



**UNIVERZITET CRNE GORE**  
**ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET PODGORICA**

BSc Veljko Đurković

**MODELOVANJE ELEKTRODISTRIBUTIVNOG KONZUMA U**  
**USLOVIMA RESTAURACIJE**  
**ELEKTROENERGETSKOG SISTEMA NAKON POTPUNOG RASPADA**

**MASTER RAD**

Podgorica, 2025. godina

## **PODACI I INFORMACIJE O STUDENTU**

Ime i prezime: Veljko Đurković

Datum i mjesto rođenja: 16.03.2001. godine, Podgorica, Crna Gora

Naziv završenog osnovnog studijskog programa i godina: Energetika i automatika, 2023. godina

## **INFORMACIJE O MASTER RADU**

Naziv master studija: Elektroenergetski sistemi

Naslov rada: Modelovanje elektrodistributivnog konzuma u uslovima restauracije elektroenergetskog sistema nakon potpunog raspada

## **UDK, OCJENA I ODBRANA MASTER RADA**

**Datum prijave master rada:** 13.06.2025. godine

**Datum sjednice Vijeća na kojoj je prihvaćena tema:** 03.07.2025. godine

### **Komisija za ocjenu/odbranu rada:**

1. Doc. dr Snežana Vujošević, predsjednik
2. Prof. dr Vladan Radulović, mentor
3. Doc. dr Vladan Đurković, član

### **Lektor:**

**Datum odbrane:** 24.12.2025.

**Datum promocije:**

## Izjava o autorstvu

Potpisani-a Veljko Đurković

Broj indeksa/upisa 15/23

### Izjavljujem

da je master rad pod nazivom

**"Modelovanje elektrodistributivnog konzuma u uslovima restauracije elektroenergetskog sistema nakon potpunog raspada"**

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada,
- da predloženi master rad ni u cjelini ni u djelovima nije bio predložen za dobijanje bilo koje diplome prema studijskim programima drugih ustanova visokog obrazovanja,
- da su rezultati korektno navedeni, i
- da nijesam povrijedio/la autorska i druga prava intelektualne svojine koja pripadaju trećim licima.

U Podgorici, 20.10.2025. godine

Potpis magistranda



---

## PREDGOVOR

Važnost master rada u kontekstu razvoja mladih profesionalaca često je zanemarivana, prije svega od strane samih studenata. Danas se pisanje master rada, sa izučavanjem literature i istraživanjima smatra vrlo napornim, posljednjim korakom do dobijanja prestižnog master zvanja. Pogled na master istraživanja kao na jednu dosadnu i napornu obavezu, u velikoj mjeri eliminiše mogućnost da mlada osoba-student na pravi način upozna sebe i odredi svoj budući pravac usavršavanja.

Pisanje ovog rada sam, upravo iz tog razloga, od starta posmatrao kao priliku da izgradim svoj lični stil istraživanja i učenja, kako bih isti primjenljivao za savladavanje budućih izazova. U izjavama o originalnosti i autentičnosti rada naglasak uglavnom bude na negiranju plagijarizma i akademske neetičnosti. Danas se suočavamo sa probojem alatki baziranih na vještačkoj inteligenciji (*engl. AI tools*). Ovi moćni alati mogu zaista biti od velike pomoći, ubrzavajući postupak prikupljanja literature, eliminisanja grešaka u kodu ili simulaciji. Ipak, alatka danas često postaje gospodar onoga koji je koristi, pa smo nažalost sve češći svjedoci negativnih posljedica tehnološkog razvoja po samu nauku, koja je taj razvoj omogućila.

Zato je upravo danas potrebno ne dozvoliti da potreba za brzim završetkom studija naruši integritet polaganja ispita, pisanja master ili seminarskog rada. Nalazimo se na prekretnici - ili će akademija kontrolisati tehnološki razvoj ili će tehnološki razvoj izazvati inflaciju akademskih rezultata. Čarls Proteus Štajnmetc (*engl. Charles Proteus Steinmetz*), njemačko-američki inženjer, rekao je:

„Zaista, najvažniji dio svakog inženjerskog rada – kao i svakog drugog naučnog rada – jeste određivanje metode kojom se „napada” problem, bilo da se radi o eksperimentalnom istraživanju ili teorijskom proračunu. Upravo izborom odgovarajuće metode napada složeni problemi se svode na jednostavne pojave, i tada se lako rješavaju.“

U ovim riječima vidim najveći benefit koji proces istraživanja na master studijama donosi mladom čovjeku. Još važnije, upravo ovaj citat jednog od najuticajnijih inženjera ukazuje na značaj kreativnosti čovjeka, a ta kreativnost dolazi do posebnog izražaja kod rješavanja naučnih, a svakako i praktičnih problema u inženjerstvu. I upravo je to ono što danas moramo sačuvati, ne dozvoljavajući našoj ljenosti da bude ispred našeg intelekta. Jer ne postoji taj alat, niti model vještačke inteligencije koji može nadmašiti širinu ljudskog uma.

Na kraju, želio bih da se zahvalim prof. dr Vladanu Raduloviću na mentorstvu, kao i na svim savjetima koje sam od njega dobio, a koje primjenjujem ne samo u kontekstu akademskog i profesionalnog razvoja, već i u svakodnevnom životu. Takođe, zahvaljujem se saradniku u nastavi, doktorandu Lazaru Šćekiću, na nesebičnoj pomoći i korisnim savjetima

tokom izrade ovog rada.

Posebnu zahvalnost dugujem svojim roditeljima i braći na neizmornoj podršci i razumijevanju. Uz podršku porodice, obrazovni put je neuporedivo lakši.

## SAŽETAK

Kao posljedica niza povezanih procesa, uključujući ubrzanu integraciju obnovljivih izvora energije, postepeno gašenje elektrana na fosilna goriva, kao i povećanje potrošnje i prekograničnih razmjena, očuvanje stabilnosti elektroenergetskog sistema predstavlja sve veći izazov. O tome svjedoči sve veći broj ozbiljnih incidenata, kao što je djelimični raspad elektroenergetskih sistema Španije i Portugala 28. aprila 2025. godine. S obzirom na izražene socio-ekonomske posljedice ovakvih događaja, glavni operativni cilj u slučaju potpunog raspada elektroenergetskog sistema jeste ponovno uspostavljanje napajanja u što kraćem roku. Iz tog razloga, sve veća pažnja stručne i akademske zajednice pridaje se studijama restauracije elektroenergetskih sistema.

Tokom procesa restauracije, naročito u njegovim prvim fazama, elektroenergetski sistem funkcioniše u izuzetno ranjivom režimu rada zbog ograničenih mogućnosti za regulaciju napona i učestanosti. U takvim uslovima, opseg stabilnog rada elektroenergetskog sistema u velikoj mjeri zavisi od karakteristika elektrodistributivnog konzuma. Stoga je adekvatno modelovanje elektrodistributivnog konzuma u studijama restauracije od presudnog značaja kako bi se skratilo vrijeme trajanja beznaponskog stanja i spriječila eventualna oštećenja elemenata elektroenergetskog sistema tokom procesa restauracije.

U literaturi je dostupan veliki broj različitih modela elektrodistributivnog konzuma za potrebe analiza stabilnosti elektroenergetskih sistema. Međutim, još uvijek ne postoji konsenzus po pitanju modela koji najbolje opisuje ponašanje konzuma prilikom restauracije elektroenergetskog sistema nakon potpunog raspada. U tom kontekstu, u ovom radu je predstavljen pregled postojećih modela elektrodistributivnog konzuma sa komparativnom analizom njihovih prednosti i mana.

Precizno sprovođenje studija restauracije zahtijeva određivanje parametara elektrodistributivnog konzuma, kao što je zavisnost aktivne i reaktivne snage konzuma od napona ili učestanosti. Za tu namjenu, ovom radu predložen je novi metod koji omogućava određivanje parametara konzuma na osnovu mjerenja njegovih karakterističnih veličina tokom velikih poremećaja. Predloženi metod je primijenjen za određivanje parametara različitih modela elektrodistributivnog konzuma u trafostanici Danilovgrad na osnovu mjerenja prikupljenih tokom prve faze testiranja restauracije crnogorskog elektroenergetskog sistema bez spoljašnjeg napajanja. Poređenjem odziva sistema sa različitim modelima konzuma, u ovom radu identifikovan je model koji najbolje opisuje ponašanje konzuma za vrijeme restauracije elektroenergetskog sistema. Dodatno, u radu je analiziran uticaj različitih modela elektrodistributivnog konzuma na prelazne procese tokom restauracije elektroenergetskog sistema.

**Ključne riječi:** elektroenergetski sistem, restauracija napajanja, model elektrodistributivnog konzuma, stabilnost sistema, parametri konzuma

## ABSTRACT

As a consequence of a series of interconnected processes, including the accelerated integration of renewable energy sources, the gradual shutdown of fossil-fuel power plants, as well as the increase in consumption and cross-border exchanges, maintaining the stability of the power system is becoming an ever-greater challenge. This is evidenced by the growing number of serious incidents, such as the partial collapse of the Spanish and Portuguese power systems on April 28, 2025. Given the pronounced socio-economic consequences of such events, the primary operational objective in the case of a complete blackout is to restore supply in the shortest possible time. For this reason, increasing attention from both the professional and academic communities is being devoted to studies of power system restoration.

During the restoration process—particularly in its initial stages—the power system operates in an extremely vulnerable mode due to limited capabilities for voltage and frequency regulation. Under such conditions, the range of stable operation of the power system largely depends on the characteristics of the distribution load. Therefore, adequate modeling of distribution load in restoration studies is of crucial importance in order to reduce blackout duration and prevent potential damage to power system elements during the restoration process.

The literature offers a wide variety of distribution load models for power system stability analyses. However, there is still no consensus on which model best describes load behavior during restoration following a complete blackout. In this context, this paper presents a review of existing distribution load models along with a comparative analysis of their advantages and disadvantages.

Accurate implementation of restoration studies requires the determination of distribution load parameters, such as the dependence of active and reactive power on voltage or frequency. For this purpose, this thesis proposes a new method that enables the determination of load parameters based on measurements of its characteristic quantities during major disturbances. The proposed method is applied to determine parameters of different distribution load models at the Daniloivgrad substation, based on measurements collected during the first stage of testing the restoration of the Montenegrin power system without external supply. By comparing system responses with different load models, the thesis identifies the model that best describes load behavior during power system restoration. In addition, the impact of different distribution load models on transient processes during restoration will also be analyzed.

**Keywords:** power system, supply restoration, distribution load model, system stability, load parameters

# Sadržaj

<b>1</b>	<b>UVOD</b>	1
<b>2</b>	<b>Restauracija elektroenergetskih sistema nakon potpunog raspada</b>	4
2.1	Izazovi i problemi tokom procesa restauracije	5
2.1.1	Naponski profil black-start ostrva	6
2.1.2	Fenomeni vezani za dinamiku potrošača	9
2.1.3	Međusobna zavisnost parametara sistema i opterećenja u potrošačkim čvorovima	12
<b>3</b>	<b>Modeli elektrodistributivnog konzuma u analizama stabilnosti elektroenergetskih sistema</b>	14
3.1	Statički modeli	14
3.2	Dinamički modeli	16
3.2.1	Modeli asinhronih motora	17
3.2.2	Adaptive Load i Exponential Recovery modeli	21
3.3	Predlog matematičkog modela potrošača za potrebe analize restauracije elektroenergetskog sistema	22
<b>4</b>	<b>Metode za određivanje parametara elektrodistributivnog konzuma</b>	25
4.1	Postojeći pristupi identifikaciji parametara elektrodistributivnog konzuma	25
4.2	Predloženi metod za određivanje parametara konzuma	26
4.2.1	Formulacija problema	26
4.2.2	Genetski algoritam	36
4.2.3	Particle Swarm Optimization (PSO)	36
4.2.4	Levenberg–Marquardt (LM) algoritam	38
4.2.5	Determinističke optimizacione metode — <code>fmincon</code>	39
<b>5</b>	<b>Odabir algoritma i optimizacija parametara različitih modela potrošača</b>	40
5.1	Izbor optimizacionog algoritma	43
5.2	Modifikovani kompozitni model (ER + $B_{cap}$ + veliki i mali motor)	50
5.3	<i>Exponential Recovery</i> (ER)	51
5.4	Adaptive Load (sa frekventnom zavisnošću)	52

---

5.5	Statički ZIP model . . . . .	53
5.6	ZIP model sa dodatkom motora trećeg reda (ZIP+motori) . . . . .	54
5.7	Komparativna analiza simuliranih karakteristika različitih modela potrošača u odnosu na mjerenja . . . . .	54
<b>6</b>	<b>Analiza uticaja modela elektrodistributivnog konzuma na frekvenciju i naponske prilike u mreži . . . . .</b>	<b>57</b>
6.1	Frekventni odzivi . . . . .	57
6.2	Naponski odzivi . . . . .	59
<b>7</b>	<b>Zaključak . . . . .</b>	<b>62</b>
<b>A</b>	<b>Prilog . . . . .</b>	<b>64</b>
A.1	Automatski regulator pobude (AVR) - šema i parametri . . . . .	64
A.2	Regulator turbine - šema i parametri . . . . .	64

# 1. UVOD

Savremeni elektroenergetski sistemi izloženi su brojnim promjenama, uključujući ubrzanu integraciju obnovljivih izvora energije, postepeno gašenje proizvodnih kapaciteta na fosilna goriva, povećanje i promjenu strukture konzuma, kao i povećanje prekograničnih razmjena usljed liberalizacije tržišta električne energije. U ovakvim uslovima, očuvanje stabilnosti elektroenergetskog sistema predstavlja sve veći izazov, o čemu svjedoči i povećan broj ozbiljnih incidenata.

Tokom prve tri decenije 21. vijeka desilo se više velikih raspada sistema (eng. *blackout*). Neki od značajnijih su:

- 14. avgust 2003. godine — veliki raspad na teritoriji SAD-a i Kanade, sa približno 50 miliona pogođenih korisnika i značajnim ekonomskim posljedicama [1].
- 21. jun 2024. godine — raspad na teritoriji Albanije, Bosne i Hercegovine i Hrvatske, sa gubitkom 2.214 GW proizvodnje u nekoliko minuta; restauracija je započela u 12:33 i završena oko 16h [2].
- 28. april 2025. godine — raspad elektroenergetskog sistema Španije i Portugala; restauracija je započela u 12:35 i trajala do 29. aprila (00:22 u Portugalu i 04:00 u Španiji) [3].

Iz ovih primjera jasno je da raspad sistema imaju ozbiljne tehničke i ekonomske posljedice te da je ponovno uspostavljanje napajanja neophodno obaviti što brže i uz minimalan rizik. Prema podacima Svjetske banke, godišnji gubici kompanija u zemljama sa niskim i srednjim prihodima usljed prekida napajanja iznose oko 82 milijarde američkih dolara [4]. Stoga je, u slučaju potpunog raspada elektroenergetskog sistema, od ključne važnosti minimizovati trajanje beznaponskog stanja i efikasno sprovesti proces restauracije.

Ponašanje sistema u uslovima ponovnog uspostavljanja napajanja je predmet studija restauracije elektroenergetskog sistema. Operatori prenosnog sistema (eng. *Transmission System Operator, TSO*) moraju biti pripremljeni za sigurno i brzo vraćanje sistema u normalan pogon, uz jasnu procjenu ograničenja i rizika tokom svakog koraka restauracije. Prema [5], „cilj restauracije je omogućiti da se elektroenergetski sistem vrati u normalno stanje sigurno i brzo, uz minimizaciju gubitaka i vremena potrebnog za povratak napajanja, kao i eliminisanje štetnog uticaja na društvo.”

U početnim fazama restauracije sistem je naročito „krhak” zbog manjka inercije (obrtne mase generatora) i smanjene robusnosti mreže u ostrvskom radu. Frekvencijski odziv zavisi od inercije i statičkog pojačanja, brzine odziva primarne regulacije turbina, frekventne zavisnosti potrošača, kao i veličine i dinamike svakog novog priključenja potrošača. Uključenje ili

isključenje potrošača od 50 MW tokom normalnog režima rada velikog elektroenergetskog sistema je gotovo neprimjetno. Međutim, tokom procesa restauracije, uključanje istog tog potrošača od 50 MW može izazvati veliki propad frekvencije i djelovanje podfrekventne zaštite. Ako su, pri tome, ranije uključeni dijelovi konzuma i sami opremljeni podfrekventnom zaštitom, njihovo istovremeno isključenje bi dovelo do velikog porasta frekvencije [6]. Ovakav slijed događaja značajno produžava restauraciju, povećavajući rizike i troškove, što dodatno naglašava značaj poznavanja prirode konzuma.

Imajući prethodno u vidu, jasno je da modelovanje konzuma bitno utiče na validnost studija restauracije elektroenergetskog sistema nakon potpunog raspada. U ovom radu je zato predstavljen pregled postojećih statičkih i dinamičkih modela konzuma, sa posebnim osvrtom na njihovu primjenjivost u studijama restauracije. Uz to, dat je pregled metoda za određivanje parametara konzuma na osnovu mjernih podataka prikupljenih pomoću SCADA i WAMS sistema. Nakon sprovedene komparativne analize postojećih pristupa, u radu se predlaže novi model elektrodistributivnog konzuma, kao i novi postupak identifikacije parametara na osnovu mjerenja. Predloženi pristup primijenjen je za određivanje parametara različitih modela konzuma u TS 110/35 kV Danilovgrad, koristeći mjerne podatke sa SCADA sistema prilikom testiranja prve faze restauracije sistema nakon potpunog raspada.

Ostatak rada je strukturiran na sljedeći način:

- U drugom poglavlju predstavljene su osnovne strategije restauracije (top-down i bottom-up) i obrazloženo opredjeljenje za bottom-up u uslovima potpunog raspada, razmotreni su zahtjevi za generatore sa sposobnošću black-starta, a zatim su sistematizovani ključni fenomeni koji utiču na stabilnost u ranim fazama restauracije (naponski profil ostrva, prenaponi/podnaponi, ferorezonansa i struje zalijetanja motora) te analizirana međuzavisnost napona, frekvencije i aktivne/reaktivne snage u potrošačkim čvorovima.
- U trećem poglavlju dat je pregled najzastupljenijih modela potrošača koji se koriste u studijama stabilnosti elektroenergetskog sistema. Definisana je podjela modela na statičke i dinamičke, a pregledom literature utvrđeno je da dinamički modeli sa većom tačnošću opisuju ponašanje potrošača u ostrvskim sistemima, kakav je elektroenergetski sistem tokom bottom-up restauracije. Na kraju, dat je predlog novog matematičkog modela potrošača za potrebe studija restauracije elektroenergetskog sistema.
- U četvrtom poglavlju formulisana je funkcija cilja (eng. *objective function*) i postupak pripreme SCADA podataka, predstavljen skup optimizacionih parametara predloženog modela potrošača, uvedena  $\rho$ -transformacija kojom se implicitno uvažava nelinearno ograničenje modela asinhronog motora trećeg reda, te opisani penali optimizacionog postupka (faktor snage i klizanje motora, divergencija).
- U petom poglavlju obrazložen je izbor optimizacionog algoritma i sprovedena uporedna analiza PSO, GA, LM i `fmincon` na ZIP i kompozitnim modelima uz SCADA mjerenja;

razmotren je kompromis bias–varijansa i pokazano da PSO daje najmanju grešku uz dobro vrijeme i stabilnost, pa je usvojen za identifikaciju parametara različitih modela potrošača.

- U šestom poglavlju prikazana je analiza uticaja različitih modela elektrodistributivnog konzuma na frekvenciju i naponske prilike u mreži tokom restauracije. Ocijenjena je saglasnost simuliranih i mjerenih odziva, te analizirani uzroci razlika u stepenu propada frekvencije za pojedine modele.
- U Zaključku su sumirani ključni rezultati i doprinosi rada, uz date preporuke za buduća istraživanja. Kao adekvatan model izabran je onaj koji daje najpesimističniji scenario - najveći propad frekvencije - čime se omogućava sigurnije planiranje postupka restauracije i izbjegavanje neželjenog djelovanja zaštita.

## 2. RESTAURACIJA ELEKTROENERGETSKIH SISTEMA NAKON POTPUNOG RASPADA

Kao što je u Uvodu rečeno, restauracija elektroenergetskog sistema poprima sve veći značaj u posljednjih nekoliko decenija. Zbog toga je, od ključnog značaja, posjedovati adekvatnu strategiju, odnosno plan, za sprovođenje iste. Plan, odnosno strategija restauracije sistema, neophodna je zbog očuvanja bezbjednosti ljudi i izbjegavanje bilo kakvog novog kolapsa elektroenergetskog sistema, koji u datim uslovima nije robustan kao obično [7].

Strategije obnove napajanja na području pogođenom raspadom, mogu se klasifikovati u dva osnovna tipa: *top-down* i *bottom-up* [8]. *Top-down* (prevedeno kao „od gore prema dolje”) je strategija prema kojoj vraćanje pogođenog dijela sistema u pogon kreće od okolnog „zdravog” dijela mreže, pri čemu se postepenim uključivanjem dalekovoda, smanjuje beznaponsko područje. *Top-down* strategija, obično se koristi za obnovu napajanja manjih sistema, bez dugaćkih visokonaponskih vodova, u sistemima sa visokom sposobnošću apsorpcije reaktivne snage, kao i tamo gdje je većina potrošača skoncentrisana na jednom području. Takođe, ova strategija korisna je tamo gdje se dogodio djelimični blackout, pa se napajanje brzo može vratiti preko susjednih djelova mreže [6]. Sa druge strane, *bottom-up* (prevedeno kao „od dolje prema gore”) predstavlja strategiju prema kojoj vraćanje sistema u pogon kreće od *generatora sa sposobnošću black-starta*, opremljenim pomoćnim sistemom napajanja (obično dizel-agregatima). Postepenim uključanjem okolnih prenosnih vodova i djelova konzuma, formiraju se mali podsistemi, koji se na kraju sinhronizuju, sjedinjavajući se, na kraju, u jedinstveni sistem, a potom spajaju sa okolnom mrežom.

Ova teza bavi se upravo modelovanjem ponašanja elektrodistributivnog konzuma u početnoj etapi *bottom-up* strategije. *Bottom-up* je praktično jedini način za vraćanje sistema u pogon u slučaju potpunog raspada elektroenergetskog sistema. S obzirom na njihovu važnost, generatori sa sposobnošću *black starta* moraju zadovoljiti određene kriterijume, uključujući:

- Elektrana mora posjedovati rezervni agregat ili alternativni izvor napajanja (baterijski sistem sa invertorom), kako bi se obezbijedilo rezervno napajanje elektrane i sistema pobude.
- Za stabilan proces restauracije, početna konfiguracija, koja se sastoji od jedne ili više mašina u paralelnom radu, mora stabilno funkcionisati u praznom hodu, prije uključjenja prvih potrošača.
- Odnos obrtne energije prema naznačenoj brzini obrtanja definiše gradijent frekvencije prilikom uključjenja potrošača. Pad frekvencije mora biti kompenzovan od starne primarnih turbinskih regulatora. S toga, brzina primarne turbinske regulacije, ključan je

parametar za black-start generatore [9].

## 2.1 Izazovi i problemi tokom procesa restauracije

U prvim etapama uspostavljanja rada EES-a, javlja se niz fenomena nekarakterističnih za normalni radni režim. Razlog tome je znatno smanjena robustnost sistema, koji se nalazi u ostrvskom režimu rada i kao takav ne posjeduje dovoljno inercije koja bi ublažila oscilacije frekvencije i napona. U literaturi postoji više pristupa klasifikaciji fenomena tokom procesa restauracije. Prema vremenskim konstantama, ovi fenomeni se mogu podijeliti na vrlo brze, brze i spore fenomene, što je detaljno opisano u [6]. Međutim, u ovom radu odabrana je podjela na brze i spore fenomene zbog njene praktičnosti u analizi i jasnijeg fokusiranja na najvažnije izazove u inicijalnim fazama restauracije.

Brzim fenomenima pripada pojava tzv. „*inrush*” struja transformatora, praćenih visokom amplitudom i višim harmonicima, kao i struja zalijetanja motora (trajanja do 10 sekundi). Amplituda početne struje neopterećenog transformatora može biti od 10-20 puta veća od nominalne, a amplituda početne struje motora oko 6-10 puta veća od nominalne.

U spore fenomene ubrajaju se povećane struje usled gubitka nasumičnosti potrošača ("*Load Diversity*"). Naime, termostatski kontrolisani uredaji (klima uredaji, bojleri i sl.), usljed pada (ili porasta - kod klima uređaja ljeti) temperature izazvanog gubitkom napajanja, startuju punom snagom istovremeno, tako da njihov faktor jednovremenosti  $j$ , teži jedinici. Ovo povećano opterećenje traje sve dok se ne povraća stohastička priroda potrošača, karakteristična za normalne radne režime [10].

Ono što je zajedničko za sve ove fenomene su visoke struje koje ih prate. Drugim riječima, u trenutku uključivanja energetskog transformatora ili potrošača, javlja se povećana potražnja za aktivnom, odnosno reaktivnom snagom. Kako su promjene aktivne i reaktivne snage direktno vezane za vremenske promjene frekvencije i napona, jasno je da je u slučaju nedovoljno precizne procjene odziva potrošača validnost studije restauracije dovedena u pitanje. S toga je veoma važno odrediti vrijednosti parametara koje utiču na promjene frekvencije i napona u vremenu, kako bi se izbjeglo produženje trajanja beznaponskog stanja ili, u najgorem slučaju, nemogućnost restauracije sistema. Različiti matematički modeli potrošača, upotrebljavani u analizama stabilnosti EES-a, uključuju drugačije parametre, dajući drugačije funkcije promjene napona i frekvencije u vremenu. Iz tog razloga, neće svi modeli potrošača na podjednako dobar način kvantifikovati pojave koji se javljaju tokom procesa restauracije. Kako bi se stvorila slika o tim pojavama, u nastavku su dati oni najvažniji, sa najvećim uticajem na stabilnost restauracionog postupka.

## 2.1.1 Naponski profil black-start ostrva

### Podnaponi i prenaponi

Tokom uključivanja dalekovoda na black-start generatorsku konfiguraciju, javljaju se visoke kapacitivne struje, koje posebno dolaze do izražaja kod dugih dalekovoda. U ovom, podopterećenom režimu rada, dalekovodi se ponašaju kao proizvođači reaktivne snage. Ovakvo stanje rezultuje naponskim profilom u kom dominiraju vrijednosti napona veće od nominalnih. Kod uključivanja dalekovoda tokom black-starta, poželjno je da postoji dovoljan broj reaktivnih resursa u sistemu, kako bi se absorbovala reaktivna snaga koja potiče od slabo opterećenih prenosnih vodova [6]. Visoke kapacitivne struje mogu rezultirati nedozvoljenim povećanjem napona u mreži, koji mogu oštetiti elemente sistema ili znatno smanjiti njihov životni vijek. Dakle, balans reaktivne snage u mreži, ključan je za očuvanje napona u nominalnom radnom opsegu [11].

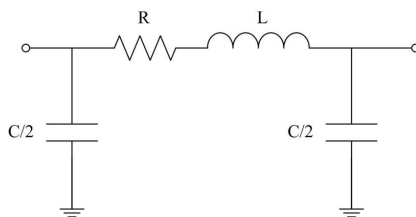
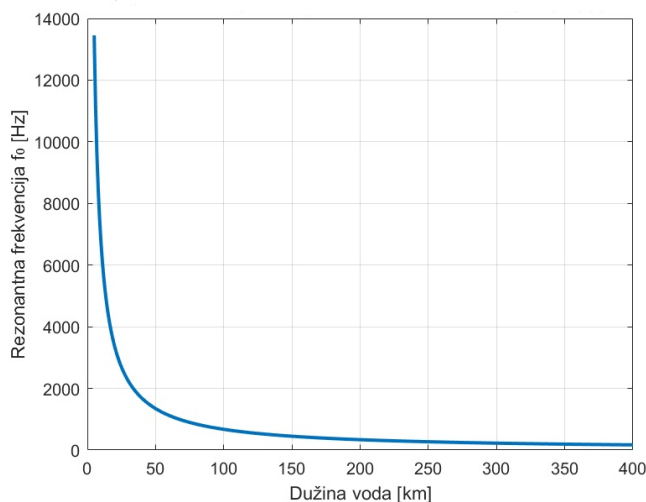
Sa druge strane, nakon uključivanja potrošača, postoji rizik od pojave niskih napona u mreži. Ti niski naponi mogu imati ozbiljne posljedice, izazivajući pregrijavanje motora i neispravan rad nekih potrošača. Takođe, ako se napon spusti na 70-90% nominalne vrijednosti, doći će do reagovanja podnaponskih releja.

Ferantijev efekat još jedan je uzrok moguće pojave prenapona tokom procesa restauracije. Ovaj efekat izražen je kod dugačkih i veoma dugačkih prenosnih vodova, pa se dužina dalekovoda mora uzeti u obzir u cilju izbjegavanja Ferantijevog prenapona. Po definiciji, Ferantijev efekat je pojava kada je napon na kraju dugog, neopterećenog, odnosno podopterećenog voda viši nego na njegovom početku. Vrijednost napona, proporcionalna je kvadratu dužine voda [12]:

$$\Delta V \propto l^2$$

### Ferorezonansa

Rečeno je da uključenje transformatora u praznom hodu izaziva pojavu kratkotrajnih, tzv. „inrush” struja. Amplituda inrush struje zavisi od trenutnog faznog ugla napona prilikom uključivanja transformatora i može biti veća čak i do dvadeset puta od naznačene [13]. Druga važna odlika inrush struje je njen talasni oblik. Ona sadrži eksponencijalnu, jednosmjernu komponentu struje, kao i više harmonike. Sadržaj jednosmjerne komponente u potpunosti je određen trenutnim faznim uglom napona prilikom uključivanja transformatora. Pri povoljnom trenutku uključivanja, kada je trenutna vrijednost napona jednaka amplitudnoj, jednosmjerna struja će biti minimalna, a time i značajno umanjena ukupna amplituda inrush struje. To se danas postiže primjenom uređaja za sinhroni (kontrolisani) uklop [14]. Viši harmonici, sa druge strane, predstavljaju problem zbog mogućnosti da se poklope sa rezonantnom frekvencijom mreže, čime nastaje - ferorezonansa [15]. Transformator u praznom hodu se tada ponaša kao generator struje viših harmonika.

Slika 2.1: Prikaz  $\pi$ -modela prenosnog voda

Slika 2.2: Vrijednost rezonantne frekvencije za različite dužine dalekovoda

Posmatrajmo primjer  $\pi$  šeme dalekovoda: Posmatrano sa ulazne strane (uz zanemaren aktivni otpor), ekvivalentna impedansa je:

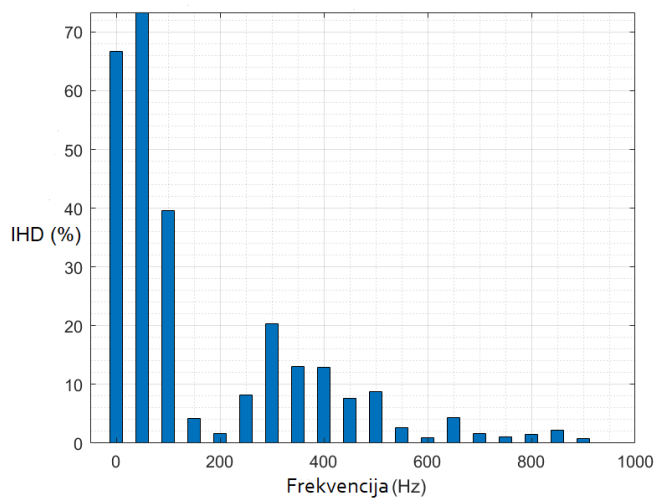
$$\underline{Z}_{in} = \left( \frac{1}{j\omega \frac{C}{2}} \parallel \left( j\omega L + \frac{1}{j\omega \frac{C}{2}} \right) \right)$$

Neka je dat vod dužine  $310\text{km}$ , induktivnosti  $1.4\text{mH}/\text{km}$  i kapacitivnosti  $8.9\text{nF}$ . Iz izraza za ulaznu impedansu, uz uslov da je imaginarni dio jednak nuli, dobija se rezonantna frekvencija:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\ell} \cdot \sqrt{\frac{2}{LC}} = 307.59\text{Hz}$$

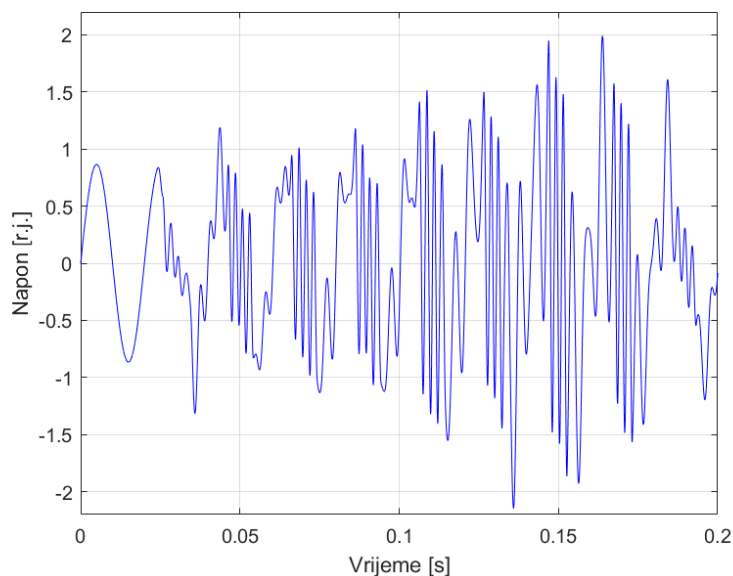
Zaključujemo da je rezonantna frekvencija, obrnuto proporcionalna dužini dalekovoda, tj. što je veća dužina dalekovoda, rezonantna učestanost će mu biti manja. Za ranije pomenute parametre, rezonansa iznosi  $307.59\text{ Hz}$ . To je gotovo jednako vrijednosti 6-tog harmonika osnovne učestanosti od  $50\text{ Hz}$ . U programskom paketu MATLAB/Simulink, posmatran je slučaj jednostavnog sistema koji se sastoji od mrežnog ekvivalentna, dalekovoda predstavljenog pi šemom, sa gore pomenutim parametrima, kao i transformatora. U modelu je uveden mrežni ekvivalent, umjesto generatora, kako bi simulacija bila manje zahtjevna za računar. Transformator se uključuje u vremenu  $t = 0.02\text{s}$ . Na Slici 2.3 prikazan je harmonijski spektar

inrush struje transformatora. Očekivano, drugi harmonik je dominantan, a vidi se i znatan sadržaj 6-tog harmonika - čak 20 %.



Slika 2.3: Sadržaj harmonika u inrush struji transformatora

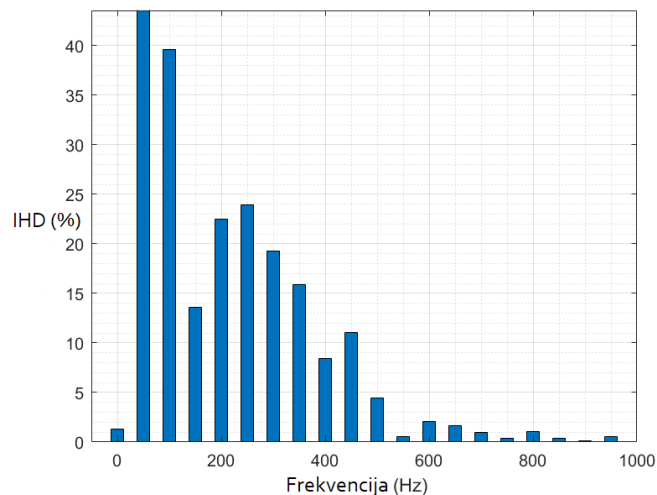
Na Slici 2.4, prikazan je talasni oblik napona faze A u odnosu na zemlju, na kraju dalekovoda 110 kV, sa strane primara transformatora 110/35 kV, 80 MVA u Simulink simulacionom modelu. Vidi se da amplituda napona postiže i preko 2 puta veće vrijednosti od nazivnog napona dalekovoda!



Slika 2.4: Napon faze A na dalekovodu 110 kV - amplituda je u pojedinim trenucima i preko 2 puta veća od nazivne

Radi analize, na Slici 2.5 prikazan je harmonijski spektar napona. Primjetno je da je, zbog rezonanse dalekovoda na frekvenciji 307.59 Hz, sadržaj 6-tog harmonika, kao i harmonika

oko njega, sada značajno izraženiji nego u inrush struji transformatora. Drugim riječima, dalekovod ima ulogu pojačavača rezonantnog harmonika, a tako i njemu bliskih, dok pri- gušuje sve ostale. Podsjećanja radi, dužina dalekovoda je 310 km. Zaključak je da se mora voditi računa o dužini dalekovoda, kako bi se izbjegla rezonansa u domenu glavnih viših harmonika inrush struje. Ferorezonantni prenaponi koji se mogu pojaviti, pored oštećenja vrijedne energetske opreme, doveli bi do djelovanja zaštite i isključenja, što bi ugrozilo cio postupak restauracije elektroenergetskog sistema [15].



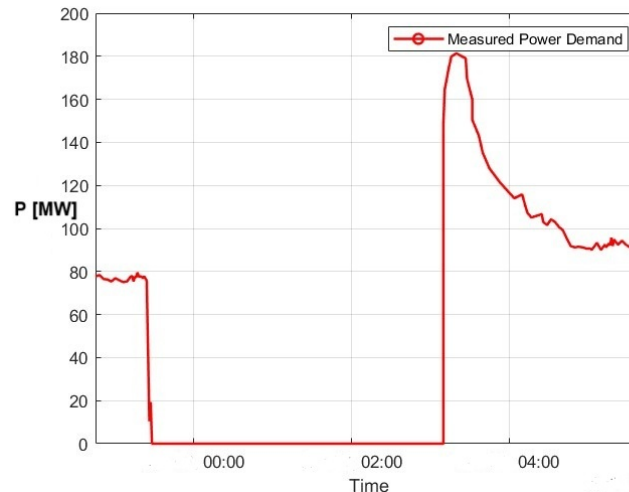
Slika 2.5: Sadržaj harmonika u naponu faze A na dalekovodu

## 2.1.2 Fenomeni vezani za dinamiku potrošača

### Cold Load Pickup

Dok su prenaponi izazvani kapacitivnim strujama vodova i ferorezonansom vezani za mrežne elemente, tokom black-start procesa, dolaze do izražaja i fenomeni koji su direktno vezani za prirodu potrošača. Posebno važno za uspješan restauracioni postupak je razumijevanje tzv. *Cold Load Pickup (CLPU)* fenomena.

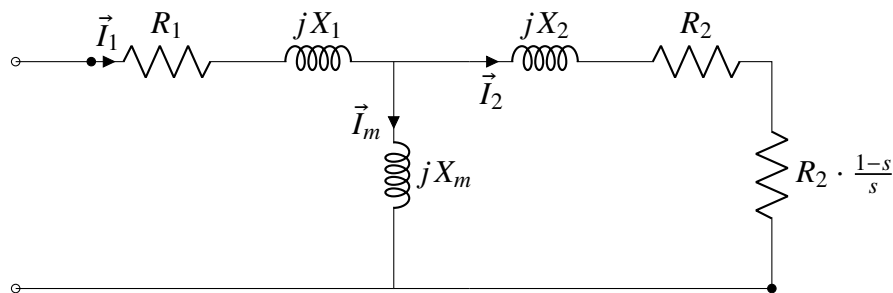
Ova pojava vezana je direktno za termičke potrošače, odnosno termostatski-upravljanje uređaja. Distributivni izvodi sa visokim koncentracijama potrošača poput klima-uređaja i bojlera, mogu izazvati ozbiljnu CLPU struju, što za posljedicu ima preopterećenje i visoke padove napona pa i oštećenja mrežnih elemenata, posebno distributivnih transformatora [16]. CLPU može trajati od nekoliko minuta do nekoliko sati, zavisno od dužine prekida i vrste opterećenja. U pojedinim izvorima CLPU (Cold Load Pickup) se definiše isključivo kao posljedica ponovnog uključenja termičkih potrošača, dok se u drugim radovima ovaj pojam proširuje i na pojave poput struje motora i inrush struja transformatora., Tako je u [17], Cold Load Pickup kategorisan u četiri faze:



Slika 2.6: Primjer CLPU opterećenja [19]

- Struje magnećenja transformatora i uključenja rasvjete. Struja u ovoj fazi može biti 10-15 puta veća od nazivne, sa trajanjem od nekoliko perioda.
- U drugoj fazi, do izražaja dolaze početne struje motora, sa amplitudama od oko 6 puta većim od nominalne, u trajanju od oko 1 sekunde.
- U trećoj fazi, zalijetanje motora održava relativno visoku struju, koja traje oko 15 sekundi.
- Četvrta, finalna faza, potiče od gubitka raznovrsnosti termostatski-kontrolisanih potrošača, koji usljed odstupanja temperature tokom beznaponske pauze, startuju sa radom istovremeno sve dok se stohastička priroda ovih potrošača ponovo ne uspostavi. Dužina trajanja zavisi od različitih faktora, kao što su vremenske prilike, obrasci upotrebe potrošača i trajanja prekida napajanja. Ova faza može trajati od jednog do nekoliko časova. Struja opterećenja u ovoj dugotrajnoj fazi može biti od 2 do 5 puta veća od diversifikovane vrijednosti opterećenja.

Zaključak je da se četvrta faza izdvaja, kako dužinom trajanja, tako i uzrocima povećanog opterećenja. Efekti koji se javljaju u prve tri faze, poput struja magnećenja transformatora i zalijetanja motora, čisto su električne prirode. Sa druge strane, opterećenje termostatski-kontrolisanih uređaja zavisi od velikog broja neelektričnih parametara, poput vremenskih uslova i spoljne temperature vazduha, dužine trajanja prekida napajanja, obrazaca potrošnje i izolacija stambenih i poslovnih objekata. Zbog svoje veoma specifične prirode, u ovom radu se pod terminom Cold Load Pickup podrazumijeva isključivo period visokog opterećenja izazvan gubitkom diversifikacije termostatski-kontrolisanih potrošača, kao što je navedeno u [18].

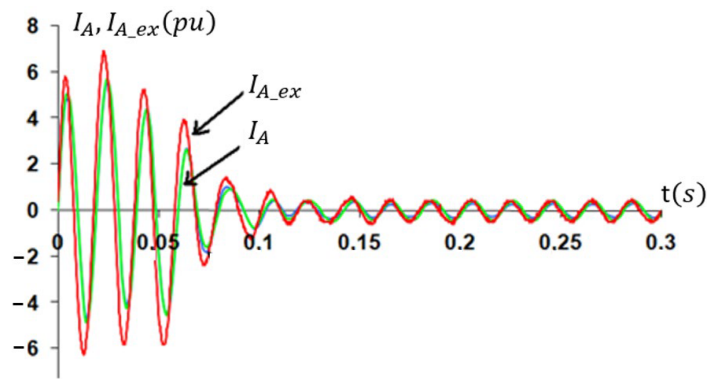


Slika 2.7: Ekvivalentna šema asinhronog motora sa klizanjem

### Struja zalijetanja motora

Početna struja zalijetanja kod asinhronog (indukcionog) motora označava kratkotrajni visok udar struje koji motor povuče pri samom uključanju na mrežu. Ova struja može dostići višestruko veću vrijednost od nominalne struje motora – tipično oko 5–8 puta veću, a u nekim slučajevima čak i do 10 puta veću od punog opterećenja [20], [21]. Ove visoke struje mogu dovesti do pada napona u mreži tokom black-start postupka, izazvati proradu zaštita i termička naprezanja. Posmatrajući Sliku 2.7, može se doći do zaključka zašto uopšte

nastaje visoka struja zalijetanja asinhronog motora. Prilikom uključanja motora na mrežu, on se nalazi u fazi mirovanja. Kroz stator teče, pretežno induktivna, struja magnetisanja, koja stvara početno magnetno polje, mrežne frekvencije, koje indukuje elektromotornu silu u rotoru. Kako se klizanje definiše kao  $\frac{n_s - n_r}{n_s}$ , pri čemu je  $n_s$  brzina statora, a  $n_r$  brzina rotora, to slijedi da će klizanje biti  $s = 1$ . Ovo dalje znači da će otpornost grane rotora biti jednaka 0, što se može smatrati praktično kratkim spojem, usljed veoma malih vrijednosti redne impedanse  $Z_r = R_2 + jX_2$ . Ova početna struja, pretežno je induktivna, predstavljajući struju uspostavljanja polja. Već u narednom trenutku, rotor počinje da se ubrzava, smanjujući klizanje, pri čemu se postepeno smanjuje i struja rotora. Kako se rotor zalijeće, tako se i faktor snage, u početku induktivnog karaktera ( $\cos \varphi = 0$ ), sve više povećava, smanjujući potražnju za reaktivnom snagom [20]. Osim reaktivne snage za uspostavljanje početnog polja, samo zalijetanje motora stvara veliku potrebu za aktivnom snagom.



Slika 2.8: Struja zalijetanja motora iz [20]: crvena - iz eksperimenta, zelena - modelovana pomoću ekvivalentne šeme

I dok sama amplituda prvog strujnog udara motora zavisi od tipa motora i napona (ne od tereta, jer je rotor u startu miran), opterećenje na osovini motora značajno utiče na trajanje perioda visoke struje. Ako motor pokreće težak pogon sa velikim momentom inercije ili visokim otporom opterećenja (kompresor, pumpa, veliki ventilator), trebaće mu veliko vrijeme da se ubrza, što znači - duže trajanje visoke struje [22]. U uslovima restauracije, gdje visoko opterećenje ima veliki uticaj na propade napona i frekvencije, od značaja su oba parametra - amplituda struje zalijetanja i njeno trajanje.

Početna struja proporcionalna je naponu napajanja motora. Motor priključen na veći napon povući će veću struju (odnosno snagu) nego motor na manjem naponu. U normalnim uslovima rada, napon na ulazu motora može se smatrati konstantnim i u radnom opsegu. Međutim, u uslovima restauracije, a pogotovo u njenoj početnoj fazi, ovo nije slučaj. Usljed već pomenutog manjka robusnosti sistema, svaki, pa i najmanji poremećaj ili promjena konfiguracije imaće značajno veći uticaj na naponske prilike u mreži. Zbog toga je nekorektno posmatrati napon kao konstantan parametar ili uvoditi mrežni ekvivalent (tzv. *jaka mreža*) u studijama restauracije. U slaboj mreži, veliki motor može uzrokovati pad napona, što paradoksalno može čak i smanjiti vršnu struju što uzrokuje duže vrijeme zaleta i probleme u sistemu [20].

### 2.1.3 Međusobna zavisnost parametara sistema i opterećenja u potrošačkim čvorovima

Svi naprijed nabrojani fenomeni mogu narušiti stabilnost black-start procesa. I dok su prenaponi gotovo uvijek vezani za komutacije mrežnih elemenata, prije svega prenosnih vodova i transformatora, promjene frekvencije, padovi napona i preopterećenje vezani su za dinamiku potrošača. Obratno, dinamika potrošača zavisice kako od napona u potrošačkom čvoru, tako i od mrežne frekvencije.

Unutar black-start ostrva, kako su ranije nazvani ostrvski podsistemi u bottom-up strategiji restauracije, međusobna zavisnost parametara sistema (napon i frekvencija) i aktivne i reak-

tivne snage, značajno je izraženija nego u normalnom radnom režimu, što će biti dokazano kroz simulacije u poglavlju 6. Takođe, pojam „*jaka mreža*”, koji u studijama poput tokova snaga i kratkih spojeva predstavlja čvorove u sistemu u kojima se napon može smatrati konstantnim, u ostrvskom režimu rada ne postoji. Svaka promjena u mrežnoj konfiguraciji i uključenje potrošača, dovešće do oscilovanja napona u svim čvorovima. Te oscilacije, kao i oscilacije frekvencije imaće nesumnjiv uticaj na odzive aktivne i reaktivne snage potrošača. U narednom poglavlju, biće data komparativna analiza matematičkih modela potrošača, upotrebljivanih u studijama stabilnosti, koji na različite načine modeluju zavisnosti aktivne i reaktivne snage od parametara sistema.

### **3. MODELI ELEKTRODISTRIBUTIVNOG KONZUMA U ANALIZAMA STABILNOSTI ELEKTROENERGETSKIH SISTEMA**

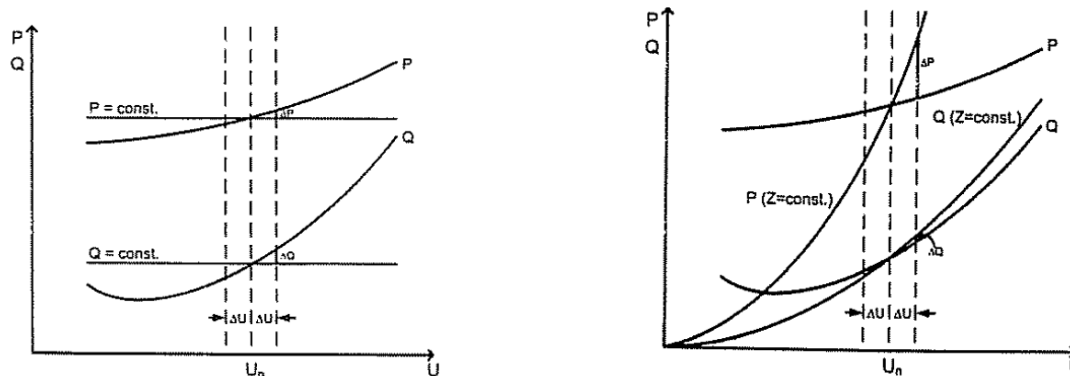
Za potrebe restauracije elektroenergetskog konzuma, gdje se prilikom komutacija javljaju veoma izraženi tranzijenti, prirodno je koristiti matematičke modele potrošača koji se koriste za analizu tranzijentne stabilnosti. Prema [23], model potrošača definisan je kao matematički prikaz koji predstavlja odnos između izmjerenog napona/frekvencije u potrošačkom čvoru i aktivne/reaktivne snage koju troši konzum u tom čvoru.

U literaturi postoji mnogo modela koji se mogu podijeliti u dvije grupe: statički i dinamički modeli. Statički modeli svoju primjenu su našli u proračunima koji se odnose na rad sistema u normalnom režimu, poput tokova snaga. Ipak, za veće promjene parametara sistema, pojedini statički modeli loše modeluju promjenu aktivne i reaktivne snage. Kao primjer, naveden je model konstantne snage, koji posjeduje manju tačnost od modela konstantne struje i konstantne impedanse [24]. Iz Slike 3.1 može se zaključiti važnost odabira adekvatnog matematičkog modela potrošača shodno prirodi pojava koje se analiziraju. U [25] je predstavljen uporedni prikaz tačnosti primjene statičkih i dinamičkih modela potrošača za potrebe studija tranzijentne stabilnosti. Rezultati jasno ukazuju na to da statički modeli tačnije modeluju ponašanje i prirodu potrošača kod velikih, interkonektovanih elektroenergetskih sistema, dok se kod analiza ostrvskih sistema znatno vjerodostojniji rezultati dobijaju upotrebom dinamičkih modela.

Sa druge strane, napredni dinamički modeli zahtjevniji su po pitanju memorije i vremena izvršavanja simulacija. Takođe, za definisanje modela potrebno je mnogo više ulaznih parametara. U [26] je predstavljen osvrt na zastupljenost najvažnijih modela potrošača kod različitih vrsta studija elektroenergetskog sistema. Statistika pokazuje da se za potrebe studija stabilnosti, u Evropi samo u 24 % slučajeva koriste dinamički modeli, dok je taj procenat u Americi 43 %.

#### **3.1 Statički modeli**

Kao najznačajniji statički modeli potrošača izdvajaju se: model konstantne snage, konstantne struje, konstantne impedanse, kao i njihove polinomijalne kombinacije (ZIP modeli). U literaturi se vrlo često koriste i eksponencijalni modeli. Iako je prije rečeno da ovi modeli ne daju precizne rezultate za ostrvske sisteme [25], kakvi su upravo elektroenergetski sistemi tokom postupka restauracije, zbog njihove velike zastupljenosti, u nastavku je dat pregled onih najvažnijih - ZIP i raznih eksponencijalnih modela.



Slika 3.1: Odstupanja modela konstantne snage i impedanse kod promjena napona: odstupanja fiktivnih od stvarnih karakteristika pri većim odstupanjima napona od nominalne vrijednosti znatno manje kod modela konstantne impedanse [24]

### ZIP modeli

ZIP model je model potrošača koji u sebi uključuje model konstantne impedanse, konstantne struje i konstantne snage u različitim postotcima. Matematički se definiše na sljedeći način:

$$P = P_n \left[ p_1 \left( \frac{U}{U_n} \right)^2 + p_2 \left( \frac{U}{U_n} \right) + p_3 \right] (1 + k_p \Delta f), \quad (3.1)$$

$$p_1 + p_2 + p_3 = 1$$

$$Q = Q_n \left[ q_1 \left( \frac{U}{U_n} \right)^2 + q_2 \left( \frac{U}{U_n} \right) + q_3 \right] (1 + k_q \Delta f), \quad (3.2)$$

$$q_1 + q_2 + q_3 = 1$$

Dakle, za slučaj  $p_2, p_3, q_2, q_3 = 0$ , polinom se svodi na model konstantne impedanse. Analogno, za  $p_1, p_2, q_1, q_2 = 0$  i  $p_1, p_3, q_1, q_3 = 0$  dobijaju se modeli konstantne snage i konstantne struje. Zbog toga se ovaj ZIP model naziva još i polinomijalni. Koeficijenti  $k_p$  i  $k_q$  definišu osjetljivosti aktivne i reaktivne snage na promjene frekvencije. U interkonektivnim, velikim elektroenergetskim sistemima, promjene frekvencije su značajno manje izražene nego promjene napona, pa se frekventna zavisnost može zanemariti [27]. To, naravno, nije slučaj kod restauracije EES-a, gdje je zbog manjka inercije i obrtne mase generatora, frekvencija podložna velikim oscilacijama. Zbog toga će se koeficijent osjetljivosti na promjenu frekvencije u modelima upotrebljavanim za određivanje parametara elektrodistributivnog konzuma na osnovu mjerenja, u ovom radu uvijek uvažiti.

## Eksponecijalni modeli

Dok su kod ZIP modela eksponenti polinoma unaprijed definisani, kod eksponencijalnih modela potrošača, osjetljivost aktivne i reaktivne snage na promjenu vrijednosti napona i frekvencije u čvoru može se proizvoljno definisati. Zbog toga su eksponencijalni modeli vrlo često upotrebljavani u raznim studijama elektroenergetskog sistema. Opšti matematički zapis je:

$$P = P_n \left( \frac{U}{U_n} \right)^{k_p} \left( \frac{f_e}{f_n} \right)^{k_{pf}} \quad (3.3)$$

$$Q = Q_n \left( \frac{U}{U_n} \right)^{k_q} \left( \frac{f_e}{f_n} \right)^{k_{qf}} \quad (3.4)$$

Slično ZIP modelu, iz eksponencijalnog modela mogu se takođe izvesti modeli konstantne snage ( $k_p, k_q = 0$ ), konstantne struje ( $k_p, k_q = 1$ ) i konstantne impedanse ( $k_p, k_q = 2$ ). U radu [28], analiziran je uticaj različitih eksponencijalnih i ZIP modela na razne studije stabilnosti elektroenergetskog sistema. Proračuni su pokazali, da sa aspekta studija stabilnosti, za koeficijente koji daju model konstantne snage ili njemu bliske modele, javlja se najgori slučaj za stabilnost – dobija se najviše odstupanje rotorskih uglova i najviše nestabilnih ishoda. Sa druge strane, model konstantne impedanse djeluje najpovoljnije po ugaonu stabilnost. Konkretno, za CP model (eksponencijalni model sa  $k_p = k_q = 0$ ) oko 70% ispitivanih kratkih spojeva dovelo je do nestabilnosti, dok je za CZ model ( $k_p = k_q = 2$ ) taj procenat smanjen na svega 15%. Razlog tome je što, upotrebom modela konstantne snage, pri smanjenju napona dolazi do povećanja struje, odnosno opterećenja po generatore i ubrzavanja rotora. Model konstantne impedanse, za slučaj propada napona redukuje potrošnju, pomažući time očuvanje stabilnosti sistema. Koeficijenti  $k_{pf}$  i  $k_{qf}$  nisu imali veliki uticaj na ugaonu stabilnost u proračunima.

Rad se osvrće i na uticaj pomenutih modela na frekventnu stabilnost sistema. Povećavanje koeficijenata  $k_p$  i  $k_q$  ima pozitivan efekat na frekventnu stabilnost, slično kao što model konstantne impedanse pozitivno djeluje na ugaonu stabilnost. Slično, za  $k_{pf}$  i  $k_{qf}$  zabilježeno da veće vrijednosti ovih koeficijenata daju manji pad frekvencije i manji konačni frekventni *offset* nakon poremećaja.

## 3.2 Dinamički modeli

Cilj upotrebe dinamičkog modela potrošača jeste da bolje opiše prelazne procese koji se javljaju tokom poremećaja i promjene mrežne konfiguracije. Ako su statički modeli relativno tačni u uskom opsegu koji obuhvata granice napona i frekvencije u normalnim uslovima, dinamički modeli bi trebalo pružiti zadovoljavajuću tačnost u znatno širem opsegu. U nastavku,

biće opisani neki od najzastupljenijih dinamičkih modela potrošača, korišćenih u studijama stabilnosti elektroenergetskog sistema.

### 3.2.1 Modeli asinhronih motora

Najpoznatiji i najčešće upotrebljavan dinamički model je model asinhronog motora (*engl. IM - Induction Motor*) [29]. U literaturi su upotrebi detaljni modeli petog (*engl. 5th Order Induction Motor*) i trećeg reda (*engl. 3rd Order Induction Motor*), kao i ranije pomenuti model Teveninovog ekvivalenta [30]. Dosta često se model asinhronih motora upotrebljava zajedno sa statičkim modelima, pa je tako WECC (*Western Electricity Coordinating Council*) 2001. predložio model sa udjelom asinhronih motora od 20%, a ostatak od 80% je modelovano preko ZIP modela, a formirana je i radna grupa za modelovanje potrošnje (*engl. Load Modeling Task Force, LMTF*). Radna grupa je predložila model za rezidencijalne i komercijalne potrošače koji se sastoji od modela distributivnog transformatora, ekvivalenta distributivne mreže, kondenzatorskih baterija, ZIP modela i dva tipa asinhronih motora [31]. Razmatrajmo tradicionalni model asinhronog motora petog reda u  $\omega_e$  referentnom okviru (u per-unit sistemu):

$$\frac{1}{\omega_s} \frac{d\psi_D}{dt} = -R_s I_D + \frac{\omega_e}{\omega_s} \psi_Q + V_D, \quad (3.5)$$

$$\frac{1}{\omega_s} \frac{d\psi_Q}{dt} = -R_s I_Q - \frac{\omega_e}{\omega_s} \psi_D + V_Q, \quad (14)$$

$$\frac{1}{\omega_s} \frac{d\psi_{D_r}}{dt} = -R_r I_{D_r} + \frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_s} \psi_{Q_r}, \quad (3.6)$$

$$\frac{1}{\omega_s} \frac{d\psi_{Q_r}}{dt} = -R_r I_{Q_r} - \frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_s} \psi_{D_r}, \quad (3.7)$$

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d\omega_r}{dt} = -T_L + (\psi_{Q_r} I_{D_r} - \psi_{D_r} I_{Q_r}). \quad (3.8)$$

gdje je  $\omega_s$  bazna učestanost, a  $\omega_e$ , učestanost Parkove transformacije. U ovom slučaju, neka je referentni sistem takav da je  $\omega_e = \omega_s$ . Odnos između struja i flukseva dat je u matričnom obliku:

$$\begin{bmatrix} \psi_D \\ \psi_{D_r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_s & X_m \\ X_m & X_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_D \\ I_{D_r} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$\begin{bmatrix} \psi_Q \\ \psi_{Q_r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_s & X_m \\ X_m & X_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_Q \\ I_{Q_r} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

U mnogim slučajevima veoma brza dinamika statorskih namotaja se može zanemariti. Zanemarujući tranzijente i otpore statora, dobijamo sledeće algebarske jednačine:

$$0 = \psi_Q + V_D, \quad (3.11)$$

$$0 = -\psi_D + V_Q. \quad (3.12)$$

Usvojiviši sljedeće smjene

$$X' = \frac{X_s X_r - X_m^2}{X_r} \quad (3.13)$$

$$E'_D = -\frac{X_m}{X_r} \psi_{Qr} \quad (3.14)$$

$$E'_Q = \frac{X_m}{X_r} \psi_{Dr} \quad (3.15)$$

$$T_o = \frac{X_r}{\omega_s R_r} \quad (3.16)$$

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (3.17)$$

, dobija se model asinhronog motora trećeg reda. Jednačine statora su:

$$V_D = E'_D - X' I_Q \quad (3.18)$$

$$V_Q = E'_Q + X' I_D \quad (3.19)$$

Jednačine rotora:

$$T_o \frac{dE'_Q}{dt} = -E'_Q + \frac{X_m^2}{X_r} I_D - s \frac{X_r}{R_r} E'_D \quad (3.20)$$

$$T_o \frac{dE'_D}{dt} = -E'_D - \frac{X_m^2}{X_r} I_Q + s \frac{X_r}{R_r} E'_Q \quad (3.21)$$

Moment je definisan sljedećom jednačinom:

$$2H \frac{ds}{dt} = T_L - (E'_Q I_Q + E'_D I_D) \quad (3.22)$$

Uz pretpostavku linearnosti mehaničkog opterećenja,

$$T_L = T_0 + K \omega_r \quad (3.23)$$

$$= T_0 + K \omega_s (1 - s) \quad (3.24)$$

$$= T_0 + K_L (1 - s) \quad (3.25)$$

, dobija se konačna jednačina momenta:

$$2H \frac{ds}{dt} = T_0 + K_L(1 - s) - (E'_Q I_Q + E'_D I_D) \quad (3.26)$$

Dakle, jednačine (3.20), (3.21) i (3.26) predstavljaju jednačine modela asinhronog modela trećeg reda. Ukoliko se zanemari dinamika flukseva rotora, može se doći do ekvivalentnog Teveninovog modela koji uključuje samo mehaničku dinamiku klizanja  $s$ , a na poslijetku i do ranije prikazane ekvivalentne šeme. Pri tome treba obratiti pažnju na izraz (3.13) iz kog se jasno vidi da se pod reaktansom  $X_r$  ne podrazumijeva impedansa rasipanja rotora, već ukupna reaktansa rotora koja se „vidi” sa strane statora. U suprotnom, pomenuti izraz dao bi kao rezultat negativnu reaktansu, što nema fizičkog smisla.

Iako rad [30] ne daje izvođenje ekvivalentne šeme asinhronog motora prikazane na Slici 2.7, u nastavku će biti prikazano kako je moguće doći do tog modela, počevši od već izvedenog asinhronog motora trećeg reda.

Za početak, u modelu trećeg reda, neophodno je zanemariti dinamiku rotorskih flukseva.

$$0 = -E'_Q + \frac{X_m^2}{X_r} I_D - s \frac{X_r}{R_r} E'_D \quad (3.27)$$

$$0 = -E'_D - \frac{X_m^2}{X_r} I_Q + s \frac{X_r}{R_r} E'_Q \quad (3.28)$$

Da bi se izbjegao rad sa dvije jednačine i dvije nepoznate, definišu se kompleksna struja i kompleksna elektromotorna sila. Uvođenje kompleksnih predstavnika može se izvršiti samo uz pomoć pretpostavke simetričnog trofaznog sistema prostoperiodičnih napona i struja mrežne frekvencije. Time se iz d-q sistema prelazi u kompleksni domen.

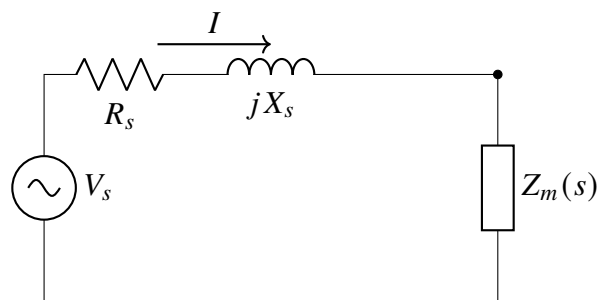
$$E' = E'_D + jE'_Q, \quad I = I_D + jI_Q$$

Množenjem (3.28) sa  $j$ , nakon sabiranja sa (3.27):

$$\begin{aligned} 0 &= (-E'_Q + \frac{X_m^2}{X_r} I_D - s \frac{X_r}{R_r} E'_D) \\ &\quad + j(-E'_D - \frac{X_m^2}{X_r} I_Q + s \frac{X_r}{R_r} E'_Q) \\ &= -(E'_D + jE'_Q) + \frac{X_m^2}{X_r} (I_D + jI_Q) - js \frac{X_r}{R_r} (E'_D + jE'_Q) \end{aligned}$$

Ako se to zapiše kao:

$$0 = -E' + \frac{X_m^2}{X_r} I - js \frac{X_r}{R_r} E'$$



Slika 3.2: Zamjenska Teveninova šema asinhronog motora viđena sa statora

i izoluje  $E'$ :

$$E' \left( 1 + js \frac{X_r}{R_r} \right) = \frac{X_m^2}{X_r} I$$

Odnosno:

$$E' = \frac{X_m^2}{X_r} \cdot \frac{1}{1 + js \frac{X_r}{R_r}} I$$

Tako se dobija izraz oblika:

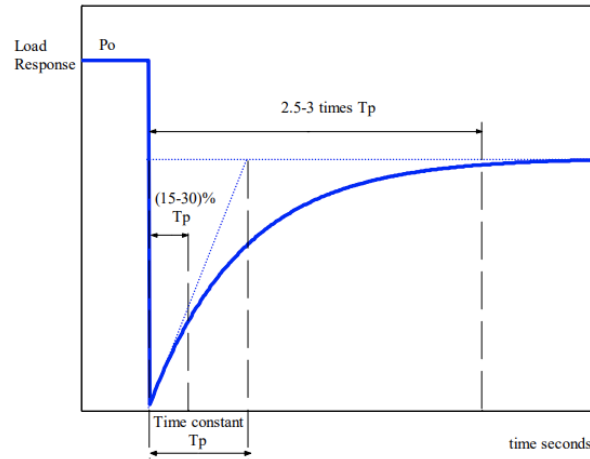
$$E' = Z_m(s) \cdot I, \quad \text{gde je} \quad Z_m(s) = \frac{X_m^2}{X_r} \cdot \frac{1}{1 + js \frac{X_r}{R_r}} \quad (3.29)$$

, pri čemu je  $Z_m$  ekvivalentna impedansa rotorskog kola, posmatrana sa strane statora. To znači da se zamjenska šema motora može predstaviti rednim kolom sa impedansom rotora svedenom na stator, reaktansom rasipanja statora i njegovom otpornošću. Vidi se da impedansa rotora zavisi od klizanja  $s$ , što je poznato iz ekvivalentne šeme sa Slike 2.7 (potpoglavlje 2.1.2). Može se uvesti još jedna aproksimacija, čime se definitivno dobija

paralelna veza otpornosti zavisne od klizanja i reaktanse magnećenja iz šeme sa Slike 2.7, ako se zanemari reaktansa rasipanja rotora, čime se ne pravi velika greška jer je  $X_r = X_{\sigma 2} + X_m \approx X_m$ . Na taj način se izraz (3.29) pretvara u

$$Z_m(s) = \frac{X_m}{1 + js \frac{X_m}{R_r}} \quad (3.30)$$

Time je zaokružen model ekvivalentne šeme asinhronog motora, izveden iz detaljnog modela petog reda, sa razlikom da je u ovom modelu zanemarena reaktansa rasipanja rotora, što je jedina razlika u odnosu na šemu sa Slike 2.7, date u 2.1.2. Naravno, ovaj uprošćeni model može se koristiti samo uz pretpostavku uslova simetrije faznih napona i struja, a jedina modelom obuhvaćena dinamika jeste dinamika klizanja rotora.



Slika 3.3: Exponential Recovery model - promjena aktivne snage  $P$  nastala usljed step promjene napona [34].  $P_0$  je vrijednost aktivne snage prije promjene napona.  $T_p$  je vremenska konstanta aktivne snage (relacija 3.31).

### 3.2.2 Adaptive Load i Exponential Recovery modeli

*Exponential Recovery Load Model*, u bukvalnom prevodu sa engleskog - „model eksponencijalnog oporavka opterećenja”, pri čemu se pod odzivom smatra reakcija potrošačke aktivne i reaktivne snage na promjene napona. Exponential Recovery model tipično se koristi u slučajevima kada u ukupnom opterećenju dominira udio rezidencijalnih potrošača, a učesće asinhronih motora u strukturi konzuma je malo [32]. Matematički, ovaj model potrošača može se opisati jednačinama datim u radu [33]:

$$T_p \ddot{x}_p(t) = -x_p(t) + P_0 \left( \frac{V(t)}{V_0} \right)^{N_{ps}} - P_0 \left( \frac{V(t)}{V_0} \right)^{N_{pt}} \quad (3.31)$$

$$P_d(t) = x_p(t) + P_0 \left( \frac{V(t)}{V_0} \right)^{N_{pt}} \quad (3.32)$$

$$T_q \ddot{x}_q(t) = -x_q(t) + Q_0 \left( \frac{V(t)}{V_0} \right)^{N_{qs}} - Q_0 \left( \frac{V(t)}{V_0} \right)^{N_{qt}} \quad (3.33)$$

$$Q_d(t) = x_q(t) + Q_0 \left( \frac{V(t)}{V_0} \right)^{N_{qt}} \quad (3.34)$$

gdje su  $x_p$  i  $x_q$  odgovarajuća stanja oporavka opterećenja za aktivnu i reaktivnu snagu, redom.  $T_p$  i  $T_q$  su vremenske konstante oporavka opterećenja,  $P_d$  i  $Q_d$  predstavljaju zahtjeve za aktivnom i reaktivnom snagom opterećenja, dok  $P_0$ ,  $Q_0$  i  $V_0$  označavaju nominalne vrijednosti aktivne snage, reaktivne snage i napona, i pretpostavlja se da su poznate. Eksponenti  $N_{ps}$ ,  $N_{qs}$ ,  $N_{pt}$  i  $N_{qt}$  označavaju zavisnosti opterećenja od napona u stacionarnom i prelaznom režimu. U istom radu dat je i *Adaptive Load Model*, odnosno adaptivni model potrošača. Poput modela eksponencijalnog odziva i adaptivni model je nelinearan, gdje su karakteristike snage

opisana nelinearnom funkcijom napona množene promjenljivima  $x_p$  i  $x_q$ . Model je opisan jednačinama:

$$T_p \dot{x}_p(t) = -x_p \left( \frac{V(t)}{V_0} \right)^{N_{pt}} + P_0 \left( \frac{V(t)}{V_0} \right)^{N_{ps}} \quad (3.35)$$

$$P_d(t) = x_p \left( \frac{V(t)}{V_0} \right)^{N_{pt}} \quad (3.36)$$

$$T_q \dot{x}_q(t) = -x_q \left( \frac{V(t)}{V_0} \right)^{N_{qt}} + Q_0 \left( \frac{V(t)}{V_0} \right)^{N_{qs}} \quad (3.37)$$

$$Q_d(t) = x_q \left( \frac{V(t)}{V_0} \right)^{N_{qt}} \quad (3.38)$$

### 3.3 Predlog matematičkog modela potrošača za potrebe analize restauracije elektroenergetskog sistema

S obzirom na to da je elektroenergetski sistem tokom procesa restauracije oslonjen na skromne generatorske resurse, značajno smanjenu inerciju i robusnost, bilo kakva sklopna operacija ili poremećaj, znatno se više osjeća nego kod kompletnog sistema, interkonekcijama povezanim sa okolnim sistemima [6]. S toga je jasna neophodnost da matematički model potrošača bude dinamički model - jer će za veće promjene napona i frekvencije odstupanja simuliranih karakteristika od stvarnih biti manja nego kod statičkih modela [25].

Kod analiza stabilnosti, ako posmatrani sistem posjeduje veliki broj generatora, sa sopstvenim sistemima regulacije napona i učestanosti, a pri tom je dobro povezan sa susjedima, promjene frekvencije se mogu smatrati zanemarljivo malim, a iz modela potrošača isključiti frekventno-zavisni član [27]. Zbog toga se ZIP i eksponencijalni modeli [28], kao i složeniji, dinamički modeli poput Exponential Recovery i Adaptive Load [33] u običnim studijama stabilnosti često predstavljaju kao zavisni isključivo od napona, ne i frekvencije. Za potrebe modelovanja potrošača u ovom radu, biće uključena frekventna zavisnost aktivne i reaktivne snage, u cilju preciznog opisivanja tranzijenata napona i frekvencije koji se javljaju kod veoma krhkog bottom-up ostrva.

U dostupnoj literaturi, dinamički modeli potrošača koji se najčešće koriste kod studija stabilnosti jesu kombinacije ZIP modela i asinhronih motora [26]. Ovi modeli nazivaju se kompozitni. Kako je ranije pomenuto, WECC-ovo radno tijelo LMTF ide korak dalje pa tako predlaže opširniji model, koji ZIP modelu pridružuje dva tipa asinhronih motora, šant kompenzaciju, kao i ekvivalente distributivne mreže i energetskih transformatora [31]. Potreba za uključivanjem dva tipa motora javlja se zbog prisutnosti dvije komponente motornog opterećenja u konzumu: prva, koja se odnosi na male motore u domaćinstvu, poput klima-uređaja i kućnih aparata, dok druga predstavlja industrijske motore. Ekvivalenti mreže, transformatora

i kompenzacije služe, prije svega, u cilju obuhvatanja gubitaka na distributivnim vodovima. Slično LMTF-ovom pristupu, u radu [35] je predstavljen tzv. kompletni model (*engl. Complete Load Model*). Ovaj model se sastoji od dva tipa motora, velikog i malog, koji su predstavljeni modelom trećeg reda opisanim u 3.2.1. Motori su pridruženi polinomijalnom (ZIP) modelu potrošača, otočnom kondezatoru, kao i ekvivalentu distributivnog transformatora.

U nastavku, predložen je novi model za opisivanje elektrodistributivnog konzuma tokom restauracije elektroenergetskog sistema. Rezultati simulacija u [26], [35] pokazuju da kompozitni modeli veoma precizno prikazuju ponašanje potrošača u studijama stabilnosti. S toga će i model prikazan u nastavku biti sačinjen od više tipova potrošača.

Osnovna komponenta ovog predloženog modela jeste Exponential Recovery [33], [34]. Ovaj model, ranije dat sistemom jednačina (3.31) - (3.34), modifikovan je u odnosu na izvornu formu, tako što mu je dodat član koji uvažava zavisnost aktivne i reaktivne snage od frekvencije. Sada je nova forma Exponential Recovery modela:

$$T_p \dot{x}_p(t) = -x_p(t) + P_0 \left( \frac{V(t)}{V_0} \right)^{N_{ps}} (1 + \Delta\omega(t))^{N_{fps}} - P_0 \left( \frac{V(t)}{V_0} \right)^{N_{pt}} (1 + \Delta\omega(t))^{N_{fpt}} \quad (3.39)$$

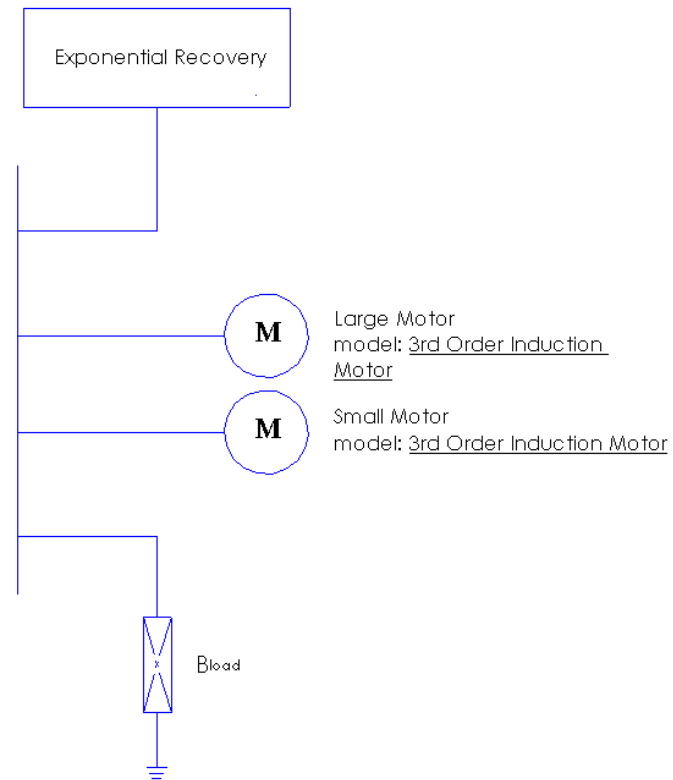
$$T_q \dot{x}_q(t) = -x_q(t) + Q_0 \left( \frac{V(t)}{V_0} \right)^{N_{qs}} (1 + \Delta\omega(t))^{N_{fqs}} - Q_0 \left( \frac{V(t)}{V_0} \right)^{N_{qt}} (1 + \Delta\omega(t))^{N_{fqt}} \quad (3.40)$$

$$P_{\text{load}}(t) = x_p(t) + P_0 \left( \frac{V(t)}{V_0} \right)^{N_{pt}} (1 + \Delta\omega(t))^{N_{fpt}} \quad (3.41)$$

$$Q_{\text{load}}(t) = x_q(t) + Q_0 \left( \frac{V(t)}{V_0} \right)^{N_{qt}} (1 + \Delta\omega(t))^{N_{fqt}} \quad (3.42)$$

Drugu komponentu čine modeli asinhronne mašine čiji red zavisi od rezolucije mjernih podataka. Ako se za određivanje parametara konzuma koriste SCADA mjerenja, onda se nameće primjena modela trećeg reda zbog niske rezolucije, koja je u slučaju ovog rada jedno mjerenje po sekundi. Model trećeg reda je sasvim dovoljan, jer ni sama mjerenja ne mogu prikazati veoma brze statorske tranzijente.

Posljednja komponenta novog modela potrošača jeste otočna susceptansa vezana na potrošački čvor. Uzimajući u obzir da se u literaturi termin „kompozitni model” odnosio na kombinaciju ZIP modela i asinhronih motora, model predložen u ovom radu, u daljem tekstu će se nazivati „modifikovani kompozitni model”. Razlog tome je što, umjesto statičkog ZIP modela, njegovu bazu čini dinamički Exponential Recovery model potrošača. Jedina statička komponenta ovog modela je otočna susceptansa  $B_{\text{load}}$ .



Slika 3.4: Predloženi model: Exponential Recovery, kondenzator, veliki i mali motor

## 4. METODE ZA ODREĐIVANJE PARAMETARA ELEKTRODISTRIBUTIVNOG KONZUMA

Problem identifikacije parametara kroz optimizacioni postupak veoma je čest u elektroenergetici. U literaturi se stoga mogu pronaći brojne metode čiji je cilj identifikacija nepoznatih parametara složenih matematičkih modela. Na primjer, u radu [36] koristi se modifikovani genetski algoritam sa fuzzy klasterovanjem radi određivanja parametara regulatora pobude sinhronih generatora. Validacija na osnovu eksperimentalnih podataka potvrđuje visoku tačnost metode.

Slično, u radu [37] za identifikaciju parametara zamjenskih d–q šema sinhronog generatora koristi se metoda Particle Swarm Optimization (PSO).

Jedan od najčešće korišćenih pristupa u ovom domenu jeste i iterativni Levenberg–Marquardt (LM) algoritam, uspješno primijenjen u [38] za određivanje parametara invertorski upravljanih izvora električne energije.

Navedene metode koriste se za pronalaženje globalnog minimuma složenih funkcija greške, pri čemu se često radi sa velikim brojem slobodnih parametara. Ipak, u slučajevima kada se pouzdano može pretpostaviti da se traženi parametri nalaze u uskom intervalu oko očekivanih ili empirijskih vrijednosti, efikasnije je koristiti manje kompleksne algoritme, poput klasične gradijentne optimizacije.

Takav pristup je predstavljen u [39], gdje se klasični gradijentni metod (dostupan u MATLAB-u kao funkcija `fmincon`) kombinuje sa metodama globalne optimizacije kao što je PSO radi brže i robusnije konvergencije.

### 4.1 Postojeći pristupi identifikaciji parametara elektro-distributivnog konzuma

Kada su u pitanju matematički modeli potrošača, izbor optimizacionog algoritma direktno zavisi od složenosti modela konzuma. Za potrebe identifikacije parametara statičkih modela konzuma, primjena determinističkih, lokalnih optimizacionih metoda, poput `fmincon` i Levenberg–Marquardt algoritma, pokazuje se kao sasvim adekvatna. S druge strane, za dinamičke modele konzuma preporučuje se upotreba globalnih optimizacionih metoda, kao što su PSO i GA, što je potvrđeno komparativnom analizom datom u narednom poglavlju.

U radu [33] primijenjena je kvazi-Njutnova metoda (Levenberg–Marquardt) za identifikaciju parametara modela potrošača. Autori ističu da je LM metoda robusna, ali da često konvergira ka lokalnim, a ne globalnim optimumima, zbog čega se za ovu namjenu preporučuje primjena globalnih optimizacionih tehnika. Kvazi-Njutnova metoda je u navedenom

radu primijenjena na ranije opisane *Exponential Recovery*, *Adaptive* i modele asinhronih motora.

U radu [35] korišćena je nelinearna metoda najmanjih kvadrata (*Nonlinear Least Squares Estimation – LSE*), koja se pokazala kao jednostavna i pouzdana za identifikaciju parametara modela potrošača.

U [40] predstavljeno je poređenje lokalnih i globalnih optimizacionih metoda. Autori ističu da lokalne metode (poput Levenberg–Marquardt i simpleks metode) imaju brzu konvergenciju, ali su izrazito zavisne od početne tačke i sklone pronalaženju lokalnih minimuma. Nasuprot tome, globalne metode, poput genetskih algoritama i simuliranog kaljenja, omogućavaju pronalazak globalnog optimuma, ali uz veću računarsku složenost i duže vrijeme izvođenja. Kao kompromisno rješenje, autori su predložili hibridni pristup koji kombinuje prednosti oba tipa metoda — najprije se genetskim algoritmom određuje oblast mogućeg optimuma, a zatim se simpleks metodom pronalazi precizno rješenje.

## 4.2 Predloženi metod za određivanje parametara konzuma

### 4.2.1 Formulacija problema

Za kreiranje funkcije cilja (*eng. objective function*) potrebna su eksperimentalna mjerenja (u ovom slučaju preuzeta sa SCADA sistema), kao i matematički model čiji ulaz predstavljaju parametri sistema, a izlaz aktivna snaga  $\mathbf{P}$  i reaktivna snaga  $\mathbf{Q}$  potrošača. Parametri sistema su napon i frekvencija potrošačkog čvora, koji se, tokom prve etape restauracije mogu, kao i struja, smatrati sistemskim parametrima. Više o elektroenergetskom sistemu čiji se model koristi za svrhu analize restauracionog postupka biće rečeno u potpoglavlju 4.7, kada će biti izložen detaljan model sistema.

Pod uslovom da su mjerenja dostupna i matematički model potrošača odabran, funkcija cilja može se zapisati kao

$$J(\boldsymbol{\theta}) = \sum_{k \in T} [w_P \cdot (P_{\text{sim}}(k, \boldsymbol{\theta}) - P_{\text{meas}}(k))^2 + w_Q \cdot (Q_{\text{sim}}(k, \boldsymbol{\theta}) - Q_{\text{meas}}(k))^2] \quad (4.1)$$

gdje je:

- $\boldsymbol{\theta}$  vektor optimizacionih parametara modela
- $P_{\text{sim}}, Q_{\text{sim}}$  aktivna i reaktivna snaga dobijene simulacijom
- $P_{\text{meas}}, Q_{\text{meas}}$  mjereni (realni) podaci
- $w_P, w_Q$  ponderi koji određuju relativnu važnost P i Q (u ovom slučaju  $w_P = w_Q = 1$ )
- $i$  T vremenski interval optimizacije

1254	7.10.2022 10:29:03	4.6961588860	1.97254705429077
1255	7.10.2022 10:29:03	4.6961588860	1.97254705429077
1256	7.10.2022 10:29:04	4.6961588860	1.97254705429077
1257	7.10.2022 10:29:04	4.7259750366	1.97254705429077
1258	7.10.2022 10:29:05	4.7259750366	1.97254705429077
1259	7.10.2022 10:29:05	4.7259750366	1.97254705429077
1260	7.10.2022 10:29:06	4.7259750366	1.97254705429077
1261	7.10.2022 10:29:06	4.7259750366	1.97254705429077
1262	7.10.2022 10:29:07	4.7259750366	1.97254705429077
1263	7.10.2022 10:29:07	4.7259750366	1.97254705429077
1264	7.10.2022 10:29:08	4.7259750366	1.99152600765228
1265	7.10.2022 10:29:08	4.7259750366	1.99152600765228
1266	7.10.2022 10:29:09	4.7259750366	1.99152600765228

Slika 4.1: Format mjerenja preuzetih sa SCADA-e

S obzirom na veliku složenost problema, a prema onome što je pokazano u prethodnom poglavlju, izvjesno je da je za minimizaciju greške neophodno koristiti neku od globalnih metoda optimizacije. Za slučaj dugačkog vremenskog intervala  $T$ , izvršavanje algoritma može značajno potrajati i opteretiti računar. Međutim, kako je od interesa simulirati tranzijentne efekte priključenja potrošača, posmatrani interval se može suziti na opseg od trenutka neposredno prije uključenja prekidača potrošačkog izvoda do trenutka kada tranzijenti iščezavaju, a oscilacije napona i frekvencije se prigušuju. Ukupni vremenski interval optimizacije će u ovom slučaju trajati 85 sekundi. Na taj način će simulacija biti kratka, a ipak dovoljno trajati da se prikaže odziv spore regulacije frekvencije.

Kako bi se optimizacija ubrzala, u MATLAB-u će biti primijenjena paralelizacija. To se realizuje pomoću `parpool` i opcije `UseParallel=true`, čime se značajno skraćuje vrijeme postizanja minimalne vrijednosti funkcije cilja. Biće korišćeno 12 procesorskih jezgara.

Vremenski korak numeričke integracije veoma je bitan za stabilnost odziva, a tokom istraživanja koja su prethodila pisanju ovog rada, u simulacijama se korak  $T_s = 0.002s$  pokazao kao dovoljno mali za postizanje konvergencije, a da simulacija ne traje predugo.

Mjerenja sa SCADA sistema data su u rezoluciji od jedne sekunde, kao *timestamp*-ovi u .csv fajlu. Zbog toga je, kako bi vektori mjerenog i simuliranog odziva sistema bili jednaki, potrebno izvršiti interpolaciju mjerenih podataka. Za čitanje .csv fajla i interpolaciju, upotrijebljene su funkcije `readtable`, `detectImportOptions` i `interp1`. Za interpolacioni metod, izabrana je funkcija `previous`.

Vrlo važna stavka su početni vektor i granični vektori rješenja. Početni vektor  $x_0$  mora imati realne vrijednosti parametara, pri čemu je poželjno dobro poznavanje njihovih tipičnih vrijednosti koje se javljaju u praksi. Isto tako, granični vektori  $l_b$  i  $u_b$  moraju biti definisani tako da im vrijednosti parametara odgovaraju tipičnim ekstremima, a ipak ne odstupati značajno od očekivanih vrijednosti. Modifikovani kompozitni model (predložen u prethodnom poglavlju) je izrazito nelinearan i dinamički: spregnute diferencijalne jednačine, zavisnosti od napona i frekvencije, te snažna međuzavisnost parametara generišu nekonveksnu, multi-

modalnu funkciju greške. Dodatno, ograničenja tipa  $X' = X_s - \frac{X_m^2}{X_r} > 0$  i ograničen SCADA uzorak (jedno mjerenje po sekundi) otežavaju upotrebu lokalnih, gradijentnih metoda koje lako zapadaju u lokalne minimume. Stoga je za identifikaciju parametara ovakvog modela primjeren primarno *globalni* pristup (npr. PSO/GA), a eventualno fino podešavanje može se potom obaviti lokalnom metodom.

### Parametri i nelinearna ograničenja

Kako bi se na adekvatan način pristupilo postupku identifikacije parametara predloženog modela potrošača, potrebno je definisati broj nepoznatih parametara i njihove granice. Model predložen u ovom radu jeste kompozitni model, sličan onome predstavljenom u [35], pod imenom „kompletni model potrošača”. Ovaj model modifikovan je na način da je umjesto ZIP potrošača, za bazni model upotrijebljen Exponential Recovery. Detaljan opis korišćenog modela dat je ranije, u poglavlju 3.3.

Parametri Exponential Recovery modela su:

- $P_{0\text{high}}$  - bazna aktivna snaga nakon uključenja potrošača
- $Q_{0\text{high}}$  - bazna reaktivna snaga nakon uključenja potrošača
- $T_p$  - vremenska konstanta promjene aktivne snage ER modela
- $T_q$  - vremenska konstanta promjene reaktivne snage ER modela
- $N_{ps}$  - statički koeficijent osjetljivosti aktivne snage na promjenu napona kod ER modela
- $N_{pt}$  - prelazni koeficijent osjetljivosti aktivne snage na promjenu napona
- $N_{qs}$  - statički koeficijent osjetljivosti reaktivne snage na promjenu napona
- $N_{qt}$  - prelazni koeficijent osjetljivosti reaktivne snage na promjenu napona
- $N_{fps}$  - statički koeficijent osjetljivosti aktivne snage na promjenu frekvencije
- $N_{fqs}$  - statički koeficijent osjetljivosti reaktivne snage na promjenu frekvencije kod ER modela
- $N_{fpt}$  - prelazni koeficijent osjetljivosti aktivne snage na promjenu frekvencije
- $N_{fmt}$  - prelazni koeficijent osjetljivosti reaktivne snage na promjenu frekvencije

To je već 12 parametara koji će biti proslijeđeni optimizacionom algoritmu. Na početku poglavlja, predstavljena je procedura pripreme mjernih podataka, gdje se upotrebom interpolacionog metoda *previous* mjerenja, u izvornom obliku data kao podaci tipa double po jedinici vremena (sekunda), prilagođavaju tako da odgovaraju intervalu simulacije i koraku

simulacije, koji u ovom slučaju iznosi  $t_i = 2 \cdot 10^{-3} s$ .

Za razliku od postupka kalibracije parametara generatora i regulatora, kada je upotrijebljeno ponderovanje na određeni vremenski interval, ovdje je, zbog uštede vremena i računarskih resursa, simulacioni interval smanjen sa 1000 sekundi na 85 sekundi. To se poklapa sa intervalom od 480s do 565s u prethodnom intervalu od 1000 sekundi. Time se značajno ubrzava postupak.

Optimizacioni postupak se mora učiniti robusnim na divergenciju rezultata. Drugim riječima, kombinacije ulaznih promjenljivih, odnosno parametara optimizacije moraju biti validne. Za razliku od Exponential Recovery modela, dosta je teže odrediti opsege ulaznih parametara asinhronih motora.

Definisanjem granica parametara asinhronih motora eliminiše se mogućnost za pojavom nevalidnih rezultata. Osim toga, značajno se olakšava i ubrzava pronalazak finalnog seta parametara optimizacije.

Usljed ranije pomenutog, u nastavku će biti definisana radna oblast asinhronog motora, kao oblast definisana promjenljivima modela motora trećeg reda (*3rd Order Induction Motor*), tako da budu zadovoljeni sljedeći zahtjevi:

1. Nominalna snaga motora mora odgovarati onoj definisanoj nazivnim udjelom motora u u kupnom opterećenju. Ako je, naprimjer, nominalna snaga konzuma 4 MVA, a udio motora u ukupnom opterećenju 10%, onda nominalna snaga motora mora biti jednaka 400 kVA.
2. Klizanje motora  $s$ , u određenom vremenskom intervalu prije posljednje vremenske jedinice simulacije (`simTime(end)`) mora biti:  $s \approx 0$ . To znači da se motor uspješno ubrzao do asinhronne brzine.
3. Faktor snage,  $\cos \varphi$ , mora biti povoljan, kako bi se izbjegla neočekivana i nevalidna ponašanja asinhronog motora. Previše nizak  $\cos \varphi$  doveo bi do toga da se motor ponaša kao prigušnica, umjesto da obavlja svoju primrnu ulogu, a to je pogon tereta na osovini. Zbog toga se zahtijeva da  $\cos \varphi \in [0.7, 0.95]$ .
4. Ograničenje konvergencije, koje je definisano samim modelom motora. Podsjećanja radi, u radu [30] je reaktansa  $X'$  definisana kao:

$$X' \equiv X_s - \frac{X_m^2}{X_r} = \frac{X_s X_r - X_m^2}{X_r}$$

U svakoj tački radne oblasti motora mora biti zadovoljena smisljena nejednakost:

$$X' > 0$$

Reaktansa  $X'$ , kao i ostali parametri i jednačine motora trećeg reda definisani su u sekciji **3.2 Dinamički modeli**, jednačine (3.13)-(3.25).

Kompleksna snaga na priključcima motora je:

$$S_e = (V_D + jV_Q) \overline{(I_D + jI_Q)}, \quad (4.2)$$

$$P_e = \Re\{S_e\}, \quad Q_e = \Im\{S_e\}, \quad PF = \frac{P_e}{\sqrt{P_e^2 + Q_e^2}}. \quad (4.3)$$

Iz (4.3) se vidi da je  $\cos \varphi$  određen odnosom  $P_e : Q_e$ . U ovom modelu:

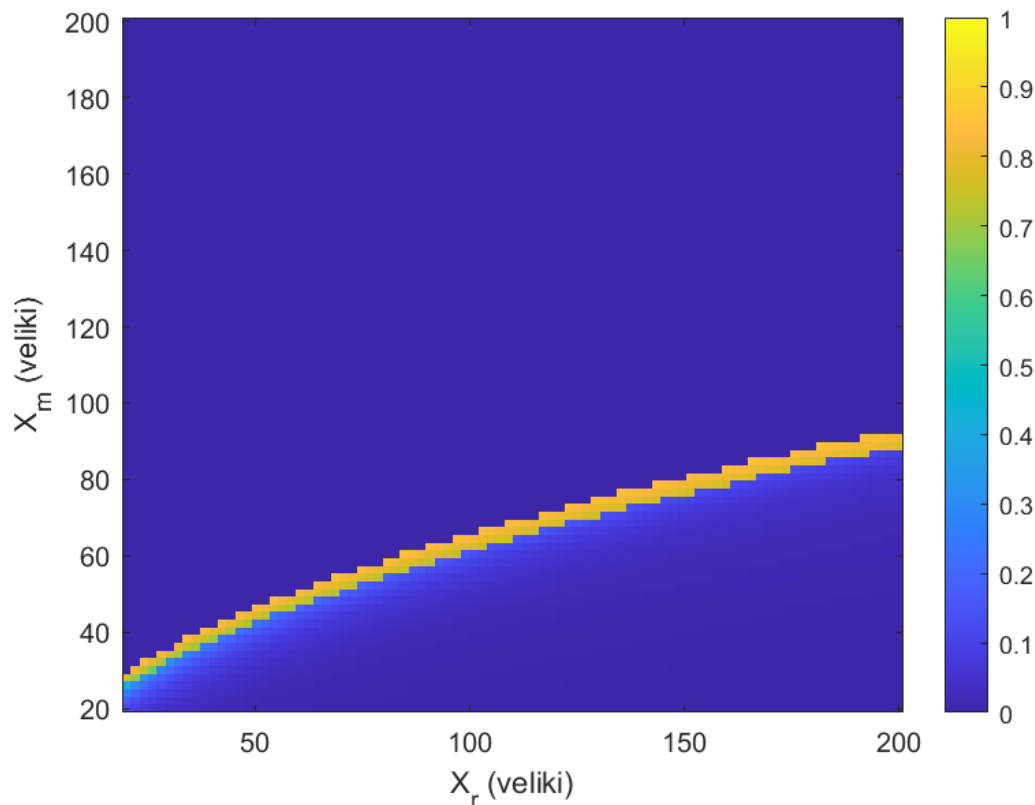
- Dominantni dio  $Q_e$  potiče od magnetizacionog toka ( $X_m$ ). Za dati napon taj dio je *kvazi-konstanta* (ne zavisi jako od opterećenja).
- Povećanjem opterećenja (veći  $T_{L0}$  u (3.25)) raste  $T_e$  i  $P_e$ , dok  $Q_e$  raste malo  $\Rightarrow \cos \varphi$  raste.

Otud i praksa: Faktor snage tipično ostaje nizak pri malim opterećenjima, a značajno raste kada motor radi bliže nominalnoj snazi.

Kako bi se grafički odredio radni opseg motora, odnosno granice njegovih parametara, cilj je pronaći parove ( $X_m, X_r$ ) za koje se dobija mali  $Q_e$  i dovoljan  $T_e$ , uz stabilan rad, odnosno zadovoljenje

$$X' > 0$$

. Kako bi se do opsega došlo, kreiran je takozvani *sweep* algoritam koji pokreće dinamički model motora sa različitim tačkama ( $X_m, X_r$ ), pri čemu rezultate ( $P_e, Q_e, \cos \varphi$  i  $s$ ) upisuje u matrice i iscrtava *imagesc* mape nad ( $X_m, X_r$ ). Pri tome su  $X_s$  i  $R_r$  konstante.

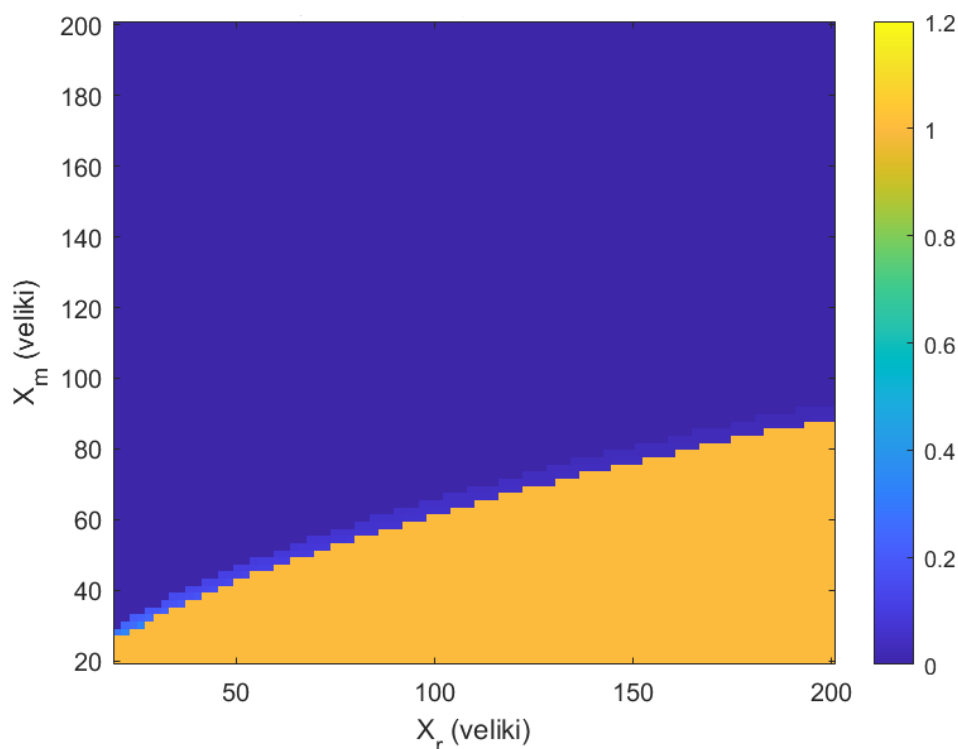
Slika 4.2:  $\cos \varphi$  u zavisnosti od reaktansi  $X_m$  i  $X_r$ 

Faktor snage poprima vrijednosti od 0.75 do 0.95 u veoma uskom intervalu ograničenom sa gornje strane jednakosti  $X' = 0$ , odnosno  $X_m > \sqrt{X_r X_s}$ . Drugim riječima, visok faktor snage dobija se za male, pozitivne vrijednosti reaktanse  $X'$ . Relativni koeficijent  $\rho$  definiše „širinu” ovog tunela sa dobrim faktorom snagu. U cilju smanjenja ukupnog broja parametara za optimizaciju, reaktansa magnetizacije će u nastavku biti definisana preko veze sa  $X_r$  i koeficijentom  $\rho$ :

$$X_m = \sqrt{(1 - \rho) X_s X_r}$$

U datom primjeru izračunato je  $\rho_{min} = 0.0575$ ,  $\rho_{max} = 0.0894$  i  $\rho_{target} = 0.0742$ . Oblast dobrog faktora snage odgovara oblasti malog klizanja, što pokazuje da je izabrana aktivna otpornost rotora  $R_r$  dobrog reda veličine.

Međutim, neposredno ispod tog pojasa, vidi se da je klizanje jednako jedinici, odnosno da rotor miruje. Zaključuje se da ograničenje klizanja odgovara ograničenju faktora snage.

Slika 4.3: Klizanje motora  $s$  u zavisnosti od reaktansi  $X_m$  i  $X_r$ 

Neka je  $\gamma$  fiksno. Tada je skup parametara koji daju  $\cos \varphi \geq \tau$  jednak

$$\mathcal{R}_\tau = \{(X_m, X_r, X_s) : \rho(X_m, X_r, X_s) \in [\rho_{\min}(\tau, \gamma), \rho_{\max}(\tau, \gamma)]\},$$

pri čemu su  $\rho_{\min}, \rho_{\max}$  konstante koje ne zavise od  $X_s$ . Promjena  $X_s$  samo preslikava pojas preko relacije

$$X_m = \sqrt{(1 - \rho) X_s X_r},$$

zadržavajući iste granice u  $\rho$ .

Za dati cilj  $\text{PF} \geq \tau$  i zadati raspon  $\gamma$  (tj. očekivani opseg slipa i  $X_r/R_r$ ), granice  $\rho_{\min}, \rho_{\max}$  mogu se tretirati kao *invarijantne* spram  $X_s$ , pa ograničenje u prostoru  $(X_m, X_r, X_s)$  pišemo kao

$$\boxed{\rho_{\min} \leq 1 - \frac{X_m^2}{X_s X_r} \leq \rho_{\max}} \iff \sqrt{(1 - \rho_{\max}) X_s X_r} \leq X_m \leq \sqrt{(1 - \rho_{\min}) X_s X_r}. \quad (4.4)$$

Praktično,  $\gamma$  u „dobroj zoni“ varira malo (slip je mali, a  $X_r/R_r$  izabran u uskom opsegu), pa su izmjene granica  $\rho$  zanemarljive, što je potvrđeno numerikom (npr.  $\rho_{\min} \approx 0.0575$ ,  $\rho_{\max} \approx 0.0894$ ,  $\rho_{\text{target}} \approx 0.0742$  u sweep-ovima).

Drugim riječima, ako se uvede faktor skaliranja  $k$  za sve reaktanse (a to je slučaj u sweep-u)

kao parametar optimizacije, onda važi:

$$\rho' = 1 - \frac{(kX_m)^2}{(kX_r)(kX_s)} = 1 - \frac{(X_m)^2}{X_r X_s} = \rho$$

Jedino veće promjene  $R_r$ , odnosno klizanja  $s$  mogu unijeti male promjene opsega  $\gamma$ , ali je otpornost rotora ograničena sa gornje strane tako da ne utiče značajno na povećanje klizanja. Ograničenje je postavljeno jer u realnom slučaju asinhronog motora, aktivna otpornost je značajno manja od reaktansi.

Iz tog razloga, potencijalne, male promjene širine opsega  $\gamma$  biće zanemarene. Navedena nelinearna transformacija biće nazvana  **$\rho$ -transformacija** i biće upotrebljavana u svim modelima potrošača u kojima egzistiraju asinhroni motori. Matematički,  $\rho$ -transformacija se formuliše kao:

$$X_s = k_b X_{s0}, \quad X_r = k_b X_{r0}, \quad X_m = k_b \sqrt{(1 - \rho) X_{s0} X_{r0}}$$

$$f : (k_b, \rho) \mapsto (X_s, X_r, X_m)$$

Time je jasno definisana zona kretanja reaktansi modela motora trećeg reda. Na prvi pogled, ovako definisane granice daju utisak da se umanjuje sloboda modelu motora po pitanju faktora snage i potrošnje aktivne snage. Međutim, aktivna snaga je potpuno kontrolabilna, posredno kroz skaliranje reaktansi faktorima  $k_b$  i  $k_{b_s}$  (smanjenje električnog momenta  $T_e$ ), a neposredno kroz promjenu vrijednosti konstantnog opterećenja na osovini motora ( $T_0$  i  $T_{0_s}$ ). Smanjenjem (povećanjem) opterećenja motora utiče se na smanjenje (povećanje) faktora snage  $\cos \varphi$ . Sa druge strane, skaliranje reaktansi ne mijenja faktor snage, ali smanjuje nominalnu snagu motora. Time je modelu motora data potrebna sloboda. Za razliku od pretpostavke linearnog opterećenja iz rada [30] izraženog kao:

$$T_L = K\omega_r = K\omega_s(1 - s) = K_L(1 - s)$$

, u modelu koji će biti korišćen za potrebe ovog rada uvedeno je konstantno opterećenje  $T_0$  ( $T_{0_s}$  za mali motor), čime se izvorni oblik pretvara u

$$T_L = T_0 + K\omega_r = T_0 + K\omega_s(1 - s) = T_0 + K_L(1 - s)$$

, kako je i dato jednačinama (3.23)-(3.25). Koeficijenti linearnog opterećenja  $K_L$  i  $K_{L_s}$  izostavljeni su iz optimizacije i data im je simbolična, mala vrijednost, čime se faktički sav teret može opisati kao  $T_L \approx T_0$ . Razlog zašto je ova izmijenjena napravljena jeste da bi se dobio efekat zaleta motora. Taj efekat je faktički anuliran izvornim oblikom iz [30] jer u trenutku uključivanja motora, kada je  $s = 1$ , slijedi da je  $T_L = 0$ .

Dakle, optimizacijom su obuhvaćeni sljedeći parametri asinhronih motora:

- $B_{cap}$  - otopna mrežna susceptansa.
- $k_b$  i  $k_{bs}$  - koeficijenti skaliranja baznih reaktansi motora. Za bazne reaktanse uzete su vrijednosti  $X_{s0} = 22$  i  $X_{r0} = 20$ . Koeficijent skaliranja direktno utiče na rezultujuću električni moment  $T_e$ , a time i na nominalnu snagu motora.
- $\rho$  - parametar koji shodno (4.4) definiše dužinu intervala dozvoljenih pozitivnih vrijednosti  $X'$  počevši od nule. Po svojoj prirodi  $\rho$  i  $\rho_s$  predstavlja granicu. Kako je uvršten u optimizacione parametre, posjeduje donju i gornju granicu, pa se može reći da je ovaj parametar zapravo šetajuća granica. Ukoliko algoritam optimizacije smatra da je početni opseg  $\gamma$  prekratak ili predugačak, on može shodno ograničenjima pomjerati dužinu  $\rho$ . Isto važi i za  $\rho_s$  (mali motor).
- $R_r$  i  $R_{rs}$  su otpornosti namotaja rotora.
- $T_0$  i  $T_{0s}$  - opterećenja na osovini motora. Veće opterećenje iziskuje veću aktivnu snagu, pri čemu raste  $\cos \varphi$ . Za slučaj manjeg opterećenja efekat je suprotan. Treba razlikovati uticaj opterećenja od uticaja skaliranja.  $T_0$  i  $T_{0s}$  djeluju na aktivnu snagu P, a  $k_b$  i  $k_{bs}$  djeluju na prividnu snagu S.
- $H_{motor}$  i  $H_{motor_s}$  su konstante inercije velikog i malog motora. Veća konstanta inercije povlači i duže vrijeme zalijetanja motora, kao i veću energiju utrošenu za postizanje asinhronne brzine.

Transformacija sistema parametara prema kojoj se umjesto reaktansi  $X_r$ ,  $X_m$  i  $X_s$ , algoritmu optimizacije prosljeđuju gore navedeni parametri  $k_b$  i  $\rho$  eliminiše upotrebu za bilo kakvim nelinearnim ograničenjima.

Pomenuta transformacija predstavlja vrlo zgodno rješenje, prije svega zbog sljedeće činjenice: u programskom paketu MATLAB, pojedini globalni optimizacioni algoritmi, poput PSO ne mogu obuhvatati nelinearna ograničenja (kao što to može npr. `fmincon` funkcija). U tom slučaju, da se išlo na prosljeđivanje standardnog seta parametara koji obuhvata reaktanse motora javila bi se dva problema. Osim pretrage rješenja u zonama sa neregularnim skupom rješenja, algoritam bi nailazio i na rješenja koja divergiraju, zbog nezadovoljavanja uslova

$$X' > 0$$

$$X' \equiv X_s - \frac{X_m^2}{X_r}$$

Istina, problem divergencije se može zaobići penalizacijom u okviru funkcije cilja **J**, međutim, program bi i dalje trošio vrijeme na simulaciju sa nevalidnim skupovima, a u slučaju da PSO više puta zaredom izabere skup koji ne konvergira, postupak optimizacije bi bio prekinut.

Ovi problemi uspješno su prevaziđeni transformacijom (koordinatnog) sistema parametara.

## Funkcija cilja i penalizacija

Funkcija cilja formulisana je prema standardnoj definiciji optimizacije parametara fizičkog sistema, a to je minimizacija ukupne greške (odstupanja) simuliranih krivih aktivne i reaktivne snage u odnosu na mjerenja:

$$J = wP * J_P + wQ * J_Q + pen_{PF} + pen_{slip} + pen_{rho} \quad (4.5)$$

gdje su:  $wP$  i  $wQ$  težinski faktori (ponderi) aktivne, odnosno reaktivne snage. U konkretnom primjeru, vrijednosti pondera su  $wP = wQ = 1$ .  $J_P$  i  $J_Q$  predstavljaju sume kvadrata odstupanja simulirane i mjerene krive u svakom vremenskom trenutku, odnosno:

$$J_P = \sum_{i \in idx} (P_{sim,i} - P_{measured,i})^2, J_Q = \sum_{i \in idx} (Q_{sim,i} - Q_{measured,i})^2. \quad (4.6)$$

$pen_{PF}$  je penal faktora snage. Iako su granice kretanja faktora snage definisane vektorima donjih i gornjih ograničenja  $lb$  i  $ub$ , penali u funkciji cilja predstavljaju više sigurnosnu mjeru, nego stvarnu potrebu za održavanjem parametara u granicama. Zato je i kriterijum penalizacije dosta nizak, kako bi se otklonile samo one nelogične vrijednosti faktora snage.  $pen_{slip}$  je takođe sigurnosna mjera. Slika 5.7 pokazuje da u definisanom radnom opsegu motora klizanje uvijek ima vrijednosti bliske nuli. Zbog toga ni ovaj kriterijum penalizacije nije podešen striktno, već su odabrane visoke vrijednosti klizanja, koje bi teorijski otklonile samo slučajeve kada je rotor ostao zakočen:

```
pen_slip = 0;
if s_end > 0.5, pen_slip = pen_slip + 1e4*(s_end - 0.5); end
if s_s_end > 0.5, pen_slip = pen_slip + 1e4*(s_s_end - 0.5); end
```

Identično, penal za  $\rho$  samo je rezervna sigurnosna mjera za ograničenja data  $lb$  i  $ub$  vektorima.

```
pen_rho = 0;
if rho < rho_min, pen_rho = pen_rho + 1e5*(rho_min - rho); end
if rho > rho_max, pen_rho = pen_rho + 1e5*(rho - rho_max); end
if rho_s < rho_min, pen_rho = pen_rho + 1e5*(rho_min - rho_s); end
if rho_s > rho_max, pen_rho = pen_rho + 1e5*(rho_s - rho_max); end
```

Još jedan penal u sklopu funkcije cilja odnosi se na slučajeve u kojima rješenje divergira, pa ga možemo smatrati trećim sigurnosnim stepenom, odnosno rezervom vektora granica i  $pen_{rho}$  penala.

```
if any(~isfinite(P_sim)) || any(~isfinite(Q_sim)) || ~isfinite(s_end)
|| ~isfinite(s_s_end)
```

```

    J = 1e12; return;
end

```

Navedeni penali garantuju robusnost programa. U narednoj sekciji prikazani su rezultati optimizacionog postupka sa propratnim objašnjenjima.

### 4.2.2 Genetski algoritam

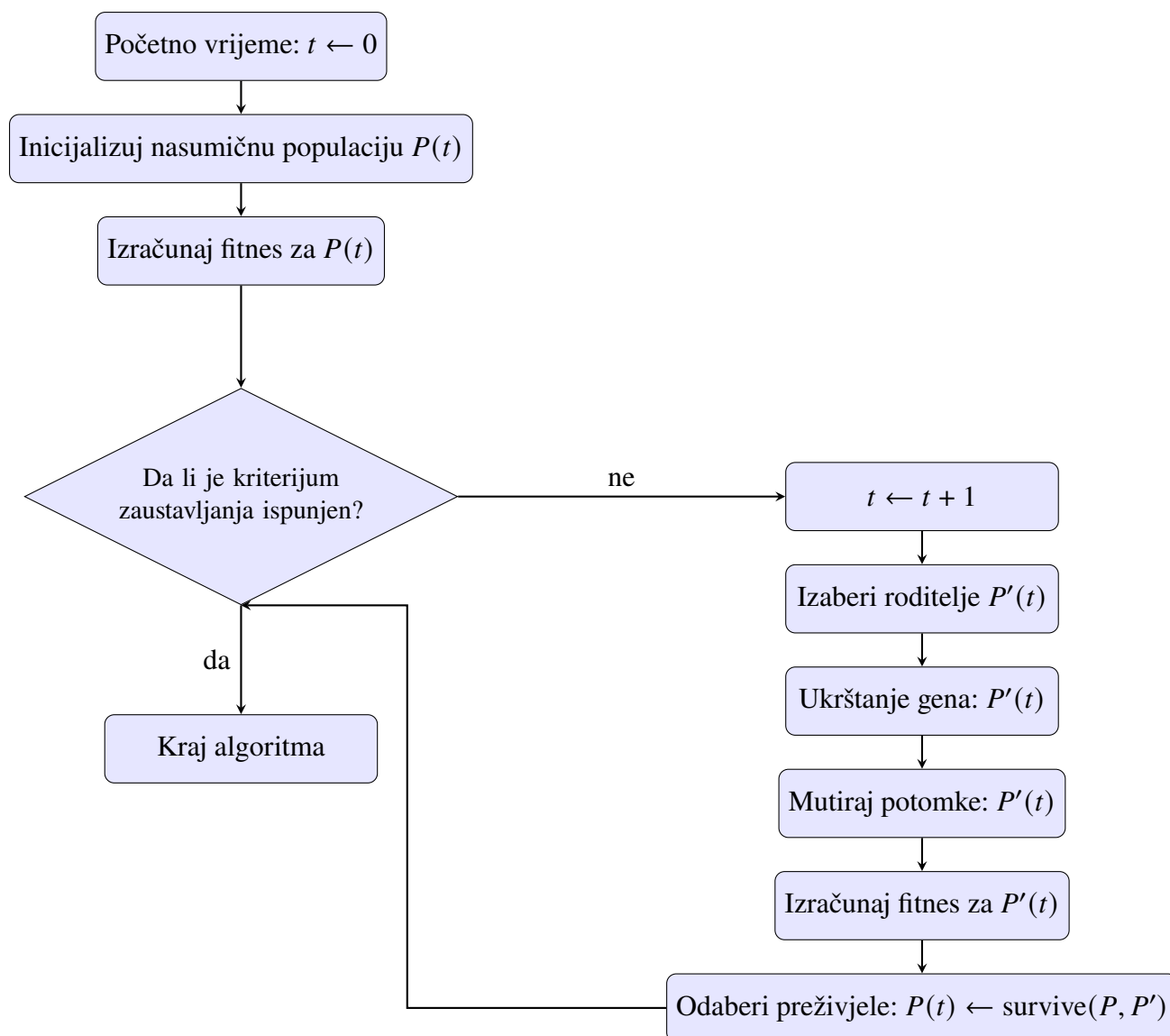
Specifičnost genetskog algoritma kao metoda jeste što se ne oslanja na matematiku. GA je zamišljen da oponaša prirodnu selekciju gena, gdje jedinke sa "boljim genetskim materijalom" imaju znatno veće šanse da prežive i ostvare potomstvo. Ono što je jedinka neke populacije u biologiji, u genetskom algoritmu optimizacije jeste jedinstveni set parametara, dat binarnim zapisom. Što je manja funkcija greške odstupanja simulirane od izmjerene karakteristike, to se set parametara (jedinka) smatra boljim. To se kvantifikuje pozitivnom brojnomo vrijednošću nazvanom *fitness*. U radu [41], dat je pseudokod koji opisuje standardnu proceduru izvršavanja genetskog algoritma. Početna, nasumična populacija naziva se nulta generacija. Nakon inicijalizacije nulte generacije, svaki član populacije (jedinka) se evaluira pomoću funkcije cilja, čime se određuje njegova fitness vrijednost. Na osnovu toga vrši se selekcija — preferencijalno biranje jedinki sa boljim fitnessom za dalju reprodukciju. Izabrane jedinke zatim učestvuju u ukrštanju gena (crossover), gdje se nasumično kombinuju dijelovi njihovih hromozoma, formirajući tako novu generaciju potomaka. Ukrštanje omogućava istraživanje novih oblasti prostora rješenja kombinujući karakteristike roditelja. Nakon toga, na dobijene potomke se primjenjuje mutacija — slučajna promjena jednog ili više gena u hromozomu. Mutacija služi očuvanju genetske raznolikosti populacije i sprječava prerano konvergiranje algoritma ka lokalnom minimumu. Potomci se zatim ponovo evaluiraju i njihova se fitness vrijednost izračunava. U zavisnosti od implementacije, preživljavanje (survival) se može sprovesti tako što najbolji članovi nove i/ili prethodne generacije formiraju novu populaciju. Ovaj proces se iterativno ponavlja kroz više generacija sve dok se ne ispuni kriterijum zaustavljanja — najčešće određeni broj iteracija ili dostignuta minimalna greška.

### 4.2.3 Particle Swarm Optimization (PSO)

Particle Swarm Optimization (PSO) je metaheuristički optimizacioni algoritam inspirisan kolektivnim ponašanjem jata ptica i rojeva riba [42, 43]. Algoritam koristi populaciju potencijalnih rješenja, nazvanih čestice, koje se kreću kroz prostor rješenja tražeći optimum tako što koriste sopstveno iskustvo i iskustvo najuspješnijih čestica u roju.

Svaka čestica  $i$  u populaciji u trenutku  $k$  ima svoju poziciju  $\mathbf{x}_i^k$  i brzinu  $\mathbf{v}_i^k$ . Brzina i pozicija svake čestice ažuriraju se na osnovu sledećih jednačina:

$$\mathbf{v}_i^{k+1} = w \cdot \mathbf{v}_i^k + c_1 r_1 (\mathbf{p}_i^{\text{best}} - \mathbf{x}_i^k) + c_2 r_2 (\mathbf{g}^{\text{best}} - \mathbf{x}_i^k), \quad (4.7)$$



Slika 4.4: GA procedura opisana u [41]

$$\mathbf{x}_i^{k+1} = \mathbf{x}_i^k + \mathbf{v}_i^{k+1}, \quad (4.8)$$

gde su:

- $w$  – inercijalna težina, koja kontroliše doprinos prethodne brzine,
- $c_1, c_2$  – koeficijenti ubrzanja, koji određuju težinu kognitivne (lične) i socijalne (globalne) komponente,
- $r_1, r_2 \sim U(0, 1)$  – slučajni brojevi sa uniformnom distribucijom,
- $\mathbf{p}_i^{\text{best}}$  – najbolja do sada pronađena pozicija čestice  $i$ ,
- $\mathbf{g}^{\text{best}}$  – najbolja do sada pronađena pozicija u čitavom roju.

Inercijalna težina  $w$  može se postepeno smanjivati tokom iteracija kako bi se postigla bolja eksploatacija rješenja. Tipično se definiše kao:

$$w = w_{\text{final}} + \frac{w_{\text{initial}} - w_{\text{final}}}{k_{\text{max}} - 1} \cdot (k_{\text{max}} - k), \quad (4.9)$$

gdje su  $w_{\text{initial}}$  i  $w_{\text{final}}$  početna i krajnja vrijednost inercijalne težine,  $k_{\text{max}}$  maksimalan broj iteracija, a  $k$  trenutna iteracija.

Osnovni koraci Particle Swarm Optimization (PSO) algoritma mogu se opisati na sljedeći način:

1. Inicijalizovati populaciju čestica sa nasumično odabranim pozicijama  $\mathbf{x}_i^0$  i brzinama  $\mathbf{v}_i^0$  u dozvoljenom prostoru pretrage.
2. Za svaku česticu izračunati vrijednost ciljne (fitnes) funkcije.
3. Ažurirati najbolju ličnu poziciju svake čestice  $\mathbf{p}_i^{\text{best}}$  i najbolju globalnu poziciju  $\mathbf{g}^{\text{best}}$  u roju.
4. Ažurirati brzine i pozicije svake čestice prema jednačinama (4.6) i (4.7).
5. Ponavljati korake 2–4 dok se ne ispuni kriterijum zaustavljanja (npr. dostizanje maksimalnog broja iteracija ili zadovoljavajuće vrijednosti fitnes funkcije).

#### 4.2.4 Levenberg–Marquardt (LM) algoritam

Levenberg–Marquardt (LM) algoritam predstavlja interpolaciju između Gauss–Newton metode i gradijentnog spuštanja, namijenjenu za rješavanje nelinearnih problema najmanjih kvadrata (Nonlinear Least Squares Estimation). Pretpostavimo da funkcija greške  $V(x)$  može biti izražena kao suma kvadrata ostataka (razlika između mjerenja i simulacije):

$$V(x) = \sum_{i=1}^N e_i^2(x) \quad (4.10)$$

Gdje je  $x$  vektor nepoznatih parametara, a  $e_i(x)$  greška modela u  $i$ -toj tački. Levenberg–Marquardt ažuriranje parametara definisano je kao:

$$\Delta x = [J^T(x)J(x) + \mu I]^{-1} J^T(x)e(x) \quad (4.11)$$

Gdje je  $J(x)$  Jakobijan matrica parcijalnih izvoda grešaka,  $e(x)$  vektor svih  $e_i(x)$ ,  $I$  je jedinična matrica, a  $\mu$  je parametar prigušenja. Ako je  $\mu$  velik, algoritam se ponaša kao gradijentni metod (uz korak  $1/\mu$ ), dok za male  $\mu$  konvergira kao Gauss–Newton metod. Ova metoda je naročito pogodna za nelinearne optimizacione probleme i široko je primjenjivana u identifikaciji parametara složenih sistema [44].

#### 4.2.5 Determinističke optimizacione metode — `fmincon`

U situacijama kada je funkcija greške glatka i parametri modela se nalaze unutar ograničenog i poznatog opsega, efikasno rješenje problema optimizacije moguće je uz korištenje determinističkih metoda zasnovanih na gradijentu. Jedan od najpoznatijih predstavnika ovih metoda je funkcija `fmincon`, dostupna u okviru MATLAB programskog okruženja [45]. Ova funkcija koristi jednu od nekoliko algoritamskih strategija, uključujući metode unutrašnje tačke, kvazi-Newton-ove metode (sa BFGS/Hessian aproksimacijom), aktivnog skupa i Trust-region algoritam.

Cilj funkcije `fmincon` je minimizacija nelinearne ciljne funkcije pod ograničenjima oblika:

$$\min_x f(x) \quad (4.12)$$

$$\text{tako da je: } c(x) \leq 0, \quad ceq(x) = 0 \quad (4.13)$$

$$lb \leq x \leq ub \quad (4.14)$$

Gdje su  $f(x)$  ciljna funkcija,  $c(x)$  i  $ceq(x)$  vektori nelinearnih nejednakosnih i jednakosnih ograničenja, dok su  $lb$  i  $ub$  vektori donjih i gornjih granica varijabli. Za efikasnu primjenu metode, funkcija  $f(x)$  mora biti neprekidno diferencijabilna. `fmincon` omogućava i eksplicitno zadavanje Jakobijana i Hessian matrice, čime se dodatno povećava numerička preciznost i brzina konvergencije.

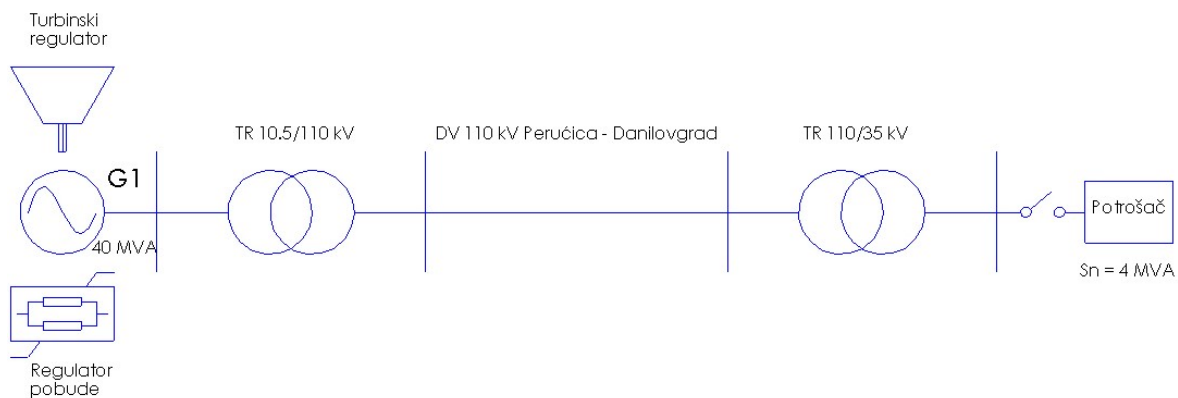
## 5. ODABIR ALGORITMA I OPTIMIZACIJA PARAMETARA RAZLIČITIH MODELA POTROŠAČA

Kako bi se izvršila adekvatna validacija predloženog modela, potrebno je uporediti simulirane odzive sa stvarnim mjerenjima. Osnovni problem primjene ovakvog pristupa, odnosno određivanja parametara konzuma na osnovu mjerenja jeste nedostupnost dovoljno velikog seta podataka. Drugim riječima, potpuni raspadi sistema nisu događaji koji se dešavaju često, a black-start eksperimenti su veoma skupi i zahtjevni, tako da su i mjerenja, ako ih uopšte ima, uglavnom svedena na nekoliko događaja. Za vjerodostojnost parametara modela koji se određuju optimizacionim postupkom je od ključne važnosti postojanje dovoljno podataka iz prošlosti. U radu [40], tehnikom optimizacije na osnovu više krivih mjerenja, od kojih se dio koristi za optimizovanje, a dio za validaciju rezultata, identifikovani su parametri kompozitnog modela potrošača sastavljenog od ZIP modela i motora trećeg reda. Pri tom je utvrđeno da modeli zasnovani na jednom ili dva seta mjerenja nijesu pouzdani iz razloga što daju veliku varijansu i malu sposobnost generalizacije.

I pored neosporno veće preciznosti modela potrošača zasnovanih na dugotrajnom monitoringu i prikupljanju mjernih podataka, u slučajevima black-start režima rada sistema uglavnom nije dostupno toliko informacija. Upravo zbog toga je i identifikacija parametara potrošačkog modela u ovom radu zasnovana samo na jednom, jedinom dostupnom setu mjerenja. U pitanju su mjerenja prikupljena tokom black-start eksperimenta, vršenog od strane Crnogorskog elektroprenosnog sistema (CGES), 7. oktobra 2022. godine. Ovaj eksperiment zvanično je nazvan Program testiranja plana uspostavljanja rada EES-a Crne Gore nakon raspada bez spoljašnjeg napajanja. Cilj je bio na terenu testirati proceduru predviđenu pomenutim Planom uspostavljanja rada EES-a Crne Gore nakon raspada bez spoljašnjeg napajanja iz 2012. godine.

Fokus je na prvoj etapi uspostavljanja napajanja, tačnije na uključenju prvog potrošačkog izvoda na neopterećeno black-start ostrvo. Na Slici 5.1 prikazana je šema TS Perućica 220/110/10.5 kV. Sistem u prvoj etapi restauracije čine: generator G1 u HE Perućica sa svojim transformatorom, dalekovod Perućica - Danilovgrad i transformator 110/35 kV u TS Danilovgrad. To je uklopno stanje prije uključenja potrošača u pogon. Potrošač, odnosno potrošački izvod, snage 4 MVA, prema Planu, uključuje se prekidačem na 35 kV strani u TS Danilovgrad. Jedno od ključnih pitanja koja se nameću jeste: na koji način i u kom softveru vršiti analizu rada sistema u datim okolnostima? Postoji niz softvera koji se koriste za analizu tranzijentne stabilnosti. Međutim, problem u ovom slučaju predstavlja fleksibilnost modelovanja potrošača. Industrijski softveri uglavnom ne dozvoljavaju slobodu modelovanja, pa je korisnik prinuđen da koristi unaprijed definisane matematičke modele. Drugo, namjena ovih softvera jeste analiza stabilnosti rada sistema, pa se prema tome podrazumijeva poznavanje





Slika 5.2: Pojednostavljena šema sistema

Definišimo problem na sljedeći način: dostupna su mjerenja napona, aktivne i reaktivne snage i frekvencije u 110 kV polju u HE Perućica. Poznati su podaci za DV Perućica – Danilovgrad i za transformator u TS Danilovgrad. Prema tome, može se formirati ekvivalentna zamjenska šema između HE Perućica i konzuma u TS Danilovgrad. Prema tome, primjenom jednačine za pad napona na kratkom vođu mogu se odrediti:

- Aktivna snaga konzuma,
- Reaktivna snaga konzuma,
- Napon na 35 kV sabirnicama konzuma.

Možemo pretpostaviti da je učestanost globalni parametar, te da je učestanost mjerena u TS Danilovgrad identična učestanosti mjerenoj u HE Perućica.

Elementi elektroenergetskog sistema modelovani su na sljedeći način:

- Sinhroni generator u HE Perućica modelovan je detaljnim Parkovim modelom sinhronog generatora. U pitanju je model petog reda koji se koristi kod proračuna tranzijenata.
- Transformatori TR 10.5/110 kV u TS Perućica i TR 110/35 kV u TS Danilovgrad, radi jednostavnosti, modelovani su zamjenskom „I” šemom, tj. rednom impedansom. S obzirom da simulacija ne obuhvata uključenje transformatora u praznom hodu, u kom se javljaju nelinearni efekti okarakterisani višim harmonicima, ovakav linearni pristup je sasvim dovoljan.
- Dalekovod 110 kV između TS Perućica i TS Danilovgrad predstavljen je zamjenskom „ $\pi$ ” šemom, koja obuhvata rednu impedansu, kao i otočne susceptanse dalekovoda. Otočne konduktanse nisu uzete u obzir.
- Model potrošača se mijenja od slučaja do slučaja, kako bi se uporedili odzivi aktivne i reaktivne snage.

Problem koji se posebno istakao tokom kreiranja modela i jednačina sistema jeste: kako odrediti gubitke? Kod proračuna tokova snaga, pad napona na rednoj impedansi može se izraziti kroz jednačinu [24]:

$$\underline{U}_1 = U_2 + \frac{P_2 R + Q_2 X}{U_2} + j \frac{P_2 X - Q_2 R}{U_2} = U_2 + \Delta U_d + j \Delta U_q \quad (5.1)$$

gdje je  $\underline{U}_1$  napon prije impedanse,  $U_2$ ,  $P_2$  i  $Q_2$  napon i snage poslije impedanse, a  $R$  i  $X$ , otpornost i reaktansa.

Analogno ovoj jednačini slijedi da se gubici na impedansi mogu izraziti kao:

$$\Delta \underline{S} = \underline{Z} |I|^2 = (R + jX) \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \quad (5.2)$$

Problem kod ovog pristupa je što, za razliku od proračuna tokova snaga, u slučaju restauracije napajanja bottom-up strategijom, ne postoji čvor koji se može definisati kao čvor jake mreže. Drugim riječima, u ovim uslovima rada sistema, bilo koja promjena mrežne konfiguracije izazvaće promjene napona u svakom čvoru. Da bi se koristile jednačine (5.1) i (5.2), potrebno je kao ulazne parametre poznavati napon bar sa jedne strane impedanse. Međutim, u proračunu tranzijenata tokom black-start procesa, amplituda i fazni ugao napona su veličine koje predstavljaju izlazne parametre, odnosno rješenja. Zbog toga je za proračune gubitaka upotrijebljena sljedeća aproksimacija:

- za uslove na početku simulacije, odnosno prije priključenja potrošača, proračunati su tokovi snaga i određeni nominalni gubici, koji se koriste kao početni uslovi dinamičke simulacije. Ovi gubici moraju biti jednaki onim izmjerenim prije uključenja prekidača.
- poznavajući zavisnosti gubitaka od napona i struje, gubici su skalirani tako da prate zavisnost. Naime, redni gubici su definisani tako da se mijenjaju u zavisnosti od kvadrata struje, a otočni u zavisnosti od kvadrata napona.
- nije uzeta u obzir promjena reaktansi u zavisnosti od trenutne vrijednosti frekvencije mreže, već su ove vrijednosti uzete za fiksne, na bazi nominalne učestanosti.

Generalno, prvih nekoliko sekundi simulacije ostavljeno je za inicijalizaciju. Cilj je da se promjenljive sistema, poput unutrašnje ems generatora ( $E_d$ ,  $E_q$ ), napona, ugla rotora itd. ustabile i zauzmu svoje stacionarne vrijednosti. Nakon što regulatori pobude i turbine dovedu sistem u prvobitno stacionarno stanje, započinje dinamička simulacija.

## 5.1 Izbor optimizacionog algoritma

Odabir optimizacionog algoritma veoma je važan aspekt identifikacije parametara. Jedan algoritam, tj. metod, može se izuzetno dobro ponašati za pojedine matematičke modele, dok

Tabela 5.1: Rezultati optimizacije za ZIP model (SSE).

Algoritam	Konačni $f(x)$	Vreme [s]	Napomena
PSO	3.8083	415.71	Najmanja suma kvadrata odstupanja
fmincon	3.9879	43.51	Brz, ali veće odstupanje
GA	3.8165	1740.2	Blizu PSO, ali veoma spor
LM (lsqnonlin)	3.8136	28.63	<b>Najbolji kompromis</b> (malo odstupanje, veoma brzo)
PSO → fmincon	3.9847	473.84	odatak fmincon-a nije donio poboljšanje

za druge ne pruža zadovoljavajuće rezultate. Radovi iz literature [36, 37, 39] ukazuju na izuzetno veliki potencijal primjene genetskih algoritama i Particle Swarm optimizacije za identifikaciju parametara regulatora pobude sinhronih generatora, kao i parametara samih mašina. Ove probleme odlikuje izuzetno visok broj nepoznatih i izražene nelinearnosti.

Istaknuta je i primjena Levenberg-Marquardt (LM) algoritma za potrebe rješavanja nelinearnih problema [44], a ovaj metod uspješno je primjenljiv u identifikaciji parametara kod sistema sa invertorskim upravljanjem [38].

Definicija ovih metoda, zajedno sa MATLAB-ovom `fmincon` funkcijom data je na početku poglavlja. U nastavku, pomenuti optimizacioni algoritmi su uporedno testirani. Cilje je odabrati optimalan metod za rješavanje glavnog problema u ovom radu. A to je identifikacija parametara raznih modela potrošača.

Kriterijumi prema kojima će svaki metod biti ocijenjen su:

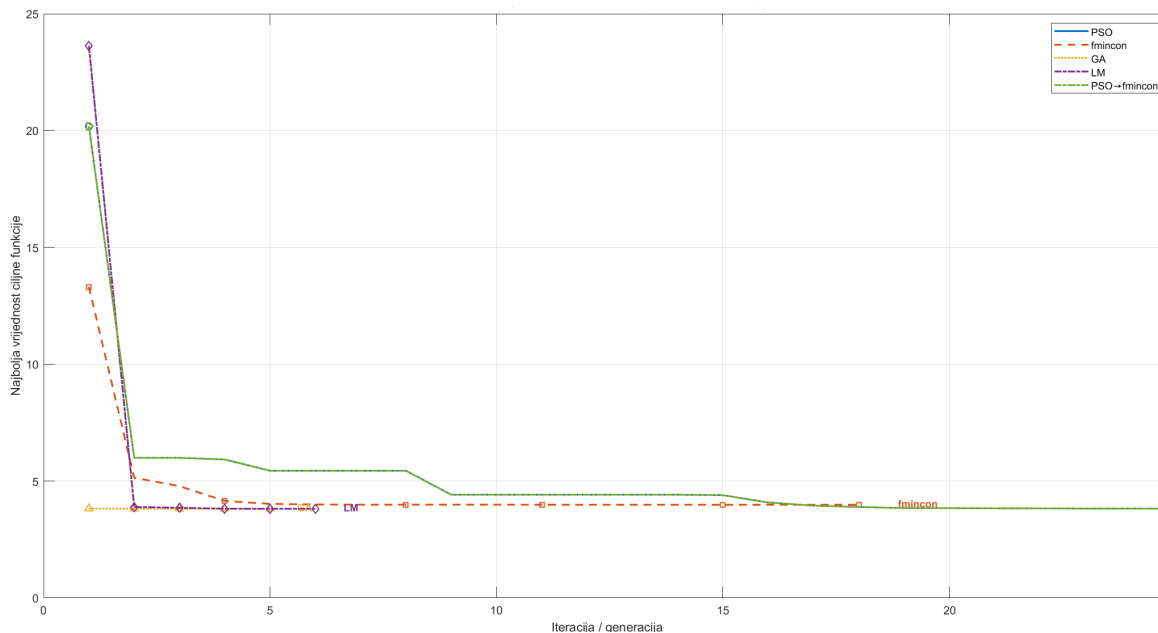
1. Minimalna greška - definisana kroz vrijednost sume kvadrata odstupanja između simulirane i mjerene krive.
2. Brzina konvergencije - broj iteracija potrebnih da algoritam pronađe minimum
3. Vrijeme izvršavanja - koliko dugo traje izvršavanje algoritma
4. Opšta primjenljivost - metoda treba da uspješno pronađe globalni minimum bez obzira na složenost modela. Složenost je definisana brojem parametara i nelinearnošću.

Uporedna analiza prvo je izvršena nad statičkim ZIP modelom. ZIP model potrošača ima svega 10 parametara i dva ograničenja. ZIP, nazvan još i polinomijalni model, definisan je u potpoglavlju 3.1 jednačinama (3.1) i (3.2). Globalni PSO metod za rezultat ima najmanje odstupanje od mjerene krive. Međutim, LM ima tek nešto veću grešku, pri čemu je značajno brži. GA takođe konvergira blizu PSO, ali je znatno sporiji, čak 4 puta! Hibrid PSO→fmincon ne donosi nikakvu dobit u odnosu na PSO, a izvršavanje traje 58.13 sekundi duže.

GA postiže konvergenciju već nakon nekoliko iteracija, što ukazuje grafik sa Slike 5.3. Međutim, formiranje početne populacije, ukršanje i računanje fitness-a zahtijevaju mnogo vremena. Sa druge strane, PSO odlikuje visok broj iteracija i dugo zadržavanje oko minimuma prije nego što se optimizacija završi. Ipak, to sve traje više od 4 puta manje, pa iako je potrebno

mного više iteracija, PSO je značajno brži od GA, kao što je rečeno u [39].

LM konvergira već nakon 6 iteracija, uz veoma malu grešku i manje vrijeme izvršavanja u poređenju sa drugim metodama. To ga čini najboljim optimizacionim algoritmom primijenjenim nad ZIP modelom. Gore navedeni zaključci ne moraju važiti za sve modele koji će biti



Slika 5.3: ZIP model - krive konvergencije različitih algoritama (PSO, GA, fmincon, LM, PSO→fmincon). Na y-osi je vrijednost funkcije cilja  $f(x)$  (MSE), a na x-osi broj iteracija/generacija.

razmatrani u nastavku. ZIP model je vrlo jednostavan model, sa ograničenjem jednakosti (zbir koeficijenata mora biti jednak nuli). Zato će u nastavku svi oni algoritmi biti primijenjeni na nešto složeniji model - ZIP opterećenju sa dodatkom dva tipa asinhronih motora.

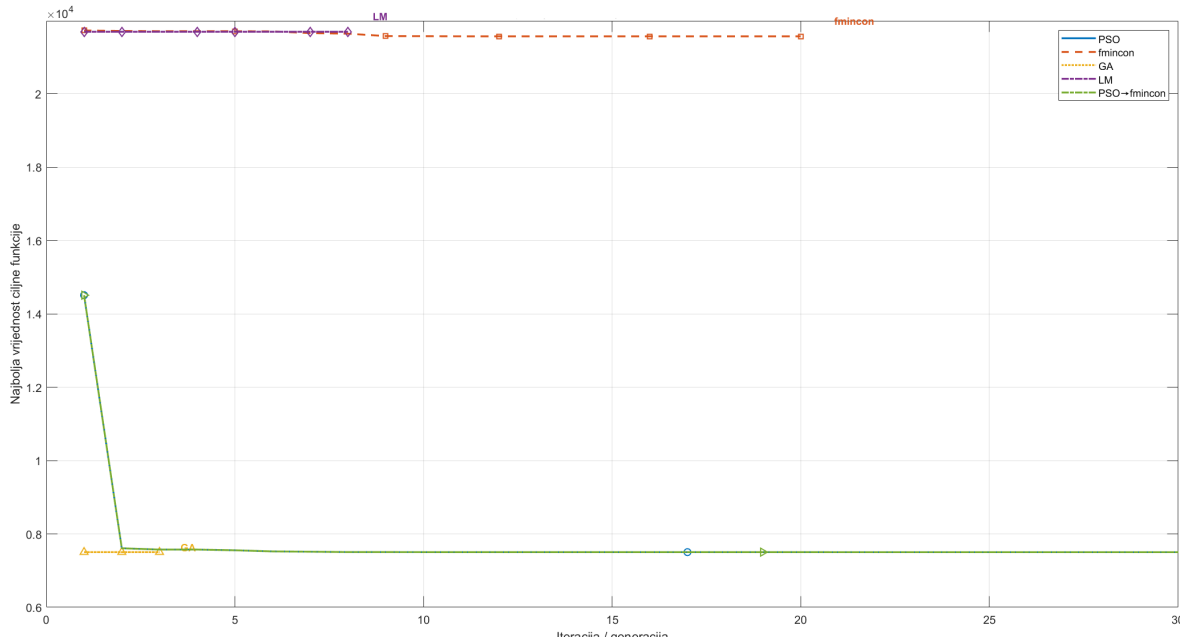
To broj parametara podiže na čak 18. Parametri pomenutog modela biće predstavljeni i objašnjeni u narednom poglavlju. Kao i kod svih modela sa asinhronim motorima i ovdje je upotrijebljena  $\rho$ -transformacija. Tabela 5.2 prikazuje značajno drugačiju situaciju u odnosu

Tabela 5.2: Rezultati optimizacije za kompletni model.

Algoritam	Konačni $f(x)$	Vreme [s]	Napomena
PSO	7503.5	244.79	Najniža greška
fmincon	21569	37.26	Značajno viša greška
GA	7504.0	909.5	Isto kao PSO, ali mnogo sporije
LM (lsqnonlin)	$10^{12}$	53.70	Divergencija
PSO → fmincon	7503.5	266.69	Bez poboljšanja u odnosu na PSO

na onu pri određivanju parametara ZIP modela. Odmah se primjećuje da fmincon i LM metode ne konvergiraju ka globalnom minimumu. PSO daje najtačniji rezultat, uz vrijeme

koje je čak kraće nego kod ZIP modela. GA pokazuje sličan trend - greška je identična kao kod PSO. Međutim, ovdje je opet vrijeme izvršavanja GA ponovo oko 4 puta duže nego kod PSO. Slično prethodnom slučaju, fmincon nije donio poboljšanje PSO metodu u hibridnom algoritmu. Slika 5.4 potvrđuje ono što se vidi u Tabeli 5.2. Slično prethodnom slučaju, za



Slika 5.4: Kompletni model - krive konvergencije različitih algoritama (PSO, GA, fmincon, LM, PSO→fmincon). Na y-osi je vrijednost funkcije cilja  $f(x)$  (MSE), a na x-osi broj iteracija/generacija.

konvergenciju GA potrebno je svega nekoliko generacija, dok je kod PSO broj iteracija veoma visok. Ipak, čak 4 puta kraće vrijeme izvršavanja PSO čini znatno bržim metodom.

Na kraju, primjenjujući ranije iznesene kriterijume, može se donijeti odluka o najboljem metodu:

- Minimalna greška - PSO u oba slučaja daje najmanje odstupanje od mjerene krive.
- Brzina konvergencije - GA u oba slučaja konvergira već poslije nekoliko generacija.
- Vrijeme izvršavanja - kod ZIP modela je najbrži bio LM metod. Za slučaj kompletnog modela LM i fmincon ne pronalaze minimum greške, dok PSO i GA postižu konvergenciju ka istoj vrijednosti. Optimizacija parametara kompletnog modela jasno pokazuje da je PSO-u potrebno čak 4 puta manje vremena za pronalazak minimuma. Isti je slučaj i kod ZIP modela.
- Opšta primjenljivost - PSO i GA optimizacioni algoritmi su pronašli optimalno rješenje kako za slučaj jednostavnog, tako i složenog modela potrošača. Međutim, postupak optimizacije traje čak 4 puta kraće za slučaj PSO algoritma.

Iz svega navedenog, može se zaključiti da je PSO optimalan metod za identifikaciju nepoznatih parametara modela potrošača. Zato će u nastavku upravo Particle Swarm biti upotrebljavan u cilju optimizovanja parametara modela konzuma.

U prethodnom poglavlju, kao najbolji optimizacioni algoritam za potrebe ovog rada odabran je Particle Swarm. Ovaj globalni algoritam pokazao se podjednako dobro u slučaju identifikacije parametara jednostavnog ZIP modela i mnogo složenijeg kompletnog modela, definisanog u [35].

Prije nego se započne proces identifikacije parametara različitih modela potrošača, potrebno je definisati pojam „optimalnog” modela. Osnovni problem definisan je jednačinom 4.1.

Uopšteno, ovakav tip problema može se zapisati kao:

$$\min E(e^2) \quad (5.3)$$

što se može rastaviti na dva dijela na sljedeći način:

$$E(e^2) = E[(y - \hat{y})^2] \quad (5.4)$$

$$= E[(y_{n-f} - \hat{y})^2] + E[n^2]. \quad (5.5)$$

Prvi sabirak desne strane 5.5 zove se greška modela, a predstavlja pravu grešku između tačne i simulirane karakteristike potrošača. Drugi sabirak je varijansa šuma. Ona se javlja usljed šumova u mjerenjima. Šumove je nemoguće opisati modelima potrošača. Očigledno, optimalan model je onaj model sa najmanjom greškom u odnosu na mjerenja. Idealno, ta greška bila bi jednaka nuli, čime bi model bio „odraz u ogledalu” realnog potrošača [40]. Greška se, dalje, može zapisati kao [46]:

$$E[(y_{n-f} - \hat{y})^2] = [y_{n-f} - E(\hat{y})]^2 + E\{[\hat{y} - E(\hat{y})]^2\} \quad (5.6)$$

što se često izražava kao:

$$(\text{Model greška})^2 = (\text{Strukturalna greška})^2 + (\text{Varijansa modela}) \quad (5.7)$$

Strukturalna greška proizilazi iz samog modela. Koliko god složen bio matematički model kojim se želi opisati mjerenje ili set mjerenja, u praksi će uvijek postojati odstupanje. Dakle, čak i model koji najviše odgovara zadatom problemu posjedovaće ovu grešku, s tim što će kod takvog modela ova greška biti veoma mala.

Posmatrajući problem samo sa tačke gledišta strukturalne greške, moglo bi se pogrešno zaključiti da složeniji model sa sobom donosi manju grešku i tačnije oponašanje stvarnosti. Ipak, u praksi je ovakva teza daleko od tačne. Razlog tome jeste greška varijanse.

Greška varijanse modela nastaje zato što se parametri modela procjenjuju na osnovu konačnog i šumovitog skupa podataka. Pošto podaci nijesu savršeni, procijenjeni parametri odstupaju od optimalnih vrijednosti, pa model ostaje podložan dodatnoj grešci. Ova greška zavisi od varijanse šuma u podacima ( $\sigma^2$ ), broja parametara modela ( $n_p$ ) i broja dostupnih uzoraka ( $N$ ). Približno važi sljedeći izraz [46]:

$$\text{Greška varijanse modela} \approx \frac{\sigma^2 n_p}{N} \quad (5.8)$$

Iz izraza (5.8) se vidi da greška raste sa povećanjem šuma i broja parametara modela, a smanjuje se sa povećanjem broja uzoraka za treniranje.

Jednačina 5.8 jasno pokazuje da strukturna greška u protivteži sa greškom varijanse. Dok strukturna greška opada sa uslozljavanjem modela, greška varijanse raste. U ovom slučaju, broj dostupnih uzoraka ( $N$ ) jednak je jedinici, jer je do sada rađen samo jedan black-start eksperiment nad test sistemom opisanim u [47].

Usljed toga, vodeći se jednačinom 5.8, **od dva modela koji daju sličnu grešku u odnosu na mjerenja, bolji je onaj model koji ima manji broj parametara**. Usljed nedostupnosti većeg broja mjerenja, složeniji modeli su mnogo osjetljiviji i mogu izazvati tzv. *overfitting*.

### Kriterijumi dobrog modela i balansiranje između bias i greške varijanse

U skladu sa [40], usvajaju se sljedeća tri principa:

1. *Model ne smije biti prejednostavan*. Suviše jednostavna struktura vodi ka velikoj **strukturnoj grešci** (bias), što se tumači kao veliko odstupanje modela od mjerenja.
2. *Model ne smije biti previše složen*. Suvišna složenost podiže **grešku varijanse** (nestabilnost procjene parametara) i slabi sposobnost generalizacije.
3. *Model zasnovan na jednom ili dva terenska testa je nepouzdan*. Malo podataka povećava **grešku varijanse**; dobar model se gradi na dužim posmatranjima.

Jasno je da već u startu, treći kriterijum ne može biti zadovoljen, pa će u nastavku fokus biti na prva dva.

### Modifikovani kompozitni sa motorima trećeg reda (23 parametara)

Najniže RMS/MAE greške za  $Q$  ukazuju da bogata struktura (ER + motori +  $B_{\text{cap}}$ ) dobro reprezentuje reaktivnu dinamiku, tj. da je *strukturno ograničenje* za  $Q$  malo (princip br. 1). Za  $P$  greška je viša nego kod ER, što je u skladu sa očekivanim rastom *komponente varijanse* kod većeg broja parametara (princip br. 2). U zoni uključenja dio neslaganja se može pripisati i redukciji motornog modela na III red (ograničeno hvatanje ultra-brzih prelaza).

### Modifikovani kompozitni sa motorima petog reda (23 parametara)

U cilju utvrđivanja uticaja odabira matematičkog modela motora na odzive snage, izvedena je optimizacija prethodnog modela, samo sa najsloženijim modelima asinhronih motora

Tabela 5.3: Sažetak optimizacija: broj parametara i statistika greške.

Model	Br. param.	RMS $P$ (pu)	RMS $Q$ (pu)	MAE $P$ (pu)	MAE $Q$ (pu)
Modifikovani kompozitni (3rd IM)	23	0.0057	0.0017	0.0023	0.0013
Modifikovani kompozitni (5th IM)	23	0.0041	0.0037	0.0019	0.0028
Exponential Recovery	12	0.0041	0.0041	0.00329	0.0034
Adaptive Load	12	0.0048	0.0080	0.0031	0.0058
ZIP	10	0.0050	0.0081	0.0032	0.0057
ZIP + motori (3rd IM)	18	0.0056	0.0068	0.0028	0.0051

petog reda. Dok simulirana reaktivna snaga u poređenju sa prethodnim slučajem ima neznatno veće odstupanje od mjerenja, karakteristika aktivne snage pokazuje veće podudaranje. Kako bi broj parametara motora ostao jednak 23, uvedena su sljedeća pojednostavljena:  $R_s = R_r$  za oba motora, kao i  $D_{motor} = D_{motor,s} \approx 0$ . To ukazuje da redukcija modela ipak može imati veze sa izgledom odziva u zoni uključenja.

### Exponential Recovery (12 parametara)

Daje najniži empirijski rizik za  $P$  (najmanje RMS/MAE). To je dobar „srednji“ kapacitet: dovoljno fleksibilan da smanji strukturnu grešku, a dovoljno kompaktan da varijansa ne dominira (dobar kompromis između principa 1 i 2). Za  $Q$  je slabiji od kompozitnog jer nema eksplicitne motorne/kapacitivne mehanizme; ovdje se prepoznaje *strukturno ograničenje*  $Q$ -komponente.

### Adaptive Load (12 parametara)

Prihvatljiv za  $P$ , ali *značajno lošiji* za  $Q$ ; optimizacija praktično vraća gotovo konstantnu  $Q$ -krivu. To je tipičan signal da je *struktura modela* neadekvatna za reaktivnu dinamiku (dominira sistematska komponenta ukupne greške), iako broj parametara nije veliki.

### ZIP (10 parametara, statički)

Konzistentno veće greške, posebno za  $Q$ . Najmanji broj parametara implicira malu varijansu procjene, ali *statička* priroda ne može da reprodukuje tranzijente ni zavisnost od frekvencije  $\rightarrow$  dominira *strukturna greška* (jasna ilustracija prvog principa: „prejednostavan model“).

### ZIP + motori (3rd IM, 18 parametara)

Dodavanjem motorne dinamike *smanjuje se strukturno ograničenje* ZIP-a (sve metrike bolje nego kod čistog ZIP-a), ali ukupni rezultat ostaje između ER i kompozitnog: broj parametara raste (povećan rizik varijanse), dok je bazna struktura i dalje skromnija od kompozitne. Međutim, upotreba ovog modela se nije pokazala opravdanom, jer ER sa čak 6 parametarsa manje daje znatno bolji rezultat.

U zbiru, za posmatrani eksperiment: *ER (12 param.)* je najefikasniji (jednostavnost i tačnost) za  $P$ ; *kompozitni (23 param.)* ostaje najadekvatniji za  $Q$ . Međutim, upotreba složenije dinamike asinhronih motora dokazala je da odstupanja karakteristike aktivne snage u trenutku uključenja mogu zavisiti od stepena modela motora. Tako, *upotreba motora petog reda daje identičnu grešku aktivne snage kao ER model*. Ipak, u datoj situaciji je ER, kao znatno jed-

Br.	Parametar	$x_0$	Granice	Optimizovano
1	$P_{0\text{high}}$	3.000	[3, 3.5]	3.0262
2	$Q_{0\text{high}}$	0.800	[0.8, 3]	1.0124
3	$T_p$	7.000	[0, 30]	25.171
4	$T_q$	28.000	[0, 30]	27.537
5	$N_{ps}$	0.040	[0, 20]	1.6132
6	$N_{pt}$	15.000	[0, 20]	1.4770
7	$N_{qs}$	0.050	[0, 20]	13.565
8	$N_{qt}$	0.070	[0, 20]	5.2309
9	$N_{fps}$	5.500	[0, 20]	3.0081
10	$N_{fqs}$	0.095	[0, 20]	3.1189
11	$N_{fpt}$	0.045	[0, 20]	2.4503
12	$N_{fmt}$	0.057	[0, 20]	0.0455
13	$B_{\text{cap}}$	0.030	[-0.08, 0.08]	0.0235
14	$k_b$ (veliki)	15.000	[5, 15]	13.189
15	$\rho$ (veliki)	0.070	[0.0575, 0.0894]	0.0882
16	$R_r$ (veliki)	5.000	[3, 8.5]	6.3495
17	$T_0$ (veliki)	0.040	[0.01, 0.06]	0.0100
18	$H_{\text{motor}}$	0.004	[0.0002, 0.1]	0.0197
19	$k_{bs}$ (mali)	15.000	[10, 15]	11.151
20	$\rho_s$ (mali)	0.070	[0.0575, 0.0894]	0.0647
21	$R_{r,s}$ (mali)	5.000	[3, 8.5]	8.4201
22	$T_{0,s}$ (mali)	0.040	[0.01, 0.06]	0.0100
23	$H_{\text{motor},s}$	0.004	[0.0002, 0.01]	0.00037

Tabela 5.4: Parametri i granice modifikovanog kompozitnog modela sa motorima trećeg reda.

nostavniji model, mnogo primjenljiviji za modelovanje konzuma. ZIP-varijante su korisne kao referenca: uz znatno dobijanje na fleksibilnosti kada im se pridoda minimalna dinamika (ZIP+motori), ali bez dostizanja performansi ER/kompozitnog.

Tabele prikazuju početne vrijednosti  $x_0$ , granice  $[lb, ub]$  i optimizovane vrijednosti za svaki model. Ispod svake tabele dat je kratak komentar o vrijednostima parametara dobijenih optimizacijom.

## 5.2 Modifikovani kompozitni model (ER + $B_{\text{cap}}$ + veliki i mali motor)

U Tabeli 5.4 predstavljeni su parametri modifikovanog kompozitnog modela sa motorima trećeg reda. Vrijednosti  $T_p$  i  $T_q$  su visoke i udaljene od donje granice, što ukazuje na sporiji oporavak ER komponente. Eksponenti osjetljivosti su pretežno u gornjoj polovini opsega (posebno  $N_{qs}$ ), dok je  $B_{\text{cap}} > 0$ , pa potrošač pokazuje blago kapacitivni karakter. Kod motora, opterećenja na osovini ( $T_0$ ,  $T_{0,s}$ ) su na donjoj granici, inercije su jasno razdvojene ( $H_{\text{motor}} \gg H_{\text{motor},s}$ ), a koeficijenti skaliranja reaktansi ( $k_b$ ,  $k_{bs}$ ) nalaze se u gornjoj polovini opsega. Otpornosti rotora su bliže gornjim granicama (izraženije kod malog motora), dok je  $\rho$  velikog motora blizu gornje granice, a  $\rho_s$  u srednjem dijelu opsega.

Br.	Parametar	$x_0$	Granice	Optimizovano
1	$P0_{\text{high}}$	3.000	[3, 3.5]	3.0045
2	$Q0_{\text{high}}$	0.800	[0.8, 3]	1.3647
3	$T_p$	7.000	[0, 30]	30.000
4	$T_q$	28.000	[0, 30]	13.945
5	$N_{ps}$	0.040	[0, 20]	4.0992
6	$N_{pt}$	15.000	[0, 20]	8.6567
7	$N_{qs}$	0.050	[0, 20]	0.0069
8	$N_{qt}$	0.070	[0, 20]	19.999
9	$N_{fps}$	5.500	[0, 20]	5.5779
10	$N_{fqs}$	0.095	[0, 20]	5.0762
11	$N_{fpt}$	0.045	[0, 20]	1.5627
12	$N_{fmt}$	0.057	[0, 20]	0.0044
13	$B_{\text{cap}}$	0.030	[-0.08, 0.08]	0.0118
14	$k_b$ (veliki)	15.000	[5, 15]	14.942
15	$\rho$ (veliki)	0.070	[0.0575, 0.0894]	0.0597
16	$R_r$ (veliki)	5.000	[3, 8.5]	8.1852
17	$T_0$ (veliki)	0.040	[0.01, 0.06]	0.0310
18	$H_{\text{motor}}$	0.004	[0.0002, 0.1]	0.0002
19	$k_{bs}$ (mali)	15.000	[10, 15]	10.000
20	$\rho_s$ (mali)	0.070	[0.0575, 0.0894]	0.0577
21	$R_{r,s}$ (mali)	5.000	[3, 8.5]	7.5560
22	$T_{0,s}$ (mali)	0.040	[0.01, 0.06]	0.0334
23	$H_{\text{motor},s}$	0.004	[0.0002, 0.01]	0.0002

Tabela 5.5: Parametri i granice modifikovanog kompozitnog modela sa motorima petog reda.

U Tabeli 5.5 predstavljeni su parametri modifikovanog kompozitnog modela sa motorima petog reda. Susceptansa je i dalje pozitivna, ali bliža nuli ( $B_{\text{cap}} \approx 0.012$ ), pa je kapacitivni karakter slabiji nego u varijanti sa motorima trećeg reda. Konstanta  $T_p$  saturira na gornjoj granici, dok je  $T_q$  u srednjem dijelu opsega. Eksponenti pokazuju izraženu disperziju:  $N_{qt}$  je praktično na gornjoj granici, a  $N_{qs} \approx 0$  i  $N_{fmt} \approx 0$ , što ukazuje da ER komponenta reaktivnog opterećenja dominatno reaguje na promjene napona, a znatno manje na frekvenciju. Kod motora,  $k_b$  je na gornjoj, a  $k_{bs}$  na donjoj granici opsega; otpornosti rotora ( $R_r, R_{r,s}$ ) su bliže gornjim granicama. Parametri inercije padaju na minimalnu dozvoljenu vrijednost za oba motora ( $H_{\text{motor}} = H_{\text{motor},s} = 0.0002$ ), pa se razlika u inerciji ovdje praktično gubi; opterećenja na osovini ( $T_0, T_{0,s}$ ) prelaze sa donje na srednje vrijednosti. Parametri  $\rho$  su pomjereni ka donjoj granici opsega (posebno za veliki motor), što je konzistentno sa održavanjem povoljnog faktora snage uz zadate granice reaktansi.

### 5.3 Exponential Recovery (ER)

U Tabeli 5.6 prikazani su optimizovani parametri ER modela. Uočava se da je  $T_p$  na gornjoj granici opsega, dok je  $Q0_{\text{high}}$  na donjoj. Naponski eksponent  $N_{qt}$  praktično saturira na gornjoj granici, dok je  $N_{qs} = 0$ , što ukazuje da reaktivna snaga dominantno reaguje na promjene napona tokom prelaznog procesa. Frekventni eksponenti  $N_{fmt} \approx 0$  i  $N_{fqs} = 0$

Br.	Parametar	$x_0$	Granice	Optimizovano
1	$P0_{\text{high}}$	3.242755	[3, 5]	3.6721
2	$Q0_{\text{high}}$	1.271093	[1.2, 5]	1.2
3	$T_p$	0.521595	[0, 25]	25
4	$T_q$	11.16911	[0, 20]	7.0824
5	$N_{ps}$	4.92644	[0, 15]	0.16626
6	$N_{pt}$	14.99819	[0, 15]	2.055
7	$N_{qs}$	0	[0, 15]	0
8	$N_{qt}$	15	[0, 15]	14.998
9	$N_{fps}$	1.502954	[0, 15]	4.0841
10	$N_{fqs}$	1.275081	[0, 15]	0
11	$N_{fpt}$	1.586284	[0, 15]	1.4154
12	$N_{fmt}$	0	[0, 15]	$6.2387 \cdot 10^{-11}$

Tabela 5.6: Parametri ER modela.

Br.	Parametar	$x_0$	Granice	Optimizovano
1	$P0_{\text{high}}$	4.2066	[3, 5]	4.2066
2	$Q0_{\text{high}}$	1.5912	[1.2, 5]	1.7912
3	$T_p$	0.0052886	[0, 25]	0.0052886
4	$T_q$	0.0032372	[0, 25]	0.0032372
5	$N_{ps}$	0.025761	[0, 25]	0.025761
6	$N_{pt}$	0	[0, 25]	0
7	$N_{qs}$	0.002105	[0, 25]	0.0021053
8	$N_{qt}$	1.557	[0, 25]	1.557
9	$M_{ps}$	1.5175	[0, 25]	1.5175
10	$M_{pt}$	25.00	[0, 25]	25
11	$M_{qs}$	$1.4899 \cdot 10^{-6}$	[0, 25]	$1.4899 \cdot 10^{-6}$
12	$M_{qt}$	9.6443	[0, 25]	9.6443

Tabela 5.7: Parametri Adaptive Load modela.

sugerisu da je  $Q$  praktično neosjetljiva na promjene frekvencije, dok povišena vrijednost  $N_{fps}$  i umjerena  $N_{fpt}$  ukazuju na ograničenu, ali prisutnu frekventnu osjetljivost aktivne snage  $P$ .

## 5.4 Adaptive Load (sa frekventnom zavisnošću)

U Tabeli 5.7 prikazani su optimizovani parametri Adaptive Load modela. Vrijednosti vremenskih konstanti  $T_p$  i  $T_q$  su vrlo male (reda milisekundi), što ukazuje na izrazito brzu reakciju modela. Parametar  $M_{pt}$  dostiže svoju gornju granicu, dok su naponski eksponenti  $N_{ps}$  i  $N_{qs}$  veoma mali, a  $M_{qs}$  praktično jednak nuli. Takav odnos parametara ukazuje da model ne uspijeva adekvatno da prikaže dinamiku reaktivne snage, te su RMS i MAE greške veće.

Br.	Parametar	$x_0$	Granice	Optimizovano
1	$P_0$	3.3	[0, 5]	4.0368
2	$\alpha_P$	0.34	[0, 1]	0.00091821
3	$\beta_P$	0.33	[0, 1]	0.99881
4	$\gamma_P$	0.33	[0, 1]	0.00027453
5	$\delta_P$	0.00	[-0.5, 0.5]	1.4123
6	$Q_0$	1.5	[0, 3]	0.035792
7	$\alpha_Q$	0.34	[0, 1]	0.96993
8	$\beta_Q$	0.33	[0, 1]	0.026922
9	$\gamma_Q$	0.33	[0, 1]	0.0031473
10	$\delta_Q$	0.00	[-0.5, 0.5]	1.5

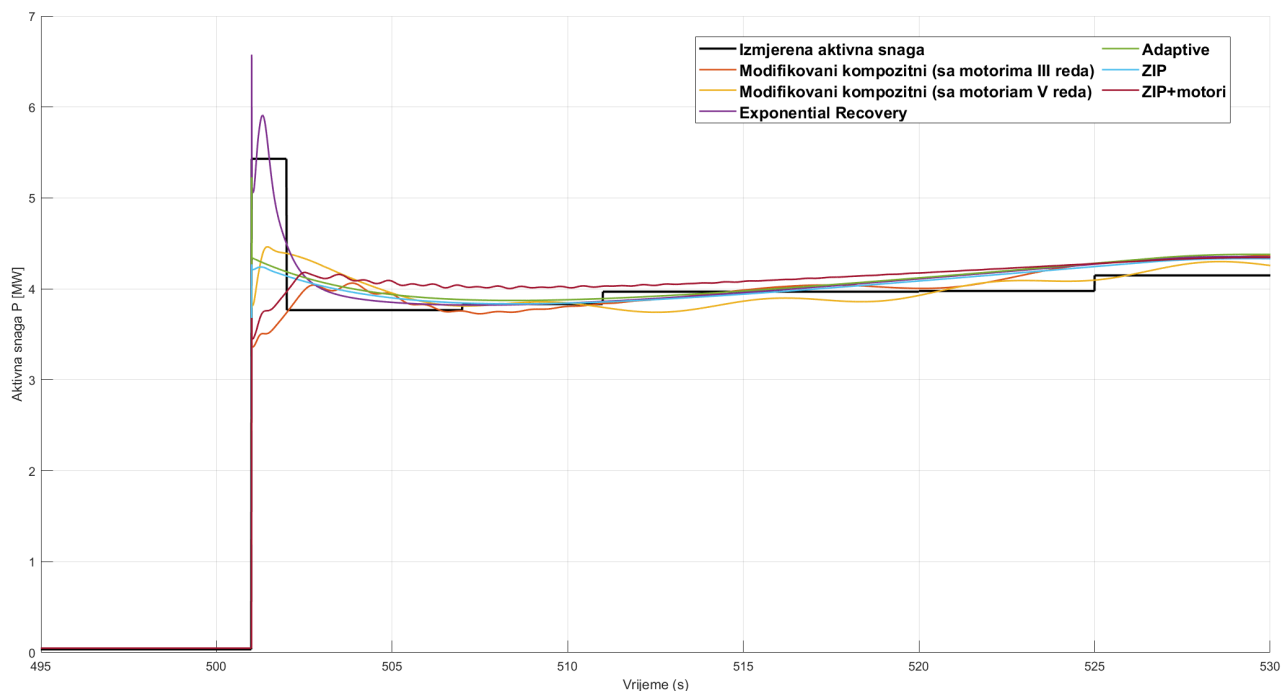
Tabela 5.8: Parametri ZIP modela ( $\alpha + \beta + \gamma = 1$  zadovoljen).

Br.	Parametar	$x_0$	Granice	Optimizovano
1	$P_{0,high}$	4.20	[3.0, 5.0]	3.4897
2	$Q_{0,high}$	1.00	[1.2, 4.6]	1.2000
3	$a_P$	0.30	[0, 1]	0.0000
4	$b_P$	0.60	[0, 1]	0.028965
5	$d_P$	0.10	[-1, 1]	0.99986
6	$a_Q$	0.20	[0, 1]	0.0000
7	$b_Q$	0.70	[0, 1]	0.96607
8	$d_Q$	-0.05	[-0.6, 0.6]	-0.59998
9	$k_b$	15.0	[5, 15]	15.0
10	$\rho$	0.0742	[0.0575, 0.0894]	0.061971
11	$R_r$	5.0	[3, 8]	7.9999
12	$T_0$	0.040	[0.01, 0.06]	0.010001
13	$H_{motor}$	0.040	[0.0002, 0.10]	0.0002
14	$k_{bs}$	15.0	[10, 50]	27.603
15	$\rho_s$	0.0742	[0.0575, 0.0894]	0.0575
16	$R_{r,s}$	5.5	[3.5, 8.5]	8.3374
17	$T_{0,s}$	0.020	[0.005, 0.06]	0.0050004
18	$H_{motor,s}$	0.004	[0.0001, 0.01]	0.0001026

Tabela 5.9: Parametri ZIP+motori kompozitnog modela (novi skup).

## 5.5 Statički ZIP model

U Tabeli 5.8 prikazani su optimizovani parametri ZIP modela. Frekventni koeficijenti  $\delta_P$  i  $\delta_Q$  dostižu granične vrijednosti, što ukazuje na njihovu snažnu saturaciju. Naponske komponente aktivne snage teže modelu konstantne struje, dok komponente reaktivne snage pokazuju osobine modela konstantne snage. Ovakav raspored parametara sugerira ograničenu sposobnost ZIP modela da vjerodostojno prikaže tranzijentno ponašanje konzuma u za slučaj velikih promjena napona i frekvencije.

Slika 5.5: Poređenje mjerenja i različitih modela za aktivnu snagu  $P$ 

## 5.6 ZIP model sa dodatkom motora trećeg reda (ZIP+motori)

U Tabeli 5.9 prikazani su optimizovani parametri kompozitnog ZIP+motori modela. Uočen je veći broj parametara koji se nalaze blizu granica svojih dozvoljenih vrijednosti:  $k_b$  dostiže gornju granicu, dok su  $R_r$  i  $R_{r,s}$  u njenoj neposrednoj blizini. Parametri  $T_0$  i  $H_{\text{motor}}$  kod velikog motora, kao i  $T_{0,s}$  i  $H_{\text{motor},s}$  kod malog motora, nalaze se na donjoj granici, što ukazuje na vrlo nisku mehaničku inerciju. U ZIP dijelu modela, naponske komponente  $a_P$  i  $a_Q$  teže nuli, dok su *frekventni* koeficijenti izraženi:  $d_P \approx 1$  i  $d_Q \approx -0.6$ , što potvrđuje izraženu frekventnu osjetljivost potrošnje. Parametri  $k_{bS}$  i  $R_{r,s}$  zauzimaju gornju polovinu svojih opsega, što ukazuje na izraženiji uticaj malih motora u ukupnom konzumu.

## 5.7 Komparativna analiza simuliranih karakteristika različitih modela potrošača u odnosu na mjerenja

Iako je Tabela 5.3 bila dosta indikativna po pitanju prikaza statističkih grešaka modela, kompletan uvid u tačnost pojedinačnih modela konzuma može se dobiti samo grafičkim prikazom. Tako, Slika 5.5 na jednom grafiku daje komparativni prikaz izmjerene i simuliranih karakteristika aktivne snage za slučaj svih modela upotrijebljenih u ovom radu. Prikaz na Slici 5.5 samo potvrđuje indicacije izvedene iz Tabele 5.3. Modifikovani kompozitni model lošiji je u pogledu oponašanja karakteristike aktivne snage u poređenju sa jednostavnijim

Exponential Recovery (ER) modelom. Sada je jasnije, veoma kratak interval visokog opterećenja neposredno nakon uključenja konzuma nije moguće na pravi način opisati modelima sa asinhronim motorima. Čak ni upotreba veoma složenog modela asinhronog motora petog reda nije uspjela opisati ovaj fenomen na pravi način. Modifikovani kompozitni model sa motorima trećeg reda, isto kao i kompozitni model sačinjen od ZIP potrošača i motora imaju znatno veće odstupanje od ER, na šta ukazuje i Tabela 5.3. Podsjećanja radi, ista tabela pokazuje da je RMS modifikovanog kompozitnog modela sa motorima petog reda jednaka onome koji daje ER model. Ipak, Slika 5.5 ukazuje na veliku razliku među ovim modelima, pa se tako može zaključiti da ER model mnogo tačnije oponaša tranzijente neposredno nakon uključenja.

Preciznost ER modela navodi na jednu interesantnu mogućnost: početna dinamika aktivne snaga (povećana snaga nakon samog uključenja) vrlo vjerovatno nije posljedica postojanja značajnog udjela motornih potrošača u ukupnom konzumu. Ovaj fenomen je vrlo vjerovatno posljedica poremećaja frekvencije i napona izazvanih uključenjem potrošačkog izvoda.

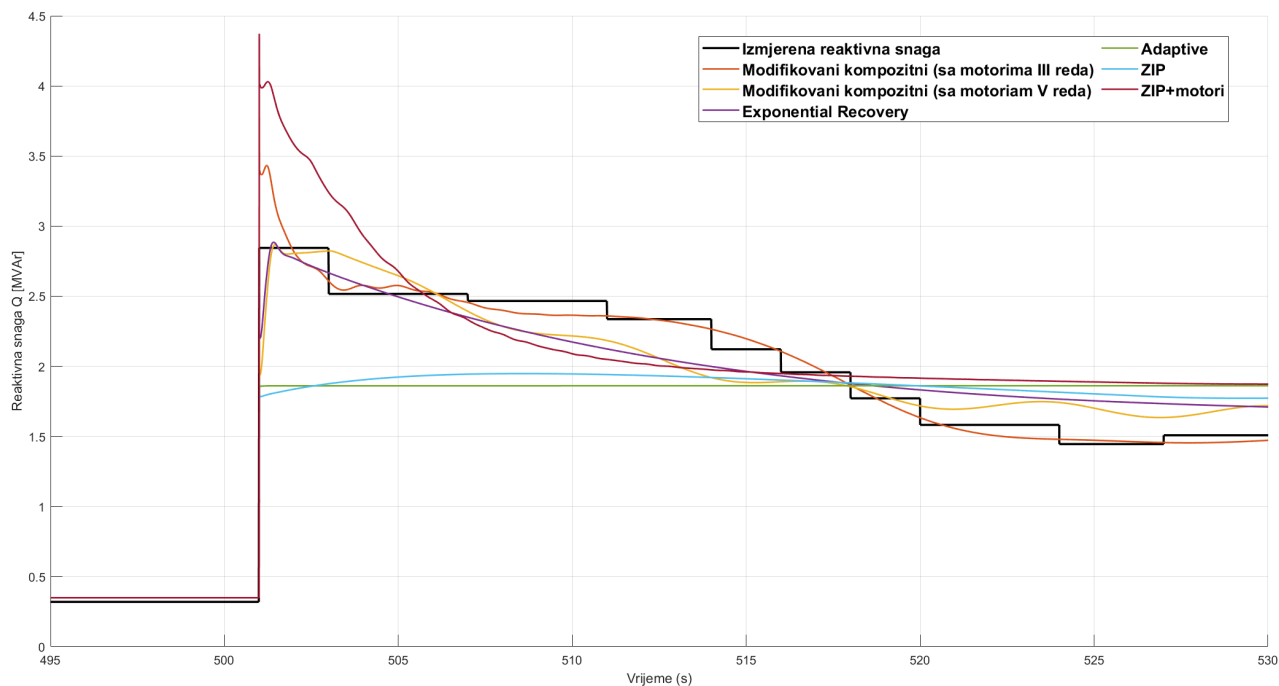
Time bi se moglo objasniti zašto model sa gotovo duplo manje parametara (Exponential Recovery) mnogo bolje opisuje ponašanje potrošača od znatno složenijih, kompozitnih modela. Što se tiče adaptivnog modela, posmatrajući grafik može se utvrditi da dosta korektno opisuje karakteristiku aktivnog opterećenja konzuma.

Očekivano, ZIP model, kao jedini predstavnik statičkih modela jednostavno nema fleksibilnost da opiše ponašanja izazvana poremećajima napona i frekvencije koji izlaze izvan opsega karakterističnog za normalne radne režime. Time je potvrđen tvrdnja iznesena u [25] o neophodnosti upotrebe dinamičkih modela u uslovima ostrvskih sistema.

Razlika između odziva simuliranih modela potrošača smanjuje se u trenutku  $t = 530s$ , kada modeli počinju da konvergiraju ka istoj horizontalnoj pravoj. Može se primijetiti da se kod modifikovanog kompozitnog modela sa motorima petog reda javljaju oscilacije koje traju do kraja simulacije. Ove oscilacije vjerovatno su težnja PSO algoritma da vjerno prati blago povećanje snage pri kraju posmatranog intervala, što ukazuje na potencijalni *overfitting* modela. Slika 5.6 daje uporedni prikaz simuliranih krivih reaktivne snage u odnosu na mjerenja. Tu je situacija nešto raznovrsnija nego po pitanju aktivne snage, ali i dalje dobro oslikava podatke o statističkim greškama datim u Tabeli 5.3.

U početku, moguće je potpuno eliminisati dva modela: adaptivni i ZIP model. Oba modela vrlo neprecizno opisuju reaktivnu snagu potrošača, pri čemu je, iznenađujuće, adaptivni model lošiji od ZIP-a.

Model komponovan od ZIP potrošača sa dodatkom asinhronih motora trećeg reda posjeduje mnogo veću fleksibilnost od prethodna dva modela. Međutim, u ovom slučaju je znatno premašio početnu izmjerenu reaktivnu snagu. Kako se na grafiku vidi, neposredno nakon uključenja, izmjerena je reaktivna snaga vrijednosti približno 2.85 MVA<sub>r</sub>, dok pomenuti model daje 4.4 MVA<sub>r</sub>. Ni na ostatku intervala, ovaj model se nije pokazao mnogo preciznim, pa



Slika 5.6: Poređenje mjerenja i različitih modela za reaktivnu snagu  $Q$

prikaz na Slici 5.6 dosta dobro oslikava vrijednosti RMS od 0.272 MVA<sub>r</sub> i MAE od 0.204 MVA<sub>r</sub> koje su više samo kod ZIP i adaptivnog modela.

Modifikovani kompozitni modeli dosta bolje opisuju reaktivni odziv. Tako model sa motorima trećeg reda daje najbolje podudaranje. Iako je i kod njega prisutan blagi preskok u početnim sekundama nakon uključjenja (3.43 MVA<sub>r</sub> naspram izmjerenih 2.85 MVA<sub>r</sub>), već nakon par sekundi simulirana karakteristika gotovo idealno prati izmjerenu. Iznenađujuće je da složeniji model motora ne doprinosi boljoj reaktivnoj karakteristici. Tako, upotrebom motora petog reda umjesto modela trećeg reda, dobija se nešto lošije podudaranje reaktivne snage sa mjerenjima. U početnim trenucima simulirana kriva dosta dobro oponaša izmjerenu, međutim, u nastavku je odstupanje veće, a i ovdje se javljaju gorepomenute oscilacije koje mogu ukazati na *overfitting*.

Exponential Recovery model je manje precizan nego obje varijante modifikovanog kompozitnog modela. Međutim, ovaj model simulira reaktivni odziv potrošača mnogo tačnije od ZIP, adaptivnog kao i kombinacije ZIP modela i motora.

## 6. ANALIZA UTICAJA MODELA ELEKTRODISTRIBUTIVNOG KONZUMA NA FREKVENCIJU I NAPONSKE PRILIKE U MREŽI

Kako bi se ocijenila primjenljivost matematičkih modela potrošača opisanih i testiranih u prethodnom poglavlju, potrebno je vidjeti kako svaki od njih utiče na parametre sistema. U uvodnim poglavljima već je pomenut značaj poznavanja ponašanja konzuma tokom black-start procesa, kako bi se cio postupak restauracije mogao isplanirati i izbjegli neželjeni scenariji [5]. Jedan od tih scenarija jeste reagovanje podfrekventne, odnosno nadfrekventne zaštite, čime bi došlo do ispada potrošnje, odnosno generatorskih jedinica [6].

Poređenje uticaja različitih modela potrošača na frekvenciju i naponske prilike tokom procesa restauracije biće izvršeno nad testnim black-start sistemom opisanom u [47], a ranije prikazanim na slikama 5.1 i 5.2. Referenca za frekventne odzive biće mjerenja prikupljena sa SCADA-e.

Kako je testni sistem detaljno opisan na početku 5. poglavlja, u nastavku su dati samo načini modelovanja turbinskog, odnosno regulatora pobude. Turbinski regulator predstavlja zasigurno najvažniji element za ovaj proračun, jer će od njegovih osobina zavisiti frekventni odziv generatora. U zavisnosti od vremenskih konstanti hidroregulatora i njihovih aktuatora, pad frekvencije se može ublažiti. Presudne za pravovremeno angažovanje primarne regulacione snage su dovoljne brzine regulacije primarnih regulatora i upotreba aktuatora sa dovoljnom brzinom zatvarača [48]. Kako se generatorska jedinica pomenutog testnog sistema nalazi u HE Perućica, turbinski regulator biće modelovan HYGOCR modelom.

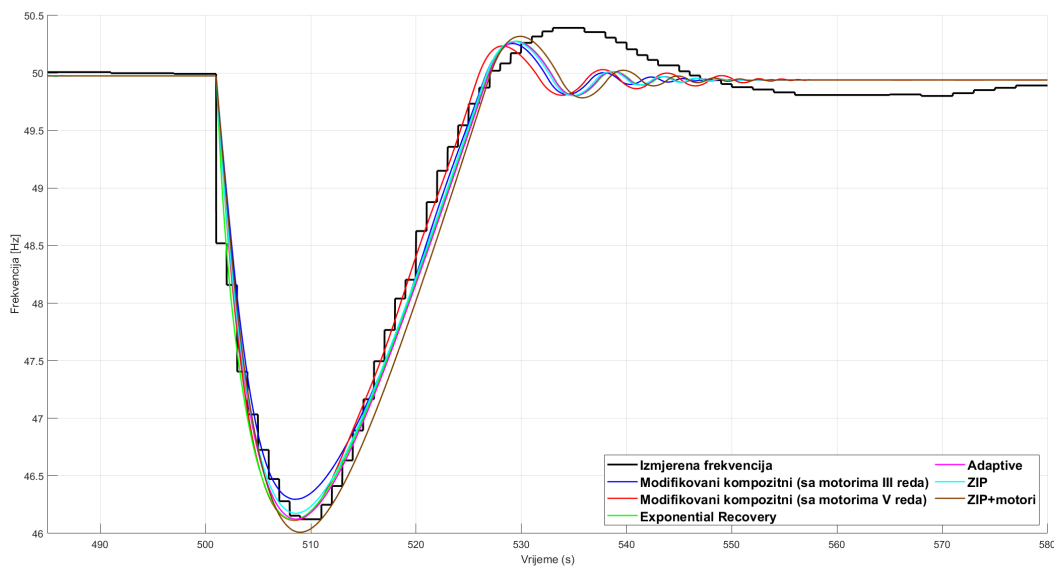
U HE Perućica koriste se elektrostatički regulatori pobude. Prema tome, u simulaciji je korišćen ST1A model pobudnog sistema, kreiran tako da odgovara verziji predstavljenoj u korisničkom uputstvu NEPLAN softvera [49]. U modelu je zanemaren ulaz VOS koji dolazi sa stabilizatora elektroenergetskog sistema i njegova vrijednost je uzeta kao nulta. Kao što je i rečeno, za modelovanje generatora uzet je subtranzijentni, detaljni Parkov model. Time je kompletiran model sinhronog generatora G1, nazivne snage 40 MVA u HE Perućica.

Parametri turbinskog regulatora određeni su na bazi mjerenja, na isti način kao u [47] i dati su u Prilogu. Za regulator pobude uzeti su karakteristične vrijednosti parametara.

### 6.1 Frekventni odzivi

Simulirani odzivi frekvencije upoređeni su sa eksperimentalnim mjerenjima tokom black-start eksperimenta.

Na Slici 6.1 su uporedno prikazani odzivi frekvencije različitih simuliranih modela potrošača zajedno sa izmjerenim frekventnim odzivom. Minimalne i maksimalne vrijednosti za sve

Slika 6.1: Poređenje izmjerenog i simuliranih odziva frekvencije  $f$ .

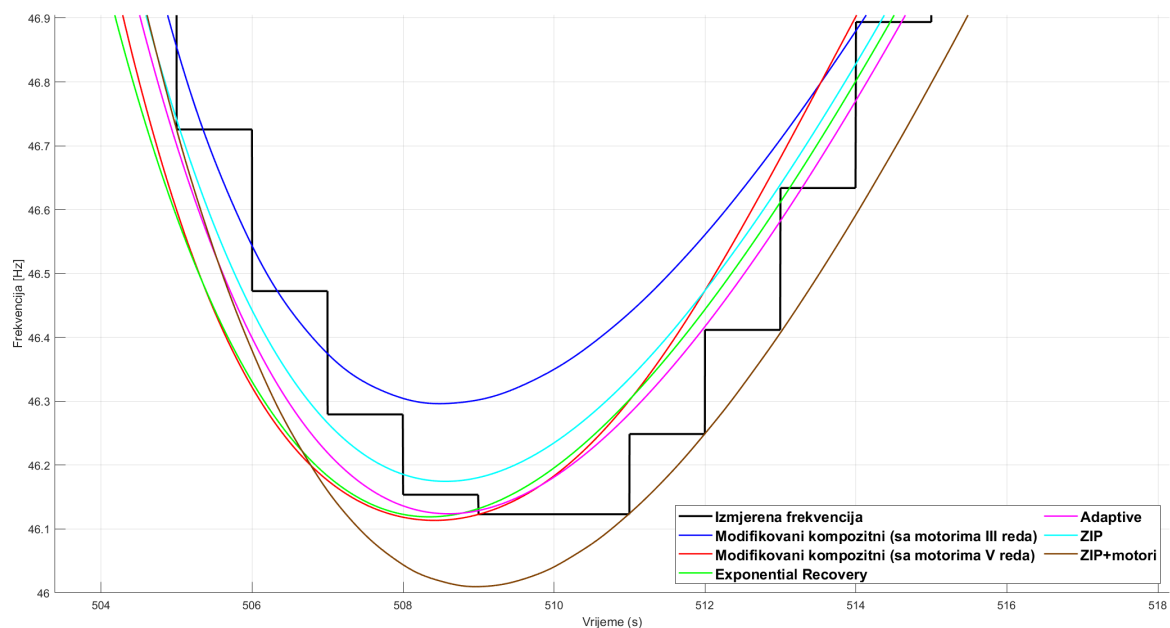
Model	Minimalna frekvencija [Hz]	Maksimalna frekvencija [Hz]
Mjerenje (referenca)	46.12	50.39
Modif. kompozitni (3rd Order IM)	46.29	50.25
Modif. kompozitni (5th Order IM)	46.11	50.23
Exponential Recovery	46.11	50.27
Adaptive Load	46.12	50.27
ZIP	46.17	50.27
ZIP + motori	46.00	50.32

Tabela 6.1: Usporedni prikaz minimalnih i maksimalnih vrijednosti frekvencije za različite modele.

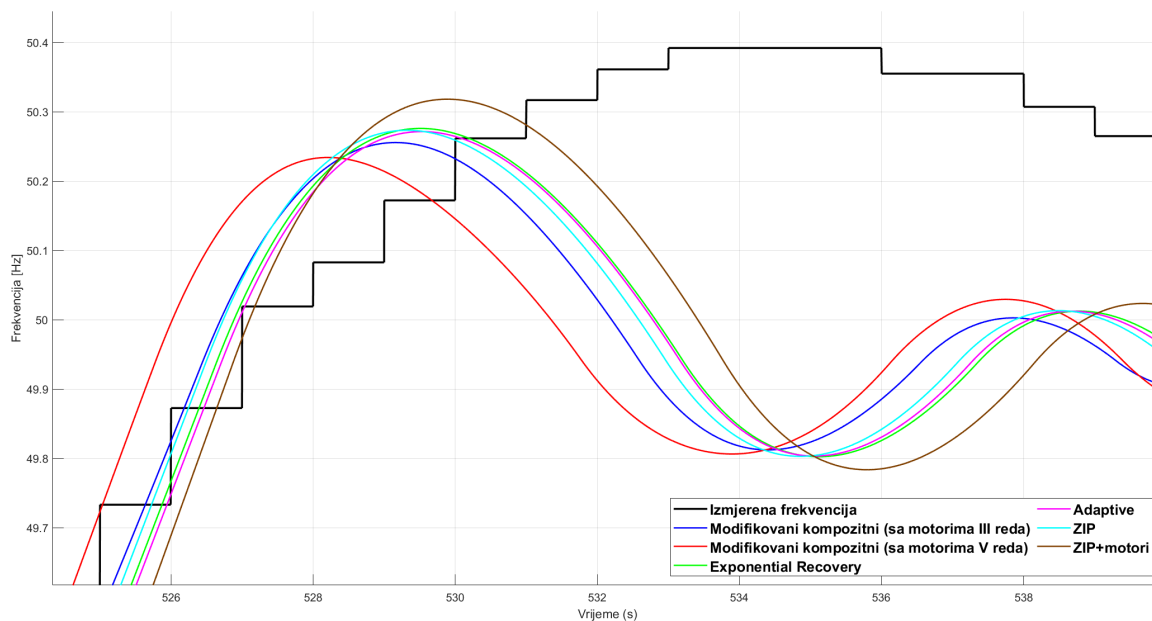
razmatrane modele date su u Tabeli 6.1. Generalni zaključak je da se svi simulirani odzivi nalaze u malom rasponu oko izmjerene frekventnog odziva. Međutim, u cilju donošenja odluke koji je model najadekvatniji za primjenu u studijama restauracije, u nastavku je data kratka analiza.

Sa aspekta propada frekvencije, modeli koji daju rezultate veoma bliske izmjerenom minimumu od 46.12 Hz su adaptivni, Exponential Recovery i modifikovani kompozitni sa motorima petog reda. Modifikovani kompozitni model u kom su motori dati modelom trećeg reda daje najmanji propad - 46.29 Hz.

Tokom planiranja postupka restauracije je od posebnog interesa imati podatak o minimalnoj mogućoj vrijednosti frekvencije. Drugim riječima, podatak o maksimalnom propadu frekvencije vrlo je važan jer se time može izbjeći situacija da djelovanje podfrekventnih zaštitnih funkcija releja onemogući povratak sistema u pogon. Zato je korisno vidjeti koji model daje najpessimističniji scenario po pitanju frekvencije. Ovdje je to model sačinjen od



(a) minimumi frekventnih odziva



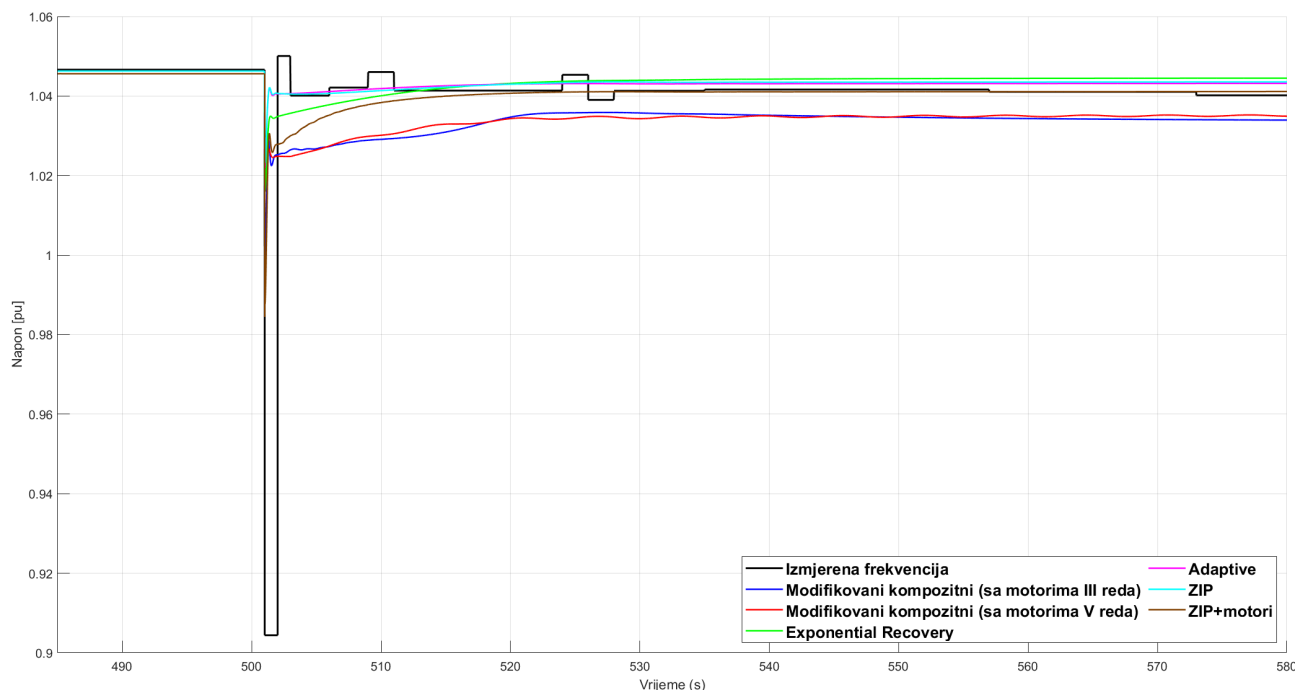
(b) maksimumi frekventnih odziva

Slika 6.2: Ekstremi frekventnih odziva

ZIP opterećenja, velikog i malog asinhronog motora. Upravo taj model daje i najveći preskok frekvencije: 50.32 Hz u poređenju sa izmjerenim preskokom od 50.39 Hz.

## 6.2 Naponski odzivi

Slika 6.3 daje uporedni prikaz simuliranih odziva napona zajedno sa izmjerenim naponom sabirnice 110 kV u TS Danilovgrad. S obzirom da su naponski odzivi veoma brzi, grafički

Slika 6.3: Poređenje izmjerenog i simuliranih odziva napona  $U$ .

Model	Minimalni napon [p.u.]
Mjerenje (referenca)	0.900
Modif. kompozitni (3rd Order IM)	0.993
Modif. kompozitni (5th Order IM)	1.009
Exponential Recovery	1.012
Adaptive Load	1.021
ZIP	1.023
ZIP + motori	0.984

Tabela 6.2: Uporedni prikaz minimalnih vrijednosti napona za različite modele.

prikaz nije optimalan za pronalaženje minimalnih vrijednosti napona, pa će iste biti date tabelarno, u Tabeli 6.2. Razlog nepodudaranja izmjerene minimalne vrijednosti napona sa minimumima simuliranih krivih jeste taj što, za razliku od parametara regulatora turbine, parametri ST1A sistema pobude nisu određeni na osnovu mjerenja, već su uzete karakteristične vrijednosti. Ipak, može se ocijeniti kako pojedini modeli utiču na napon.

Slično kao za slučaj frekvencije, ovdje je takođe kombinacija ZIP modela i motora trećeg reda najekstremniji slučaj. Upotreba ovog modela rezultovala je najvećim propadom napona. Na kraju, može se napraviti kratka analiza kako bi se odgovorilo na pitanje: zašto baš ovaj model (ZIP+motori) daje najekstremnije rezultate sa aspekta propada frekvencije i napona? Za početak, ako se obrati pažnja na Sliku 5.5 uočava se da aktivna snaga dobijena simulacijom ER modela, iako ima najveću početnu vrijednost, taj period traje svega jednu sekundu. Već u sljedećem trenutku, ER kriva je niže pozicionirana od ostalih.

Sa druge strane, aktivna snaga dobijena simulacijom modela sačinjenog od ZIP modela i

motora, već nakon dvije sekunde ima veću vrijednost od svih ostalih karakteristika, a taj period traje približno do trenutka  $t = 524s$ . Dakle, osnovni razlog za maksimalan propad frekvencije ovog modela je sljedeći:

- Turbinski regulatori znatno su sporiji od brzih elektrostatičkih regulatora pobude (parametri dati u Prilogu). Dodatno, vodena masa ima svoju inerciju, što se opisuje konstantom vode  $T_w$ . Zato je potrebno neko vrijeme da regulator omogući veći dotok na turbinu. Obrtna masa sinhronne mašine pruža dodatan otpor naglom ubrzanju mašine.
- U vremenskom intervalu prije nego što turbinska regulacija počne davati učinak (malo manje od 10 sekundi nakon uključjenja), kriva aktivne snage dobijena simulacijom pomenutog modela (ZIP+motori) kreira najveću površinu u odnosu na vremensku osu. To uzrokuje veći propad frekvencije, uz sporiji oporavak iste (Slika 6.1).

Kada je u pitanju napon, tu je situacija nešto očiglednija. Uz pretpostavku da reaktivna ima mnogo veći uticaj od aktivne snage na naponske prilike [24], na Slici 5.6 se jasno vidi da ZIP potrošači sa dodatkom motora imaju daleko najveće reaktivno opterećenje. To je razlog najvećem propadu napona kada se primjenjuje ovaj model potrošača.

## 7. ZAKLJUČAK

Rezultati istraživanja prezentovanog u ovom radu potvrđuju hipoteze iz uvodnih poglavlja. Kako bi se na adekvatan način opisala složena dinamika tokom procesa restauracije elektroenergetskog sistema, neophodno je koristiti složenije modele od onih koji se primjenjuju u analizama tokova snaga i stabilnosti.

Uvođenje termina „jake mreže“ praktično je neprihvatljivo u krhkim *bottom-up* sistemima, kakav je sistem analiziran u ovom radu. Za razliku od elektroenergetskih sistema u normalnom pogonu, koji posjeduju dovoljnu inerciju i stabilnost usljed velikog broja generatora, ostrvski sistemi sa jednim ili nekoliko izvora pokazuju izrazitu osjetljivost na svaku promjenu bilansa snage. Takve okolnosti uzrokuju značajne promjene napona i frekvencije, koje direktno utiču na potrošače i gubitke u mreži.

Black-start eksperimenti imaju izuzetan značaj jer omogućavaju prikupljanje rijetkih, ali dragocjenih mjerenja koja predstavljaju realnu referencu za validaciju modela i dalje istraživanje. U ovom radu pokazano je da se upravo na osnovu takvih mjerenja može objektivno ocijeniti prikladnost različitih modela potrošača preporučenih u literaturi.

Na osnovu dobijenih rezultata mogu se izdvojiti sljedeći zaključci:

- **Validacija modela:** RMS i MAE analize jasno pokazuju da dinamički modeli znatno preciznije oponašaju ponašanje potrošača od statičkih. Polinomijalni (ZIP) model, iako uobičajen u analizama normalnog pogona, pokazao se neadekvatnim za simulaciju tranzijenata tokom restauracije.
- **Reaktivna snaga:** Modifikovani kompletni model (ER + dva asinhrona motora + otočna susceptansa) najvjernije oponaša karakteristiku reaktivne snage potrošača i daje najmanje greške u poređenju sa mjerenjima.
- **Aktivna snaga:** Exponential Recovery (ER) model daje najbolje slaganje sa izmjerenom aktivnom snagom i dobro prati kratkotrajni porast snage nakon uključanja potrošača.
- **Interpretacija rezultata:** Dobri rezultati ER modela sugerišu da posmatrani porast aktivne snage nije prvenstveno posljedica velikog udjela motora u konzumu, već posljedica dinamike frekvencije i napona u čvoru potrošača.
- **Izbor složenosti modela:** U početnim fazama istraživanja preporučuje se upotreba složenijih modela, kao što je modifikovani kompozitni model predložen u ovom radu. Međutim, ako se modeli sa manjim brojem parametara pokažu jednako efikasnim, poželjnije je koristiti upravo takva rješenja. U ovom slučaju, *Exponential Recovery* model

je pokazao jednaku tačnost u pogledu aktivne snage, dok je za reaktivnu karakteristiku postignuto zadovoljavajuće slaganje. Upotrebom jednostavnijih modela smanjuje se mogućnost *overfittinga* i greška varijanse, čime se povećava pouzdanost rezultata.

- **Planiranje restauracije:** Za potrebe planiranja postupka restauracije, najvažnije je poznavati najekstremnije vrijednosti propada frekvencije i napona. Stoga, za ovakve studije najkorisniji je model koji daje najpesimističniji scenario — u ovom radu to je ZIP + motori, koji je doveo do najvećih propada frekvencije i napona.

Rad se bavi ponašanjem potrošača u kratkom vremenskom intervalu neposredno nakon njihovog uključanja u black-start sistem. Kao smjer budućih istraživanja predlaže se analiza dugotrajnih fenomena poput tzv. *Cold Load Pickup* efekta, koji zahtijeva složenije fizičke modele bazirane na termičkim procesima i uslovima okoline. Takva istraživanja doprinijela bi potpunijem razumijevanju ponašanja potrošača u svim fazama restauracije elektroenergetskog sistema.

Zaključno, rad pokazuje da modelovanje i optimizacija parametara konzuma na osnovu stvarnih mjerenja predstavljaju pouzdan osnov za preciznije analize restauracije sistema, kao i za planiranje sigurnog i kontrolisanog postupka povratka elektroenergetskog sistema u pogon.

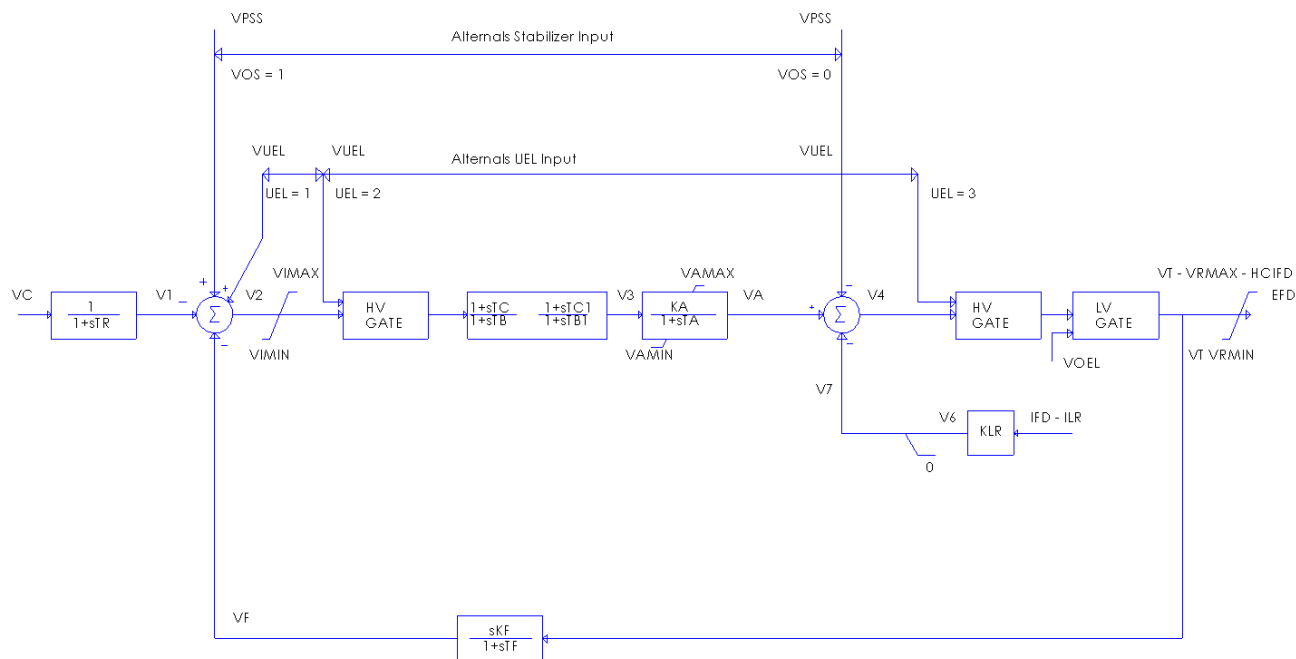
## **A. PRILOG**

### **A.1 Automatski regulator pobude (AVR) - šema i parametri**

U nastavku se mogu vidjeti šematski prikaz modela automatskog regulatora pobude (Slika A.1), a parametri upotrijebljeni u simulacijama dati su tabelarno (Tabela A.1).

### **A.2 Regulator turbine - šema i parametri**

U nastavku se mogu vidjeti šematski prikaz modela turbinskog regulatora karakterističnog za hidroturbine (Slika A.2), a parametri upotrijebljeni u simulacijama dati su tabelarno (Tabela A.2).



Slika A.1: ST1A statički regulator pobude - model korišćen u računarskom modelu testnog sistema

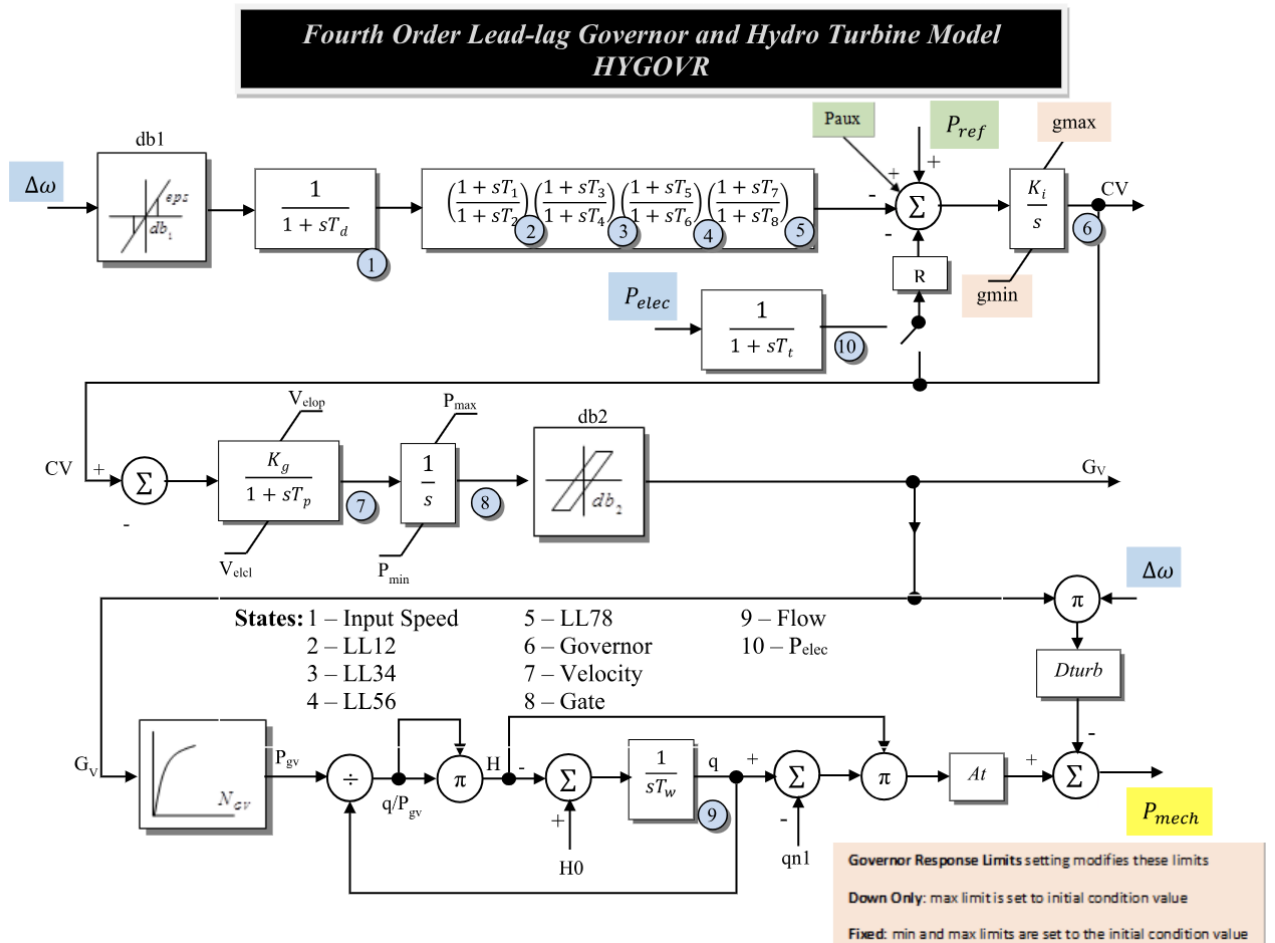
Tabela A.1: Parametri ST1A regulatora pobude upotrijebljeni u simulacijama

Parametar	Vrijednost	Opis
$T_R$	0.018925	Vremenska konstanta filtera
$T_B$	1.7543	Lead-lag vremenska konstanta (TB)
$T_C$	0.61844	Lead-lag vremenska konstanta (TC)
$T_{B1}$	10	Dodatna lead-lag vremenska konstanta (TB1)
$T_{C1}$	6	Dodatna lead-lag vremenska konstanta (TC1)
$K_A$	112.82	Pojačanje
$T_A$	0.02	Vremenska konstanta regulacije
$K_F$	0.11781	Stabilizujuće pojačanje pobudnog sistema
$T_F$	1.191	Vremenska konstanta stabilizacije
$K_{LR}$	0.63928	Ograničenje izlazne struje eksitacije
$I_{LR}$	0.43846	Referenca ograničenja izlazne struje eksitacije
$VOS$	0	Status PSS ulaza (stabilizator EES-a) (0 = nije aktivan, 1 = aktivan)
$UEL$	0	Status UEL ulaza (0 = ignore)
$VR_{MAX}$	3	Gornja granica izlaznog napona
$VR_{MIN}$	-3	Donja granica izlaznog napona
$VI_{MAX}$	0.2	Gornja granica ulaznog napona
$VI_{MIN}$	-0.3	Donja granica ulaznog napona
$VPSS$	0	Ulazni napon stabilizatora EES-a (opciono)

Tabela A.2: Parametri sinhronog generatora i turbinskog regulatora upotrijebljeni u simulacijama

Parametar	Vrijednost	Opis
$H$	1.8767	Konstanta inercije generatora (sadrži kinetičku energiju rotora)
$D$	0.052769	Koeficijent prigušenja oscilacija
$X''_d$	0.37631	Tranzijentna reaktansa po d-osi
$X''_q$	0.37889	Tranzijentna reaktansa po q-osi
$X_d$	1.8211	Sinhrona reaktansa po d-osi
$X'_d$	0.39333	Subtranzijentna reaktansa po d-osi
$X_q$	1.7619	Sinhrona reaktansa po q-osi
$X'_q$	0.6307	Subtranzijentna reaktansa po q-osi
$T'_{do}$	8.0043	Tranzijentna vremenska konstanta pobude po d-osi
$T''_{do}$	0.063991	Subtranzijentna vremenska konstanta pobude po d-osi
$T'_{qo}$	0.81854	Tranzijentna vremenska konstanta po q-osi
$T''_{qo}$	0.083973	Subtranzijentna vremenska konstanta po q-osi
$T_f$	0.84606	Vremenska konstanta stabilizatora pobude
$T_r$	0.5	Vremenska konstanta senzora regulatora brzine
$r$	2.0562	Dead-band/histerezis regulatora brzine
$T_g$	0.050184	Vremenska konstanta servomotora vodilice turbine
$T_w$	0.0018012	Vremenska konstanta vode (water starting time)
$A_1$	1.261	Pojačanje regulatora turbine
$R$	0.01	Droop – statička karakteristika regulatora brzine
$G_{MAX}$	0.98987	Gornja granica otvora mlaznice (gate limit)
$G_{MIN}$	-0.23002	Donja granica otvora mlaznice
$VELM$	0.00326	Maksimalna brzina promjene položaja mlaznice
$q_{NL}$	0.0011016	Protok pri praznom hodu turbine
$D_{turb}$	0.70168	Koeficijent prigušenja turbine
$T_n$	0.07005	Normalizovana vremenska konstanta turbine
$T_{np}$	1.7759	Dodatna vremenska konstanta turbine

**Governor HYGOVR**



Slika A.2: HYGOVR model regulatora turbine. Izvor: <https://www.powerworld.com>

## BIBLIOGRAFIJA

- [1] R. Anderson, “Final report on the blackout in the united states and canada: Causes and recommendations final report on the blackout in the united states and canada: Causes and recommendations,” 08 2004.
- [2] ENTSO-E Incident Classification Scale Investigation Expert Panel, “Grid incident in south-east europe on 21 june 2024 – interim (factual) report,” ENTSO-E, Technical Report, November 2024, available at: [https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/SOC%20documents/Incident\\_Classification\\_Scale/](https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/SOC%20documents/Incident_Classification_Scale/).
- [3] ENTSO-E. (2025, April) Grid incident in the power systems of spain and portugal. Accessed: 2025-06-10. [Online]. Available: <https://www.entsoe.eu/news/2025/04/28/grid-incident-in-the-power-systems-of-spain-and-portugal/>
- [4] World Bank, “Underutilized potential: The business costs of unreliable infrastructure in developing countries,” World Bank Group, Policy Research Working Paper 8899, 2019, accessed: 2025-06-10. [Online]. Available: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/32455>
- [5] Y. Liu, R. Fan, and V. Terzija, “Power system restoration: a literature review from 2006 to 2016,” *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 4, no. 3, pp. 332–341, 2016.
- [6] E. Agneholm, “Cold load pick-up,” Doctoral thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 1999.
- [7] Réseau de Transport d’Électricité (RTE), *Mémento de la sûreté du système électrique*, RTE, Département Exploitation du Système Électrique, Paris la Défense, France, 2004.
- [8] U. K. Verma, S. R. Narasimhan, A. Gartia, P. A. R. Bende, A. P. Das, and A. K. Gupta, “Black start in power system - a case study in western region, india,” in *2011 IEEE Conference on Computing, Control and Industrial Engineering (CCIE)*. IEEE, 2011, available upon request or via IEEE Xplore if accessible.
- [9] R. Schmaranz, H. Renner, M. Marketz, J. Polster, M. Weixelbraun, S. Brandl, and K. Köck, “Blackout – key aspects for grid restoration,” in *Proceedings of the 22nd International Conference on Electricity Distribution (CIRED)*. Stockholm, Sweden: CIRED, 2013, session 3, Paper No. 0002.

- [10] C. Hachmann, H. Becker, and M. Braun, “Cold load pickup model adequacy for power system restoration studies,” *Energies*, vol. 15, no. 20, 2022. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/20/7675>
- [11] R. R. Papasani, R. R. V. S. S. Prakash, P. V. N. Prasad, K. Anuradha, and M. P. Kumar, “Black start capability evaluation using smes in the power system restoration process,” in *2021 8th International Conference on Power Systems (ICPS)*. IEEE, 2021, pp. 1–6.
- [12] G. Deb, “Ferranti effect in transmission line,” *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, vol. 2, no. 4, pp. 447–451, 2012. [Online]. Available: <http://iaesjournal.com/online/index.php/IJECE/article/view/5349>
- [13] G. Joksimovic and V. Durkovic, “Modeliranje struje uključenja neopterećenog transformatora bazirano na modifikovanoj froehlich-ovoj krivoj,” *ETRAN*, 2018.
- [14] A. Mercier, S. D. Carufel, and P. Taillefer, “Innovative monitoring technique using controlled switching devices,” in *CIGRÉ Belgium Conference, Crowne-Plaza – Le Palace*. Brussels, Belgium: CIGRÉ, 2014, presented at the CIGRÉ Belgium Conference, March 12–14, 2014. [Online]. Available: <https://www.cigre.org>
- [15] A. Schwob, “Analysis of load models used in black-start studies,” Master’s thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2016.
- [16] R. L. Wilde, “Effects of cold load pickup at the distribution substation transformer,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-104, no. 3, pp. 704–710, 1985.
- [17] V. Kumar, I. Gupta, and H. O. Gupta, “An overview of cold load pickup issues in distribution systems,” *Electric Power Components and Systems*, vol. 34, no. 6, pp. 639–651, 2006.
- [18] M. Nehrir, P. Doh, V. Gerez, and W. Jameson, “Development and validation of a physically-based computer model for predicting winter electric heating loads,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 10, no. 1, pp. 266–272, 1995.
- [19] M. Gonzalez, K. Wheeler, and S. Faried, “An overview of cold load pickup modeling for distribution system planning,” 10 2021, pp. 328–333.
- [20] M. Habyarimana, D. G. Dorrell, and R. Musumpuka, “Reduction of starting current in large induction motors,” *Energies*, vol. 15, no. 10, 2022. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/10/3848>

- [21] M. Konuhova, “Modeling of induction motor direct starting with and without considering current displacement in slot,” *Applied Sciences*, vol. 14, no. 20, 2024. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/20/9230>
- [22] F. Rüncos, M. Bachmeyer, M. Sarris, and A. Stafford, “High torque low inrush current motor design or voltage recovery dependence for loaded start conditions,” in *2022 Petroleum and Chemical Industry Conference (PCIC)*. PCIC Europe: IEEE, 2022, p. –, paper No. PCIC-2022-0560. [Online]. Available: <https://ieeepcic.com/2022conference/wp-content/uploads/sites/7/2022/09/2022-PCIC-0560.pdf>
- [23] S. Liu, “Dynamic-data driven real-time identification for electric power systems,” Ph.D. dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana-Champaign, IL, USA, 2009.
- [24] I. Vujošević, *Analiza elektroenergetskih sistema I*. Podgorica: Elektrotehnički fakultet, 2006.
- [25] E. Vaahedi, H. El-Din, and W. Price, “Dynamic load modeling in large scale stability studies,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 3, no. 3, pp. 1039–1045, 1988.
- [26] J. Milanović, K. Yamashita, S. Martinez Villanueva, S. Djokic, and L. Korunovic, “International industry practice on power system load modeling,” *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 28, pp. 3038–3046, 08 2013.
- [27] CIGRÉ Study Committee C4, Working Group C4.605, “Modelling and aggregation of loads in flexible power networks,” CIGRÉ, Paris, France, Technical Brochure 566, 2014.
- [28] I. Pasiopoulou, E. Kontis, T. Papadopoulos, and G. Papagiannis, “Effect of load modeling on power system stability studies,” *Electric Power Systems Research*, vol. 207, p. 107846, 06 2022.
- [29] “Bibliography on load models for power flow and dynamic performance simulation,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 10, no. 1, pp. 523–538, 1995.
- [30] B. C. Lesieutre, P. W. Sauer, and M. Pai, “Development and comparative study of induction machine based dynamic p, q load models,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 10, no. 1, pp. 181–191, 1995.
- [31] A. Ellis, D. Kosterev, and A. Meklin, “Dynamic load models: Where are we?” *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2006.
- [32] A. Adrees and J. V. Milanović, “Effect of load models on angular and frequency stability of low inertia power networks,” *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 13, no. 17, p. 3660–3668, 2018.

- [33] B.-K. Choi, H.-D. Chiang, Y. Li, H. Li, Y.-T. Chen, D.-H. Huang, and M. G. Lauby, “Measurement-based dynamic load models: Derivation, comparison, and validation,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, no. 3, pp. 1276–1283, 2006.
- [34] I. Romero Navarro, “Dynamic load models for power systems – estimation of time-varying parameters during normal operation,” Division for Industrial Electrical Engineering and Automation, Lund Institute of Technology, Licentiate Thesis LTH-IEA-1034, 2002, acc 24 Jun 2025. [Online]. Available: <https://www2.iea.lth.se/publications/Theses/LTH-IEA-1034.pdf>
- [35] J. Hou, Z. Xu, and Z. Y. Dong, “Measurement-based load modeling at distribution level with complete model structure,” in *Proceedings of the IEEE Power & Energy Society General Meeting*. IEEE, 2012, pp. 1–8, supported by Hong Kong Polytechnic University projects A-PJ81 and 4-ZZ7Q.
- [36] X. Liu, L. Yan, Y. Liu, L. Zhao, and J. Jie, “Improved niche genetic algorithm based parameter identification of excitation system considering parameter identifiability,” *The Journal of Engineering*, vol. 2019, 01 2019.
- [37] Elrachid, Bendaoud, Hammoud, Radjeai, and Oussama, Boutalbi, “Parameters identification of synchronous machine based on particale swarm optimization,” *E3S Web Conf.*, vol. 336, p. 00052, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202233600052>
- [38] A. Foroutan, S. Basumallik, and A. Srivastava, “Estimating and calibrating der model parameters using levenberg–marquardt algorithm in renewable rich power grid,” *Energies*, vol. 16, no. 8, 2023. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/8/3512>
- [39] M. Podlaski, L. Vanfretti, M. de Castro Fernandes, and J. Pesente, “Parameter estimation of user-defined control system models for itaipú power plant using modelica and openipsl,” in *Proceedings of the American Modelica Conference 2020*. Boulder, Colorado, USA: Linköping University Electronic Press, 2020, pp. 139–148.
- [40] H. Renmu, M. Jin, and D. J. Hill, “Composite load modeling via measurement approach,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, no. 2, pp. 663–672, 2006.
- [41] D. E. Goldberg, “Genetic algorithms: Concepts and applications,” *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 6, no. 4, pp. 313–321, 1989.
- [42] J. Kennedy and R. Eberhart, “Particle swarm optimization,” in *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks (ICNN)*, vol. 4. IEEE, 1995, pp. 1942–1948.

- [43] Y. Shi and R. Eberhart, "A modified particle swarm optimizer," in *Proceedings of IEEE International Conference on Evolutionary Computation (ICEC)*. IEEE, 1998, pp. 69–73.
- [44] M. T. Hagan and M. B. Menhaj, "Training feedforward networks with the marquardt algorithm," *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 5, no. 6, pp. 989–993, Nov 1994.
- [45] MathWorks, *fmincon - Find minimum of constrained nonlinear multivariable function*, The MathWorks, Inc., 2023, available: <https://www.mathworks.com/help/optim/ug/fmincon.html>.
- [46] O. Nelles, *Nonlinear System Identification: From Classical Approaches to Neural Networks and Fuzzy Models*. Berlin, Heidelberg: Springer Science & Business Media, 2001.
- [47] K. Brakočević, M. Kontić, B. Ivanović, and L. Šćekić, "Restauracija sistema bez spoljašnjeg napajanja: iskustva iz testiranja prve faze i razvoj dinamičkog modela," in *CIGRE Srbija, 36. savetovanje*, Podgorica, Crna Gora, 2022, rad sa konferencije. [Online]. Available: <https://doi.org/10.46793/CIGRE36.1287B>
- [48] M. Weixelbraun, H. Renner, R. Schmaranz, and M. Marketz, "Dynamic simulation of a 110-kv-network during grid restoration and in islanded operation," 07 2009, pp. 1 – 4.
- [49] N. AG, "Exciter models: Standard dynamic excitation systems in neplan power system analysis tool," NEPLAN AG, Küsnacht, Switzerland, Tech. Rep., 2015, technical report. [Online]. Available: [https://www.neplan.ch/wp-content/uploads/2015/08/Nep\\_EXCITERS1.pdf](https://www.neplan.ch/wp-content/uploads/2015/08/Nep_EXCITERS1.pdf)

## Izjava o istovjetnosti štampane i elektronske verzije master rada

Ime i prezime autora Veljko Đurković

Broj indeksa/upisa 15/23

Studijski program Elektroenergetski sistemi

Naslov rada Modelovanje elektrodistributivnog konzuma u uslovima restauracije elektroenergetskog sistema nakon potpunog raspada

Mentor prof dr. Vladan Radulović

Potpisani/a Veljko Đurković

### Izjavljujem

da je štampana verzija mog master rada istovjetna elektronskoj verziji koju sam predao/la za objavljivanje u Digitalni arhiv Univerziteta Crne Gore.

Istovremeno izjavljujem da dozvoljavam objavljivanje mojih ličnih podataka u vezi sa dobijanjem akademskog naziva master nauka, kao što su ime i prezime, godina i mjesto rođenja, naslov master rada i datum odbrane rada.

U Podgorici, 20.10.2025. godine

Potpis magistranda



---

## IZJAVA O KORIŠĆENJU

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku da u Digitalnom arhivu Univerziteta Crne Gore pohrani moj master rad pod nazivom:

**"Modelovanje elektrodistributivnog konzuma u uslovima restauracije elektroenergetskog sistema nakon potpunog raspada"**

koji je moje autorsko djelo.

Master rad sa svim priložima predao/la sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moj master rad pohranjen u Digitalnom arhivu Univerziteta Crne Gore mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (*Creative Commons*) za koju sam se odlučio/la.

1. Autorstvo
2. Autorstvo – nekomercijalno
3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade
4. Autorstvo – nekomercijalno – dijeliti pod istim uslovima
5. Autorstvo – bez prerade
6. Autorstvo – dijeliti pod istim uslovima

*(Molimo da zaokružite samo jednu od šest ponuđenih licenci, kratak opis licenci dat je na poleđini lista).*

U Podgorici, 20.10.2025. godine

Potpis magistranda



1. Autorstvo - Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence, čak i u komercijalne svrhe. Ovo je najslobodnija od svih licenci.
2. Autorstvo - nekomercijalno. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu djela.
3. Autorstvo - nekomercijalno - bez prerade. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, bez promjena, preoblikovanja ili upotrebe djela u svom djelu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu djela. U odnosu na sve ostale licence, ovom licencom se ograničava najveći obim prava korišćenja djela.
4. Autorstvo - nekomercijalno - dijeliti pod istim uslovima. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu djela i prerade.
5. Autorstvo - bez prerade. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, bez promjena, preoblikovanja ili upotrebe djela u svom djelu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu djela.

Autorstvo - dijeliti pod istim uslovima. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu djela i prerada. Slična je softverskim licencama, odnosno licencama otvorenog koda