



UNIVERZITET U BANJOJ LUCI
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET



Optimalno planiranje i eksploatacija pasivnih kompenzatora u industrijskoj mreži

MASTER RAD

Mentor: Dr Aleksej Avramović, docent

Kandidat: Vanja Kitić

Banja Luka, 2022.



UNIVERSITY OF BANJA LUKA
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING



Optimal planning and exploitation of passive compensators in industrial power system

MASTER THESIS

Mentor: Aleksej Avramović PhD, assistant professor Candidate: Vanja Kitić

Banja Luka, 2022.

Informacije o mentoru i master radu

Mentor:

Dr Aleksej Avramović, docent
Univerzitet u Banjoj Luci, Elektrotehnički fakultet

Naslov master rada:

Optimalno planiranje i eksploatacija pasivnih kompenzatora u industrijskoj mreži

Rezime:

U radu je analizirana mogućnost primjene CFBPSO algoritma za rješavanje problema optimalnog pozicioniranja i dimenzionisanja baterija kondenzatora. Iskorišćena su dva testna sistema: distributivna mreža sa 85 sabirnica i realna industrijska mreža. Za realnu industrijsku mrežu projektovan je pasivni filter, a zatim je i predložen algoritam upravljanja pasivnim kompenzatora tokom eksploatacije.

Ključne riječi: baterije kondenzatora, pasivni filter, CFBPSO, industrijska mreža

Naučna oblast: Inženjerstvo i tehnologija

Naučno polje: Elektrotehnika, elektronika i informaciono inženjerstvo

Klasifikaciona oznaka: T 190

Tip odabrane licence Kreativne zajednice: CC BY-NC

Information about mentor and master thesis

Mentor:

Aleksej Avramović PhD, assistant professor
University of Banja Luka, Faculty of Electrical Engineering

Title:

Optimal planning and exploitation of passive compensators in industrial power system

Abstract:

In this master thesis, applicability of using Constriction-Factor-Based Particle Swarm Optimization to solve optimal capacitor placement and sizing is analysed. Two test systems are used: 85-bus distribution system and real industrial power system. For industrial power system, design of passive filter is proposed. Algorithm for optimal control of reactive power compensators in industrial power system is proposed.

Keywords: shunt capacitors, passive filter, CFBPSO, industrial power system

Scientific area: Engineering and technology

Scientific field: Electrical engineering, electronics and information engineering

Classification code: T 190

Creative Commons license type: CC BY-NC

Zahvalnice

Ovom prilikom zahvaljujem se mentoru, Alekseju Avramoviću, na nesebičnoj podršci i savjetima tokom master studija i tokom pisanja master rada.

Zahvaljujem se kolegama sa Elektrotehničkog fakulteta u Banjoj Luci kao i kolegama sa Elektrotehničkog fakulteta u Ljubljani. Zahvaljem se koordinatorima bilateralnog projekta „MLECO - Machine Learning in Edge Computing“, koji je sufinansiran od strane Istraživačke agencije Republike Slovenije i Ministarstva civilnih poslova Bosne i Hercegovine, u okviru kog sam imala priliku boravim na Univerzitetu u Ljubljani.

Posebnu zahvalnost dugujem prijateljima i Nemanji. I na kraju najveću zahvalnost dugujem porodici, Branku, Dejanu i majci.

Vanja Kitić

Decembar, 2022.

Banja Luka,

Republika Srpska

/

Uspomeni na djeda Vaskrsiju

Sadržaj

Informacije o mentoru i master radu	i
Information about mentor and master thesis	ii
Zahvalnice	iii
Posveta	iv
Spisak tabela	viii
Spisak slika	ix
1 Uvod	1
1.1 Uvodna razmatranja	1
1.2 Pregled stanja u oblasti	3
1.3 Doprinos istraživanja	5
1.4 Organizacija rada	5
2 Kompenzacija reaktivne snage u distributivnim i industrijskim mrežama	7
2.1 Načini kompenzacije s obzirom na lokaciju	8
2.2 Kompenzacija reaktivne snage	9
2.3 Filtriranje viših harmonika	10
2.4 Pasivni filtri	11
2.4.1 Tipovi paralelnih pasivnih filtara	11
2.4.2 Dimenzionisanje pasivnih filtara	13

3 Industrijska mreža	15
3.1 Osnovni podaci o industrijskoj mreži	15
3.2 Rezultati mjerenja	17
3.2.1 Parametri kvaliteta električne energije na 110 kV sabirnicama	19
3.2.2 Parametri kvaliteta napona na 20 kV sabirnicama	23
3.2.3 Kratkotrajna mjerenja	29
4 CFBPSO optimizacija	32
4.1 PSO algoritam	32
4.1.1 Matematički model	32
4.2 CFBPSO	33
4.2.1 Dijagram toka CFBPSO	35
5 Optimalno pozicioniranje i dimenzionisanje baterija kondenzatora pri- mjenom CFBPSO	38
5.1 Indeks osjetljivosti	38
5.2 Kriterijumska funkcija i ograničenja	39
5.3 CFBPSO za optimalno pozicioniranje i dimenzionisanje baterija kondenza- tora	41
5.3.1 Testna distributivna mreža sa 85 sabirnica	42
5.3.2 Industrijska mreža	45
5.4 Određivanje parametara pasivnih filtara u industrijskoj mreži	47
6 Eksploatacija pasivnih kompenzatora u industrijskoj mreži	51
6.1 Pojava rezonanse između pasivnog kompenzatora i mreže	51
6.2 Kriterijumska funkcija i ograničenja	54
6.3 Rezultati Monte Karlo algoritma	55
7 Zaključak	63
A Dodatak	64

A.1 Parametri testne mreže sa 85 sabirnica	64
Literatura	67
Biografija autora	71

Spisak tabela

3.1 Parametri po granama industrijske mreže	17
3.2 Prenosni odnosi naponskih i strujnih mjernih transformatora	19
3.3 Parametri kvaliteta napona na 110 kV sabirnicama	19
3.4 Parametri kvaliteta napona na 20 kV sabirnicama	23
5.1 CFBPSO algoritam za optimalno pozicioniranje i dimenzionisanje baterija kondenzatora	41
5.2 LSI za nekompensovan sistem	43
5.3 Rezultati CFBPSO algoritma za testnu mrežu sa 85 sabirnica	43
5.4 Poređenje rezultata CFBPSO algoritma i drugih algoritama za mrežu sa 85 sabirnica	45
5.5 Rezultati CFBPSO algoritma za industrijsku mrežu	46
5.6 Poređenje rezultata nakon CFBPSO algoritma i baznog slučaja	47
5.7 Rezonantne učestanosti pojedinih grana filtra	49
5.8 RLC parametri po granama filtra	50
6.1 Rezultati Monte Karlo algoritma - radni režim 1	56
6.2 Vrijednosti ekvivalentne impedanse za optimalnu kombinaciju kompenzatora	58
6.3 Rezultati Monte Karlo algoritma - najboljša kombinacija	58
6.4 Vrijednosti ekvivalentne impedanse za najboljšu kombinaciju kompenzatora	59
6.5 Vrijednosti ekvivalentne impedanse za optimalnu kombinaciju kompenzatora	61
6.6 Vrijednosti ekvivalentne impedanse za najboljšu kombinaciju kompenzatora	61
A.1 Podaci za testnu mrežu sa 85 sabirnica	64

Spisak slika

2.1 Pojedinačna kompenzacija	8
2.2 Grupna kompenzacija	8
2.3 Centralna kompenzacija	8
2.4 Filtar sa jednom rezonantnom frekvencijom	11
2.5 Filtar sa dvije rezonantne frekvencije	12
3.1 Jednopolna šema industrijske mreže	16
3.2 Mjerna mjesta u industrijskoj mreži	18
3.3 Parametri kvaliteta napona na 110 kV sabirnicama	20
3.4 Srednja vrijednost napona na 110 kV sabirnicama	20
3.5 Ukupno harmonijsko izobličenje napona na 110 kV sabirnicama	21
3.6 Nesimetrija napona na 110 kV sabirnicama	21
3.7 Parametri kvaliteta napona na 20 kV sabirnicama	24
3.8 Srednja vrijednost napona na sabirnicama Sistem II	24
3.9 Ukupno harmonijsko izobličenje napona na sabirnicama Sistem II	25
3.10 Nesimetrija napona na sabirnicama Sistem II	25
3.11 Srednje efektivne vrijednosti struja na sabirnicama Sistem II	26
3.12 Ukupno harmonijsko izobličenje struja na sabirnicama Sistem II	27
3.13 Ukupno harmonijsko izobličenje struja na sabirnicama Sistem II tokom 48h	27
3.14 Ukupna aktivna i reaktivna snaga - Sistem II	28
3.15 Prividna snaga i napon faze L1	28
3.16 Struje na primarnoj strani transformatora (mjerno mjesto MI3)	29
3.17 Pet perioda struja na primarnoj strani transformatora (mjerno mjesto MI3)	30

3.18 Pet perioda struja na sekundarnoj strani transformatora (mjerno mjesto MI4)	30
3.19 Napon na sekundarnoj strani transformatora (mjerno mjesto MU4)	31
3.20 Spektar napona na mjernom mjestu MU4	31
4.1 Grafički prikaz pomaka čestice	34
4.2 Dijagram toka CFBPSO	36
4.3 Ažuriranje P_{best} i G_{best}	37
5.1 Predstava dva čvora u distributivnoj mreži	38
5.2 Naponski profil distributivne mreže sa 85 sabirnica	44
6.1 Električno kolo	52
6.2 Ekvivalentna serijska impedansa	53
6.3 Ekvivalentna paralelna impedansa	53
6.4 Kombinacije kompenzatora	56
6.5 Vrijednosti kriterijumske funkcije za različite kombinacije kompenzatora	56
6.6 Prividna snaga gubitaka osnovnog harmonika - radni režim 1	57
6.7 Serijska impedansa - sabirnice 1	57
6.8 Paralelna impedansa - sabirnice 9	57
6.9 Paralelna impedansa - sabirnice 7	58
6.10 Vrijednosti kriterijumske funkcije za različite kombinacije kompenzatora	59
6.11 Prividna snaga gubitaka osnovnog harmonika - radni režim 2	59
6.12 Serijska impedansa - sabirnice 1	60
6.13 Paralelna impedansa - sabirnice 9	60
6.14 Paralelna impedansa - sabirnice 9	60
6.15 Vrijednosti kriterijumske funkcije za različite kombinacije kompenzatora	62
6.16 Prividna snaga gubitaka osnovnog harmonika	62

Glava 1

Uvod

Predmet istraživanja u ovom radu je kompenzacija reaktivne snage u industrijskoj mreži sa ciljem popravke tehničko-ekonomskih pokazatelja kvaliteta električne energije. Tokom istraživanja biće razmatrana industrijska mreža u kojoj postoje elektrolučne peći kao nelinearni potrošači velike snage. Istraživanjem će biti obuhvaćeno optimalno pozicioniranje i dimenzionisanje otočnih baterija kondenzatora, a potom i projektovanje pasivnih filtara. Nakon ovog planerskog problema, predmet istraživanja je i eksploatacija projektovanih pasivnih kompenzatora u industrijskoj mreži. U sklopu optimalnog planiranja baterija kondenzatora, razmatrana je jedna od optimizacionih metoda za prethodno definisanu kriterijumsku funkciju.

U ovoj glavi opisan je značaj i cilj rada, a potom i pregled relevantne literature iz oblasti. Zatim je dat sadržaj i organizacija rada.

1.1 Uvodna razmatranja

Elektroenergetski sistem jeste složen dinamički sistem čija je funkcija da sigurno, pouzdano i ekonomično snabdijeva potrošače električnom energijom [1]. Četiri podsistema čine elektroenergetski sistem funkcionalnim: proizvodni, prenosni, distributivni i potrošački podsistem. Proizvodni podsistem je prvi u lancu podsistema i čine ga elektrane. Primarna funkcija elektrana je da obezbijede neophodnu električnu energiju u svakom trenutku u elektroenergetskom sistemu i da osiguraju neophodan nivo rezerve u slučaju ispada ili nepredviđenih zahtjeva od strane potrošačkog podsistema. Zajednički zadatak prenosnog i distributivnog podsistema je prenos električne energije od izvora do potrošača. Proizvodnja i potrošnja koncipirane su na trofaznom naizmjeničnom naponu kao optimalnom načinu proizvodnje i potrošnje električne energije. Osim naizmjeničnom, prenos električne energije odvija se manjim dijelom i jednosmjernom strujom, čija je prednost to što stabilnost sistema nije dovedena u pitanje pri prenosu velikih snaga na veća rastojanja. Povezivanje elektroenergetskih podsistema takođe se odvija na nivou prenosnih mreža. Potrošački podsistem posljednji je u tehnološkom lancu. Potrošački podsistem je složena cjelina raznorodnih prijemnika, čiji zahtjevi mogu biti varijabilni kako u toku dana tako i u toku godine.

Distributivni podsistem širi je pojam od distributivne mreže jer u sebe uključuje i eventualno manje distributivne elektrane. Pod pojmom distributivne mreže podrazumijeva se funkcionalna cjelina elektroenergetskih vodova, transformatorskih stanica i prateće opreme različitih naponskih nivoa, koji su međusobno povezani u jedinstven sistem koji vrši distribuciju električne energije [1].

Osnovna uloga prenosnog sistema je prenos aktivne snage do krajnjeg potrošača. Pojam reaktivne snage usko je povezan za prirodu pojava pri naizmjeničnom prenosu električne energije u elektroenergetskom sistemu. Reaktivna snaga može se formulirati kao srednja brzina kojom se energija izvora predaje reaktivnim elementima kroz reverzibilni proces akumuliranja energije magnetnog i/ili električnog polja [2].

Tokovi reaktivne snage kroz elektroenergetsku mrežu stvaraju niz negativnih efekata kao što su: smanjeni kapaciteti za aktivnu energiju, povećani gubici snage i energije, pogoršanje naponskih prilika, te veće mogućnosti havarija. Kako bi se ublažile posljedice tokova reaktivne snage kroz elektroenergetsku mrežu, javlja se potreba za kompenzacijom reaktivne snage. Kompenzacija reaktivne snage predstavlja jedan od glavnih postupaka za poboljšanje parametara kvaliteta električne energije kao i tehničko-ekonomskih karakteristika elektroenergetskih sistema [2]. Ciljevi kompenzacije reaktivne snage u prenosnoj, distributivnoj i industrijskoj mreži mogu se međusobno razlikovati.

Baterije kondenzatora predstavljaju kompenzatore reaktivne snage, koji se često ugrađuju u distributivne i industrijske mreže. Prednosti otočnih baterija kondenzatora izdvajaju ovakav vid kompenzacije reaktivne snage među ostalim, a neke od prednosti su: niski gubici snage u samim baterijama kondenzatora, relativno niska cijena, kao i niski zahtjevi u pogledu troškova i načina održavanja.

U industrijskim mrežama priključeni su potrošači koji, pored aktivne, troše i reaktivnu snagu. Osim toga, mreže napona do 1 kV udaljenije su od izvora električne energije, pa se tako stvaraju dodatni troškovi na povećanju presjeka provodnika, povećanju snage transformatora i gubitaka u energiji [1]. Nelinearni potrošači, koji su često zastupljeni u industrijskim mrežama, imaju prirodu takvu da dolazi do izrazitog izobličenja talasnih oblika napona i struja. Zbog toga, postoji potreba i za umanjenjem tokova snaga viših harmonika u elektroenergetskom sistemu. Baterije kondenzatora, koje se koriste u svrhu kompenzacije reaktivne snage, često su iz eksploatacionih razloga preraspodijeljene u odvojene sekcije u mreži, a potom se kombinuju sa induktivnostima i otpornostima kako bi se formirali pasivni filtri. Pasivni filtri predstavljaju konfiguraciju induktivnosti, kapacitivnosti i otpornosti koja se u elektroenergetsku mrežu ugrađuje sa ciljem prigušenja viših harmonika u mreži. Pogodno je filtre ugraditi što bliže nelinearnim potrošačima, kako bi se zaustavio tok viših harmonika struje dalje u mrežu.

Da bi se uz što manja investiciona i godišnja ulaganja popravili pokazatelji kvaliteta električne energije i da bi se ostvarile maksimalne uštede uz zadovoljavanje svih tehničkih ograničenja, neophodno je pristupiti proračunu optimalnog pozicioniranja i dimenzioniranja baterija kondenzatora te pasivnih filtara, a potom i upravljanju ovim uređaja u

mreži. Problem optimalnog planiranja i eksploatacije pasivnih kompenzatora predstavlja nelinearan optimizacioni problem velike dimenzionalnosti.

Cilj istraživanja u ovom radu je razmatranje mogućnosti rješavanja problema optimalne kompenzacije reaktivne snage industrijske mreže i ugradnje pasivnih filtara, a potom i razmatranje mogućnosti upravljanja projektovanim pasivnim kompenzatorima. U okviru rješavanja problema optimalne kompenzacije reaktivne snage pomoću otočnih baterija kondenzatora, primarni cilj je odrediti optimalne pozicije i snagu baterija kondenzatora kako bi se ostvarilo što veće umanjeње gubitaka aktivne snage uz što manja investicijska ulaganja usljed ugradnje baterija kondenzatora. Kao optimizacioni algoritam biće iskorišćen *Constriction-Factor-Based Particle Swarm Optimization* - CFBPSO [3]. Ovaj optimizacioni algoritam predstavlja modifikovanu verziju optimizacionog algoritma pomoću roja čestica *Particle Swarm Optimization* - PSO, koji osigurava konvergenciju širokog spektra nelinearnih funkcija. Drugi cilj ovog istraživanja je projektovati pasivne filtre u blizini nelinearnih izvora kako bi se eliminisao dalji tok viših harmonika kroz sistem. U okviru ovog rada, biće predložen i algoritam upravljanja projektovanim pasivnim kompenzatorima tokom eksploatacije.

1.2 Pregled stanja u oblasti

Postoji veliki broj naučnih radova čija je tematika optimalno pozicioniranje i dimenzionisanje baterija kondenzatora. Autori rada [4] razmotrili su prednosti i mane različitih metoda za rješavanje problema optimalnog pozicioniranja i dimenzionisanja baterija kondenzatora. Metode za rješavanje ovog problema mogu se klasifikovati u četiri grupe:

- analitičke metode,
- numeričke metode,
- heurističke metode,
- metode zasnovane na vještačkoj inteligenciji.

Prvi radovi koji su se bavili problemom optimalnog pozicioniranja i dimenzionisanja baterija kondenzatora zasnovani su na analitičkim alatima. Ovi algoritmi su korišćeni kada su moćni računarski resursi bili nedostupni ili skupi. Pioniri u rješavanju ovog problema u svojim radovima [5-8] koriste analitičke algoritme. Iako su rješenja bila predložena, ovi radovi zasnovani su na nerealnim pretpostavkama gdje su napojni vodovi u radijalnoj distributivnoj mreži konstantnog poprečnog presjeka i sa ravnomjernim opterećenjem po čitavoj dužini. U kasnijim radovima [9, 10] korišćeni su modeli distributivnih vodova koji su tačniji. U ovim radovima razmatrano je različito opterećenje u radijalnim sistemima. Nedostatak analitičkih metoda je modelovanje lokacije i snage baterije kondenzatora kao kontinualnih promjenljivih. Za jednostavan model napojnog voda u radijalnim sistemima, raniji radovi obezbjeđuju grubo pravilo za planiranje baterija kondenzatora. Nešto novije metode daju preciznije rješenje za distributivne sisteme većih dimenzija, ali zahtijevaju veći skup podataka o distributivnom sistemu kao i veće vrijeme za implementaciju.

Kako su računarski resursi postali sve dostupniji, numeričke metode postajale su popularnije za rješavanje optimizacionih problema. Numeričke metode predstavljaju iterativne algoritme za minimizaciju ili maksimizaciju kriterijumske funkcije, pri čemu i skup ograničenja treba da bude zadovoljen. Numeričke metode omogućavaju kompleksnije formulisanje kriterijumske funkcije za problem optimalnog pozicioniranja i dimenzionisanja baterija kondenzatora. Snaga baterija kondenzatora ne mora biti kontinualna promjenljiva. Autor rada [11] prvi je predstavio pristup dinamičkog programiranja za rješavanje problema optimalnog postavljanja diskretnih vrijednosti snaga kondenzatora, pri čemu je problem formulisan na veoma jednostavan način i uzima u obzir umanjeње gubitaka energije. U radovima [12], [13], koji su objavljeni nekoliko godina kasnije, razmatrane su kompleksnije kriterijumske funkcije. Autori rada [14] 1989. godine predstavili su mješovito cjelobrojno linearno programiranje. Uvidom u numeričke metode, može se zaključiti da se nivo sofistiranosti i složenosti modela povećava hronološki, što se poklapa sa razvojem računarskih sistema. Prednost numeričkih metoda u odnosu na analitičke jeste što postoji mogućnosti definisanja baterija kondenzatora kao diskretnih promjenljivih. Nedostatak numeričkih metoda jeste što u nekim slučajevima priprema podataka može zahtijevati više vremena nego za analitičke metode [4]. Potrebno je odrediti i konveksnost problema optimalnog pozicioniranja baterija kondenzatora da bi se utvrdilo da je dobijeni rezultat pomoću numeričkih algoritama globalni ili lokalni ekstrem.

Heurističke metode bazirane su na heurističkim pravilima koji uključuju iskustvo, rasuđivanje i intuiciju. Heuristička pravila smanjuju iscrpan prostor pretraživanja rješenja i mogu dovesti brzo do rješenja koje je blizu globalnog optimuma. Heurističke metode prvo su predstavljene u radovima koji su se bavili tematikom optimalne rekonfiguracije distributivnih mreža [15], [16]. Autori rada [17], vodeći se idejama radova [15] i [16], predložili su heurističku metodu kako bi identifikovali čvorove distributivne mreže koji su najbolji kandidati za postavljanje baterija kondenzatora. Osnovna prednost heurističkih metoda u odnosu na druge jeste što su intuitivne, lako razumljive i veoma jednostavne za implementaciju. Nedostatak se ogleda u tome što heurističke metode ne garantuju uvijek globalni optimum, ali garantuju rješenje koje je veoma blizu globalnog optimuma.

Skorija popularnost vještačke inteligencije navela je mnoge istraživače i inženjere da istraže primjenljivost metode vještačke inteligencije u različitim oblastima elektroenergetike. U radu [18] predstavljen je genetički algoritam za rješavanje problema optimalnog pozicioniranja i dimenzionisanja baterija kondenzatora. U radu [19] korišćene su dvije vještačke neuralne mreže za rješavanje problema optimalnog pozicioniranja i dimenzionisanje baterija kondenzatora. Jedna neuralna mreža se koristi kako bi se estimirao profil opterećenja u sistemu na osnovnu mjerenja. Druga neuralna mreža koristi se kako bi se odredile pozicije za optimalno postavljanje baterija kondenzatora na osnovu rezultata prve neuralne mreže. Autori rada [20] koristili su fazi teoriju za rješenje problema optimalnog pozicioniranja baterija kondenzatora. U radu [21] problem optimalnog pozicioniranja i dimenzionisanja baterija kondenzatora i pasivnih filtara posmatran je kao jedinstven problem, za čije rješenje je predložen genetički algoritam.

U ovom istraživanju problemi optimalnog pozicioniranja i dimenzionisanja baterija kondenzatora i problem projektovanja pasivnih filtara posmatraju se razdvojeno. Autori ra-

da [22] su detaljno, korak po korak, predstavili algoritam projektovanja pasivnih filtara u distributivnim sistemima navodeći prednosti i mane njihove primjene. U radu [23] autori se bavili izborom topologije pasivnih filtara u distributivnim mrežama. Objavljeno je mnogo radova u kojima su predložena rješenja problema optimalnog pozicioniranja i dimenzionisanja baterija kondenzatora i pasivnih filtara, što predstavlja planerski problem u elektroenergetskim sistemima. Manje radova objavljeno je na temu eksploatacije postojećih pasivnih kompenzatora. Autori rada [24] predložili su koncept virtuelnog kompenzatora, kao jedan od algoritama koji daje optimalne kombinacije već postojećih baterija kompenzatora i pasivnih filtara u industrijskoj mreži. Uticaj postojanja viših harmonika na elektroenergetski sistem opisan je u radu [25].

1.3 Doprinos istraživanja

U ovom radu korišćena su dva testna sistema prilikom optimalnog pozicioniranja i dimenzionisanja baterija kondenzatora pomoću CFBPSO algoritma: distributivna mreža sa 85 sabirnica i industrijska mreža. Opis i analiza mjerenja sprovedena u drugom testnom sistemu, dati su u glavi [3]. Rezultati na često korišćenom testnom sistemu za rješavanje problema optimizacije baterija kondenzatora, kakva je distributivna mreža sa 85 sabirnica, pokazuju prednost korišćenja CFBPSO nad algoritmima PSO [26], PGSA [27] i MNLP [28]. Prednosti korišćenja CFBPSO algoritma prvenstveno se ogledaju u značajnijem umanjenju gubitaka u mreži [29]. Pronalazak optimalnih pozicija i snaga baterija kondenzatora koristeći CFBPSO urađen je i za industrijsku mrežu. Nakon toga, opisan je pristup projektovanju pasivnih filtara za specifično nelinearno opterećenje, kakve su elektrolučne peći u industrijskoj mreži. Kako bi se izbjegla pojava rezonanse tokom eksploatacije industrijske mreže i kako bi se uspostavio optimalan rad pasivnih kompenzatora, algoritam opisan u [24] iskorišćen je za upravljanje pasivnim kompenzatorima projektovanim za industrijsku mrežu.

1.4 Organizacija rada

U drugoj glavi predstavljen je značaj kompenzacije reaktivne snage u distributivnim i industrijskim mrežama, kao i načini kompenzacije s obzirom na lokaciju. Predstavljeni su načini filtriranja viših harmonika u mrežama u kojima su prisutni nelinearni potrošači. U trećoj glavi dati su osnovni podaci o industrijskoj mreži, koja je jedan od testnih sistema za CFBPSO optimizaciju. Dat je pregled i analiza rezultata mjerenja parametara koji se odnose na kvalitet električne energije. CFBPSO algoritam, koji je korišćen da bi se odredile optimalne lokacije i snage paralelnih baterija kondenzatora, opisan je u četvrtoj glavi. Dat je dijagram toka CFBPSO algoritma i matematički model. Peta glava odnosi se na implementaciju CFBPSO algoritma na dva testna sistema. U prvom koraku se računaju indeksi osjetljivosti, koji su korišćeni kako bi se odredilo koje sanirnice su najbolji kandidati za postavljanje baterija kondenzatora. U drugom koraku vrši se minimizacija kriterijumske funkcija, uz poštovanje svih ograničenja. U petoj glavi opisano je i određivanje parametara pasivnih filtara u industrijskoj mreži na osnovu rezultata CFBPSO algoritma. U šestoj glavi data je rezultati i analiza u vezi sa eksploatacijom kompenzatora koji su instalirani u industrijskoj mreži. Data je analiza uticaja uključivanja kompenzatora na odgovarajuću

kriterijumsku funkciju, sa mogućnošću pojave rezonanse i antirezonanse. Kratak osvrt na cjelokupni rad, kao i zaključak sprovedenog istraživanja dati su u sedmoj glavi.

Glava 2

Kompenzacija reaktivne snage u distributivnim i industrijskim mrežama

Ekonomski značaj distributivnih podsistema je izuzetno veliki. Imperativ je detaljno pristupiti planiranju, projektovanju, izvođenju i eksploataciji distributivnog podsistema jer su troškovi usljed izgradnje i eksploatacije izuzetno veliki. Distributivne mreže se uslovno mogu podijeliti na:

- gradske mreže,
- prigradske mreže,
- vangradske (seoske) mreže i
- industrijske mreže.

U nastavku rada pojam kompenzacija distributivnih i industrijskih mreža odnosiće se na kompenzaciju reaktivne snage u distributivnim i industrijskim mrežama. Osnovni ciljevi kompenzacije distributivnih i industrijskih mreža su [30]:

- smanjenje troškova za utrošenu električnu energiju,
- smanjenje gubitaka u mreži,
- oslobađanje kapaciteta vodova i transformatora od prenosa reaktivne snage kako bi se investicije preusmjerile u izgradnju novih vodova i transformatora.

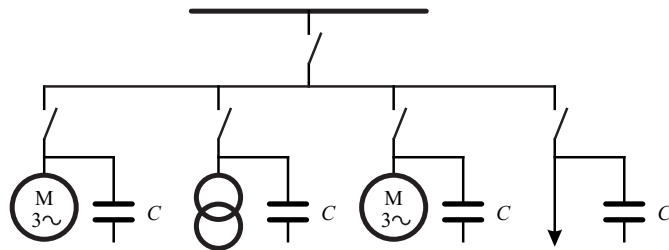
Prevashodno se kompenzacijom reaktivne snage u distributivnim i industrijskim mrežama želi izbjeći plaćanje visokih penala za nizak faktor snage. Prisutne su različite metode kako bi se ostvarila kompenzacija reaktivne snage. Metode ili načini kompenzacije u industrijskoj i distributivnoj mreži mogu se podijeliti s obzirom na lokaciju kompenzatora i s obzirom na vrstu kompenzacionih uređaja koji se koriste.

2.1 Načini kompenzacije s obzirom na lokaciju

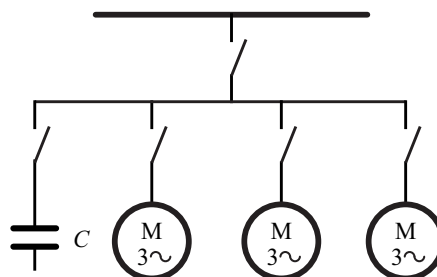
U odnosu na lokaciju, na koju se postavljaju kompenzatori u sistemu, razlikuju se:

- pojedinačna kompenzacija,
- grupna kompenzacija,
- centralna kompenzacija i
- mješovita kompenzacija.

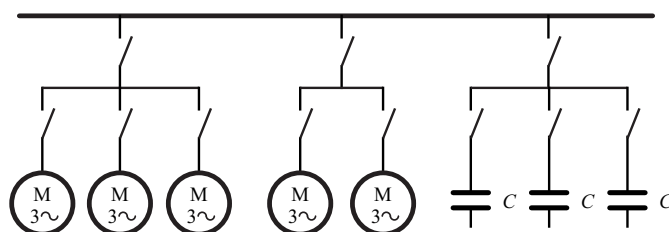
Na slikama [2.1](#), [2.2](#), [2.3](#) ilustrovane su redom pojedinačna, grupna i centralna kompenzacija. Mješoviti tip kompenzacije predstavlja kombinaciju pojedinačne, grupne i centralne kompenzacije.



Slika 2.1: Pojedinačna kompenzacija



Slika 2.2: Grupna kompenzacija



Slika 2.3: Centralna kompenzacija

2.2 Kompenzacija reaktivne snage

Prisustvo reaktivne snage je neophodno za mnoge potrošače u elektroenergetskom sistemu, kao što su asinhroni motori kojima je reaktivna snaga potrebna za magnjećenje. Elektrolučnim pećima takođe je potrebna reaktivna snaga, ali sa stanovišta parametara kvaliteta je poželjno da se reaktivna snaga generiše lokalno, kako bi se umanjili reaktivni tokovi. Elementi tj. uređaji koji proizvode reaktivnu snagu su sredstva kojima se generiše reaktivna snaga. Kada se usvoji konvencija prema kojoj se struja konjuguje pri proračunu kompleksne snage, induktivnosti u elektroenergetskom sistemu troše reaktivnu snagu, a kapacitivnosti proizvode reaktivnu snagu. Elementi koji proizvode reaktivnu snagu su: sinhroni kompenzator, otočne i redne baterije kondenzatora, statički kompenzacioni uređaji i sistemi.

Sinhroni motor bez mehaničkog opterećenja je sinhroni kompenzator koji, u zavisnosti od pobudne struje, generiše ili troši reaktivnu snagu. Sinhroni kompenzator, kao idealizovani element u elektroenergetskom sistemu, ima balans aktivnih snaga jednak nuli. Podešavanjem pobudne struje sinhronog kompenzatora utiče se samo na reaktivna injektiranja u mreži. Ugradnja sinhronih kompenzatora mora biti tehničko-ekonomski isplativa s obzirom na to da je cijena sinhronih kompenzatora, kao rotacionih mašina, izuzetno visoka.

Statički kompenzacioni uređaji su uređaji koji proizvode ili troše reaktivnu snagu. Vežani su otočno u mrežu, čija se reaktivna snaga mijenja kontrolišući neke specifične promjenljive ili parametre sistema. Pojam „statički” naglašava da ovi uređaji nemaju obrtnih komponenata. Zahvaljujući sve većem razvoju uređaja energetske elektronike, ovakav način kompenzacije se često ugrađuje u moderne elektroenergetske sisteme. Statički kompenzacioni sistemi su kombinacija statičkih kompenzacionih uređaja i mehanički prekidanih prigušnica i/ili otočnih kondenzatora [30]. Osnovna prednost statičkih kompenzacionih sistema je sposobnost održavanja napona konstantnim pri promjeni reaktivne snage. U odnosu na način regulacije susceptanse kompenzacionog uređaja, razlikuju se:

- uređaji sa kontinualnom regulacijom,
- uređaji sa diskontinualnom regulacijom,
- uređaji sa inherentnom kontrolom susceptanse,
- statički kompenzacioni sistemi koje čine kombinacije fiksnih ili kontrolisanih baterija kondenzatora ili kontrolisanih prigušnica.

Zajednički nedostatak statičkih uređaja za kompenzaciju je da im ponašanje izuzetno zavisi od lokacije.

Baterije kondenzatora vezane otočno ili redno najčešće se koriste u distributivnim i industrijskim mrežama. Formiraju se redno-paralelnim kombinacijama kojima se postiže željena snaga.

2.3 Filtriranje viših harmonika

Harmonijska izobličenja posljedica su postojanja nelinearnih potrošača u elektroenergetskim sistemima. Viši harmonici struje negativno utiču na širok spektar opreme elektroenergetskog sistema, naročito na transformatore, kondenzatore i motore. Njihovo prisustvo dovodi do povećanih gubitaka, preopterećenja i prekomjernog zagrijavanja. Filtriranje viših harmonika napona i struje u elektroenergetskim sistema postiže se [31]:

- ugradnjom prigušnice na red sa nelinearnim potrošačem,
- modifikacijom rezonantne učestanosti,
- korišćenjem transformatora sa adekvatnim spregama,
- ugradnjom aktivnih filtara,
- ugradnjom pasivnih filtara.

Ugradnja prigušnica na red sa nelinearnim potrošačima predstavlja najjednostavniji metod za filtriranje viših harmonika. Prigušenje viših harmonika ugradnjom prigušnica često je rješenje kod elektromotornih pogona koji su regulisani pomoću impulsno-širinske modulacije.

Prednost transformatora sa spregom trougao ogleda se u blokiranju toka trećeg harmonika i neparnih umnožaka trećeg harmonika. Još jedna od prednosti ovakvog načina filtriranja viših harmonika je ostvarivanje dvanaesto-pulsne konfiguracije za suzbijanje viših harmonika. Transformatori sa spregom z i sa uzemljenom neutralnom tačkom, kao filtri trećeg harmonika i neparnih umnožaka trećeg harmonika, često se ugrađuju kod komercijalnih potrošačkih područja.

Baterije kondenzatora za kompenzaciju reaktivne snage mogu dovesti do pojave rezonanse kao veoma negativnog efekta u elektroenergetskom sistemu. Za prevazilaženje ovog problema pribjegava se modifikovanju rezonantne frekvencije sistema, što se postiže pomoću: izmiještanja baterija kondenzatora, dodavanja prigušnice na red sa baterijama kondenzatora ili dodavanja paralelnih filtara.

Pasivni filtri predstavljaju kombinaciju induktivnosti, kapacitivnosti i otpornosti koji se koriste za prigušenje viših harmonika i za kompenzaciju reaktivne snage [31]. Ovaj metod je veoma jednostavno rješenje u poređenju sa drugim sredstvima, te se često koristi u distributivnim industrijskim mrežama. U praksi moguća je primjena rednih i paralelnih filtara. O pasivnim filtrima biće više riječi u odjeljku 2.4.

Aktivni filtri su uređaji koji su zasnovani na energetskej elektronici i značajno su skuplji od pasivnih filtara. Osnovna prednost aktivnih filtara je što ne stvaraju rezonantna kola sa ostalim elementima sistema.

2.4 Pasivni filtri

Pasivni filtri sačinjavaju kombinacije kapacitivnosti, induktivnosti i otpornosti, pri čemu se baterijama kondenzatora, koji se koriste u svrhu popravke faktora snage, dodaju induktivnosti i otpornosti tako da formiraju filtre za prigušenje harmonika određene frekvencije. Osnovni zadatak paralelnih pasivnih filtara je da osiguraju malu impedansu za proticanje odgovarajućih viših komponenata prema uzemljenju, dok je osnovni zadatak rednih filtara da obezbijede veliku impedansu za eliminaciju viših harmonika kroz sistem. Češće se koriste paralelni pasivni filtri jer redni filtri stvaraju velike distorzije napona na priključcima potrošača.

Paralelni pasivni filtri ugrađuju se paralelno (otočno) nelinearnim potrošačima. Pogodno ih je ugraditi što bliže izvorima viših harmonika u mreži, kako bi se spriječila propagacija viših harmonika dalje u sistem.

2.4.1 Tipovi paralelnih pasivnih filtara

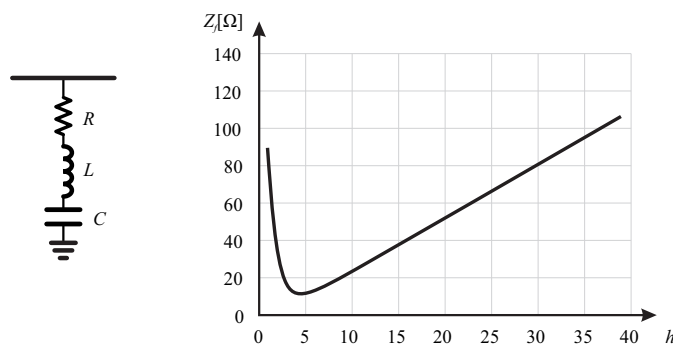
Zahtjevi za filtriranjem kao i raspoloživa finansijska sredstva za ugradnju biće presudni za izbor tipa filtra. Razlikuje se nekoliko osnovnih tipova paralelnih pasivnih filtara:

- filtri podešeni na jednu frekvenciju (filtri sa jednom rezonantnom frekvencijom),
- filtri podešeni na više rezonantnih frekvencija,
- prigušni filtri (visokopropusni filtri koji prigušuju više harmonike).

Paralelne pasivne filtre usklađene na jednu frekvenciju čini redna veza kondenzatora i prigušnice. S obzirom na to da prigušnica sadrži i konačnu provodnost, paralelni pasivni filtri sa jednom rezonantnom frekvencijom modelovani su rednom RLC granom. Kompleksna impedansa filtra sa jednom rezonantnom frekvencijom data je izrazom:

$$Z_f = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} \quad (2.1)$$

Električna šema filtra sa jednom rezonantnom frekvencijom i impedansa filtra u zavisnosti od reda harmonika predstavljene su na Slici 2.4.



Slika 2.4: Filtar sa jednom rezonantnom frekvencijom

Paralelni pasivni filter usklađen je na učestanost ω_r , ako je kapacitivna reaktansa na toj učestanosti jednaka induktivnoj, tada je ukupna impedansa filtra jednaka otpornosti R :

$$Z_f = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} = R \quad (2.2)$$

Rezonantna odnosno podešena učestanost filtra je:

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.3)$$

Na rezonantnoj učestanosti reaktansa kondenzatora ili reaktansa prigušnice imaju vrijednost:

$$X_L = \omega_r L = X_C = \frac{1}{\omega_r C} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.4)$$

Selektivnost tj. oštrina podešavanja paralelnog pasivnog filtra određena je faktorom dobrote (kvaliteta) pasivnog filtra. Obično su visoke vrijednosti faktora dobrote (30-100) odlika rezonantnih filtara. Male vrijednosti faktora dobrote (0.5-5) obezbjeđuju prigušnim filterima male vrijednosti impedanse u širokom frekvencijskom opsegu. Faktor dobrote jednak je faktoru dobrote prigušnice kod rezonantnih pasivnih filtara:

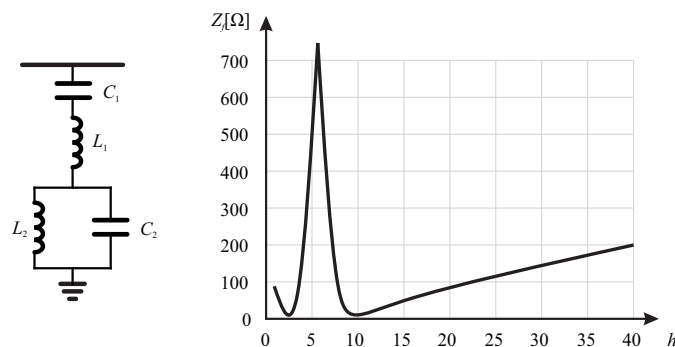
$$Q_z = \frac{\omega_r L}{R} \quad (2.5)$$

Propusni opseg filtra određen je vrijednostima frekvencija kada impedansa filtra ima moduo koji iznosi $\sqrt{2} \cdot R$, i fazni stav $\pi/4$. Faktor neusklađenosti pasivnog filtra δ definisan je na osnovu odnosa napona na prigušnici pri osnovnoj (50 Hz) i podešenoj vrijednosti, a računa se kao:

$$\delta = 1 - \frac{f_1^2}{f_{r,i}^2} \quad (2.6)$$

gdje je f_1 frekvencija osnovne komponente na 50 Hz, a $f_{r,i}$ frekvencija na koju se filter podešava, pri čemu je i red harmonika koji se filtrira.

Električna šema filtra sa dvije rezonantne frekvencije i impedansa filtra u zavisnosti od reda harmonika ilustrovana je na Slici 2.5



Slika 2.5: Filtar sa dvije rezonantne frekvencije

2.4.2 Dimenzionisanje pasivnih filtara

Dimenzionisanje pasivnih filtara podrazumijeva određivanje parametara filtra, koje je potrebno izabrati tako da za određen viši harmonik impedansa filtra ima veoma malu vrijednost. Pri tome potrebno je da se ostvari i optimalna kompenzacija snage.

Neka je učestanost h -tog harmonika, kojeg je potrebno eliminisati označena kao ω_h . Kako bi se ostvarilo da impedansa filtra bude veoma mala na učestanosti ω_h , potrebno je da se izbor parametara filtra izvrši tako da rezonantna učestanost filtra bude jednaka učestanosti harmonika [31]:

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_h. \quad (2.7)$$

Izraz za faktor dobrote kola je druga jednačina koja je potrebna za određivanje RLC parametara:

$$Q_z = \frac{\omega_r L}{R}. \quad (2.8)$$

Obično se za rezonantne filtre usvaja faktor dobrote iz opsega $30 \leq Q_z \leq 100$. Treća jednačina potrebna za dimenzionisanje RLC parametara filtra je:

$$Y_i(\omega_1) = \frac{1}{R + j\omega_1 L + \frac{1}{j\omega_1 C}} \quad (2.9)$$

gdje je $Y_i(\omega_1)$ admitansa rezonantnog filtra na učestanosti od osnovnog harmonika (50 Hz). Susceptansa filtra na učestanosti osnovnog harmonika je:

$$B_i(\omega_1) = \text{Im}\{Y_i(\omega_1)\} = \frac{\omega_1 C (1 - \omega_1^2 LC)}{(\omega_1 RC)^2 + (1 - \omega_1^2 LC)^2}. \quad (2.10)$$

Koristeći jednačine (2.7) i (2.8) dobija se da je susceptansa filtra:

$$B_i(\omega_1) = \frac{\omega_1 C \left(1 - \frac{\omega_1^2}{\omega_r^2}\right)}{\left(\frac{1}{Q_z} \cdot \frac{\omega_1^2}{\omega_r^2}\right)^2 + \left(1 - \frac{\omega_1^2}{\omega_r^2}\right)^2}. \quad (2.11)$$

Uslov da se pomoću filtra ostvari kompenzacija jeste da susceptansa filtra na osnovnoj frekvenciji bude jednaka susceptansi kondenzatora sa optimalno proračunatom kapacitivnošću C_{opt} :

$$B_i(\omega_1) = \omega_1 C_{opt}. \quad (2.12)$$

O optimalno proračunata kapacitivnost kondenzatora biće više riječi u petoj glavi. U ovom radu, optimalne kapacitivnosti baterija kondenzatora određene su na osnovu rezultata CFBPSO optimizacionog algoritma, koji određuje optimalne pozicije i snage baterija kondenzatora. Prema izrazima (2.11) i (2.12) kapacitivnost rezonantnog pasivnog filtra iznosi:

$$C = \frac{\left(\frac{1}{Q_z} \cdot \frac{\omega_1^2}{\omega_r^2}\right)^2 + \left(1 - \frac{\omega_1^2}{\omega_r^2}\right)^2}{\left(1 - \frac{\omega_1^2}{\omega_r^2}\right)} \cdot C_{opt} \quad (2.13)$$

Uzimajući u obzir da je faktor dobrote kod rezonantnih filtara $Q_z \gg 1$, kapacitivnost filtra u RLC grani je:

$$C \approx \left(1 - \frac{\omega_1^2}{\omega_r^2}\right) C_{opt}. \quad (2.14)$$

Kada je poznata kapacitivnost u RLC grani, induktivnost se određuje kao:

$$L = \frac{1}{\omega_r^2 C}. \quad (2.15)$$

Kada su poznate kapacitivnost i induktivnost rezonantnog pasivnog filtra, otpornost se određuje kao:

$$R = \frac{\omega_r L}{Q_z}. \quad (2.16)$$

Kada je cilj eliminisati dva viša harmonika reda h_1 i h_2 , potrebna su dva paralelna rezonantna RLC filtra sa rezonantnim učestanostima ω_{r1} i ω_{r2} :

$$\omega_{r1} = \omega_{h1} \quad \omega_{r2} = \omega_{h2}. \quad (2.17)$$

Tada je ukupna susceptansa jednaka zbiru susceptansi pojedinačnih grana:

$$B_i(\omega) = B_i(\omega_1) + B_i(\omega_2) \approx \frac{\omega_1 C_1}{\left(1 - \frac{\omega_1^2}{\omega_{r1}^2}\right)} + \frac{\omega_2 C_2}{\left(1 - \frac{\omega_2^2}{\omega_{r2}^2}\right)} = \omega_1 C_{opt} \quad (2.18)$$

Ako su harmonici koje je neophodno eliminisati međusobno bliski, jedan od pristupa za određivanje parametara filtarskih grana jeste da se kapacitivnost C_{opt} ravnomjerno rasporedi po granama:

$$C_1 \approx \left(1 - \frac{\omega_1^2}{\omega_{r1}^2}\right) \cdot \frac{C_{opt}}{2} \quad (2.19)$$

$$C_2 \approx \left(1 - \frac{\omega_2^2}{\omega_{r2}^2}\right) \cdot \frac{C_{opt}}{2} \quad (2.20)$$

Parametri induktivnosti i otpornosti određuju se prema izrazima (2.15) i (2.16). Drugi pristup za određivanje parametara paralelnih RLC filtara polazi od pretpostavke da su otpornosti po paralelnim granama jednake. Tada, pored jednačina (2.14), (2.15) i (2.16) dodatna jednačina potrebna za određivanje parametara paralelnih grana je:

$$R_1 = R_2 \implies \frac{\omega_{r1} L_1}{Q_z} = \frac{\omega_{r2} L_2}{Q_z} \implies \omega_{r1} C_1 = \omega_{r2} C_2. \quad (2.21)$$

Glava 3

Industrijska mreža

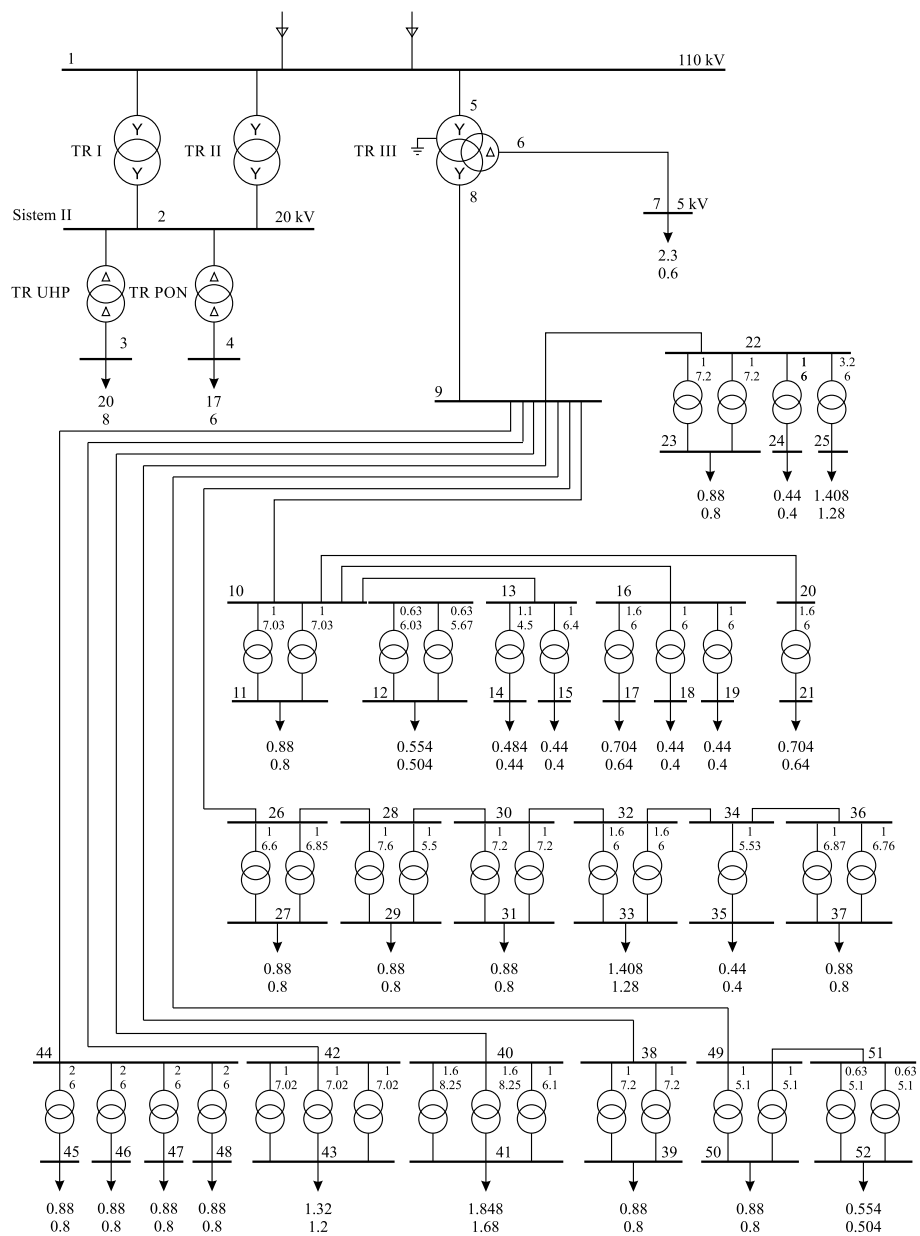
Industrijska mreža, analizirana u ovom poglavlju, jedan je od testnih sistema za CFBP-SO algoritam. U ovoj glavi data je jednopolna šema i osnovni parametri industrijske mreže. Analizirani su i rezultati mjerenja koja su izvedena na sabirnicama naponskog nivoa 110 kV i 20 kV. Pored ovih mjerenja, predstavljeni su i rezultati kratkotrajnih mjerenja na sabirnicama naponskog nivoa 20 kV.

3.1 Osnovni podaci o industrijskoj mreži

Jednopolna šema industrijske mreže prikazana je na Slici 3.1. Mreža se napaja preko dva dalekovoda naponskog nivoa 110 kV HE Dravograd i RTP Ravne, pri čemu je dalekovod RTP Ravne isključen u normalnim uslovima rada i služi kao rezerva za napajanje sistema. U industrijskoj mreži postoje elektrolučne peći, koje su priključene na sabirnice 3 i 4. Ova dva nelinearna potrošača povezana su na dvostruke sabirnice naponskog nivoa 20 kV, koje se napajaju preko dva transformatora 110/20 kV ukupne nominalne prividne snage 40 MVA (TR I i TR II). Jedan potrošač napaja se preko 5 kV sabirnice, koje su povezane sa tercijerom tronamotajnog transformatora VII nominalne prividne snage 40 MVA. Ostali potrošači su priključeni na sabirnice 9, spojene preko sekundara transformatora III.

Otpornosti R i reaktanse X industrijske mreže, svedene na 20 kV nivo, navedene su u Tabeli 3.1. Oznake „Od“ i „Do“ u Tabeli 3.1 označavaju od koje do koje sabirnice se prostire vod.

3.1. Osnovni podaci o industrijskoj mreži



Slika 3.1: Jednopolna šema industrijske mreže

Tabela 3.1: Parametri po granama industrijske mreže

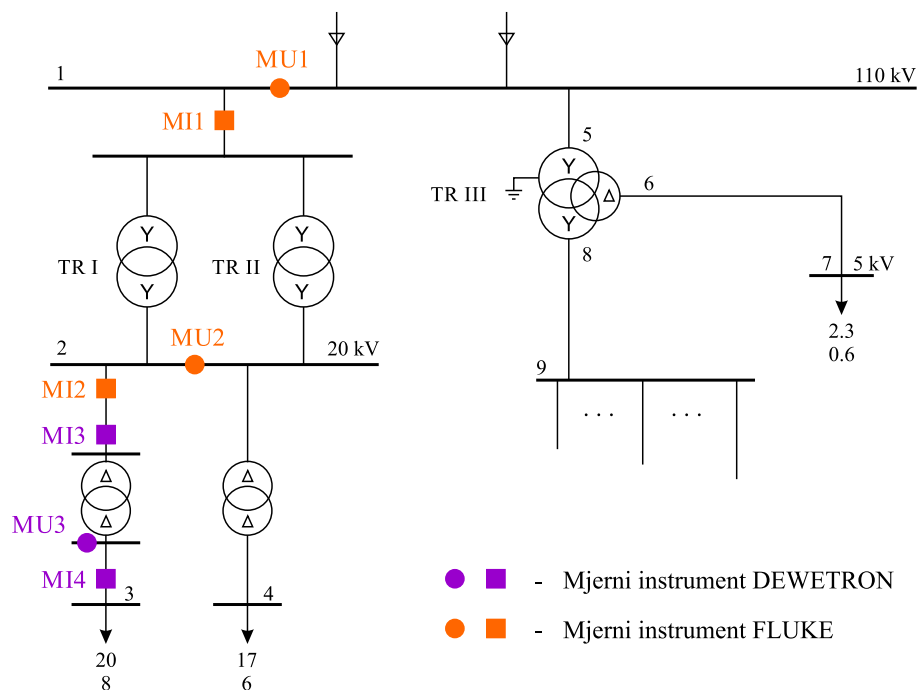
Od	Do	R [Ω]	X [Ω]	Od	Do	R [Ω]	X [Ω]
1	2	0.0259	0.259	26	27	0.6600	6.6000
2	3	0.0507	0.0477	26	28	0.0351	0.0330
2	4	0.0507	0.0477	28	29	0.3190	3.1908
1	5	0.037	0.819	28	30	0.0234	0.0220
5	6	0.082	0.819	30	31	0.3600	3.6000
5	8	0.0035	0.035	30	32	0.0390	0.0367
6	7	0.0390	0.0367	32	33	0.2187	2.1875
8	9	0.0195	0.0183	32	34	0.0195	0.0183
9	10	0.1618	0.1524	34	35	0.5530	5.5300
10	11	0.3515	3.5150	34	36	0.0312	0.0293
10	12	0.4638	4.6384	36	37	0.3407	3.4072
10	13	0.0195	0.0183	9	38	0.0897	0.0844
13	14	0.4090	4.0909	38	39	0.3600	3.6000
13	15	0.6400	6.400	9	40	0.0819	0.0771
10	16	0.0390	0.0367	40	41	0.1812	1.8122
16	17	0.3750	3.7500	9	42	0.1326	0.1248
16	18	0.6000	5.9999	42	43	0.2340	2.3399
10	20	0.0975	0.0918	9	49	0.0409	0.0385
20	21	0.3750	3.7500	49	50	0.2550	2.5499
9	22	0.0507	0.0477	49	51	0.0312	0.0293
22	23	0.36000	3.6000	51	52	0.4047	4.0476
22	24	0.6000	5.9999	44	45	0.3000	3.0000
22	25	0.1875	1.8750	44	46	0.3000	3.0000
9	26	0.0273	0.0257	44	47	0.3000	3.0000
9	44	0.0507	0.0477	44	48	0.3000	3.0000

3.2 Rezultati mjerenja

Mjerenja parametara kvaliteta električne energije vršena su na naponskim nivoima 110 kV i 20 kV, kao što je označeno na Slici 3.2 i to na mjernim mjestima koja su označena kao:

- sabirnice naponskog nivoa 110 kV (MU1, MI1),
- sabirnice naponskog nivoa 20 kV (MU2, MI2).

Kratkotrajna mjerenja označena su kao (MU3), (MI3) i (MU4) na Slici 3.2 i analizirana su u sekciji 3.2.3.



Slika 3.2: Mjerna mjesta u industrijskoj mreži

U okviru mjerenja parametara kvaliteta električne energije prema standardu EN 50160 u trajanju od sedam dana, obavljena su mjerenja sljedećih veličina:

- varijacije napona,
- efektivne vrijednosti napona napajanja i struja po pojedinim harmonicima,
- nesimetrija napona/struja,
- flikeri napona,
- THD napona/struja,
- broj prekida,
- frekvencija.

Mjerenje je višeno pomoću FLUKE 1745 mjernog instrumenta, a za obradu i analizu podataka iskorišćen je PQ Log softver i programski paket MATLAB. U Tabeli 3.2 predstavljene su prenosni odnosi naponskih i strujnih mjernih transformatora (naponski i strujni MT).

U trenutku mjerenja, u mreži su postojale baterije kondenzatora reaktivne snage 9 Mvar, raspoređene na nekoliko sabirnica na naponskom nivou 0.4 kV. Pored toga, na sabirnicama 8 bile su ugrađene baterije kondenzatora reaktivne snage 3 Mvar, te je na sabirnicama 9 postojao pasivni filtar, koji filtrira treći, peti i sedmi harmonik, čija je nominalna reaktivna snaga bila 2.1 Mvar. Takođe, postojalo je kogenerativno postrojenje nominalne prividne snage 2.7 MVA, priključeno na sabirnice 7.

Tabela 3.2: Prenosni odnosi naponskih i strujnih mjernih transformatora

Mjerno mjesto	Naponski MT	Strujni MT
MU1 / MI1	$\frac{110000}{\sqrt{3}} / \frac{100}{\sqrt{3}}$	400/5
MU3 / MI4	$\frac{20000}{\sqrt{3}} / \frac{100}{\sqrt{3}}$	1250/5

3.2.1 Parametri kvaliteta električne energije na 110 kV sabirnicama

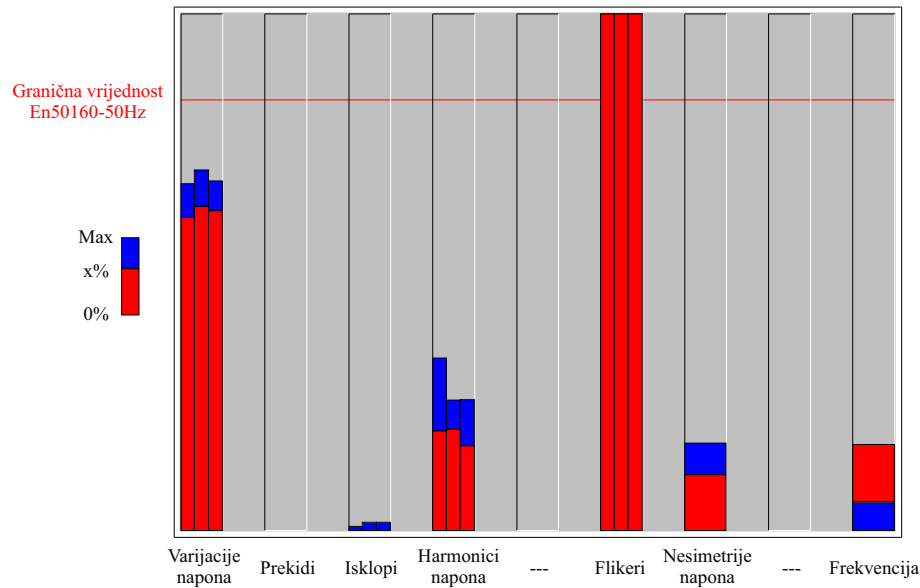
Mjerno mjesto mjerenja parametara kvaliteta električne energije na 110 kV vezana za parametre napona je na Slici 3.2 označeno kao MU1, dok je mjerenje parametara u vezi sa strujom označena sa MI1. Slika 3.3 pokazuje parametre kvaliteta napona na 110 kV sabirnicama. Visina stupca označena crvenom bojom predstavlja vrijednosti pojedinačnog parametra u 95% vremena mjerenja, dok cijela visina stupca predstavlja vrijednosti pojedinačnog parametra u 100% vremena mjerenja. U Tabeli 3.3 predstavljene su vrijednosti određenih parametara kvaliteta, kao i vrijednosti dozvoljene prema Evropskom standardu EN 50160.

Tabela 3.3: Parametri kvaliteta napona na 110 kV sabirnicama

Parametar		EN 50160-50 Hz	Maksimalna vrijednost			95% vremena		
			L1	L2	L3	L1	L2	L3
Varijacije napona		63510 V				95% - vrijednost		
Maksimum 100%/95%	% [Vn]	+10/-10	8.07	8.38	8.14	7.27	7.54	7.42
Minimum 100%/95%	% [Vn]	-15/-10	1.96	2.35	1.99	1.96	2.35	1.99
Prekidi		100	0	0	0			
Harmonici napona								
6. harm. 100%/90%	[%V _{h1}]	0.5/0.5	0.20	0.15	0.15	0.05	0.05	0.05
25. harm. 100%/90%	[%V _{h1}]	1.5/1.5	0.40	0.45	0.35	0.35	0.35	0.3
Flikeri 100%/95% <i>Plt</i>	%	1/1	3.344	3.163	2.928	2.604	2.502	2.375
Nesimetrija napona 100%/95%	%	2/2		0.41			0.26	
Frekvencija		50 Hz						99%
Maksimum 100% /99.5%	%	+4/-1		0.20			0.20	
Minimum 100% /99.5%	%	-6/-1		-0.40			-0.20	

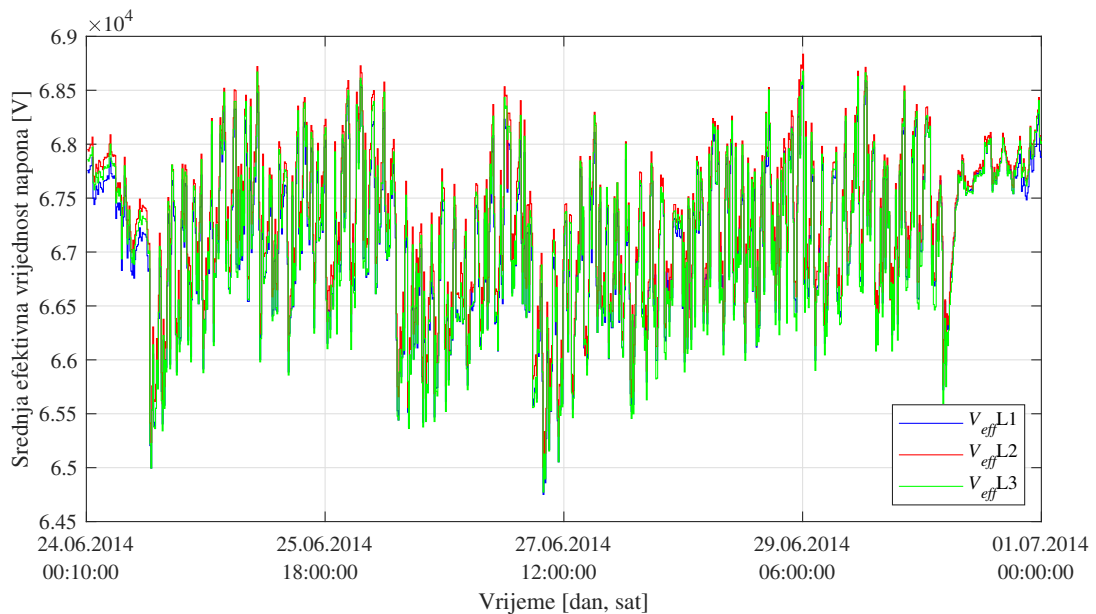
Treperenja napona odnosno naponski flikeri kao pojava mogu se primjetiti na rasvjetnim tijelima. Flikeri koji u Tabeli 3.3 nose oznaku *Plt*, označavaju da se radi o dugotrajnim naponskim flikerima. Izračunati na osnovu niza od dvanaest izmjerenih vrijednosti kratkotrajnih naponskih flikera *Pst* (koji se mjere u trajanju od deset minuta):

$$Plt = \sqrt[3]{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} Pst} \quad (3.1)$$



Slika 3.3: Parametri kvaliteta napona na 110 kV sabirnicama

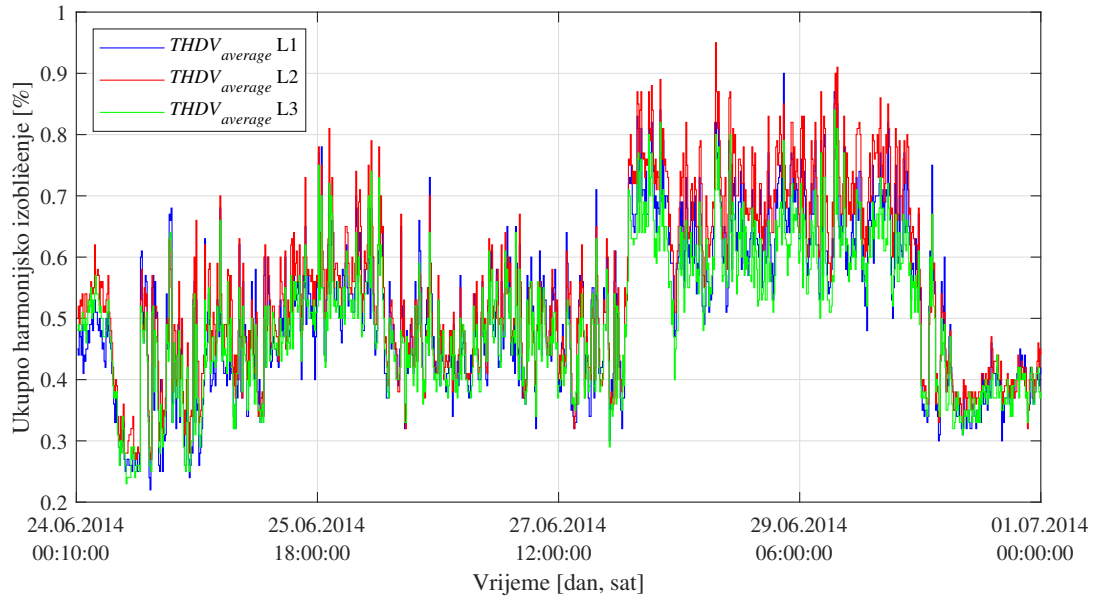
Rezultati analize pokazuju da kvalitet napona na mjernom mjestu ne zadovoljava standarde EN 50160, što se može uočiti i iz Tabele 3.3 i sa Slike 3.3. Vrijednosti flikera napona prekoračile su maksimalne vrijednosti propisane standardom. Po fazama vrijednosti flikera napona kreću se približno u rasponu od 2.4 do 2.6, dok maksimalna vrijednost definisana standardom iznosi 1. Flikeri napona su uglavnom rezultat rada nelinearnih potrošača. Ostali parametri kvaliteta su u okviru standardom definisanih vrijednosti. Prema Tabeli 3.3, može se uočiti da se radi o dugotrajnim flikerima napona (Plt). Na Slici 3.4 predstavljena je srednja efektivna vrijednost napona po fazama na 110 kV sabirnicama. Vrijednosti svih veličina mjerenih na mjernim mjestima (MU1, MI1, MU2 i MI2) su usrednjavane na petnaestominutnom intervalu.



Slika 3.4: Srednja vrijednost napona na 110 kV sabirnicama

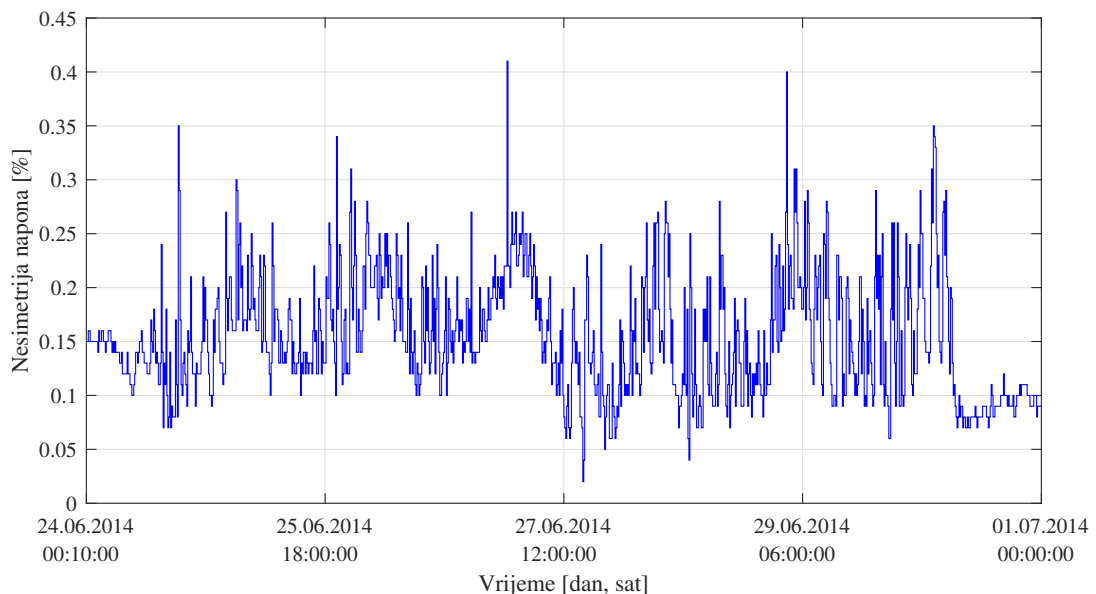
3.2. Rezultati mjerenja

Posmatrajući Sliku 3.4 može se zaključiti da se izrazito dinamična priroda nelinearnih potrošača u industrijskoj mreži prenosi i na sabirnice naponskog nivoa 110 kV. Srednja vrijednost ukupne (totalne) harmonijske distorzije napona (THD) po fazama na 110 kV sabirnicama tokom sedmodnevnog perioda mjerenja predstavljena je na Slici 3.5.



Slika 3.5: Ukupno harmonijsko izobličenje napona na 110 kV sabirnicama

Može se uočiti da se ukupna harmonijska distorzija napona na 110 kV sabirnicama razlikuje po fazama, te da su vrijednosti ukupne harmonijske distorzije napona za fazu L2 veće nego u odnosu na druge dvije faze. Nesimetrija napona na 110 kV sabirnicama ilustrovana je na Slici 3.6.



Slika 3.6: Nesimetrija napona na 110 kV sabirnicama

Ukupna harmonijska distorzija je mala i iznosi ispod 1% po fazama, dok je gornja granična vrijednost prema standardu 8%. Najkritičniji je 25. harmonik koji dostiže vrijednost do 0.35%, a granična vrijednost prema standardu je 1.5%. Nesimetrija napona na sabirnicama 110 kV postoji, ali u okviru standardom definisanih vrijednosti. Uzimajući u obzir 95% vremena, dostiže vrijednost 0.26% što je ispod granične vrijednosti prema standardu, koja iznosi 2%.

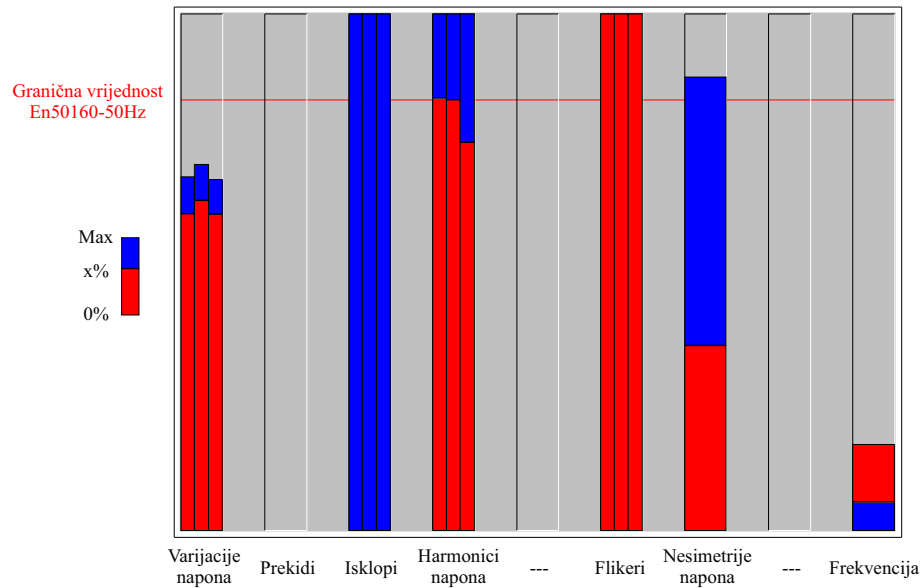
3.2.2 Parametri kvaliteta napona na 20 kV sabirnicama

Mjerenja su vršena i na 20 kV sabirnicama. Mjerna mjesta su na Slici 3.2 označena sa MU2 i MI2. Elektrolučne peći koje su na Slici 3.1 označene kao potrošači 3 i 4, povezane su na sabirnice Sistem II preko transformatora. Rezultati mjerenja dati su u Tabeli 3.4

Tabela 3.4: Parametri kvaliteta napona na 20 kV sabirnicama

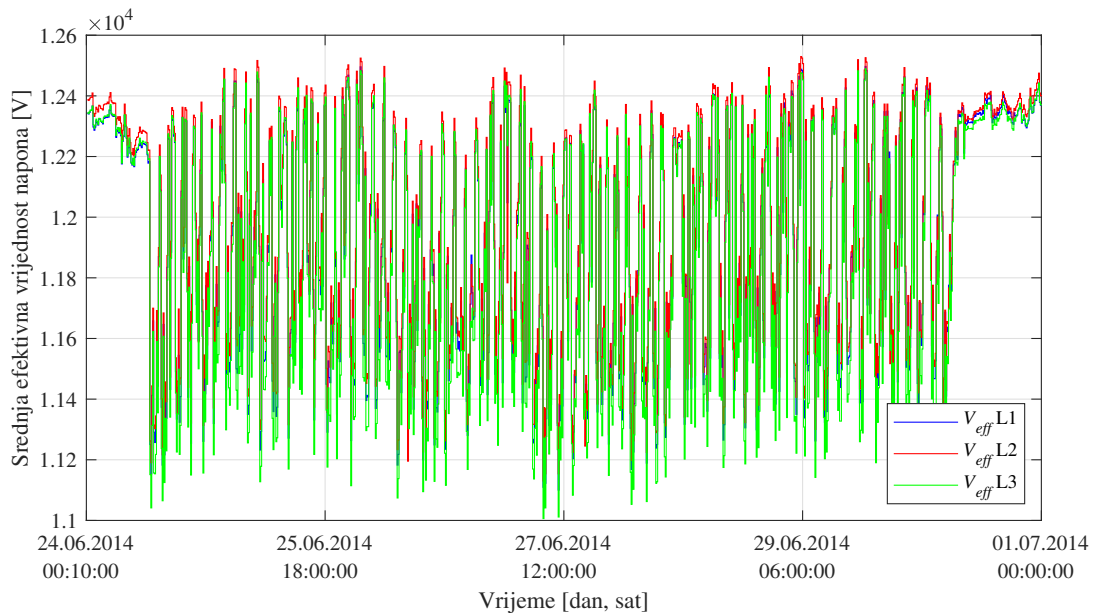
Parametar			Maksimalna vrijednost			95% vremena		
			EN 50160-50 Hz					
			L1	L2	L3	L1	L2	L3
Varijacije napona		63510 V				95% - vrijednost		
Maksimum 100%/95%	% [V _n]	+10/-10	8.23	8.51	8.16	7.37	7.67	7.36
Minimum 100%/95%	% [V _n]	-15/-10	-3.87	-3.61	-4.69	-3.87	-3.61	-4.69
Prekidi		100	0	0	0			
Isklopi		100	4786	3286	5028			
Harmonici napona								
6. harm. 100%/90%	[%V _{h1}]	0.5/0.5	1.35	0.95	0.95	0.5	0.5	0.45
Flikeri 100%/95% <i>Plt</i>	%	1/1	6.461	9.503	4.487	5.313	6.335	3.809
Nesimetrije napona 100%/95%	%	2/2	2.11			0.86		
Frekvencija		50 Hz				99%		
Maksimum 100% /99.5%	%	+4/-1	0.20			0.20		
Minimum 100% /99.5%	%	-6/-1	-0.40			-0.20		

Rezultati analize pokazuju da kvalitet napona na mjernom mjestu ne odgovara odredbama standarda EN 50160. Granične vrijednosti standarda prekoračene su zbog postojanja flikera napona, pri čemu najveće pofazne vrijednosti, uzimajući u obzir 95% vremena, prelaze vrijednost od 6%. Tokom mjernog perioda desio se i veliki broj događaja. Većina događaja bili su padovi napona, što nije neočekivano s obzirom na to da se mjerno mjesto nalazi oko 300 m od transformatora pomoću kog je elektrolučna peć (potrošač 3) povezana na sabirnice Sistem II. Rezultati mjerenja pregledno su ilustrovani i na Slici 3.7



Slika 3.7: Parametri kvaliteta napona na 20 kV sabirnicama

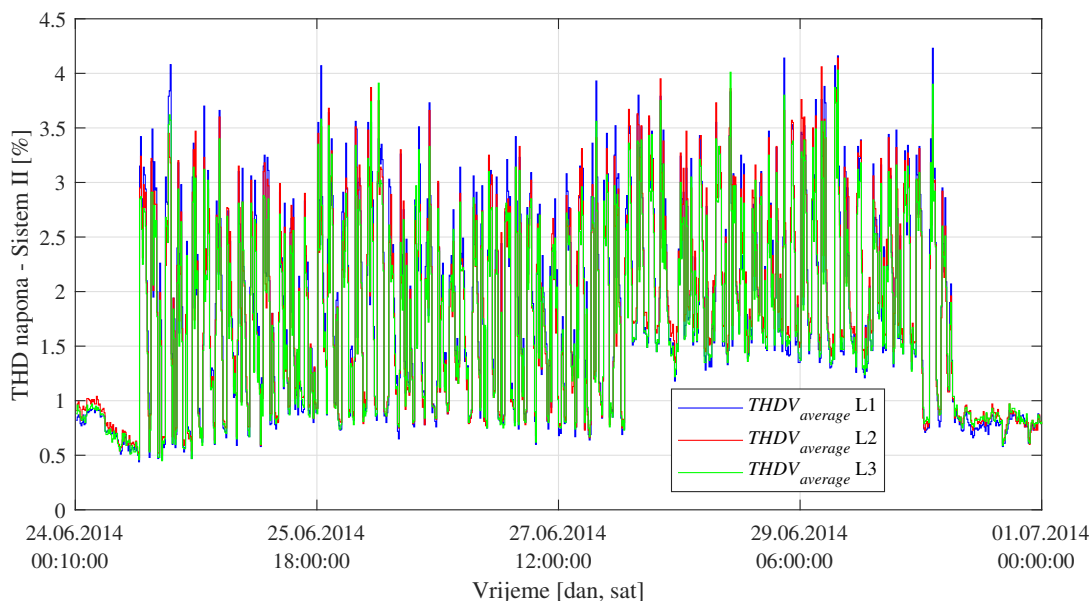
Na Slici 3.8 predstavljene su srednje efektivne vrijednosti napona po fazama sabirnica Sistem II.



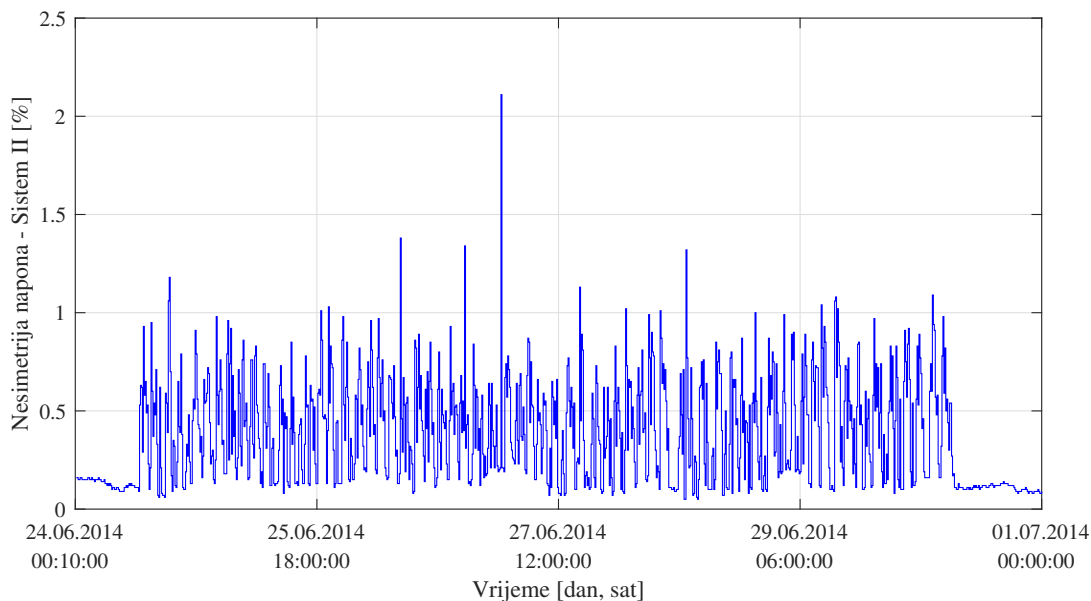
Slika 3.8: Srednja vrijednost napona na sabirnicama Sistem II

Slika 3.8 pokazuje da srednja efektivna vrijednost napona na 20 kV varira od 11 kV do 12.6 kV u zavisnosti od radnog režima nelinearnih potrošača. Na početku i na kraju mjernog perioda prisutne su stabilnije efektivne vrijednosti napona, što ukazuje da su nelinearni potrošači isključeni. Može se uočiti nesimetrija između efektivnih vrijednosti napona između faza L2 i L3. Srednja vrijednost totalne harmonijske distorzije napona

po fazama na 20 kV sabirnicama Sistem II ilustrovana je na Slici 3.9, dok je nesimetrija napona predstavljena na Slici 3.10.



Slika 3.9: Ukupno harmonijsko izobličenje napona na sabirnicama Sistem II



Slika 3.10: Nesimetrija napona na sabirnicama Sistem II

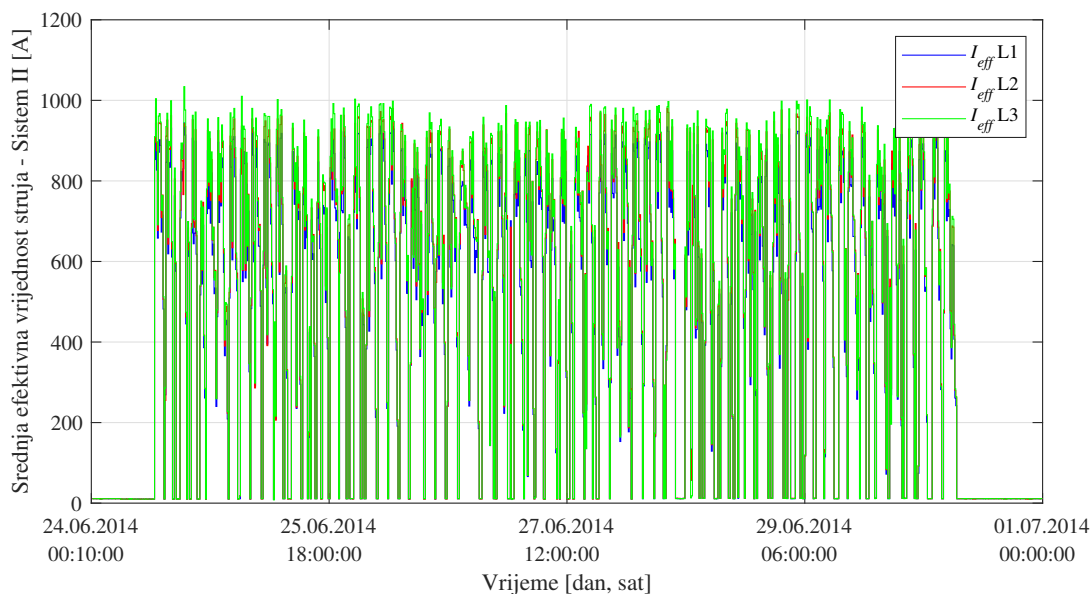
Jako male vrijednosti ukupnog hamornijskog izobličenja i nesimetrije napona na početku i na kraju mjernog perioda takođe govore da su nelinearni potrošači van pogona. Ukupno harmonijsko izobličenje napona na sabirnicama Sistem II, koje su bliže nelinearnim potrošačima, značajno su veće nego ukupno harmonijsko izobličenje napona na 110 kV sabirnicama, ilustrovano na Slici 3.5. Vrijednosti nesimetrije napona na sabirnicama Sistem II veće je od vrijednosti propisanih standardom EN 50160. Maksimalna

vrijednost nesimetrije napona ostvarena je za radni režim tokom dana 26.06.2014. godine. Tada je neuravnotežnost po fazama bila najveća te je premašila vrijednost od 2% koja je dozvoljena prema standardu EN 50160.

Specifičnost potrošnje u ovoj industrijskoj mreži je velika fluktuacija snage, koja je rezultat promjenljivog rada elektrolučnih peći. Iz tog razloga tumačenju ukupne harmonijske distorzije struje, koja je data kao relativna vrijednost u odnosu na osnovnu komponentu, treba posvetiti posebnu pažnju. Ispostavlja se da se najveće vrijednosti ukupne harmonijske distorzije javljaju kada je osnovna komponenta struje niska. To znači da relativne vrijednosti struja po harmonicima i ukupna harmonijska distorzija struje mogu dostići velike vrijednosti, ali su apsolutne vrijednosti struja niske. Sličan zaključak se može donijeti i za faktor snage. Zbog velike promjene reaktivne snage, faktor snage se takođe mijenja. Rezultati analize pokazuju da faktor snage dostiže ekstremne vrijednosti pri relativno malom opterećenju kada su aktivna i reaktivna snaga niske.

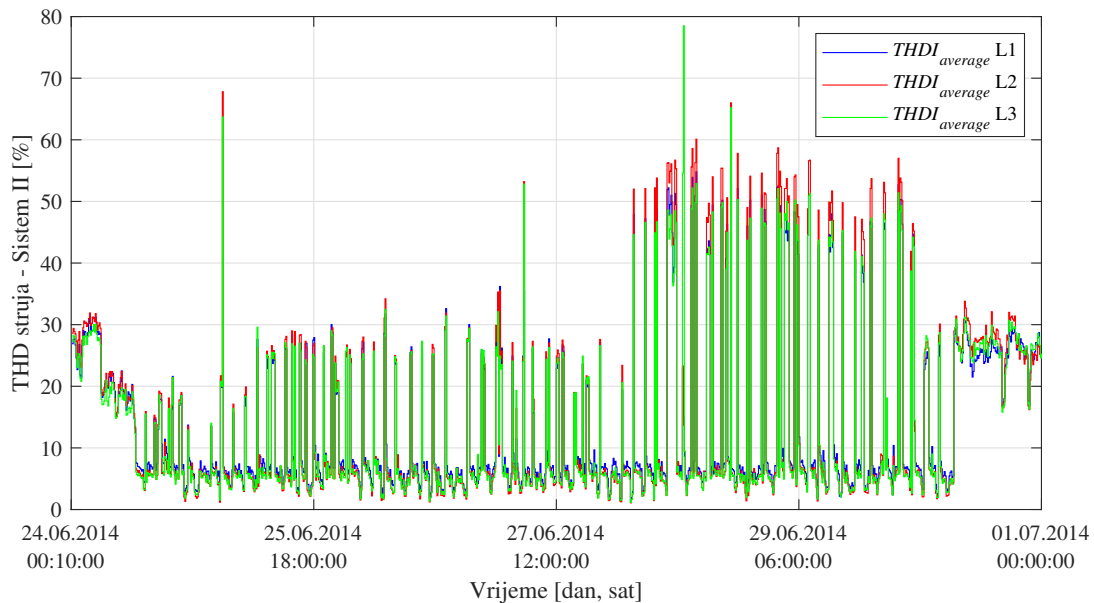
Srednje efektivne vrijednosti struja po fazama ilustrovane su na Slici 3.11. S obzirom na to da su postojala dva strujna mjerna transformatora na fazama L1 i L2 i kako nije bilo neutralnog provodnika, treća struja računata je kao:

$$i_3 = -i_1 - i_2. \quad (3.2)$$



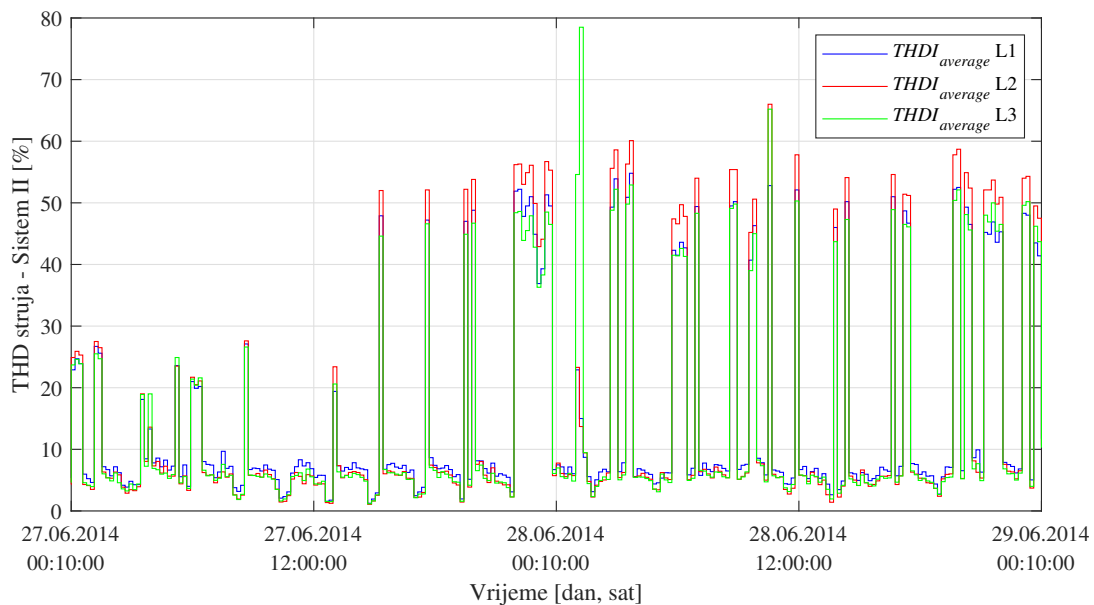
Slika 3.11: Srednje efektivne vrijednosti struja na sabirnicama Sistem II

Ukupno harmonijsko izobličenje struja po fazama sabirnica Sistem II ilustrovano je na Slici 3.12.



Slika 3.12: Ukupno harmonijsko izobličenje struja na sabirnicama Sistem II

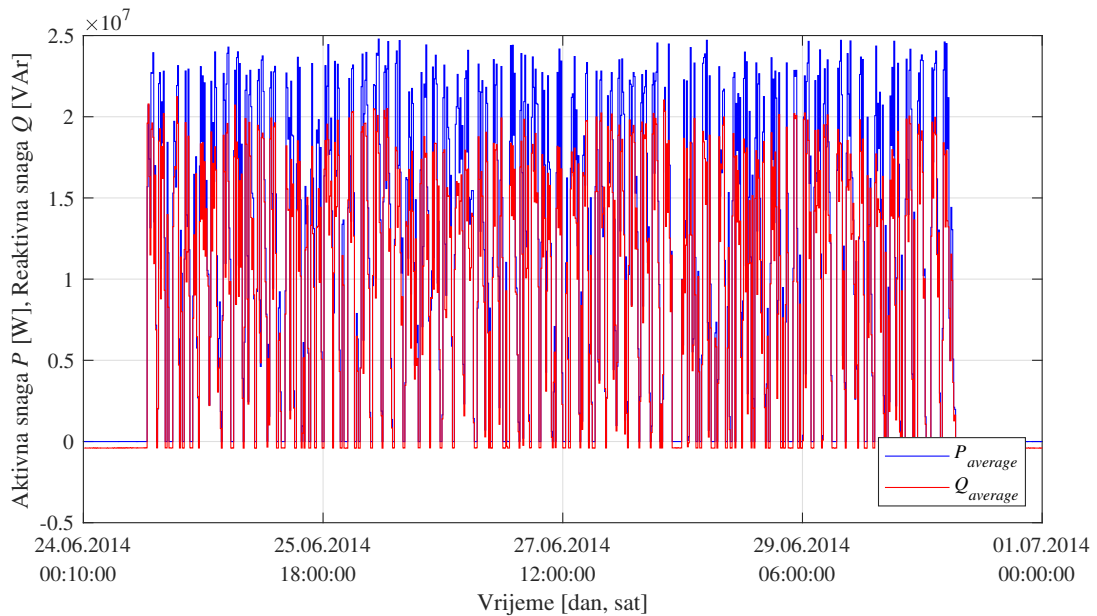
Vrijednosti ukupnog harmonijskog izobličenja struja su izuzetno visoke, što je i očekivano s obzirom na blizinu mjerenja u odnosu na nelinearne potrošače u industrijskoj mreži. Na Slici 3.12 se jasno mogu uočiti različiti periodi rada elektrolučnih peći jer vrijednosti totalnog harmonijskog izobličenja osciluju od veoma malih vrijednosti, ispod 10% pa sve do čak 80% kada elektrolučne peći tope rudu. Ukupno harmonijsko izobličenje tokom dva dana, koje najbolje pokazuje dinamičnost rada ovih potrošača, ilustrirano je na Slici 3.13



Slika 3.13: Ukupno harmonijsko izobličenje struja na sabirnicama Sistem II tokom 48h

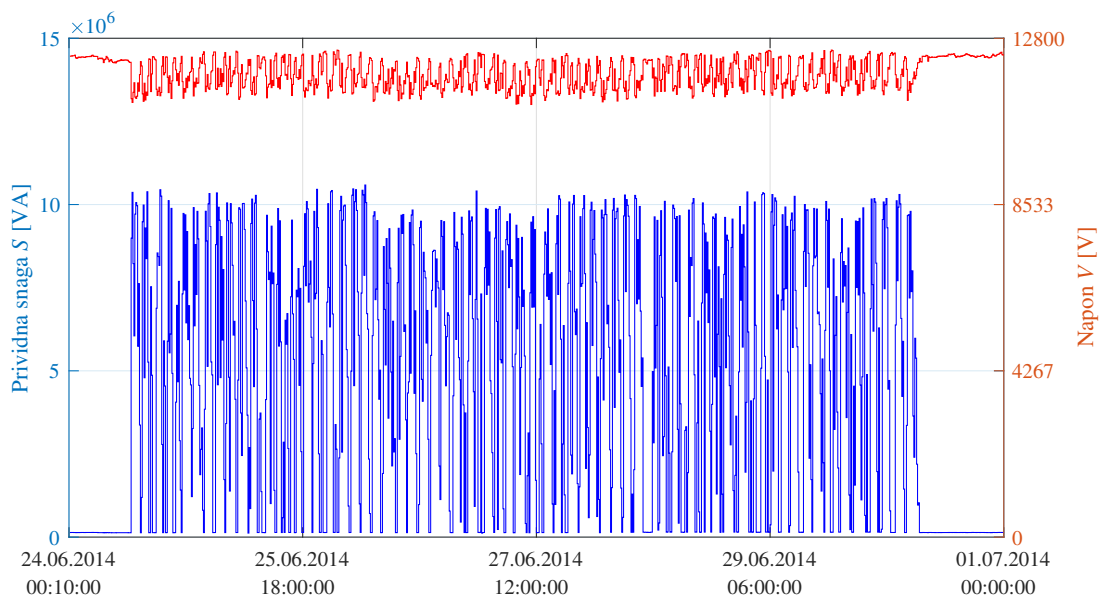
Dokaz da su elektrolučne peći izuzetno dinamična opterećenja pokazuju i rezultati mjerenja na odvodu transformatora UHP. Promjene aktivne i reaktivne snage ilustrirane su

na Slici 3.14



Slika 3.14: Ukupna aktivna i reaktivna snaga - Sistem II

Crvena boja na grafiku 3.14 svjedoči o velikim zahtjevima potrošača, koji je spojen radialno u odnosu na mjerno mjesto, za reaktivnom snagom. Kada zahtjev za reaktivnom snagom poraste za 20 Mvar, stvori se veliki udar na mrežu, pri čemu je sposobnost prenosa aktivne snage narušena zbog reaktivnih tokova. Promjena prividne snage i napona faze L1 ilustrovana je na Slici 3.15.



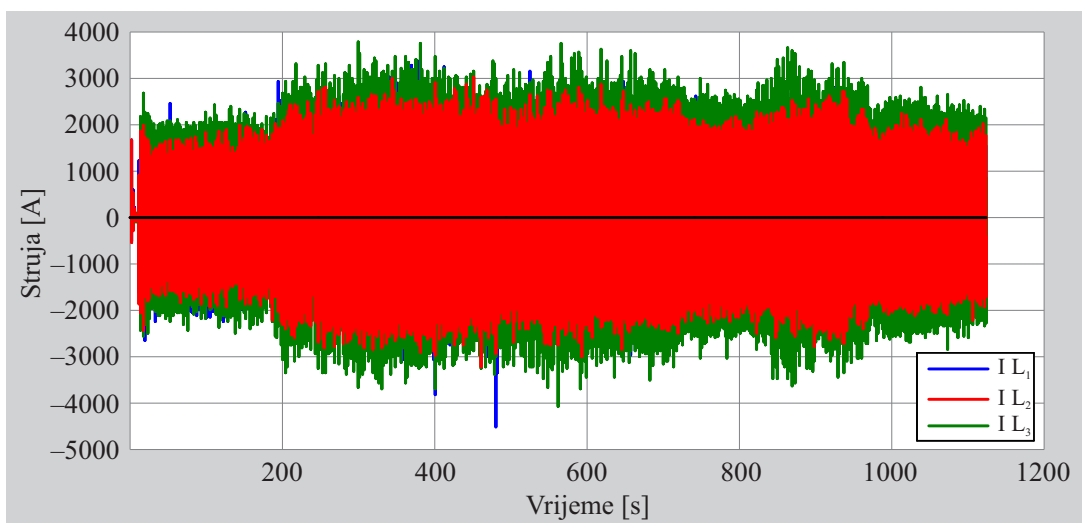
Slika 3.15: Prividna snaga i napon faze L1

Rezultati mjerenja pokazuju izuzetne oscilacije napona i struja, samim tim i snaga tokom perioda mjerenja. Ukupno harmonijsko izobličenje struja na sabirnicama Sistem II je izuzetno izraženo. U opštem slučaju, posmatrajući elektrolučne peći kao velike potrošače, sa aspekta parametara kvaliteta električne energije, poželjno bi bilo kompenzovati reaktivnu snagu lokalno, što bliže potrošačima. Tada se potrebe za reaktivnom snagom iz mreže smanjuju, čime se oslobađaju prenosni kapaciteti vodova za prenos aktivne snage. Faktor snage će se popraviti, pa tako potrošač neće plaćati visoke račune za prekomjerno preuzetu reaktivnu energiju. Kompenzacijom reaktivne snage uticaće se i na poboljšanje naponskih profila u mreži. Umanjenjem toka viših harmonika prema elektroenergetskom sistemu, smanjiće se ukupno harmonijsko izobličenje, što se može ostvariti ugradnjom pasivnih filtara što bliže nelinearnim izvorima.

3.2.3 Kratkotrajna mjerenja

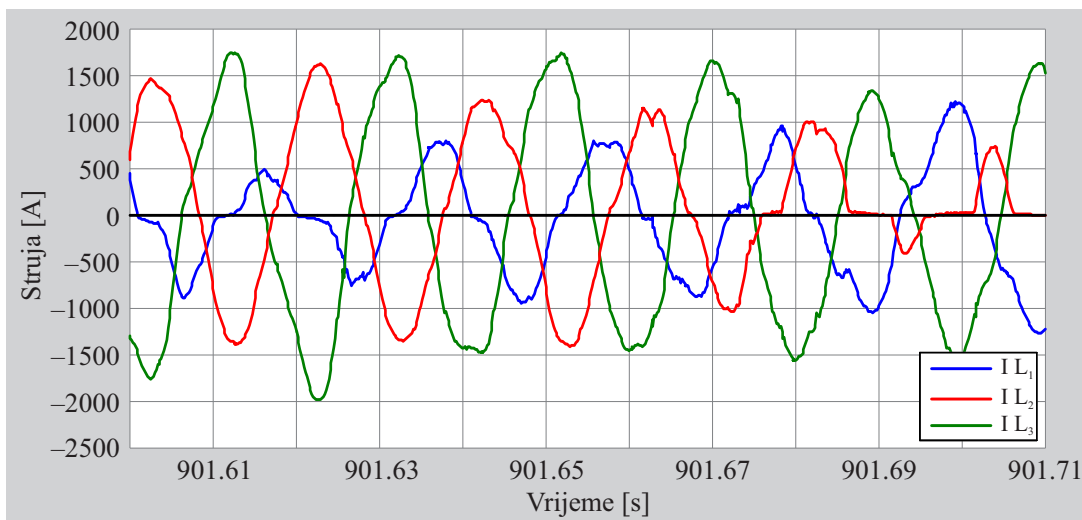
Kratkotrajna mjerenja talasnih oblika struja i napona vršena su na mjernim mjestima koja su na Slici 3.2 označena sa MI3, MU3 i MI4. Kratkotrajna mjerenja trenutnih vrijednosti struje vršena su na primarnoj i sekundarnoj strani transformatora UHP, dok je kratkotrajno mjerenje trenutnih vrijednosti napona vršeno samo na sekundarnoj strani. Mjerenja su bila izvedena 3. jula 2014. godine.

Mjerenje talasnih oblika napona i struja obavljeno je pomoću mjernog instrumenta Dewetron DEWE-BOOK. Frekvencija odmjeraanja iznosila je 6400 Hz ili 128 odmjeraaka po periodu signala napona i struje. Rezultati kratkotrajnih mjerenja zavise od trenutnog radnog režima rada elektrolučnih peći. S obzirom na to da je promjena opterećenja peći dinamična, radni režim se mijenja veoma brzo. Kratkotrajna mjerenja obuhvataju vremenski interval od 12:17:44 do 12:36:33. Struje sve tri faze na primarnoj strani transformatora, na mjernom mjestu označenom kao MI3, prikazane su na Slici 3.16. Nesimetričnost struja između faza L2 i L3, kao jedna od glavnih karakteristika nelinearnih potrošača velike snage, jasno se može vidjeti i tokom kratkotrajnih mjerenja.



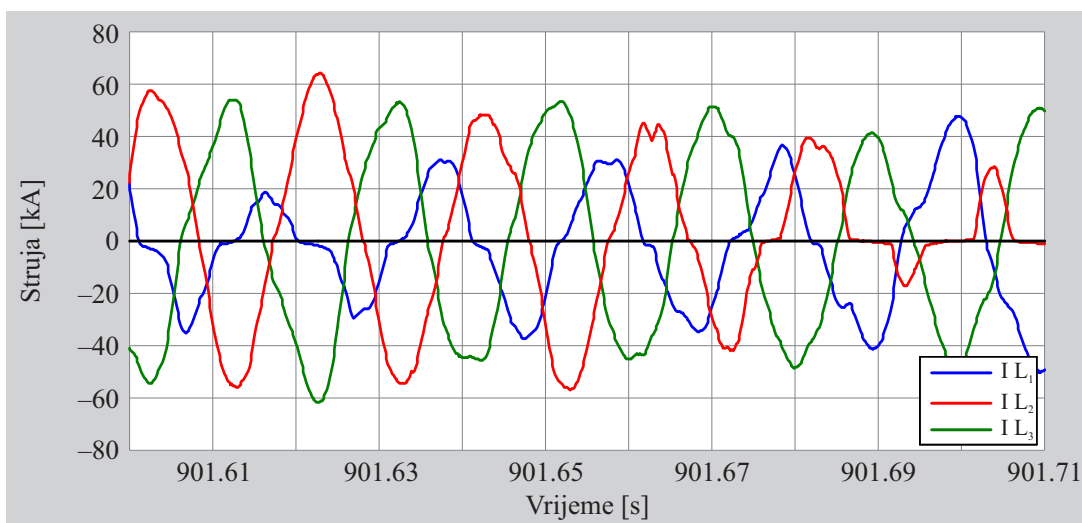
Slika 3.16: Struje na primarnoj strani transformatora (mjerno mjesto MI3)

Pet perioda struja na primarnoj strani istog transformatora predstavljeno na Slici [3.17](#)



Slika 3.17: Pet perioda struja na primarnoj strani transformatora (mjerno mjesto MI3)

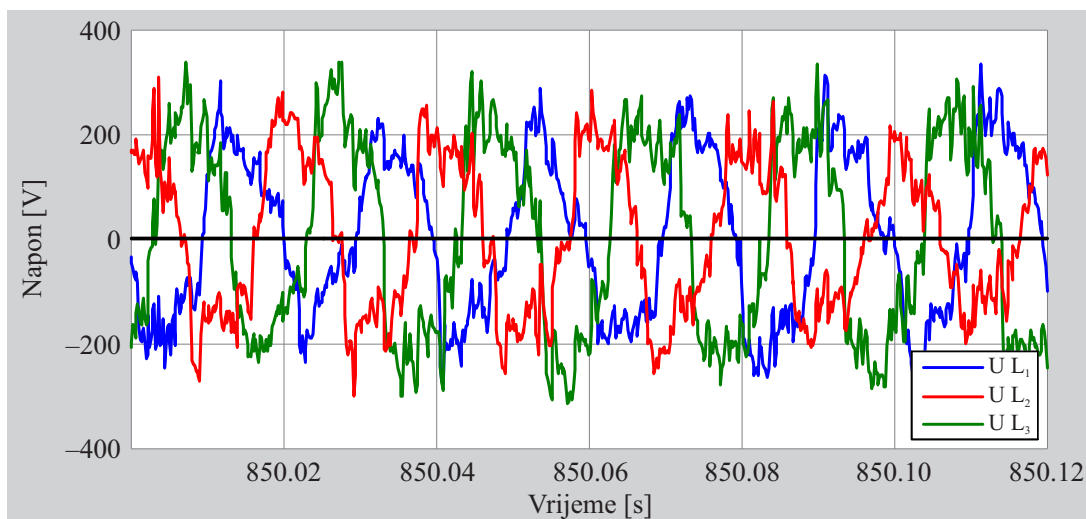
Pet perioda struja na sekundarnoj strani transformatora UHP ilustrirano je na Slici [3.18](#).



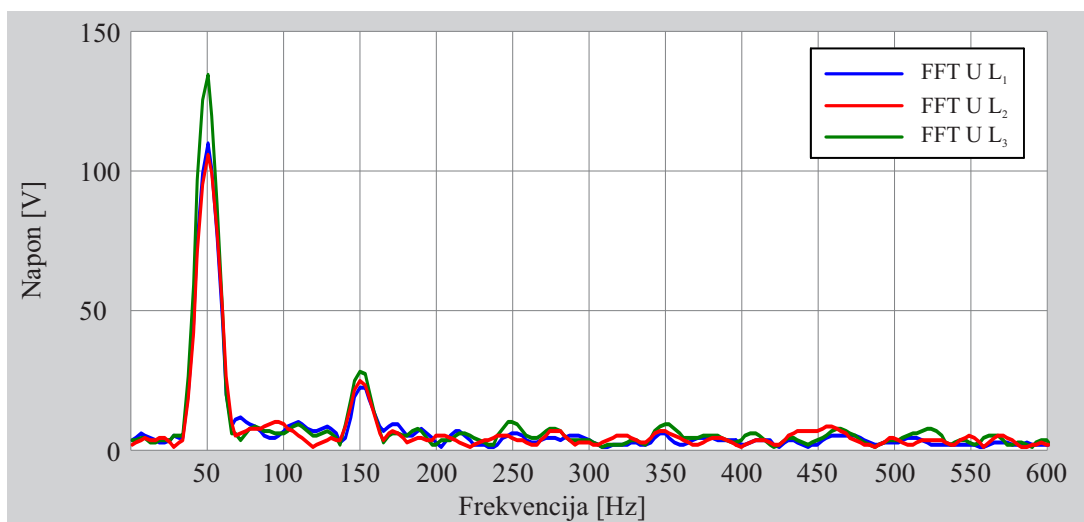
Slika 3.18: Pet perioda struja na sekundarnoj strani transformatora (mjerno mjesto MI4)

Talasni oblici struja sve tri faze odstupaju od prostoperiodičnih talasnih oblika. Tokom mjernog perioda amplituda struje faze L2 opada, dok amplituda struje faze L1 raste, što znači da se neuravnoteženost povećava. Struja faze L1 pokazuje da dolazi i do histerezisnog zasićenja, odnosno da transformator radi na koljenu karakteristike.

Na Slici [3.19](#) ilustriran je isječak od pet perioda napona na mjernom mjestu MU3. Spektar napona prikazanog na Slici [3.19](#) dat je na Slici [3.20](#). Proračun obuhvata 2048 odmjerača signala, odnosno 16 perioda signala, te rezolucija u frekvenciji iznosi 3.125 Hz.



Slika 3.19: Napon na sekundarnoj strani transformatora (mjerno mjesto MU4)



Slika 3.20: Spektar napona na mjernom mjestu MU4

U spektru napona dominantna je osnovna komponenta na 50 Hz. Spektralna analiza na mjernom mjestu MU4, pokazuje da je osnovna komponenta faze L3 izraženija u odnosu na faze L1 i L2, što je već potvrđeno, jer i nesimetrija napona na sabirnicama 20 kV prelazi maksimalne vrijednosti propisane standardom EN 50160. S obzirom na to da su elektro-lučne peći, kao nelinearni potrošači velike snage jedini potrošači priključeni na sabirnice Sistem II, očekivano je da nesimetrija postoji i sa sekundarne strane transformatora. Pored osnovne komponente na 50 Hz, u spektru napona izražen je treći harmonik. Za fazu L3, može se uočiti prisustvo i petog i sedmog harmonika. Efekat curenja spektra prilikom ove analize nije umanjen odabirom drugih prozorskih sekvenci, pa se tako raspršivanje energije signala po bočnim komponentama supeponira sa eventualno detektovanim višim harmonicima preostale dvije faze.

Glava 4

CFBPSO optimizacija

U ovom poglavlju biće predstavljena osnovna ideja optimizacije rojem čestica (PSO - *Particle Swarm Optimization*), a zatim i modifikacije tog algoritma pomoću faktora sužavanja (CFBPSO - *Constriction Factor Based Particle Swarm Optimization*). Detaljno će biti opisan princip rada CFBPSO algoritma.

4.1 PSO algoritam

Optimizacija rojem čestica (u nastavku: PSO) je metaheuristički algoritam inspirisan prirodnim procesima predstavljen od strane Eberharta i Kenedija 1995. godine [32]. PSO se temelji na sociološko-psihološkim ponašanjima jedinki (čestica) unutar grupe, na primjer: jato ptica. Jato ptica mijenja svoj položaj u potrazi za hranom i sve jedinke u jatu traže hranu u nekom prostoru. Očekivano je da će jato slijediti pticu koja je pronašla hranu. Svaka jedinka u jatu ima instinkt da pronade što bolji izvor hrane, što znači da bi se mogla odvojiti od jata. To znači da je pomogla čitavom jatu, jer će se vjerovatno i ostatak jata preseliti na bolji izvor hrane.

4.1.1 Matematički model

PSO kao optimizacioni algoritam bazira se na interakciji i razmjeni iskustva jedinki u populaciji. Populacija se sastoji od skupa čestica koje pretražuju multidimenzionalni prostor rješenja. Svaka čestica unutar populacije opisana je pozicijom i brzinom. Čestice mijenjaju svoja stanja u vremenu. Za vrijeme pretrage, svaka čestica podešava svoju poziciju (stanje) na bazi vlastitog iskustva i na bazi iskustva ostalih čestica u grupi. Vođena takvim iskustvima, svaka čestica iskorištava najbolju poziciju na koju je naišla ona ili ostatak grupe. Drugim riječima, svaka čestica pamti najbolju poziciju do koje je došla ona, kao i najbolju poziciju do koje je došao ostatak grupe jer je pozicija svake čestice potencijalno rješenje problema.

Broj čestica u populaciji može biti konstantan ili promjenljiv tokom iteracija. Najčešće je broj čestica konstantan. Kada je broj čestica u populaciji veliki, pretražuju se veći dijelovi prostora rješenja tokom svake iteracije, ali se istovremeno usporava rad algoritma.

U svakom koraku optimizacionog algoritma pozicija i brzina svake čestice se ažuriraju sa dvije najbolje vrijednosti:

- najboljim ličnim rješenjem do koje je došla čestica (eng. *personal best solution*),
- najboljim rješenjem do koje je došla bilo koja čestica u grupi ikad (eng. *global best solution*).

Pozicija svake čestice može se izraziti kao:

$$p_i^{n+1} = p_i^n + v_i^{n+1} \quad (4.1)$$

pri čemu su:

- p_i^n i p_i^{n+1} pozicije čestice i u n -toj i $n + 1$ iteraciji respektivno,
- v_i^{n+1} brzina čestice i u $n + 1$ iteraciji.

Brzina i -te čestice u $n + 1$ iteraciji, može se izračunati kao:

$$v_i^{n+1} = v_i^n + c_1 \cdot r_1 (P_{\text{best},i}^n - p_i^n) + c_2 \cdot r_2 (G_{\text{best}}^n - p_i^n) \quad (4.2)$$

gdje su:

- v_i^n brzina i -te čestice u n -toj iteraciji,
- c_1 faktor kognitivnog (samospoznajnog) učenja (uticaj iskustva čestice),
- c_2 faktor socijalnog učenja (uticaj iskustva grupe),
- $P_{\text{best},i}^n$ najbolje lično rješenje do koje je došla čestica i u n -toj iteraciji,
- G_{best}^n najbolje rješenje koje je postignuto u grupi ikad u n -toj iteraciji,
- r_1 i r_2 su slučajni brojevi iz uniformne raspodjele iz intervala $[0,1]$.

U izrazu [4.2](#) faktor c_1 predstavlja stepen povjerenja u rješenje do kojeg je došla pojedina čestica, dok faktor c_2 predstavlja stepen povjerenja u globalno rješenje. Figurisanjem ova dva faktora, kod PSO metoda postiže se kombinacija globalnog i lokalnog pretraživanja, što osigurava fino podešavanje rješenja.

4.2 CFBPSO

U radu [\[33\]](#) predstavljen je faktor ograničenja, čime je izvršena modifikacija PSO algoritma u CFBPSO (eng: *Constriction Factor Based Particle Swarm Optimization*). Prvobitno su sličan efekat postigli autori rada [\[34\]](#) 1998. godine pomoću faktora inercije. Uvođenjem faktora ograničenja značajno se utiče i na komponentu lokalnog i na komponentu globalnog pretraživanja. Potrebno je ograničiti brzinu kretanja čestice, kako bi se obezbijedila kontrola nad kretanjem jedinki kroz prostor rješenja. Kada faktor ograničenja

uzima veliku vrijednost, čestice bi mogle da prelete preko rješenja problema ili bi mogle da se zarobe lokalno zbog male brzine, što je slučaj kada faktor ograničenja ima malu vrijednost. Promjena brzine i -te čestice u $n + 1$ iteraciji postaje:

$$v_i^{n+1} = K \cdot [v_i^n + c_1 \cdot r_1 (P_{\text{best},i}^n - p_i^n) + c_2 \cdot r_2 (G_{\text{best}}^n - p_i^n)] \quad (4.3)$$

pri čemu je K faktor ograničenja, koji zavisi i od kognitivnog i od socijalnog faktora i određen je jednačinom:

$$K = \frac{2}{2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}} \quad (4.4)$$

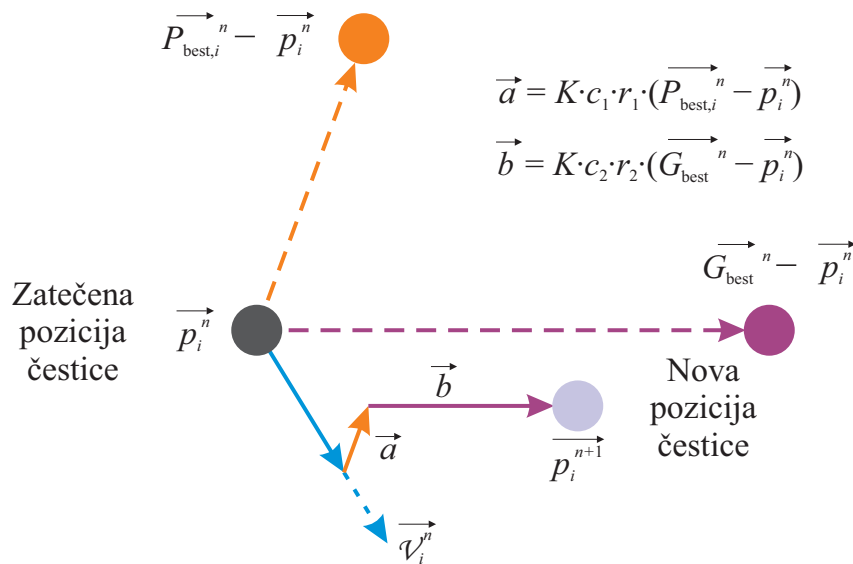
U izrazu [4.4](#), faktorom φ definisan je zbir kognitivnog i socijalnog faktora:

$$\varphi = c_1 + c_2 \quad (4.5)$$

Obično se uzima da su $c_1 = 2.05$ i $c_2 = 2.05$ [\[33-35\]](#), tako da je $\varphi = 4.1$ pa faktor ograničenja ima vrijednost:

$$K = \frac{2}{2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}} = \frac{2}{2 - 4.1 - \sqrt{4.1^2 - 4 \cdot 4.1}} = 0.7298 \quad (4.6)$$

Faktorom ograničenja od $K = 0.7298$ vrši se modulacija brzine kretanja čestica u svakoj iteraciji tokom CFBPSO algoritma. Cilj uvođenja faktora ograničenja jeste onemogućavanje divergencije PSO algoritma, odnosno ostvarivanje stabilnosti. Zaključak analize sprovedene u radu [\[35\]](#) jeste da su faktor inercije i faktor ograničenja ekvivalentni u pogledu ostvarivanja stabilnosti. Grafički pomak i -te čestice u n -toj iteraciji ilustrovan je Slici [4.1](#).



Slika 4.1: Grafički prikaz pomaka čestice

4.2.1 Dijagram toka CFBPSO

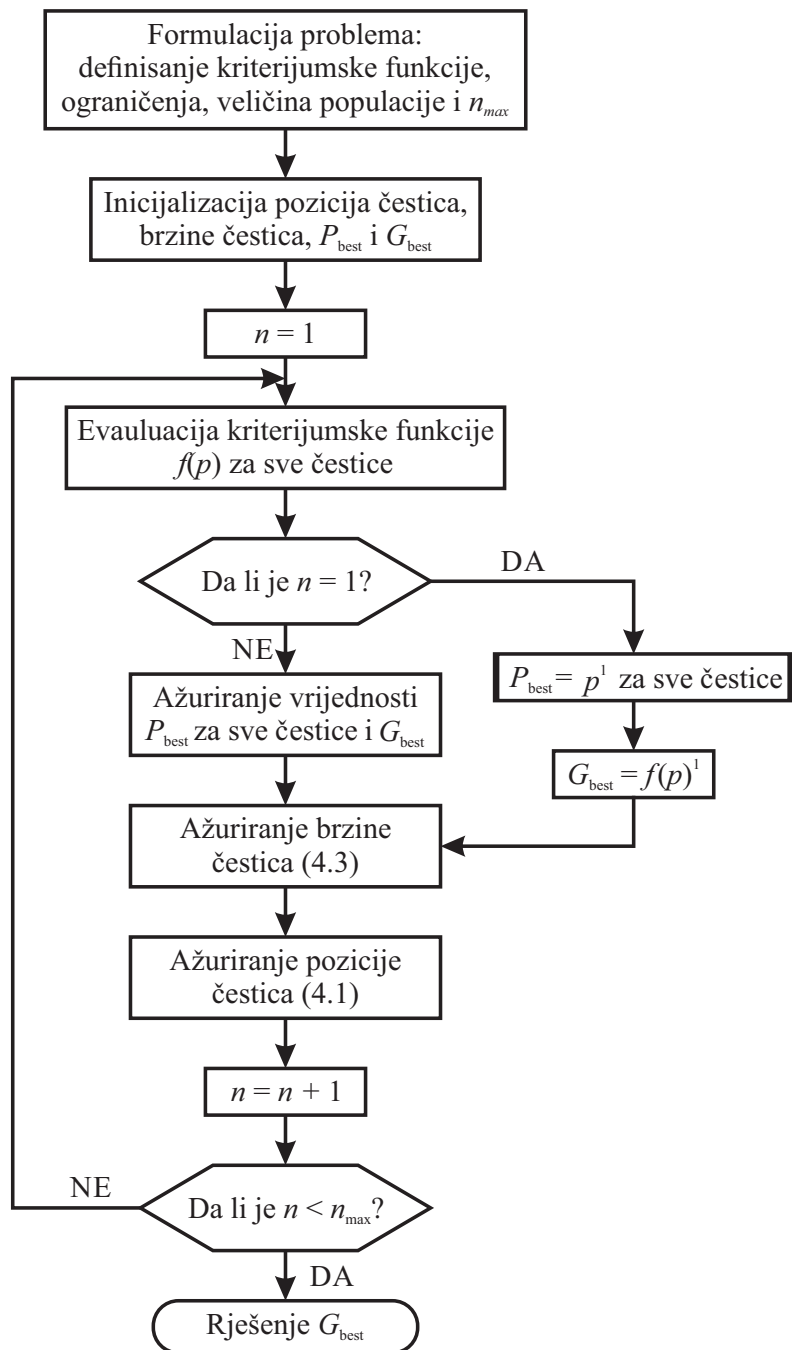
Na Slici 4.2 ilustrovan je dijagram toka CFBPSO algoritma. Algoritam počinje definisanjem kriterijumske funkcije, njenih ograničenja, veličine populacije i postavljanjem maksimalnog broja iteracija n_{\max} . Potrebno je definisati i dimenzionalnost prostora rješenja. Na primjer, ako se optimizacioni algoritam koristi za pronalazak nula polinoma l -tog stepena, tada je dimenzija prostora rješenja l . U narednom koraku vrši se inicijalizacija pozicija čestica, brzine čestica, P_{best} i G_{best} . Prilikom inicijalizacije svakoj čestici u populaciji dodjeljuje se slučajno odabrana pozicija p i brzina v . Pozicija i brzina mogu se posmatrati kao matrice koje imaju onoliko vrsta koliko ima čestica u populaciji, dok je broj kolona jednak broju dimenzija prostora rješenja.

Nakon inicijalizacije izvršava se glavni dio algoritma koji se ponavlja sve dok ne bude ispunjen prethodno definisan kriterijum zaustavljanja. Pod evaluacijom populacije podrazumijeva se računanje vrijednosti kriterijumske funkcije za trenutnu poziciju čestice. Kriterijum zaustavljanja može biti:

- dostizanje maksimalnog broja iteracija n_{\max} ,
- u posljednjih m iteracija ne dolazi do promjene vrijednosti dobijenog rješenja,
- apsolutna vrijednost razlike između dva uzastopna rješenja manja je od unaprijed postavljene vrijednosti ϵ .

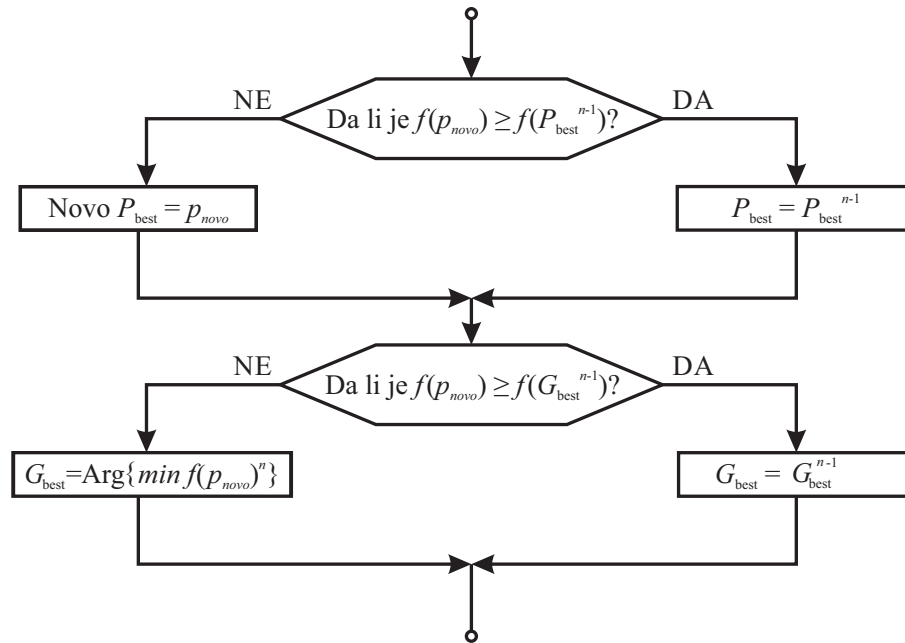
Nakon evaluacije kriterijumske funkcije, za svaku česticu u populaciji računa se najbolje lično rješenje. Ako je novo najbolje lično rješenje i -te čestice u n -toj iteraciji bolje od prethodno zapamćenog ličnog rješenja, novo najbolje lično rješenje se pamti. Nakon ažuriranja najboljeg ličnog rješenja, u populaciji se pronade najbolje lično rješenje koje su postigle čestice za trenutnu iteraciju n . Ako je novo najbolje rješenje čestica u populaciji bolje od starog, za vrijednost najboljeg rješenja čestica u populaciji se uzima novo najbolje rješenje postignuto u trenutnoj iteraciji n , a ako nije uzima se staro najbolje rješenje.

Poslije ažuriranja P_{best} i G_{best} , vrši se ažuriranje brzine čestica prema (4.3). Kada se ažurira brzina, provjerava se da li se dobijena brzina nalazi unutar dozvoljenih granica. Ako se dobijena brzina ne nalazi unutar dozvoljenih granica, vrši se korekcija brzine, pa tek nakon toga nastupa ažuriranje pozicije prema (4.1).



Slika 4.2: Dijagram toka CFBPSO

Na Slici 4.3 predstavljen je dijagram toka ažuriranja najboljeg ličnog rješenja čestica i najboljeg rješenja u populaciji.



Slika 4.3: Ažuriranje P_{best} i G_{best}

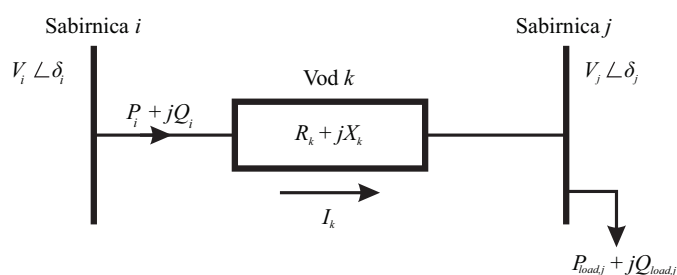
Glava 5

Optimalno pozicioniranje i dimenzionisanje baterija kondenzatora primjenom CFBPSO

U ovoj glavi biće predstavljeno optimalno pozicioniranje i dimenzionisanje baterija kondenzatora primjenom CFBPSO algoritma. Prvo će biti razmatrano optimalno pozicioniranje i dimenzionisanje baterija kondenzatora u distributivnoj mreži sa 85 sabirnica, a zatim u realnoj industrijskoj mreži koja je opisana i analizirana u glavi 3. Rezultati CFBPSO algoritma za distributivnu mrežu sa 85 sabirnica, poređiće se sa rezultatima sprovedenim na istoj mreži koji su dobijeni pomoću drugih optimizacionih algoritama. Algoritam za pronalazak optimalnih pozicija i snage baterija kondenzatora sastoji se iz dva koraka. U prvom koraku pomoću indeksa osjetljivosti (eng. *Loss Sensitivity Index - LSI*) vrši se selekcija sabirnica koje su najbolji kandidati za postavljanje baterija kondenzatora [36]. U drugom koraku, CFBPSO pronalazi optimalne sabirnice i snagu baterija kondenzatora prema kriterijumskoj funkciji (funkciji cilja) poštujući sva prethodno definisana ograničenja.

5.1 Indeks osjetljivosti

Selekcija sabirnica računanjem indeksa osjetljivosti ima za cilj redukciju prostora mogućih rješenja. Posmatra se dio distributivne mreže ilustrovan na Slici 5.1.



Slika 5.1: Predstava dva čvora u distributivnoj mreži

Aktivna snaga P_p i reaktivna snaga Q_p kroz granu k u elektroenergetskom sistemu, koja povezuje sabirnice i i j , mogu se izračunati kao:

$$P_p = P_{\text{load}j} + P_{\text{loss}k} \quad (5.1)$$

$$Q_p = Q_{\text{load}j} + Q_{\text{loss}k} \quad (5.2)$$

pri čemu su $P_{\text{load}j}$ i $Q_{\text{load}j}$ ukupna aktivna i reaktivna snaga potrošnje nakon čvora j ; $P_{\text{loss}k}$ i $Q_{\text{loss}k}$ aktivna i reaktivna snaga gubitaka kroz granu k . Gubici aktivne i reaktivne snage kroz granu k , mogu se zapisati kao:

$$P_{\text{loss}k} = I_k^2 \cdot R_k = \left(\frac{P_{\text{load}j}^2 + Q_{\text{load}j}^2}{V_j^2} \right) \cdot R_k \quad (5.3)$$

gdje je V_j efektivna vrijednost napona sabirnice j , a R_k otpornost grane k . Ukupni gubici aktivne snage u distributivnoj mreži mogu se zapisati kao:

$$P_{\text{loss}}^{\text{total}} = \sum_{j=2}^{N_b} \sum_{k=2}^{N_b-1} \left(\frac{P_{\text{load}j}^2 + Q_{\text{load}j}^2}{V_j^2} \right) \cdot R_k \quad (5.4)$$

pri čemu su N_b i $N_b - 1$ ukupan broj sabirnica u sistemu i ukupan broj grana, respektivno. Indeks osjetljivosti predstavlja promjenu gubitaka aktivne snage sa promjenom napona i računa se kao:

$$LSI = \frac{\partial P_{\text{loss}k}}{\partial V_j} = -2 \cdot \left(\frac{P_{\text{load}j}^2 + Q_{\text{load}j}^2}{V_j^3} \right) \cdot R_k \quad (5.5)$$

Sabirnice sa najvećom vrijednošću indeksa osjetljivosti su najbolji kandidati za postavljanje baterija kondenzatora. Nakon proračuna, vrši se sortiranje vektora LSI, tako da se sabirnice sa najvećom vrijednošću indeksa osjetljivosti nalaze na vrhu liste.

5.2 Kriterijumska funkcija i ograničenja

Pronaći optimalne lokacije i snage baterija kondenzatora znači izvršiti optimizaciju kriterijumske funkcije uz uvažavanje svih ograničenja. Kriterijumska funkcija u ovom radu definisana je kao:

$$F = K_p \cdot P_{\text{loss}}^{\text{total}} + K_C \cdot Q_C^{\text{total}} = K_p \cdot \sum_{k=2}^{N_b} P_{\text{loss}k} + K_C \cdot \sum_{j=1}^{N_C} Q_{Cj} \quad (5.6)$$

gdje su: F [€/god] ukupni troškovi, K_p ekvivalentni troškovi po jedinici gubitaka aktivne snage godišnje [€/kW/god], K_C ekvivalentni troškovi kupovine i instalacije [€/kvar], Q_C^{total} [kvar] ukupna instalisana snaga baterija kondenzatora u distributivnoj mreži, Q_{Cj} [kvar] predstavlja snagu baterije kondenzatora postavljenu na sabirnici j , a N_C predstavlja broj instalisanih baterija kondenzatora.

Izvršiti minimizaciju kriterijumske funkcije 5.6 podrazumijeva postići što manje troškove usljed gubitaka aktivne snage te usljed kupovine i instalacije svakog kilovara baterije kondenzatora. Cilj je ostvariti što veće uštede usljed gubitaka uz minimalnu instalaciju reaktivne snage, poštujući sva ograničenja kriterijumske funkcije. Prilikom minimizacije potrebno je zadovoljiti sljedeća ograničenja:

- Ograničenje efektivne vrijednosti napona
Efektivna vrijednost napona svake sabirnice treba da bude u intervalu između minimalne V_{\min} i maksimalne dozvoljene vrijednosti V_{\max} :

$$V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max} \quad (5.7)$$

pri čemu je sa V_i označena efektivna vrijednost i -te sabirnice.

- Ograničenje vrijednosti ukupnog $\cos\varphi$
Ukupni $\cos\varphi$ treba da bude veći od minimalne granične vrijednosti faktora snage $\cos\varphi_{\text{overall}}^{\min}$:

$$|\cos\varphi_{\text{overall}}| \geq \cos\varphi_{\text{overall}}^{\min} \quad (5.8)$$

- Ograničenje aktivne snage po granama
Aktivna snaga svake grane k u distributivnoj mreži $P_{\text{flow}k}$ treba da bude manja od maksimalne dozvoljene vrijednosti aktivne snage kroz tu granu $P_{\text{flow}k}^{\max}$:

$$P_{\text{flow}k} \leq P_{\text{flow}k}^{\max} \quad (5.9)$$

- Ograničenje instalisane reaktivne snage baterije kondenzatora
Instalisana reaktivna snaga baterije kondenzatora na sabirnici i , Q_{Ci} treba da se nađe između maksimalne Q_{Ci}^{\max} i minimalne dozvoljene vrijednosti reaktivne snage Q_{Ci}^{\min} za tu sabirnicu:

$$Q_{Ci}^{\min} \leq Q_{Ci} \leq Q_{Ci}^{\max} \quad (5.10)$$

- Ograničenje po broju instalisanih baterija kondenzatora
Optimalan broj instalisanih baterija kondenzatora N_C mora da bude manji od maksimalne, prethodno definisane vrijednosti N_C^{\max} :

$$N_C \leq N_C^{\max} \quad (5.11)$$

- Ograničenje po ukupnoj maksimalnoj snazi koju injektiraju baterije kondenzatora
Ukupna snaga koju u distributivni sistem injektiraju baterije kondenzatora Q_C^{total} ne smije biti veća od ukupne reaktivne snage potrošnje u sistemu Q_L^{total} :

$$Q_C^{\text{total}} \leq Q_L^{\text{total}} \quad (5.12)$$

5.3 CFBPSO za optimalno pozicioniranje i dimenzionisanje baterija kondenzatora

U Tabeli [5.1](#) predstavljen je CFBPSO algoritam za optimalno pozicioniranje i dimenzionisanje baterija kondenzatora. Algoritam se sastoji iz petnaest koraka, koji se mogu grupisati u četiri osnovne grupe:

- proračun tokova snaga i indeksa osjetljivosti za slučaj bez kompenzacije,
- inicijalizacija parametara CFBPSO algoritma,
- evaluacija kriterijumske funkcije,
- ažuriranje brzine, pozicije čestica kao i P_{best} i G_{best} .

Tabela 5.1: CFBPSO algoritam za optimalno pozicioniranje i dimenzionisanje baterija kondenzatora

Korak 1: Proračun tokova snaga za bazni slučaj bez kompenzacije

Korak 2: Rangiranje sabirnica u sistemu prema vrijednosti LSI - indeksa osjetljivosti

Korak 3: Inicijalizacija faktora kognitivnog učenja c_1 i faktora socijalnog učenja c_2

Korak 4: Inicijalizacija pozicije, brzine čestica, P_{best} i G_{best} u populaciji

Korak 5: Iteracija $n = 1$

Korak 6: Proračun tokova snaga postavljajući česticu i na sabirnicu kandidata za optimalno dimenzionisanje baterija kondenzatora; snimanje gubitaka, $\cos\varphi$ i naponskog profila

Korak 7: Evaluacija kriterijumske funkcije

$$F_i^n = f(p_i^n), \forall i \text{ selekcija indeksa najbolje vrijednosti } b$$

Korak 8: Pronalazak $P_{\text{best},i}^n = p_i^n, \forall i$ i $G_{\text{best}}^n = p_b^n$

Korak 9: Ažuriranje brzine čestice vodeći računa o granicama

Korak 10: Ažuriranje pozicije čestice vodeći računa o granicama

Korak 11: Proračun tokova snaga za ažuriranu česticu; snimanje gubitaka, $\cos\varphi$ i naponskog profila

Korak 12: Evaluacija kriterijumske funkcije

$$F_i^{n+1} = f(p_i^{n+1}), \forall i \text{ selekcija indeksa najbolje vrijednosti } b1$$

Korak 13: Ažuriranje G_{best} populacije

$$\text{Ako je } F_{b1}^{n+1} \leq F_b^n, \text{ onda je } G_{\text{best}}^{n+1} = P_{\text{best},b1}^{n+1}$$

$$\text{u suprotnom } G_{\text{best}}^{n+1} = G_{\text{best}}^n$$

Korak 14: Ako je $n < n_{\text{max}}$, brojač iteracija je $n = n + 1$ (povratak na korak 6) u suprotnom prelazak na korak 15

Korak 15: Optimalno rješenje je G_{best}^n

5.3.1 Testna distributivna mreža sa 85 sabirnica

Testna distributivna mreža od 85 sabirnica često se koristi za testiranje algoritama za optimalno pozicioniranje i dimenzionisanje baterija kondenzatora [26–28]. Podaci o testnoj mreži navedeni su u radu [37]. Testna mreža 11 kV naponskog nivoa sastoji se od 85 sabirnica, 84 voda i 56 potrošača ukupne aktivne i reaktivne snage 2.59 MW i 2.65 Mvar, respektivno. Vrijednost $\cos\varphi$ za sve potrošače iznosi 0.7_{ind} . U Tabeli A.1 navedeni su parametri vodova, otpornost i reaktansa, kao i prividna snaga potrošača testne mreže.

Kako bi rezultati optimizacije CFBPSO algoritmom bili uporedivi sa rezultatima drugih algoritama [26–28], izabrana su sljedeća ograničenja:

- minimalna efektivna vrijednost napona $V_{\min} = 0.9$ p.u.,
- maksimalna efektivna vrijednost napona $V_{\min} = 1.1$ p.u.,
- minimalna vrijednost $\cos\varphi_{\text{overall}}^{\min} = 0.9$,
- maksimalna aktivna snaga po grana mreže ograničena je na $P_{\text{flow}k}^{\max} = 3$ MW,
- maksimalan dozvoljen broj instalisanih baterija kondenzatora iznosi $N_C^{\max} = 10$,
- ukupna instalisana snaga baterija kondenzatora ne smije biti veća od nominalne reaktivne snage potrošnje $Q_L^{\text{total}} = 2.65$ Mvar.

U Tabeli 5.2 prikazani su rezultati proračuna LSI za nekompensovan sistem.

Tabela 5.2: LSI za nekompenzovan sistem

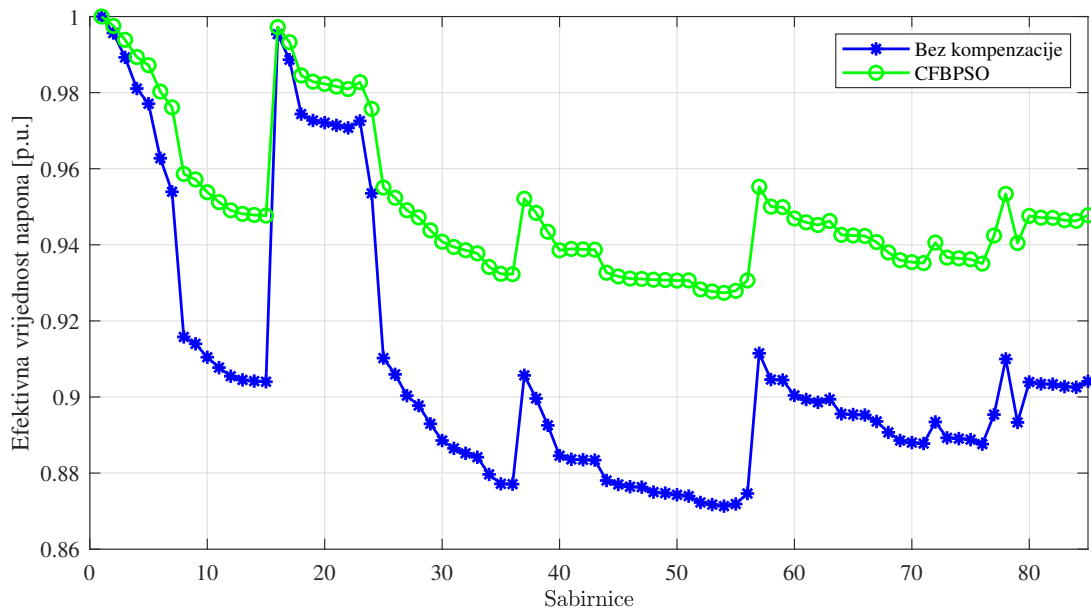
Sabirnice	LSI	Sabirnice	LSI	Sabirnice	LSI	Sabirnice	LSI
17	-4.308e-06	82	-1.317e-06	75	-5.419e-07	58	-6.413e-09
8	-4.020e-06	59	-1.313e-06	79	-5.357e-07	27	-6.268e-09
4	-1.822e-06	6	-1.312e-06	83	-5.241e-07	29	-3.427e-09
26	-1.457e-06	37	-1.309e-06	14	-5.219e-07	34	-1.227e-09
54	-1.425e-06	78	-1.296e-06	85	-5.218e-07	9	-1.077e-09
55	-1.423e-06	18	-1.135e-06	15	-5.218e-07	64	-8.094e-10
60	-1.423e-06	19	-1.128e-06	24	-4.635e-07	10	-5.093e-10
51	-1.416e-06	23	-1.117e-06	22	-4.456e-07	35	-1.869e-10
28	-1.409e-06	25	-6.437e-07	21	-4.454e-07	32	-1.656e-10
69	-1.378e-06	30	-6.109e-07	20	-4.449e-07	68	-1.635e-10
76	-1.369e-06	50	-5.945e-07	16	-4.207e-07	67	-1.477e-10
74	-1.364e-06	31	-5.746e-07	33	-9.074e-08	48	-1.118e-10
57	-1.357e-06	53	-5.660e-07	56	-8.828e-08	12	-1.057e-10
39	-1.352e-06	44	-5.609e-07	47	-8.792e-08	52	-5.916e-11
72	-1.349e-06	45	-5.596e-07	63	-8.713e-08	73	-5.940e-12
66	-1.343e-06	46	-5.589e-07	7	-8.524e-08	13	-3.150e-12
11	-1.336e-06	36	-5.573e-07	77	-8.388e-08	41	-1.568e-12
61	-1.334e-06	43	-5.488e-07	84	-8.245e-08	81	-9.165e-13
62	-1.333e-06	40	-5.488e-07	3	-6.210e-08	70	-8.841e-13
38	-1.330e-06	42	-5.486e-07	2	-2.848e-08	49	-2.800e-13
80	-1.324e-06	71	-5.431e-07	5	-2.163e-08	65	-4.674e-14

Parametri K_p i K_C iz jednačine iznose 168 €/kW/god i 5 €/kvar [27], [28]. Nakon proračuna CFBPSO algoritmom, dobijaju se rezultati ilustrovani u Tabeli 5.3.

Tabela 5.3: Rezultati CFBPSO algoritma za testnu mrežu sa 85 sabirnica

Sabirnice	Reaktivna snaga [kvar]
8	1200
27	443
41	345
51	219
63	441

CFBPSO predlaže sabirnice 8, 27, 41, 51, 63 kao optimalne lokacije za instalaciju baterija kondenzatora čije su snage 1200, 443, 345, 219 i 441 kvar, respektivno. Za testnu mrežu sa 85 sabirnica, CFBPSO algoritmu, kandidati za optimalno postavljanje baterija kondenzatora bile su sve sabirnice. Na taj način nije bilo redukcije prostora pretraživanja u okviru testiranja algoritma za ovaj testni sistem. U oba testna slučaja, maksimalan broj iteracija iznosio je 100, dok je broj čestica u populaciji bio ograničen na 300. Naponski profil distributivne mreže za 85 sabirnica ilustrovan je na Slici 5.2. Može se uočiti da je naponski profil značajno poboljšán nakon kompenzacije.



Slika 5.2: Naponski profil distributivne mreže sa 85 sabirnica

Uporedni prikaz rezultata dobijenih pomoću CFBPSO algoritma u odnosu na algoritme [26-28] ilustrovan je u Tabeli 5.4.

Tabela 5.4: Poređenje rezultata CFBPSO algoritma i drugih algoritama za mrežu sa 85 sabirnica

	-	PSO [26]	PGSA [27]	MINLP [28]	CFBPSO
		7 314	7 200	7 300	8 1200
		8 796	8 1200	8 700	27 443
Optimalne lokacije i snaga [kvar]		27 901	58 908	29 900	41 345
		58 453		58 500	51 219
					63 441
Ukupni gubici aktivne snage [kW]	315.7	163.32	161.4	159.87	155.45
Smanjenje gubitaka [%]	-	48.27	48.88	49.57	50.83
Ukupni $\cos\varphi$	0.71	0.9983	0.9926	0.9932	0.9998
Minimalna ef. vr. napona [p.u.]	0.871 - 54	0.9156 - 54	0.9090 -54	0.9171 - 54	0.9296 - 56
Maksimalna ef. vr. napona [p.u.]	0.9973 -2	0.9974 - 2	0.9926 - 2	0.9974-2	0.9976 - 2
Ukupna instalisana snaga baterija [kvar]	-	2464	2308	2400	2648
Godišnja cijena gubitaka ^a [€/god]	53088	27438	27115	26858	26116
Ušteda [€/year]	-	25650	25973	26230	26972

^a Za potrebe poređenja, valute su izjednačene.

Ukupni gubici testne mreže prije kompenzacije iznose 315.7 kW, dok su ukupni gubici nakon CFBPSO algoritma smanjeni za 50.83% i iznose 155.45 kW, kao što je objavljeno u radu [29]. Rezultati poređenja predstavljeni u Tabeli 5.4 pokazuju da se optimizacijom pomoću CFBPSO algoritma ostvaruje veće umanjeње gubitaka aktivne snage, pri čemu ukupna instalisana snaga baterija kondenzatora iznosi 2648 kvar, što je manje od maksimalne dozvoljene. Naponski profil je značajno poboljšán. Prije kompenzacije minimalna efektivna vrijednost napona iznosila je 0.871 p.u. na sabirnicama 54, dok nakon kompenzacije minimalna efektivna vrijednost napona iznosi 0.9296 p.u. na sabirnicama 56. Za potrebe poređenja, valute u radovima [26–28] ekvivalentirane su sa valutom korišćenom u ovom radu. Kako se pomoću CFBPSO algoritma postiže veće umanjeње gubitaka aktivne snage, postižu se i veće uštede posmatrajući troškove gubitaka aktivne snage na godišnjem nivou. Bitno je naglasiti da će početni troškovi usljed kupovine i ugradnje baterija kondenzatora biti nešto veći, s obzirom da optimizacija pomoću CFBPSO algoritma predlaže blago veću instalisanu snagu baterija kondenzatora u odnosu na algoritme [26–28].

5.3.2 Industrijska mreža

Drugi testni sistem je industrijska mreža opisana u glavi 3. Mreža se posmatra bez pasivnih kompenzatora i kogenerativnog postrojenja, koje je postojalo u mreži u trenutku mjerenja, koje je predstavljeno u glavi 3. Optimalnom planiranju pasivnih kompenzatora u industrijskoj mreži u ovom radu se pristupa na sljedeći način. Prvo se određuje optimalna pozicija i snaga baterija kondenzatora posmatrajući gubitke aktivne snage prvog harmonika i $\cos\varphi$. Nakon toga, pristupa se projektovanju pasivnih filtara koji prigušuju najkritičnije harmonike, koji su posljedica postojanja nelinearnih potrošača. Za pasivni filter odabiraće se baterija kondenzatora koja je najbliža nelinearnim potrošačima [31].

Konačno, u glavi 6, na osnovu zavisnosti impedanse i frekvencije i na osnovu postojanja viših harmonika, posmatraće se koja kombinacija pasivnih kompenzatora je optimalna tokom eksploatacije.

Odabrana su sljedeća ograničenja kriterijumske funkcije za industrijsku mrežu prilikom optimizacionog algoritma:

- minimalna efektivna vrijednost napona $V_{\min} = 0.95$ p.u.,
- maksimalna efektivna vrijednost napona $V_{\max} = 1.05$ p.u.,
- minimalna vrijednost $\cos\varphi_{\text{overall}}^{\min} = 0.95$,
- maksimalan dozvoljen broj instalisanih baterija kondenzatora iznosi $N_C^{\max} = 10$,
- ukupna instalisana snaga baterija kondenzatora ne smije biti veća od nominalne reaktivne snage potrošnje $Q_L^{\text{total}} = 13.75$ Mvar.

Za parametar K_p usvojena je vrijednost 168 €/kW/god, dok su za parametar K_C usvojene vrijednosti 5, 6 i 8 €/kvar za naponske nivoe 0.4, 5 i 20 kV, respektivno. Usvojena je pretpostavka da je poprečni presjek provodnika po granama u industrijskoj mreži zadovoljavajući, tako da nije eksplicitno definisana maksimalna dozvoljena snaga po granama industrijske mreže prilikom optimizacije. Ukupna maksimalna snaga baterija kondenzatora ograničena je na 13.75 Mvar, dok je ograničenje instalisane reaktivne snage baterije kondenzatora računato za svaku sabirnicu pojedinačno. Za vrijednost ukupne instalisane maksimalne snage baterija kondenzatora izabrana je vrijednost koja iznosi 40% ukupne nominalne reaktivne snage svih potrošača u industrijskoj mreži. Upravo je radna tačka 40% ukupne nominalne prividne snage najčešći radni režim industrijske mreže [24]. Rezultati CFBPSO algoritma na industrijskoj mreži u odnosu na bazni slučaj, bez kompenzacije, predstavljeni su u Tabeli 5.6. Za drugi testni sistem, CFBPSO algoritam je u razmatranje uzeo 70% sabirnica sa vrha LSI proračuna.

Tabela 5.5: Rezultati CFBPSO algoritma za industrijsku mrežu

Sabirnice	Reaktivna snaga [kvar]
8	8855
15	566
48	835

Nakon optimizacije CFBPSO algoritmom, dobijaju se rezultati ilustrovani u Tabeli 5.5.

Tabela 5.6: Poređenje rezultata nakon CFBPSO algoritma i baznog slučaja

	Bez kompenzacije CFBPSO	
	8	8855
Optimalne lokacije i snaga [kvar]	15	566
	48	835
Ukupni gubici aktivne snage [kW]	294.5	228.9
Smanjenje gubitaka [%]	-	22.27
Ukupni $\cos\varphi$	0.9401	0.9959
Minimalna ef. vr. napona [p.u.]	0.8533 - 27	0.95 - 27
Maksimalna ef. vr. napona [p.u.]	1 - 2	1.008 - 5
Ukupna instalisana snaga baterija [kvar]	-	10255
Godišnja cijena gubitaka [€/year]	49476	38455
Ušteda [€/god]	-	11021

Rezultati prikazani u Tabeli 5.6, pokazuju da ukupni gubici aktivne snage nakon optimizacije iznose 228.9 kW, što je za 22.29% manje od ukupnih gubitaka aktivne snage prije kompenzacije. Vrijednost $\cos\varphi$ nakon CFBPSO algoritma iznosi 0.9959. Minimalna efektivna vrijednost napona u industrijskoj mreži prije kompenzacije iznosila je 0.8353 p.u. i to na sabirnicama 27. Nakon optimizacije CFBPSO algoritmom, minimalna vrijednost napona iznosi 0.95 p.u. na sabirnicama 27, a ova vrijednost jednaka je minimalnoj graničnoj efektivnoj vrijednosti napona V_{\min} . Ukupna instalisana snaga baterija kondenzatora koju predlaže CFBPSO algoritam iznosi 10.255 Mvar. Ušteda koja bi se ostvarila na godišnjem nivou na osnovu smanjenih gubitaka aktivne snage iznosi 11021 €/god.

5.4 Određivanje parametara pasivnih filtara u industrijskoj mreži

Nelinearni potrošači u industrijskoj mreži, čija je jednopolna šema prikazana na Slici 3.1, vezani su za sabirnice 3 i 4. Više harmonike u industrijskoj mreži, koji su posljedica postojanja nelinearnih potrošača, potrebno je prigušiti koristeći neku od prethodno opisanih metoda. U ovom istraživanju, za umanjene efekta viših harmonika u industrijskoj mreži, biće iskorišćeni pasivni filtri. Pasivne filtre pogodno je ugraditi u blizini izvora viših harmonika, kako bi se umanjio njihov uticaj na ostatak sistema. Parametri pasivnih filtara biće određeni na osnovu optimalnih kapacitivnosti baterija kondenzatora, vodeći računa o tome koje harmonike želimo da filtriramo. Prilikom projektovanja pasivnih filtara, u cilju izbjegavanja pojave rezonanse, kondenzatoru se na red vezuje prigušnica, formirajući neusklađeni filtar. Neusklađeni (eng. *detuned*) filtar naziv je dobio po tome što se njegova učestanost podešava tako da se razlikuje od učestanosti harmonika, da ne bi došlo do pojačavanja tog harmonika.

Elektrolučne peći tope željeznu rudu na temperaturama između 3000 i 3500 °C. Električni luk predstavlja tok struje kroz vazdušni zazor između elektroda elektrolučne peći. Kada se naizmjenična struja propusti kroz elektrode nastaje električni luk izazivajući na taj način veoma visok temperaturni udar koji topi komade rude. Proces proizvodnje legura je izuzetno haotičan i karakterišu ga nagle promjene struja i napona koji nepovoljno utiču na rad elektroenergetske mreže. Autori rada [38] predstavili su model elektrolučne peći i detaljno su analizirali uticaj ovog nelinearnog potrošača na elektroenergetski sistem. Pored postojanja međuharmonika, čije su magnitude obično dosta manje, u harmonijskom spektru značajno su izraženi treći, peti i sedmi harmonik.

CFBPSO algoritam predlaže postavljanje baterija kondenzatora u industrijskoj mreži na sabirnicama 8, 15 i 48. Sabirnice 8 biće iskorišćene i za projektovanje filtara za priгуšenje viših harmonika, kao sabirnice koje su najbliže nelinearnim potrošačima. Pasivni filtar projektovaće se tako da filtrira treći, peti i sedmi harmonik, odnosno upravo one harmonike koji su u najvećoj mjeri generisani topljenjem rude u elektrolučnim pećima.

Opšti principi projektovanja pasivnih filtara opisani su u sekciji 2.4.2. Ovdje će biti objašnjeni principi određivanja parametara pasivnih filtara u industrijskoj mreži na osnovu optimalnih kapacitivnosti kondenzatora izračunatih pomoću CFBPSO algoritma. Prilikom projektovanja pasivnih filtara na osnovu optimalne kapacitivnosti kondenzatora nakon CFBPSO algoritma, jedan kondenzator može da se zamijeni sa jednom ili sa više RLC grana. Ako se optimalna vrijednost kondenzatora mijenja sa jednom RLC granom, tada je vrijednost RLC parametara jednoznačno određena za usvojenu rezonantnu frekvenciju. U ovom radu, optimalna kapacitivnost kondenzatora na sabirnicama 8 zamijenice se sa tri RLC grane, sa ciljem umanjnja tri najkritičnija harmonika.

Potrebno je usvojiti vrijednost rezonantne učestanosti i -te RLC grane ω_{ri} :

$$\omega_{ri} = \frac{1}{\sqrt{L_i C_i}} \quad i \in [1, n_g] \quad (5.13)$$

U jednačini 5.13, sa L_i označena je induktivnost, a sa C_i kapacitivnost i -te RLC grane, a n_g je ukupan broj grana, u ovom slučaju to su tri. Sljedeća jednačina potrebna za određivanje RLC parametara odnosi se na faktor dobrote i -te grane filtra $Q_{z,i}$:

$$Q_{z,i} = \frac{\omega_{ri} L_i}{R_i} \quad (5.14)$$

Obično se uzima da se vrijednost faktora dobrote nalazi u opsegu $30 \leq Q_i \leq 100$. Sljedeća jednačina neophodna za određivanje RLC parametara definiše jednakost između ekvivalentne kapacitivnosti grana C_e i optimalne vrijednosti kapacitivnosti kondenzatora nakon CFBPSO algoritma C_{opt} :

$$C_e = \frac{1}{\omega_1} \text{Im} \sum_{i=1}^{n_g} Y_i(\omega_1) = C_{opt} \quad (5.15)$$

pri čemu $Y_i(\omega_1)$ predstavlja kompleksnu admitansu i -te RLC grane na učestanosti prvog harmonika. Kompleksna admitansa i -te RLC grane je:

$$Y_i(\omega_1) = \frac{1}{R_i + j\omega_1 L_i + \frac{1}{j\omega_1 C_i}} \quad (5.16)$$

Ekvivalentna kapacitivnost C_e postaje:

$$C_e = \sum_{i=1}^{n_g} \frac{C_i(1 - \omega_1 L_i C_i)}{(\omega_1 R_i C_i)^2 + (1 - \omega_1^2 L_i C_i)^2} = C_{opt} \quad (5.17)$$

Parametri RLC grana mogu se odrediti polazeći od različitih pretpostavki. Jedna od pretpostavki je da otpornosti RLC grana budu jednake. Druga pretpostavka je da reaktivna snaga svake grane bude jednaka trećini optimalne reaktivne snage na sabirnicama, Q_{opt} . U tom slučaju reaktivne snage RLC grana Q_i postaju:

$$Q_i = \frac{Q_{opt}}{3} \quad (5.18)$$

Rezonantne učestanosti pojedinih grana podešene su na vrijednosti koje odgovaraju 94% do 96% vrijednosti učestanosti harmonika koji se eliminiše, što je ilustrovano u Tabeli 5.7.

Tabela 5.7: Rezonantne učestanosti pojedinih grana filtra

Rezonantne učestanosti	Vrijednost [Hz]
f_{r1}	141
f_{r2}	240
f_{r3}	335

Faktor neusklađenosti δ definisan je kao 2.6:

$$\delta = 1 - \frac{f_1^2}{f_{ri}^2} \quad (5.19)$$

Kapacitivnosti kondenzatora po granama određuju se kao:

$$C_i = \frac{Q_i}{U^2} \cdot \frac{1 - \frac{\omega_1^2}{\omega_{ri}^2}}{\omega_1} \quad (5.20)$$

Kada je poznata kapacitivnost i rezonantna učestanost grane, induktivnost grane određuje se kao 2.15:

$$L_i = \frac{1}{\omega_{r,i}^2 C_i} \quad (5.21)$$

Otpornosti po granama mogu se odrediti na osnovu usvojene vrijednosti faktora dobrote,

rezonantne učestanosti te vrijednosti induktivnosti grane [5.14](#):

$$R_i = \frac{\omega_{ri} L_i}{Q_{z,i}} \quad (5.22)$$

Za vrijednosti faktora dobrote po granama $i = 1, 2, 3$ usvojena je vrijednost 100. Parametri RLC po svakoj grani predstavljeni su u Tabeli [5.8](#).

Tabela 5.8: RLC parametri po granama filtra

Parametar	$f_{r_1} = 141 \text{ Hz}$	$f_{r_2} = 240 \text{ Hz}$	$f_{r_3} = 335 \text{ Hz}$
R [mΩ]	404	216.9	152.1
L [mH]	45.6	14.4	7.2
C [μF]	27.939	30.57	31.24

Glava 6

Eksploatacija pasivnih kompenzatora u industrijskoj mreži

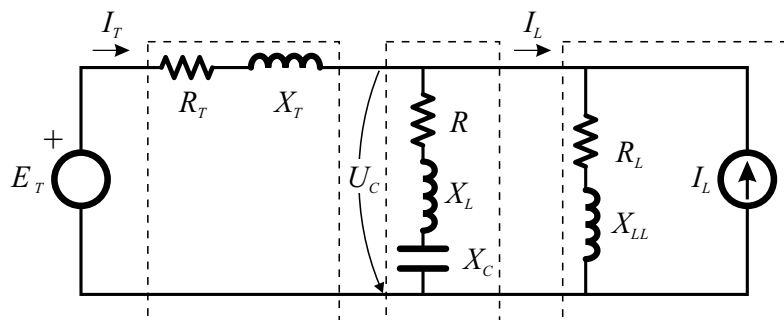
Optimalno pozicioniranje i dimenzionisanje pasivnih kompenzatora, kao planerski problem, dobro je istraženo među naučnim i inženjerskim krugovima te je prisutno i mnogo naučnih radova sa ovom tematikom. Sa druge strane, eksploataciji pasivnih kompenzatora pridaje se manje pažnje, iako eksploatacija sa porastom prisustva nelinearnih potrošača postaje sve važnije pitanje. Kada su u mreži ugrađeni kompenzatori, postavlja se pitanje kakav algoritam upravljanja treba da postoji, da bi se izbjegla pojava rezonanse i da bi se ostvarili minimalni gubici u mreži.

U ovom radu, za industrijsku mrežu prikazanu na Slici [3.1](#), primijenjena je ideja virtuelnog kompenzatora [\[24\]](#). Osnovna ideja virtuelnog kompenzatora je da se sa centralnog računara kontrolišu svi kompenzatori u mreži. Algoritam se može primijeniti za svaki radni režim, određuje optimalne kontrolne signale za uključenje/isključenje uz minimalno rezonantno pojačanje harmonika, minimalne gubitke aktivne snage osnovnog harmonika i prihvatljiv profil napona.

6.1 Pojava rezonanse između pasivnog kompenzatora i mreže

Rezonansa između kompenzatora i mreže je pojava gdje se kapacitivna i induktivna reaktansa međusobno poništavaju, ostavljajući otpornost kao jedini oblik impedanse. Učestanost na kojoj se ovo dešava naziva se rezonantna učestanost. Na ovoj učestanosti može doći do naponskih i strujnih pojačanja, pri čemu može doći do oštećenja kompenzatora i drugih elemenata u elektroenergetskom sistemu. U slučaju rezonanse, gubici aktivne snage mogu se značajno povećati.

Posmatra se električno kolo ilustrovano na Slici [6.1](#)



Slika 6.1: Električno kolo

Simboli na slici [6.1](#) označavaju:

- E_T - Tevenenov napon,
- $Z_T = R_T + jX_T$ - impedansa kojom je predstavljen ostatak mreže,
- $Z_L = R_L + jX_{LL}$ - impedansa opterećenja,
- $Z_C = R + jX_L + jX_C$ - impedansa kompenzatora.

Na slici [6.1](#) sa E_T i $Z_T = R_T + jX_T$ modelovan je ostatak industrijske mreže u odnosu na filter i nelinearni potrošač, dok je paralelnom vezom strujnog izvora i impedanse Z_L modelovan nelinearan potrošač. U opštem slučaju, Tevenenov napon može se napisati kao superpozicija osnovnog i viših harmonika:

$$e_T(t) = e_{T,1}(t) + \sum_{h=2}^n e_{T,h}(t) \quad (6.1)$$

Jačina struje I_L može se napisati takođe kao superpozicija:

$$i_L(t) = i_{L,1}(t) + \sum_{h=2}^n i_{L,h}(t) \quad (6.2)$$

gdje je sa h označen red harmonika. Ekvivalentna impedansa sa strane napona napajanja može se napisati kao:

$$Z_{ser,h} = R_T + j \cdot h \cdot X_T + R + j \cdot h \cdot X_L - j \cdot \frac{X_C}{h} \quad (6.3)$$

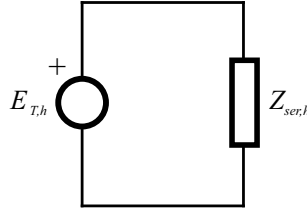
Pomoću strujnog izvora mogu se modelovati nelinearni potrošači kao što su elektrolučne peći, koje injektiraju više harmonike struje u mrežu. U izrazu [6.3](#) zanemerala je impedansa nelinearnog potrošača, jer je upravo tako pokriven i najgori mogući scenario. Nakon zanemarivanja otpornosti kompenzatora i reaktanse h -tog harmonika dobija se:

$$Z_{ser,h} \approx R_T + j \cdot h \cdot X_T - j \frac{X_C}{h} \quad (6.4)$$

Za vrijednosti frekvencija jako bliskim rezonantnoj vrijednosti $f_{r,ser}$, ekvivalentna impe-

dansa, ilustrovana na Slici 6.2, postaje jednaka Tevenenovoj otpornosti:

$$Z_{\text{ser}}^{f_{r,\text{ser}}} \approx R_T \quad (6.5)$$



Slika 6.2: Ekvivalentna serijska impedansa

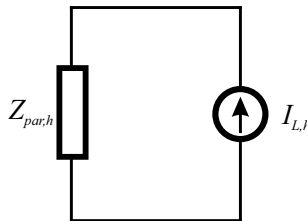
Analogno izvođenje može biti sprovedeno i za ekvivalentnu paralelnu impedansu odnosno antirezonsansu $Z_{\text{par},h}$ ilustrovanu na Slici 6.3. Ekvivalentna paralelna impedansa može se zapisati kao:

$$Z_{\text{par},h} = \frac{(j \cdot h \cdot X_L - j \frac{X_C}{h}) \cdot R_T + j \cdot h \cdot X_T}{(j \cdot h X_L - j \frac{X_C}{h}) + R_T + j \cdot h \cdot X_T} \quad (6.6)$$

$$Z_{\text{par},h} \approx \frac{(-j \frac{X_C}{h}) + j \cdot h \cdot X_T}{(-j \frac{X_C}{h}) + j \cdot R_T \cdot h \cdot X_T} = \frac{h \cdot X_T^2}{R_T} \quad (6.7)$$

S obzirom na to da je $X_T \gg R_T$, ekvivalentna paralelna impedansa u blizini rezonantne frekvencije $f_{r,\text{par}}$ postaje:

$$Z_{\text{par},h} \approx \frac{X_C^2}{R_T} = \frac{X_T^2}{R_T} \quad (6.8)$$



Slika 6.3: Ekvivalentna paralelna impedansa

Kako bi se izbjegla pojava redne i paralelne rezonanse u sistemu, virtuelni kompenzator treba da obezbijedi za svaki režim optimalne kombinacije podešavanja pasivnih filtara u mreži. Redna rezonansa prouzrokuje povećanje napona, dok paralelna rezonansa može dovesti do povećanja vrijednosti struje. Pojava rezonanse može prouzrokovati oštećenje baterija kondenzatora, ali i druge opreme u elektroenergetskom sistemu.

6.2 Kriterijumska funkcija i ograničenja

Za svaku harmonijsku komponentu h , mogu se napisati sljedeće jednačine [24]:

$$Fv_{h,ser} = k_{ser,h} \cdot \int_{f_h-5Hz}^{f_h+5Hz} \left| Z(f)_{opt,ser} - Z(f)_{ser} \right| \cdot df \quad (6.9)$$

$$Fi_{h,par} = k_{par,h} \cdot \int_{f_h-5Hz}^{f_h+5Hz} \left| Z(f)_{opt,par} - Z(f)_{par} \right| \cdot df \quad (6.10)$$

pri čemu su $k_{ser,h}$ i $k_{par,h}$ proporcionalni koeficijenti koji opisuju spektar nelinearnog opterećenja. Impedanse $Z(f)_{opt,ser}$ i $Z(f)_{opt,par}$ su ekvivalentna serijska i paralelna impedansa kada u mreži nisu prisutni kompenzatori i kada je $\cos\varphi = 0.95$. Impedanse $Z(f)_{ser}$ i $Z(f)_{par}$ su stvarna ekvivalentna serijska i paralelna impedansa, kada su u mreži prisutni kompenzatori. Da bi se formirale funkcije [6.9] i [6.10], potrebno je apsolutnu vrijednost razlike impedansi integraliti u granicama od ± 5 Hz u okolini harmonijske komponente.

Cilj prilikom upravljanja kompenzatorima u mreži je minimizacija gubitaka i izbjegavanje pojava serijske i paralelne rezonanse, pa se kriterijumska funkcija može zapisati kao:

$$f = \sum_{k=1}^{N_b-1} S_{loss,k} + a + b \quad (6.11)$$

U [6.11] sa $S_{loss,k}$ označeni su prividni gubici grane k , a sa $N_b - 1$ ukupan broj grana u industrijskoj mreži. Članovi a i b su:

$$a = \sum_{h=3,5,7,11,13} Fv_{h,ser} \quad (6.12)$$

$$b = \sum_{h=3,5,7,11,13} Fi_{h,par} \quad (6.13)$$

Suma [6.12] posmatrana je samo sa za sabirnice 1, jer je upravo na ovim sabirnicama postoji najveća mogućnost za pojavu rezonanse, s obzirom na to da nema naponskih izvora u ostatku mreže. Za sabirnice 7 i 9 posmatrana je suma [6.13], kao karakteristične sabirnice na 5 kV i 20 kV naponu. Koeficijenti $k_{ser,h}$ i $k_{par,h}$ tokom proračuna su uzeti da iznose $1/h$, za $h = 3,5,7,11,13$. Cilj je izvršiti minimizaciju kriterijumske funkcije uz uvažavanje sljedećih ograničenja:

- Ograničenje ukupnog $\cos\varphi$

$$0.95 \leq \cos\varphi_{ind} \leq 1 \quad (6.14)$$

- Ograničenje prividne snage transformatora

$$S_{TR,i} < S_{n,i} \quad (6.15)$$

pri čemu je $S_{TR,i}$ prividna snaga transformatora i , dok je $S_{n,i}$ nominalna snaga transfor-

matora i u industrijskoj mreži. Ograničenje prividne snage transformatora, podrazumijeva da prividna snaga kroz svaki transformator mora biti manja od odgovarajuće nominalne vrijednosti kako ne bi došlo do preopterećenja transformatora.

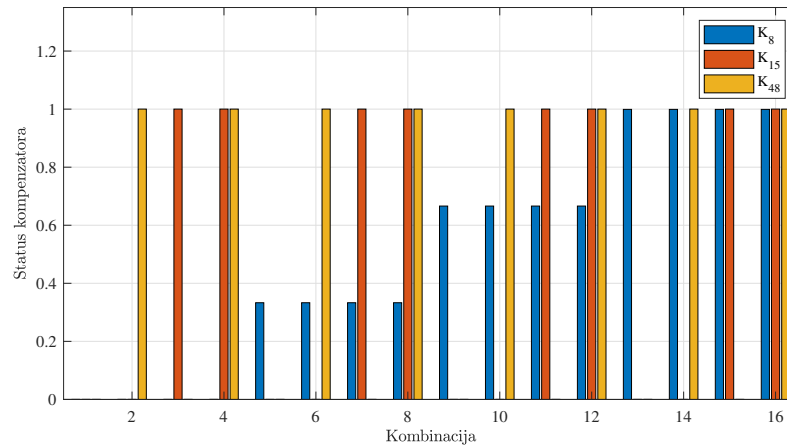
Za rješenje nelinearnog optimizacionog problema upravljanja pasivnim kompenzatorima u industrijskoj mreži, iskorišćen je Monte Karlo algoritam [24]. Ulazi u algoritam su bili stanja uključenosti pojedinih kompenzatora kao diskretne varijable. Status baterija kondenzatora na sabirnicama 15 i 48 može biti 0 ili 1, odnosno uključen ili isključen, dok status kompenzatora na sabirnicama 8 može biti iz skupa vrijednosti $\{0, \frac{1}{3}, \frac{2}{3}, 1\}$. Kada je status kompenzatora na sabirnicama 8 jednak 0, kompenzator je isključen. Statusi $\frac{1}{3}$ podrazumijevaju da je kompenzator u pogonu sa $\frac{1}{3}$ nominalne snage te da je uključen filter trećeg harmonika, status $\frac{2}{3}$ označava da kompenzatora radi sa $\frac{2}{3}$ svoje nominalne reaktivne snage i da je uključen pored trećeg, i filter petog harmonika. Status 1 označava da je kompenzator u pogonu sa nominalnom reaktivnom snagom te da se, pored trećeg i petog, uključuje i filter sedmog harmonika. Pored toga, ulaz u algoritam jeste prividna snaga potrošnje. U ovom istraživanju, nije posmatrana promjena snaga potrošnje po dnevnom dijagramu, nego je uzeto u razmatranje nekoliko tipičnih radnih tačaka u kojima je snaga potrošnje imala određene vrijednosti. Za takvu snagu potrošnje, cilj je bio odrediti optimalne kombinacije kompenzatora za koje kriterijumska funkcija ima minimalne vrijednosti.

6.3 Rezultati Monte Karlo algoritma

Dva radna režima biće analizirana:

- radni režim 1 - elektrolučne peći opterećene nominalno, ostali potrošači opterećeni sa 40% nominalne prividne snage,
- radni režim 2 - elektrolučne peći i ostali potrošači opterećeni sa 40% nominalne prividne snage.

Posmatra se slučaj kada su elektrolučne peći opterećene nominalno, a ostali potrošači rade sa 40% nominalne prividne snage. Postavlja se pitanje, kako treba upravljati kompenzatorima u industrijskoj mreži, da bi gubici bili minimalni i kako ne bi došlo do neželjenih pojava, serijske i paralelne rezonanse. Sve moguće kombinacije pasivnih kompenzatora tokom eksploatacije u industrijskoj mreži ilustrovane su na Slici [6.4]. Kombinacija kompenzatora koja je na Slici [6.4] označena kao prva predstavlja trivijalan slučaj kada su svi kompenzatori isključeni.

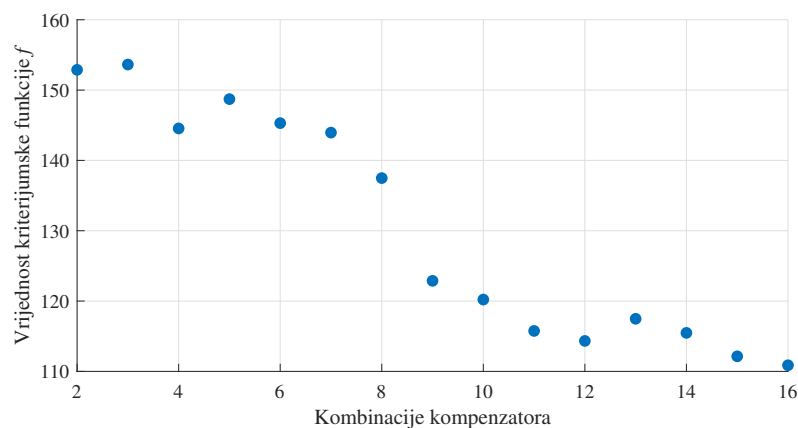


Slika 6.4: Kombinacije kompenzatora

Vrijednosti kriterijumske funkcije, za različite kombinacije kompenzatora, u slučaju kada su elektrolučne peći opterećene nominalno, a ostali potrošači rade sa 40% nominalne prividne snage predstavljene su na Slici 6.5. Na osnovu rezultata predstavljenih na Slici 6.5, može se zaključiti da je posljednja kompenzacija optimalna, jer tada kriterijumska funkcija dostiže minimum. Slika 6.4 pokazuje da je optimalna kombinacija kompenzatora u posmatranom radnom režimu slučaj kada su svi kompenzatori podešeni na nominalnu vrijednost reaktivne snage, što je predstavljeno u Tabeli 6.1.

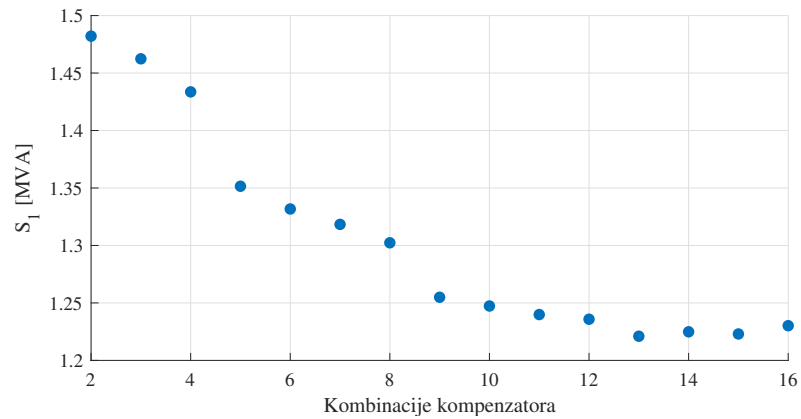
Tabela 6.1: Rezultati Monte Karlo algoritma - radni režim 1

Sabirnice	Reaktivna snaga [kvar]
K_8	8855
K_{15}	566
K_{48}	835



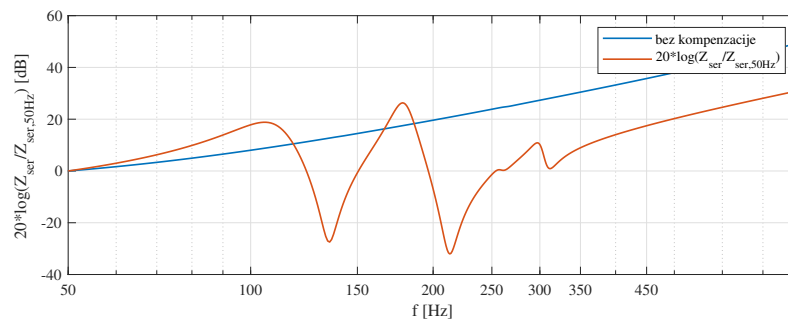
Slika 6.5: Vrijednosti kriterijumske funkcije za različite kombinacije kompenzatora

Prividna snaga gubitaka osnovnog harmonika ilustrovani su na Slici 6.6.

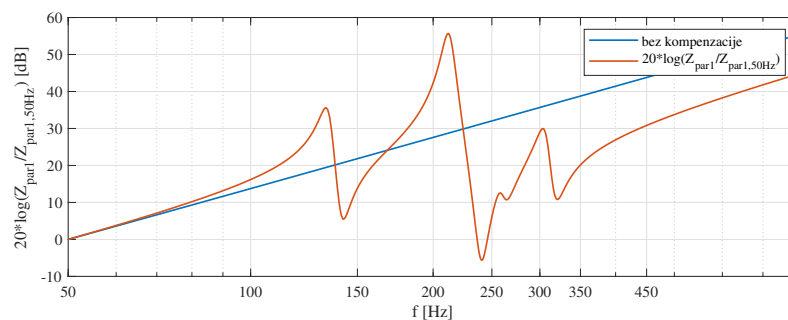


Slika 6.6: Prividna snaga gubitaka osnovnog harmonika - radni režim 1

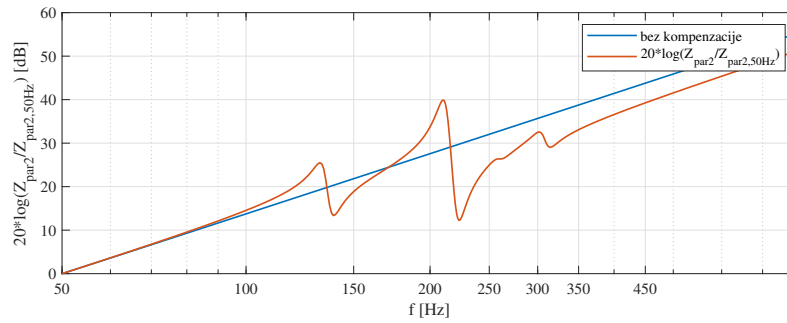
Zavisnost ekvivalentne serijske impedanse od frekvencije, posmatrane sa sabirnica 1, za optimalnu kombinaciju kompenzatora ilustrovano u Tabeli 6.1, predstavljena je na Slici 6.7. Zavisnosti ekvivalentne paralelne impedanse, posmatrane sa sabirnica 9 i 7 predstavljene su na slikama 6.8 i 6.9, respektivno. Plavom bojom na graficima 6.7, 6.8 i 6.9 predstavljena je impedansa bez pasivnih kompenzatora.



Slika 6.7: Serijska impedansa - sabirnice 1



Slika 6.8: Paralelna impedansa - sabirnice 9



Slika 6.9: Paralelna impedansa - sabirnice 7

Magnituda ekvivalentnih impedansi na vrijednostima trećeg, petog, sedmog i devetog harmonika, za optimalnu kombinaciju kompenzatora, date su u Tabeli 6.2. Ekvivalentna paralelna impedansa posmatrana sa sabirnica 9, označena je sa Z_{par1} , dok je ekvivalentna paralelna impedansa posmatrana sa sabirnica 7 označena sa Z_{par2} .

Tabela 6.2: Vrijednosti ekvivalentne impedanse za optimalnu kombinaciju kompenzatora

$20 \cdot \log(Z)$ [dB]	150 Hz	250 Hz	350 Hz	450 Hz
Z_{ser}	-0.69	-1.37	8.96	17.47
Z_{par1}	13.81	6.06	20.13	30.81
Z_{par2}	18.54	24.98	33.08	39.25

Na osnovu vrijednosti kriterijumske funkcije, predstavljenih na Slici 6.5, može se zaključiti da se za treću kombinaciju kompenzatora dostiže maksimum kriterijumske funkcije, pa je treća kombinacija najnepovoljniji slučaj. Status kompenzatora za kojeg kriterijumska funkcija dostiže maksimum, predstavljen je Tabelom 6.3.

Tabela 6.3: Rezultati Monte Karlo algoritma - najlošija kombinacija

Sabirnice	Reaktivna snaga [kvar]
K_8	0
K_{15}	566
K_{48}	0

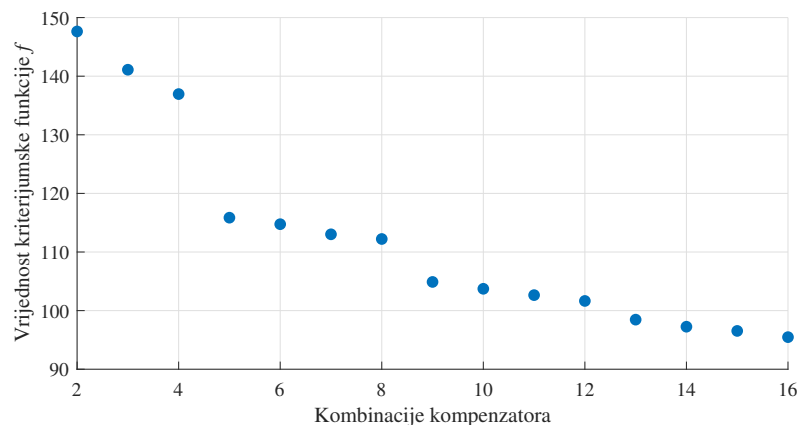
Pojačanja ekvivalentnih impedansi na vrijednostima trećeg, petog, sedmog i devetog harmonika, za najlošiju kombinaciju kompenzatora data su u Tabeli 6.4.

Tabela 6.4: Vrijednosti ekvivalentne impedanse za najlošiju kombinaciju kompenzatora

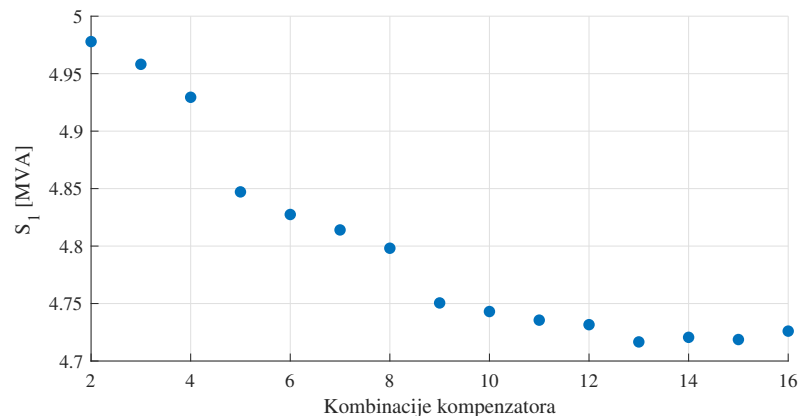
$20 \cdot \log(Z)$ [dB]	150 Hz	250 Hz	350 Hz	450 Hz
Z_{ser}	18.48	43.27	14.98	26.82
Z_{par1}	21.87	35.70	27.72	38.41
Z_{par2}	21.56	32.96	34.80	41.35

Poredeći rezultate predstavljene tabelama 6.2 i 6.4, može se uočiti da su vrijednosti ekvivalentnih impedansi manje za optimalnu kombinaciju kompenzatora. Pored toga, bitno je ostvariti i što manje gubitke u mreži. Posmatrajući vrijednosti gubitaka na Slici 6.6, pri optimalnoj kombinaciji kompenzatora u radnom režimu 1, ostvaruju se za 252 kVA manji gubici u odnosu na gubitke pri najnepovoljnijoj kombinaciji.

Posmatra se radni režim 2, kada su i elektrolučne peći i ostali potrošači opterećeni sa 40% nominalne prividne snage. Vrijednosti kriterijumske funkcije nakon Monte Karlo algoritma predstavljene su na Slici 6.10. Prividna snaga gubitaka osnovne komponente za ovaj radni režim ilustrirani su na Slici 6.11.



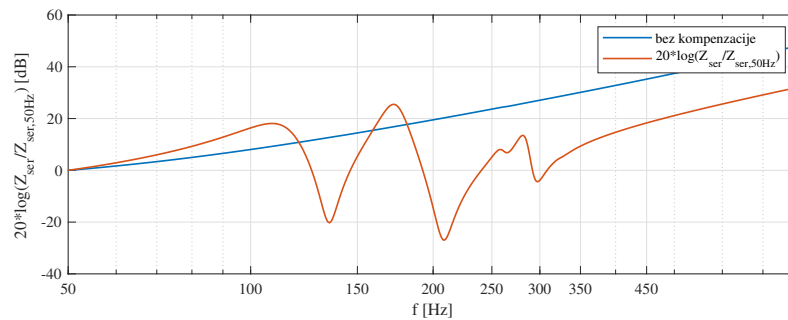
Slika 6.10: Vrijednosti kriterijumske funkcije za različite kombinacije kompenzatora



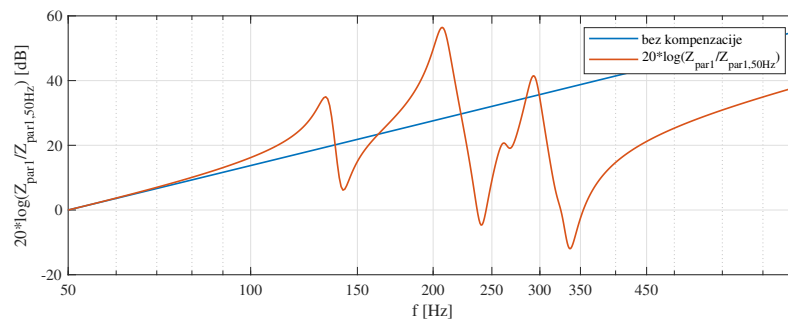
Slika 6.11: Prividna snaga gubitaka osnovnog harmonika - radni režim 2

Posmatrajući vrijednosti kriterijumske funkcije, može se uočiti da kriterijumska funkcija dostiže minimum za posljednju kombinaciju kompenzatora, a maksimum u kombinaciji 2. Status kompenzatora za posljednju kombinaciju predstavljen je u Tabeli 6.1. Kao što se uočava sa Slike 6.4, u drugoj po redu kombinaciji kompenzatora uključene su samo baterije kondenzatora na sabirnicama 48.

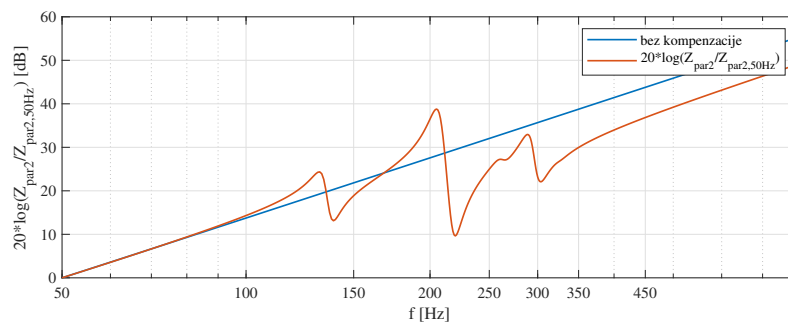
Ekvivalentna serijska impedansa, posmatrana sa sabirnica 1, za optimalnu kombinaciju kompenzatora u radnom režimu 2, ilustrovana je na Slici 6.12. Zavisnost ekvivalentnih paralelnih impedansi posmatranih sa strane sabirnica 9 i sabirnica 7, ilustrovane su na slikama 6.13 i 6.14, respektivno. Plavom bojom na graficima 6.12, 6.13 i 6.14 predstavljena je impedansa bez pasivnih kompenzatora.



Slika 6.12: Serijska impedansa - sabirnice 1



Slika 6.13: Paralelna impedansa - sabirnice 9



Slika 6.14: Paralelna impedansa - sabirnice 9

Magnituda ekvivalentnih impedansi na vrijednostima trećeg, petog, sedmog i devetog harmonika, za optimalnu kombinaciju kompenzatora, date su u Tabeli 6.5.

Tabela 6.5: Vrijednosti ekvivalentne impedanse za optimalnu kombinaciju kompenzatora

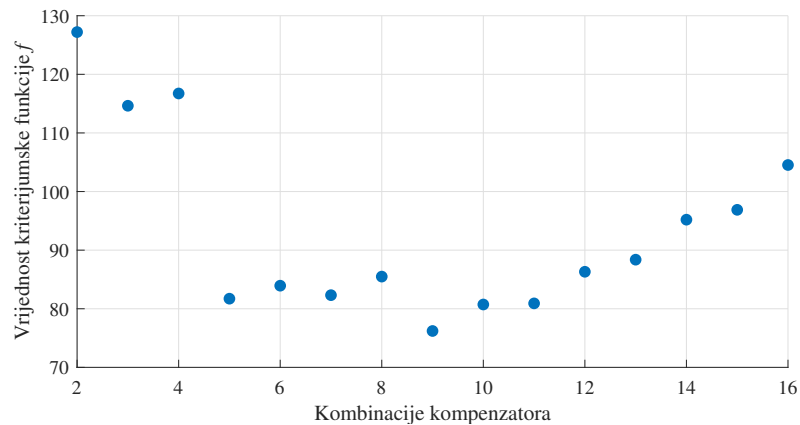
$20 \cdot \log(Z)$ [dB]	150 Hz	250 Hz	350 Hz	450 Hz
Z_{ser}	5.39	5.12	9.34	18.30
Z_{par1}	14.99	9.14	-2.52	21.19
Z_{par2}	18.87	24.97	29.96	38.85

Posmatrajući slike 6.12, 6.13, 6.14 i vrijednosti u Tabeli 6.5 možemo primijetiti da za optimalnu kombinaciju kompenzatora ne dolazi do značajnijeg povećanja trećeg, petog, sedmog i devetog harmonika. Magnituda ekvivalentnih impedansi na vrijednostima trećeg, petog, sedmog i devetog harmonika za najlošiju kombinaciju kompenzatora su date u Tabeli 6.6.

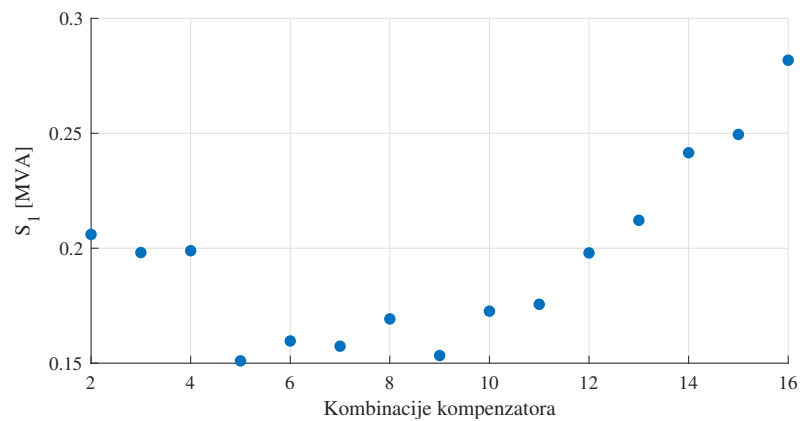
Tabela 6.6: Vrijednosti ekvivalentne impedanse za najlošiju kombinaciju kompenzatora

$20 \cdot \log(Z)$ [dB]	150 Hz	250 Hz	350 Hz	450 Hz
Z_{ser}	17.43	26.74	28.12	34.33
Z_{par1}	20.89	36.52	34.67	40.38
Z_{par2}	20.85	32.36	36.06	41.15

Poredeći vrijednosti ekvivalentnih impedansi za optimalnu 6.5 i najlošiju 6.6 kombinaciju kompenzatora za ovaj radni režim, može se uočiti da su vrijednosti serijske impedanse po pojedinim harmonicima, posmatrane od strane sabirnica 110 kV, značajno manje za optimalnu kombinaciju kompenzatora. Za ostale radne tačke, prema analogiji računaju se optimalne kombinacije kompenzatora. Kada su elektrolučne peći isključene, a ostali potrošači u industrijskoj mreži opterećeni sa 20% nominalne prividne snage, vrijednosti kriterijumske funkcije predstavljene su na Slici 6.15. Za ovaj radni režim, optimalna je deveta kombinacija kompenzatora. Prividna snaga gubitaka osnovnog harmonika ilustrovani su na Slici 6.16.



Slika 6.15: Vrijednosti kriterijumske funkcije za različite kombinacije kompenzatora



Slika 6.16: Prividna snaga gubitaka osnovnog harmonika

Kako su zahtjevi potrošnje u industrijskoj mreži manji, manji su i gubici u odnosu na prethodna dva analizirana radna režima. Manja je i potreba za kompenzacijom reaktivne snage.

Glava 7

Zaključak

U ovom radu predložen je CFBPSO algoritam za optimalno pozicioniranje i dimenzionisanje otočnih baterija kondenzatora. Računanje indeksa osjetljivosti iskorišćeno je sa ciljem pronalaska sabirnica, kao najboljih kandidata za postavljanje baterija kondenzatora. Cilj optimizacije bio je da se ostvare minimalni gubici aktivne snage uz što manju instalisanu reaktivnu snagu, poštujući sva prethodno definisana ograničenja. U okviru ovog rada, predstavljeno je softversko rješenje u okviru programskog paketa MATLAB, u kom je razvijen predloženi optimizacioni algoritam. Iskorišćena su dva testna sistema za CFBPSO algoritam: distributivna mreža sa 85 sabirnica i industrijska mreža. Rezultati predloženog rješenja za testnu distributivnu mrežu sa 85 sabirnica poređeni su sa rezultatima PSO, PGSA i MNLP algoritmima. Rezultati pokazuju da CFBPSO algoritam daje minimalne gubitke aktivne snage uz istu kriterijumsku funkciju i ograničenja. Prednost CFBPSO ogleda se i u tome što je ovaj algoritam jednostavan za implementaciju. Nedostatak CFBPSO optimizacije ogleda se u tome što ovaj optimizacioni algoritam ne garantuje globalni optimum.

Realna industrijska mreža drugi je testni sistem za CFBPSO algoritam i modelovana je u okviru programskog paketa MATLAB/MATPOWER. Rezultati CFBPSO i za ovaj testni sistem pokazuju značajnu redukciju gubitaka aktivne snage, popravku naponskog profila i $\cos\varphi$. S obzirom da u industrijskoj mreži postoje elektrolučne peći, projektovan je pasivni filter koji eliminiše protok trećeg, petog i sedmog harmonika. U poglavlju 6 iskorišćen je algoritam virtuelnog kompenzatora [24], pri čemu je akcenat na eksploataciji odnosno upravljanju instaliranim pasivnim kompenzatorima u industrijskoj mreži za tipične radne režime. Buduće istraživanje može biti u pravcu optimizacije pomoću CFBPSO algoritma sa ciljem direktnog određivanja pasivnih filtera neophodnih za kompenzaciju reaktivne snage i za umanjeње tokova viših harmonika, kao posljedica postojanja nelinearnih potrošača u mreži. Kada je riječ o eksploataciji, u budućem istraživanju bilo bi značajno istražiti algoritme koji bi na petnaestominutnom nivou proračunavali neophodna stanja kompenzatora, u zavisnosti od promjena snaga potrošnje u mreži. U okviru budućeg istraživanja, može se istražiti i mogućnost primjene optimizacije pomoću metoda vještačke inteligencije, kako za pronalazak optimalnih pozicija i snaga kompenzatora tako i tokom eksploatacije.

Dodatak A

Dodatak

A.1 Parametri testne mreže sa 85 sabirnica

Tabela A.1: Podaci za testnu mrežu sa 85 sabirnica

Vod	Od čvora	Do čvora	R [Ω]	X [Ω]	S [kVA]
1	1	2	0.108	0.075	0
2	2	3	0.163	0.112	0
3	3	4	0.217	0.149	56
4	4	5	0.108	0.074	0
5	5	6	0.435	0.298	0
6	6	7	0.272	0.186	0
7	7	8	1.197	0.820	35.28
8	8	9	0.108	0.074	0
9	9	10	0.598	0.410	0
10	10	11	0.544	0.373	56
11	11	12	0.544	0.373	0
12	12	13	0.598	0.410	0
13	13	14	0.272	0.186	35.28
14	14	15	0.326	0.223	35.28
15	2	16	0.728	0.302	35.28
16	3	17	0.455	0.189	112
17	5	18	0.820	0.340	56
18	18	19	0.637	0.264	56
19	19	20	0.455	0.189	35.28
20	20	21	0.819	0.340	35.28
21	2	22	1.548	0.642	35.28
22	19	23	0.182	0.075	56
23	7	24	0.910	0.378	35.28
24	8	25	0.455	0.189	35.28
25	25	26	0.364	0.151	56

Nastavak na sljedećoj stranici

Tabela A.1 – Nastavak

Vod	Od čvora	Do čvora	R [Ω]	X [Ω]	S [kVA]
26	26	27	0.546	0.226	0
27	27	28	0.273	0.113	56
28	28	29	0.546	0.226	0
29	29	30	0.546	0.226	35.28
30	30	31	0.273	0.113	35.28
31	31	32	0.182	0.075	0
32	32	33	0.182	0.075	14
33	33	34	0.819	0.340	0
34	34	35	0.637	0.264	0
35	35	36	0.182	0.075	35.28
36	26	37	0.364	0.151	56
37	27	38	1.002	0.416	56
38	29	39	0.546	0.226	56
39	32	40	0.455	0.189	35.28
40	40	41	1.002	0.416	0
41	41	42	0.273	0.113	35.28
42	41	43	0.455	0.189	35.28
43	34	44	1.002	0.416	35.28
44	44	45	0.911	0.378	35.28
45	45	46	0.911	0.378	35.28
46	46	47	0.546	0.226	14
47	35	48	0.637	0.264	0
48	48	49	0.182	0.075	0
49	49	50	0.364	0.151	36.28
50	50	51	0.455	0.189	56
51	48	52	1.366	0.567	0
52	52	53	0.455	0.189	35.28
53	53	54	0.546	0.226	56
54	52	55	0.546	0.226	56
55	49	56	0.546	0.226	14
56	9	57	0.273	0.113	56
57	57	58	0.819	0.340	0
58	58	59	0.182	0.075	56
59	58	60	0.546	0.226	56
60	60	61	0.728	0.302	56
61	61	62	1.002	0.415	56
62	60	63	0.182	0.075	14
63	63	64	0.728	0.302	0
64	64	65	0.182	0.075	0
65	65	66	0.182	0.075	56
66	64	67	0.455	0.189	0
67	67	68	0.910	0.378	0
68	68	69	1.092	0.453	56
Nastavak na sljedećoj stranici					

Tabela A.1 – Nastavak

Vod	Od čvora	Do čvora	R [Ω]	X [Ω]	S [kVA]
69	69	70	0.455	0.189	0
70	70	71	0.546	0.226	35.28
71	67	72	0.182	0.075	56.00
72	68	73	1.184	0.491	0
73	73	74	0.273	0.113	56
74	73	75	1.002	0.416	35.28
75	70	76	0.546	0.226	56
76	65	77	0.091	0.037	14
77	10	78	0.637	0.264	56
78	67	79	0.546	0.226	35.28
79	12	80	0.728	0.302	56
80	80	81	0.364	0.151	0
81	81	82	0.091	0.037	56
82	81	83	1.092	0.453	35.28
83	83	84	1.002	0.340	14
84	13	85	0.819	0.340	35.28

Bibliografija

- [1] D. Tasić i G. Savanović N. Rajaković. *Distributivne i industrijske mreže*. Akademski misao, Beograd, 2008.
- [2] N. Rajaković. *Analiza elektroenergetskih sistema I*. Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, 2002.
- [3] Maurice Clerc. The swarm and the queen: towards a deterministic and adaptive particle swarm optimization. In *Proceedings of the 1999 congress on evolutionary computation-CEC99 (Cat. No. 99TH8406)*, volume 3, pages 1951–1957. IEEE, 1999.
- [4] M. M. A. Salama H.N. Ng and A. Y. Chikhani. Classification of capacitor allocation techniques. *IEEE Transactions on power delivery*, 15(1):387–392, 2000.
- [5] N. M. Neagle and D. R. Samson. Loss reduction from capacitors installed on primary feeders [includes discussion]. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, 75(3):950–959, 1956.
- [6] R.F. Cook. Analysis of capacitor application as affected by load cycle. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, 78(3):950–956, 1959.
- [7] R. F. Cook. Optimizing the application of shunt capacitors for reactive-volt-ampere control and loss reduction. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, 80(3):430–441, 1961.
- [8] Nelson E. Chang. Locating shunt capacitors on primary feeder for voltage control and loss reduction. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, (10):1574–1577, 1969.
- [9] J. J. Grainger and S. Civanlar. Volt/var control on distribution systems with lateral branches using shunt capacitors and voltage regulators part i: The overall problem. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, (11):3278–3283, 1985.
- [10] S. Civanlar and J. J. Grainger. Volt/var control on distribution systems with lateral branches using shunt capacitors and voltage regulators part ii: The solution method. *IEEE transactions on power apparatus and systems*, (11):3284–3290, 1985.

- [11] Hernando Dura. Optimum number, location, and size of shunt capacitors in radial distribution feeders a dynamic programming approach. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, (9):1769–1774, 1968.
- [12] Salah M. El-Sobki Tharwat H. Fawzi and Mohamed A. Abdel-halim. New approach for the application of shunt capacitors to the primary distribution feeders. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, (1):10–13, 1983.
- [13] M. Ponnasikko and K.S. Prakasa Rao. Optimal choice of fixed and switched shunt capacitors on radial distributors by the method of local variations. *IEEE transactions on power apparatus and systems*, (6):1607–1615, 1983.
- [14] Mesut E. Baran and Felix F. Wu. Optimal capacitor placement on radial distribution systems. *IEEE Transactions on power Delivery*, 4(1):725–734, 1989.
- [15] H. Yin S. Civanlar, J. J. Grainger and S.S.H. Lee. Distribution feeder reconfiguration for loss reduction. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 3(3):1217–1223, 1988.
- [16] Tim Taylor and David Lubkeman. Implementation of heuristic search strategies for distribution feeder reconfiguration. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 5(1):239–246, 1990.
- [17] T.S. Abdel-Salam, A.Y. Chikhani, and R. Hackam. A new technique for loss reduction using compensating capacitors applied to distribution systems with varying load condition. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 9(2):819–827, 1994.
- [18] Gary Boone and Hsiao-Dong Chiang. Optimal capacitor placement in distribution systems by genetic algorithm. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 15(3):155–161, 1993.
- [19] N. Iwan Santoso and Owen T. Tan. Neural-net based real-time control of capacitors installed on distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 5(1):266–272, 1990.
- [20] M. M. A. Salama H.N. Ng and A. Y. Chikhani. Capacitor allocation by approximate reasoning: fuzzy capacitor placement. *IEEE transactions on power delivery*, 15(1):393–398, 2000.
- [21] Ignacio Pérez Abril Jandecy Cabral Leite and Manoel Socorro Santos Azevedo. Capacitor and passive filter placement in distribution systems by nondominated sorting genetic algorithm-ii. *Electric Power Systems Research*, 143:482–489, 2017.
- [22] J. C. Das. Passive filters-potentialities and limitations. *IEEE transactions on industry applications*, 40(1):232–241, 2004.
- [23] Wilsun Xu Alexandre B. Nassif and Walmir Freitas. An investigation on the selection of filter topologies for passive filter applications. *IEEE transactions on Power Delivery*, 24(3):1710–1718, 2009.

- [24] Leopold Herman and Igor Papič. Optimal control of reactive power compensators in industrial networks. In *Proceedings of 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power-ICHQP 2010*, pages 1–6. IEEE, 2010.
- [25] Dejan Stevanović i Predrag Petković. Harmonici u elektroenergetskom sistemu-praktični problemi i rešenja. *Infoteh, Jahorina*, 2013.
- [26] K. Prakash and M. Sydulu. Particle swarm optimization based capacitor placement on radial distribution systems. In *2007 IEEE power engineering society general meeting*, pages 1–5. IEEE, 2007.
- [27] S.V.L.Narasimham R. Srinivasas Rao and M. Ramalingaraju. Optimal capacitor placement in a radial distribution system using plant growth simulation algorithm. *International journal of electrical power & energy systems*, 33(5):1133–1139, 2011.
- [28] Mehdi Jalali Sayyad Nojavan and Kazem Zare. Optimal allocation of capacitors in radial/mesh distribution systems using mixed integer nonlinear programming approach. *Electric Power Systems Research*, 107:119–124, 2014.
- [29] Vanja Starčević, Leopold Herman, Boštjan Blažič, and Aleksej Avramović. Optimal capacitor placement and sizing using constriction-factor-based optimization. *INDEL*, 2022.
- [30] Strahil J. Gušavac. *Osnovni principi projektovanja u mrežama srednjeg i niskog napona*. Fakultet tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu, 2014.
- [31] Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu. Materijali: Kvalitet električne energije. http://ees.etf.bg.ac.rs/predmeti/75/KEE10_Prigusenje%20visih%20harmonika.pdf. [Online; accessed 25-June-2022].
- [32] James Kennedy and Russell Eberhart. Particle swarm optimization. In *Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks*, volume 4, pages 1942–1948. IEEE, 1995.
- [33] Yuhui Shi *et al.* Particle swarm optimization: developments, applications and resources. In *Proceedings of the 2001 congress on evolutionary computation (IEEE Cat. No. 01TH8546)*, volume 1, pages 81–86. IEEE, 2001.
- [34] Yuhui Shi and Russell Eberhart. A modified particle swarm optimizer. In *1998 IEEE international conference on evolutionary computation proceedings. IEEE world congress on computational intelligence (Cat. No. 98TH8360)*, pages 69–73. IEEE, 1998.
- [35] Russel Eberhart and Yuhui Shi. Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization. In *Proceedings of the 2000 congress on evolutionary computation. CEC00 (Cat. No. 00TH8512)*, volume 1, pages 84–88. IEEE, 2000.
- [36] Adel Ali Abou El-Ela, Ragab A El-Sehiemy, Abdel-Mohsen Kinawy, and Mohamed Taha Mouwafi. Optimal capacitor placement in distribution systems for power

- loss reduction and voltage profile improvement. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 10(5):1209–1221, 2016.
- [37] Mohamed M. Hamada, Mohamed A.A. Wahab, and Nasser G.A. Hemdan. Simple and efficient method for steady-state voltage stability assessment of radial distribution systems. *Electric Power Systems Research*, 80(2):152–160, 2010.
- [38] K. U. Vinayaka and P.S. Puttaswamy. Review on characteristic modeling of electric arc furnace and its effects. In *2017 International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICT)*, pages 1222–1229. IEEE, 2017.

Biografija autora

Vanja Kitić (rođena Starčević) rođena je 11. oktobra 1995. godine u Tesliću. Osnovnu školu „Ivo Andrić“ završila je kao nosilac Vukove diplome i kao učenik generacije. Gimnaziju opšteg smjela „Jovan Dučić“ u Teslići završila je kao nosilac Vukove diplome. Prvi ciklus studija upisala je 2014. godine na Elektrotehničkom fakultetu u Banjoj Luci. Smjer Elektroenergetika i automatika završila je u decembru 2018. odbranivši diplomski rad pod nazivom „Analiza tranzijentne stabilnosti elektroenergetskih sistema koristeći programski paket DIGSILENT“.

Po završetku studija, dobitnik je zlatne značke Univerziteta u Banjoj Luci kao najuspješniji student Elektrotehničkog fakulteta u svojoj generaciji. Drugi ciklus studija upisala je u oktobru 2019. godine na Elektrotehničkom fakultetu, studijski program Elektroenergetski i industrijski sistemi.

U maju 2019. godine izabrana je u zvanje asistenta na Univerzitetu u Banjoj Luci, a u junu 2019. zaposlila se na Katedri za opštu elektrotehniku Elektrotehničkog fakulteta. Kao asistent bila je angažovana na sedam predmeta: Osnovi elektrotehnike 1, Osnovi elektrotehnike 2, Električna mjerenja, Signali i sistemi, Kola i signali, Digitalna obrada signala i Analogni i digitalni filtri.

U julu 2022. godine zaposlila se u „High Tech Engineering Center - HTEC Group“ na poziciji softver inženjer, gdje je i trenutno zaposlena.

УНИВЕРЗИТЕТ У БАЊОЈ ЛУЦИ
ПОДАЦИ О АУТОРУ ОДБРАЊЕНОГ МАСТЕР/МАГИСТАРСКОГ РАДА

Име и презиме аутора мастер/магистарског рада: **Вања Китић**

Датум, мјесто и држава рођења аутора: **11.10.1995. Теслић, БиХ**

Назив завршеног факултета/Академије аутора и година дипломирања:

Електротехнички факултет Универзитета у Бањој Луци

Датум одбране завршног/дипломског рада аутора: **26. децембар 2022.**

Наслов завршног/дипломског рада аутора: **Анализа транзијенте стабилности електроенергетских система помоћу програмског пакета DIgSILENT**

Академско звање коју је аутор стекао одбраном завршног/дипломског рада:

Дипломирани инжењер електротехнике – 240 ECTS

Академско звање које је аутор стекао одбраном мастер/магистарског рада:

Мастер електротехнике – 300 ECTS – Електроенергетски и индустријски системи

Назив факултета/Академије на коме је мастер/магистарски рад одбрањен:

Електротехнички факултет Универзитета у Бањој Луци

Наслов мастер/магистарског рада и датум одбране:

Оптимално планирање и експлоатација пасивних компензатора у индустријској мрежи, 26. децембар 2022.

Научна област мастер/магистарског рада према CERIF шифрарнику: **T 190**

Имена ментора и чланова комисије за одбрану мастер/магистарског рада:

проф. др Владимир Рисојевић, предсједник
доц. др Алексеј Аврамовић, ментор
проф. др Чедомир Зељковић, члан

У Бањој Луци, дана 19.12.2022.

Декан



ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Изјављујем да је
мастер/магистарски радНаслов рада Оптимално планирање и експлоатације пасивних
компензатора у индустријској мрежиНаслов рада на енглеском језику Optimal planning and exploitation of passive compensators
in industrial power system

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да мастер/магистарски рад, у цјелини или у дијеловима, није био предложен за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

У Бањој Луци 16.12.2022.Потпис кандидата
Вања Климић

Изјава 2

Изјава којом се овлашћује Електротехнички факултет/ Академија умјетности Универзитета у Бањој Луци да мастер/магистарски рад учини јавно доступним

Овлашћујем Електротехнички факултет/ Академију умјетности Универзитета у Бањој Луци да мој мастер/магистарски рад, под насловом

Оптимално планирање и експлоатације пасивних компензатора у индустријској мрежи

који је моје ауторско дјело, учини јавно доступним.

Мастер/магистарски рад са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату, погодном за трајно архивирање.

Мој мастер/магистарски рад, похрањен у д и г и т а л н и р е п о з и т о р и ј у м Универзитета у Бањој Луци, могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (*Creative Commons*), за коју сам се одлучио/ла.

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

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

У Бањој Луци 16.12.2022.

Потпис кандидата

Вања Кривић

Изјава 3

**Изјава о идентичности штампане и електронске верзије
мастер/магистарског рада**

Име и презиме аутора Вања Китић

Наслов рада Оптимално планирање и експлоатације пасивних
компензатора у индустријској мрежи

Ментор доц. др Алексеј Аврамовић

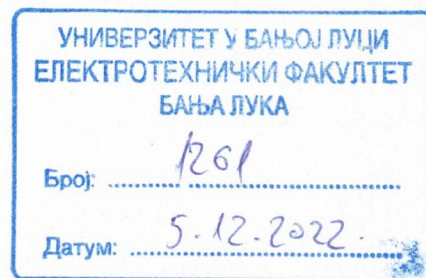
Изјављујем да је штампана верзија мог мастер/магистарског рада идентична електронској верзији коју сам предао/ла за дигитални репозиторијум Универзитета у Бањој Луци.

У Бањој Луци 16.12.2022.

Потпис кандидата

Вања Китић

Др Владимир Рисојевић, ванредни професор
Електротехнички факултет Универзитета у Бањој Луци
Др Алексеј Аврамовић, доцент
Електротехнички факултет Универзитета у Бањој Луци
Др Чедомир Зельковић, ванредни професор
Електротехнички факултет Универзитета у Бањој Луци



**НАУЧНО-НАСТАВНОМ ВИЈЕЋУ
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКОГ ФАКУЛТЕТА
УНИВЕРЗИТЕТА У БАЊОЈ ЛУЦИ**

Одлуком Научно-наставног вијећа Електротехничког факултета Универзитета у Бањој Луци број 20/3.238-3/22 од 18.04.2022. године, именовани смо за чланове Комисије за завршни рад II циклуса студија, под називом „**Оптимално планирање и експлоатација пасивних компензатора у индустријској мрежи**“, кандидаткиње **Вање Китић**. Након прегледа приложеног рада подносимо сљедећи

ИЗВЈЕШТАЈ

1. БИОГРАФСКИ ПОДАЦИ КАНДИДАТА

Вања Китић (рођена Старчевић), дипл. инж. електротехнике, рођена је 11.10.1995. године у Теслићу. Основну школу „Иво Андрић“ завршила је као носилац Вукове дипломе и као ученик генерације. Гимназију општег смјера завршила је у СШЦ „Јован Дучић“ у Теслићу као носилац Вукове дипломе Први циклус студија уписала је 2014. године на Електротехничком факултету у Бањој Луци, на смјеру Електроенергетика и аутоматика. Факултет је завршила у децембру 2018. године одбравивши дипломски рад под називом „Анализа транзијентне стабилности електроенергетских система користећи програмски пакет DIgSILENT“.

По завршетку студија, добитник је златне значке Универзитета у Бањој Луци као најуспјешнији студент Електротехничког факултета у својој генерацији. Други циклус студија уписала је у октобру 2019. године на Електротехничком факултету, студијски програм Електроенергетски индустријски системи. Све испите је положила са просјечном оцјеном 10.0.

Током мастер студија, кандидаткиња је провела један дио истраживања на Електротехничком факултету Универзитета у Љубљани према билатералном пројекту „MLECO – Machine Learning in Edge Computing“, који суфинансирају Истраживачка агенција Републике Словеније и Министарство цивилних послова Босне и Херцеговине, број уговора 19.032/966-13/20.

У мају 2019. године изабрана је у звање асистента на Универзитету у Бањој Луци, а у јуну 2019. запослила се на Катедри за Општу електротехнику Електротехничког факултета. Као асистент била је ангажована на следећим предметима: Основи електротехнике 1, Основи електротехнике 2, Електрична мјерења, Сигнали и системи, Кола и сигнали, Дигитална обрада сигнала и Аналогни и дигитални филтри. Током свог ангажовања као асистента на Електротехничком факултету у Бањој Луци, учествовала је у реализацији неколико научно-истраживачких домаћих и међународних пројеката.

Кандидаткиња је до сада објавила шест радова на научно-истраживачким конференцијама:

1. **Vanja Starčević**, Nikola Kezić, Zdenka Babić:
Simple and Low-Cost Electronic System for Honey Bee Counting, *28th International Electrotechnical and Computer Science Conference*, 10-13 Portorož, Slovenia, 2019.
2. Mitar Simić, Vladan Stojnić, **Vanja Starčević**, Zdenka Babić, Janja Filipi:
Electronic System for Remote Monitoring of Environmental Parameters on a Bee Yard, *19th International Symposium INFOTEH-JAHORINA*, Bosnia and Herzegovina, 2020.
3. **Vanja Starčević**, Čedomir Zeljković, Nemanja Kitić, Predrag Mršić, Bojan Erceg, Vedran Jovanović:
PV System Integration Assessment by Automated Monte Carlo Simulation in DIgSILENT PowerFactory, *20th International Symposium INFOTEH-JAHORINA*, Bosnia and Herzegovina, 2021.
4. Nemanja Kitić, Petar Matić, Đorđe Lekić, Predrag Mršić, Bojan Erceg, Čedomir Zeljković, **Vanja Starčević**:
Real-Time Sag Estimation of Overhead Power Lines Based on Approximate Magnetic Field Model, *21th International Symposium INFOTEH-JAHORINA*, Bosnia and Herzegovina, 2022.
5. **Vanja Starčević**, Mitar Simić, Vladimir Risojević, Zdenka Babić:
Integrated video-based bee counting and multi-sensors platform for remote bee yard monitoring, *21st International Symposium INFOTEH-JAHORINA*, Bosnia and Herzegovina, 2022.
6. **Vanja Starčević**, Leopold Herman, Boštjan Blažič, Aleksej Avramović:
Optimal Capacitor Placement and Sizing Using Constriction-Factor-Based Optimization, *XIV International Symposium on Industrial Electronics and Applications (INDEL)*, Bosnia and Herzegovina, 2022.

У јулу 2022. године запослила се у „High Tech Engineering Center – HTEC Group“ на позицији софтвер инжењер, гдје је и тренутно запослена.

2. ОСНОВНИ ПОДАЦИ О РАДУ

Завршни рад II циклуса кандидаткње Вање Китић, под називом „Оптимално планирање и експлоатација пасивних компензатора у индустријској мрежи“ садржи 70 нумерисаних страница, са укупно 48 слика и 18 табела, а организован је у шест глава:

1. Увод,
2. Компензација реактивне снаге у дистрибутивним и индустријским мрежама,
3. Индустријска мрежа,
4. CFBPSO оптимизација,
5. Оптимално позиционирање и димензионисање батерија кондензатора примјеном CFBPSO,
6. Експлоатација пасивних компензатора у индустријској мрежи
7. Закључак.

Такође, приложени рад садржи додатак са параметрима тестне индустријске мреже. Списак коришћене литературе садржи 37 цитираних извора.

3. АНАЛИЗА РАДА

Уводни дио рада је посвећен разматрањима везаним за компензацију реактивне снаге у индустријским мрежама. Описан је значај димензионисања и оптималног позиционирања оточних батерија, као и пројектовања пасивних филтара, како би се извршила компензација реактивне снаге и умањили реактивни токови из мреже. Након уводних разматрања, наведени су циљеви истраживањаведеног током писања рада. Наведено је да је практични дио рада укључио имплементацију CFBPSO (Constriction-Factor-Based Particle Swarm Optimization) алгоритма за рачунање реактивних снага и оптималних позиција оточних батерија у индустријским мрежама. Употреба овог алгоритма у сврху компензације реактивне снаге представља оригинални научни допринос аутора. Такође, дат је кратак преглед стања у овој области, описане су методе до сада предложене у литератури, те наведени њихове предности и мане. На крају, наведен је допринос овог истраживања.

У другој глави су дати детаљи везани за конкретне начине компензације реактивне снаге у дистрибутивним и индустријским мрежама (појединачне, групне и централне компензације), као и детаљи везани за начине и потребе филтрирања виших хармоника. Дата је анализа карактеристика филтара који се користе у пракси, као и детаљи о начину димензионисања пасивних филтара.

Трећа глава даје детаље о индустријској мрежи која је била предмет истраживања током боравка кандидата на Електротехничком факултету у Љубљани. Дата је једнополна шема индустријске мреже, као и параметри грана индустријске мреже. Даље, дат је преглед и анализа резултата мјерења параметара који се односе на квалитет електричне енергије, са нагласком на параметре који указују на сметње и изобличења усљед укључивања потрошача велике снаге са великим нелинеарним изобличењима (као што су електролучне пећи у индустријским мрежама). Посебно су анализирани параметри квалитета електричне енергије на сабирницама различитих

напонских нивоа и приликом краткотрајних мјерења. Ова анализа је нагласила је значај увођења механизма за побољшање квалитета електричне енергије.

Четврта глава даје детаље о алгоритму CFBPSO, који је касније коришћен приликом рачунања параметара компензационих филтара. Ова глава се бави математичким моделом алгоритма који се може искористити како би се на основу више резултата мјерења итеративном методом дошло до оптималног рјешења. У разматраном случају, алгоритам је прилагођен да се кроз одређени број итерација, на основу резултата мјерења у индустријској мрежи, дође до параметара који указују на оптималну позицију пасивних филтара како би се извршила минимизација протока реактивне снаге у посматраној индустријској мрежи. Разматрање CFBPSO алгоритма је извршено искључиво са аспекта дигиталне обраде сигнала, при чему су изведене све једначине које описују итеративни процес, а дате су и одговарајуће илустрације.

Пета глава односи се на конкретну имплементацију CFBPSO алгоритма приликом оптималног позиционирања и димензионисања батерија кондензатора у циљу минимизације реактивне снаге у посматраној индустријској мрежи. Наведен је начин како се изводе одговарајући индекси осјетљивости који су везани за селекцију грана у мрежи које су најпогоднији кандидати за постављање пасивних филтара или оточних батерија, а затим се у другом кораку врши минимизација критеријумске функције која бира сабирнице из листе кандидата и рачуна снагу батерија. Извршен је прорачун одговарајућих индекса осјетљивости, па је описано како се користе приликом примјене CFBPSO алгоритма.

Експериментални резултати су потврђени на два модела мрежа. Први модел јесте дистрибутивна мрежа са 85 сабирница, која се често користи за тестирање, а друга мрежа јесте конкретна индустријска мрежа чији су детаљи дати у Глави 3. За обје мреже дати су и анализирани резултати након примјене описаног алгоритма. Пошто за мрежу са 85 сабирница постоје резултати у литератури који се односе на примјену других алгоритама, кандидаткиња је могла дати поређење са својим резултатима, при чему се види да је предложени алгоритам постигао веће смањење губитака снаге, као и већу уштеду у односу на друге алгоритме који су дати у литератури. Такође, извршена је детаљна анализа за индустријску мрежу описану у Глави 3.

У шестој глави дати су анализа и резултати у вези са управљањем пасивних компензатора који су инсталирани у индустријској мрежи. Наиме, укључивањем пасивних филтара може доћи до нежељених ефеката услед интеракције компонената филтара са параметрима мреже. Ти нежељени ефекти се најчешће манифестују у виду појаве резонансе или антирезонансе. Стога, у овој глави су дати резултати који се односе на управљање већ инсталираним компензаторима (њихово укључивање и искључивање). Резултати су дати на основу посматрања додатне критеријумске функције, која треба да одреди да ли ће одређени компензатор извршити потребни утицај на параметре квалитета електричне енергије и да ли ће при његовом укључивању доћи до појаве нежељених ефеката. дата је анализа утицаја укључивања компензатора на одговарајућу критеријумску функцију, као и анализа могућности појаве резонансе и антирезонансе. За симулацију овог комплексног модела коришћен је Монте Карло метод.

Седма глава даје кратак осврт на цјелокупни рад корак по корак, као и закључак спроведеног истраживања.

4. НАЈВАЖНИЈИ ДОПРИНОСИ

У раду је дат преглед могућности компензовања реактивне снаге дистрибутивне и индустријске мреже, услед утицаја нелинеарних оптерећења у мрежи. Кандидаткиња је успјешно реализовала алгоритам за одређивање димензија и позиција компензатора у индустријским мрежама, чиме је показала способност да самостално савлада мултидисциплинаран проблем који укључује електроенергетику, теорију електричних кола, електрична мјерења и дигиталну обраду сигнала. Стога, комисија сматра да је кандидаткиња, кроз спроведено истраживање, усјешно реализовала завршни рад II циклуса студија који садржи више значајних доприноса:


1. Извршена је детаљна анализа могућности компензације реактивне снаге у индустријској и дистрибутивној мрежи, како би се смањили губици активне снаге, и поправили параметри квалитета као што су фактор снаге и напонске прилике у мрежи.
2. Описан је алгоритам за оптимизацију итеративним поступком, који има за циљ минимизацију одређене критеријумске функције.
3. Описан алгоритам је прилагођен и имплементиран тако да се изврши оптимизација снаге и позиције оточних батерија или пасивних филтара у циљу минимизације реактивне снаге у индустријској и дистрибутивној мрежи. Овај дио рада представља самосталан и оригинални научни допринос кандидата.
4. Извршена су додатна разматрања која се односе на могућности управљања већ инсталираним пасивним компонентама унутар индустријске мреже. Како би се могле предвидјети ефекти укључивања и искључивања, извршена је Монте Карло анализа утицаја на додатну критеријумску функцију, која испитује могућности појаве резонансе или антирезонансе.

5. ЗАКЉУЧАК И ПРИЈЕДЛОГ

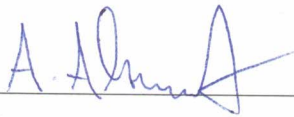
Комисија сматра да завршни рад II циклуса под називом "**Оптимално планирање и експлоатација пасивних компензатора у индустријској мрежи**", кандидаткиње Вање Китић, садржи све потребне елементе и резултате којима су остварени постављени циљеви истраживања, па са задовољством предлаже Научно-наставном вијећу Електротехничког факултета Универзитета у Бањој Луци да усвоји извјештај Комисије и одобри заказивање усмене јавне одбране.

Бања Лука, 5.12.2022. године


КОМИСИЈА



1. Проф. др Владимир Рисојевић, предсједник



2. Доц. др Алексеј Аврамовић, ментор



3. Проф. др Чедомир Зељковић, члан