iskaza definiše se koja od deklariranih promjenjivih predstavlja funkciju cilja. Pomoću ključne riječi `min`, odnosno `max`, ispred funkcije cilja definiše da li je rješenja problema minimum, odnosno maksimum iste.

Kod 5.1.5.2.

```
Solve model1 using LP min OF;
```

5.1.6. Izlaz

Izlaz iz GAMS-a predstavlja tekstualni fajl koji se otvara unutar korisničkog interfejsa nakon rješavanje problema. Izlazni fajl sadrži podatke kao što su: performanse odbranog solvera, vrijeme i broj iteracija koje su potrebne za rješenje problema, koji je karakter dobijenog rješenja, vrijednosti definisanih promjenjivih i drugo [69].

Programski kod 5.1.6.1 predstavlja način za definisanja promjenjivih čije će vrijednosti biti prikazane u izlaznom dokumentu. Ključna riječ je `Display` nakon koje se navode sve promjenjive čije vrijednosti treba prikazati. Bitno je napomenuti da je uz promjenjive neophodno koristiti sufiks `.1` jer će u suprotnom GAMS prijaviti grešku.

Kod 5.1.5.2.

```
Display OF.1, x.1, y.1;
```

5.2. Ugrađeni BONMIN solver

BONMIN (eng. *Basic Open-source Nonlinear Mixed Integer programming*) predstavlja jedan od GAMS-ovih ugrađenih solvera za rješavanje MINLP optimizacionih problema. BONMIN ima mogućnost rješavanja problema sa dvostruko diferencijabilnim funkcijama, dok verzija solvera u sklopu GAMS podržava: kontinualne, binarne i cijelobrojne promjenjive [69].

Odabir BONMIN-a kao solvera za rješavanje problema može se izvesti shodno programskom kodu 5.2.1. Nakon ključne riječi `Option` potrebno je navesti tip modela, koji je u ovom slučaju MINLP. Zatim slijedi znak jednakosti i naziv željenog solvera.

Kod 5.2.1.

```
Option MINLP = BONMIN;
```

Za rješavanje MINLP problema BONMIN implementira sljedeće algoritme [69]:

1. B-BB – klasični *branch-and-bound* (B&B) algoritam koji pretražuje rješenje u svakom čvoru stabla i sprovodi „grananje“ čvorova,
2. B-OA – algoritam „spoljne“ aproksimacije koji se zasniva na rješavanju MIP relaksacije i NLP podproblema,

3. B-QG – predstavlja tip algoritma spoljne aproksimacije koji se zasniva na *brach-and-cut* metodu,
4. B-Hyb – hibridni metod koji kombinuje B-BB i B-QG algoritme, pri čemu se u svakom čvoru stabla rješava nelinearni ili linearni podproblem,
5. B-ECP – Kelijev algoritam „spoljne“ aproksimacije koji predstavlja nadogranju FiMNT solvera,
6. B-iFP – iterativni algoritam koji traži izvodljivo rješenje MIP problema.

U programskom kodu moguće je definisati koja će od navedenih metoda biti implementirana. Primjer implementacije B-BB algoritma data je u okviru koda 5.2.2.

Kod 5.2.2.

```
bonmin.algorithm B-BB;
```

Prema preporukama iz literature, ukoliko je MINLP problem nekonveksan predlaže se upotreba B-BB algoritma [69]. Shodno tome u nastavku poglavlja biće opisane osnovne karakteristike *brach-and-bound* algoritma.

5.2.1. Branch-and-bound algoritam

Branch-and-bound (B&B) algoritam zasniva se na konceptima grananja i ograničavanja [68]. Grananje predstavlja dijeljenje skupa izvodljivih rješenja na veći broj manjih podskupova, dok ograničavanje podrazumjeva rješavanje podproblema čime se formiraju donja i gornja granica na vrijednost izvodljivog rješenja MINLP problema.

Pseudokod 5.2.1.1.

1. Inicijalizacija.

$\mathcal{L} \leftarrow \{(L_I, U_I)\}$, $z_U = \infty$, $x^* \leftarrow \emptyset$.

2. Provjera?

Ako je $\mathcal{L} = \emptyset$ onda je x^* optimalno rješenje problema.

3. Selekcija.

Izdvojiti i izbrisati podproblem $N^i = (l_i^i, u_i^i)$ iz \mathcal{L} .

4. Evaluacija.

Rješavanje $NLPR(l_i^i, u_i^i)$. Ukoliko je rješenje neizvodljivo vrati se na korak 1, u sprotnom z_{NLPR} je optimalna vrijednost f-je cilja, dok je \hat{x}^i optimalno rješenje.

5. Odstranjivanje.

Ako je $z_{NLPR} \geq z_U$ vrati se na korak 1. Ukoliko je \hat{x}^i razlomak slijedi korak 5. Za ostale slučajeve $z_U \leftarrow z_{NLPR}$ i $x^* \leftarrow \hat{x}^i$, iz stabla se odstranjuju svi podproblemi za koje važi da je $z_L^j \geq z_U$ i algoritam se vraća na korak 1.

6. Grananje.

N^i se razdvaja na podprobleme, odnosno čvorove $N^{i_1}, N^{i_2}, \dots, N^{i_k}$, pri čemu se navedeni čvorovi dodaju stablu \mathcal{L} . Vрати se na korak 1.

Koraci B&B algoritma predstavljani su u okviru pseudokoda 5.2.1.1 [68]. Prvi korak je inicijalizacija stabla \mathcal{L} čija su donja i gornja granica L_l i U_l , respektivno. Gornja granica se inicijalizuje na vrijednost beskonačno, dok se donja granica dobija kao rješenje kontinualne relaksacije MINLP problema. Nakon toga slijedi drugi korak kojim se provjerava da li je rješenje optimalno, pri čemu je to ona vrijednost cjelobrojne promjenjive x za koju je stablo \mathcal{L} prazan skup.

U koraku tri vrši se selekcija podproblema N^i iz stabla \mathcal{L} koji će se rješavati. Bitno je napomenuti da se pored naziva podproblem češće u literaturi primjenjuje termin čvor. Nakon selekcije čvora slijedi četvrti korak evaluacije. Ovdje se za odabrani čvor N^i , koji ima definisane granice (l_j^i, u_j^i) , rješava NLP relaksacija (poglavlje 4.2.2.2). Ukoliko ne postoji izvodljivo rješenje algoritam se vraća na korak 1, dok se u suprotnom optimalno rješenje relaksacije z_{NLPR} postavlja kao gornja granica rješenja MINLP problema.

Ako se nakon rješavanja NLP relaksacije u koraku 4 pronađe izvodljivo rješenje, ili ako vrijednost rješenja prelazi gornju granicu z_U , tada se u koraku 5 vrši odstranjivanje konkretnog čvora N^i i algoritam se ponovno vraća na korak 1. Međutim, ukoliko nijedan od prethodno navedenih uslova nije ispunjen nemoguće je odstraniti čvor već algoritam započinje proces grananje.

U koraku šest prikazanog B&B algoritma vrši se takozvano „dihomično“ grananje [68]. Suštinski, čvor N^i se grana tako što se mijenjaju ograničenja jedne cjelobrojne promjenjive na osnovu vrijednosti rješenja NLP relaksacije \hat{x}^i . Za konkretno $j \in I$ dodaju se dva nova čvora, pri čemu za jedan važi da je $x_j \leq \hat{x}_j$, dok za drugi čvor važi ograničenje $x_j \leq \hat{x}_j$. Postupak se ponavlja sve dok se ne odstrane svi čvorovi stabla, što prema koraku 2 znači da je pronađeno optimalno rješenje MINLP problema.

6. Simulacioni rezultati

U ovom poglavlju biće predstavljeni simulacioni rezultati pojedinačne i koordinisane optimalne alokacije i dimenzionisanja DG, SVC i TCSC, koji su dobijeni predloženim BONMIN solverom. Simulacija je izvršena na IEEE 33-čvornoj radijalnoj testnoj distributivnoj mreži. Linijski dijagram, parametri dalekovoda i podaci o potrošačima za razmatranu testnu mrežu izloženi su u Prilogu 1 [70].

Prilikom simulacije uzete su u obzir sljedeće pretpostavke [71-72]:

- Dozvoljena vrijednost napona sabirnica kreće se u opsegu od 0.95 p.u do 1 p.u,
- Fazni stavovi napona sabirnica ne smiju izaći iz opsega od $-\pi/2$ rad do $\pi/2$ rad,
- Za balansni čvor odabrana je sabirnica 1 IEEE 33-čvorne mreže,
- Po jedan DG i SVC mogu biti priključeni na istu sabirnicu, pri čemu ta sabirnica ne može biti balansni čvor,
- Samo jedan TCSC može biti priključen na istu granu u datom trenutku,
- Podrazumjeva se da DG proizvodi samo aktivnu snagu, pri čemu njena maksimalna vrijednost ne smije biti veća od ukupne aktivne potrošnje konzuma,
- Reaktivna snaga SVC u kapacitivnom režimu ima maksimalnu vrijednost 1.2 MVar, dok, se induktivni režim rada neće razmatrati,
- Nivo kompenzacije reaktanse TCSC u kapacitivnom režimu iznosi 75%, dok se induktivni režim rada neće razmatrati.

6.1. Optimalna alokacija i dimezionisanje DG

U Tabeli 6.1.1 prikazani su rezultati optimalne alokacije i dimenzionisanja jednog, dva i tri DG, pri čemu je P_{DG} optimalna snaga generatora, dok je P_{loss} minimalna vrijednost gubitaka [71]. Pored rezultata koji su dobijeni primjenom predloženog BONMIN solvera prikazani su i rezultati iz dostupne lietarature, gdje su autori za rješavanje problema upotrebljavali metaheurističke ili hibridne algoritme.

Rezultati prikazani u Tabeli 6.1.1 pokazuju da BONMIN solver, u poređenju sa navedenim metaheurističkim i hibridnim algoritmima, daje značajno bolje rezultate u pogledu minimalne vrijednosti gubitaka (minimalne vrijednosti gubitaka dobijene BONMIN solverom prikazane su u bold stilu).

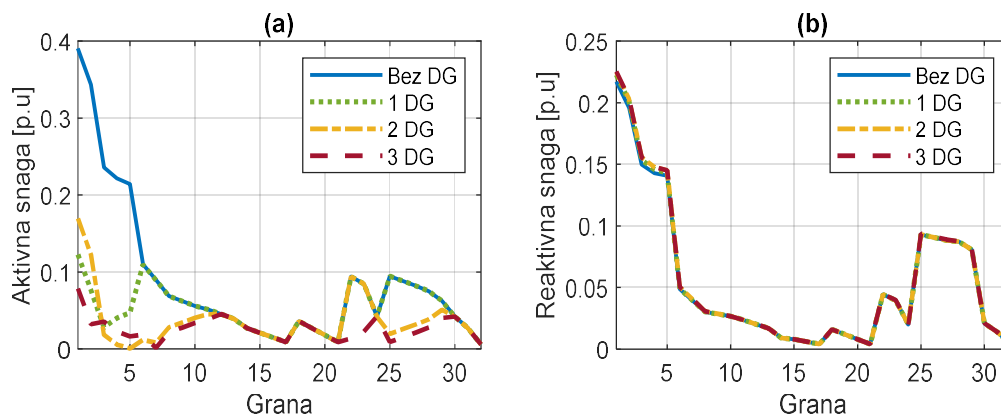
Ukoliko se minimalni gubici iz Tabele 6.1.1 uporede sa inicijanim gubicima u mreži (Prilog 1) jasno je da integracija DG značajno smanjuje gubitke u prenosu. Sa jednim priključenim DG postiže se smanjenje gubitaka za 48.42 %, dok sa dvije i tri priključene DG jedinice smanjenje gubitaka iznosi 58.58 % i 65.44 % [71]. Zaključuje se da se efekat smanjivanja gubitaka povećava sa povećanjem broja optimalno lociranih DG.

Dodatno, ukoliko se uporedno posmatraju optimalne vrijednosti snage i minimalni gubici iza Tabele 6.1.1, u sva tri navedene slučaja simulacije, jasno se uočava da je sa aspekta smanjivanja gubitaka povoljnije priključiti više DG jedinica manje snage, nego jednu DG jedinicu veće snage.

Tabela 6.1.1. Rezultati optimalne alokacije i dimenzionisanja DG dobijeni BONMIN solverom, metaheurističkim i hibridnim algoritmima.

Broj DG	Metod/Algoritam	Lokacije (sabirnice)	P_{DG} (MW)	P_{loss} (kW)
1	BONMIN	6	2.5845	99.06
	PSO [3]	6	2.5743	103.90
	PPSO [3]	6	2.5743	103.90
	PSOCFA [4]	6	2.5752	103.90
	BSOA [5]	6	1.8575	118.10
	ALOA [8]	6	2.4500	103.10
	HSA-PABC [19]	6	2.5900	111.02
	PIPSO-SQP [18]	6	2.5980	111.03
	ALGA [9]	6	2.5800	105.48
	Sh-BAT [17]	6	2.6300	103.78
2	BONMIN	12, 30	0.9645, 1.1344	79.56
	PSO	13, 28	0.6987, 1.2623	86.60
	PPSO	13, 30	0.6986, 1.2623	86.60
	PSOCFA	14, 29	0.7876, 1.2487	86.20
	BSOA	13, 31	0.8800, 0.9240	89.30
	ALOA	13, 30	0.8500, 1.1911	82.60
	PIPSO-SQP	13, 30	0.8400, 1.1400	87.71
	Sh-BAT	13, 30	0.8610, 1.1800	85.75
3	BONMIN	12, 24, 30	0.8976, 1.0701, 1.0280	66.38
	PSO	10, 23, 29	0.9337, 1.0667, 0.9872	72.40
	PPSO	14, 24, 30	0.7538, 1.0989, 1.0711	71.40
	PSOCFA	10, 25, 33	1.0491, 0.8786, 0.8049	76.00
	HSA-PABC	14, 24, 30	0.7550, 1.0730, 1.0680	72.81
	Sh-BAT	13, 25, 30	0.7900, 0.8490, 1.1900	72.13

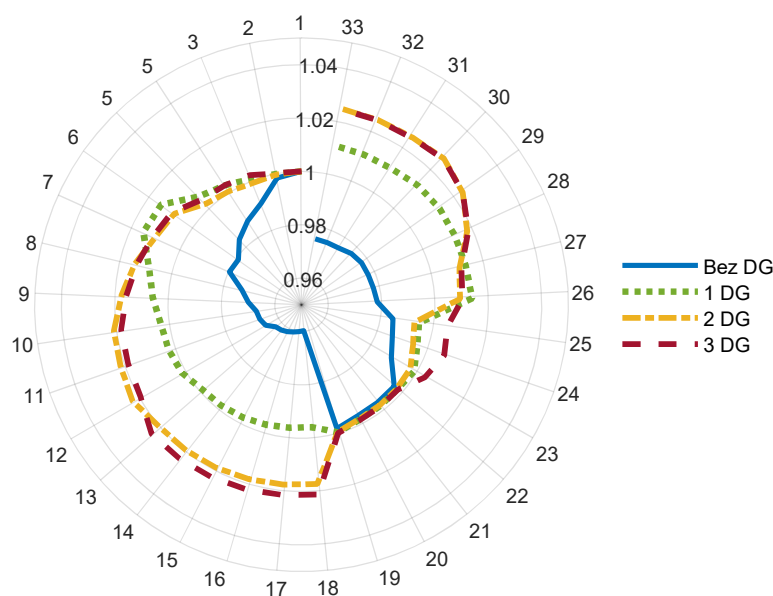
Na slici 6.1.1 prikazani su tokovi aktivnih i reaktivnih snaga prije i nakon priključivanja DG [71]. Sa slike 6.1.1.a zaključuje se da priključivanje DG značajno rasterećuje vodove sa aspekta prenosa aktivne snage, što je u skladu sa smanjivanjem gubitaka. Tokovi reaktivnih snaga neće se značajno promijeniti jer razmatrani DG injektira isključivo aktivnu snagu (slika 6.1.1.b).



Slika 6.1.1. Tokovi (a) aktivnih i (b) reaktivnih snaga, prije i nakon priključivanja DG.

Naponske prilike prije i nakon priključivanja DG prikazane su na slici 6.1.2 [71]. Na slici se jasno uočava da naponi i nakon priključivanja DG ostaju unutar definisanih granica (0.95 do 1 p.u). Iz prezentovanih rezultata može se zaključiti da nakon priključivanja DG dolazi do poboljšanja naponskih prilika u mreži. Najpovoljnije prilike su u slučaju optimalnog priključivanja jednog DG, jer su naponi u sabirnicama najbliži nominalnoj vrijednosti (slika 6.1.2).

Ipak, iako rezultati pokazuju da se nakon priključivanja DG naponske prilike poboljšavaju, ova konstatacije se ne može generalizovati. Razlog je što u realnim sistemima obnovljivi DG imaju intermitentan karakter proizvodnje, što dovodi do fluktuacije aktivne snage, a samim tim i do promjena u naponima sabirnica [71]. Navedeni problem može se riješiti apsorbovanjem ili injektiranjem reaktivne snage primjenom FACTS uređaja što će se diskutovati u nastavku poglavlja. Alternativno rješenje je priključivanje uređaja za skadištenje električne energije. Međutim, prethodno navedeno izlazi iz domena istraživanja ovog rada.



Slika 6.1.2. Naponske prilike prije i nakon priključivanja DG.

6.2. Optimalno alociranje i dimenzionisanje SVC i TCSC

Rezultati optimalne alokacije i dimenzionisanja SVC i TCSC dobijeni predloženim BONMIN solverom predstavljani su u Tabeli 6.2.1, gdje je Q_{SVC} optimalna snaga SVC i X_{TCSC} optimalna reaktansa TCSC [72]. Kao i u prethodnom poglavlju razmatrani su slučajevi alokacije i dimenzionisanja jednog, dva i tri FACTS uređaja.

Prikazani rezultati pokazuju da se minimalni gubici postižu u slučaju optimalnog alociranje 3 TCSC. Priključivanjem jednog TCSC inicijalni gubici se smanjuju za 32.63 %, dok se priključivanjem dva i tri TCSC inicijalni gubici smanjuju za 42.52 % i 50.87 %, respektivno. Prethodno pokazuje da sa povećanjem broja priključenih TCSC dolazi do značajnog smanjenja gubitaka u prenosu.

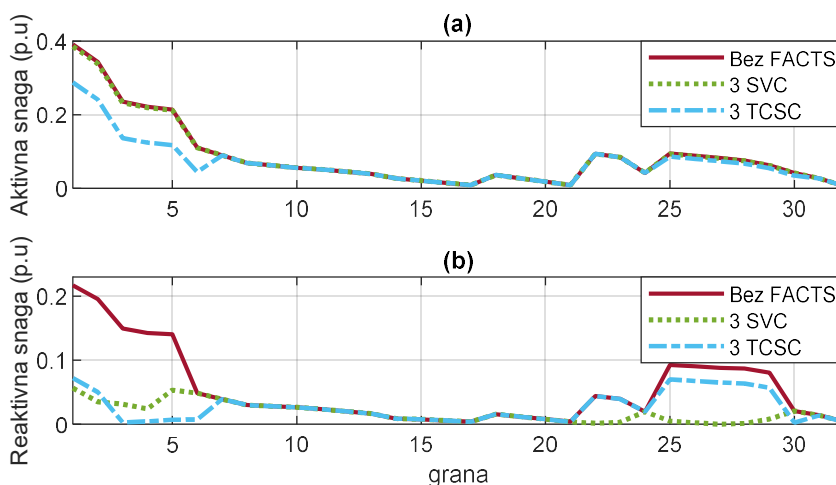
Što se tiče optimalne alokacije i dimenzionisanja SVC, rezultati u Tabeli 6.2.1 pokazuju da alokacija jednog, dva i tri SVC dovodi do smanjenja inicijalnih gubitaka za 23.56 %, 23.8 % i 25.77 %, respektivno. Zaključuje se da povećavanje broja optimalno lociranih SVC nema značajan uticaj na smanjenje gubitaka. Upoređujući rezultate u slučaju optimalnog alociranja SVC i TCSC jasno je da je sa aspekta minimizacije gubitaka u razmatranoj radijalnoj distributivnoj mreži mnogo povoljnije optimalno priključivanje TCSC.

Tabela 6.2.1. Rezultati optimalne alokacije i dimenzionisanja SVC i TCSC primjenom BONIMN solvera.

Alokacija i dimenzionisanje SVC			
Broj	Lokacija (sabirnica)	Q_{SVC} (MVar)	P_{loss} (kW)
1	30	1.1346	146.82
2	24, 30	0.5221, 1.0244	146.35
3	5, 24, 30	0.3172, 0.4278, 0.8897	142.58
Alokacija i dimenzionisanje TCSC			
Broj	Lokacija (grana)	X_{TCSC} (Ω)	P_{loss} (kW)
1	6	-0.4642	129.41
2	6, 30	-0.4642, -0.7222	110.41
3	5, 6, 30	-0.5302, -0.4642, -0.7222	94.37

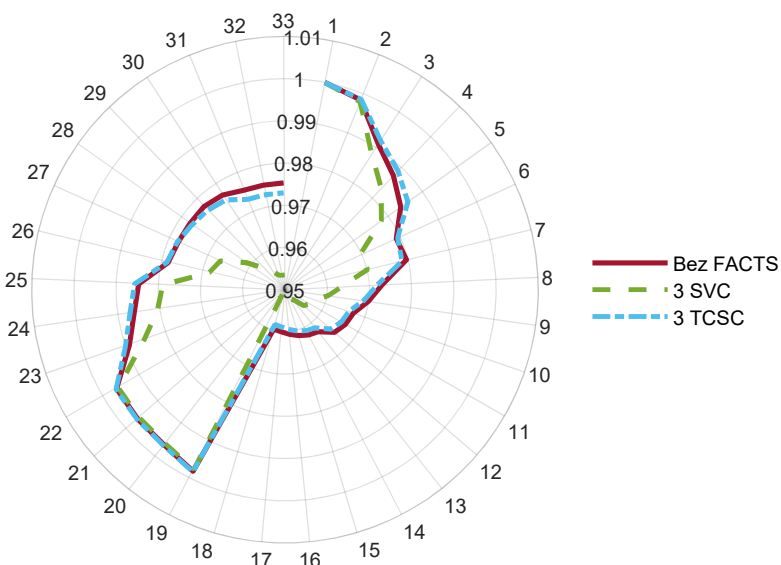
Tokovi aktivnih i reaktivnih snaga prije i nakon priključivanja SVC i TCSC prikazani su na slici 6.2.1 [72]. Na slici su pored inicijalnog slučaja prikazani i oni slučajevi priključivanja SVC i TCSC u kojima se postižu minimalne vrijednosti gubitaka. Analizirajući tokove aktivnih snaga na slici 6.2.1.a jasno je da TCSC doprinosi rasterećivanju prenosnih vodova, dok je efekat SVC neznatan. Ovakvi rezultati su očekivani s obzirom da SVC kontrolira isključivo tokove reaktivnih snaga dok TCSC direktno vrši kompenzaciju reaktanse voda.

Što se tiče tokova reaktivnih snaga prikazanih na slici 6.2.1.b, jasno je da oba razmatrana uređaja doprinose smanjenu prenesene reaktivne snage. Međutim, znatno izraženije rasterećenje vodova se postiže priključivanjem SVC pošto oni direktno injektiraju reaktivnu snagu u mjestu priključivanja.



Slika 6.2.1. Tokovi (a) aktivnih (b) reaktivnih snaga prije i nakon priključivanja SVC i TCSC.

Naponske prilike u mreži prije i nakon priključivanja SVC i TCSC prikazane su na slici 6.2.2 [72]. Iako se naponi nalaze unutar zadatih granica, predstavljeni rezultati pokazuju da priključivanjem SVC doprinosi pogoršanju naponskih prilika u odnosu na inicijalan slučaj. Što se tiče optimalne alokacije TCSC sa slike 6.2.2 se može vidjeti da primjena ovih uređaja značajno ne utiče na vrijednosti napona u čvorovima. Ovakvi rezultati su očekivani s obzirem na to da je cilj alokacije SVC i TCSC minimizacija gubitaka snage.



Slika 6.2.2. Naponske prilike prije i nakon priključivanja SVC i TCSC.

6.3. Koordinisana alokacija i dimenzionisanje DG i SVC

U Tabeli 6.3.1 prikazani su rezultati koordinisane alokacije i dimenzionisanja DG i SVC koji su dobijeni korišćenjem BONMIN solvera [71]. Kao što se može primjetiti iz priloženog, u ovom poglavlju se razmatraju svi mogući slučajevi koordinacije između 3 DG i 3 SVC uređaja.

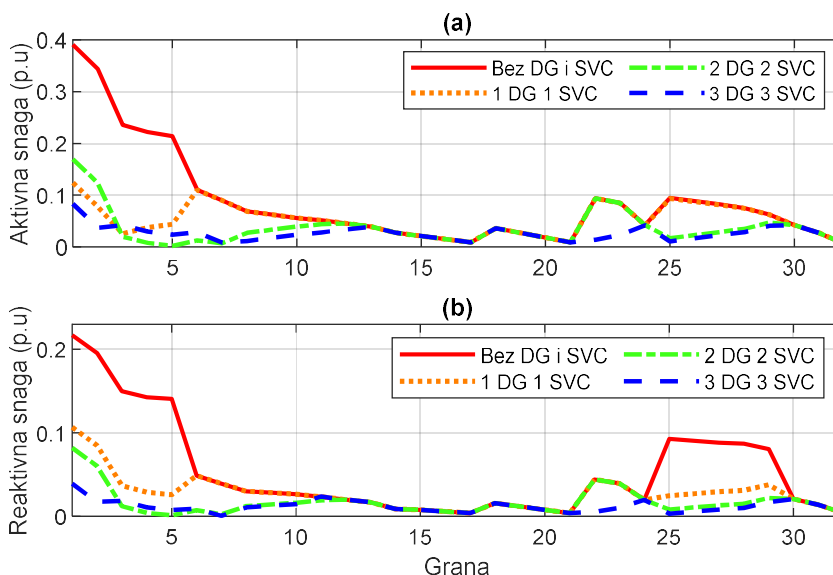
Rezultati prezentovani u Tabeli 6.3.1 pokazuju da koordinisana alokacija i dimenzionisanje DG i SVC doprinosi značajnijem smanjenju gubitaka u odnosu na pojedinačnu alokaciju i dimenzionisanje navedenih uređaja. Minimalni gubici se postižu u slučaju priključivanja 3 DG i 3 SVC. U konkretnom slučaju gubici su redukovani za 93.85 % inicijane vrijednosti gubitaka, odnosno za 82.21 % i 91.72 % minimalne vrijednosti gubitaka u slučaju pojedinačne alokacije 3 DG i 3 SVC, respektivno [71].

Bitno je istaći da koordinisanje DG i SVC može da utiče na promjenu njihove optimalne lokacije iz slučajeva pojedinačne alokacije istih. Na primjer, za slučaj pojedinačnog alociranja 3 DG optimalne sabirnice za priključivanje generatora su 12, 24 i 30 (Tabela 6.1.1), dok su optimalne lokacije za priključivanje 2 SVC sabirnice 24 i 30 (Tabela 6.2.1). Međutim u slučaju koordinacije 3 DG i 2 SVC optimalna lokacije generatora su sabirnice 13, 24 i 29, a za statički kompenzator to su sabirnice 12 i 30 (Tabela 6.3.1).

Tokovi aktivnih i reaktivnih snaga za inicijalni slučaj kao i za razmatrane slučajeve koordinisane alokacije DG i SVC prikazani su na slikama 6.3.1.a i 6.3.1.b, respektivno [71]. Iz prezentovanih rezultata jasno je da koordinacija DG i SVC doprinosi rasterećenju vodova sa aspekta prenosa aktivne i reaktivne snage. Prethodno je saglasno sa činjenicom da su u slučaju koordinacije DG i SVC mnogo manje vrijednosti ukupnih gubitaka u poređenju sa slučajevima pojedinačne alokacije istih. Takođe, sa slike 6.3.1 može se uočiti da povećavanjem broja priključenih DG, odnosno SVC, dolazi do povećanja efekta rasterećenja prenosnih vodova sa aspekta aktivne, odnosno reaktivne snage.

Tabela 6.3.1. Rezultati koordinisane alokacije i dimenzionisanja DG i SVC dobijeni primjenom BONMIN solvera.

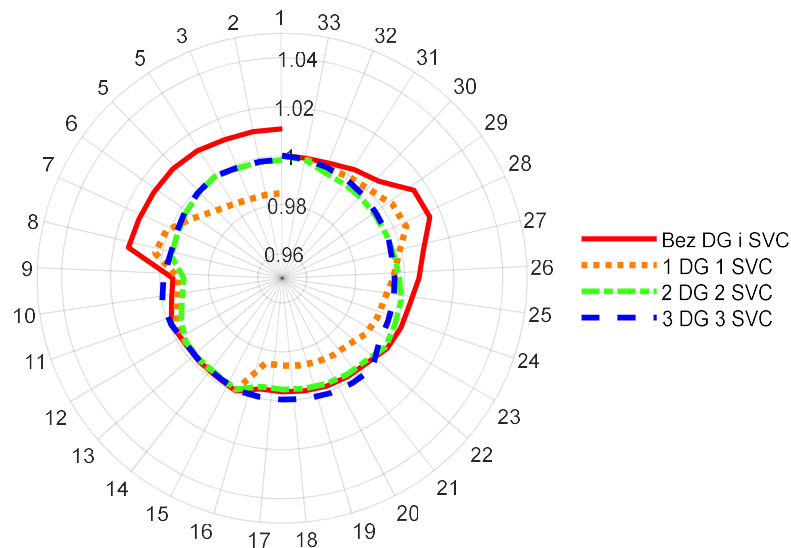
Broj DG	DG Lokacija	P_{DG} (MW)	Broj SVC	SVC lokacija	Q_{SVC} (MVar)	P_{loss} (kW)
1	6	2.5306	1	30	1.1867	55.95
	6	2.5198	2	13, 30	0.3680, 1.033	49.65
	6	2.5198	3	15, 25, 30	0.3180, 0.4062, 1.0088	47.01
2	12, 30	0.9559, 1.0961	1	30	1.2000	34.91
	12, 30	0.9527, 1.0933	2	12, 30	0.4297, 1.0293	28.27
	12, 30	0.9476, 1.0943	3	11, 24, 30	0.4948, 0.9796, 1.200	25.42
3	12, 24, 30	0.8908, 1.0585, 0.9957	1	30	1.2000	21.88
	13, 24, 29	0.7941, 1.0735, 1.0297	2	12, 30	0.4322, 1.0304	15.39
	13, 24, 30	0.7943, 1.0701, 1.0295	3	11, 24, 30	0.4149, 0.5026, 0.9801	11.81



Slika 6.3.1. Tokovi (a) aktivnih (b) reaktivnih snaga prije i nakon priključivanja DG i SVC.

Naponi u čvorovima prije i nakon koordinacije DG i SVC prikazani su na slici 6.3.2 [71]. Iz prezentovanog se može zaključiti da koordinacija DG i SVC doprinosi značajnom poboljšanju naponskih prilika. Posmatrajući slike 6.1.2, 6.2.2 i 6.3.2 može se primjetiti da su naponske prilike u slučaju koordinacije DG i SVC mnogo povoljnije u odnosu na slučaj pojedinačne alokacije uređaja. Najpovoljnije naponske prilike javljaju se u slučaju

priključivanja 3 DG i 3 SVC pošto su vrijednosti napona u sabirnicama skoro jednake nominalnoj vrijednosti 1 p.u.



Slika 6.3.2. Naponske prilike prije i nakon priključivanja DG i SVC.

6.4. Koordinisana alokacija i dimenzionisanje DG i TCSC

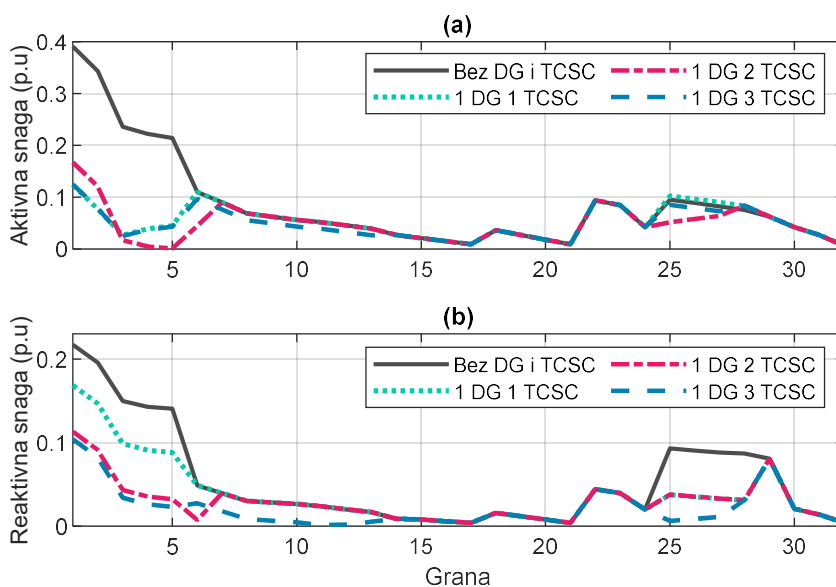
Rezultati koordinisane alokacije i dimenzionisanja DG i TCSC, dobijeni korišćenjem BONMIN solvera i metaheurističkih algoritama, prikazani su u Tabeli 6.4.1 [72]. Konkretno u ovom radu razmatraju se slučajevi koordinisanja jednog DG i 1, 2 i 3 TCSC.

Tabela 6.4.1. Rezultati koordinisane alokacije DG i TCSC dobijeni primjenom metaheurističkih algoritama i predloženog BONMIN solvera

DG lokacija	P_{DG} (MW)	Broj TCSC	TCSC lokacija	X_{TCSC} (Ω)	P_{loss} (Ω)
Predloženi BONIM solver					
6	2.6365	1	28	-0.5254	73.57
28	1.5358	2	6, 28	-0.4642, -0.5254	58.97
6	2.2027	3	13, 27, 28	-0.5347, -0.7002, -0.6032	49.26
GA [50]					
7	2.8844	1	2	N/A	114.60
BSA [50]					
6	2.5639	1	2	N/A	101.06
ALO [48]					
6	2.5383	1	2	-4.4989	98.70

Iz Tabele 6.4.1 može se zaključiti da predloženi BONMIN solver daje značajno bolje rezultate u pogledu vrijednosti minimalnih gubitaka u odnosu na metahurističke algoritme iz literature. Takođe, poređenjem rezultata u Tabelama 6.1.1, 6.2.1 i 6.4.1, jasno je da koordinisana alokacija DG i TCSC doprinosi dodatnom smanjivanju gubitaka u poređenju sa respektivnim slučajevima pojedinačne alokacije DG i TCSC. Minimalni gubici se postižu u slučaju priključivanja jednog DG i 3 TCSC. U navedenom slučaju, gubici su redukovani za 74.35 % inicijalne vrijednosti, odnosno za 25.79 % i 47.8 % vrijednosti gubitaka u slučaju pojedinačne alokacije jednog DG i 3 TCSC, respektivno [72].

Ukoliko se rezultati koordinisane alokacije DG i TCSC uporede sa rezultatima koordinisane alokacije DG i SVC jasno je da u slučaju koordinacije DG i SVC dolazi do izraženijeg smanjivanja ukupnih gubitaka (Tabele 6.3.1 i 6.4.1). Prethodno dovodi do zaključka da je sa aspekta minimizacije gubitaka u razmatranoj IEEE 33-čvornoj mreži efikasnije optimalno koordinisati priključivanje DG i SVC.



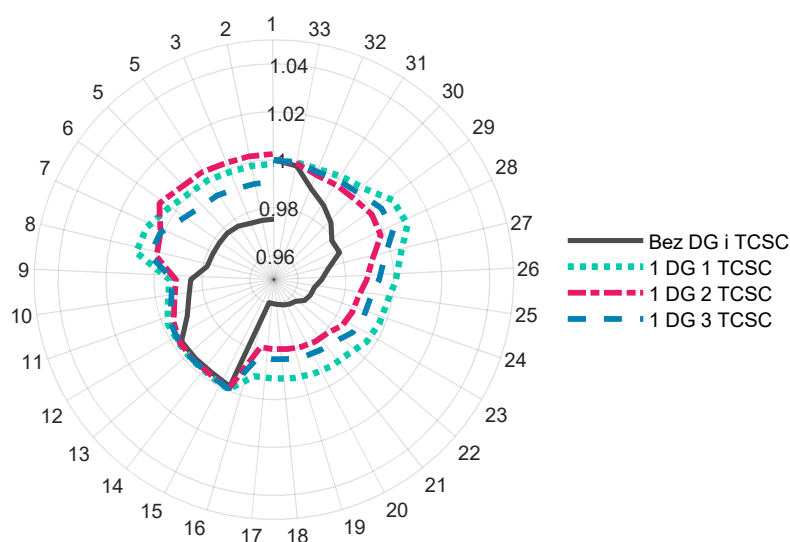
Slika 6.4.1. Tokovi (a) aktivnih (b) reaktivnih snaga prije i nakon priključivanja DG i TCSC.

Na slikama 6.4.1.a i 6.4.1.b predstavljeni su tokovi aktivnih i reaktivnih snaga prije i nakon priključivanja DG i TCSC [72]. Očekivano priključivanje DG i TCSC doprinosi značajnom rasterećivanju tokova aktivnih i reaktivnih snaga u poređenju sa inicijalnim slučajem. Sa slike 6.4.1.b se može primjetiti da efekat rasterećenja vodova sa aspekta prenosa reaktivne snage raste sa porastom broja priključenih TCSC. Međutim, u respektivnim slučajevima koordinacije DG i SVC rasterećenje tokova reaktivnih snaga je izraženije što je ujedno i u korelaciji sa manjim gubicima snage (slika 6.3.1.b).

Naponske prilike prije i nakon priključivanja DG i TCSC prikazane su na slici 6.4.2 [72]. Iz priloženog se može primjetiti da koordinisana alokacija DG i TCSC značajno poboljšava naponske prilike u odnosu na inicijalni slučaj. Sa slike 6.4.2 se može vidjeti da su u svim razmatranim slučajevima koordinacije naponi sabirnica jako bliski nominalnoj vrijednosti 1 p.u.

6.5. Numerička analiza BONMIN solvera

Performanse predloženog BONMIN solvera prilikom rješavanja problema pojedinačne, odnosno koordinisane, alokacije i dimenzionisanja DG i razmatranih FACTS uređaja sumirane su u Tabelama 6.5.1 i 6.5.2, respektivno [72]. Numerička analiza solvera izvršena je na osnovu tri parametra: broja iteracija, vremena izvršavanja i broja čvorova. Broj iteracija i vrijeme izvršavanja su standardni parametri kojima se opisuju performanse nekog algoritma. Bitno je napomenuti da u ovom radu vrijeme izvršavanja (mjereno u sekundama) obuhvata vrijeme potrebno za rješavanje problema i generisanje izlaznog izvještaja. Broj čvorova je parametar karakterističan za B&B algoritam i, kao što je objašnjeno u poglavlju 5, predstavlja broj podproblema koji algoritam rješava kako bi došao do optimalnog rješenja.



Slika 6.4.2. Naponske prilike prije i nakon priključivanja DG i TCSC.

Tabela 6.5.1. Performanse BONIMN solvera za slučajeve pojedinačne alokacije i dimenzionisanja DG, SVC i TCSC.

Slučaj	Vrijednost funkcije cilja (MW)	Broj iteracija	Vrijeme izvršavanja (s)	Broj čvorova
1 DG	0.09907	334	17.828	0
2 DG	0.07956	30 778	152.496	1801
3 DG	0.06639	38 352	216.672	2701
1 SVC	0.14682	19	0.628	0
2 SVC	0.14334	19	0.752	0
3 SVC	0.14258	19	0.730	0
1 TCSC	0.12941	243	83.945	0
2 TCSC	0.11014	253	90.136	0
3 TCSC	0.09437	422	104.625	0

Posmatrajući Tabelu 6.5.1 može se zaključiti da su sa aspekta broja iteracija i vremena izvršavanja najzahtjevniji problemi optimalne alokacije DG. Numerički najzahtjevniji slučaj je alociranje 3 DG za čije rješavanje je potrebno 38 352 iteracije i 216.672 sekundi. Nasuprot prethodnom, problemi optimalne alokacije SVC su najmanje zahtjevni. Iz Tabele 6.5.1 se može vidjeti da je za rješavanje problema optimalnog alociranja 3 SVC potrebno 19 iteracija i svega 0.73 sekunde.

Što se tiče problema optimalne alokacije TCSC rezultati u Tabeli 6.5.1 pokazuju da su oni, sa aspekta broja iteracija i vremena izvršavanja, numerički mnogo zahtjevniji od alokacije SVC, odnosno manje zahtjevniji od alokacije DG. Najzahtjevniji problem alokacije TCSC je u slučaju kada se razmatraju 3 uređaja, gdje za rješavanje problema potrebno 422 iteracije i 104.625 sekundi.

Tabela 6.5.2. Performanse BONMIN solevra za slučajeve koordinisane alokacije i dimezionisanja DG, SVC i TCSC.

Slučaj	Vrijednost funkcije cilja (MW)	Broj iteracija	Vrijeme izvršavanja (s)	Broj čvorova
1 DG 1 SVC	0.05595	2075	68.236	46
1 DG 2 SVC	0.04965	17 037	151.674	1201
1 DG 3 SVC	0.04702	12 629	136.847	951
2 DG 1 SVC	0.03491	88 176	523.672	4401
2 DG 2 SVC	0.02827	198 045	1000.20	8886
2 DG 3 SVC	0.02542	176 062	1140.41	10 857
3 DG 1 SVC	0.02811	123 043	615.578	6501
3 DG 2 SVC	0.01539	248 130	1500.53	10 587
3 DG 3 SVC	0.01181	305 936	1745.48	18 002
1 DG 1 TCSC	0.07357	675	227.887	0
1 DG 2 TCSC	0.05897	1305	239.076	1
1 DG 3 TCSC	0.04926	54 179	1009.42	1788

Iz prezentovanih rezultata u Tabeli 6.5.1 može se zaključiti da je prilikom rješavanja većine problema pojedinačne alokacije broj čvorova jednak 0. Ukoliko je nakon rješavanja problema broj čvorova 0 to znači da B&B algoritam nije ušao u fazu grananja, odnosno optimalno rješenje je pronađeno u baznom čvoru. Bazni čvor se generiše na početku programa i ujedno predstavlja kompletan prostor pretraživanja.

Za razliku od većine slučajeva, u toku rješavanja problema optimalnog alociranja 2 i 3 DG, B&B algoritam je generisao 1801, odnosno 2701 čvorova, respektivno (Tabela 6.5.1). Uzimajući u obzir broj čvorova, kao i prethodnu analizu broja iteracija i vremena izvršavanja programa, zaključuje se da je rješavanje problema optimalnog alociranja DG numerički najzahtjevnije.

Rezultati u Tabeli 6.5.2 jasno pokazuju da su problem koordinisane alokacije DG i FACTS uređaja znatno numerički zahtjevniji u odnosu na probleme pojedinačne alokacije istih. Konkretno, za koordinisanje DG i SVC numerički najzahtjevniji problem je alokacija 3 DG i 3 SVC za čije rješavanje je neophodno 305 936 iteracija, 1745.48 sekundi i 18 002 čvorova (Tabela 6.5.2). Što se tiče koordinisane alokacije DG i TCSC numerički najzahtjevniji je problem u kojem se razmatra jedna DG i 3 TCSC. U navedenom slučaju za rješavanje problema neophodno 54 179 iteracija, 1009.42 sekundi i 1788 čvorova (Tabela 6.5.2). Bitno je napomenuti da se kao i u slučajevima pojedinačne alokacije, numerička kompleksnost

problema povećava sa povećavajem broja pojedinačno, odnosno koordinisano, alociranih uređaja.

Ukoliko se rezultati koordinisane alokacije DG i SVC uporede sa rezultatima koordinisane alokacije DG i TCSC, uočava se da je koordinacija DG i SVC značajno zahtjevnija u pogledu broja čvorova potrebnih za pronalaženje optimalnog rješenja. Sa aspekta vremena izvršavanja koordinisana alokacija DG i TCSC je numerički mnogo zahtjevnija. Što se tiče broja iteracija, u slučaju koordinacije 1 DG i 1 i 2 SVC potreban je znatno veći broj iteracija nego u slučaju koordinacije 1 DG i 1 i 2 TCSC. Međutim, isto ne važi u slučaj koordinacije 1 DG i 3 TCSC, gdje je broj iteracija neuporedivo veći u odnosu na slučaj koordinacije 1 DG i 3 SVC.

6.5.1. Poređenje sa metahurističkim i hibridnim algoritmima

U prethodnim poglavljima napravljeno je poređenje BONMIN solvera sa metaheurističkim i hibridnim algoritmima po kriterijumu minimalne funkcije cilja. Slučajevi u kojima je razmatrano poređenje bili su pojedinačna alokacija DG i koordinisana alokacija DG i TCSC. Neki od autora u navedenoj literaturi dali su podatke o broju iteracija i vremenu izvršavanja korišćenih algoritama, pa će u nastavku poglavlja isti biti upoređeni sa numeričkim performansama BONMIN solvera.

U [3] autori su grafički predstavili konvergenciju PSO i PPSO algoritma u slučaju optimalne alokacije 3 DG. Iz priloženog se zaključuje da PSO konvergira ka optimalnom rješenju za oko 180 iteracija, dok je PPSO znatno brži sa oko 40 iteracija. Što se tiče PSOCFA algoritma u [4] je pokazano da se optimalno rješenje postiže nakon 30 iteracija. U [5] autori su naveli da je za optimalno alociranje 1, 2 i 3 DG primjenom BSOA vrijeme izvršavanja algoritma 20.40, 23.54 i 24.95 sekundi, respektivno. Za ALGA algoritma koji je iskorišćen u [3] pokazano je da je vrijeme izvršavanja algoritma u slučaju optimalnog alociranja 1 DG 33.76 sekundi, dok za optimalno alociranje 2 DG iznosi 33.58 sekundi. Grafički prikaz konvergencije Sh-BAT u [17] pokazuje da broj iteracija predloženog algoritma iznosi 34. U [18] pokazano je da je vrijeme izvršavanja hibridnog PIPSO-SQP algoritma za slučajeve optimalne alokacije 1, 2 i 3 DG 10.22, 13.85 i 15.91 sekundi, respektivno. Autori u [19] proračunali su da je za rješavanje problema optimalne alokacije 1 i 3 DG primjenom HSA-PABC algoritma 100 iteracija.

Što se tiče koordinacije DG i TCSC, u [17] pokazano je da predloženi ALOA, u slučaju koordinisanog alociranja 1 DG i 1 TCSC, konvergira ka optimalnom rješenju nakon 20 iteracija. Što se tiče BSA i GA algoritma autori u [17] nijesu analizirali njihove numeričke performanse.

Ukoliko se literaturni rezultati uporede sa rezultatima alokacije DG i koordinisane alokacije DG i TCSC (tabele 6.5.1 i 6.5.2) mogao bi se izvući zaključak da su metode predložene u literaturi numerički znatno efikasnije od predloženog BONMIN solvera. Međutim, ono što je potrebno uzeti u obzir jeste da metahuristički algoritmi daju različito rješenje nakon svakog pokretanja programa, što ujedno predstavlja i njihovu najveću manu [40, 80]. Iz tog razloga se prilikom rješavanja optimizacionih problema primjenom istih pokreće više puta. Na primjer u [19] naglašeno je da se prilikom traženja optimalnog rješenja program pokreće 25 puta. Prethodno navodi na zaključak da je za adekvatno poređenje, pored prosječnog broja iteracija i vremena izvršavanja, neophodno znati koliko puta je program pokrenut. Osim svega prethodnog važno je naglasiti da je vrijeme izvršavanja programa individualan podatak koji zavisi od karakteristika korišćenog računara.

Bitno je istaći da je broj iteracija u svim navedenim radovima ograničen. U zavisnosti od autora maksimalan broj iteracija kreće se u opsegu od 100 do 500. Međutim, u GAMS-u generički maksimalan broj iteracija je neuporedivo veći i iznosi 2×10^9 .

7. Zaključak

Moderni EES doživljava transformaciju u pogledu principa funkcionisanja u odnosu na svoje konvencionalno ustrojstvo. Kao ključni faktor transformacije nalazi se potreba za rješavanjem problema pretjerane emisije štetnih materija i nedostataka električne energije za neprekidno napajanje rastućeg konzuma. U takvom okruženju, integracija modernih tehnologija kao što su DG i FACTS uređaji predstavlja okosnicu razvoja energetske mreže. Sinergija ovih tehnologija daje mogućnost „sanacije“ problema ESS-a uz očuvanje stabilnosti i kvaliteta električne energije u sistemu.

U ovom radu prikazano je rješavanje problema optimalne pojedinačne, odnosno koordinisane, alokacije i dimenzionisanja DG i FACTS uređaja u radikalnoj distributivnoj mreži. Cilj rješavanja problema bio je minimizacija ukupnih gubitaka aktivne snage u mreži. Od predstavnika FACTS uređaja uzeti su u obzir SVC i TCSC, dok se za DG pretpostavlja da injektira isključivo aktivnu snagu. Predloženo je da se optimizacioni problem formuliše korišćenjem MINLP. Konkretno u ovom radu, nelinearni dio problema predstavlja proračun tokova snaga, dok su cjelobrojne promjenjive iskorišćenje za traženje optimalnog mjesta priključivanja i izlazne snage DG i razmatranih FACTS uređaja.

Problem je modelovan u softverskom paketu GAMS korišćenjem osnovnih elemenata okruženja. Za rješavanje problema upotrebljen je GAMS-ov ugrađeni MINLP solver BONMIN. Validnost predloženog metoda za pronalažene optimalne lokacije i snage DG i FACTS testirana je simulacijom na IEEE 33-čvornoj testnoj mreži, koja spada u grupu radikalnih distributivnih sistema. Simulacija je izvršena za slučajeve pojedinačne alokacije DG, SVC i TCSC, kao i za slučajeve koordinacije DG i SVC, odnosno TCSC. Dodatno, napravljena je numerička analiza BONMIN solvera, gdje su njegove performanse pri rješavanju problema pojedinačne i koordinisane alokacije ocijenjene korišćenjem tri parametra: broj iteracija, vrijeme izvršavanja programa i broj čvorova. U slučajevima pojedinačne alokacije DG i koordinisane alokacije DG i TCSC napravljeno je poređenje sa metaheurističkim i hibridnim algoritmima iz dostupne literature. Poređenje je izvršeno prema kriterijumu minimalnih gubitaka i numeričkih performansi algoritama.

Na osnovu predstavljene analize i diskusije simulacionih rezultata može se reći da su sljedeći glavni naučni doprinosi ovog rada:

- Koordinisana alokacije DG i razmatranih FACTS uređaja doprinosi značajnom smanjivanju ukupnih gubitaka, poboljšanju naponskih prilika i rasterećivanju vodova sa aspekta prenosa aktivne i reaktivne snage,
- U poređenju sa pojedinačnom alokacijom DG i FACTS koordinisana alokacija daje bolje rezultate u pogledu minimalne vrijednosti gubitaka,
- Sa aspekta minimizacije gubitaka u razmatranoj radikalnoj distributivnoj mreži mnogo je efikasnije optimalno koordinisati priključivanje DG i SVC u odnosu na DG i TCSC,
- Numerička analiza predloženog BONMIN solvera pokazuje da isti efikasno rješava razmatrane slučajeve pojedinačne i koordinisane alokacije DG i FACTS,
- BONMIN solver daje bolje rezultate u pogledu minimalnih gubitaka snage u odnosu na metaheurističke i hibridne algoritme iz dostupne literature. Za adekvatno poređenje sa aspekta numeričkih performansi potrebno je imati podatak o broju puta rješavanja problema primjenom metaheurističkih, odnosno hibridnih algoritama.

Iako je prezentovano istraživanje relevantno, neophodno je istaći određena ograničenja primjene predložene metode za alokaciju i dimenzionisanje DG i FACTS. U realnim sistemima, snage potrošnje, kao i proizvodnje, se mijenjaju u vremenu, što značajno usložnjava analizu čitavog sistema. Ovo istraživanje se bazira na jednovremenoj analizi koordinacije DG i FACTS uređaja, tj. na posmatranju jednog vremenskog trenutka. Prema tome, prethodno predstavlja najveće, ali literaturno opšteprihvaćeno, ograničenje. Drugo ograničenje odnosi se na testnu IEEE 33-čvornu mrežu. Ova mreža sadrži svega 33 čvora i 32 grane, te se sa sigurnošću ne može dati ocjena numeričkih performansi BONMIN solvera za veće mreže. Takođe, bitno je spomenuti da je za dobijanje realnije slike o benefitima koordinacije DG i FACTS neophodno analizirati realnu distributivnu mrežu sa tačnim podacima o parametrima sistema i stanju konzuma.

U daljem istraživačkom radu fokus će biti na razvijanju metoda za optimalno alociranje i dimenzionisanje FACTS uređaja u realnim mrežama sa obnovljivim izvorima električne energije, pri čemu se uzima u obzir nesigurnost u proizvodnji iz obnovljivih izvora i razmatra uticaj FACTS uređaja na kvalitet električne energije sa aspekta naponskih prilika i totalne harmonijske distorzije. Takođe, u daljem istraživanju, pored SVC i TCSC, razmatraće se i drugi FACTS uređaji: statički sinhroni kompenzator (STatic Synchronous COMpenzator - STATCOM) i statički sinhroni serijski kompenzator (Static Synchronous Series Compenzator - SSSC).

Literatura

- [1] H. HassanzadehFard and A. Jalilian, "Optimal sizing and location of renewable energy based DG units in distribution systems considering load growth", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 101, pp. 356–370, 2018.
- [2] H. Bhumkittipich & W. Phuangpornpiak, „Optimal Placement of Distributed Generation in Using Particle Swarm Optimization“, *IEEE Inetrational Conference for Emerging Technology (INCET)*, Belgaum, India, 2020.
- [3] Z. Ullah, S. Wang & J. Radosavljević, „A novel method based on PPSO for optimal placement and sizing of distributed generation“, *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, vol. 14, no. 12, pp. 274-292, 2019.
- [4] K. D. Mistry & R. Roy, „Enhancement of loading capacity of distribution system through distributed generator placement considering techno-economic benefits with load growth“, *International Journal of Electical. Power and Energy Systems*, vol. 54, pp. 505-515, 2014.
- [5] A. El-Fergany, „Optimal allocation of multi-type distributed generators using backtracking search optimization algorithm“, *International Journal of Electical. Power and Energy Systems*, vol. 64, pp. 1197-1205, 2015.
- [6] J. Gao, J. Chen, Y. Cai, S. Zeng & K. Peng, „A two-stage microgrid cost optimization considering distribution network loss and voltage deviation“, *Energy Reports*, vol. 6, no. 2, pp. 263-267, 2019.
- [7] N. Daryani, K. Zare, S. Tohidi & J. M. Guerrero, „Dominated GSO algorithm for optimal microgrid construction to improve consumer side properties in a distribution system“, *International Journal of Electical. Power and Energy Systems*, vol. 123, p. 106232, 2020.
- [8] E. S. Ali, S. M. Elazim & A. Y. Abdelaziz, „Ant Lion Optimization Algorithm for optimal location and sizing of renewable distributed generations“, *Renewable Energy*, vol. 101, pp. 1311-1324, 2017.
- [9] A. A. Hassan, F. H. Fahmy, A. E. A. Nafeh & M. A. Abu-elmagd, „Genetic single objective optimisation for sizing and allocation of renewable DG systems“, *International Journal of Sustainable Energy*, vol. 36, no. 6, pp. 545-562, 2015.
- [10] K. Roy, L. Srivastava & S. Dixit, „Optimal Placement and Sizing of Distributed Generation Uisng Multi-Verse Optimization“, *IEEE 12th International Conference on Computational Intelligence and Communication (CICN)*, Bhimtal, Indija, 2020.
- [11] Q. Zhao, S. Wang, K. Wnag & B. Huang, „Multi-objective optimal allocation of distributed generators under uncertainty based on D-S evidnece theory and affine arithmetic“, *International Journal of Electical Power and Energy Systems*, vol. 112, pp. 70-82, 2019.
- [12] M. Abdelaziz & M. Moradzadeh, „Monte-Carlo simulation based multi-objective optimum allocation of renewable distributrđ generation using OpenCL“, *Eeectrical Power Systems Research*, vol. 170, pp. 81-91, 2019.

- [13] A. A. Recalde & M. A. Alvarez-Alvarado, „Design optimization for reliability improvement in microgrids with wind-tidal-photovoltaic generation“, *Electrical Power Systems Research*, vol. 188, p. 106540, 2020.
- [14] M. Pesaran H. A., M. Nazari-Heris, B. Mohammadi-Ivatloo & H. Seyedi, „A hybrid genetic particle swarm optimization for distributed generation allocation in power distribution networks“, *Energy*, vol. 209, pp. 1-16, 2020.
- [15] A. S. Hassan, Y. Sun & Z. Wang, „Multi-objective for optimal placement and sizing DG units in reducing loss of power and enhancing voltage profile using BPSO-SLFA“, *Energy Reports*, vol. 6, pp. 1581-1589, 2020.
- [16] M. H. Moradi & M. Abedin, „A combination of genetic algorithm and particle swarm optimization for optimal DG location and sizing in distribution systems“, *International Journal of Electrical. Power and Energy Systems*, vol. 34, no. 1, pp. 66-74, 2012.
- [17] C. Yammani, S. Masheswarapu & S. K. Matam, „Optimal placement and sizing of distributed generations using shuffled bat algorithm with future load enhancement“, *International Transactions on Electrical and Energy Systems*, vol. 26, no. 2, pp. 274-292, 2016.
- [18] S. Angalaeswari, P. Sanjeevikumar, K. Jamuna & Z. Leonowicz, „Hybrid PIPSO-SQP Algorithm for Real Power Loss Minimization in Radial Distribution Systems with Optimal Placement of Distributed Generation“, *Sustainability*, vol. 12, no. 14, p. 5787, 2020.
- [19] K. Muthukumar & S. Jayalalitha, „Optimal placement and sizing of distributed generators and shunt capacitors for power loss minimization in radial distribution networks using hybrid heuristic search optimization technique“, *International Journal of Electrical. Power and Energy Systems*, vol. 78, pp. 299-319, 2016.
- [20] A. R. Jordehi, „Particle swarm optimization (PSO) for allocation of FACTS devices in electrical transmission systems: A review“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 52, pp. 1260-1267, 2015.
- [21] D. Modal, A. Chakrabarti & A. Sengupta, „Optimal placement and parameter setting of SVC and TCSC using PSO to mitigate small signal stability problem“, *International Journal of Electrical. Power and Energy Systems*, vol. 42, no. 1, pp. 334-340, 2012.
- [22] J. G. Jammani & M. Pandya, „Coordination of SVC and TCSC for Management of Power Flow by Particle Swarm Optimization“, *Energy Procedia*, vol. 156, pp. 321-326, 2019.
- [23] R. Benadi, M. Boudour & M. A. Abido, „Optimal location and setting of SVC and TCSC devices using non-dominated sorting particle swarm optimization“, *Electrical Power Systems Research*, vol. 79, no. 12, pp. 1668-1677, 2009.
- [24] A. R. Jordehi, J. Jasni, N. A. Whab, M. Z. Kadri & M. S. Javadi, „Enhanced leader PSO (ELPSO): A new algorithm for allocation of distributed TCSC's in power systems“, *International Journal of Electrical. Power and Energy Systems*, vol. 64, pp. 771-784, 2015.
- [25] A. Savić & Ž. Đurišić, „Optimal sizing and location of SVC devices for improvement of voltage profile in distribution network with dispersed photovoltaic and wind power plant“, *Applied Energy*, vol. 134, pp. 114-124, 2014.
- [26] E. R. Sanseverino, Q. T. T. Tran, L. R. Roose, S. T. Sadoyama, T. Tran, B. V. Doan & N. H. Nguyen, „Optimal Placement of SVC Devices in Low Voltage Grids with High

- Penetration of PV Systems”, *9th IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*, Šarlot, SAD, 2018.
- [27] I. Pisica, C. Bulac, L. Toma & M. Eremia, “Optimal SVC Placement in Systems Using a Genetic Algorithm Based Method”, *IEEE Bucharest Power Tech Conference*, Bukurešt, Rumunija, 2009.
- [28] E. Ghahremani & I. Kamwa, „Optimal placement of multi-type FACTS devices to maximize power system loadability using a genetic graphical user interface“, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 2, pp. 764-778, 2012.
- [29] M. Nadeem, K. Imran, A. Khattak, A. Ulasyar, A. Pal, M. Z. Zeb, A. N. Khan & M. Padhee, „Optimal Placement, Sizing and Coordination of FACTS Devices in Transmission Network Using Whale Optimization Algorithm“, *Energies*, vol. 13, no. 3, p. 753, 2020.
- [30] 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*, vol. 35, no. 1, pp. 243-248, 2010.
- [31] B. Sigh & G. Agrawal, „Enhancement of voltage profile by incorporation of SVC in power system networks by using optimal load flow method in MATLAB/Simulink enviroment“, *Energy Reports*, vol. 4, pp. 418-434, 2018.
- [32] M. Čalasan, T. Konjić, K. Kecojević & L. Nikitović, „Optimal allocation of static var compensators in electrical power system“, *Energies*, vol. 13, no. 12, p. 3219, 2020.
- [33] E. A. Belati, C. F. Nascimento, H. De Faria Jr, E. H. Watanabe & A. Padilha-Feltrin, „Allocation of static var compensator in electrical power systems considering different load levels“, *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, vol. 30, pp. 1-8, 2019.
- [34] A. R. Jordehi, „Brainstorm optimization algorithm (BSOA): An efficient algorithm for finding optimal location and setting of FACTS devices in electric power systems“, *International Journal of Electical. Power and Energy Systems*, vol. 69, pp. 48-57, 2015.
- [35] B. Bhattacharyya & S. Kumar, „Loadability enhancement with FACTS devices using gravitational search algorithm“, *International Journal of Electical. Power and Energy Systems*, vol. 78, pp. 470-479, 2016.
- [36] A. Sharma & S. K. Jain, „Gravitational search assisted algorithm for TCSC placement for congestion control in deregulated power system“, *Electrical Power Systems Research*, vol. 174, p. 105874, 2019.
- [37] R. Sirjani, A. Mohamed & H. Shareef, „Optimal allocation of shunt Var compensators in power systems using a novel global harmony search algorithm“, *International Journal of Electical. Power and Energy Systems*, vol. 43, no. 1, pp. 562-572, 2012.
- [38] M. B. Shafik, G. I. Rashed, R. A. El-Sehiemy & H. Chen, „Optimal Sizing and Sitting of TCSC Devices for Multi-Objective Operation of Power Systems Using Adaptive Seeker Optimization Algorithm“, *IEEE Region Ten Symposium (Tensymp)*, Sidnej, Australija, 2018.
- [39] M. B. Shafik, H. Chen, G. I. Rashed & R. A. El-Sehiemy, „Adaptive multi objective parallel seeker optimization algorithm for incorporating TCSC devices into optimal power flow framework ”, *IEEE Access*, vol. 7, pp. 36934-36947, 2019.

- [40] K. T. Venkatraman, B. Paramasivam & I. A. Chidambaram, „Optimal Allocation of TCSC Devices for Enhancement of ATC in Deregulated Power System Using Flower Pollination Algorithm”, *Journal of Engineering Science and Technology*, vol. 13, no. 9, pp. 2857-2871, 2018.
- [41] R. Agrawal, S. K. Bharadwaj & D. P. Kothari, „Population based evolutionary optimization techniques for optimal allocation and sizing of Thyristor Controlled Series Capacitor”, *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, vol. 5, no. 3, pp. 484-501, 2018.
- [42] X. Zhang, D. Shi, Z. Wang, B. Zeng, X. Wang, K. Tomsovic & Y. Jin, „Optimal Allocation of Series FACTS devices Under High Penetration of Wind Power Within a Market Environment”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33, no. 6, pp. 6206-6217, 2018.
- [43] B. Bhattacharyya & S. Raj, „Swarm intelligence based algorithms for reactive power planning with Flexible AC transmission system devices”, *International Journal of Electrical. Power and Energy Systems*, vol. 78, pp. 158-164, 2016.
- [44] R. W. Chang & T. K. Saha, „A novel MICQP method for FACTS allocation in complex real-world networks”, *International Journal of Electrical. Power and Energy Systems*, vol. 62, pp. 735-743, 2014.
- [45] M. El-Azab, W. A. Omran, S. F. Mekhamer & H. E. A. Talaat, „Allocation of FACTS Devices Using a Probabilistic Multi-Objective Approach Incorporating Various Sources of Uncertainty and Dynamic Line Rating”, *IEEE Access*, vol. 8, pp. 167647-167664, 2020.
- [46] A. A. Ahmad & R. Sirjani, „Optimal placement and sizing of multi-type FACTS devices in power systems using metaheuristic optimisation techniques: An updated review“, *Ani Shams Engineering Journal*, vol. 11, no. 3, pp. 611-628, 2020.
- [47] A. M Junadi, A. Awais, A. Saqlain, B. T. Saud, „A Review of DGs and FACTS in Power Distribution Network: Methodologies and Objectives“, *2018 International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies – iCoMET*, Sakur, Pakistan, 2018.
- [48] T. George, A. Youssef & S. Kamel, „Optimal Allocation of DG and TCSC in Radial Networks Using Ant Lion Optimizer”, *2018 20th International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*, Kairo, Egipat, 2018.
- [49] A. Rath, S. R. Ghatak & P. Goyal, „Optimal allocation of Distributed Generation (DGs) and static VAR compensator (SVC) in a power system using Revamp Voltage Stability Indicator“, *2016 National Power Systems Conference (NPSC)*, Bubanešvar, Indija, 2016.
- [50] W. Fadel, U. Kilic & S. Taskin, „Placement of Dg, Cb, and Tcsc in radial distribution system for power loss minimization using back-tracking search algorithm“, *Electrical Engineering*, vol. 99, no. 3, pp. 791-802, 2017.
- [51] O. A. Coronado de Koster & J. A. Dominguez-Navaro, „Multi-Objective Tabu Search for the Location and Sizing of Multiple Types of FACTS and DG in Electrical Networks“, *Energies*, vol. 13, no. 11, p. 2722, 2020.
- [52] G. B. Gharehpetian, S. M. Mousavi, *Distributed generation systems: Design, operation and grid integration*, Oksford, Velika Britanija: Butterworth-Heinemann, 2017.

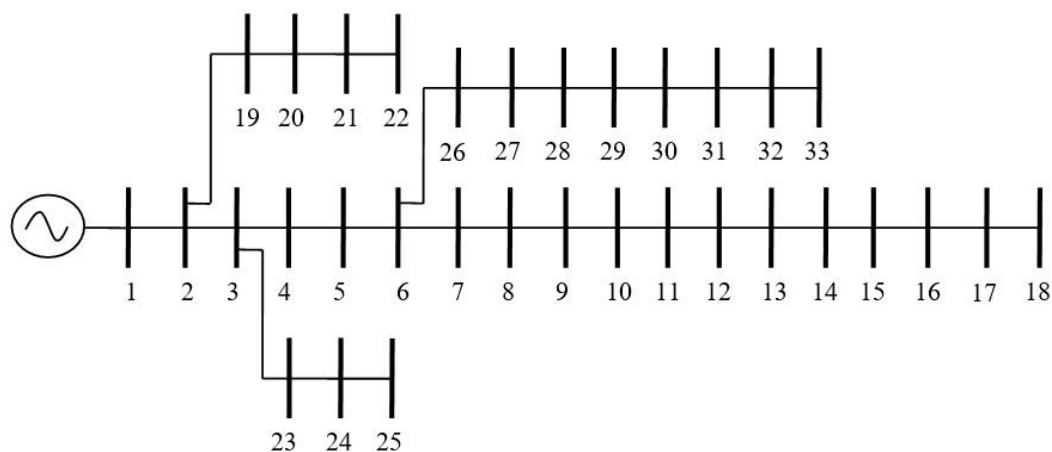
- [53] T. Funabashi, *Integration of distributed energy resources in power systems: Implementation, operation and control*, Amsterdam, Holandija: Academic Press, 2016.
- [54] G. M. Masters, *Renewable and Efficient Electric Power Systems*, Hoboken, Nju Džersij: John Wiley & Sons, 2004.
- [55] Y. Yang, F. Blaabjerg, K. A. Kim, A. Sangwongwanich, *Advances in Grid-Connected Photovoltaic Power Conversion Systems*, Daksford, Velika Britanija: Woodhead Publishing, 2019.
- [56] E. Youssef, A. Sharaf, A. Amin, A. El Samhey, „Wind Energy FACTS Applications and Stabilization Schemes“ u *Advances in Renewable Energies and Power Technologies*, Ed. I. Yahyaoui, Amsterdam, Holandija: Elsevier, 2018.
- [57] N. Urasaki, T. Senjyu, K. Uezato, T. Funabashi, H. Fujita, „High Efficiency Drive for Micro-Turbine Generator Based on Current Phase and Revolving Speed Optimization“, *5th International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, Singapur, 2003.
- [58] M. F. Akorede, H. Hizam, E. Pouresmaeil, „Distributed energy resources and benefits to the environment“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 2, pp. 724-734, 2010.
- [59] Y. Muhammad, R. Khan, M. Raja, F. Ullah, N. Chaudhary, Y. He, „Solution of optimal reactive power dispatch with Facts Devices: A survey“, *Energy Reports*, vol. 6, pp. 2211-2229, 2020.
- [60] N. G. Hingorani, L. Gyugyi, *Understanding FACTS: concepts and technology of dlexible AC transmission systems*, Delhi, Indija: Standard Publ. istributors, 2001.
- [61] M. Eremia, A. Gole, L. Toma, „Static VAR compenzator (SVC)“ u *Advanced solutions in power systems: HVDC, FACTS, and artificial intelligence*, Eds. M. Eremia, C. Liu, A. Edris, Piskatavi, Nju Džersi: IEEE Press, 2016.
- [62] M. Eremia, S. Nilsson, „Series capacitive compenzation“ u *Advanced Solutions in Power Systems: HVDC, FACTS, and Artificial Intelligence*, Eds. M. Eremia, C. Liu, A. Edris, Piskatavi, Nju Džersi: IEEE Press, 2016.
- [63] M. Fan, Z. Zhang, C. Wang, *Mathematical models and algorithms for power system optimization: Modelling Technology for Practical Engineering Problems*, London, Velika Britanija: Academic Press, 2019.
- [64] J. Das, *Load Flow Optimization and Optimal Power Flow, 1st ed.*, Boca Raton, Florida: CRC Press/Taylor & Francis Group, 2017.
- [65] M. Ebeed, S. Kamel, F. Jurado, „Optimal power flow using recent optimization techniques“ u *Classical and Recent Aspects of Power System Optimization*, Eds. A. F. Zobaa, S. H. E. Abdel Aleem, A. Y. Abdelaziz, London, Velika Britanija: Academic Press, 2018.
- [66] J. Radosavljević, M. Jevtić, N. Arsić & D. Klimenta, „Optimal power flow for distribution networks using gravitational search algorithm“, *Electrical Engineering*, vol. 96, pp. 335-345, 2014.
- [67] M. Čalasan, L. Nikitović & S. Mujović, „CONOPT solver embedded in GAMS for optimal power flow“, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 11, p. 046301, 2019.

-
- [68] P. Bonami, M. Kilinc, J. Linderoth, „Algorithms and Software for Convex Mixed Integer Nonlinear Programs“ u *Mixed Integer Nonlinear Programming*, Eds. J. Lee, S. Leyffer, Nju Jork, SAD: Springer, 2012.
- [69] *User's Guide*, <https://www.gams.com/>, poslednji put pristupano: 25.05.2022.
- [70] V. Vita, „Development of a Decision-Making Algorithm for the Optimum Size and Placement of Distributed Generation Units in Distribution Networks“, *Energies*, vol. 10, no. 9, p. 1433, 2017.
- [71] S. Rakočević, M. Čalasan, S. H. E. Abdel Aleem, „Smart and coordinated allocation of static VAR compensators, shunt capacitors and distributed generators in power systems toward power loss minimization“, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, pp. 1-19, 2021.
- [72] E. M. Ahmed, S. Rakočević, M. Čalasan, Z. M. Ali, H. M. Hasanien, R. A. Turkey, S. H. E. Abdel Aleem, „BONMIN solver-based coordination of distributed FACTS compensators and distributed generation units in modern distribution networks“, *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 13, no. 4, p. 101664, 2022.

Prilog 1. Osnovni podaci o IEEE 33-čvornoj testnoj mreži

Inicijalni gubici proračunati u GAMS-u: $P_{loss} = 192.08$ kW.

Nazivna snaga, napon i impedansa: $S_B = 10$ MVA, $U_B = 12.66$ kV i $Z_B = 16.028 \Omega$.



Slika P.1.1. Linijni dijagram IEEE 33-čvorne testne mreže.

Tabela P.1.1. Otpornosti (R) i reaktanse (X) dalekovoda.

Grana	Od čvora	Do čvora	R [Ω]	X [Ω]
1	1	2	0.0922	0.0470
2	2	3	0.4930	0.2511
3	3	4	0.3660	0.1864
4	4	5	0.3811	0.1941
5	5	6	0.8190	0.7070
6	6	7	0.1872	0.6188
7	7	8	1.7114	1.2351
8	8	9	1.0300	0.7400
9	9	10	1.0440	0.7400
10	10	11	0.1966	0.0650
11	11	12	0.3744	0.1238
12	12	13	1.4680	1.1550
13	13	14	0.5416	0.7129
14	14	15	0.5910	0.5260
15	15	16	0.7463	0.5450
16	16	17	1.2890	1.7210
17	17	18	0.7320	0.5740
18	2	19	0.1640	0.1565
19	19	20	1.5042	1.3554
20	20	21	0.4095	0.4784

Tabela P.1.1. Nastavak

Grana	Od čvora	Do čvora	R [Ω]	X [Ω]
21	21	22	0.7089	0.9373
22	3	23	0.4512	0.3083
23	23	24	0.8980	0.7011
24	24	25	0.8960	0.1941
25	6	26	0.2030	0.1034
26	26	27	0.2842	0.1447
27	27	28	1.0590	0.9337
28	28	29	0.8042	0.7006
29	29	30	0.5075	0.2585
30	30	31	0.9744	0.9630
31	31	32	0.3105	0.3619
32	32	33	0.3410	0.5302

Tabela P.1.2. Podaci o aktivnim (P_L) i reaktivnim (Q_L) snagama potrošača.

Sabirnica	P_L (kW)	Q_L (kVAr)
2	100	60
3	90	40
4	120	80
5	60	30
6	60	20
7	200	100
8	200	100
9	60	20
10	60	20
11	45	30
12	60	35
13	60	35
14	120	80
15	60	10
16	60	20
17	60	20
18	90	40
19	90	40
20	90	40
21	90	40
22	90	40
23	90	50
24	420	200
25	420	200
26	60	25
27	60	25
28	60	20
29	120	70
30	200	600
31	150	70
32	210	100
33	60	40
Ukupno	3715	2300