

# Analiza električnih veličina za vrijeme otočnog pogona

---

Jović, Aleksandar

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:489257>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom](#).

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-27**

Repository / Repozitorij:

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**

**Sveučilišni studij**

**ANALIZA ELEKTRIČNIH VELIČINA ZA VRIJEME  
OTOČNOG POGONA**

**Diplomski rad**

**Aleksandar Jović**

**Osijek, 2024.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**Obrazac D1: Obrazac za ocjenu diplomskog rada na sveučilišnom diplomskom studiju****Ocjena diplomskog rada na sveučilišnom diplomskom studiju**

<b>Ime i prezime pristupnika:</b>	Aleksandar Jović
<b>Studij, smjer:</b>	Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, Elektroenergetika
<b>Mat. br. pristupnika, god.</b>	D-1451, 07.10.2022.
<b>JMBAG:</b>	0165083000
<b>Mentor:</b>	izv. prof. dr. sc. Krešimir Fekete
<b>Sumentor:</b>	
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	Kristijan Čvek
<b>Predsjednik Povjerenstva:</b>	prof. dr. sc. Zvonimir Klaić
<b>Član Povjerenstva 1:</b>	izv. prof. dr. sc. Krešimir Fekete
<b>Član Povjerenstva 2:</b>	Ružica Kljajić, univ. mag. ing. el.
<b>Naslov diplomskog rada:</b>	Analiza električnih veličina za vrijeme otočnog pogona
<b>Znanstvena grana diplomskog rada:</b>	<b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Zadatak diplomskog rada:</b>	Cilj diplomskog rada je proučiti promjene električnih veličina za vrijeme otočnog pogona kroz programsko modeliranje električne mreže, koristeći IEEE 33 sabirnički sustav. Fokus će biti stavljen na istraživanje promjena u mreži uz promjene potrošnje i/ili proizvodnje električne energije. Implementacija scenarija može uključivati dinamičke promjene potrošnje i/ili proizvodnje električne energije. Promjene bi mogle uključivati povećanje potrošnje, isključivanje generatora ili dodavanje novih distribuiranih izvora. Sumentor iz tvrtke: Kristijan Čvek (FMŠC)
<b>Datum ocjene pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora:</b>	25.06.2024.
<b>Ocjena pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora:</b>	Izvrstan (5)
<b>Datum obrane diplomskog rada:</b>	4.7.2024.
<b>Ocjena usmenog dijela diplomskog rada (obrane):</b>	Izvrstan (5)
<b>Ukupna ocjena diplomskog rada:</b>	Izvrstan (5)
<b>Datum potvrde mentora o predaji konačne verzije diplomskog rada čime je pristupnik završio sveučilišni diplomski studij:</b>	10.07.2024.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK****IZJAVA O IZVORNOSTI RADA**

Osijek, 10.07.2024.

<b>Ime i prezime Pristupnika:</b>	Aleksandar Jović
<b>Studij:</b>	Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, Elektroenergetika
<b>Mat. br. Pristupnika, godina upisa:</b>	D-1451, 07.10.2022.
<b>Turnitin podudaranje [%]:</b>	5

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Analiza električnih veličina za vrijeme otočnog pogona**

izrađen pod vodstvom mentora izv. prof. dr. sc. Krešimir Fekete

i sumentora

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.

Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis pristupnika:

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
1.1. Zadatak završnog rada .....	2
<b>2. PREGLED PODRUČJA TEME</b> .....	<b>3</b>
<b>3. OTOČNI POGON</b> .....	<b>6</b>
3.1. Arhitektura umjetnih neuronskih mreža (ANN) .....	10
3.2. Fazni prostor .....	13
3.3. Neuronska mreža s radijalnim baznim funkcijama (RBFNN) .....	14
3.4. Vjerojatnosna neuronska mreža (PNN) .....	16
<b>4. SIMULACIJE I REZULTATI</b> .....	<b>19</b>
4.1. Opis modela .....	19
4.2. Simulacija malog otoka .....	22
4.2.1. Proizvodnja veća od potrošnje .....	25
4.2.2. Proizvodnja jednaka potrošnji .....	30
4.2.3. Proizvodnja manja od potrošnje .....	34
4.2.4. Usporedba rezultata po sabirnicama .....	39
4.3. Simulacija velikog otoka .....	56
4.3.1. Proizvodnja veća od potrošnje .....	58
4.3.2. Proizvodnja jednaka potrošnji .....	64
4.3.3. Proizvodnja manja od potrošnje .....	69
4.3.4. Usporedba rezultata po sabirnicama .....	74
<b>5. ZAKLJUČAK</b> .....	<b>97</b>
<b>SAŽETAK</b> .....	<b>98</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>98</b>
<b>LITERATURA</b> .....	<b>99</b>

# 1. UVOD

U današnjem modernom društvu, električna energija predstavlja neizostavan element svakodnevnog života, igrajući ključnu ulogu u napajanju različitih uređaja i sustava. S obzirom na sve veću potražnju za električnom energijom, posebno u uvjetima povećane upotrebe obnovljivih izvora energije, otočni pogon postaje sve značajnija tema proučavanja. Analiza električnih veličina za vrijeme otočnog pogona predstavlja bitan aspekt istraživanja, budući da omogućuje duboko razumijevanje ponašanja električnih sustava izvan uobičajenih mrežnih uvjeta.

U tom kontekstu, ovaj diplomski rad istražuje različite električne veličine koje igraju ključnu ulogu tijekom otočnog pogona, pružajući uvid u parametre koji utječu na stabilnost, učinkovitost i sigurnost takvih sustava. Kroz analizu napona, struje, frekvencije i drugih relevantnih električnih parametara, istražitelji mogu identificirati potencijalne izazove i razviti strategije za optimizaciju rada otočnih električnih sustava. Ova analiza ne samo da doprinosi teorijskom razumijevanju otočnog pogona, već pruža i praktične smjernice za poboljšanje performansi sustava te jačanje pouzdanosti opskrbe električnom energijom u uvjetima koji odstupaju od tradicionalnog mrežnog priključka.

Ovaj rad se sastoji od pet poglavlja s uvodom kao prvim poglavljem. U drugom poglavlju navedena je i opisana literatura vezana uz otočni pogon. Treće poglavlje ukratko opisuje otočni pogon, tehnike detekcije, te neuronske mreže. Četvrto poglavlje posvećeno je simulacijama i rezultatima. Provedene su simulacije malog i velikog otoka, a njihovi rezultati prikazani su grafovima i tablicama. Električne veličine koje su prikazane uključuju napon, frekvenciju te radnu i jalovu snagu mreže i distribuirane proizvodnje koja se nalazi u otočnom pogonu. U petom poglavlju dan je zaključak temeljen na dobivenim rezultatima iz četvrtog poglavlja.

## **1.1. Zadatak završnog rada**

Cilj diplomskog rada je proučiti promjene električnih veličina za vrijeme otočnog pogona kroz programsko modeliranje električne mreže, koristeći IEEE 33 sabirnički sustav. Fokus će biti stavljen na istraživanje promjena u mreži uz promjene potrošnje i/ili proizvodnje električne energije. Implementacija scenarija može uključivati dinamičke promjene potrošnje i/ili proizvodnje električne energije. Promjene bi mogle uključivati povećanje potrošnje, isključivanje generatora ili dodavanje novih distribuiranih izvora.

## 2. PREGLED PODRUČJA TEME

Otočni pogon te njegovi problemi su glavna tema mnogim diplomskim, završnim i znanstvenim radovima. U ovom poglavlju su navedeni neki od tih radova kako bi se dokazala povezanost između tih radova i ovog diplomskog rada.

Autori u literaturi [1] su procijenili rizik od pojave otočnog pogona elektrane sastavljene od više mrežnih izmjenjivačkih jedinica. Koristio je modele: stablo kvarova, model generacije, model opterećenja. Došao je do zaključka da je rizik za otočni pogon u određenim slučajevima značajan, jer se nominalne vrijednosti generacije i opterećenja na dovodu podudaraju, te da bi se trebalo pregledati priključak elektrane ukoliko nema visoko pouzdane zaštite.

Autor u literaturi [2] je opisao metode zaštite od otočnog pogona, te simulirao rad hibridne metode pomoću programskog paketa DIgSILENT PoweFactory [3]. Došao je do zaključka da hibridne metode detekcije otočnog pogona predstavljaju efikasno rješenje za problem detekcije, omogućujući kombinaciju aktivnih i pasivnih pristupa kako bi se smanjila zona neosjetljivosti i narušavanje kvalitete mreže. Iako je implementacija skuplja, ove metode nude napredak u odnosu na tradicionalne pristupe, potvrđujući potencijal za daljnji razvoj u novim istraživanjima.

Autor u literaturi [4] je opisao i analizirao otočni pogon niskonaponske mreže s baterijskim spremnikom, te utjecaj rada fotonaponskih elektrana na pogon niskonaponske mreže i utjecaj baterijskog skladištenja na otočni pogon niskonaponske mreže. Došao je zaključka da je otočni pogon s baterijskim spremnikom ključan za postizanje energetske neovisnosti, zaštite okoliša i osiguranje stabilnog napajanja potrošača.

Autor u literaturi [5] je opisao načine detekcije otočnog pogona te ih je testirao pomoću programskog paketa DIgSILENT PoweFactory [3]. Došao je do zaključka da model sustava male elektrane ukazuje na značajne promjene u kutu rotora i frekvenciji prilikom otočnog pogona, te se ističe značaj kašnjenja odziva zbog inercije generatora.

Autor u literaturi [6] je analizirao pojavu otočnog pogona u mrežama s distribuiranom proizvodnjom, s naglaskom na fotonaponske elektrane spojene na mrežu srednjeg napona. Definirao je strukturu i karakteristike takve elektrane te predložio metodologiju za kvantificiranje vjerojatnosti pojave otočnog rada, uz analizu zona neprepoznavanja pasivnih metoda zaštite. Na primjeru stvarne elektrane i lokalne mreže, izračunao je vjerojatnosti otočnog rada, iznoseći zaključke o primijenjenim metodama zaštite. Došao je do zaključka da metoda detekcije brzine



promjene frekvencije ima značajnu učinkovitost kod fotonaponskih sustava, dok se ta metoda može pokazati manje učinkovitom za elektrane sa sinkronim generatorima.

Autori u literaturi [7] su opisali probleme izvanmrežnih energetskih sustava, posebno izvanmrežnih sustava s vjetroelektranama i fotonaponskim sustavima. Koristeći izvanmrežni energetski sustav izgrađen na kampusu VSB-TUO koji se sastoji od vjetroelektrane, fotonaponskog sustava, baterijskog spremnika, upravljačke jedinice i ulične rasvjete kao povezani uređaj, utvrđeno je da je neovisan o elektroenergetskoj mreži tijekom testiranja, te da je kontroler i Ni-Cd baterija ispravno djelovala u ekstremnim uvjetima.

Autori u literaturi [8] su istražili vjerojatnost prorade pasivnih i aktivnih metoda od otočnog pogona elektrane, posebno analizirajući APU (automatsko ponovno uspostavljanje) na pojnom vodu elektrane. Zaključili su da ni jedna od zaštita ne može detektirati otočni pogon u slučaju izjednačenja snage generatora i konzuma u odvojenom otočnom dijelu mreže, te se preporučuje provedba pokusa s disbalansom snage od 10% do 20% i potrebom za zaštitom od povratne snage kako bi se spriječio asinkroni uklop generatora na mrežu.

Autor u literaturi [9] je prikazao postupak detekcije i zaštite otočnog pogona elektrane pomoću simulacije i analize u programskom paketu DIgSILENT PowerFactory [3]. Mijenjanjem uvjeta za tri različita generatora u svakom slučaju je zaštita proradila i detektirala otočni pogon.

Autori u literaturi [10] su opisali i analizirali tehnike detekcije otočnog pogona za DG koje se dijele na udaljene i lokalne tehnike. Zaključak je da brza i precizna detekcija otočnog pogona predstavlja jedan od glavnih izazova u današnjim elektroenergetskim sustavima. Detekcija otočnog pogona također je važna jer se otočni rad distribuiranog sustava smatra izvedivom opcijom u budućnosti radi poboljšanja pouzdanosti i kvalitete opskrbe.

Autori u literaturi [11] prikazali su implementaciju zaštite od otočnog pogona za elektranu snage 3,2 MW povezanu s distribucijskom mrežom 20 kV. Radi poboljšanja osjetljivosti generatorskih zaštita, uključujući detekciju promjene kuta napona generatora, razvili su i ispitivali novu zaštitnu funkciju –  $df/dt$  (ROCOF) unutar postojećeg numeričkog releja ABB REF 541 korištenog u elektrani, provodeći simulacije za različite scenarije proizvodnje i opterećenja. Analiza brzine promjene frekvencije s disbalansom od 10% za najveću proizvodnju djelatne snage generatora i najveće opterećenje pomoćnog izvoda nije prikazana. Rezultati ukazuju da disbalans proizvodnje i potrošnje od 10% ne zadovoljava kriterije osjetljivosti za aktivaciju zaštite od otočnog pogona, osim u specifičnim uvjetima s brzinama promjene frekvencije većim od 0,2 Hz/s, što ukazuje

potrebu za aktivacijom člana  $df/dt$  releja ABB REF 541 za adekvatnu zaštitu od otočnog pogona u drugim scenarijama.

Autor u literaturi [12] je izvršio analizu osjetljivosti detekcije otočnog pogona distributivne mreže kroz scenarije povećanja broja integracija elektrana iz obnovljivih izvora energije pomoću programskog paketa DIgSILENT PowerFactory [3]. Snimljeni oscilogrami prikazuju utjecaj aktivne snage generatora na detekciju otočnog pogona, istražujući različite scenarije s jednim do četiri generatora. Promatranjem reaktivne snage zaključuje se da generatori iz obnovljivih izvora imaju karakterističan skok nakon isklopa nadomjesne mreže, što može poslužiti za detekciju otočnog pogona.

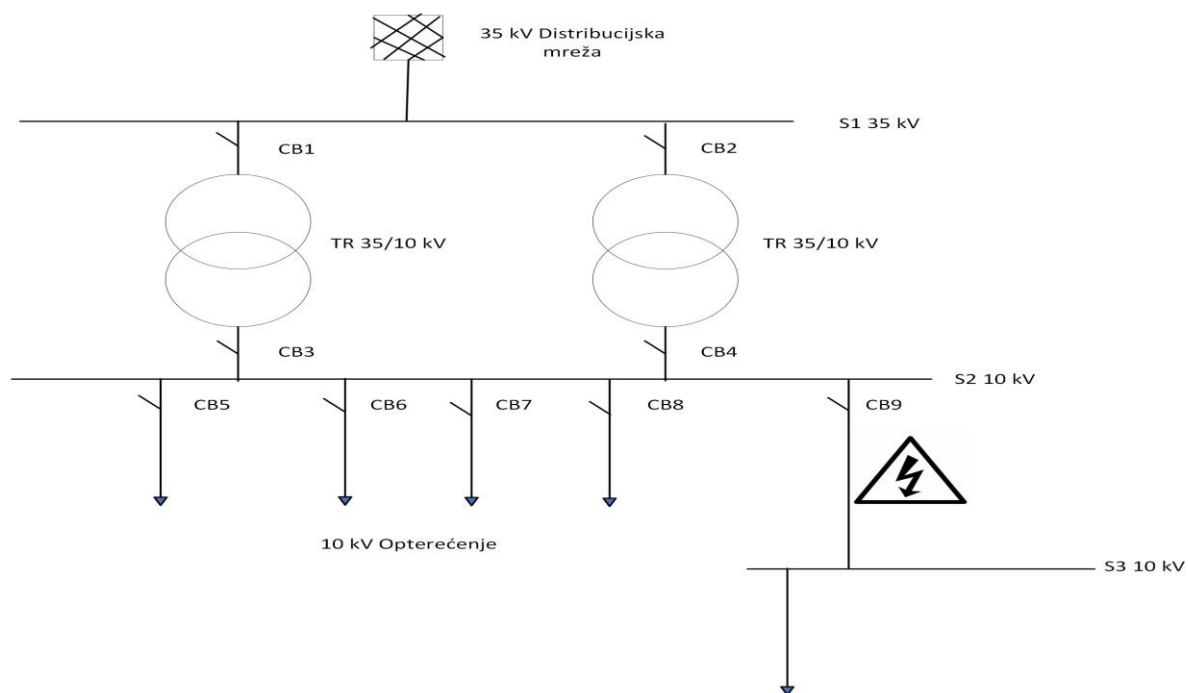
Autor u literaturi [13] je objasnio problematiku otočnog pogona, te je simulacijskim alatima na računalu prikazano što se događa sa električnim veličinama prilikom odvajanja dijela mreže u otočni pogon. Zaključak je da pasivne metode detekcije otoka uspješno reagiraju na promjene, dok je detekcija izazovna u slučaju jednakosti proizvodnje i potrošnje, što može predstavljati ozbiljan problem za stabilnost mreže.

Autori u literaturi [14] su proveli ispitivanja nove sheme za otkrivanje otočnog pogona i optimalnog smanjenja opterećenja za radialne distribucijske sustave integrirane s raspodijeljenom generacijom (DG). Ispitivanja su provedena pomoću softvera DIgSILENT PowerFactory [3] i MATLAB [15] na IEEE 33- busnom sustavu s četiri DG jedinice. Koristila se BSA tehnika, te je pokazano da ona nadmašuje GA u pronalaženju optimalnih rješenja i pruža precizniju stopu konvergencije.

### 3. OTOČNI POGON

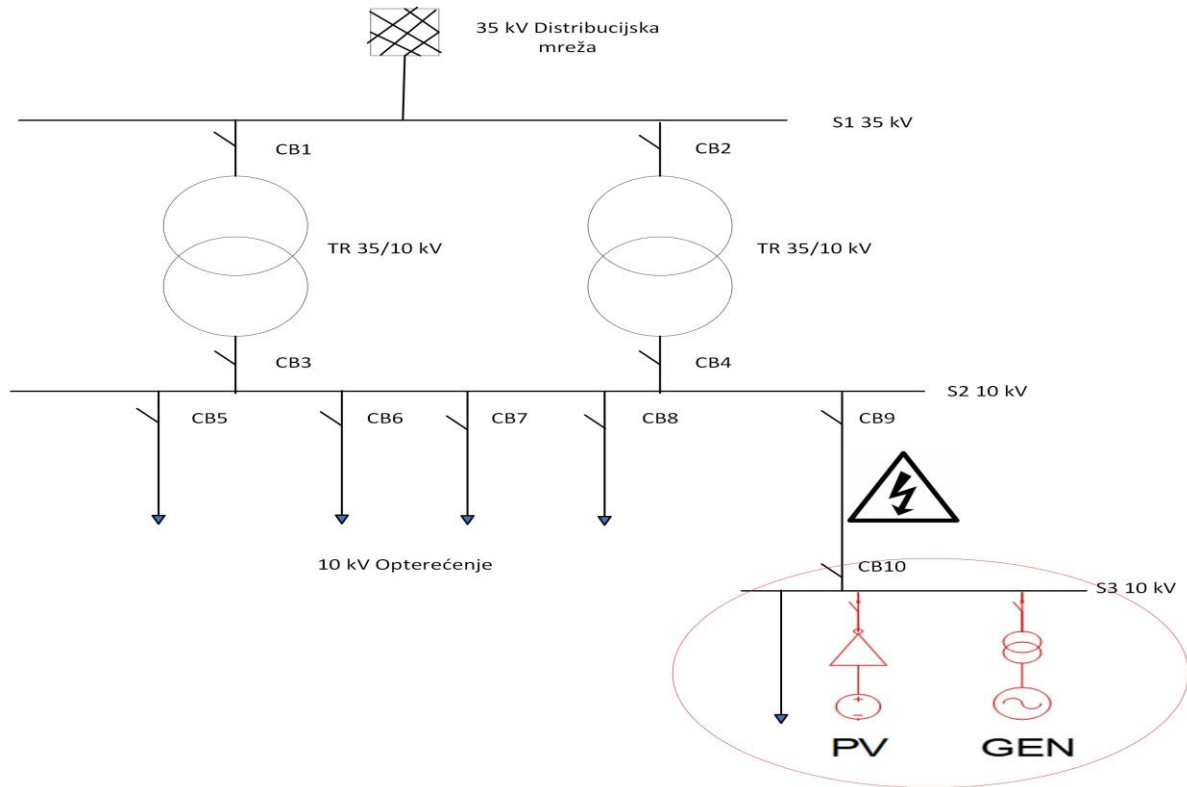
Distribuirana proizvodnja (DG) jedna je od najperspektivnijih alternativa za konvencionalnu centraliziranu proizvodnju električne energije. Potreba za DG raste diljem svijeta zbog restrukturiranja električne industrije i povećanja potražnje za električnom energijom. Nekoliko uslužnih tvrtki diljem svijeta već ima značajan postotak DG-a u svojim energetske sustavima. Međutim, još uvijek postoji niz pitanja koja treba ozbiljno razmotriti kada su DG-ovi spojeni na elektroenergetsku mrežu. Jedno od glavnih pitanja je detekcija otočnog pogona. Otočni pogon nastaje kada DG nastavlja opskrbljivati energijom mrežu nakon gubitka glavnog napajanja. Kao rezultat, usluga gubi kontrolu nad otočnim dijelom distribucijske mreže. Ovaj događaj može negativno utjecati na mrežu i same DG-ove stvarajući sigurnosne opasnosti za osoblje usluge i javnost, kao i uzrokujući probleme s kvalitetom energije i ozbiljna oštećenja mreže i DG-ova, čak i ako se glavno napajanje obnovi u kratkom vremenu [16].

Kako se navodi u literaturi [17]: „Otočni pogon je stanje proizvodne jedinice u kojem ona može sigurno kroz dulji vremenski period podnijeti djelomično opterećenje u izdvojenom dijelu elektroenergetskog sustava. Sposobnost otočnog pogona zahtijeva sustav regulacije (brzine vrtnje, djelatne snage, uzbuđe) kojim se regulira snaga proizvodnje jer temeljni je uvjet održivog otočnog pogona izdvojenih dijelova izmjeničnih elektroenergetskih sustava da su radna i jalova snaga proizvodnje i potrošnje uravnotežene u svakom trenutku.“



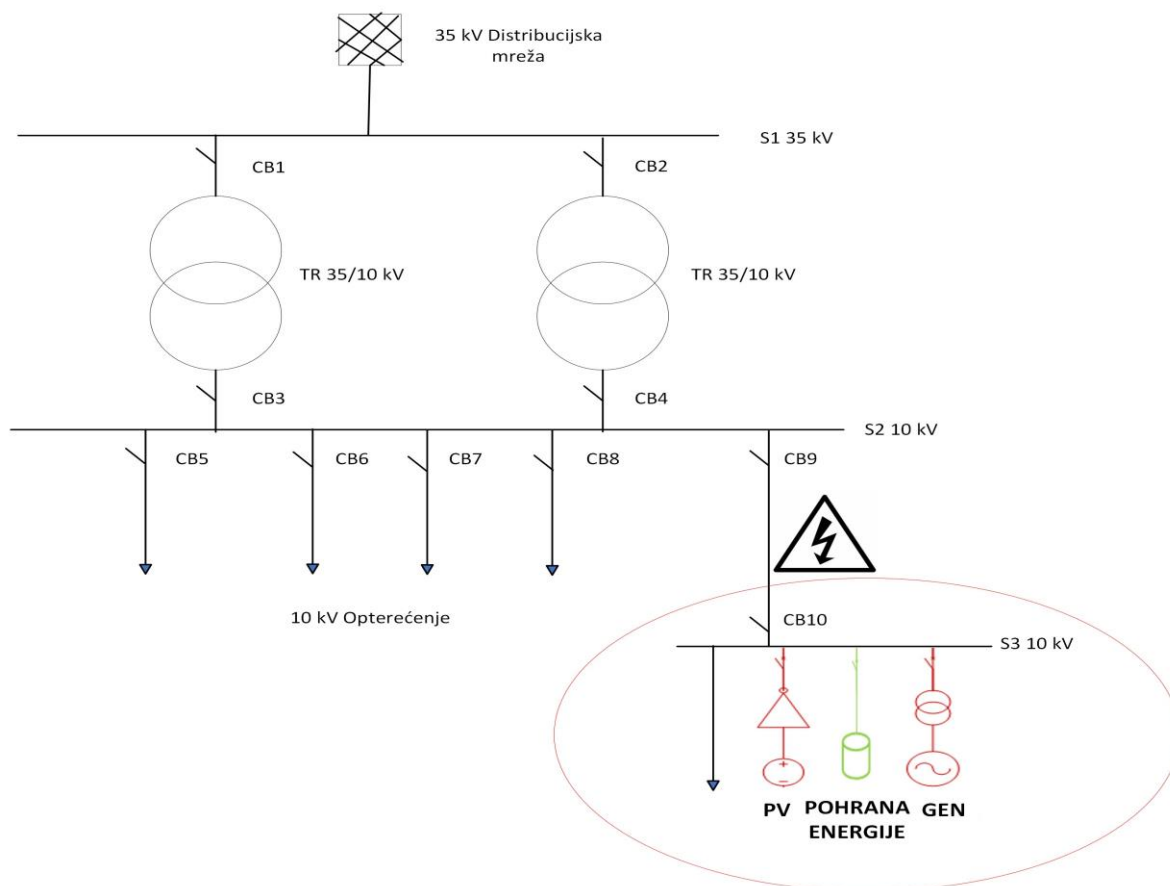
Slika 3.1. Distribucijska mreža

Na slici 3.1. je prikazana 35 kV distribucijska mreža kojom se prenosi električna energija do 10 kV opterećenja. U ovom slučaju ukoliko dođe do kvara i proradi prekidač CB9, vod nakon tog prekidača zajedno sa opterećenjem koje je spojeno na sabirnicu S3 (10 kV) će ostati bez napajanja. U tom slučaju nema otočnog pogona [18].



Slika 3.2. Otočni pogon

Na slici 3.2. je prikazana situacija u kojoj nastaje otočni pogon. Dakle, ako nastane kvar na vodu i isključi se prekidačem CB9 ili CB10, potrošači na spojeni na sabirnicu S3 će i dalje dobivati električnu energiju od distribuirane proizvodnje. To su većinom solarne elektrane ili vjetroelektrane. Problem koji se tu javlja je što ta proizvodnja nije stalna, pa se može desiti da je kvar npr. po noći kada nema sunca, dakle solarne elektrane ne rade. Sličan slučaj se dešava i sa vjetroelektranama, jer kako solarne elektrane ovise o suncu, tako i vjetroelektrane ovise o vjetru. Također kao i inače opterećenje se tijekom dana mijenja. U održavanju elektroenergetskog sustava cilj je da opterećenje (potrošnja) bude jednako proizvodnji i tada je frekvencija 50 Hz. Otočni pogon se ne može održavati jer je odvojen od mreže, a pojavljuju se problemi u održavanju frekvencije i napona [18].

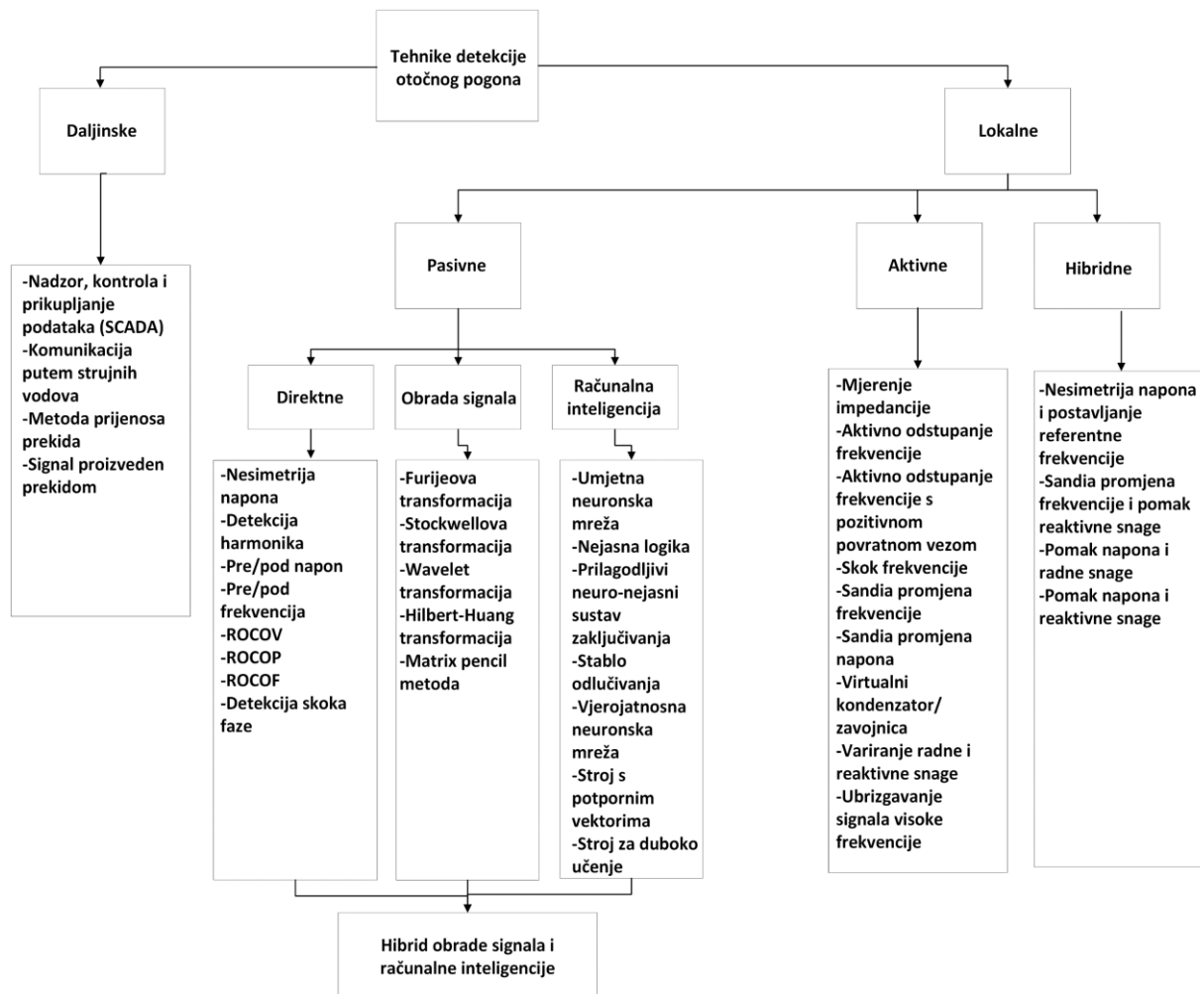


Slika 3.3. Mikromreža

Pomoću mikromreža možemo lakše održavati otočni pogon. Smisao mikromreže je dodavanje različitih uređaja kao npr. pohrana energije (baterija) kao što je vidljivo na slici 3.3. U slučaju otočnog pogona pomoću mikromreže može se održavati jer ima određene zalihe energije koje su spremjene. Međutim, mikromreže se ne grade kako bi podržavale rad otočnog pogona nego kako bi ga brzo detektirali [18].

Postoji mnogo tehnika detekcije otočnog pogona (slika 3.4.). Ove metode uglavnom se dijele na dvije kategorije, na daljinske i lokalne. Daljinske metode zahtijevaju komunikacijsku shemu, dok se lokalne tehnike temelje na lokalnim informacijama. Drugim riječima, daljinski sustavi koriste komunikaciju, dok lokalni koriste promatranje. Iako su daljinske tehnike vrlo pouzdane, implementacija takvih metoda je teška zbog upotrebe izravne komunikacije između DG-ova i usluge putem tehnologije poput optičkih vlakana i bežičnih komunikacijskih mreža. Osim toga, praktična primjena ovih shema može biti neprilagodljiva, složena i skupa zbog visokog postotka DG-a u složenim sustavima. Stoga, radi jednostavnosti i primjenjivosti, u ovom se istraživanju preferira lokalna tehnika koja je ekonomičnija. Osnovni koncept lokalnih tehnika detekcije otočnog pogona ostaje isti kao kod određenih parametara sustava koji bi trebali biti stabilni tijekom

rada povezanog s mrežom, ali se značajno mijenjaju tijekom prijelaznog stanja s povezanog na otočni način rada [16].



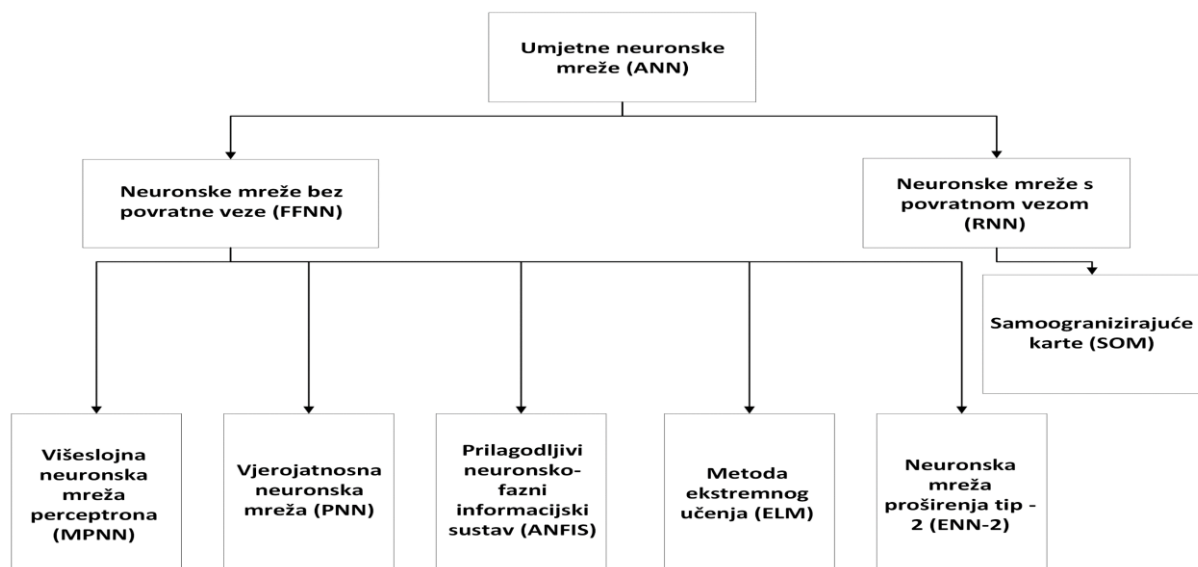
Slika 3.4. Tehnike detekcije otočnog pogona

Lokalne metode dijele se na dvije kategorije, pasivne i aktivne. Obje tehnike koriste se za praćenje prekoračenja granica napona/frekvencije mreže propisanih odgovarajućim standardom. Konvencionalne pasivne tehnike koriste mjerenja električnih veličina poput napona, struje ili frekvencije kako bi procijenile stanje otočenja sustava koristeći funkcije podnapona ili prenapona (Under voltage protection/Over voltage protection, UVP/OVP), podfrekvencije ili nadfrekvencije (Under frequency protection/Over frequency protection, UFP/OFP) te pomak vektora (Vector shift, VS). Frekvencija je konstantna u normalnim uvjetima, stoga je moguće otkriti otočno stanje provjerom stope promjene frekvencije. Releji za frekvenciju temelje se na kriterijima podfrekvencije i nadfrekvencije za izračunavanje frekvencije oblika valova na terminalu DG-a. Tipično, raspon pod- i prefrekvencije postavljen je na 0.5 Hz. Glavna slabost releja za nadzor frekvencije i napona je teškoća u otkrivanju kada su proizvodnja i opterećenje jednaki. U tom slučaju se može pojaviti velika zona nedetekcije. Međutim, došlo je do poboljšanja tako što se

smanjila zona nedetekcije usporedbom P-V i P-Q karakteristika invertera opremljenih sa stalnom kontrolom struje. Primjena računalne inteligencije u detekciji otočnog pogona novi je trend u pasivnim algoritmima detekcije otočnog pogona. Ovi pristupi uglavnom imaju za cilj procjenu rada izvan mreže što je prije moguće bez komuniciranja s drugim dijelovima električne mreže niti davanja kompromisa na kvaliteti energije. Osim brze procjene, tehnika pruža visoku računalnu učinkovitost uz pouzdanost i točnost. Neki postojeći inteligentni pristupi kombiniraju tehnike obrade signala i neuronske mreže. Na primjer, brza Fourierova transformacija (Fast Fourier transform, FFT) , ali FFT nije prikladan za ne stacionarne signale koji se pojavljuju tijekom otočenja. Kako bi se prevladale njegove ograničenosti, FFT je zamijenjen značajkama valovitog oblika i klasifikatorom umjetne neuronske mreže (Artificial Neural Networks, ANN) za pouzdanu detekciju otočnog pogona. Nova tehnika zvana metoda faze prostora postaje sve više popularna za korištenje u različitim algoritmima klasifikacije i detekcije. Tehnika se temelji na matematičkoj metodi koja rekonstruira podatke vremenskog niza u višedimenzionalnom prostoru [16].

### 3.1. Arhitektura umjetnih neuronskih mreža (ANN)

Arhitektura umjetnih neuronskih mreža (Architecture of Artificial Neural Networks, ANN) je jedna od tehnika CI-a (Computational Intelligence) koja je privukla ogroman interes u detekciji otočnog pogona. ANN su inteligentni računalni sustavi koji funkcioniraju na isti način kao i ljudski mozak. Tipična neuronska mreža (NN) sastoji se od međusobno povezanih čvorova koji komuniciraju međusobno. Čvorovi NN-a, slično stvarnim neuronima, obrađuju im pružene informacije. Sastoje se od tijela koje sadrži informacije o obradi signala i izlaznih grana koje povezuju čvorove zajedno.



Slika 3.5. Podjela umjetnih neuronskih mreža

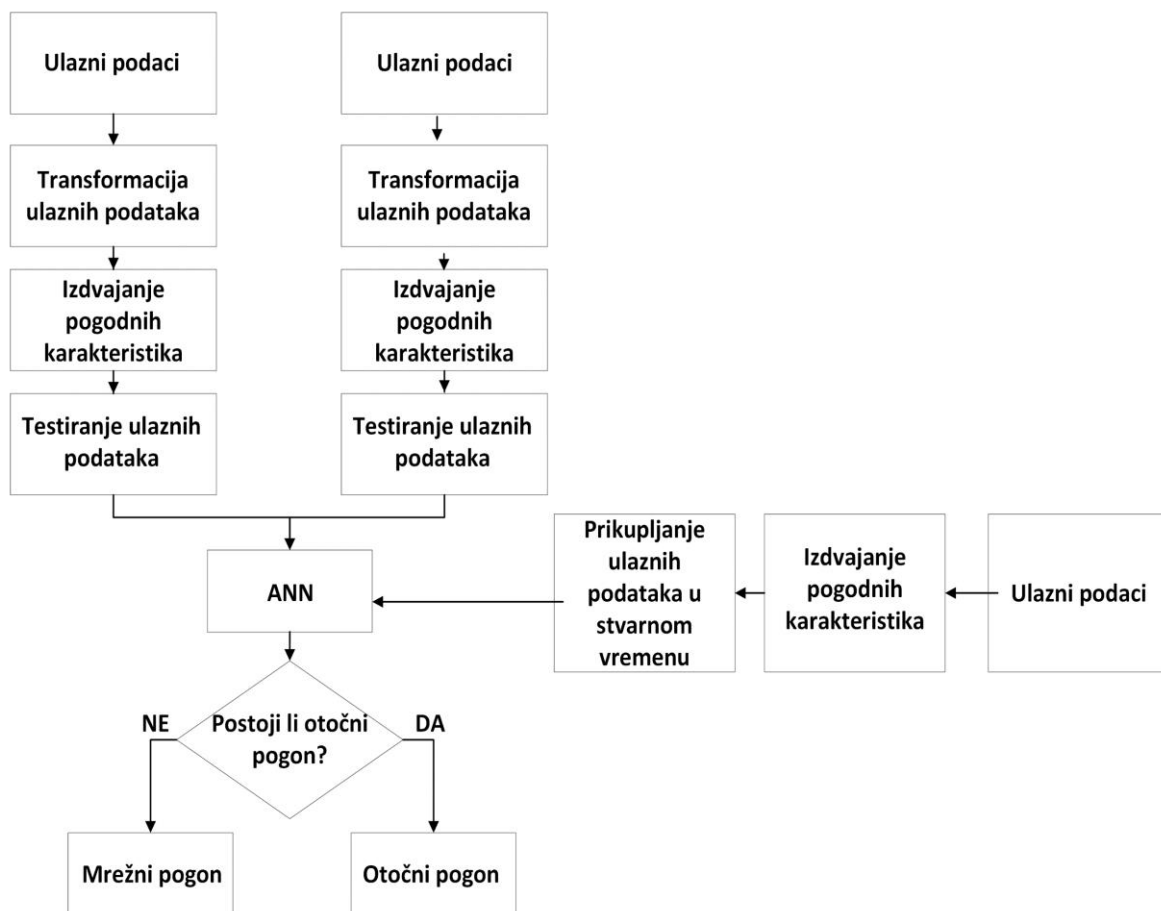
Signal se prima kroz jedan kraj, obrađuje se i prenosi kroz drugi kraj čvora, slično kao što stvarni neuroni primaju i prenose signale. Putem ovog procesa, NN-ovi mogu učiti i prilagoditi se određenim scenarijima, pa je njihova primjena u modernim računalnim sustavima nedvojbeno prepoznata. Ulazni sloj i izlazni sloj osnovnog dizajna ANN-a sastoji se od umjetnih neurona i veza. Ovakvi umjetni neuron u NN-u djeluje kao aktivacijski čvor, slično stvarnom neuronu u tome što obrađuje informacije i donosi odluke. ANN se može koristiti s SL-om ili ne (Supervised Learning, SL). Broj skrivenih čvorova određuje koliko je točan ANN; međutim, više skrivenih slojeva zahtijeva više memorije, što ovaj pristup čini neprikladnim za CPU-ove (Central Processing Unit, CPU) s niskim rasponima. Na slici 3.5. je prikazana podjela ANN-a na neuronske mreže koje se najčešće koriste za otkrivanje otočnog pogona [18].

U neuronskim mrežama bez povratne veze (Feedforward neural network, FFNN), neuroni su organizirani u slojeve koji su međusobno povezani u jednom smjeru. FFNN-ovi djeluju statično, generiraju samo jedan skup izlaza iz ulaznih podataka bez uzimanja u obzir niza ulaza. To znači da je njihova reakcija na ulaz neovisna o prethodnim stanjima mreže, čime su FFNN-ovi bez memorije. Ulazi u svaki neuron mijenjaju se samo putem povratnih petlji, što dovodi do prijelaza mreže u novo stanje [18].

Jedna od ključnih karakteristika inteligencije je kapacitet učenja. Proces učenja u kontekstu ANN-a može se promatrati kao problem nadogradnje arhitekture mreže i težina veza tako da mreža može učinkovito obavljati određeni zadatak, unatoč teškoći pružanja definiranog učenja. Općenito, mreža mora koristiti dostupne obrazovne uzorke kako bi naučila težinu veze. Težine mreža se iterativno ažuriraju kako bi se tijekom vremena povećala učinkovitost. ANN automatski uče iz primjera što predstavlja jednu od glavnih prednosti ANN-a nad konvencionalnim ekspertnim sustavima. Čini se da ANN uče osnovna pravila iz pružene kolekcije reprezentativnih slučajeva umjesto pridržavanja skupa pravila koje su postavili ljudski stručnjaci. Prvo je potrebno imati model okoline u kojoj ANN-ovi djeluju, odnosno, moraju biti svjesni informacija koje su dostupne mreži, kako bi razumjeli ili izgradili proces učenja. Ova teorija je ono što se misli pod učenjem paradigme. Druga stvar je znati kako se ažuriraju težine mreže, odnosno, koje učene metode kontroliraju postupak ažuriranja. Proces u kojem se primjenjuju učeni principi za promjenu težina naziva se učeni algoritam. Nadzirano, nenadzirano i hibridno učenje paradigme su tri osnovna tipa. U nadziranom učenju, mreža dobiva odgovarajući izlaz za svaki obrazac ulaznih podataka. Težine se odabiru tako da mreža daje odgovore što je moguće bliže poznatim točnim odgovorima. Nenadzirano učenje ne zahtijeva ispravan odgovor za svaki ulazni obrazac u skupu podataka za obuku. Istražuje odnose između uzoraka u podacima, ili njihovu osnovnu strukturu, a zatim



klasificira uzorke na temelju tih odnosa. Kombinirano nadzirano i nenadzirano učenje poznato je kao hibridno učenje. Obično se nadzirano učenje koristi za identificiranje nekih težina dok se nenadzirano učenje koristi za izračunavanje ostalih. Pronalaženje najbolje vrijednosti za svaku vezu i izmjenični faktor je glavni cilj učenog algoritma kako bi se smanjila ukupna pogreška ANN, i otkrivanje idealne strukture za određeni problem. Ispravak pogrešaka, Hebbian i kompetitivno učenje su tri učenja principa koji se koriste u otkrivanju otočnog pogona. Hebbianovo učenje objašnjava kako se neuroni prilagođavaju i formiraju jače veze kroz ponavljanu upotrebu. U nadziranom učenju paradigme, pravilo ispravka pogrešaka primjenjuje se, a ANN-u se daje željeni izlaz za svaki obrazac ulaznih podataka. Stvarni izlaz koji proizvodi ANN tijekom procesa učenja može se razlikovati od očekivanog izlaza. Pravilo učenja perceptrona temelji se na temeljnoj ideji pravila ispravka pogrešaka, a to je korištenje signala pogreške za prilagodbu težina veza kako bi se postupno smanjila ova pogreška. Kada su neuroni s obje strane sinapsi redovito i sinkronizirano stimulirani, snaga sinapsi selektivno se povećava.



Slika 3.6. Dijagram toka ANN-a u otkrivanju otočnog pogona

Činjenica da učenje lokalno nastaje, ili da se promjena u težini sinapsi temelji isključivo na aktivnosti dva neurona povezana njome, ključna je karakteristika ovog pravila. Jedan neuron koji je treniran prema Hebbian pravilu pokazuje selektivnost orijentacije. Izlazne jedinice

kompetitivnog učenja, za razliku od Hebbian učenja, natječu se međusobno kako bi bile aktivirane.

Stoga je jedna izlazna jedinica uvijek operativna u isto vrijeme. Ovaj fenomen naziva se "pobjednik uzima sve". Ulazni podaci često se grupiraju ili kategoriziraju kroz kompetitivno učenje. ANN grupira povezane uzorke i prikazuje ih kao jednu cjelinu. Automatska kategorizacija provodi se na temelju korelacija podataka. Pravila učenja temeljena na ispravku pogrešaka, Hebbian i kompetitivno učenje koriste se i u nadziranom i nenadziranom učenju. Iako se pravila Hebbian učenja koriste za sve vrste arhitekture ANN-a, pravila učenja ispravljanja pogrešaka potrebna su za obuku FFNN-a (algoritam učenja unatrag). Svaki učeni algoritam stvoren je za obuku određene arhitekture [18].

Na slici 3.6 je prikazan postupak detekcije otočnog pogona korak po korak, odnosno način na koji je ANN istreniran na detekciju otočnog pogona. Ulazni podaci prvo prolaze kroz transformaciju i redukciju pomoću različitih matematičkih transformacija. Ti podaci su podijeljeni na testiranje i obuku u omjeru 66/33. Na temelju toga ANN odlučuje postoji ili otočni pogon ili ne [18].

### 3.2. Fazni prostor

Cilj metode faznog prostora je analizirati vremenski niz u prostoru veće dimenzije nazvanom fazni prostor. U matematici i fizici fazni prostor je prostor u kojem su predstavljena sva moguća stanja sustava. U tom stanju svako moguće stanje sustava odgovara jedinstvenoj točki. Upotreba faznog prostora je praktična za opis dinamičkih sustava. Svaka ortogonalna koordinata faznog prostora predstavlja jedno od trenutnih stanja sustava [19].

Dinamički sustav s  $d$  dimenzija može se prikazati pomoću  $d$  diferencijalnih jednadžbi prvog reda. Rješenje ovih jednadžbi,  $\mathbf{s} \in \mathfrak{R}^d$ , predstavlja stanje u odgovarajućem faznom prostoru, gdje  $\mathfrak{R}$  označava euklidski prostor [16].

Izvlačenje značajki jedan je od ključnih zadataka u razvoju detekcije otočnog pogona temeljene na višestrukim parametrima. Cilj predloženih značajki faznog prostora je identificirati specifični naponski signal koji može razlikovati otočni pogon od bilo kojeg drugog stanja. Značajke s prosječnom vrijednošću  $E_x$  tijekom vremena kvara ili nakon prvog tranzijentnog razdoblja do sljedećeg tranzijentnog razdoblja poremećaja dobivene su iz sljedeće jednadžbe [16]:

$$\overline{E_x} = \frac{\sum_{x=1}^n E_x}{n} \quad (3 - 1)$$

Gdje je  $n$  broj uzoraka, naime, značajka s površinom se može izračunati kao:

$$Area = \int_b^a E_x dt \quad (3 - 2)$$

Gdje su a i b granice koje označavaju početak i kraj poremećaja.

Moguće situacije otočnog pogona:

- Promjena opterećenja i prebacivanje kondenzatora na točki spoja s potrošačima i jedinicama distribuirane energije (DG)
- Gubitak glavnog napajanja na sabirnici
- Kvarovi na jedinicama DG i distribucijskim linijama
- Isključivanje glavnog prekidača za uvjete otočnog pogona
- Isključivanje drugih jedinica DG osim ciljane
- Događaji koji mogu isključiti prekidače i ponovno zatvaranje, kao i otkidanje DG-a koji se proučava [16]

Ovi uvjeti simuliraju se pod različitim varijacijama uvjeta kao što su:

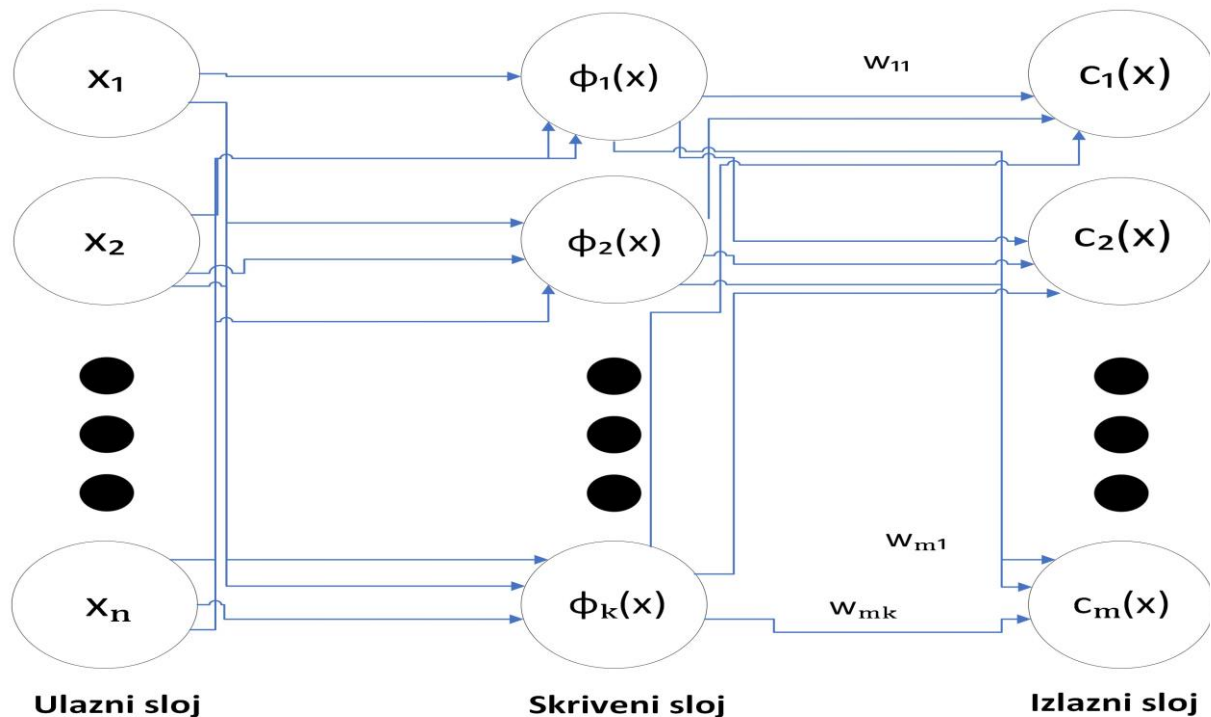
- Normalno opterećenje DG-a, minimalno opterećenje DG-a i maksimalno opterećenje DG-a
- Različite radne točke DG-a koje mogu uzrokovati NDZ (non-detection zone) [16]

Za bilo koji umjetno inteligentni klasifikator, poput neuronskih mreža, važno je dobivanje uzoraka testiranja, kao i ulaznih parametara. Ulaz u klasifikator može se dobiti korištenjem značajki malih valova ili faznog prostora za različite događaje poremećaja. Izlazni parametri klasifikatora mogu, a i ne moraju biti otočni pogon i ti parametri se dobivaju simulacijom svakog uvjeta.

### **3.3. Neuronska mreža s radijalnim baznim funkcijama (RBFNN)**

U mnogim znanstvenim i inženjerskim primjenama važno je tražiti funkciju koja može adekvatno opisati skup ulazno-izlaznih parova, poput identifikacije sustava. Jedna od široko korištenih metoda je aproksimacija funkcije. Općenito, aproksimacija funkcije može se postići parametarskim ili neparametarskim metodama. Parametarska metoda pretpostavlja da se odnos između ulaznih i izlaznih uzoraka može predstaviti određenim funkcionalnim modelom s određenim parametrima, tako da se problem aproksimacije može pojednostaviti na pronalaženje tih parametara. Nasuprot tome, neparametarska metoda ne pretpostavlja a priori znanje za skup ulazno-izlaznih parova, iako u stvarnom svijetu ti ulazno-izlazni parovi općenito pokazuju visoko nelinearan odnos [20].

RBF ili neuronska mreža s radijalnim baznim funkcijama sastoji se od ulaznog sloja, skrivenog sloja i izlaznog sloja. Neuron u tim slojevima imaju Gaussove transferne funkcije, a njihovi izlazi su obrnuto proporcionalni udaljenosti izračunatoj od centra neurona. RBF mreže dijele sličnosti s K-srednjim grupiranjem, Vjerojatnosnim neuronskim mrežama (PNN) ili općim neuronskim mrežama regresije (GRNN).



Slika 3.7. Slojevi RBFNN-a

Međutim, glavna razlika leži u strukturi: PNN i GRNN obično imaju neuron za svaku točku u skupu podataka za obuku modela. Nasuprot tome, RBF mreže imaju promjenjiv broj neurona, što je obično puno manje od broja točaka za obuku. Za male ili srednje veličine skupa za obuku, PNN ili GRNN mreže često pokazuju veću preciznost od RBF mreža. Međutim, kada se radi s velikim skupovima za obuku, PNN ili GRNN mreže postaju nepraktične. U takvim slučajevima, RBFNN postaje preferirana opcija zbog prilagodljivosti velikim skupovima podataka [21].

Matematički, radijalna bazna funkcija (RBF) ima stvarnu vrijednost,  $\Psi$ , čija vrijednost ovisi isključivo o udaljenosti između bilo koje fiksne točke i ulaza. Ta točka može biti ili ishodište, što je  $\Psi(x) = \Psi'(\|x\|)$  koordinata prostora ili fiksna točka, koja se naziva  $\varphi(x) = \varphi^{\wedge}(\|x\|)$  radijalna funkcija [21].

Primjena RBF-a razlikuje se od bilo koje druge neuronske mreže. Teorijski, RBF neuronske mreže izuzetno su slične modelima K-najbližih susjeda (k-NN). Ideja iza toga je da je prognozirana ciljna vrijednost određenog elementa vjerojatno vrlo slična drugim susjedima varijabli prediktora.

Metoda klasifikacije najbližih susjeda ovisi o broju susjednih točaka koje se razmatraju. RBF mreža smješta jedan ili više RBF neurona u koordinatni prostor, kako su navedene varijable prediktora. Ovaj prostor je višedimenzijski, gdje broj varijabli prediktora određuje broj dimenzija u ovom prostoru. Euklidska udaljenost u ovom prostoru između svakog neurona, pri čemu se udaljenost računa od centra neurona. Nakon toga, primjenjuje se RBF, također jezgra funkcije. Zatim se izračunava težina svakog neurona [21].

Kako je prikazano na slici 3.7. RBF mreže posjeduju tri sloja:

- Ulazni sloj - U ovom sloju trend je jedan neuron za svaku varijablu prediktora. Ulazni neuroni dovode dodijeljene vrijednosti u svaki skriveni sloj.
- Skriveni sloj - U ovom sloju nalazi se varijabilan broj neurona, koji se izračunava tijekom procesa obuke. Skriveni neuron izračunava euklidsku udaljenost testnog slučaja. Koristeći vrijednosti raspršenosti, zatim se primjenjuje na jezgru funkcije RBF. Rezultat se zatim prenosi na sloj zbrajanja.
- Sloj zbrajanja ili sloj zbrajanja (izlazni sloj) - Težina neurona pomnožena je s vrijednošću koju daje neuron u skrivenom sloju, a rezultat se zatim prenosi na sloj zbrajanja. Ovdje težinske vrijednosti predstavljaju zbrojeve kao izlaz mreže [21].

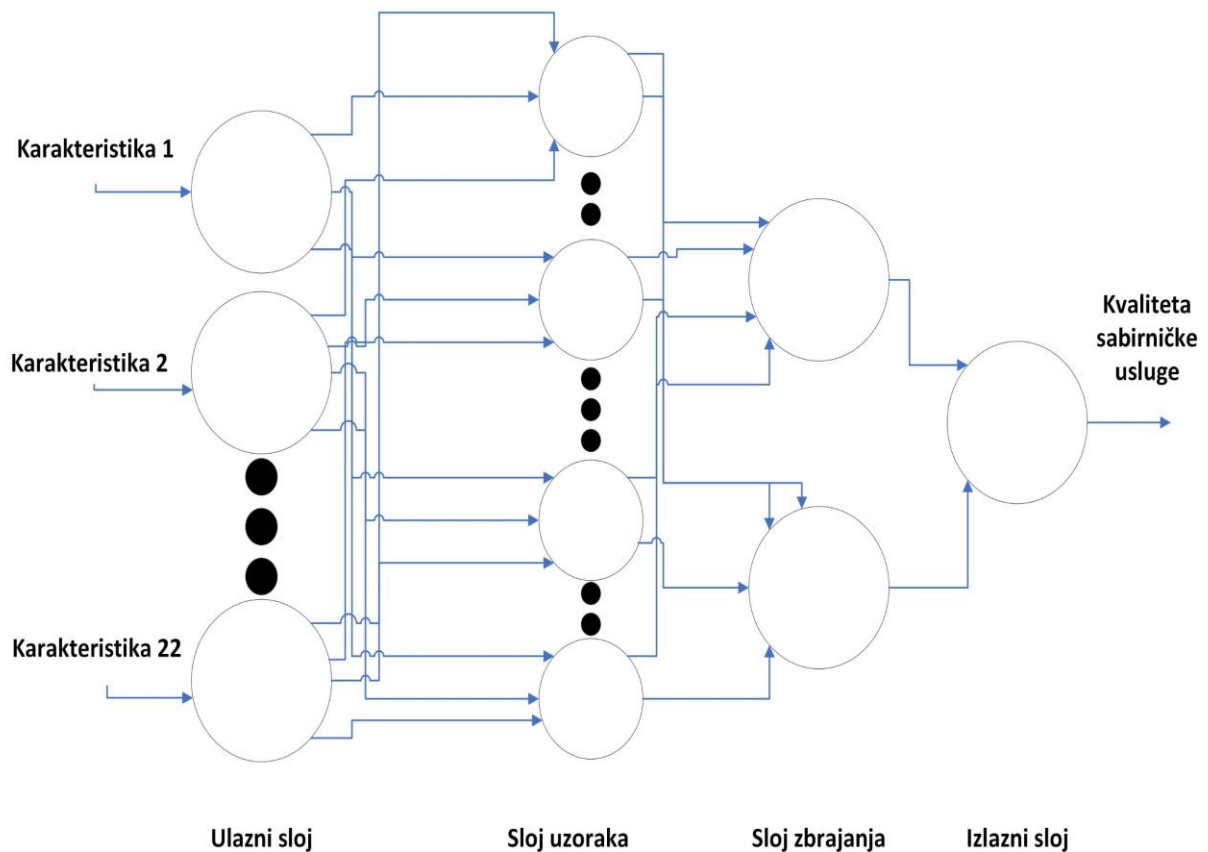
### **3.4. Vjerojatnosna neuronska mreža (PNN)**

Vjerojatnosne neuronske mreže (Probabilistic neural network, PNN) stoje na čelu inovacija u strojnom učenju, nudeći nijansirani pristup obradi nesigurnosti u podacima. Tradicionalne neuronske mreže, iako moćne u mnogim primjenama, nailaze na ograničenja kada se suoče s dvosmislenim ili nepreciznim informacijama. PNN rješava ovaj izazov uvodeći vjerojatnosni okvir koji poboljšava njegovu sposobnost modeliranja i snalaženja u neizvjesnim scenarijima. Arhitektura PNN-a sastoji se od različitih slojeva koji doprinose njezinim jedinstvenim sposobnostima. Ulazni sloj obrađuje dolazne podatke, dok sloj obrasca hvata urođene obrasce unutar informacija. Sloj zbrajanja kombinira ove obrasce, a na kraju, izlazni sloj proizvodi vjerojatnosne izlaze, što omogućuje nijansiranije razumijevanje predikcija. Ova karakteristična struktura osnažuje PNN da se istakne u zadacima gdje je nesigurnost prisutna, čineći je posebno vrijednom u stvarnim aplikacijama [22].

Jedna od ključnih značajki PNN-a leži u njezinoj inkorporaciji gustoća vjerojatnosti. Za razliku od tradicionalnih neuronskih mreža koje generiraju determinističke izlaze, PNN pruža izlaze u obliku distribucija vjerojatnosti. Ova osobina neprocjenjiva je u scenarijima gdje su precizne predikcije

izazovne, poput medicinske dijagnostike, financijskog prognoziranja ili praćenja okoliša. Vjerojatnosna priroda PNN-a ne samo da poboljšava pouzdanost predikcija, već pruža i mjeru povjerenja u izlaz modela. To je ključno u procesima donošenja odluka gdje je razumijevanje razine nesigurnosti povezane s predikcijom bitno za informirane izbore [22].

Primjene PNN-a obuhvaćaju širok spektar domena. U zadacima prepoznavanja uzoraka, gdje je identifikacija složenih uzoraka u podacima ključna, PNN pokazuje svoju sposobnost. Mogućnost uzimanja u obzir nesigurnosti posebno je relevantna u područjima poput prepoznavanja slika, obrade govora i razumijevanja prirodnog jezika, gdje su varijacije i nijanse inherentne. PNN je također pokazao učinkovitost u zadacima klasifikacije u neizvjesnim okruženjima, čineći ga vrijednim alatom za zadatke poput otkrivanja anomalija i procjene rizika [22].



Slika 3.8. Slojevi PNN-a

Unatoč svojim prednostima, PNN nije bez izazova. Računalna složenost obuke i korištenja probabilističkih modela može biti zahtjevna. Istraživači aktivno istražuju strategije za optimizaciju učinkovitosti PNN-a bez ugrožavanja njegove točnosti. Trenutni napori također usredotočeni su na usavršavanje arhitekture kako bi se rukovalo visokodimenzijskim podacima i poboljšala skalabilnost. Kako se strojno učenje nastavlja razvijati, PNN predstavlja obećavajući teren u

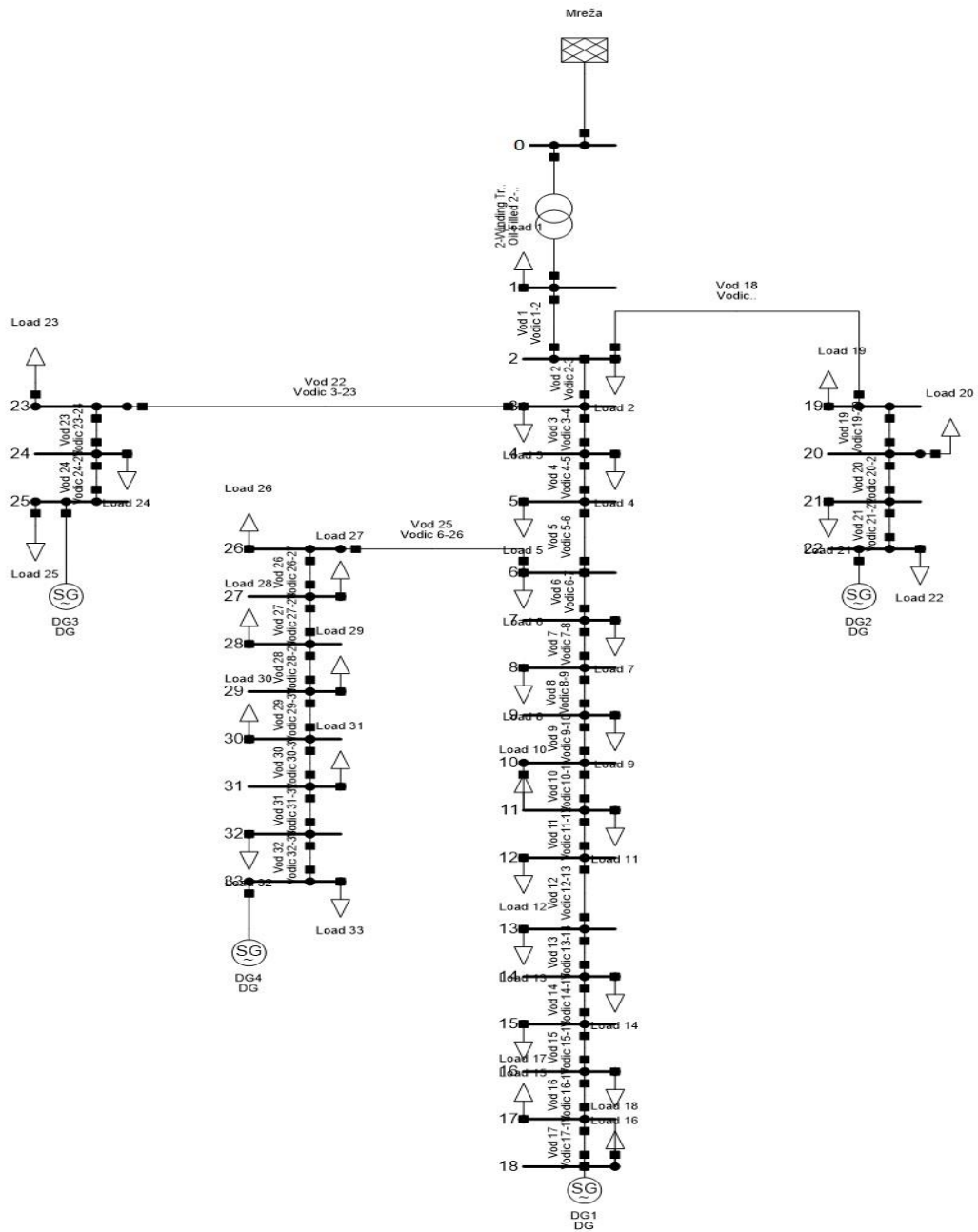
probabilističkom modeliranju, a trenutna istraživanja imaju za cilj otključati njezin puni potencijal [22].

Razmatrajući jednostavnu arhitekturu mreže prikazanu na slici 3.8. s četiri ulazna čvora ( $p = 4$ ) u ulaznom sloju, dvije populacijske klase (klasa 1 i klasa 2), pet primjera za učenje koji pripadaju klasi 1 ( $n_1 = 5$ ) i tri primjera u klasi 2 ( $n_2 = 3$ ). Sloj uzoraka dizajniran je da sadrži jedan neuron (čvor) za svaki dostupni obučeni slučaj i neuroni su podijeljeni u dvije klase. Sloj zbrajanja sadrži po jedan neuron za svaku klasu. Izlazni sloj sadrži jedan neuron koji izvodi trivijalnu diskriminaciju praga, jednostavno zadržava maksimum od dva neuronska zbrajanja. PNN izvršava obučeni slučaj tako što ga prvo predstavlja svim neuronima sloja uzoraka. Svaki neuron u sloju uzoraka izračunava mjeru udaljenosti između predstavljenog vektora ulaza i obučenog primjera koji predstavlja taj uzorak neurona. PNN zatim podvrgava tu mjeru udaljenosti Parzenovom prozoru (funkcija težine,  $W$ ) i daje aktivaciju svakog neurona u sloju uzoraka. Naknadno, aktivacija iz svake klase dovodi se do odgovarajućeg neurona sloja zbrajanja, koji zbraja sve rezultate u određenoj klasi zajedno. Aktivacija svakog neurona zbrajanja izvršava se primjenom preostalog dijela Parzenove jednadžbe kako bi se dobila procijenjena vrijednost funkcije gustoće vjerojatnosti populacije određene klase. Ako su troškovi pogrešne klasifikacije i prijašnja vjerojatnost jednaki između dvije klase, te su klase međusobno isključive (tj. nijedan slučaj ne može biti klasificiran u više od jedne klase) i iscrpne (tj. skup za učenje pokriva sve klase pravedno), aktivacija neurona zbrajanja bit će jednaka a posteriori vjerojatnosti svake klase. Rezultati iz dva neurona zbrajanja zatim se uspoređuju i veći se unaprijed dovodi do izlaznog neurona kako bi se dobio izračunata klasa i vjerojatnost da taj primjer pripada toj klasi. Najvažniji parametar koji treba odrediti kako bi se dobila optimalna PNN su parametri zaglađivanja ( $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \text{ i } \sigma_p$ ) slučajnih varijabli. Jednostavan postupak uključuje odabir proizvoljnih vrijednosti  $\sigma$ , obučavanje mreže i testiranje na testnom (validacijskom) skupu primjera. Taj postupak se ponavlja za druge  $\sigma$ , a skup  $\sigma$  koji daje najmanju stopu pogrešne klasifikacije (postotak primjera koji su pogrešno klasificirani) se bira [23].

## 4. SIMULACIJE I REZULTATI

### 4.1. Opis modela

U simulaciji je korišten IEEE 33 sabirnički sustav prikazan na slici 4.1. Simulacija je rađena u programskom paketu DIgSILENT PoweFactory [3].



Slika 4.1. IEEE 33 sabirnički sustav



U modelu mreže korišten je američki tip transformatora snage 20 MVA čiji su podaci napisani u tablici 4.1.

Tablica 4.1. Podaci transformatora

Prijenosni omjer	Grupa spoja	Frekvencija	Prijenosna snaga
69/13,8	Dyn11	50 Hz	20 MVA

U modelu mreže postoji distribuirana proizvodnja na sabirnici 22, 18, 25 i 33. Na sabirnici 0 je spojena mreža. Podaci su prikazani u tablici 4.2.

Tablica 4.2. Podaci generatora i mreže

Sabirnica	Radna snaga [kW]	Jalova snaga [kVAr]
0	4000	2500
18	200	0
22	200	0
25	200	0
33	200	0

Svaka sabirnica ima potrošača čija je potrošnja radne i jalove snage prikazana u tablici 4.3.

Tablica 4.3. Podaci potrošača

Load	P [kW]	Q [kVAr]
1	0	0
2	100	60
3	90	40
4	120	80
5	60	30
6	60	20
7	200	100
8	200	100
9	60	20
10	60	20
11	45	30
12	60	35
13	60	35
14	120	80
15	60	10
16	60	20
17	60	20
18	90	40
19	90	40
20	90	40
21	90	40
22	90	40
23	90	50
24	420	200
25	420	200
26	60	25
27	60	25
28	60	20
29	120	70
30	200	600

31	150	70
32	210	100
33	60	40

Nadzemni vodovi spajaju sabirnice čiji su podaci prikazani tablicom 4.4.

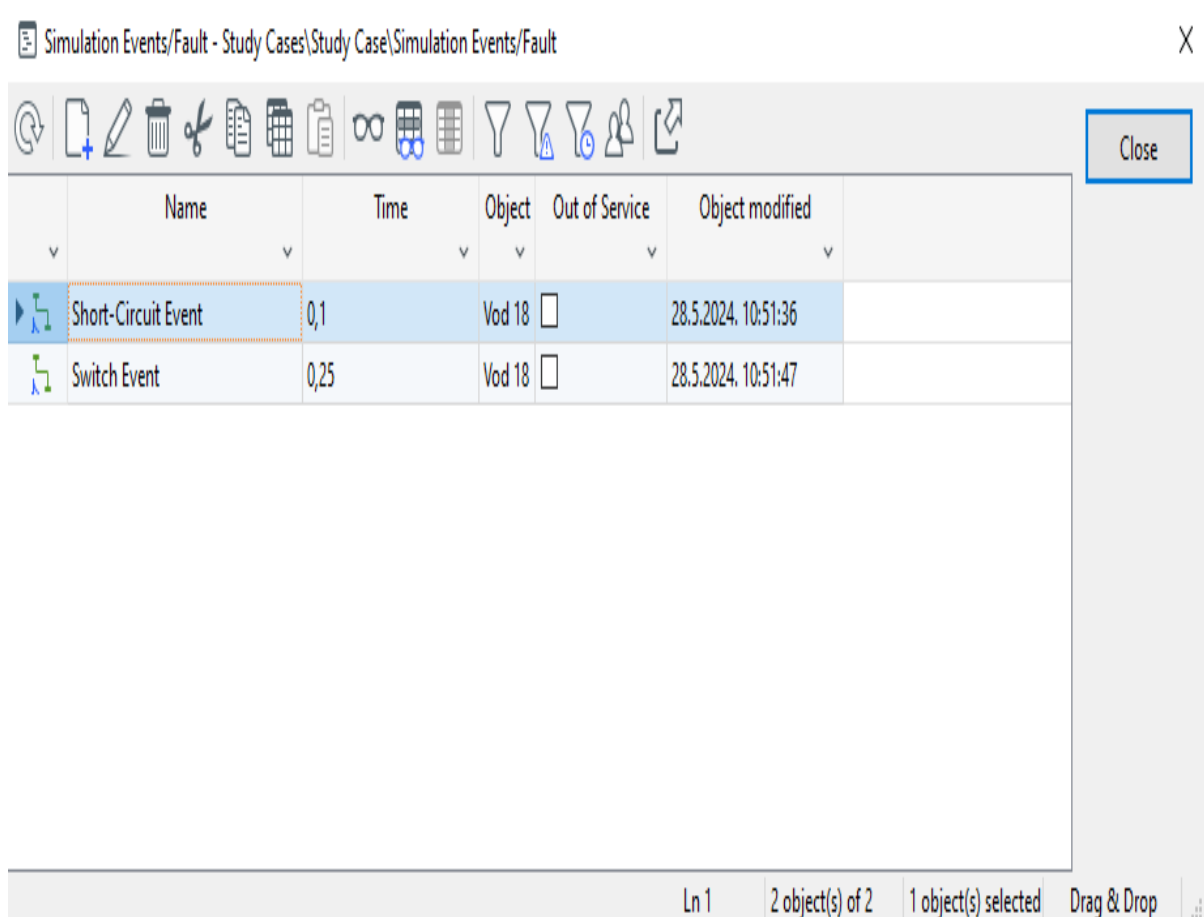
Tablica 4.4. Podaci vodova

Od sabirnice	Do sabirnice	R [ $\Omega/m$ ]	X [ $\Omega/m$ ]	Struja [A]
1	2	0.0922	0.0477	500
2	3	0.493	0.2511	500
3	4	0.366	0.1864	500
4	5	0.3811	0.1941	500
5	6	0.819	0.707	500
6	7	0.1872	0.6188	500
7	8	1.7114	1.2351	500
8	9	1.03	0.74	500
9	10	1.04	0.74	500
10	11	0.1966	0.065	500
11	12	0.3744	0.1238	500
12	13	1.468	1.155	500
13	14	0.5416	0.7129	500
14	15	0.591	0.526	500
15	16	0.7463	0.545	500
16	17	1.289	1.721	500
17	18	0.732	0.574	500
2	19	0.164	0.1565	500
19	20	1.5042	1.3554	500
20	21	0.4095	0.4784	500
21	22	0.7089	0.9373	500
3	23	0.4512	0.3083	500
23	24	0.898	0.7091	500
24	25	0.896	0.7011	500
6	26	0.203	0.1034	500
26	27	0.2842	0.1447	500
27	28	1.059	0.9337	500
28	29	0.8042	0.7006	500
29	30	0.5075	0.2585	500
30	31	0.9744	0.963	500
31	32	0.3105	0.3619	500
32	33	0.341	0.5302	500

Na osnovu ovih podataka odrađena je simulacija malog i velikog otoka. U tim simulacijama promatrana su tri različita scenarija: prvi scenarij predstavlja situaciju u kojoj distribuirana proizvodnja ima veću proizvodnju od potrošnje potrošača koji se nalaze u otočnom pogonu, drugi scenarij razmatra situaciju u kojoj distribuirana proizvodnja ima jednaku proizvodnju potrošnji potrošača, dok treći scenarij analizira uvjete kada distribuirana proizvodnja ima manju proizvodnju u odnosu na potrošnju u otočnom pogonu.

## 4.2. Simulacija malog otoka

Nakon što je model napravljen, pokrenuta je funkcija tokova snaga pomoću koje se prikazuje tok energije kroz mrežu. Pomoću te funkcije se može ustanoviti je li neka od sabirnica, transformator, generator ili vod preopterećen.



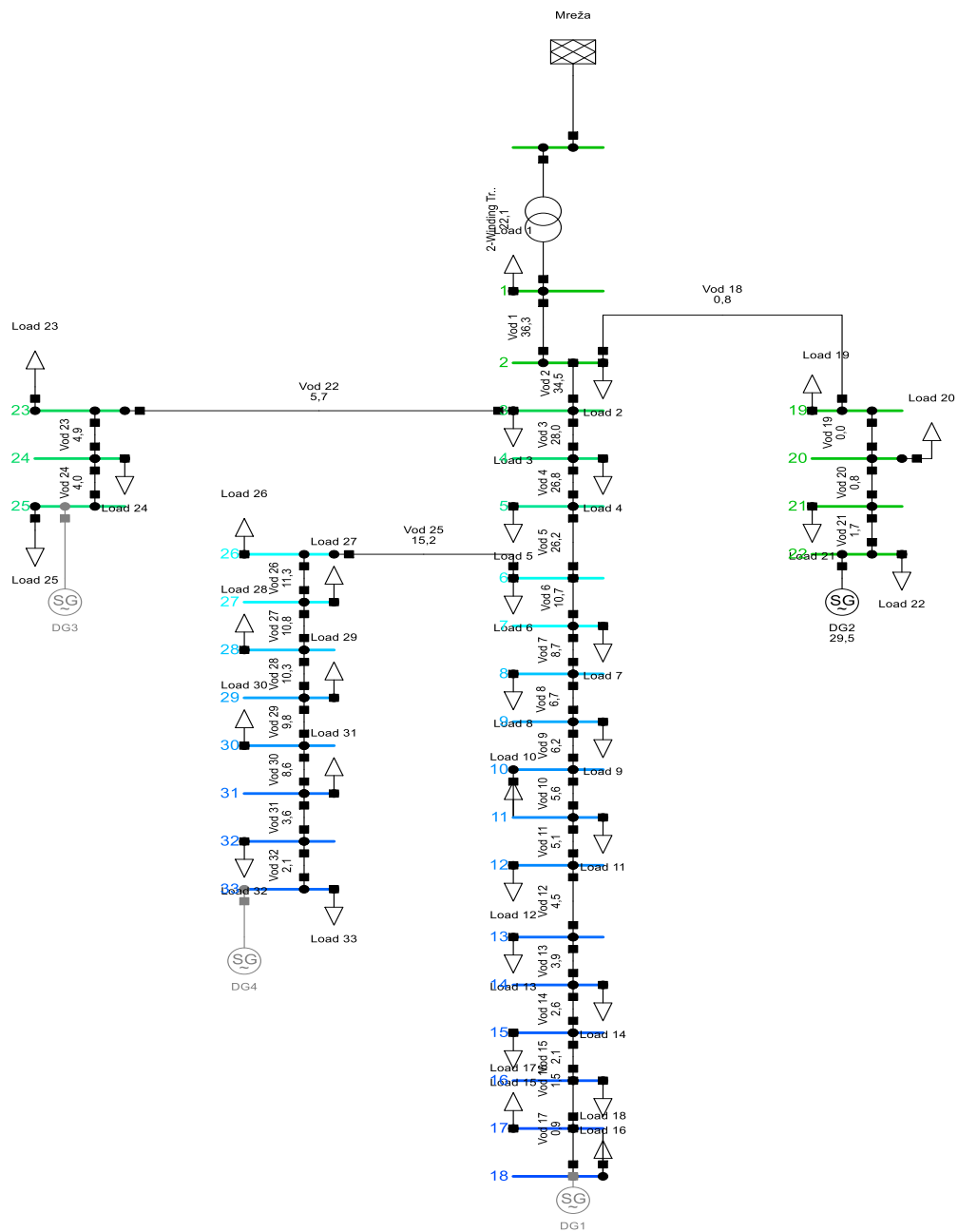
Name	Time	Object	Out of Service	Object modified
Short-Circuit Event	0,1	Vod 18	<input type="checkbox"/>	28.5.2024. 10:51:36
Switch Event	0,25	Vod 18	<input type="checkbox"/>	28.5.2024. 10:51:47

Slika 4.2. Događaji

Kada je ustanovljeno da je sve u redu i da nema preopterećenja, kreirani su događaji koji će se dogoditi u simulaciji. Događaji su prikazani na slici 4.2. Postavljeno je da se dogodi trolpolni kratki spoj na vodu 18, koji spaja sabirnice 2 i 19, u trenutku 0,1 sekunda nakon pokretanja simulacije. U trenutku 0,25 sekundi, vod 18 se isključuje. Nakon isključenja voda 18, nastaje otočni pogon koji se napaja iz distribuirane proizvodnje DG2 prikazane na slici 4.4. Simulacija se izvodi u tri promatrana slučaja. Prvi slučaj je kada je proizvodnja veća od potrošnje. Drugi slučaj je kada je proizvodnja jednaka potrošnji.

Treći, odnosno zadnji slučaj, je kada je proizvodnja manja od potrošnje. Promatraju se sabirnice 22, 21, 19 i 2. Električne veličine koje se promatraju na tim sabirnicama su napon, frekvencija, te radna i jalova snaga koju daje mreža i koju daje DG2. U svakom od ovih slučajeva, cilj je analizirati kako različiti uvjeti proizvodnje i potrošnje utječu na stabilnost sustava. Proučavaju se promjene

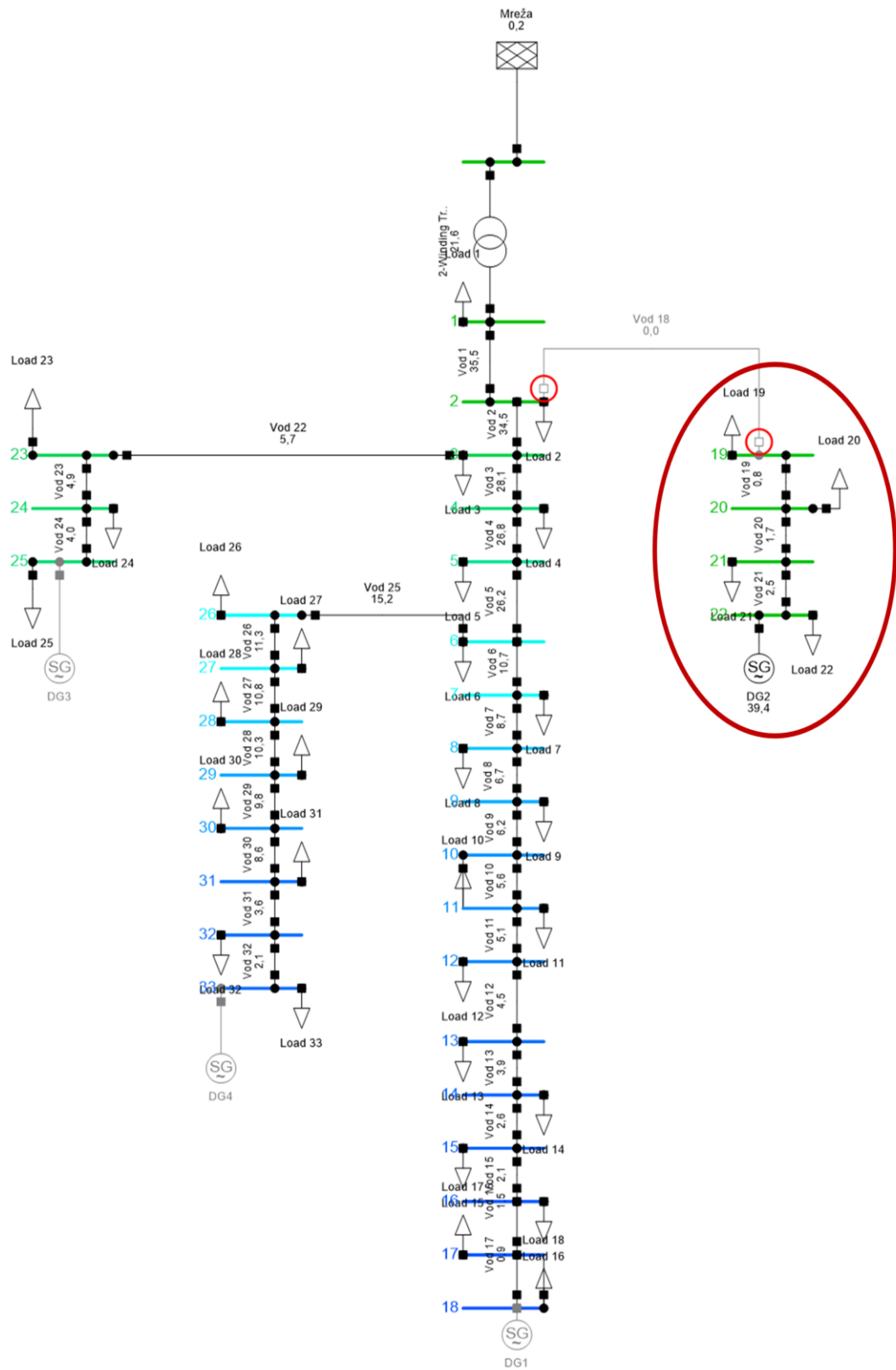
u naponskim profilima, fluktuacije frekvencije, te distribucija radne i jalove snage između mreže i DG2. Promjene u naponu, frekvenciji, te radnoj i jalovoj snazi koje se prate na sabirnicama 22, 21, 19 i 2, daju uvid u ponašanje sustava pod različitim uvjetima. To omogućava identifikaciju potencijalnih problema i potrebnih korektivnih mjera kako bi se osigurala stabilnost i pouzdanost elektroenergetskog sustava. Slika 4.3. prikazuje model nakon što je pokrenuta funkcija tokova snaga.



Created with DIGSILENT PowerFactory Education Licence

Slika 4.3. Tokovi snaga modela mreže

Slika 4.4. prikazuje mali otok napajan distribuiranom proizvodnjom DG2.

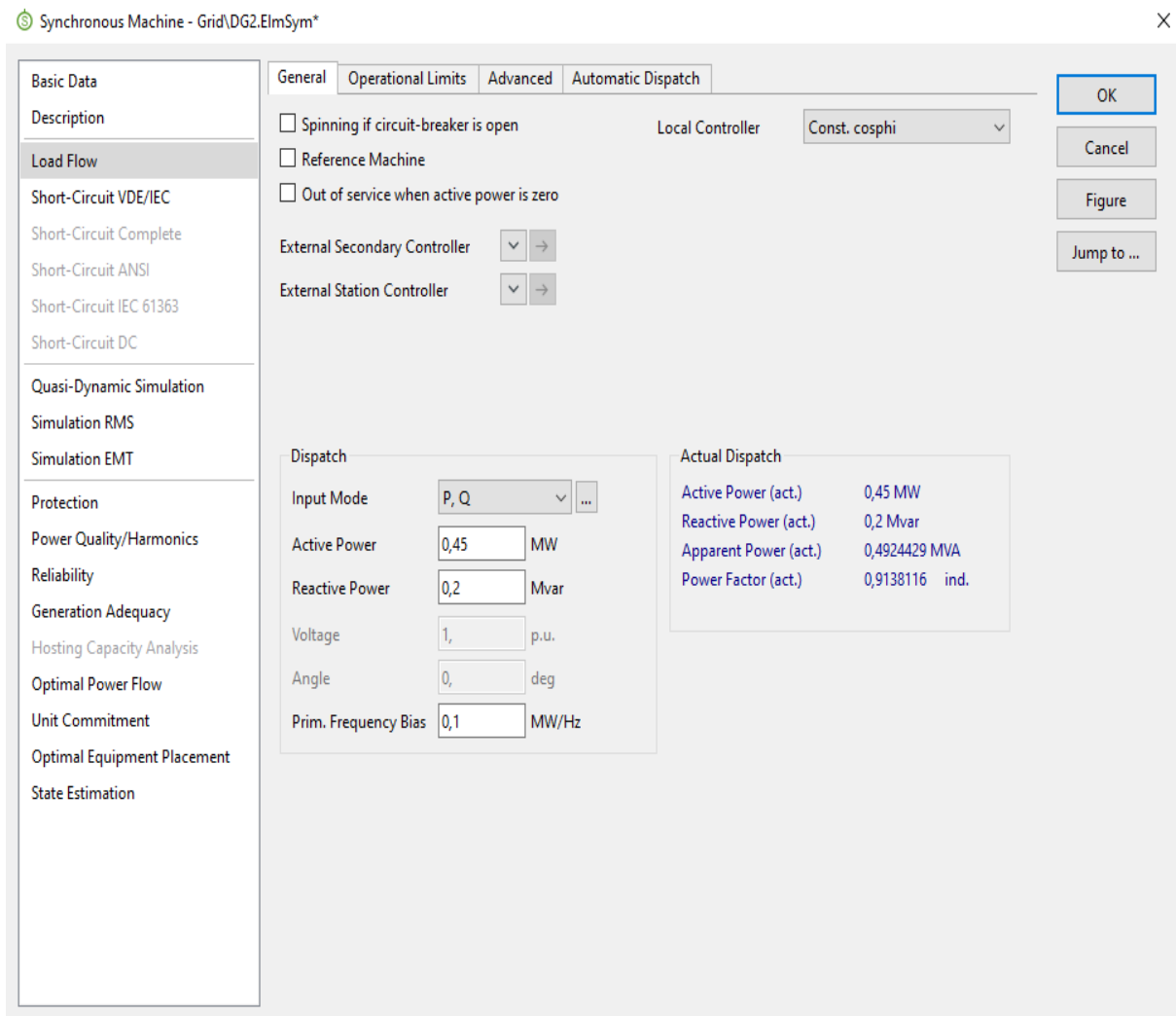


Created with DIGSILENT PowerFactory Education Licence

Slika 4.4. Mali otok

### 4.2.1. Proizvodnja veća od potrošnje

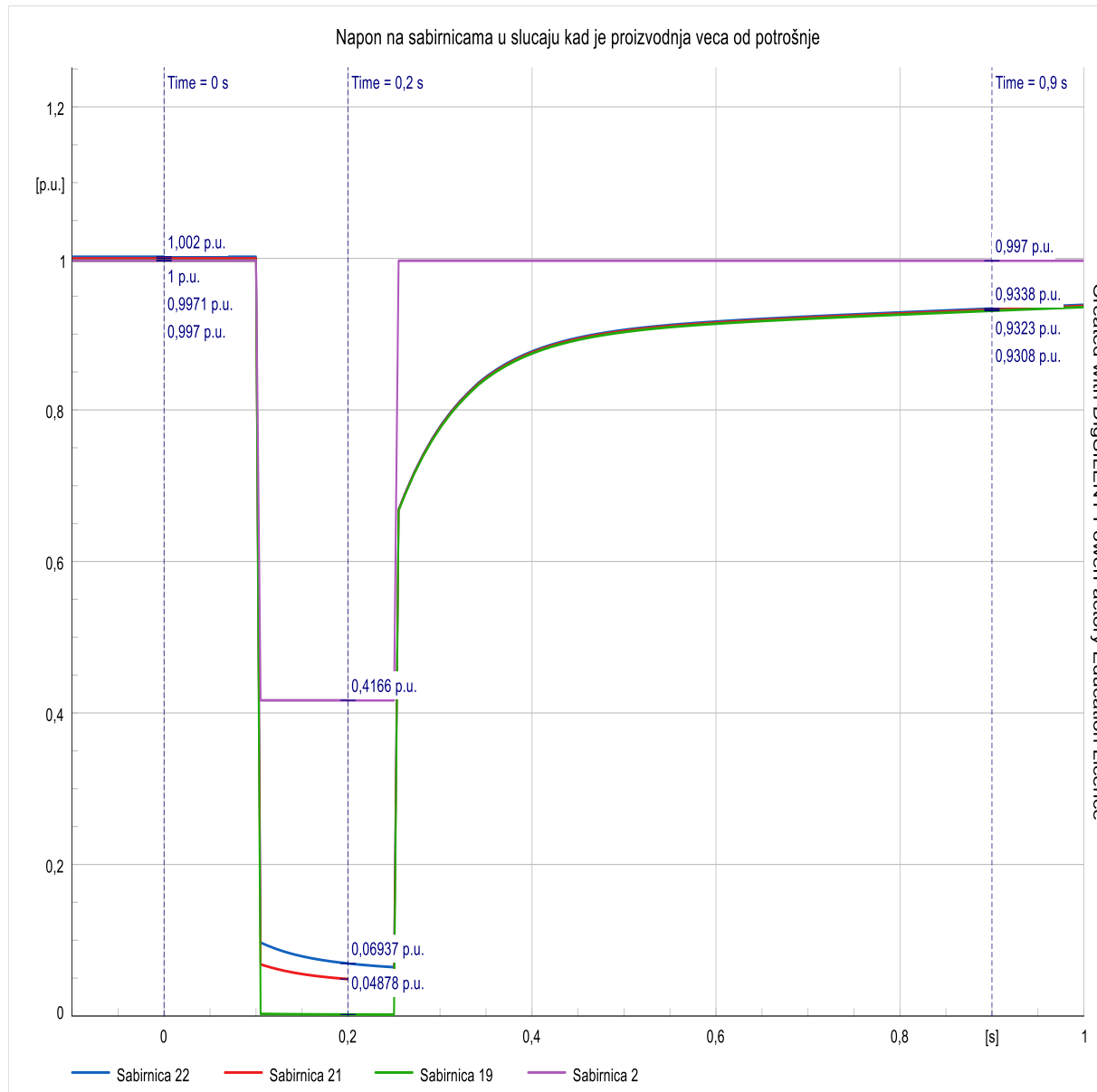
U ovom slučaju, proizvodnja je veća od potrošnje u malom otoku prikazanom na slici 4.4. Ukupna potrošnja na sabirnicama 22, 21, 20 i 19, koje su u otočnom pogonu, iznosi 360 kW radne snage i 160 kVAr jalove snage. U scenariju u kojem je proizvodnja veća od potrošnje, snaga je povećana za 25%. Dakle, proizvodnja je postavljena na 450 kW radne snage i 200 kVAr jalove snage, kao što je prikazano na slici 4.5. Ovaj porast u proizvodnji osigurava da distribuirana proizvodnja DG2 generira dovoljno energije za pokrivanje trenutnih potreba potrošnje na sabirnicama u otočnom pogonu, s dodatnim viškom koji rezultira povećanjem napona. Dok su svi ostali generatori isključeni, DG2 preuzima cjelokupno opterećenje i osigurava napajanje za sabirnice 22, 21, 20 i 19. Ovaj scenarij omogućava detaljno praćenje kako višak proizvodnje utječe na električne veličine kao što su napon, frekvencija, te radna i jalova snaga.



Slika 4.5. Podaci DG2 u slučaju kad je proizvodnja veća od potrošnje

Napon na sabirnicama u trenutku nula je gotovo isti, svi su oko 1 p.u. s minimalnim odstupanjem. U trenutku kratkog spoja (0,1 s) napon naglo pada na vrijednost blizu 0 p.u. (slika 4.6.) za sve

sabirnice u otočnom pogonu, osim za sabirnicu 2 koja nije u otočnom pogonu. Napon na sabirnici 2 pada na 0,4166 p.u. U trenutku isključenja voda 18 (0,25 s), napon na sabirnici 2 se naglo vraća na vrijednost oko 1 p.u. i ostaje stabilan na toj vrijednosti. Ovo pokazuje kako je sabirnica 2, koja je povezana s glavnom mrežom, manje osjetljiva na poremećaje koji se događaju u otočnom pogonu.



Slika 4.6. Napon - prijelazno stanje

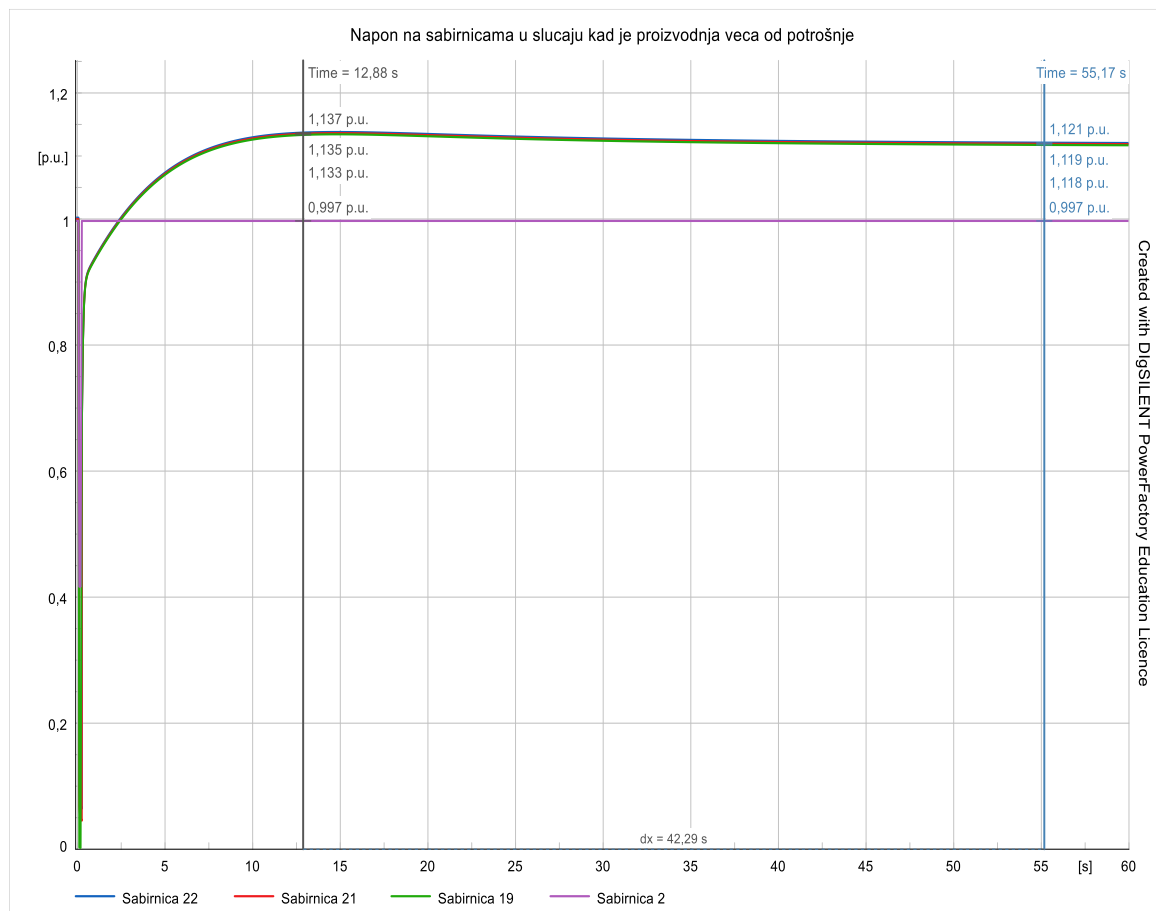
Što se tiče ostalih sabirnica koje su u otočnom pogonu (sabirnice 22, 21 i 19), njihov napon počinje rasti nakon isključenja voda 18. Ove sabirnice doživljavaju postupno povećanje napona, dosežući svoj maksimum u 13. sekundi. Nakon dostizanja maksimuma, naponi na ovim sabirnicama se stabiliziraju na vrijednost koja je veća od 1 p.u. Povećanje napona iznad 1 p.u. na sabirnicama u otočnom pogonu događa se zbog toga što je proizvodnja veća od potrošnje. Kada postoji višak

proizvodnje električne energije u odnosu na potrošnju, višak energije uzrokuje porast napona u sustavu. To znači da distribuirana proizvodnja DG2 generira više energije nego što je potrebno za trenutne potrebe potrošnje, što rezultira povišenim naponom na sabirnicama. Vrijednosti napona su prikazane u tablici 4.5.

Tablica 4.5. Naponi na sabirnicama u različitim stanjima

Sabirnica	Početno stanje, U [p.u.]	Prijelazno stanje, U [p.u.]	Ustaljeno stanje, U [p.u.]
22	1.00211	0.06443	1.12059
21	0.99999	0.0453	1.1188
19	0.99713	0.00186	1.11702
2	0.99702	0.41664	0.99695

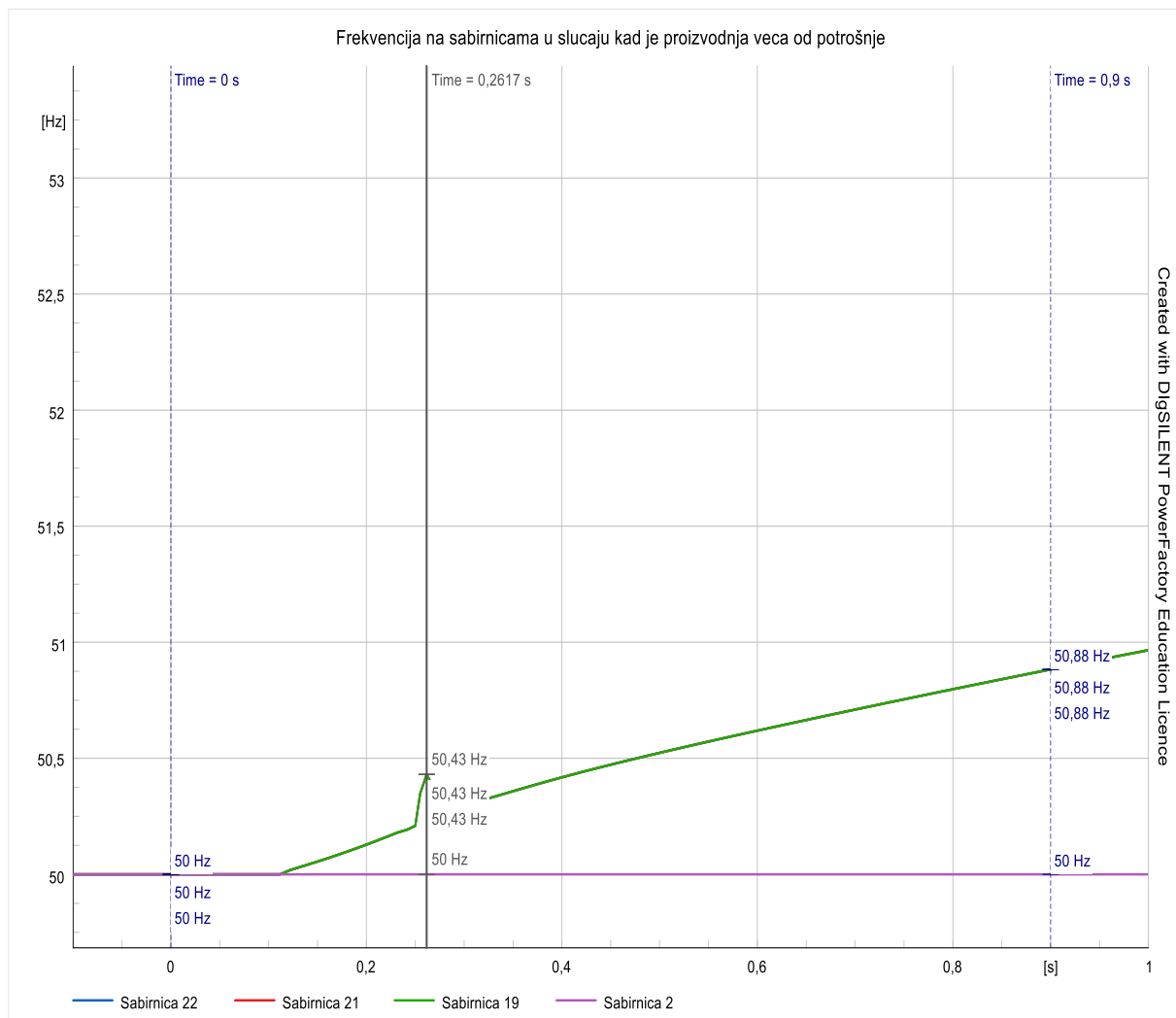
Ustaljeno stanje u kojem su naponi na sabirnicama veći od 1 p.u. prikazano je na slici 4.7. Ovo stanje pokazuje stabilizaciju napona nakon početnog poremećaja i prilagodbe sustava na uvjete rada u otočnom pogonu s viškom proizvodnje. U ovom scenariju, potrebno je pažljivo upravljati viškom energije kako bi se spriječile negativne posljedice prekomjernog napona na opremu i održala stabilnost sustava.



Slika 4.7. Napon - ustaljeno stanje



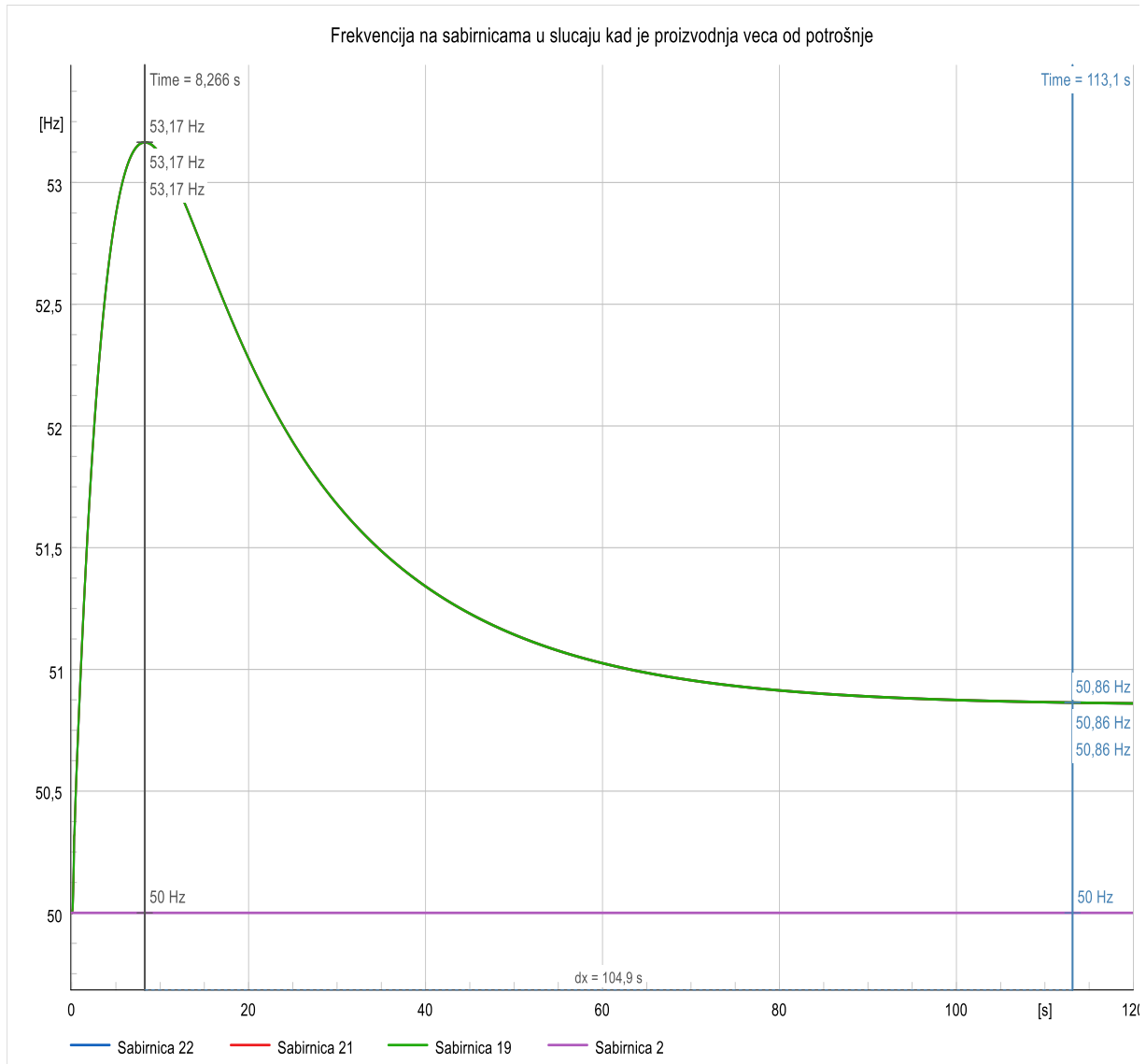
U početnom stanju, frekvencija elektroenergetskog sustava iznosi nominalnih 50 Hz. Međutim, u trenutku kratkog spoja koji se dogodi u 0,1 sekundi, dolazi do promjena frekvencije u sustavu (slika 4.8.). Kratki spoj uzrokuje povećanje frekvencije na sabirnicama koje se nalaze u otočnom pogonu (sabirnice 21, 22 i 19). Frekvencija na tim sabirnicama počinje rasti, te u trenutku 0,25 sekundi kada se vod 18 isključi, frekvencija ima mali skok, te nastavlja rasti. Porast frekvencije je posljedica naglog smanjenja opterećenja u otočnom području, što rezultira povećanjem brzine rotacije generatora u tom segmentu mreže.



Slika 4.8. Frekvencija - prijelazno stanje

Nakon dostizanja maksimuma u 8 sekundi, frekvencija se postupno smanjuje i stabilizira na vrijednost od 50,86 Hz. Ova nova stabilizirana vrijednost frekvencije pokazuje da sustav u otočnom pogonu postiže novu ravnotežu između proizvodnje i potrošnje energije, ali pri nešto višoj frekvenciji od nominalne. S druge strane, frekvencija na sabirnici 2, koja nije u otočnom pogonu, ostaje stabilna i jednaka nominalnoj vrijednosti od 50 Hz tijekom cijelog perioda promatranja. To ukazuje na to da sabirnica 2 nije značajno pogođena događajima u otočnom

pogonu i da glavni elektroenergetski sustav održava stabilnu frekvenciju. Prikaz na slici 4.9. jasno pokazuje ove promjene frekvencije.



Slika 4.9. Frekvencija - ustaljeno stanje

U početnom stanju frekvencija je konstantna na 50 Hz, zatim se, nakon kratkog spoja, bilježi rast frekvencije u otočnom pogonu do maksimuma od 53,17 Hz, a nakon toga dolazi do stabilizacije na 50,86 Hz kao što je prikazano u tablici 4.6. Ovo povećanje frekvencije znatno prelazi dozvoljeno odstupanje od  $\pm 1\%$  (što bi bilo 50,5 Hz), što ukazuje na ozbiljan poremećaj u ravnoteži između proizvodnje i potrošnje energije u otočnom području. Frekvencija na sabirnici 2 ostaje nepromijenjena tijekom cijelog razdoblja promatranja. Ove promjene frekvencije su važan pokazatelj dinamike i stabilnosti elektroenergetskog sustava.

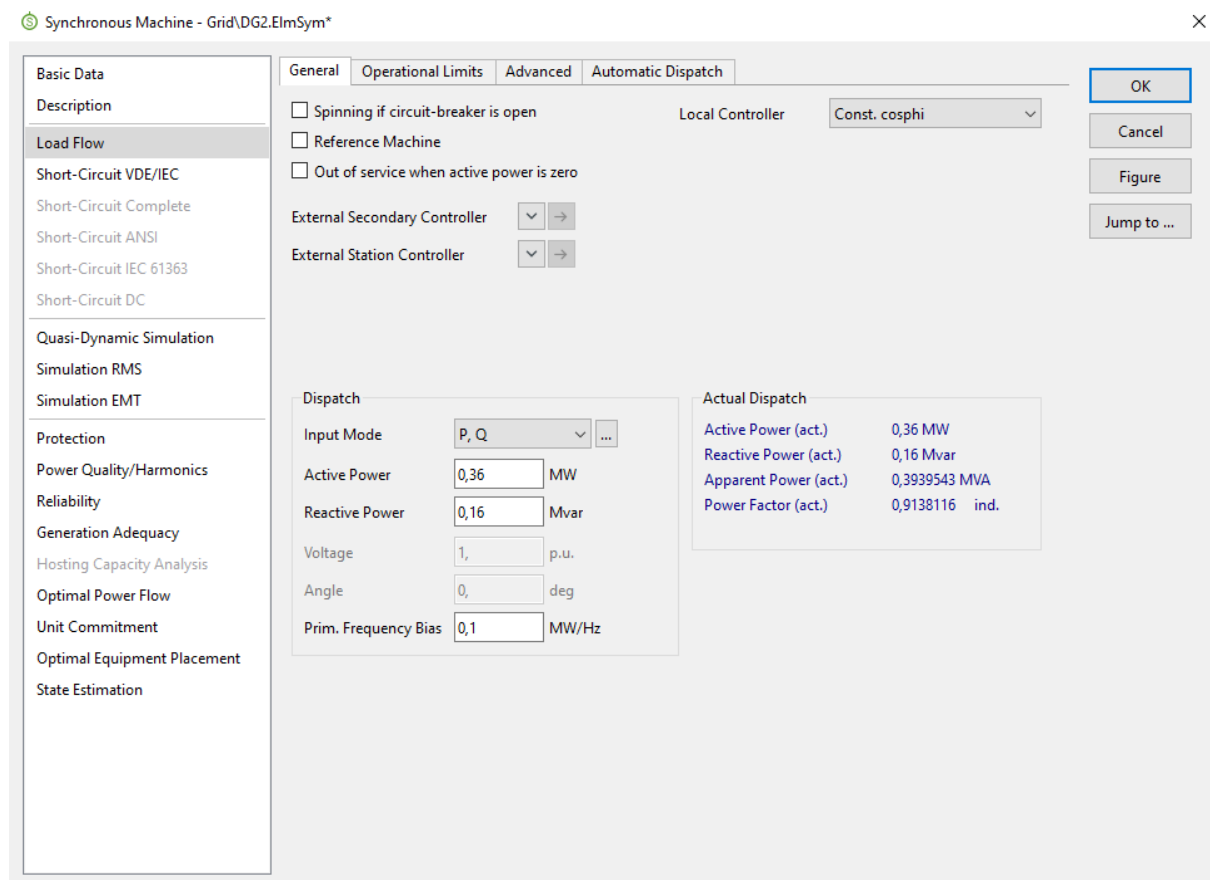
Tablica 4.6. Frekvencija na sabirnicama u različitim stanjima

Sabirnica	Početno stanje, f [Hz]	Maksimum, f [Hz]	Ustaljeno stanje, f [Hz]
22	50	53,16539	50.86034
21	50	53,16539	50.86034
19	50	53,16539	50.86034
2	50	53,16539	50.86034

Povećanje frekvencije iznad nominalne vrijednosti ukazuje na višak proizvodnje energije u odnosu na potrošnju, dok stabilnost frekvencije na sabirnici 2 pokazuje da ostatak mreže uspješno održava ravnotežu i stabilnost. Ovi podaci su ključni za razumijevanje ponašanja sustava tijekom poremećaja i za planiranje odgovarajućih mjera za održavanje stabilnosti frekvencije.

#### 4.2.2. Proizvodnja jednaka potrošnji

U ovom slučaju, proizvodnja je jednaka potrošnji u malom otoku prikazanom na slici 4.4. Ukupna potrošnja na sabirnicama 22, 21, 20 i 19, koje su u otočnom pogonu, iznosi 360 kW radne snage i 160 kVAr jalove snage.

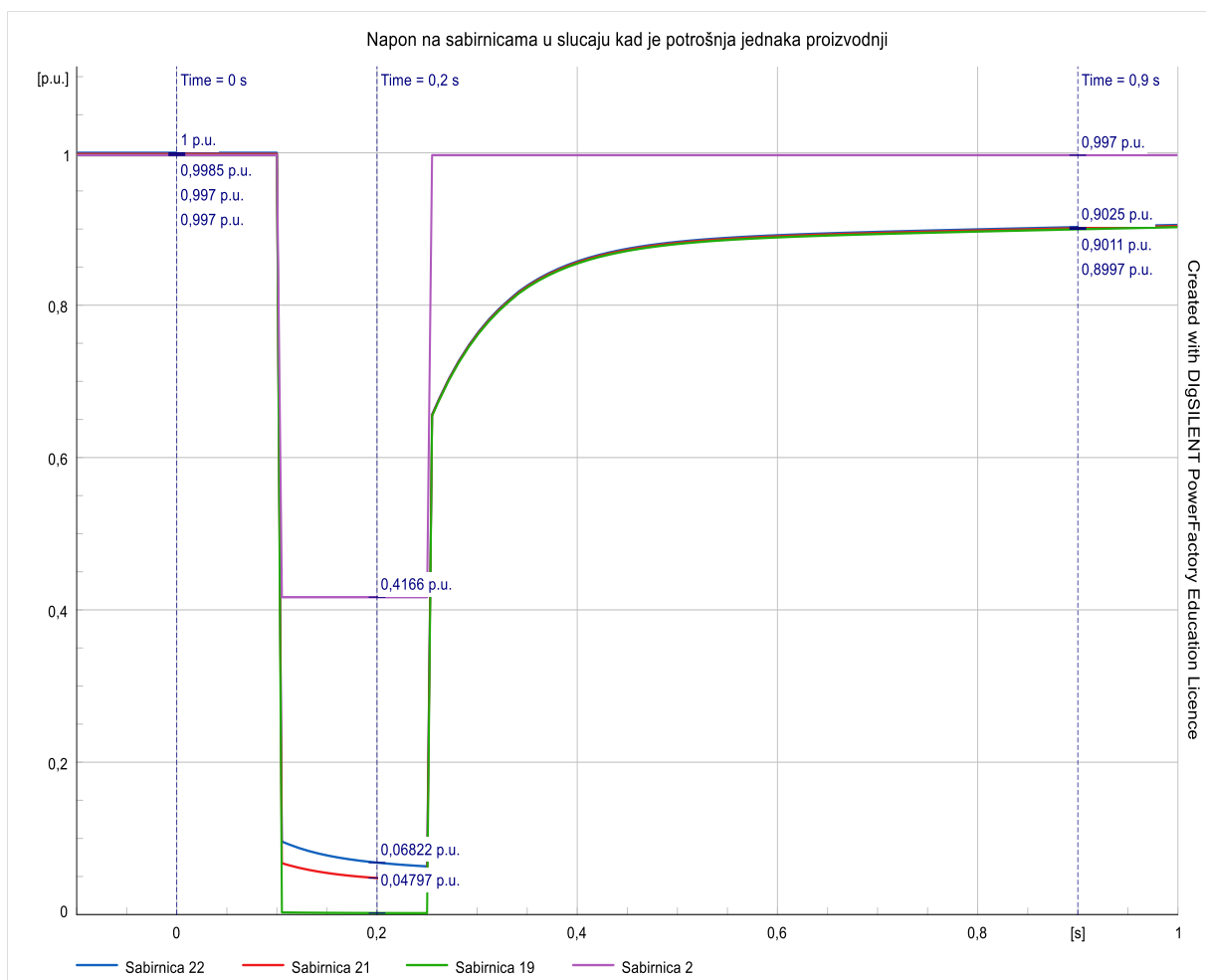


Slika 4.10. Podaci DG2 u slučaju kad je proizvodnja jednaka potrošnji

U scenariju u kojem je proizvodnja točno jednaka potrošnji, proizvodnja je postavljena na 360 kW radne snage i 160 kVAr jalove snage, kao što je prikazano na slici 4.10. Dok su svi ostali generatori

isključeni, distribuirana proizvodnja DG2 preuzima cjelokupno opterećenje i osigurava napajanje za sabirnice 22, 21, 20 i 19. Ovaj scenarij omogućava detaljno praćenje kako ravnoteža između proizvodnje i potrošnje utječe na električne veličine kao što su napon, frekvencija, te radna i jalova snaga.

Na slici 4.11. prikazan je napon na sabirnicama u različitim vremenskim trenucima. Nominalna vrijednost napona je 1 p.u. U trenutku 0,1 sekunda događa se kratki spoj koji uzrokuje značajan pad napona na sabirnicama, gotovo do nule. Ovaj pad napona je izravan rezultat kratkog spoja koji uzrokuje naglo smanjenje napona zbog velike struje kratkog spoja koja prolazi kroz sustav. Napon ostaje na vrlo niskoj razini sve do trenutka 0,25 sekundi, kada dolazi do isključenja voda 18. Isključenje voda uklanja kratki spoj, što omogućuje naponu da počne rasti. Od tog trenutka, napon se postupno oporavlja i dostiže maksimum u 14. sekundi, kada iznosi 1,012 p.u. Ovaj maksimum predstavlja kratkotrajni prijelazni proces nakon kojeg se sustav stabilizira.



Slika 4.11. Napon - prijelazno stanje

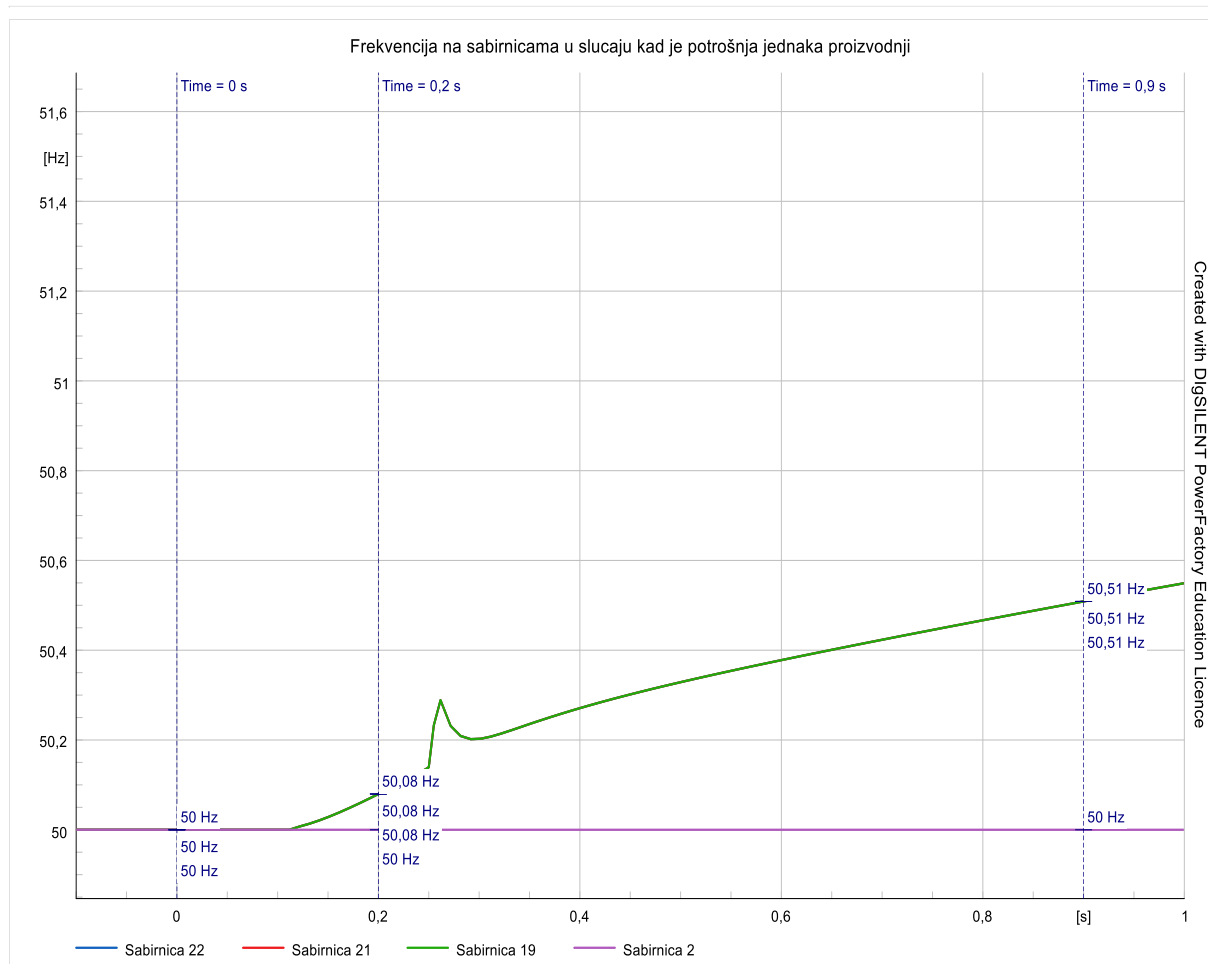
U trenutku 55 sekundi prikazano je ustaljeno stanje sustava. U ovom stanju, napon je blizu nominalne vrijednosti od 1 p.u., što ukazuje na to da su proizvodnja i potrošnja električne energije

u ravnoteži. Kada je proizvodnja jednaka potrošnji, napon ostaje stabilan i blizu nominalne vrijednosti, što je ključni pokazatelj stabilnosti elektroenergetskog sustava. Ova analiza napona kroz različite vremenske intervale omogućava razumijevanje dinamike sustava tijekom i nakon poremećaja kao što je kratki spoj. Prikaz stabilizacije napona na slici 4.12. potvrđuje učinkovitost zaštitnih i stabilizacijskih mehanizama u sustavu koji vraćaju napon na nominalnu vrijednost nakon uklanjanja kratkog spoja. Vrijednosti napona su prikazane u tablici 4.7.

Tablica 4.7. Naponi na sabirnicama u različitim stanjima

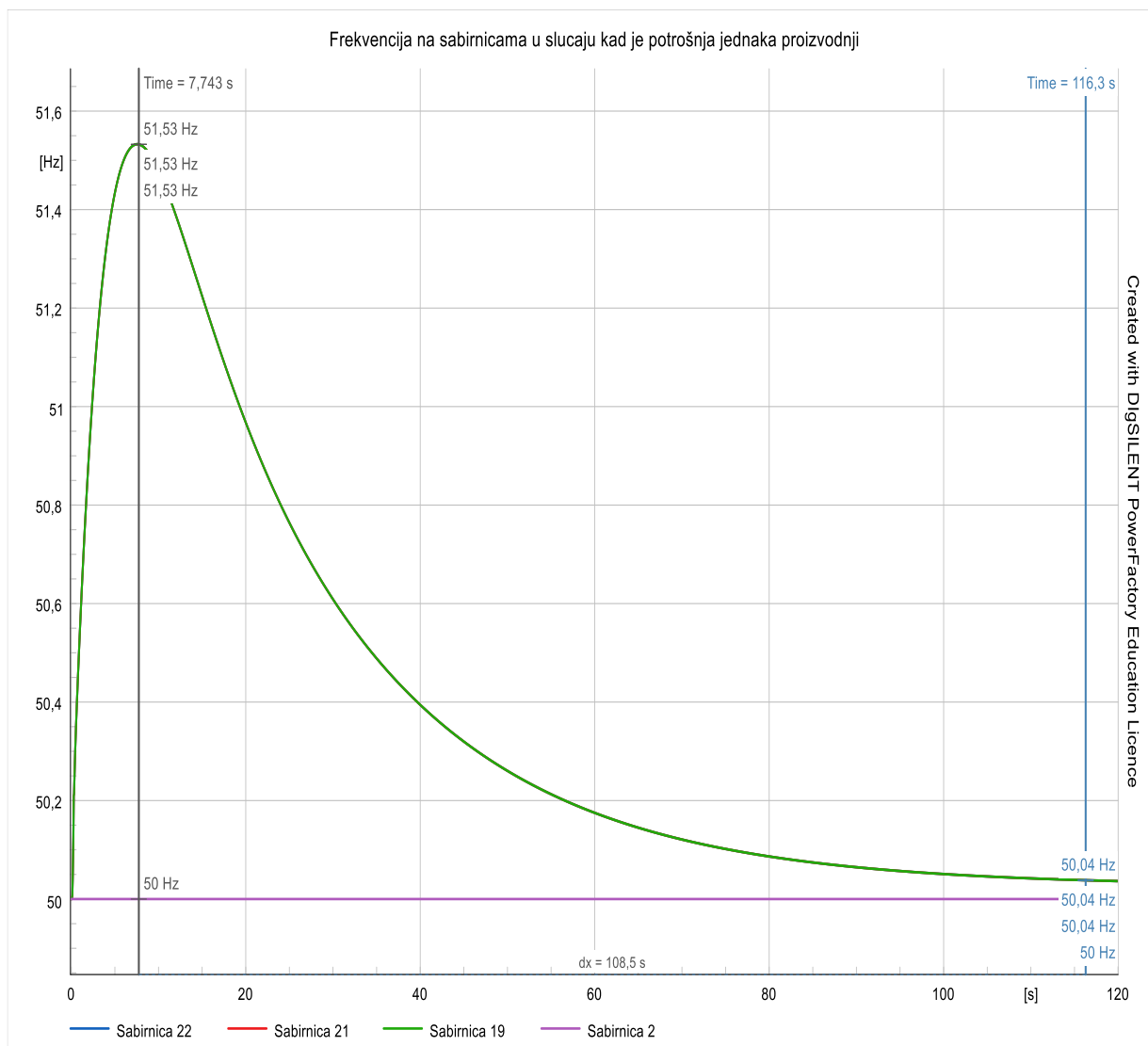
Sabirnica	Početno stanje, U [p.u.]	Prijelazno stanje, U [p.u.]	Ustaljeno stanje, U [p.u.]
22	1.00013	0.06325	1.00096
21	0.99853	0.04447	0.99936
19	0.99696	0.00182	0.99777
2	0.99696	0.41665	0.99696

U početnom stanju, frekvencija sustava je stabilna i iznosi nominalnih 50 Hz. Međutim, u trenutku 0,1 sekundi, događa se kratki spoj koji uzrokuje značajne promjene frekvencije (slika 4.13.). Odmah nakon kratkog spoja, frekvencija počinje rasti.



Slika 4.13. Frekvencija - prijelazno stanje

Ovaj nagli porast frekvencije je posljedica promjene opterećenja u sustavu. Kada dođe do kratkog spoja, dolazi do trenutačnog smanjenja opterećenja u dijelu mreže, što uzrokuje povećanje brzine rotacije generatora i, posljedično, povećanje frekvencije. Frekvencija nastavlja rasti i dostiže svoj maksimum u osmoj sekundi, dosegnuvši vrijednost od 51,53 Hz. Ovo povećanje frekvencije značajno prelazi dozvoljeno odstupanje od  $\pm 1\%$  (odnosno 50,5 Hz), što ukazuje na ozbiljan poremećaj u ravnoteži između proizvodnje i potrošnje energije u sustavu. Nakon dostizanja maksimuma u osmoj sekundi, frekvencija počinje opadati. Ovaj pad frekvencije rezultat je korektivnih mjera koje su poduzete kako bi se stabilizirala frekvencija. Sustav koristi automatsku regulaciju opterećenja i proizvodnje kako bi vratio frekvenciju unutar prihvatljivih granica. Ove mjere su ključne za vraćanje stabilnosti sustava i sprječavanje daljnjih poremećaja. U trenutku 120 sekundi, prikazano je ustaljeno stanje sustava (slika 4.14.). U ovom stanju, frekvencija je ponovno jednaka nominalnoj vrijednosti od 50 Hz.



Slika 4.14. Frekvencija - ustaljeno stanje

Ovaj povratak na nominalnu vrijednost ukazuje na to da je sustav postigao ravnotežu između proizvodnje i potrošnje električne energije, te da nema promjena u frekvenciji. Stabilizacija frekvencije na nominalnoj vrijednosti je ključna za osiguranje stabilnosti i pouzdanosti elektroenergetskog sustava. Frekvencija koja se ustalila na 50 Hz potvrđuje da su poduzete korektivne mjere bile učinkovite i da je sustav uspješno vratio ravnotežu. Važno je napomenuti da na sabirnici 2, koja nije u otočnom pogonu, nema promjena frekvencije. To znači da sabirnica 2 nije značajno pogođena događajima u otočnom pogonu i da glavni elektroenergetski sustav uspješno održava stabilnu frekvenciju od 50 Hz tijekom cijelog perioda promatranja. Ova stabilnost frekvencije na sabirnici 2 ukazuje na otpornost glavnog sustava na poremećaje koji se javljaju u otočnim dijelovima mreže. Vrijednosti frekvencije su prikazane u tablici 4.8.

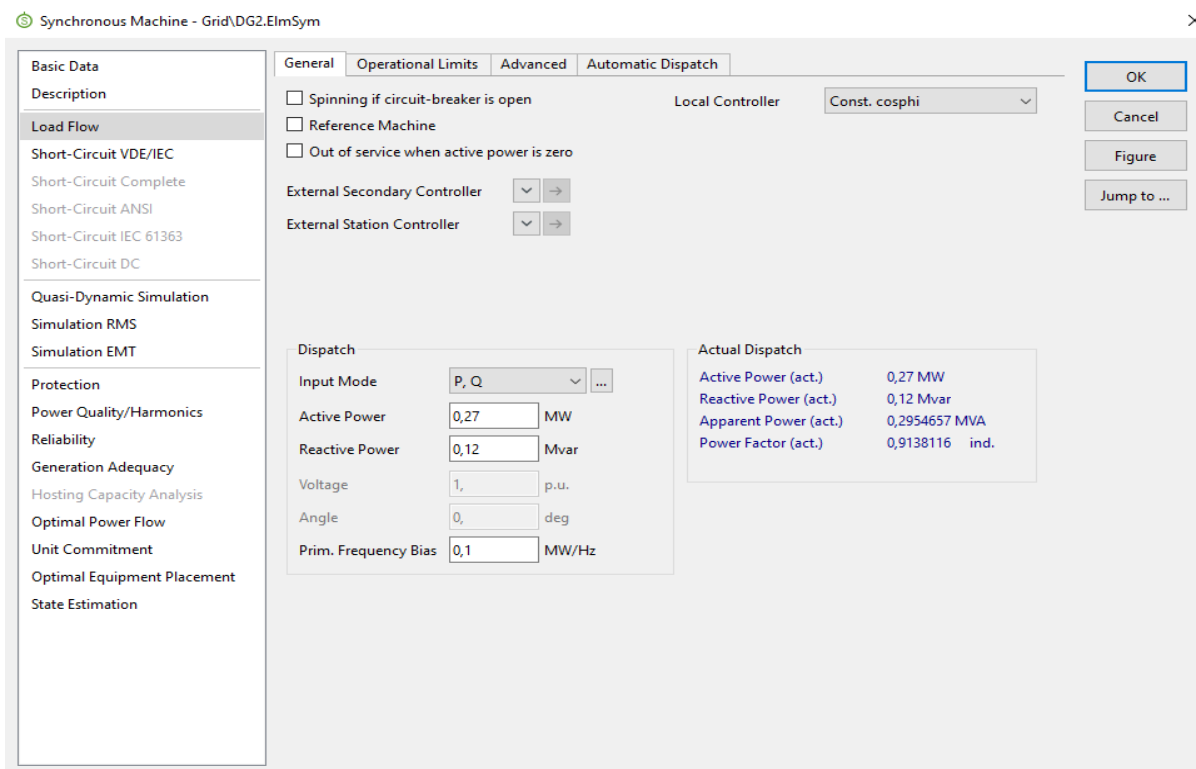
Tablica 4.8. Frekvencija na sabirnicama u različitim stanjima

Sabirnica	Početno stanje, f [Hz]	Maksimum, f [Hz]	Ustaljeno stanje, f [Hz]
22	50	51.53277	50.03639
21	50	51.53277	50.03639
19	50	51.53277	50.03639
2	50	50	50

#### 4.2.3. Proizvodnja manja od potrošnje

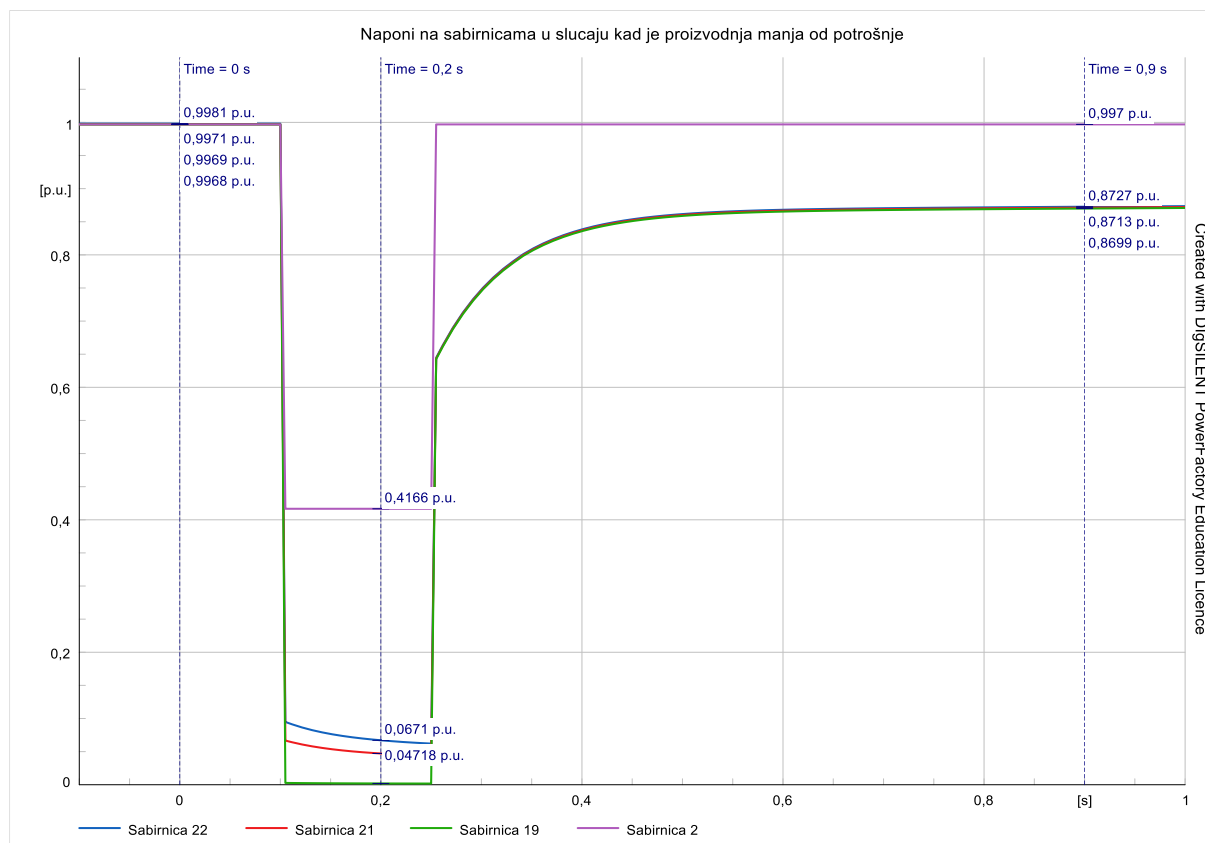
U ovom slučaju, proizvodnja električne energije u otočnom pogonu je manja od ukupne potrošnje malog otoka. Ukupna potrošnja na sabirnicama 22, 21, 20 i 19, koje čine otočni pogon, iznosi 360 kW radne snage i 160 kVAr jalove snage. Sustav je u početnom stanju konfiguriran tako da zadovoljava potrebe potrošača unutar ovog dijela mreže.

Međutim, u promatranom scenariju snaga je smanjena za 25%. Stoga je proizvodnja prilagođena kako bi iznosila 270 kW radne snage i 120 kVAr jalove snage, što je prikazano na slici 4.15. Ova prilagodba proizvodnje znači da otočni pogon sada proizvodi manje električne energije nego što je potrebno za pokrivanje ukupne potrošnje na sabirnicama u ovom dijelu mreže. Ostali generatori su isključeni.



Slika 4.15. Podaci DG2 u slučaju kad je proizvodnja manja od potrošnje

Na slici 4.16. prikazan je napon na sabirnicama 22, 21 i 19. U trenutku kratkog spoja, koji se događa u 0,1 sekundi, naponi na ovim sabirnicama naglo padaju na gotovo nulu.



Slika 4.16. Napon - prijelazno stanje

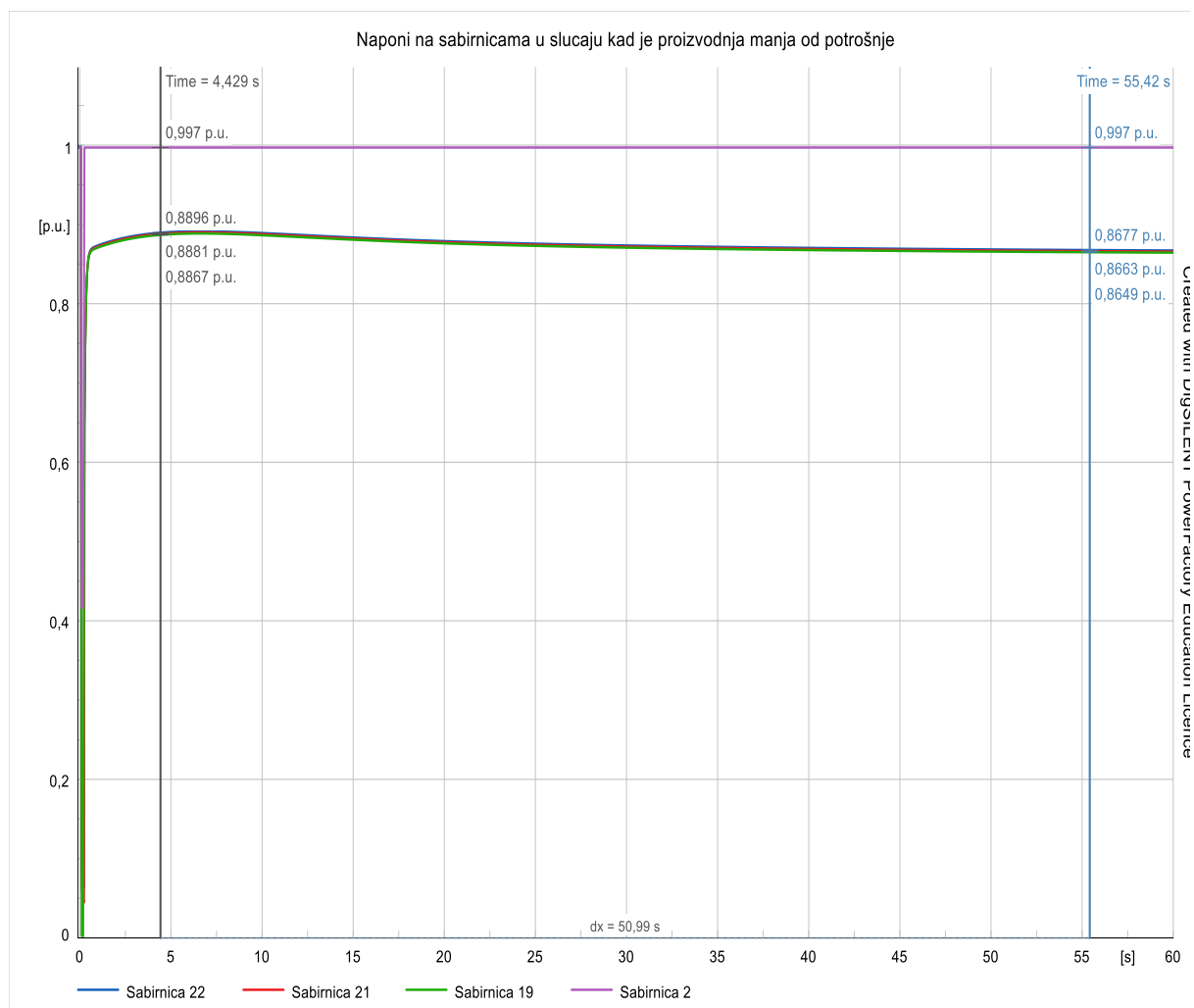


Nakon kratkog spoja, naponi počinju rasti i stabiliziraju se. Ustaljeno stanje (slika 4.17.) u 55. sekundi pokazuje da se napon ustalio na 0,87 p.u. Vrijednosti napona su prikazane u tablici 4.9.

Tablica 4.9. Naponi na sabirnicama u različitim stanjima

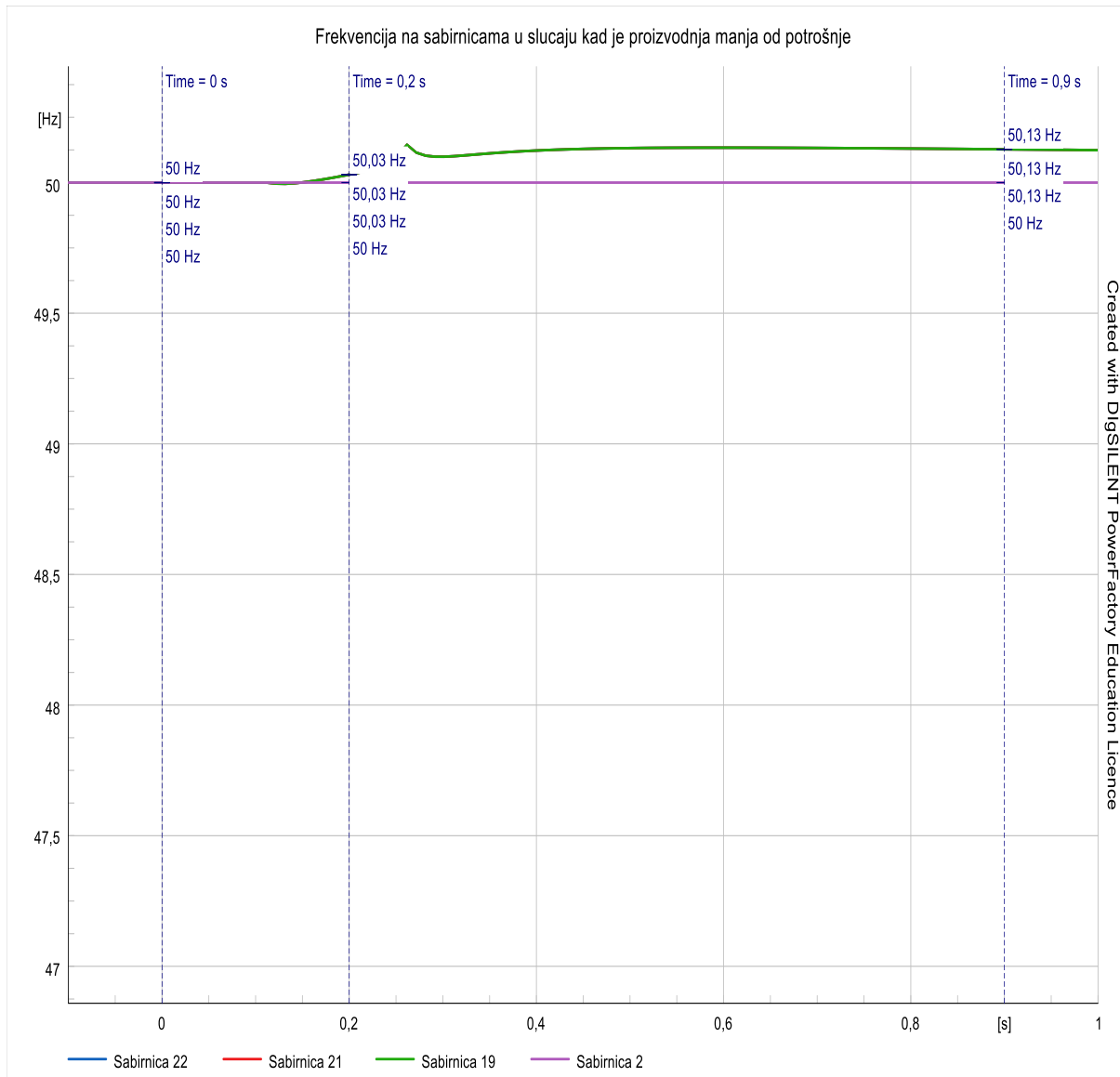
Sabirnica	Početno stanje, U [p.u.]	Prijelazno stanje, U [p.u.]	Ustaljeno stanje, U [p.u.]
22	0.99814	0.06211	0.86713
21	0.99707	0.04367	0.86575
19	0.99678	0.00179	0.86437
2	0.99689	0.41665	0.99696

Ovaj niži napon rezultat je smanjene proizvodnje koja je manja od potrošnje. Smanjena proizvodnja uzrokuje pad napona ispod nominalne vrijednosti. Iako napon nije unutar dozvoljenih granica od  $\pm 10\%$  (0,9 p.u. do 1,1 p.u.), zadovoljava kriterij stabilnosti od  $\pm 15\%$ , što znači da se sustav može oporaviti. Važno je napomenuti da na sabirnici 2, koja nije u otočnom pogonu, nema promjene napona. To pokazuje da je stabilnost ove sabirnice neovisna o događajima u otočnom pogonu, zahvaljujući zaštitnim i regulacijskim mehanizmima glavnog sustava.



Slika 4.17. Napon - ustaljeno stanje

Frekvencija u elektroenergetskom sustavu u početnom stanju iznosi nominalnih 50 Hz. Međutim, kod sabirnica koje se nalaze u otočnom pogonu, frekvencija pokazuje značajne promjene u slučaju kratkog spoja. U trenutku kratkog spoja, koji se događa u 0,1 sekundi, frekvencija počinje rasti, a u trenutku isključenja voda 18 frekvencija skoči na 50,13 Hz i od tog trenutka pada (slika 4.18.). Ova inicijalna promjena frekvencije rezultat je neravnoteže između proizvodnje i potrošnje u sustavu, uzrokovane kratkim spojem. Ovaj pad frekvencije nastavljen je sve dok se sustav ne ustali.

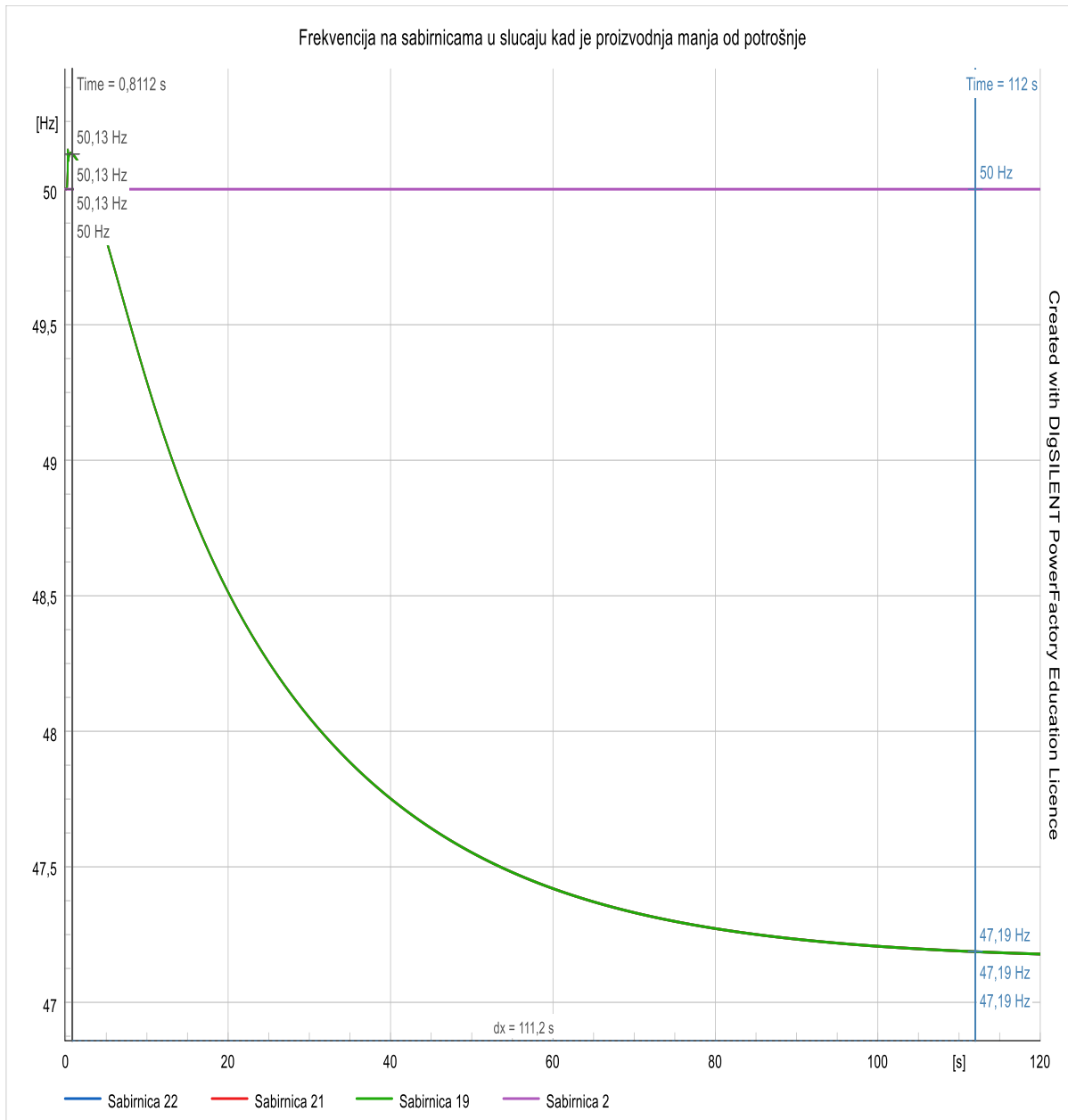


Slika 4.18. Frekvencija - prijelazno stanje

U trenutku 120 sekundi, frekvencija se ustalila na vrijednost od 47,19 Hz (slika 4.19.). Ova vrijednost je značajno ispod dozvoljene granice, koja za elektroenergetske sustave obično iznosi  $\pm 1\%$  od nominalne vrijednosti, što bi bilo između 49,5 Hz i 50,5 Hz. Vrijednosti frekvencije su prikazane u tablici 4.10.

Tablica 4.10. Frekvencija na sabirnicama u različitim stanjima

Sabirnica	Početno stanje, f [Hz]	Maksimum, f [Hz]	Ustaljeno stanje, f [Hz]
22	50	50.14524	47.17811
21	50	50.14524	47.17811
19	50	50.14524	47.17811
2	50	50	50



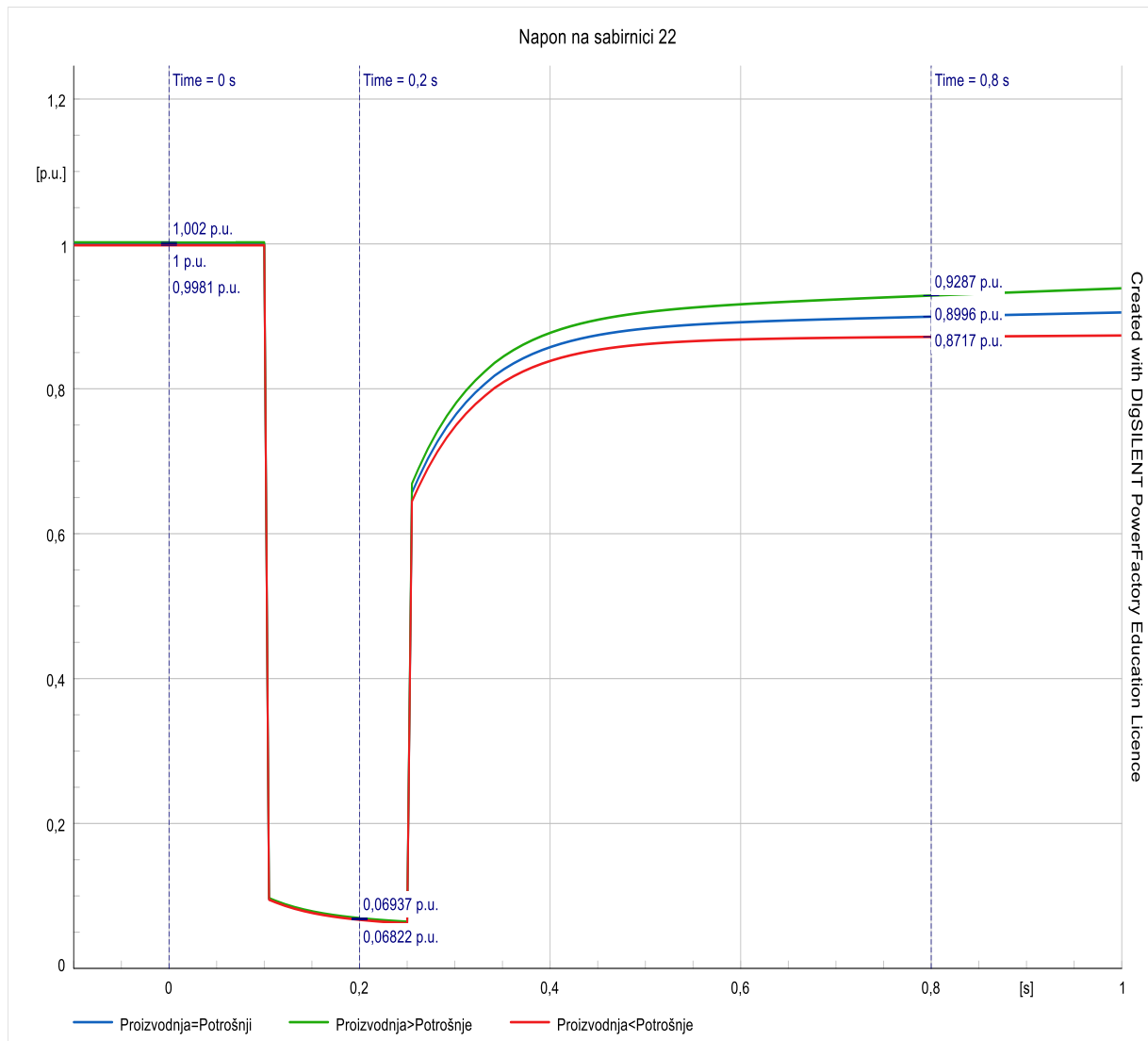
Slika 4.19. Frekvencija - ustaljeno stanje

#### 4.2.4. Usporedba rezultata po sabirnicama

Za usporedbu različitih scenarija razmatraju se veličine na sabirnicama 22, 19 i 2, te ponašanje mreže i distribuirane proizvodnje DG2. Sabirnice su odabrane zbog njihovih specifičnih lokacija i uloga u elektroenergetskom sustavu, što omogućava detaljno praćenje različitih aspekata mrežnog ponašanja i reakcija na promjene u sustavu. Sabirnica 22 je najbliža distribuiranoj proizvodnji DG2. Njena blizina izvoru proizvodnje omogućava praćenje neposrednog utjecaja DG2 na mrežu, uključujući promjene u naponu, frekvenciji i tokovima snage. Ova sabirnica je ključna za razumijevanje kako lokalna proizvodnja utječe na stabilnost i rad mreže u neposrednoj blizini izvora. Sabirnica 19 je najudaljenija od distribuirane proizvodnje DG2. Praćenjem ove sabirnice moguće je analizirati kako se promjene uvjetovane DG2 prenose kroz mrežu do njezinih udaljenih dijelova. Ovo omogućava razumijevanje dinamike napona i frekvencije na krajnjim točkama mreže, te kako udaljenost od izvora proizvodnje utječe na stabilnost i kvalitetu napajanja. Sabirnica 2 je uzeta kao točka promatranja izvan otočnog pogona. Ona je povezana s glavnom mrežom i nije izravno pod utjecajem lokalne distribuirane proizvodnje DG2. Praćenje sabirnice 2 omogućava analizu ponašanja glavne mreže i utjecaja lokalnih događaja u otočnom pogonu na ostatak sustava. To uključuje promjene u naponu i frekvenciji koje mogu nastati zbog poremećaja poput kratkih spojeva ili isključenja voda. Promatranje ovih sabirnica omogućava sveobuhvatno razumijevanje ponašanja mreže i DG2 u različitim scenarijima, uključujući kratke spojeve, isključenja voda i promjene u omjeru proizvodnje i potrošnje. Ova analiza pruža ključne uvide u stabilnost i učinkovitost rada elektroenergetskog sustava, te omogućava identificiranje kritičnih točaka i potrebnih mjera za osiguranje pouzdanog i stabilnog napajanja.

Na slici 4.20. prikazano je prijelazno stanje napona na sabirnici 22. Kao što je već i spomenuto, u trenutku kratkog spoja koji se događa u 0,1 sekundi, napon na sabirnici 22 naglo pada. Ovaj pad napona traje do trenutka kada se isključuje vod 18, što se događa u 0,25 sekundi. Nakon isključenja voda 18, napon na sabirnici 22 počinje rasti. Na slici je jasno vidljivo da se napon nakon inicijalnog pada različito ponaša ovisno o omjeru proizvodnje i potrošnje. Ako je proizvodnja veća od potrošnje, napon na sabirnici 22 će rasti brže i dosegnuti više vrijednosti prije nego se stabilizira. To je zato što višak proizvedene energije uzrokuje porast napona, jer distribuirana proizvodnja DG2 nastavlja proizvoditi snagu koja premašuje trenutne potrebe potrošnje na sabirnicama u otočnom pogonu. S druge strane, ako je proizvodnja manja od potrošnje, napon će rasti sporije i dosegnuti niže vrijednosti prije stabilizacije. U ovom slučaju, manjak proizvedene energije znači da nema dovoljno napajanja za pokrivanje svih potreba potrošnje, što rezultira nižim naponima na sabirnicama. Ovaj deficit energije dovodi do pada napona, sve dok se sustav ne stabilizira na nižoj

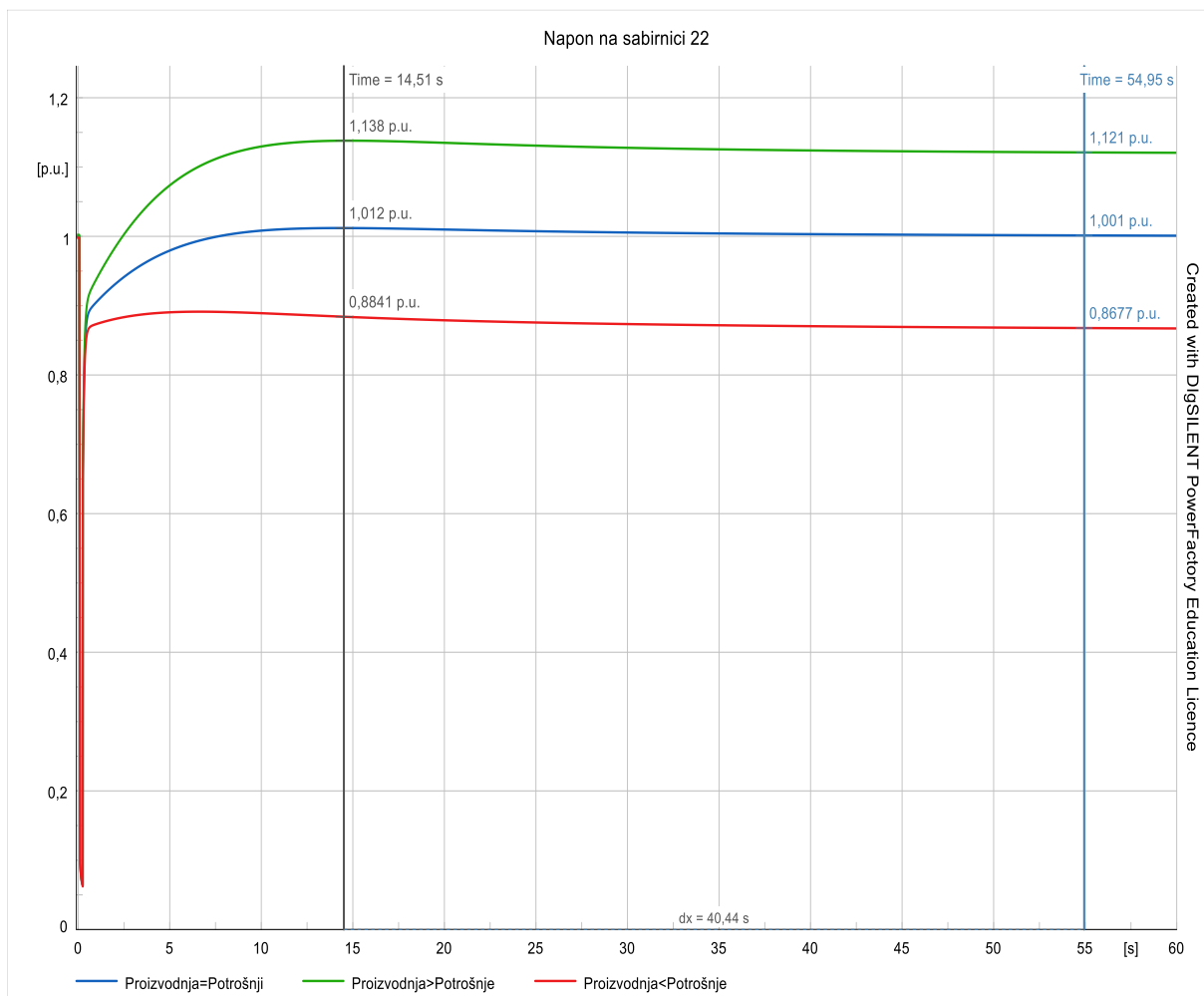
vrijednosti napona. Također, ako je proizvodnja jednaka potrošnji, napon će nakon početnog pada rasti i stabilizirati se oko nominalne vrijednosti od 1 p.u. Ova ravnoteža između proizvodnje i potrošnje osigurava stabilan napon, jer je energija proizvedena u otočnom pogonu točno jednaka energiji potrebnoj za potrošnju, bez viškova ili manjkova.



Slika 4.20. Sabirnica 22 – napon – prijelazno stanje

Na slici 4.21. prikazano je ustaljeno stanje napona na sabirnici 22. U ovom prikazu, jasno je vidljivo kako različiti omjeri proizvodnje i potrošnje utječu na konačne vrijednosti napona kada se sustav stabilizira. Kada je proizvodnja veća od potrošnje, napon na sabirnici 22 raste i stabilizira se na višoj vrijednosti. To se događa zato što višak proizvedene energije rezultira viškom napona. Distribuirana proizvodnja DG2 nastavlja generirati više energije nego što je potrebno za pokrivanje trenutne potrošnje, što uzrokuje povećanje napona. U ovom slučaju, napon može dosegnuti vrijednosti iznad nominalnih 1 p.u., što pokazuje da sustav ima dovoljno kapaciteta za opskrbu potrošača i dodatni višak energije. Ako je proizvodnja manja od potrošnje, napon na

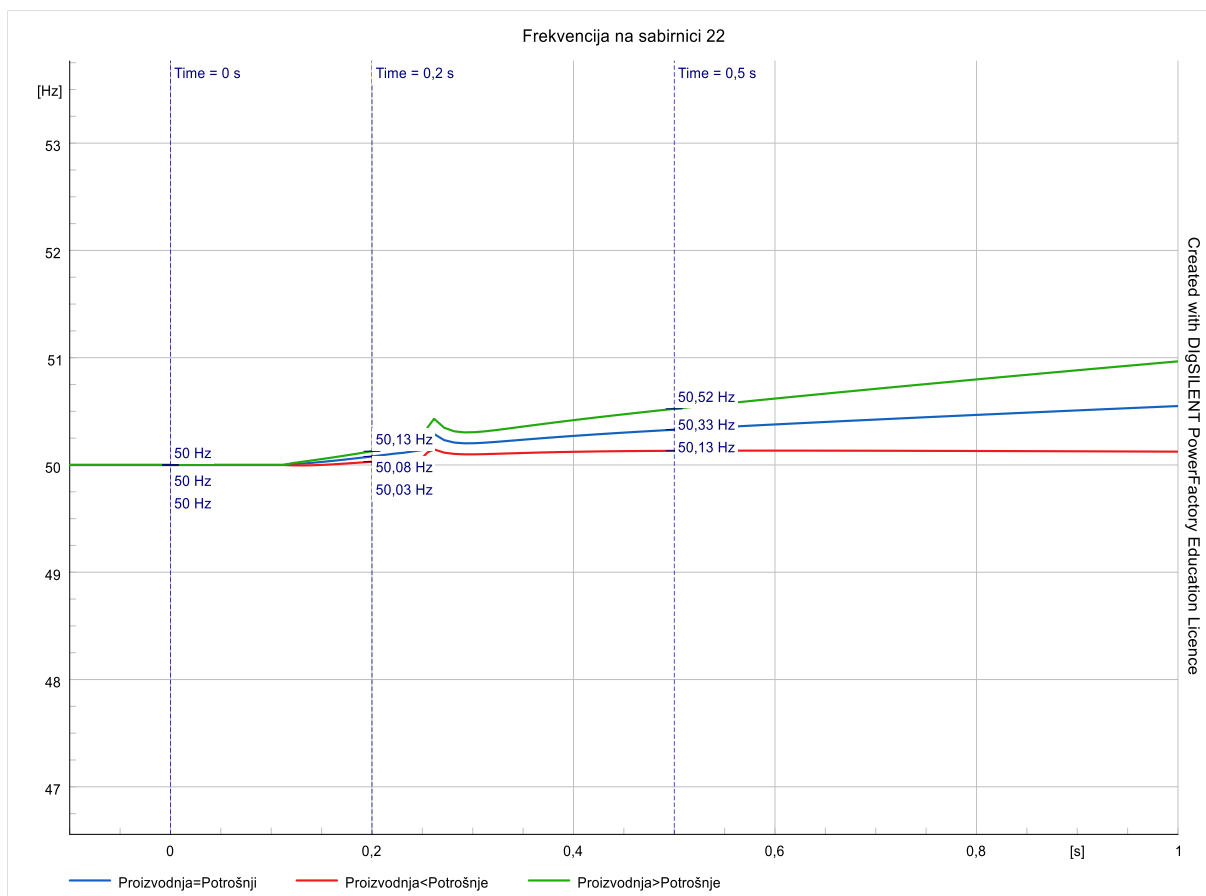
sabirnici 22 raste sporije i stabilizira se na nižoj vrijednosti. Manjak proizvedene energije znači da nema dovoljno napajanja za pokrivanje svih potreba potrošnje, što rezultira nižim naponima na sabirnici. Ovaj deficit energije dovodi do nižeg stabiliziranog napona, jer sustav ne može održavati nominalne vrijednosti bez dodatnog izvora napajanja. Kada je proizvodnja jednaka potrošnji, napon se stabilizira oko nominalne vrijednosti od 1 p.u. U ovom slučaju, proizvedena energija točno odgovara potrebama potrošnje, što osigurava ravnotežu i stabilan napon bez značajnih fluktuacija. Ovo stanje pokazuje optimalno funkcioniranje otočnog pogona, gdje je napajanje dovoljno za pokrivanje svih potreba potrošnje bez viškova ili manjkova energije.



Slika 4.21. Sabirnica 22 – napon – ustaljeno stanje

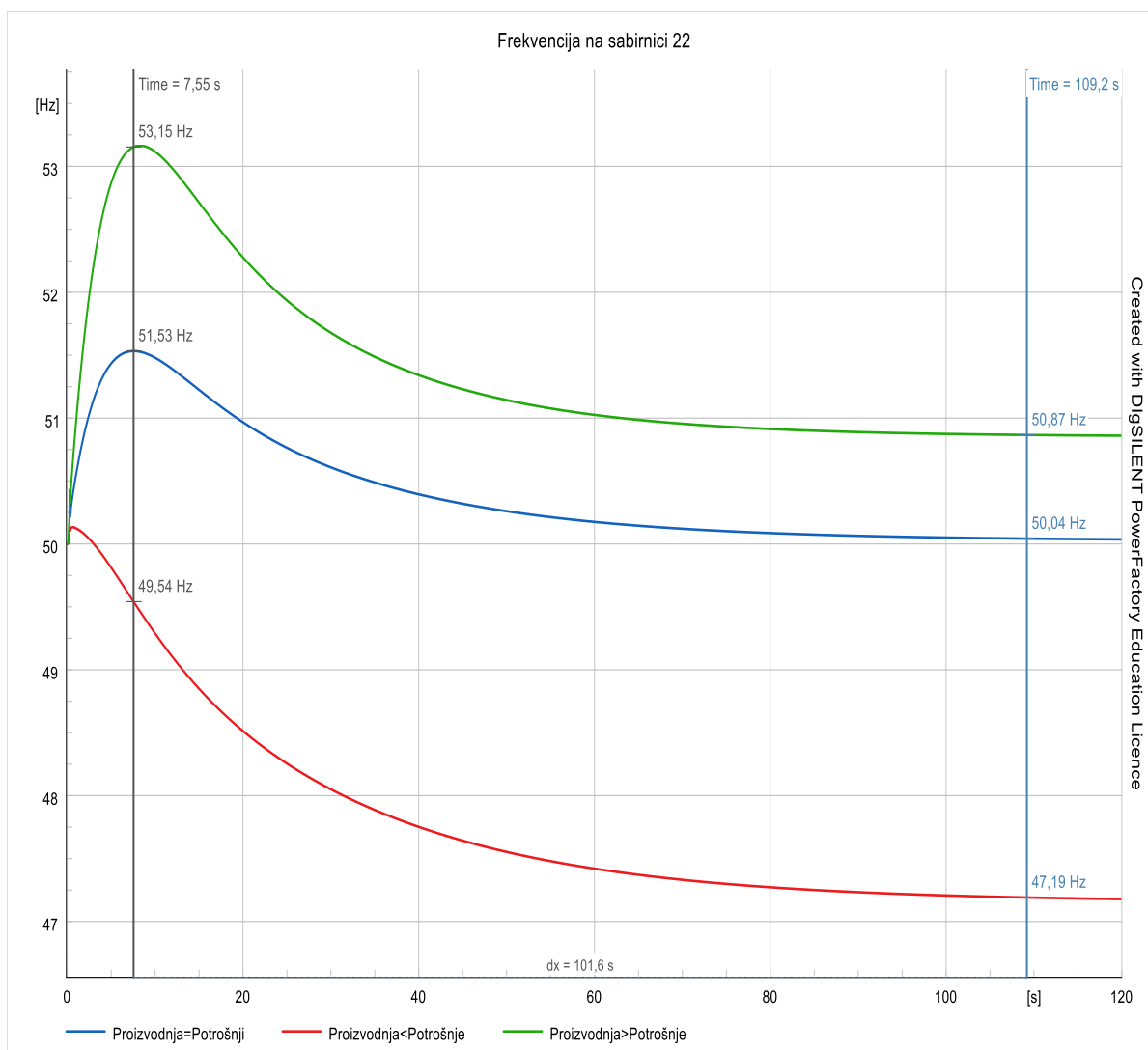
U svim promatranim slučajevima, ustaljene vrijednosti napona zadovoljene su unutar granica stabilnosti, što znači da sustav može biti korigiran i održan unutar operativnih granica. Iako naponi mogu varirati ovisno o omjeru proizvodnje i potrošnje, ključna je činjenica da se sustav može prilagoditi i stabilizirati, osiguravajući pouzdano napajanje potrošača. Ova sposobnost prilagodbe i stabilizacije pokazuje otpornost elektroenergetskog sustava na promjene u proizvodnji i potrošnji, što je ključno za održavanje stabilnog i pouzdanog rada mreže.

Na slici 4.22. prikazano je prijelazno stanje frekvencije na sabirnici 22. U početnom stanju, frekvencija je nominalna (50 Hz) za sva tri slučaja. Kada se dogodi kratki spoj, frekvencija počinje rasti brzinom koja ovisi o omjeru proizvodnje i potrošnje u sustavu. Kada je proizvodnja veća od potrošnje, frekvencija će početi rasti brže. To je zato što višak proizvedene energije uzrokuje povećanje brzine vrtnje generatora, što rezultira ubrzanjem frekvencije. Ovaj porast frekvencije događa se kako bi se kompenzirao višak energije i održala ravnoteža u sustavu. Što je veći višak proizvodnje, to će frekvencija brže rasti kako bi se postigla stabilna vrijednost. S druge strane, kada je proizvodnja manja od potrošnje, frekvencija će početi rasti sporije. Nedostatak proizvedene energije uzrokuje usporavanje vrtnje generatora, što rezultira sporijim povećanjem frekvencije. Ovaj sporiji porast frekvencije događa se jer sustav pokušava nadoknaditi manjak energije i stabilizirati rad. Kada je proizvodnja manja od potrošnje, frekvencija će početi rasti, ali nakon određenog vremena, početak će opadati. Ovo je rezultat neusklađenosti između proizvodnje i potrošnje te sustav pokušava ponovno uspostaviti ravnotežu, što dovodi do pada frekvencije. Ovakav prikaz prijelaznog stanja frekvencije omogućuje bolje razumijevanje dinamike elektroenergetskog sustava i omogućuje pravovremeno poduzimanje mjera kako bi se održala stabilnost i pouzdanost rada mreže.



Slika 4.22. Sabirnica 22 – frekvencija – prijelazno stanje

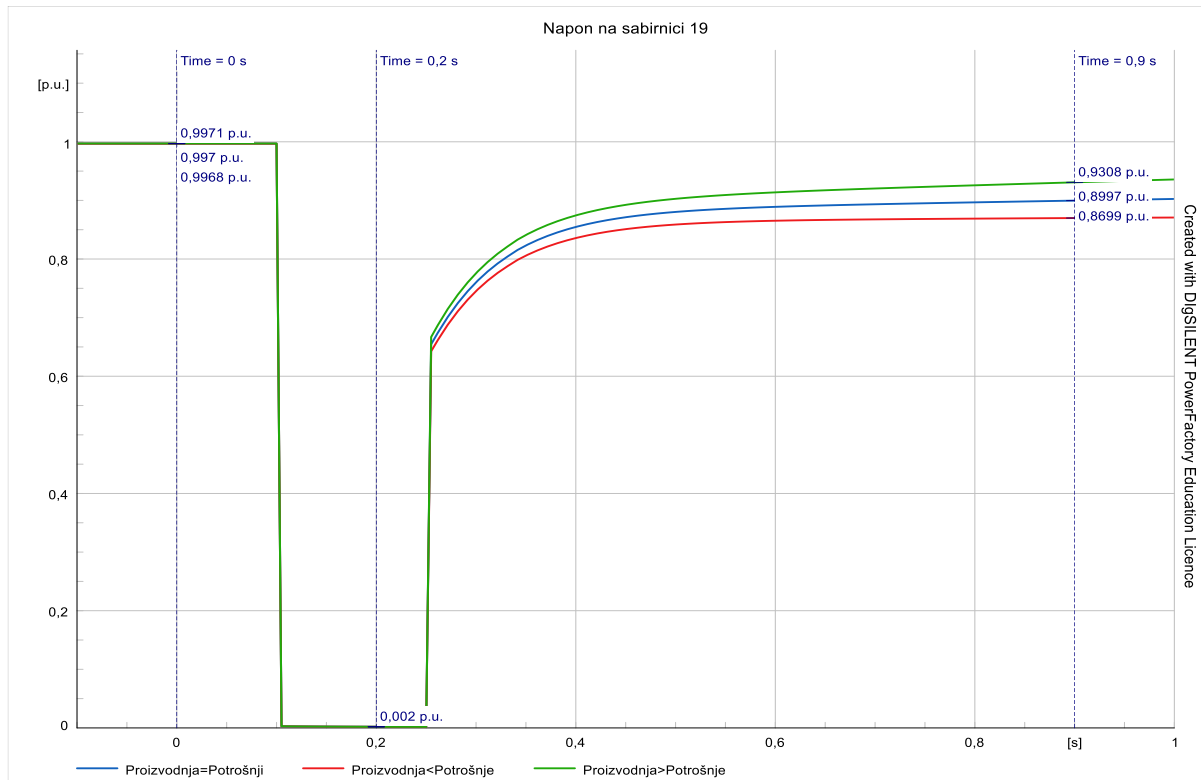
Na slici 4.23. prikazano je ustaljeno stanje frekvencije na sabirnici 22. Posebno je istaknut trenutak 7,55 s jer tada dvije krivulje, koje prikazuju slučajeve kada je proizvodnja veća od potrošnje i kada je proizvodnja jednaka potrošnji, dostižu svoj maksimum. Nakon tog trenutka, obje krivulje počinju padati i postupno se ustaljuju na svojim konačnim vrijednostima. Važno je primijetiti da krivulja koja prikazuje frekvenciju kada je proizvodnja manja od potrošnje pada u istom trenutku. Zanimljivo je da, iako je proizvodnja mijenjana za istu vrijednost (25%), imamo puno veći pad frekvencije u odnosu na porast. To naglašava osjetljivost sustava na promjene u proizvodnji i potrošnji te kako te promjene mogu značajno utjecati na stabilnost frekvencije. Analiza ovih promjena u frekvenciji omogućuje bolje razumijevanje dinamike elektroenergetskog sustava i omogućuje poduzimanje odgovarajućih mjera kako bi se osigurala stabilnost i pouzdanost rada mreže.



Slika 4.23. Sabirnica 22 – frekvencija – ustaljeno stanje

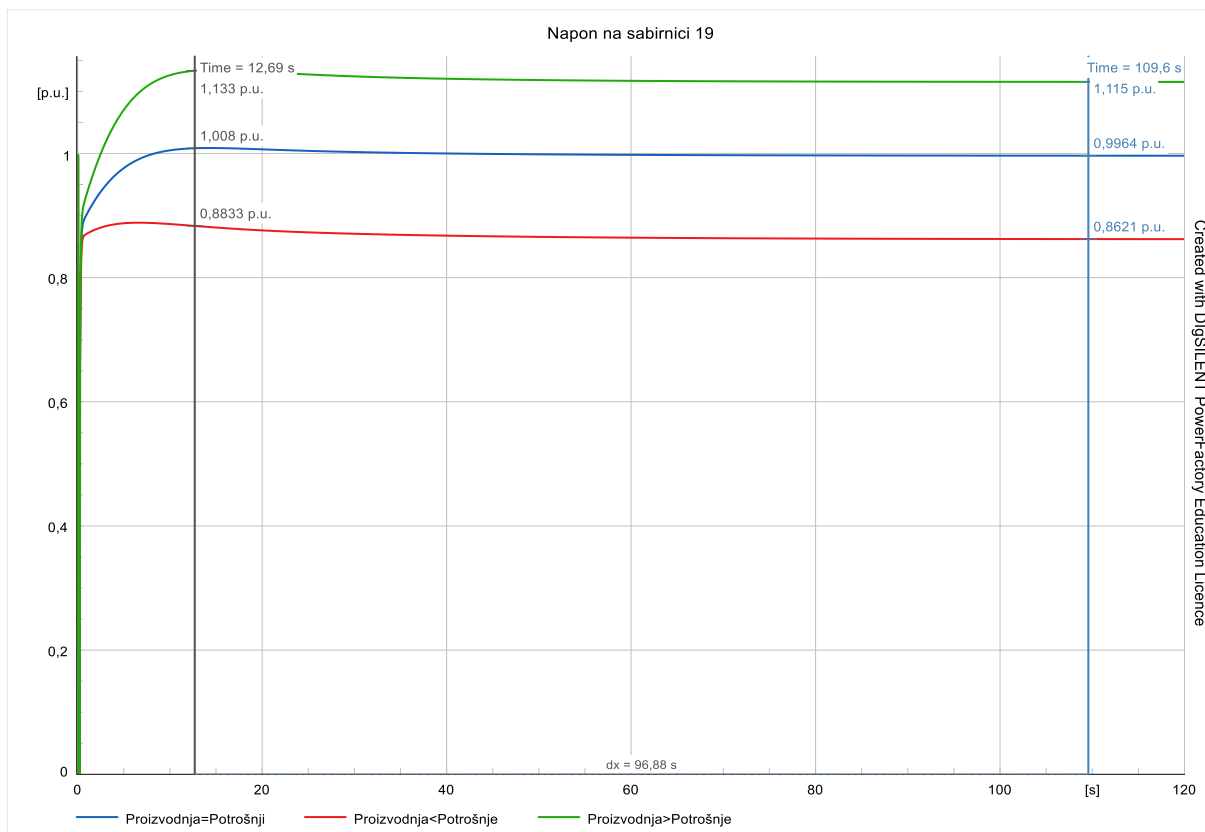


Na slici 4.24. prikazan je napon u prijelaznom stanju na sabirnici 19. Krivulje napona na sabirnici 19 su identične krivuljama napona na sabirnici 22, ali postoji mala razlika u vrijednostima jer je sabirnica 19 udaljenija od DG2 (distribuirana proizvodnja 2). Zbog te udaljenosti, naponi na sabirnici 19 su nešto niži u odnosu na napone na sabirnici 22 u ustaljenom stanju.



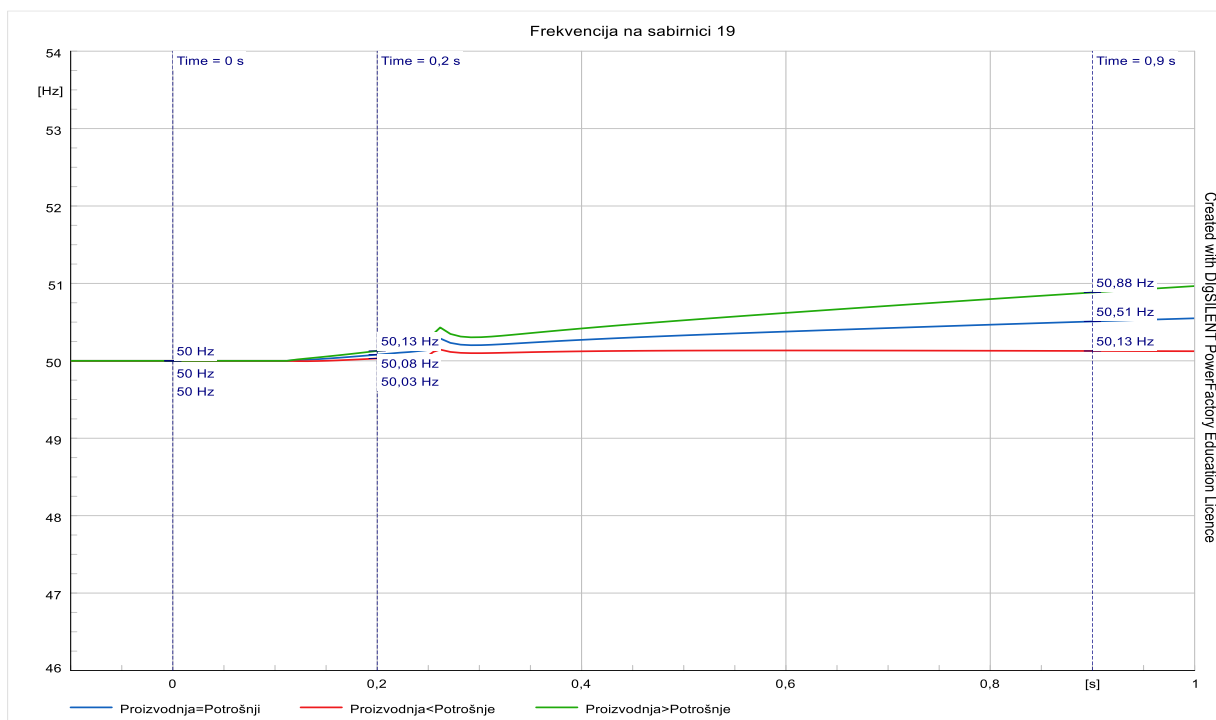
Slika 4.24. Sabirnica 19 – napon – prijelazno stanje

Na slici 4.25. prikazano je ustaljeno stanje napona na sabirnici 19. Ustaljeno stanje prikazuje da se napon stabilizirao na vrijednost koja zadovoljava uvjet od  $\pm 15\%$  od nominalne vrijednosti. Sa stajališta stabilnosti, ove vrijednosti su prihvatljive. To znači da, iako napon možda ne zadovoljava stroži uvjet od  $\pm 10\%$ , on je unutar šireg prihvatljivog raspona od  $\pm 15\%$ , što omogućava sustavu da se smatra stabilnim i operativno sigurnim. U elektroenergetskim sustavima, održavanje napona unutar određenih granica ključno je za stabilnost i pouzdanost sustava. Naponi koji zadovoljavaju uvjet od  $\pm 15\%$  osiguravaju da sustav može učinkovito funkcionirati bez značajnih rizika od nestabilnosti ili oštećenja opreme. Ovaj širi raspon stabilnosti pruža dodatnu fleksibilnost u upravljanju sustavom, omogućujući mu da se prilagodi različitim operativnim uvjetima i eventualnim poremećajima.

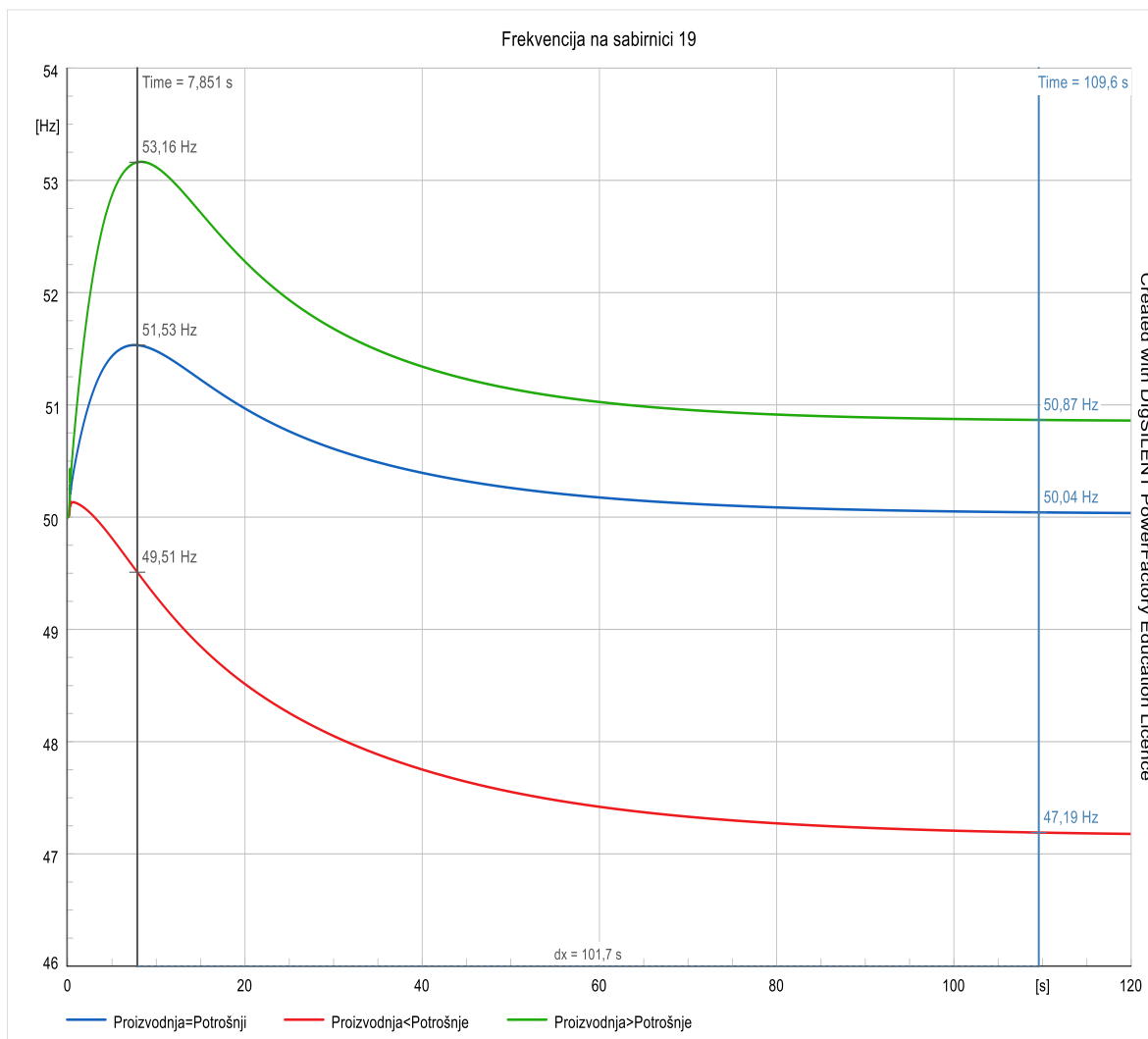


Slika 4.25. Sabirnica 19 – napon – ustaljeno stanje

Kao što je bio slučaj za sabirnicu 22, krivulja frekvencija na sabirnici 19 je identična krivulji za sabirnicu 22 (slika 4.26 i slika 4.27.). Razlike su, kao što je i očekivano, u vrijednostima zbog udaljenosti sabirnice 19 od DG2.

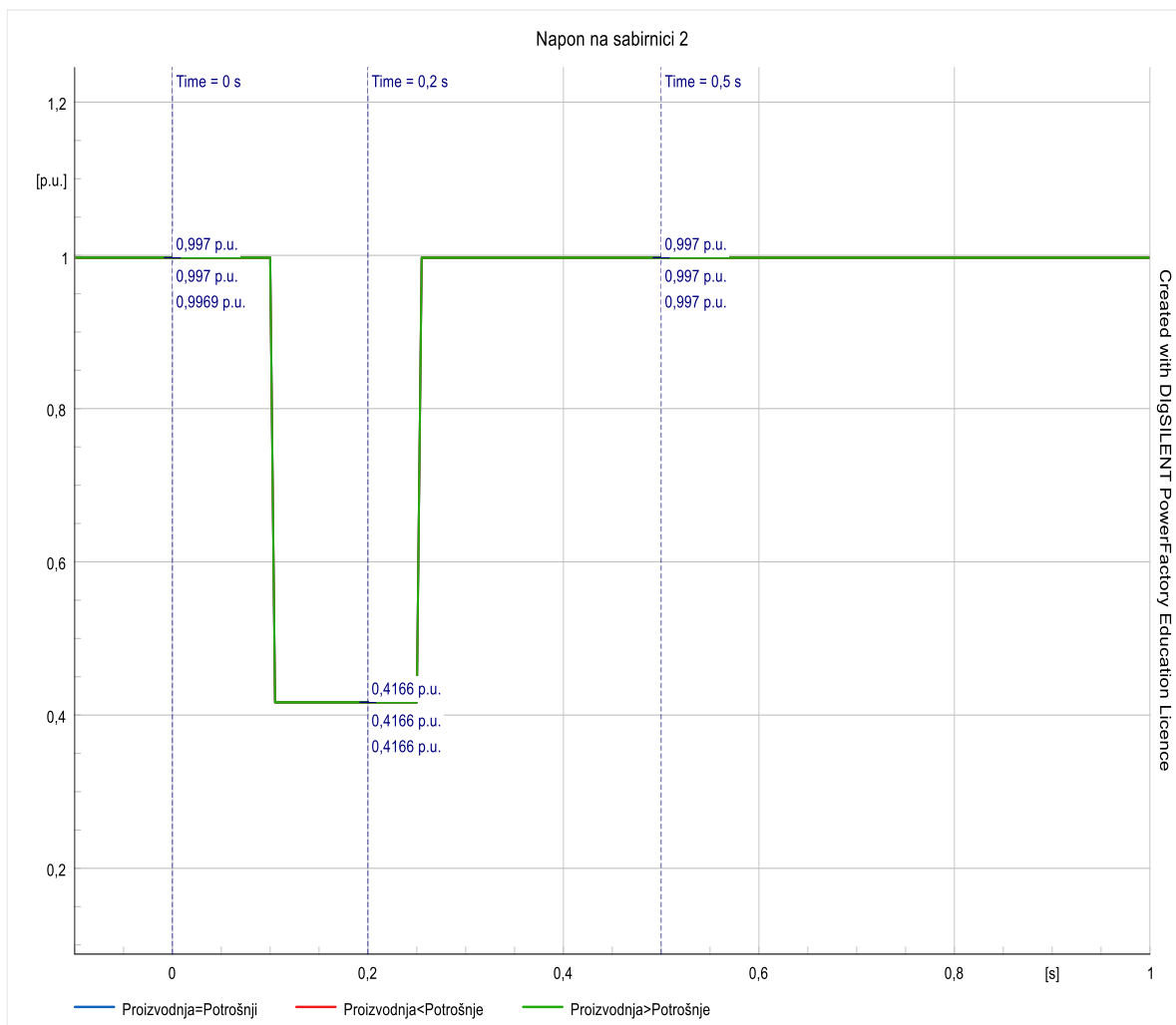


Slika 4.26. Sabirnica 19 – frekvencija – prijelazno stanje



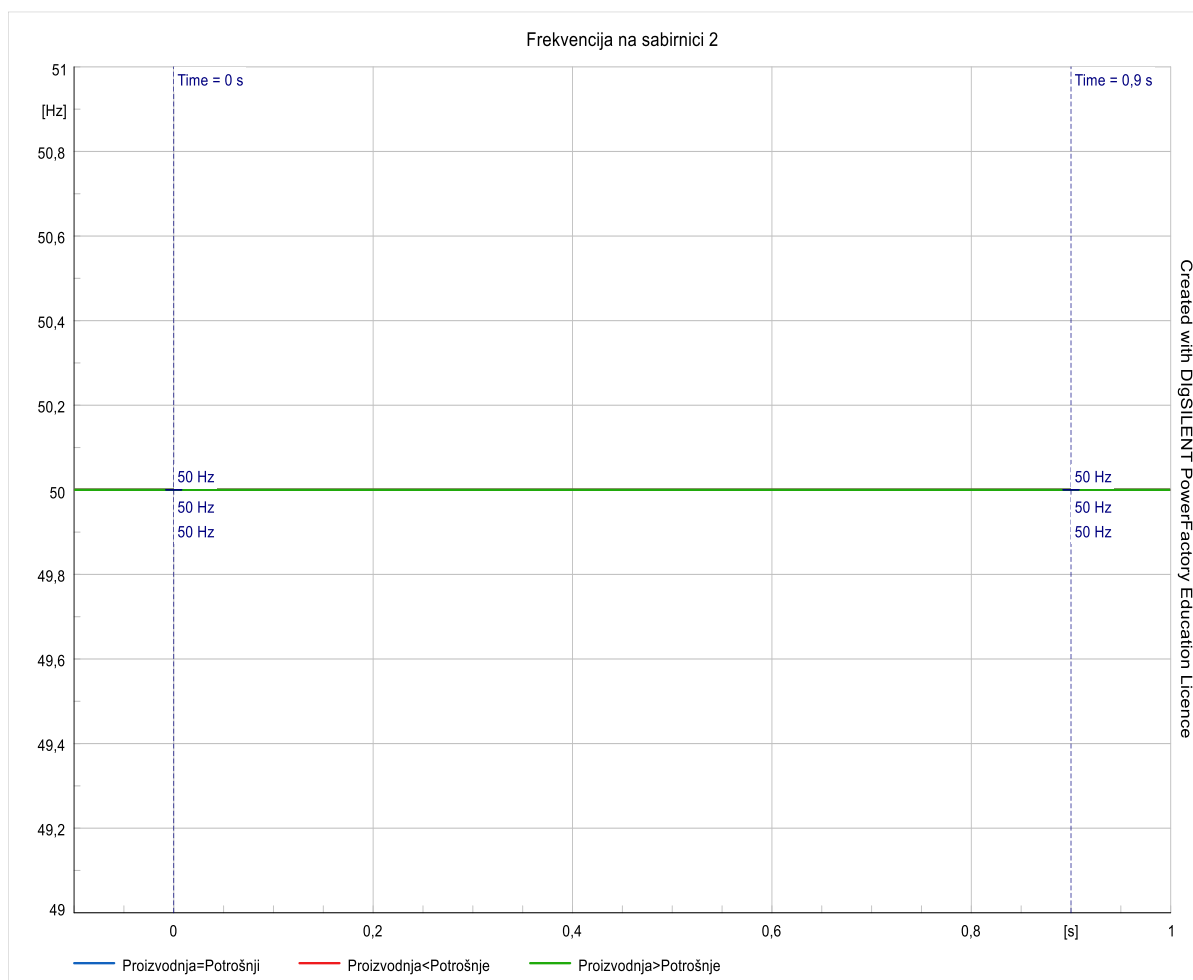
Slika 4.27. Sabirnica 19 – frekvencija – ustaljeno stanje

Za razliku od sabirnica 19 i 22 koje su u otočnom pogonu, sabirnica 2 nije dio otočnog pogona, što znači da je povezana s glavnim mrežom. U trenutku kratkog spoja, napon na sabirnici 2 također opada, ali ne tako drastično kao na otočnim sabirnicama. Ovaj pad napona je rezultat trenutne neravnoteže i prilagođavanja mreže na iznenadni poremećaj. Nakon što se kratki spoj otkloni, napon na sabirnici 2 počinje se vraćati na vrijednost na kojoj je bio prije kratkog spoja. Ovaj proces povratka napona je relativno brz kao što je i vidljivo na slici 4.28., jer je sabirnica 2 direktno povezana s glavnim elektroenergetskim sustavom koji ima veći kapacitet i stabilnost. Glavni sustav može efikasnije kompenzirati poremećaje i brzo vratiti napon na nominalnu vrijednost.



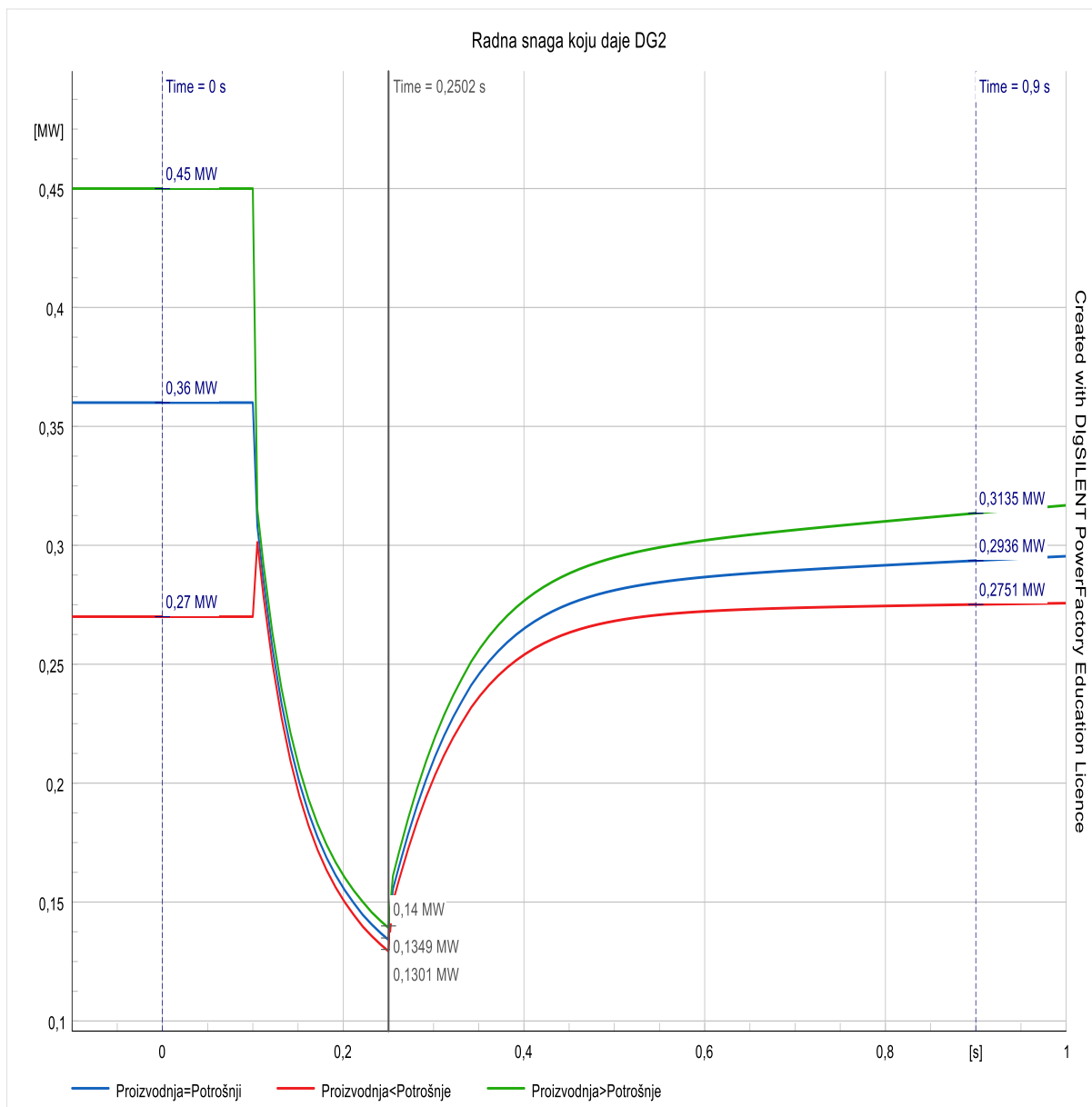
Slika 4.28. Sabirnica 2 - napon

Za to vrijeme nema značajne promjene frekvencije. Na slici 4.29. prikazana je promjena frekvencije, ali je ta promjena minimalna, s varijacijama na vrlo male decimalne, što znači da je frekvencija praktično stabilna i ravna nominalnoj vrijednosti od 50 Hz. Ova stabilnost frekvencije na sabirnici 2 može se pripisati njenoj povezanosti s glavnom mrežom, koja ima veću inerciju i sposobnost održavanja stabilnosti frekvencije unatoč lokalnim poremećajima. To pokazuje da, dok otočni pogoni mogu doživjeti značajne fluktuacije frekvencije zbog svoje izoliranosti, sabirnice povezane s glavnom mrežom imaju prednost u održavanju stabilne frekvencije, što dodatno doprinosi ukupnoj stabilnosti i pouzdanosti elektroenergetskog sustava.



Slika 4.29. Sabirnica 2 – frekvencija – prijelazno stanje

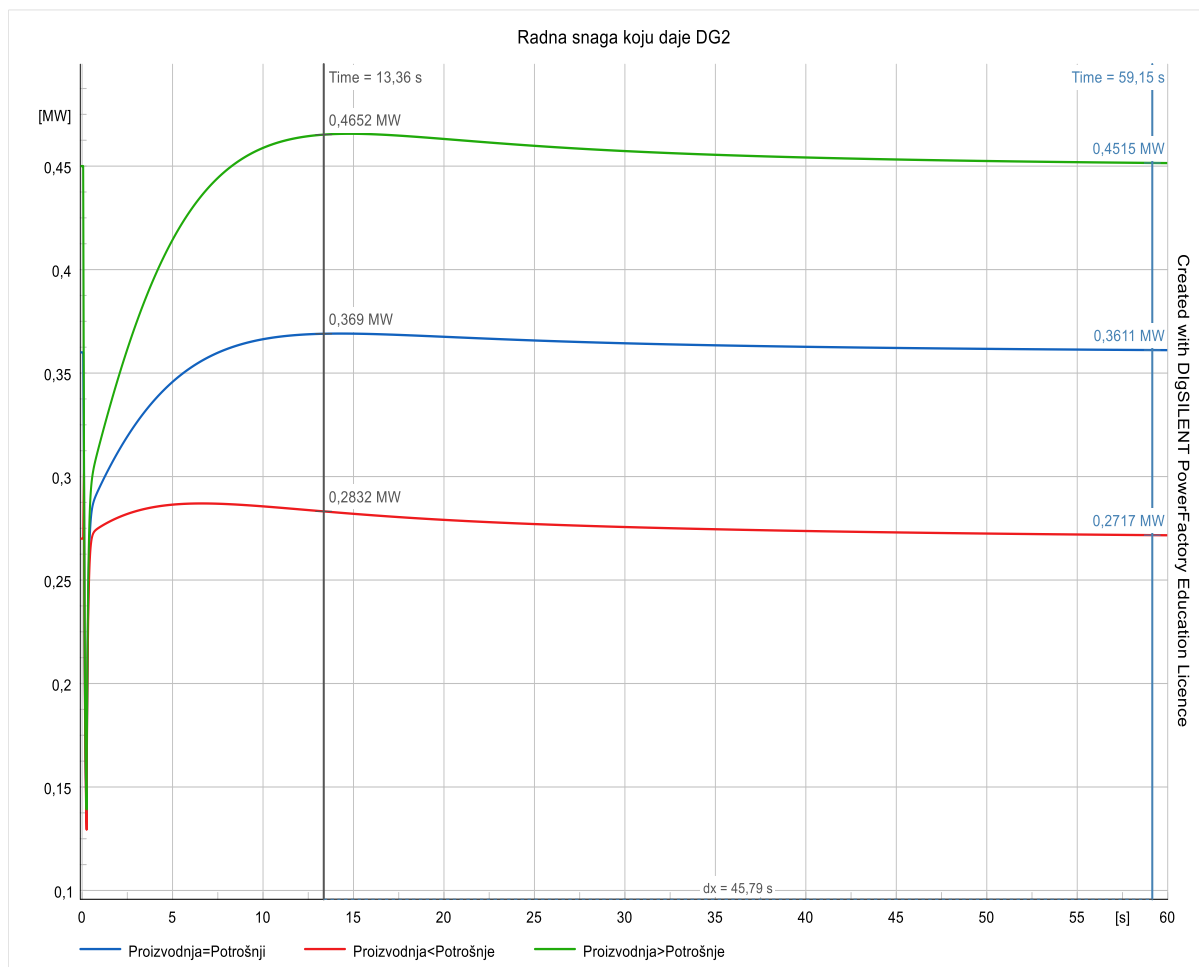
Radna snaga koju daje DG2 (distribuirana proizvodnja 2) u trenutku kratkog spoja značajno pada zbog poremećaja u sustavu. Ovaj pad radne snage je posljedica iznenadnog kratkog spoja koji uzrokuje trenutni pad napona i destabilizaciju mreže. DG2 reagira na ove promjene smanjenjem izlazne snage, jer se generatori automatski prilagođavaju novonastaloj situaciji kako bi zaštitili opremu i održali stabilnost sustava koliko je to moguće. U trenutku isključenja voda 18, radna snaga DG2 doseže svoj minimum (slika 4.30.). Ovo je kritična točka jer isključenje voda dodatno destabilizira mrežu, čime se radna snaga DG2 smanjuje na najnižu vrijednost. Isključenje voda 18 predstavlja trenutak kada sustav pokušava izolirati kvar i prilagoditi se novim uvjetima rada. Nakon isključenja, dolazi do postupnog oporavka sustava. Nakon što se vod 18 isključi i sustav počne stabilizirati, radna snaga DG2 počinje rasti. Ovaj rast je rezultat ponovne uspostave normalnih operativnih uvjeta i prilagodbe sustava na novu konfiguraciju mreže bez kratkog spoja. Kako se mreža stabilizira, DG2 postupno povećava izlaznu snagu, vraćajući se na razine radne snage koje su bile prisutne u početnom stanju prije kratkog spoja.



Slika 4.30. DG2 – radna snaga – prijelazno stanje

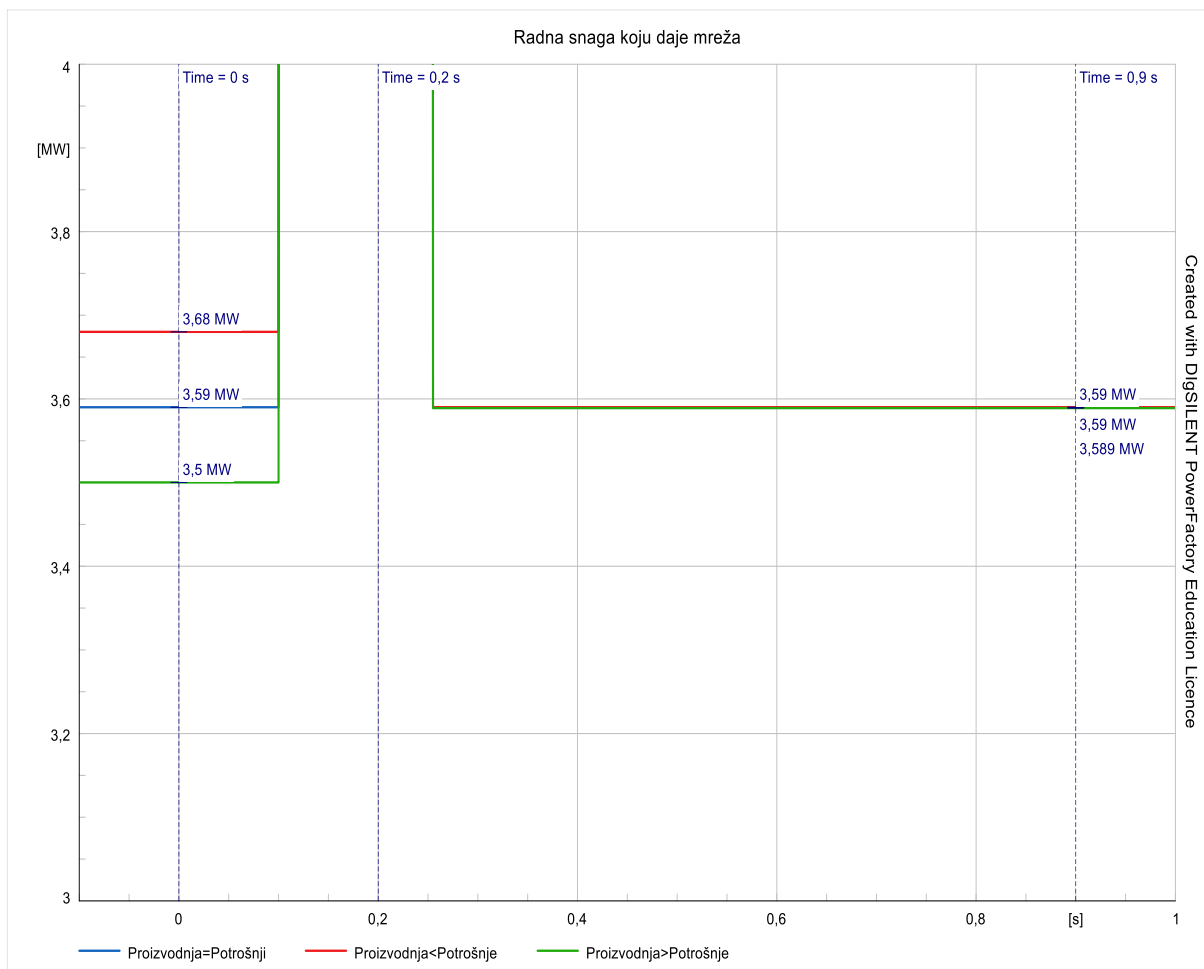
U ustaljenom stanju, radna snaga DG2 doseže vrijednosti koje odgovaraju vrijednostima u početnom stanju (slika 4.31.). Ovo ukazuje na to da se sustav uspješno oporavio od kratkog spoja i isključenja voda, te da DG2 ponovno isporučuje stabilnu i predviđenu količinu radne snage. Povratak radne snage na početne vrijednosti pokazuje da su regulatorni mehanizmi unutar mreže učinkoviti i sposobni vratiti sustav u stabilno stanje nakon poremećaja.

Ovaj proces oporavka naglašava važnost distribucijskih generatora poput DG2 u održavanju stabilnosti i pouzdanosti elektroenergetskog sustava. Unatoč početnim padovima snage uslijed kratkog spoja i isključenja voda, sustav se može stabilizirati i vratiti na nominalne operative uvjete, osiguravajući kontinuiranu opskrbu električnom energijom.



Slika 4.31. DG2 – radna snaga – ustaljeno stanje

Početne vrijednosti mreže ovise o snazi koju pruža DG2 (distribuirana proizvodnja 2). Ako je proizvodnja DG2 veća, tada će mreža manje davati snage u sustav, jer DG2 pokriva veći dio potražnje električne energije. Ovo dovodi do smanjenja opterećenja na mreži i pomaže u održavanju stabilnosti. S druge strane, ako je proizvodnja DG2 manja od potrebnog opterećenja, mreža mora nadoknaditi taj nedostatak snage. U takvim situacijama, mreža će povećati svoj izlaz kako bi zadovoljila ukupnu potražnju električne energije u sustavu. Početne vrijednosti mreže, prikazane na slici 4.32., ilustriraju ovu dinamiku. Razlika u snazi između proizvodnje DG2 i potrebnog opterećenja iznosi 90 kW, što je ekvivalentno 25% kapaciteta DG2. Ova razlika u snazi pokazuje koliko je DG2 blizu ili daleko od optimalnog balansa između proizvodnje i potrošnje u sustavu.

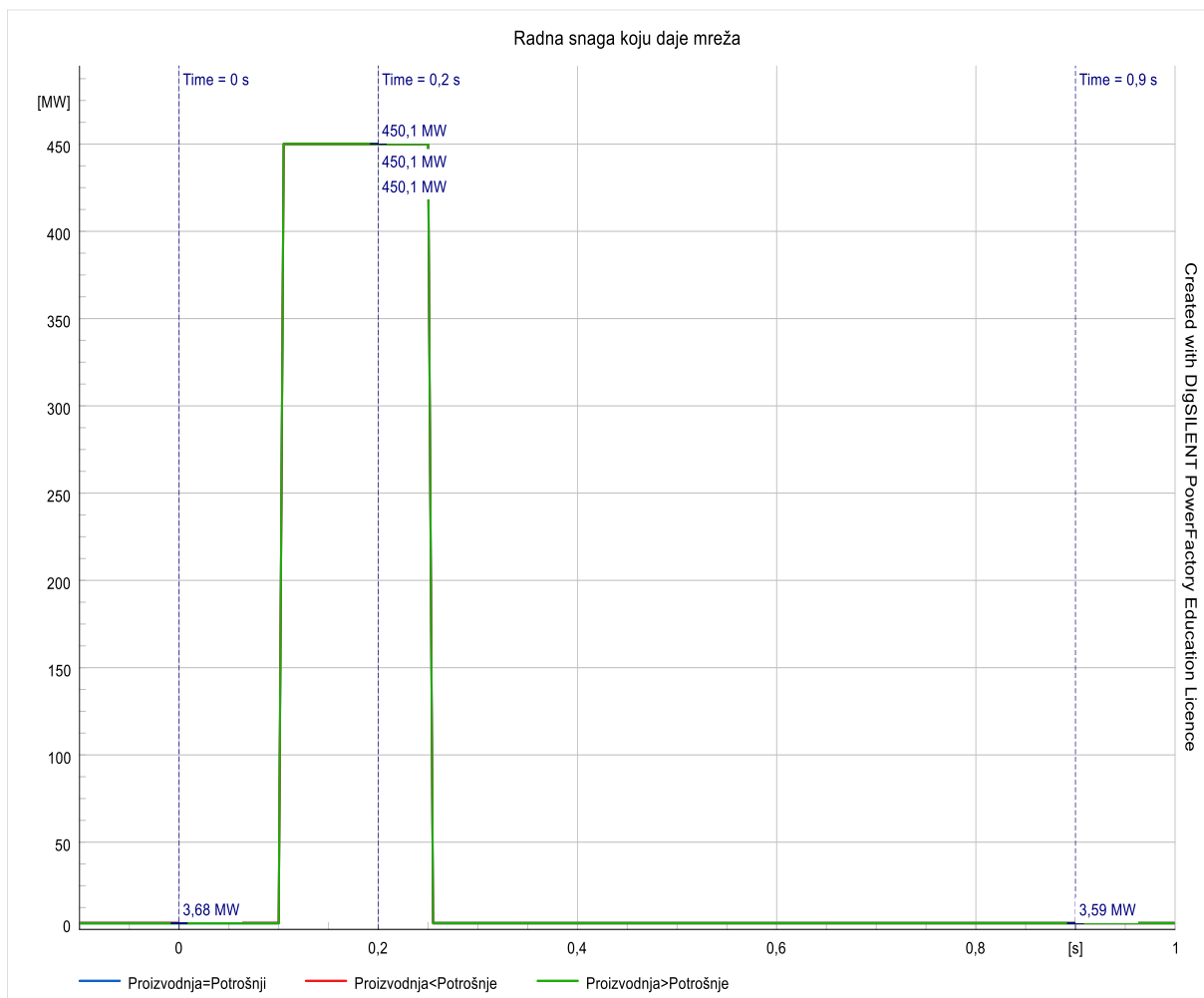


Slika 4.32. Mreža – radna snaga – početno stanje

Ovaj dinamički odnos između DG2 i mreže naglašava važnost pravilnog upravljanja i kontroliranja distribuiranih generatora kako bi se osigurala stabilnost i pouzdanost elektroenergetskog sustava. Održavanje optimalnog balansa između proizvodnje i potrošnje ključno je za efikasno i učinkovito funkcioniranje elektroenergetskog sustava, minimizirajući rizike od poremećaja i osiguravajući kontinuiranu opskrbu električnom energijom.

U trenutku kratkog spoja u mreži se pojavljuje snaga kratkog spoja koja iznosi 450,1 MW, kako je prikazano na slici 4.33. Ova visoka snaga kratkog spoja predstavlja trenutni prekid ili prekid u strujnom krugu, što može rezultirati naglim padom napona i prekidom normalnog rada mreže. Nakon isključenja voda 18 u trenutku 0,25 sekundi, snaga u mreži pada i stabilizira se na vrijednosti od 3,59 MW. Važno je napomenuti da se ova snaga stabilizira neovisno o početnom stanju, jer u tom trenutku DG2 (distribuirana proizvodnja 2) prestaje pridonositi snazi mreži.

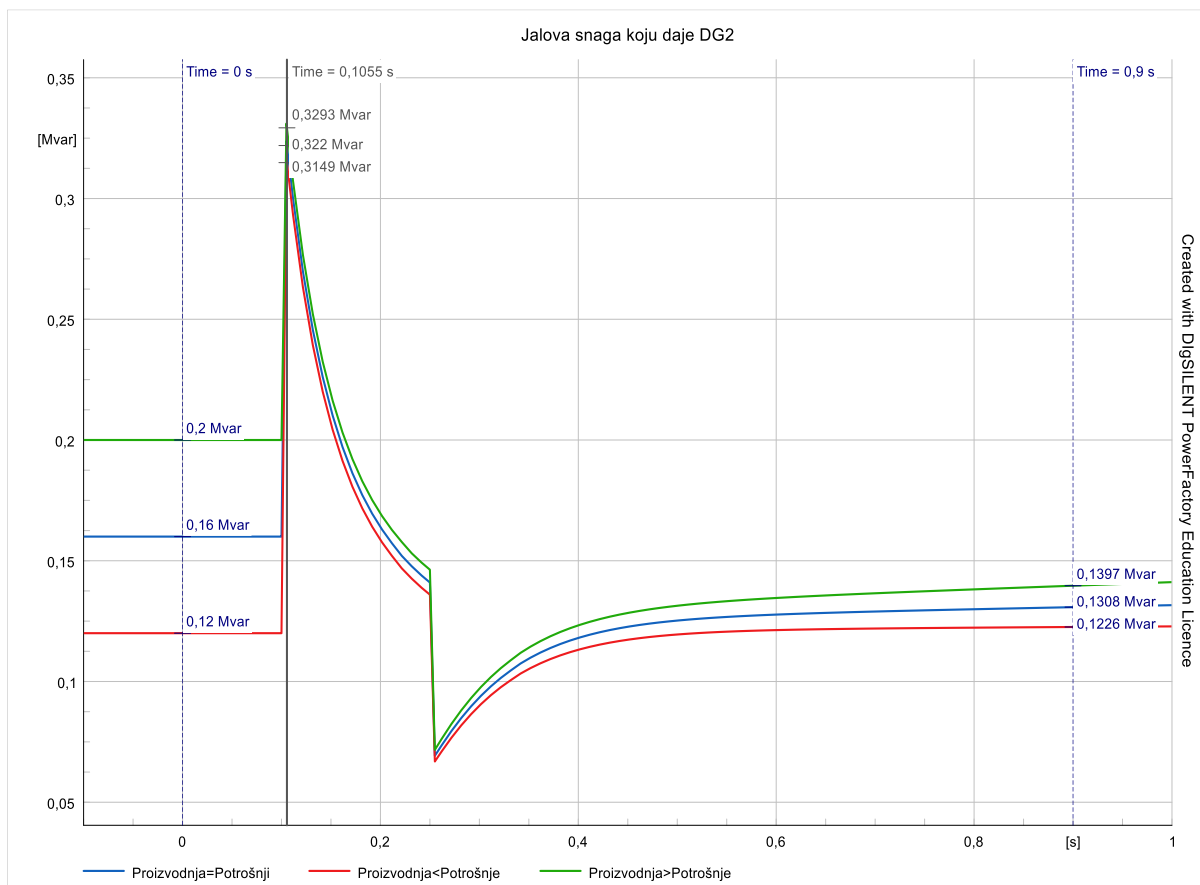




Slika 4.33. Mreža – radna snaga – snaga kratkog spoja

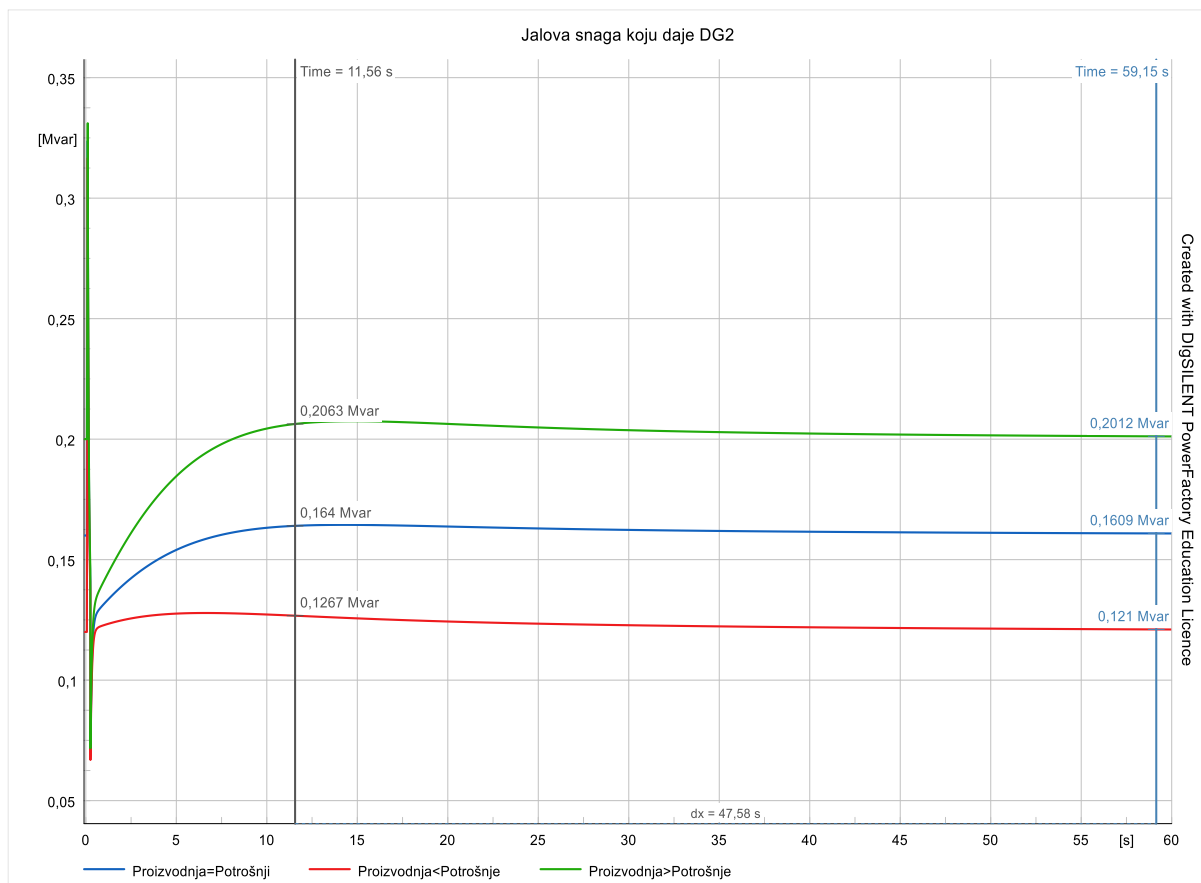
Ovaj pad snage na 3,59 MW nakon isključenja voda 18 ukazuje na to da se mreža prilagođava novim uvjetima rada nakon iznenadnog poremećaja. U tom scenariju, mreža mora održati minimalnu snagu potrebnu za osnovno funkcioniranje, unatoč nedostatku dodatnih izvora snage koji bi nadomjestili gubitak prouzrokovan isključenjem voda 18. Stabilizacija na 3,59 MW pokazuje sposobnost mreže da se prilagodi novonastalim uvjetima bez većih posljedica na stabilnost i sigurnost opskrbe električnom energijom.

Ovaj primjer dodatno potvrđuje važnost upravljanja i regulacije mreže u slučaju iznenadnih događaja poput kratkih spojeva ili prekida u mreži. Efikasno upravljanje može značajno smanjiti potencijalne štete i osigurati brz oporavak sustava nakon takvih događaja.



Slika 4.34. DG2 – jalova snaga – prijelazno stanje

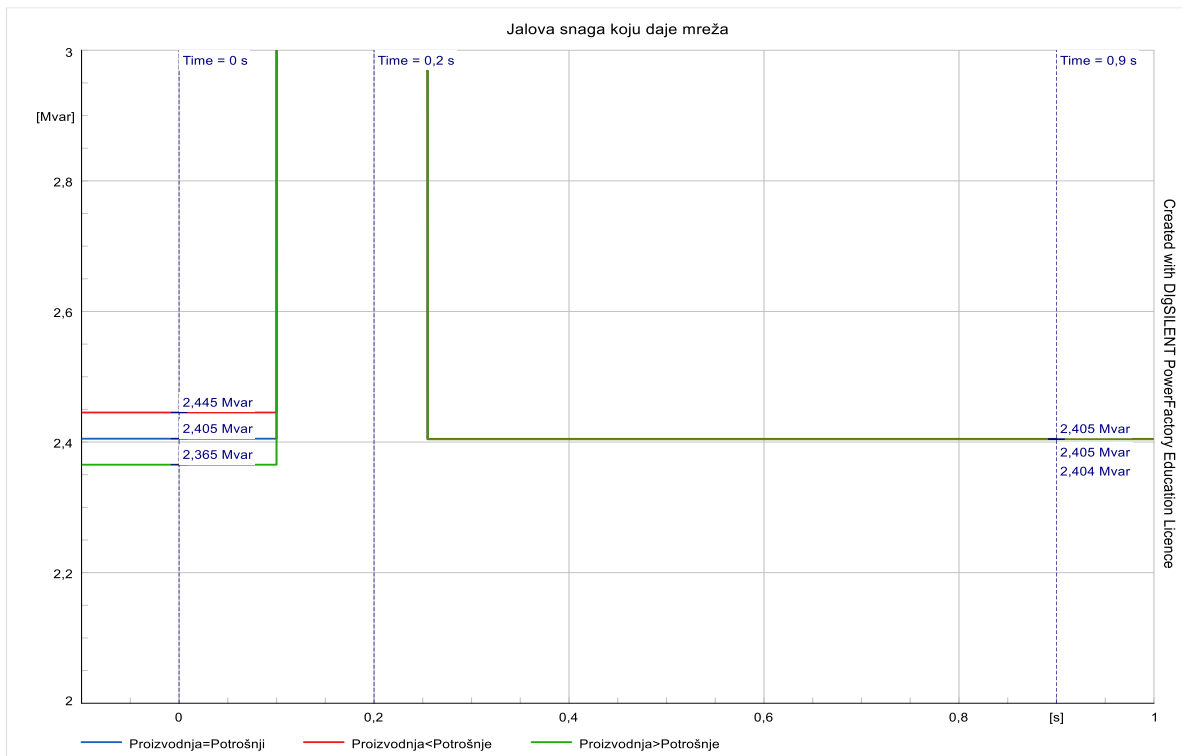
Ukoliko se promatra jalova snaga koju daje DG2, vidljivo je da je početno stanje zadano. U trenutku kratkog spoja dolazi do naglog skoka jalove snage, i to u sva tri slučaja na gotovo istu vrijednost koja iznosi oko 320 kVAr kako je i vidljivo na slici 4.34. Ovaj nagli porast jalove snage reflektira trenutačni odgovor sustava na poremećaj uzrokovan kratkim spojem, gdje dolazi do povećane potrebe za jalovom snagom kako bi se održala stabilnost napona. Odmah nakon tog naglog skoka, jalova snaga počinje padati. U trenutku isključenja voda, koji se događa u 0,25 sekundi, jalova snaga doseže svoj minimum od oko 70 kVAr. Ovaj pad jalove snage nakon kratkog spoja može se pripisati stabilizaciji sustava i smanjenju potreba za dodatnom jalovom snagom nakon inicijalnog poremećaja. Nakon doseganja minimuma u 0,25 sekundi, jalova snaga ponovno počinje rasti. Ovaj rast jalove snage nakon inicijalnog pada pokazuje prilagodbu sustava kako bi se postigla nova ravnoteža i stabilizacija nakon kratkog spoja i isključenja voda.



Slika 4.35. DG2 – jalova snaga – ustaljeno stanje

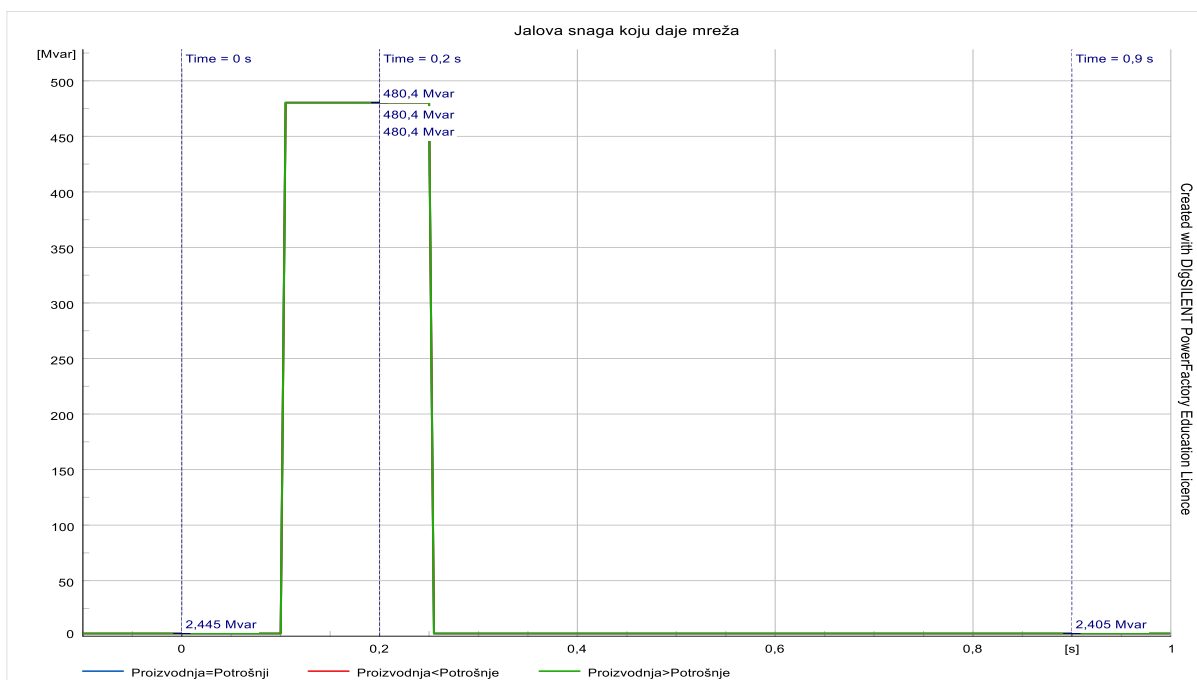
Nakon početnog perioda prilagodbe, jalova snaga se postupno ustaljuje. U 120 sekundi sustav dostiže stabilno stanje, pri čemu se jalova snaga vraća na vrijednosti koje su jednake početnom stanju. Dakle, nakon prolaska kroz dinamičke promjene uzrokovane kratkim spojem i isključenjem voda, jalova snaga se vraća na svoju početnu vrijednost, pokazujući da se sustav uspješno stabilizirao i prilagodio početnim uvjetima. Ustaljene vrijednosti vidljive su na slici 4.35.

Ukoliko se promatra jalova snaga mreže, krivulja je slična krivulji radne snage. Početna jalova snaga ovisi o snazi DG2. Ako je proizvodnja jalove snage DG2 manja od potrošnje, tada dio jalove snage mora nadomjestiti mreža. Iz tog razloga, na slici 4.36. prikazana je veća jalova snaga u početnom stanju. Obrnuto, ako je proizvodnja jalove snage DG2 veća, tada mreža mora smanjiti svoju proizvodnju jalove snage. U trenutku 0,1 sekunde dogodi se kratki spoj, te jalova snaga mreže naglo skoči na 480,4 MVar (Slika 4.37.). Ovaj skok je izravna posljedica kratkog spoja koji uzrokuje iznenadnu potrebu za dodatnom jalovom snagom kako bi se pokušala održati stabilnost sustava. Jalova snaga ostaje na toj visokoj razini sve dok se vod 18 ne isključi. Nakon isključenja voda, jalova snaga se stabilizira. Bez obzira na početnu proizvodnju jalove snage DG2, mreža više ne mora nadomještati tu snagu jer je taj dio sustava odcjepljen od mreže.



Slika 4.36. Mreža – jalova snaga – početno stanje

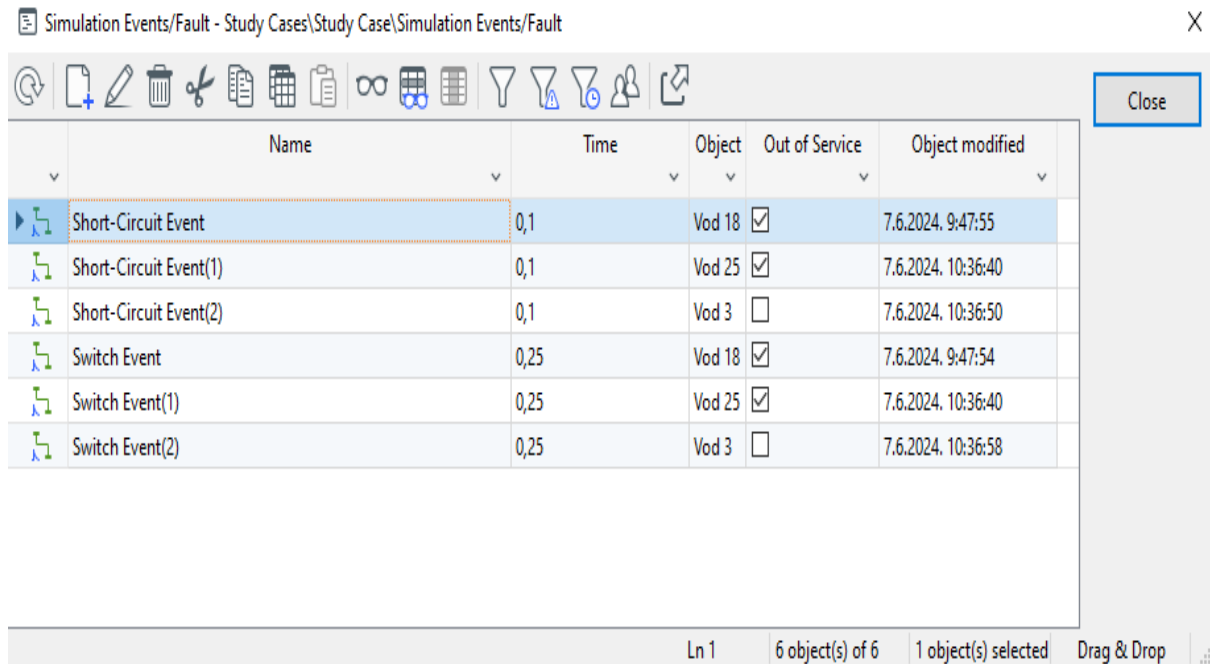
U ustaljenom stanju, jalova snaga koju mreža daje iznosi 2,405 MVar, pokazujući stabilizaciju sustava nakon početnog poremećaja uzrokovanog kratkim spojem i isključenjem voda. Ova stabilna vrijednost jalove snage odražava novo ravnotežno stanje mreže nakon što su se svi dinamički efekti smirili. Vrijednost jalove snage odražava novo ravnotežno stanje mreže nakon što su se svi dinamički efekti smirili.



Slika 4.37. Mreža – jalova snaga – kratki spoj

### 4.3. Simulacija velikog otoka

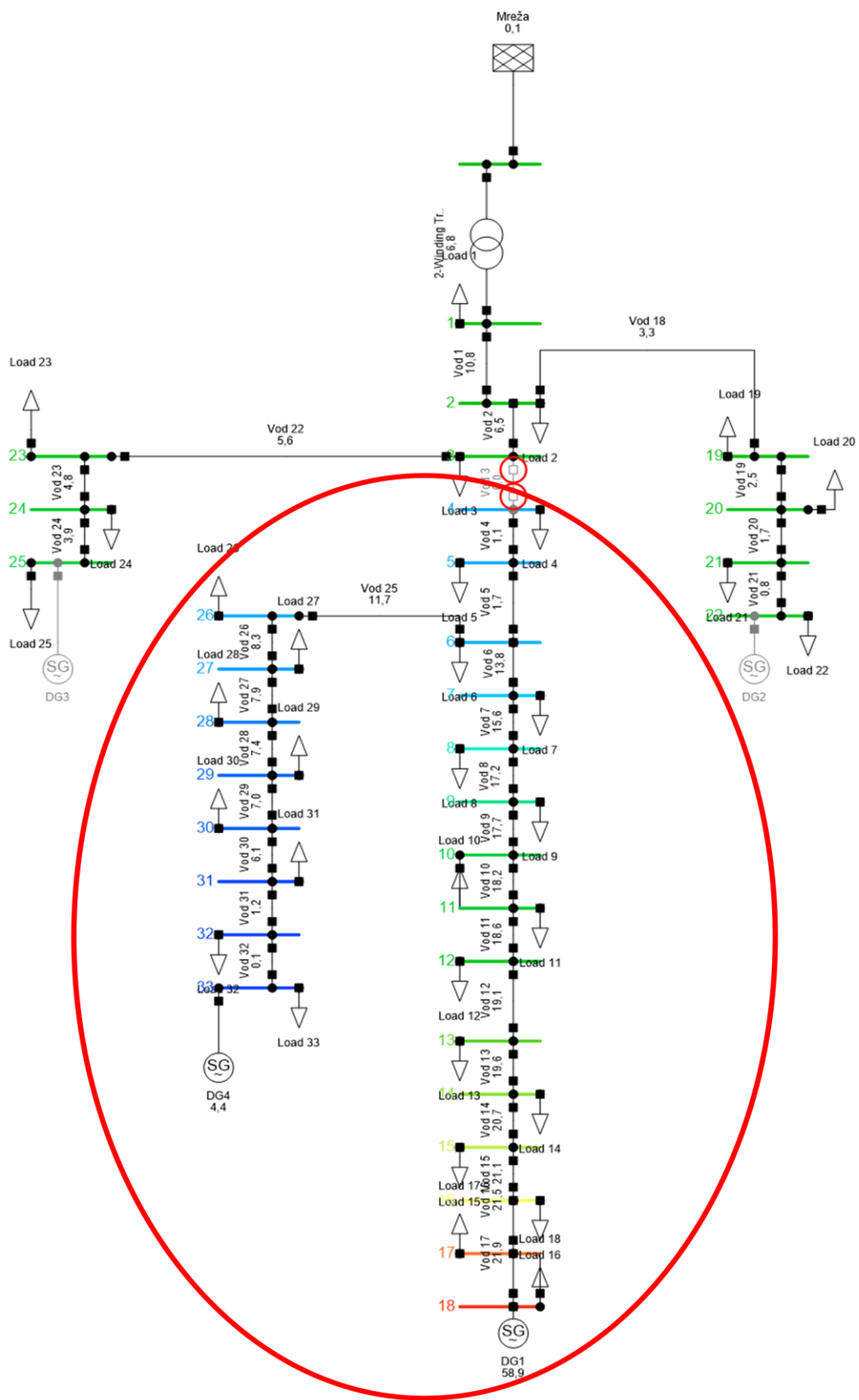
Postavljeno je da se dogodi trofazni kratki spoj na vodu 3, koji spaja sabirnice 4 i 3, u trenutku 0,1 sekunda nakon pokretanja simulacije. U trenutku 0,25 sekundi, vod 18 se isključuje. Ti događaji su vidljivi na slici 4.38.



Name	Time	Object	Out of Service	Object modified
Short-Circuit Event	0,1	Vod 18	<input checked="" type="checkbox"/>	7.6.2024. 9:47:55
Short-Circuit Event(1)	0,1	Vod 25	<input checked="" type="checkbox"/>	7.6.2024. 10:36:40
Short-Circuit Event(2)	0,1	Vod 3	<input type="checkbox"/>	7.6.2024. 10:36:50
Switch Event	0,25	Vod 18	<input checked="" type="checkbox"/>	7.6.2024. 9:47:54
Switch Event(1)	0,25	Vod 25	<input checked="" type="checkbox"/>	7.6.2024. 10:36:40
Switch Event(2)	0,25	Vod 3	<input type="checkbox"/>	7.6.2024. 10:36:58

Slika 4.38. Događaji

Nakon isključenja voda 3, nastaje veliki otočni pogon koji se napaja iz distribuirane proizvodnje DG1 i DG4 prikazane na slici 4.39. Simulacija se izvodi u tri promatrana slučaja. U prvom slučaju proizvodnja je veća od potrošnje, u drugom su proizvodnja i potrošnja izjednačene dok je u trećem slučaju proizvodnja manja od potrošnje. Promatraju se sabirnice 18, 17, 4 i 2. Električne veličine koje se promatraju na tim sabirnicama su napon, frekvencija, te radna i jalova snaga koju daje mreža i koju daje DG4 i DG1. U svakom od ovih slučajeva, cilj je analizirati kako različiti uvjeti proizvodnje i potrošnje utječu na stabilnost sustava. Proučavaju se promjene u naponskim profilima, fluktuacije frekvencije, te distribucija radne i jalove snage između mreže i DG4, te DG1. Promjene u naponu, frekvenciji, te radnoj i jalovoj snazi koje se prate na sabirnicama 18, 17, 4 i 2, daju uvid u ponašanje sustava pod različitim uvjetima. To omogućava identifikaciju potencijalnih problema i potrebnih korektivnih mjera kako bi se osigurala stabilnost i pouzdanost elektroenergetskog sustava. Kod DG1 se mijenja proizvodnja tako da u zbroju s DG4 ima veću, jednaku ili manju od ukupne potrošnje u otoku. Ostali DG-ovi su isključeni.



Slika 4.39. Veliki otok

### 4.3.1. Proizvodnja veća od potrošnje

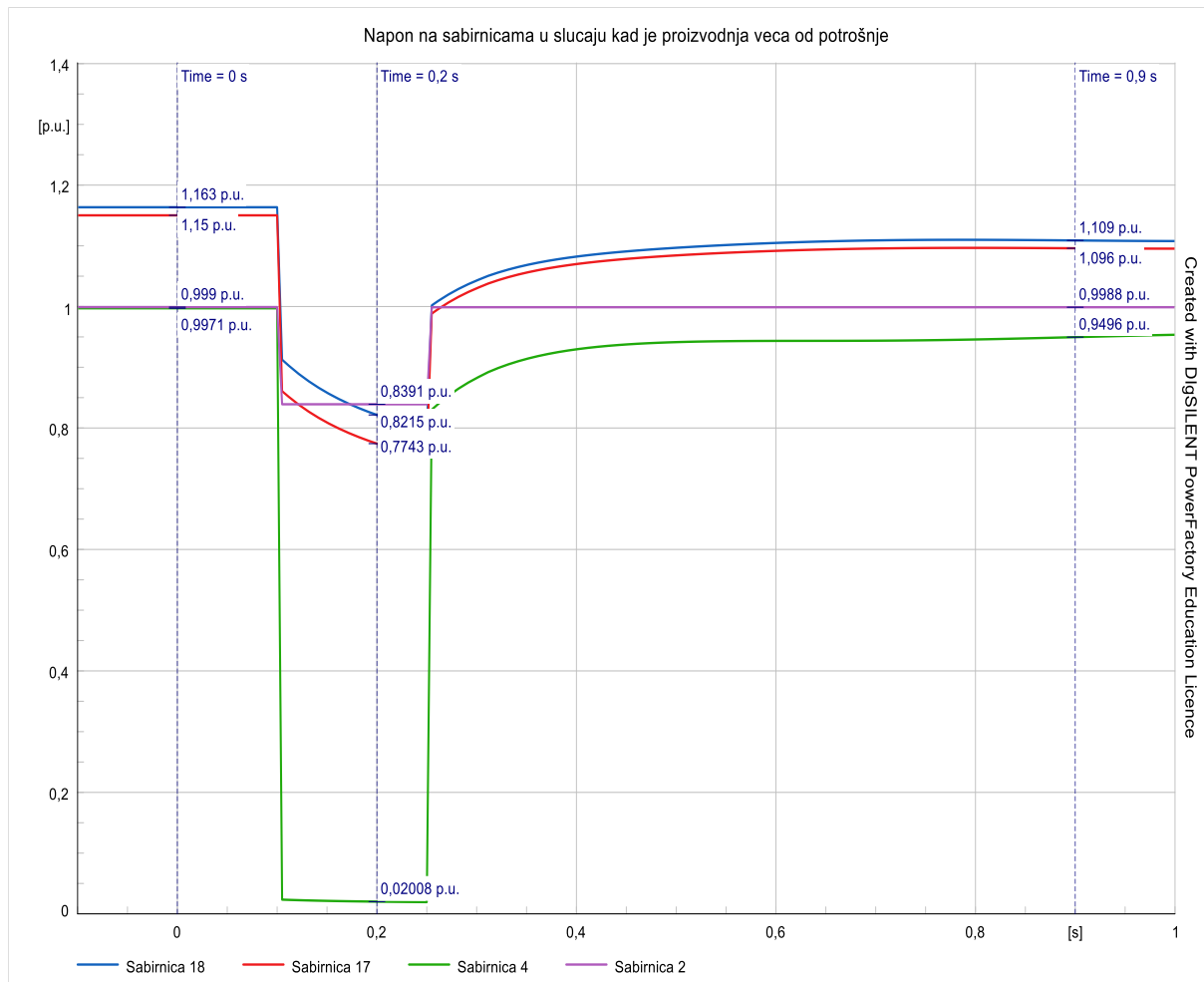
U ovom slučaju, proizvodnja je veća od potrošnje u velikom otoku. Ukupna potrošnja na sabirnicama, koje su u otočnom pogonu, iznosi 2,235 MW radne snage i 1,59 MVar jalove snage. Da bismo simulirali scenarij u kojem je proizvodnja veća od potrošnje, tu smo snagu povećali za 25%. Dakle, proizvodnja je postavljena na 2,59357 MW radne snage i 1,9875 MVar jalove snage, kao što je prikazano na slici 4.40. To su podaci za DG1. DG4 je postavljen podacima zadanim u tablici 4.2. Kada se zbroji radna snaga DG1 i DG4 ukupna radna snaga je 2,79357 MW što je točno 25% veća snaga od ukupnog opterećenja otočnog pogona. Ovaj porast u proizvodnji osigurava da distribuirana proizvodnja DG4 i DG1 generiraju dovoljno energije za pokrivanje trenutnih potreba potrošnje na sabirnicama u otočnom pogonu, s dodatnim viškom koji rezultira povećanjem napona. Dok su svi ostali generatori isključeni, DG4 i DG1 preuzimaju cjelokupno opterećenje i osiguravaju napajanje za sabirnice u otočnom pogonu. Ovaj scenarij omogućava detaljno praćenje kako višak proizvodnje utječe na električne veličine kao što su napon, frekvencija, te radna i jalova snaga.

The screenshot displays the 'Synchronous Machine - Grid\DG1.ElmSym' configuration window. The 'Load Flow' tab is selected in the left-hand navigation pane. The main area shows the 'General' tab with various operational settings. The 'Dispatch' section contains input fields for Active Power (2,59375 MW), Reactive Power (1,9875 Mvar), Voltage (1 p.u.), Angle (0 deg), and Prim. Frequency Bias (0,1 MW/Hz). The 'Actual Dispatch' section shows the resulting values: Active Power (act.) 2,59375 MW, Reactive Power (act.) 1,9875 Mvar, Apparent Power (act.) 3,267674 MVA, and Power Factor (act.) 0,7937602 ind. The window includes standard buttons for 'OK', 'Cancel', 'Figure', and 'Jump to ...'.

Parameter	Value
Active Power (act.)	2,59375 MW
Reactive Power (act.)	1,9875 Mvar
Apparent Power (act.)	3,267674 MVA
Power Factor (act.)	0,7937602 ind.

Slika 4.40. Podaci DG1 u slučaju kad je proizvodnja veća od potrošnje

Na slici 4.41. prikazano je prijelazno stanje napona na sabirnicama 18, 17, 4 i 2 u elektroenergetskom sustavu. Početni napon na sabirnicama 17 i 18 je povećan jer se one nalaze blizu distribuirane proizvodnje DG1. To znači da je energija iz DG1 odmah dostupna tim sabirnicama, uzrokujući povećane naponske vrijednosti. S druge strane, sabirnica 4 ima najmanji početni napon jer je najudaljenija od DG1, što rezultira većim naponskim padovima zbog otpora i impedancije vodova.



Slika 4.41. Napon - prijelazno stanje

U trenutku 0,1 sekundi dolazi do trofaznog kratkog spoja, što uzrokuje nagli pad napona na svim sabirnicama. Najveći pad napona očitao je na sabirnici 4, koja je najbliža vodu 3 gdje se dogodio kratki spoj. Napon na sabirnici 4 pada gotovo do nule zbog neposredne blizine mjestu kvara. Na sabirnicama 18, 17 i 2 također dolazi do pada napona, ali taj pad nije toliko drastičan kao na sabirnici 4. Vrijednosti napona u trenutku kratkog spoja prikazane su u tablici 4.11.

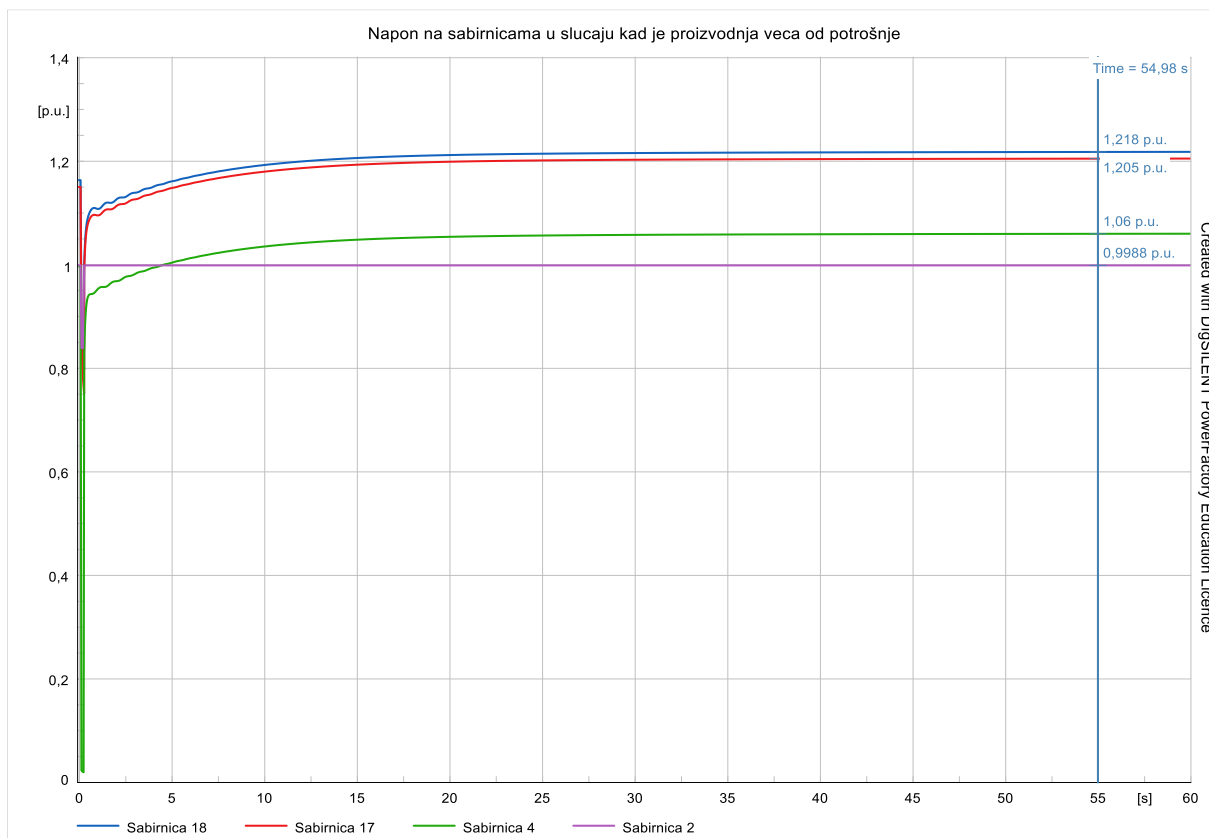


Tablica 4.11. Naponi na sabirnicama u različitim stanjima

Sabirnica	Početno stanje, U [p.u.]	Prijelazno stanje, U [p.u.]	Ustaljeno stanje, U [p.u.]
18	1.16348	0.79722	1.21816
17	1.15016	0.75130	1.20520
4	0.99714	0.01930	1.06003
2	0.99904	0.83907	0.99883

U trenutku 0,25 sekundi dolazi do isključenja voda 3. Ovaj prekid omogućuje sustavu da započne proces oporavka od kratkog spoja. Nakon isključenja voda, naponi na sabirnicama počinju rasti kako se sustav stabilizira. Oporavak napona prikazuje sposobnost sustava da se vrati u stabilno stanje nakon inicijalnog pada uzrokovanog kratkim spojem. Naponi nastavljaju rasti sve do postizanja ustaljenog stanja, što je prikazano na slici 4.42. U ustaljenom stanju, naponi na sabirnicama ovise o udaljenosti od DG1 i o ravnoteži između proizvodnje i potrošnje. Kako je proizvodnja veća od potrošnje, naponi na sabirnicama su veći. Što je sabirnica udaljenija od DG1, to je njen napon manji zbog povećanih gubitaka u prijenosu energije kroz vodove. Ovaj fenomen ilustrira osnovni princip naponskih padova u distribucijskim mrežama, gdje udaljenost od izvora napajanja utječe na napon dostupnog napajanja. Sabirnica 18, koja je blizu DG1, ima visoki početni napon. Nakon kratkog spoja, napon pada, ali se brzo oporavlja nakon isključenja voda i stabilizira se na visokoj vrijednosti zbog blizine DG1. Slično tome, sabirnica 17, također blizu DG1, pokazuje sličan obrazac kao i sabirnica 18 s visokim početnim naponom, padom tijekom kratkog spoja, i brzim oporavkom nakon isključenja voda. Sabirnica 4, koja je najudaljenija od DG1, ima najniži početni napon i najveći pad napona tijekom kratkog spoja zbog blizine mjestu kvara, ali se također oporavlja, iako na nižoj vrijednosti u odnosu na sabirnice 18 i 17. Sabirnica 2 pokazuje manji pad napona tijekom kratkog spoja i stabilan napon tijekom cijelog promatranog perioda jer nije u otočnom pogonu i manje je podložna promjenama uzrokovanim kratkim spojem i isključenjem voda.

Grafovi i opisani prijelazi pokazuju kako kratki spoj i isključenje voda utječu na napone na različitim sabirnicama unutar elektroenergetskog sustava. Blizina izvora napajanja, kao što je DG1, ključna je za početne naponske vrijednosti i brzinu oporavka nakon smetnji. Udaljenost od DG1 povećava naponske padove i smanjuje stabilnost napona, posebno u slučaju kvarova kao što je kratki spoj.

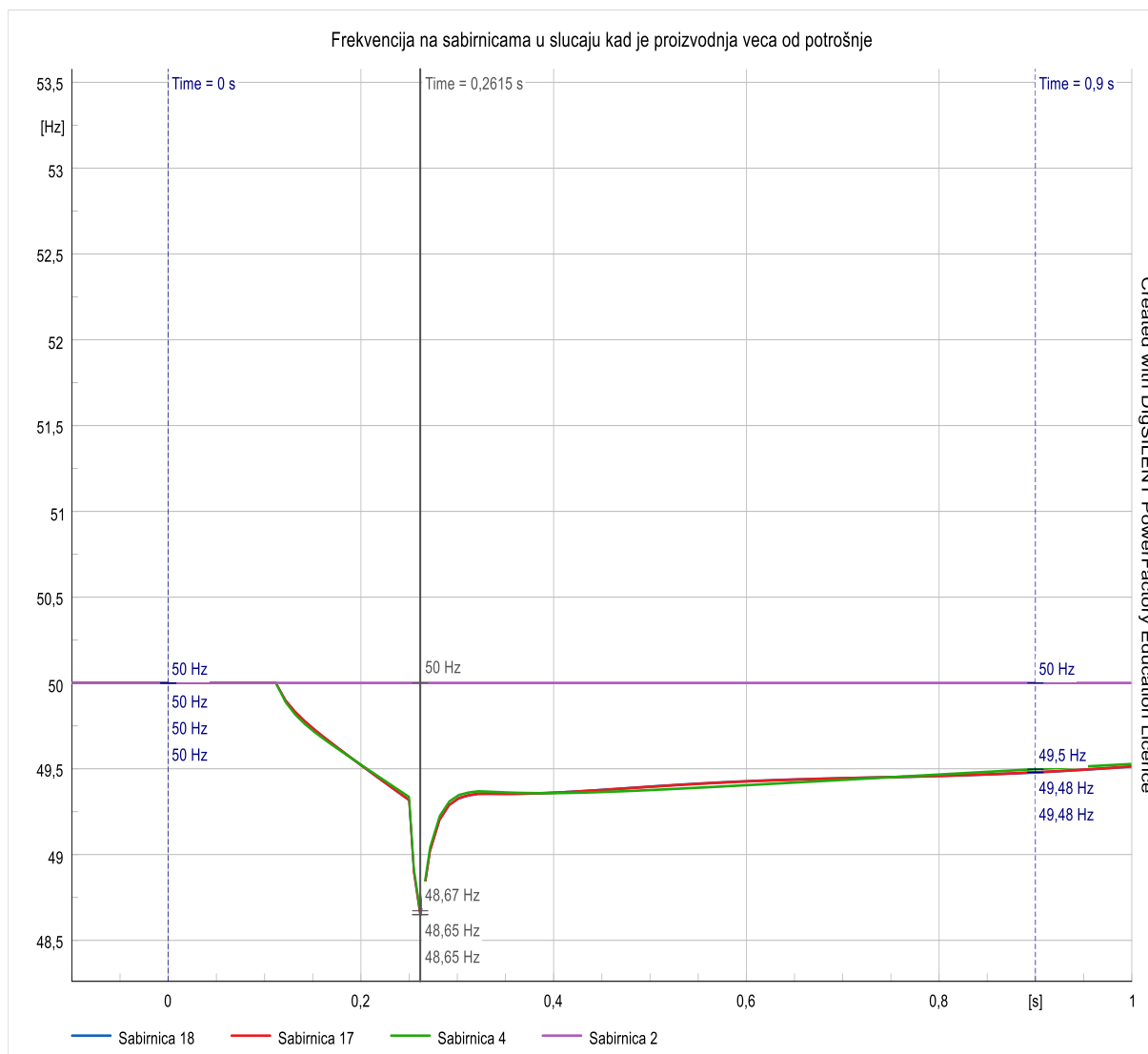


Slika 4.42. Napon - ustaljeno stanje

Frekvencija je u početnom stanju jednaka 50 Hz što je i vidljivo na slici 4.43. U trenutku kada se dogodi kratki spoj, frekvencija počinje padati zbog naglog povećanja opterećenja i narušavanja stabilnosti sustava. Ovaj pad frekvencije traje sve do trenutka isključenja voda 3, koji se događa u 0,25 sekundi. Tada frekvencija doseže svoj minimum jer sustav još uvijek pokušava stabilizirati uvjete nastale kratkim spojem, a vrijednosti se mogu pronaći u tablici 4.12.

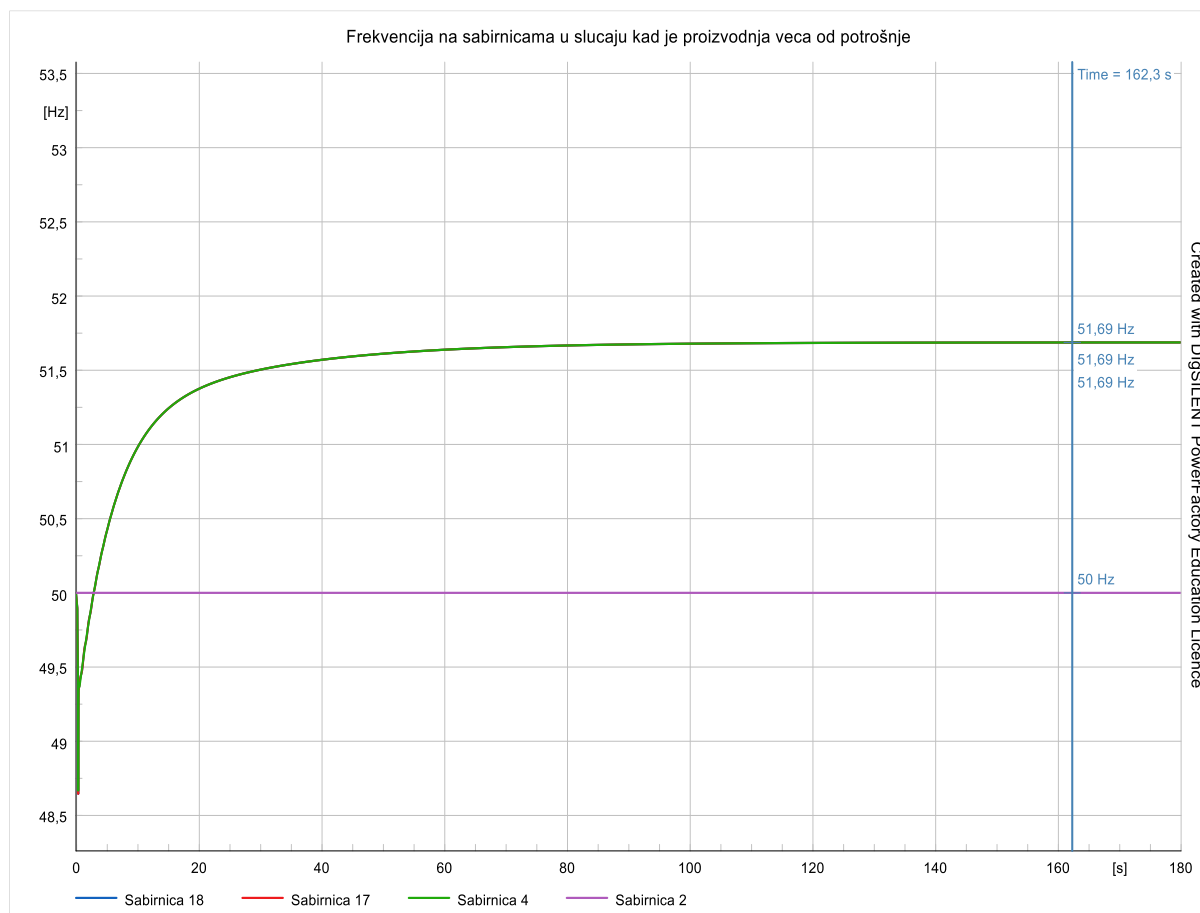
Tablica 4.12. Frekvencija na sabirnicama u različitim stanjima

Sabirnica	Početno stanje, f [Hz]	Minimum, f [Hz]	Ustaljeno stanje, f [Hz]
18	50	48.64488	51.68751
17	50	48.6453	51.68751
4	50	48.66757	51.68751
2	50	50	50



Slika 4.43. Frekvencija - prijelazno stanje

Nakon isključenja voda 3, sustav počinje oporavljati frekvenciju. Kako se napon stabilizira, frekvencija počinje rasti zbog činjenice da je proizvodnja veća od potrošnje. Ovaj rast frekvencije nastavlja sve dok se sustav ne ustali na novoj vrijednosti frekvencije, koja je viša od 50 Hz, što je prikazano na slici 4.44. Razlog povećanja frekvencije iznad nominalnih 50 Hz je višak proizvodnje u odnosu na potrošnju, što uzrokuje ubrzavanje generatora u distribuiranoj proizvodnji. Za sabirnicu 2, koja nije u otočnom pogonu, frekvencija ostaje stabilna i konstantna na 50 Hz tijekom cijelog promatranog perioda budući da sabirnica 2 nije direktno pogođena kratkim spojem i isključenjem voda 3, te ostaje povezana s glavnim dijelom elektroenergetskog sustava koji održava stabilnu frekvenciju.



Slika 4.44. Frekvencija - ustaljeno stanje

Ponašanje frekvencije nakon kratkog spoja i isključenja voda može se objasniti dinamikom rada generatora i opterećenja. U slučaju otočnog pogona, gdje određene sabirnice ostaju izolirane s lokalnom proizvodnjom, višak proizvodnje nad potrošnjom dovodi do povećanja frekvencije. Nasuprot tome, u stabilnoj mreži bez izoliranih dijelova, frekvencija se održava konstantnom na 50 Hz.

U zaključku, lokalna proizvodnja i potrošnja utječu na frekvenciju, a samim time i na stabilnost sustava. S druge strane, sabirnica 2, koja je ostala povezana s glavnim mrežnim sustavom, održava stabilnu frekvenciju, što potvrđuje važnost povezanosti s većim stabilnim mrežama za održavanje frekvencijske stabilnosti.

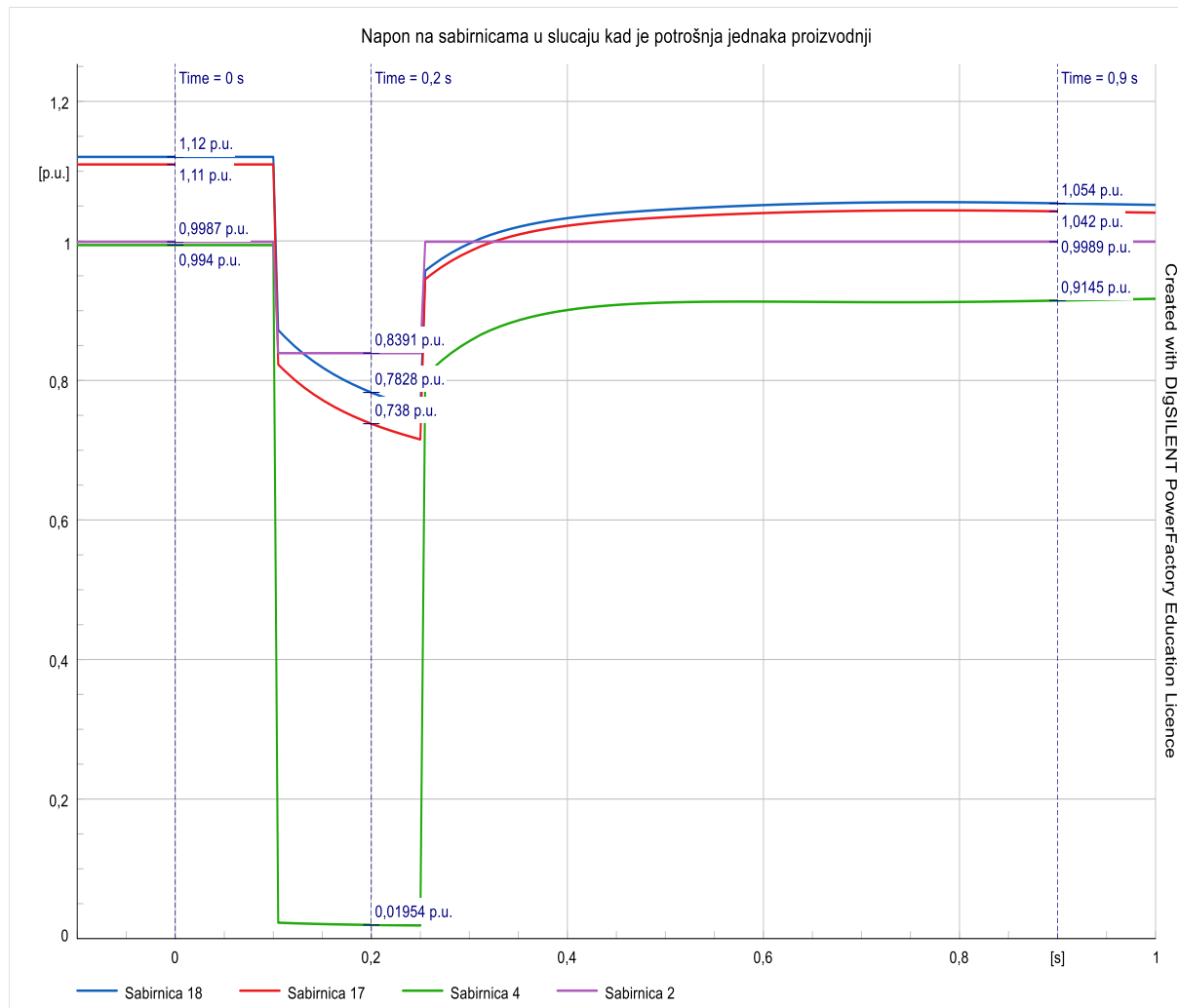
### 4.3.2. Proizvodnja jednaka potrošnji

U ovom slučaju, proizvodnja je jednaka potrošnji u velikom otoku. Ukupna potrošnja na sabirnicama koje su u otočnom pogonu, iznosi 2,235 MW radne snage i 1,59 MVar jalove snage. Dakle, proizvodnja je postavljena na 2,035 MW radne snage i 1,59 MVar jalove snage, kao što je prikazano na slici 4.45. To su podaci za DG1. DG4 je postavljen podacima zadanim u tablici 4.2. Kada se zbroji radna snaga DG1 i DG4 ukupna radna snaga je 2,235 MW što je jednako ukupnoj snazi potrošnje u otočnom pogonu. Dok su svi ostali generatori isključeni, distribuirana proizvodnja DG4 i DG1 preuzimaju cjelokupno opterećenje i osiguravaju napajanje za sabirnice u otočnom pogonu. Ovaj scenarij omogućava detaljno praćenje kako ravnoteža između proizvodnje i potrošnje utječe na električne veličine kao što su napon, frekvencija, te radna i jalova snaga.

The screenshot displays the configuration window for a Synchronous Machine in a software environment. The window title is 'Synchronous Machine - Grid\DG1.ElmSym\*'. On the left, there is a navigation pane with categories like 'Basic Data', 'Load Flow', 'Short-Circuit', 'Quasi-Dynamic Simulation', 'Protection', etc. The 'Dispatch' tab is active, showing various control parameters. A 'Local Controller' dropdown is set to 'Const. cosphi'. Below, there are checkboxes for 'Spinning if circuit-breaker is open', 'Reference Machine', and 'Out of service when active power is zero'. Two dropdown menus for 'External Secondary Controller' and 'External Station Controller' are also present. The 'Dispatch' section includes input fields for 'Input Mode' (set to 'P, Q'), 'Active Power' (2,035 MW), 'Reactive Power' (1,59 Mvar), 'Voltage' (1 p.u.), 'Angle' (0 deg), and 'Prim. Frequency Bias' (0,1 MW/Hz). To the right, the 'Actual Dispatch' section shows a summary of active values: Active Power (act.) 2,035 MW, Reactive Power (act.) 1,59 Mvar, Apparent Power (act.) 2,582504 MVA, and Power Factor (act.) 0,787995 ind. Buttons for 'OK', 'Cancel', 'Figure', and 'Jump to ...' are located on the right side of the window.

Slika 4.45. Podaci DG1 u slučaju kad je proizvodnja jednaka potrošnji

Na slici 4.46. prikazan je graf koji opisuje promjene napona u elektroenergetskom sustavu tijekom kratkog spoja i nakon isključenja voda. Početno stanje svih sabirnica je stabilno. Međutim, u trenutku 0,1 sekundi dolazi do trolejnog kratkog spoja, što uzrokuje značajne promjene u naponskim vrijednostima. Najveći pad napona događa se na sabirnici 4, koja je spojena s vodom 3, gdje se kratki spoj dogodio. Napon na sabirnici 4 pada gotovo na nulu. Što se tiče ostalih sabirnica, na njima nije toliki pad napona, ali se također bilježi nagli pad u trenutku kratkog spoja, koji se nastavlja sve do trenutka isključenja voda 3. Vrijednosti su prikazane u tablici 4.13.



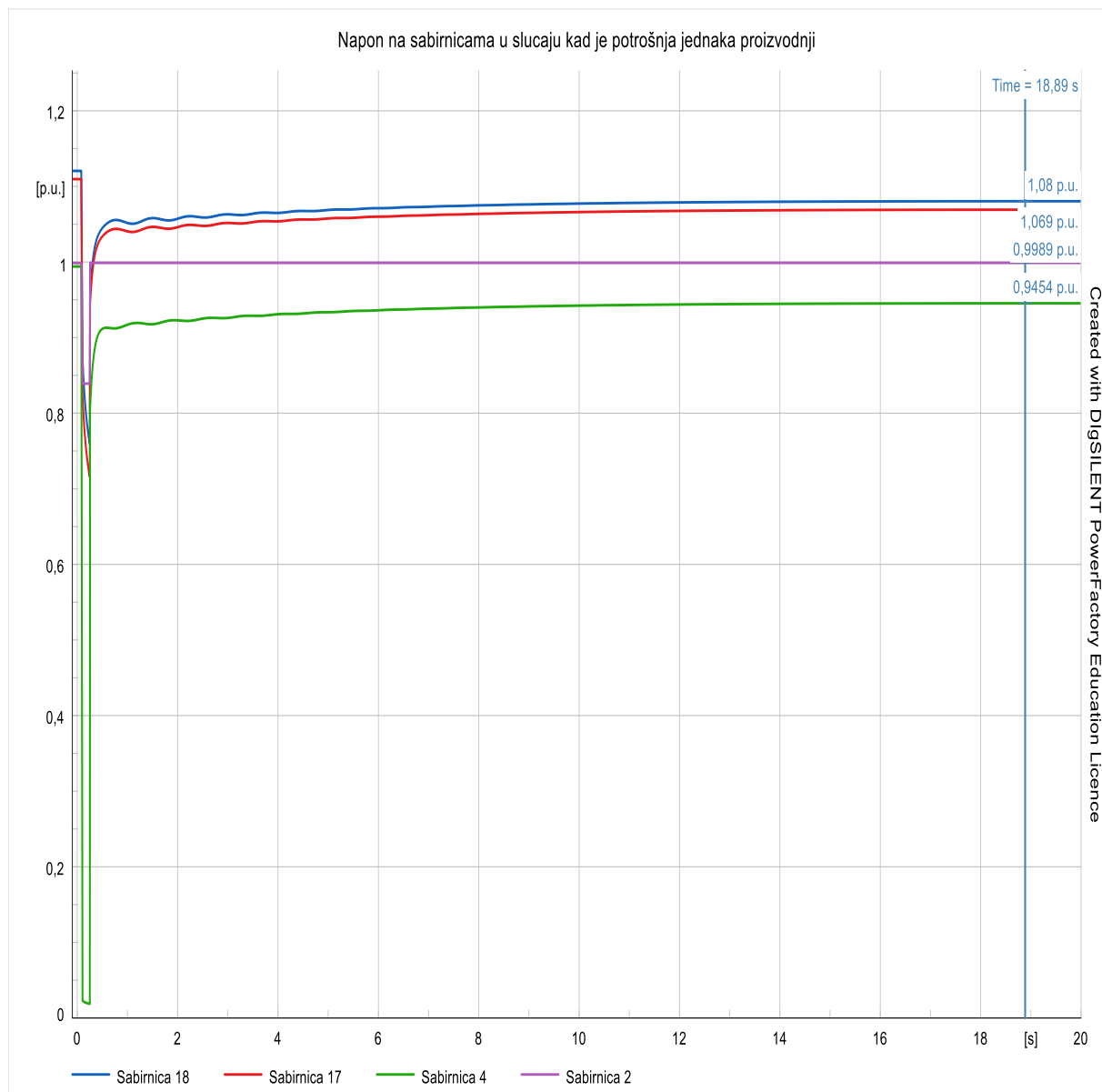
Slika 4.46. Napon - prijelazno stanje

Kod sabirnice 2, situacija je drugačija. Iako i ona bilježi pad napona u trenutku kratkog spoja, taj pad nije tako drastičan kao na ostalim sabirnicama, a napon zadržava vrijednost na koju je pala. To je zbog stabilnije mrežne konfiguracije i upravljanja naponom na sabirnici 2, koja omogućava brže vraćanje napona u stabilno stanje.

Tablica 4.13. Naponi na sabirnicama u različitim stanjima

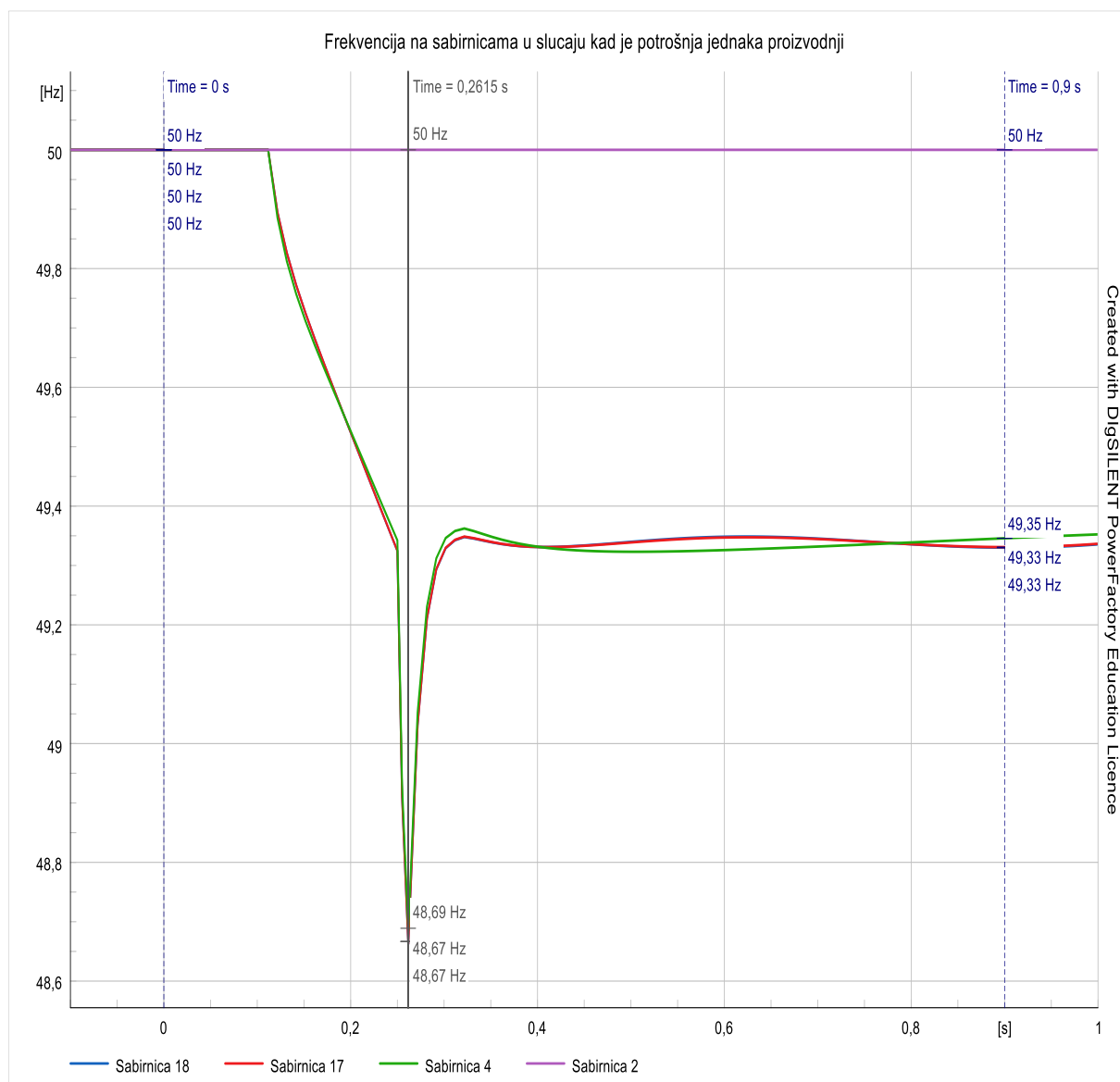
Sabirnica	Početno stanje, U [p.u.]	Prijelazno stanje, U [p.u.]	Ustaljeno stanje, U [p.u.]
18	1.12047	0.75895	1.08037
17	1.10963	0.71542	1.06913
4	0.99403	0.01876	0.94534
2	0.99865	0.83910	0.99887

U trenutku kada se vod 3 isključi, naponi na ostalim sabirnicama se također vraćaju u početno stanje. Na sabirnicama koje se nalaze u otočnom pogonu, napon počinje rasti nakon isključenja voda 3, te se ustali na vrijednostima koje su prikazane na slici 4.47. Te vrijednosti su unutar dozvoljene granice odstupanja napona od  $\pm 10\%$ .



Slika 4.47. Napon - ustaljeno stanje

Na slici 4.48. vidljivo je početno stanje frekvencije koje je jednako nazivnoj frekvenciji od 50 Hz. U trenutku kratkog spoja, koji se događa u 0,1 sekundi, frekvencija na sabirnicama u otočnom pogonu pada. Ovaj pad frekvencije rezultat je naglog povećanja opterećenja uslijed kratkog spoja, što uzrokuje privremeno smanjenje brzine vrtnje generatora i posljedično smanjenje frekvencije. Za razliku od sabirnica u otočnom pogonu, frekvencija na sabirnici 2 ostaje nepromijenjena jer nije direktno pogođena kratkim spojem i ostaje povezana s ostatkom mreže koja stabilizira njenu frekvenciju. U trenutku isključenja, koji se događa u 0,25 sekundi, frekvencija na sabirnicama u otočnom pogonu postiže svoj minimum od 48,67 Hz. Nakon ovog trenutka, frekvencija počinje rasti kako se sustav pokušava vratiti u ravnotežu. Oporavak frekvencije nakon prekida rezultat je smanjenja opterećenja i djelovanja regulacijskih sustava generatora koji nastoje vratiti frekvenciju na nominalnu vrijednost. Vrijednosti frekvencije su prikazane u tablici 4.14.

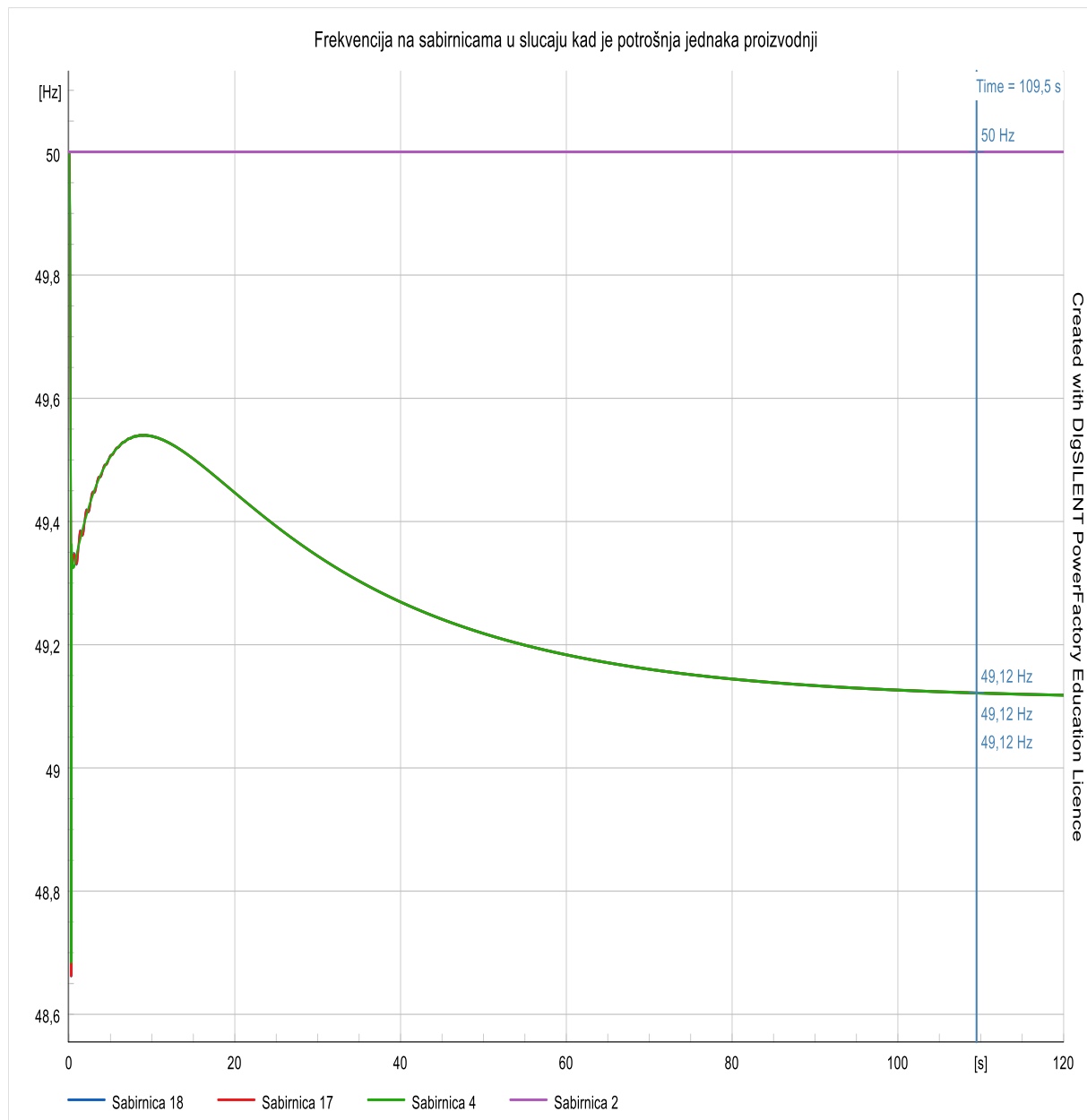


Slika 4.48. Frekvencija - prijelazno stanje



Tablica 4.14. Frekvencija na sabirnicama u različitim stanjima

Sabirnica	Početno stanje, f [Hz]	Minimum, f [Hz]	Ustaljeno stanje, f [Hz]
18	50	48.66183	49.11811
17	50	48.66225	49.11811
4	50	48.6843	49.11811
2	50	50	50



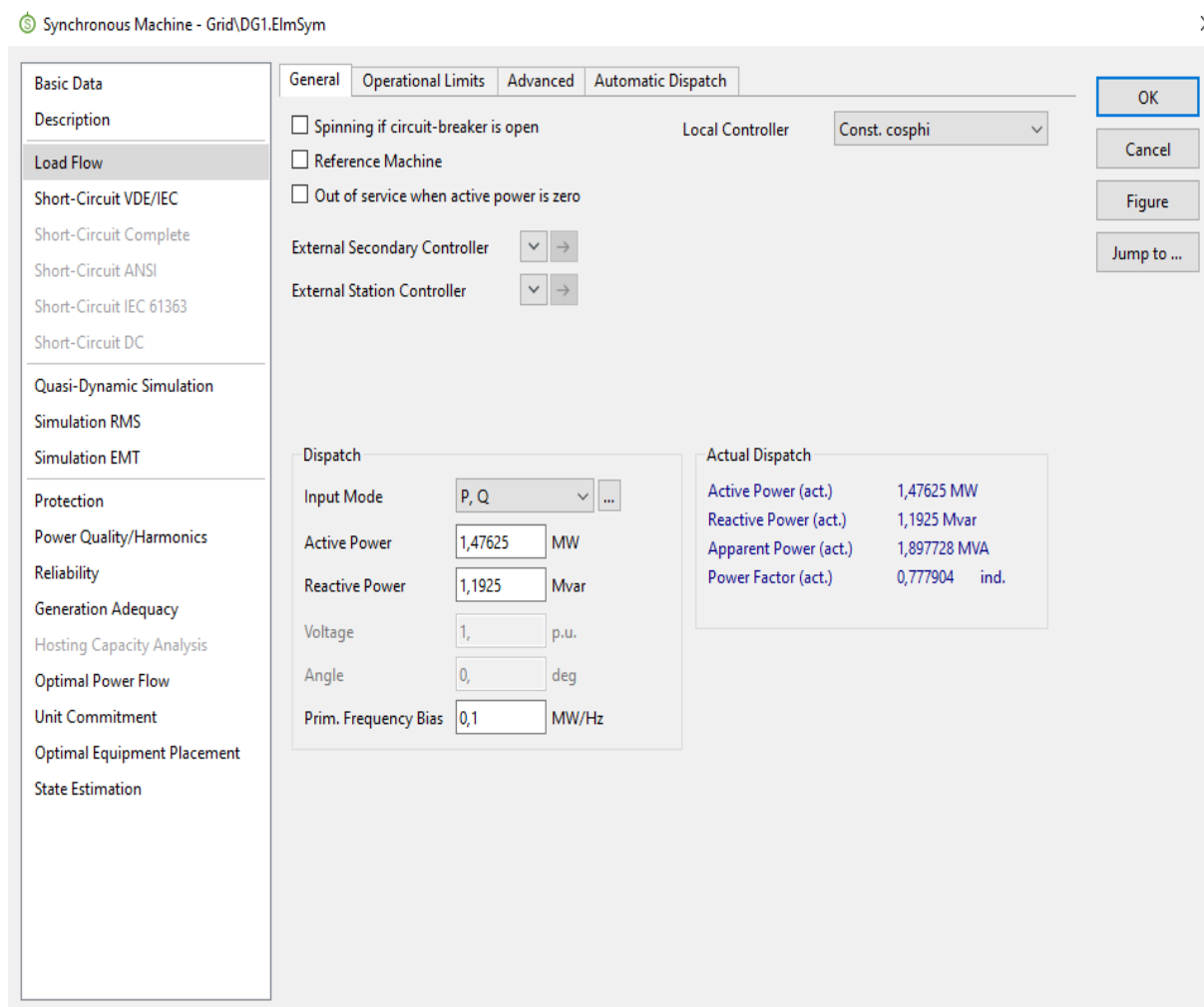
Slika 4.49. Frekvencija - ustaljeno stanje

Krivulja frekvencije se postepeno stabilizira na vrijednosti od 49,12 Hz, kako je vidljivo na slici 4.49. Ova stabilizirana vrijednost je nešto niža od nazivnih 50 Hz, što ukazuje na postojanje nekih trajnih dinamičkih efekata i gubitaka u sustavu. Naime, iako je proizvodnja jednaka potrošnji, sustav je doživio kratkotrajni poremećaj koji je izazvao oscilacije i konačno smanjenje stabilizirane frekvencije ispod nazivnog nivoa. Ovaj pad frekvencije ispod nazivnih 50 Hz također

može biti rezultat inherentnih karakteristika regulacijskih sustava generatora koji možda nisu dovoljno brzi ili osjetljivi da u potpunosti vrate frekvenciju na točnu nominalnu vrijednost u uvjetima naglih promjena opterećenja.

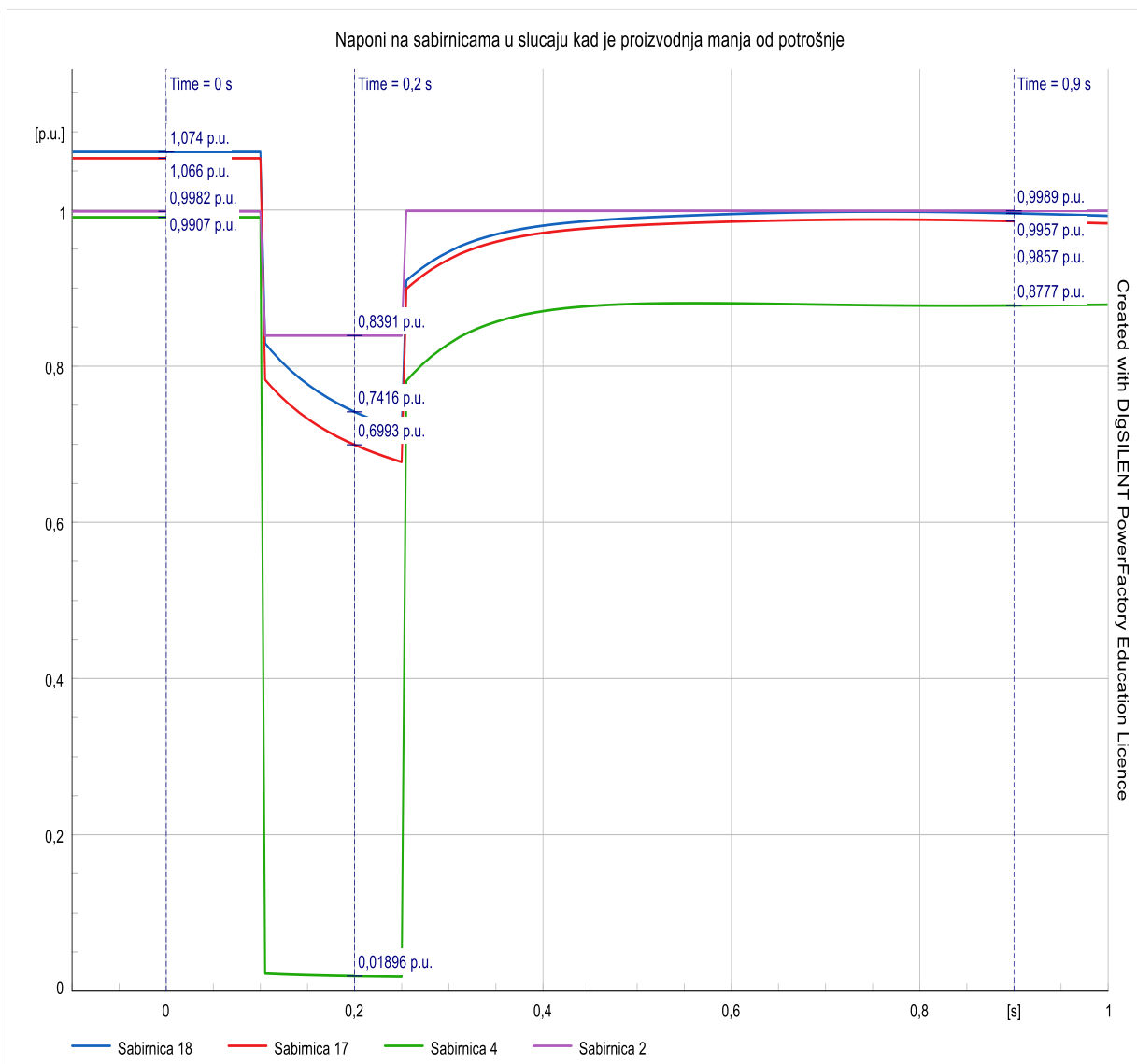
### 4.3.3. Proizvodnja manja od potrošnje

U ovom slučaju, proizvodnja je manja od potrošnje u velikom otoku. Ukupna potrošnja na sabirnicama koje su u otočnom pogonu, iznosi 2,235 MW radne snage i 1,59 MVar jalove snage. U scenariju u kojem je proizvodnja manja od potrošnje, snaga je smanjena za 25%. Dakle, proizvodnja je postavljena na 1,47625 MW radne snage i 1,1925 MVar jalove snage, kao što je prikazano na slici 4.50. To su podaci za DG1. DG4 je postavljen podacima zadanim u tablici 4.2. Kada se zbroji radna snaga DG1 i DG4 ukupna radna snaga je 1,67625 MW što je točno 25% manja snaga od ukupnog opterećenja otočnog pogona.



Slika 4.50. Podaci DG1 u slučaju kad je proizvodnja manja od potrošnje

Na slici 4.51. prikazano je početno i prijelazno stanje napona na sabirnicama 18, 17, 4 i 2. Početno stanje pokazuje nešto viši napon na sabirnicama 18 i 17, ali unutar dopuštenih granica. Na sabirnicama 4 i 2, napon je blizu nominalne vrijednosti od 1 p.u. U trenutku kratkog spoja, koji se događa u 0,1 sekundi, napon na svim sabirnicama počinje padati. Na sabirnici 4 napon pada gotovo na nulu jer je direktno povezana s vodom 3 na kojem se desi kratki spoj. Na ostalim sabirnicama u otočnom pogonu, poput sabirnica 18 i 17, napon također pada, ali ne tako drastično kao na sabirnici 4. Ove sabirnice bilježe pad napona do trenutka isključenja voda 3, nakon čega se napon počinje oporavljati. Na sabirnici 2, koja nije dio otočnog pogona, napon pada u trenutku kratkog spoja, ali ostaje fiksiran na toj nižoj vrijednosti sve do trenutka isključenja voda. U trenutku isključenja voda, napon na sabirnici 2 se vraća u početno stanje zbog stabilizacijskih mehanizama mreže koja upravlja naponom na toj sabirnici.



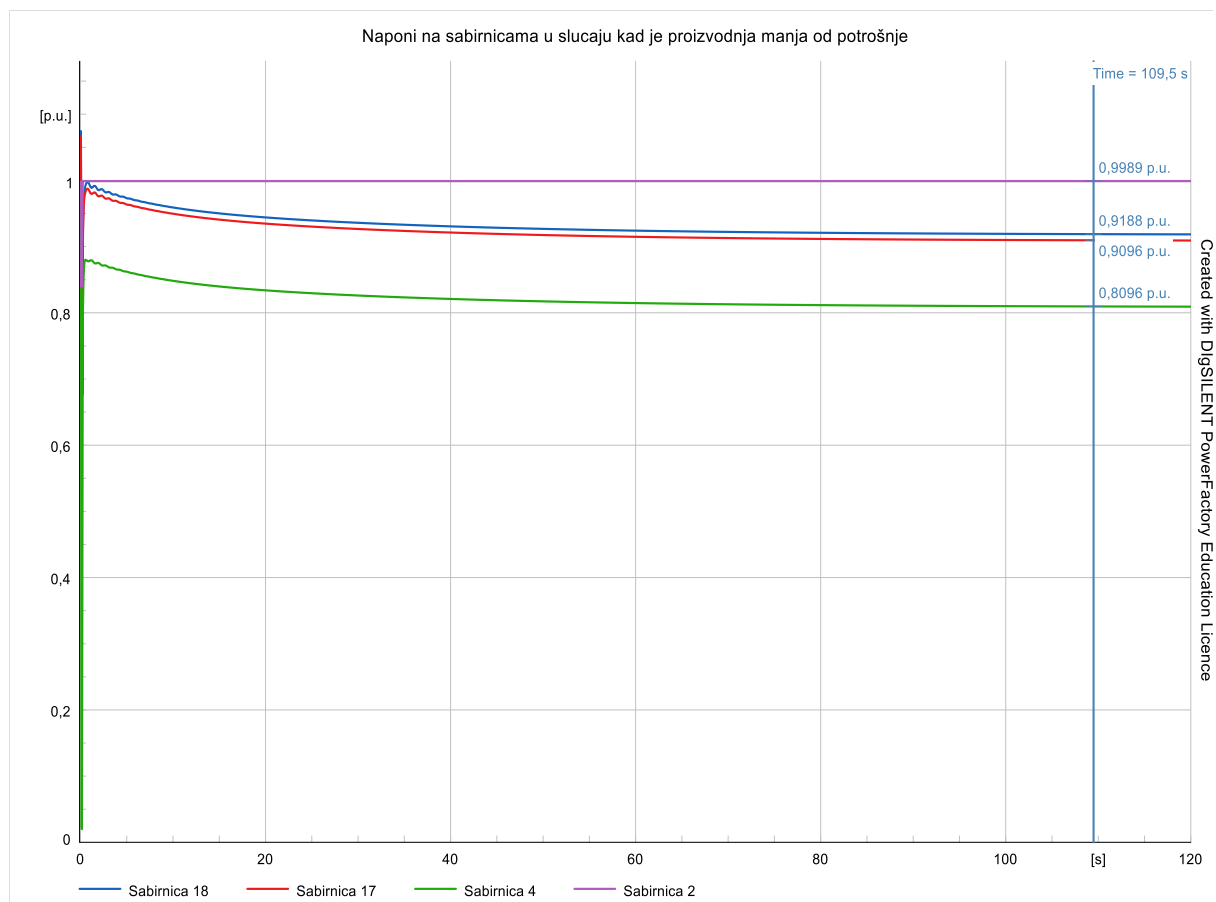
Slika 4.51. Napon - prijelazno stanje

Ustaljeno stanje napona prikazano je na slici 4.52. Nakon početnog pada i prijelaznih oscilacija, naponi na većini sabirnica se stabiliziraju unutar normalnih granica. Međutim, napon na sabirnici 4 ostaje niži nego na ostalim sabirnicama. Ovo je očekivano s obzirom na to da je sabirnica 4 najudaljenija od DG1, što znači da osjeća veći pad napona zbog povećanog otpora i gubitaka na vodovima između generatora i potrošača. Vrijednosti napona u različitim stanjima prikazane su u tablici 4.15.

Tablica 4.15. Naponi na sabirnicama u različitim stanjima

Sabirnica	Početno stanje, U [p.u.]	Prijelazno stanje, U [p.u.]	Ustaljeno stanje, U [p.u.]
18	1.07440	0.71820	0.91848
17	1.06621	0.67721	0.90920
4	0.99070	0.01819	0.80928
2	0.99823	0.83914	0.99890

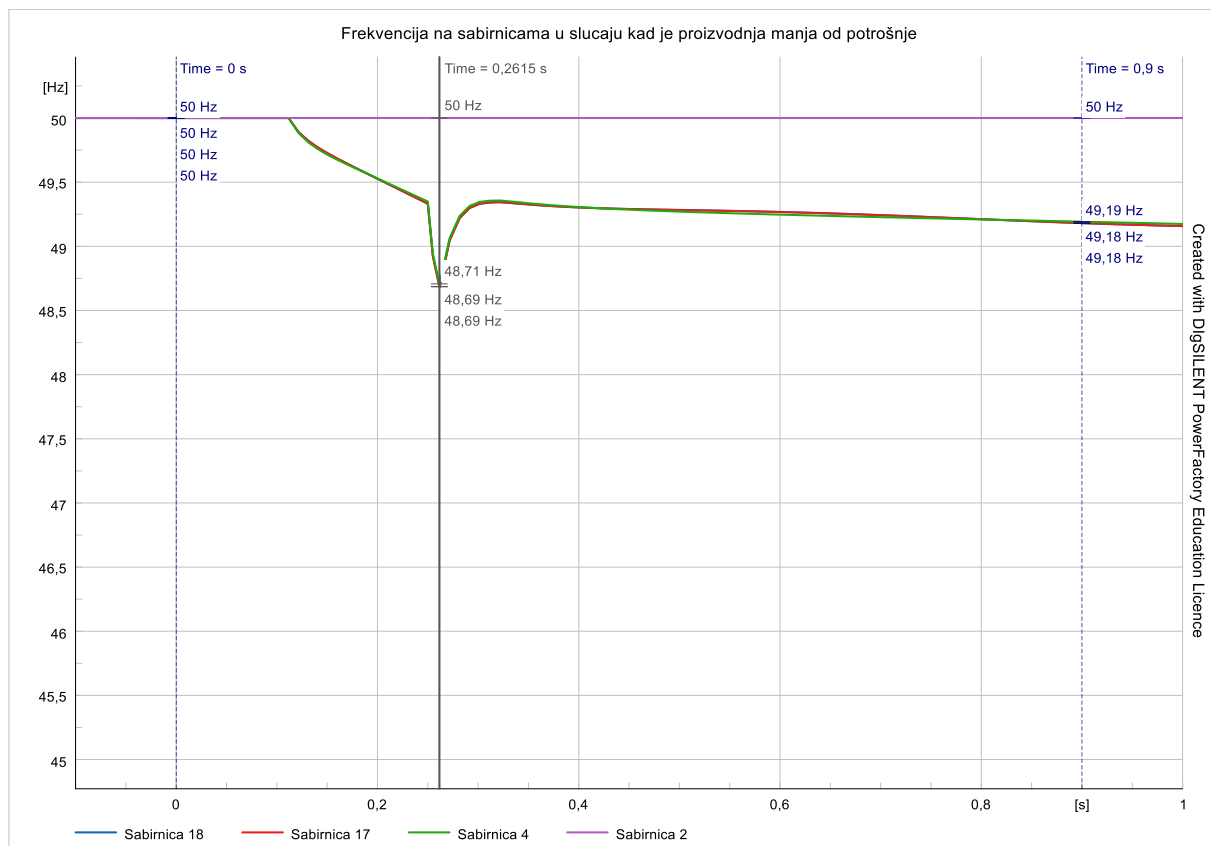
Također je uočljivo da je ukupni napon u sustavu niži nego u početnom stanju. To je direktan rezultat situacije u kojoj je proizvodnja manja od potrošnje. Kada je proizvodnja manja od potrošnje, postoji manjak snage u sustavu, što uzrokuje pad napona. Ovaj deficit se može uočiti na svim sabirnicama, ali je najizraženiji na onim sabirnicama koje su udaljenije od izvora proizvodnje, kao što je slučaj sa sabirnicom 4.



Slika 4.52. Napon - ustaljeno stanje

Na kraju, ovakvo stanje ukazuje na potrebu za pažljivim upravljanjem opterećenjem i proizvodnjom kako bi se osigurala stabilnost i pouzdanost elektroenergetskog sustava, posebno u scenarijima gdje dolazi do značajnih odstupanja između proizvodnje i potrošnje.

Frekvencija je u početnom stanju 50 Hz, što je prikazano na slici 4.53. U trenutku kratkog spoja, frekvencija počinje padati zbog povećane potrošnje u odnosu na proizvodnju. Ovaj pad frekvencije nastavlja se sve dok se ne ustali na vrijednosti od 45,32 Hz. Ovakav pad frekvencije je direktan rezultat situacije u kojoj je proizvodnja manja od potrošnje u otočnom pogonu. U trenutku kratkog spoja, dolazi do naglog povećanja opterećenja, što uzrokuje trenutno smanjenje frekvencije. Nakon što se vod 3 isključi, dio mreže prelazi u otočni pogon. U ovom stanju, zbog nedovoljne proizvodnje da zadovolji potrošnju, frekvencija i dalje pada. Ova situacija se nastavlja sve dok se ne postigne novo ravnotežno stanje pri frekvenciji od 45,32 Hz. Takva frekvencija je značajno ispod dozvoljene granice odstupanja od  $\pm 1\%$  oko nominalne vrijednosti od 50 Hz. Prema standardima, frekvencija unutar elektroenergetskog sustava mora biti održavana unutar tih granica kako bi se osigurala stabilnost i pouzdanost sustava. Frekvencija od 45,32 Hz predstavlja ozbiljno odstupanje, što ukazuje na to da je sustav u kritičnom stanju. Vrijednosti frekvencija prikazane su u tablici 4.16.



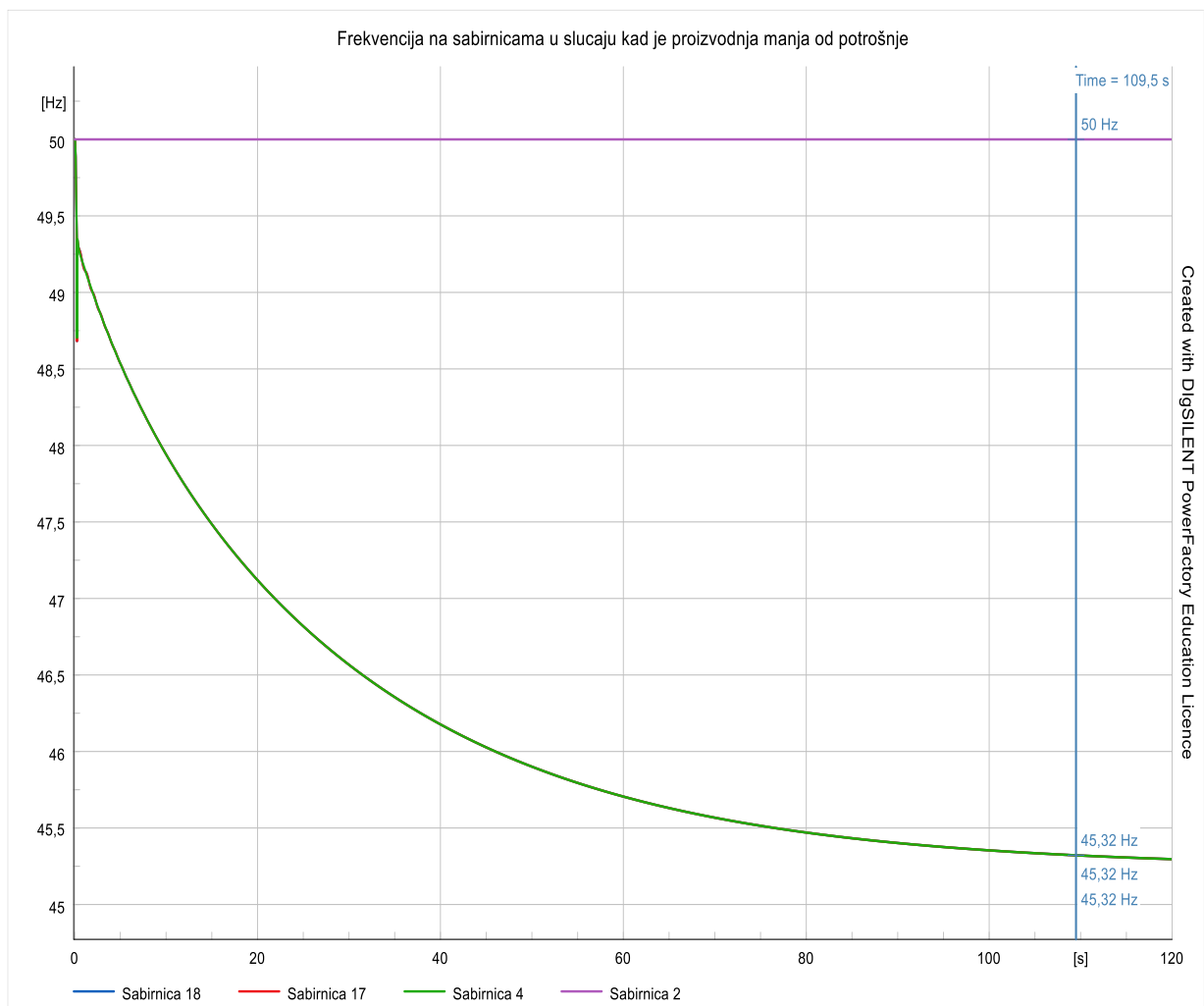
Slika 4.53. Frekvencija - prijelazno stanje

Frekvencija ispod dozvoljene granice može imati brojne negativne posljedice, uključujući smanjenu učinkovitost i pouzdanost električne opreme, moguće oštećenje osjetljivih uređaja, te povećanu opasnost od nestabilnosti sustava. U ovakvom scenariju, sustav nije održiv bez intervencija kao što su smanjenje opterećenja ili povećanje proizvodnje.

Zaključno, prikaz na slici 4.54. jasno ilustrira potrebu za pažljivim balansiranjem proizvodnje i potrošnje unutar otočnog pogona kako bi se održala stabilna frekvencija. Bez adekvatnih mjera za balansiranje, sustav može brzo postati nestabilan, što naglašava važnost kontinuiranog praćenja i upravljanja frekvencijom u realnom vremenu.

Tablica 4.16. Frekvencija na sabirnicama u različitim stanjima

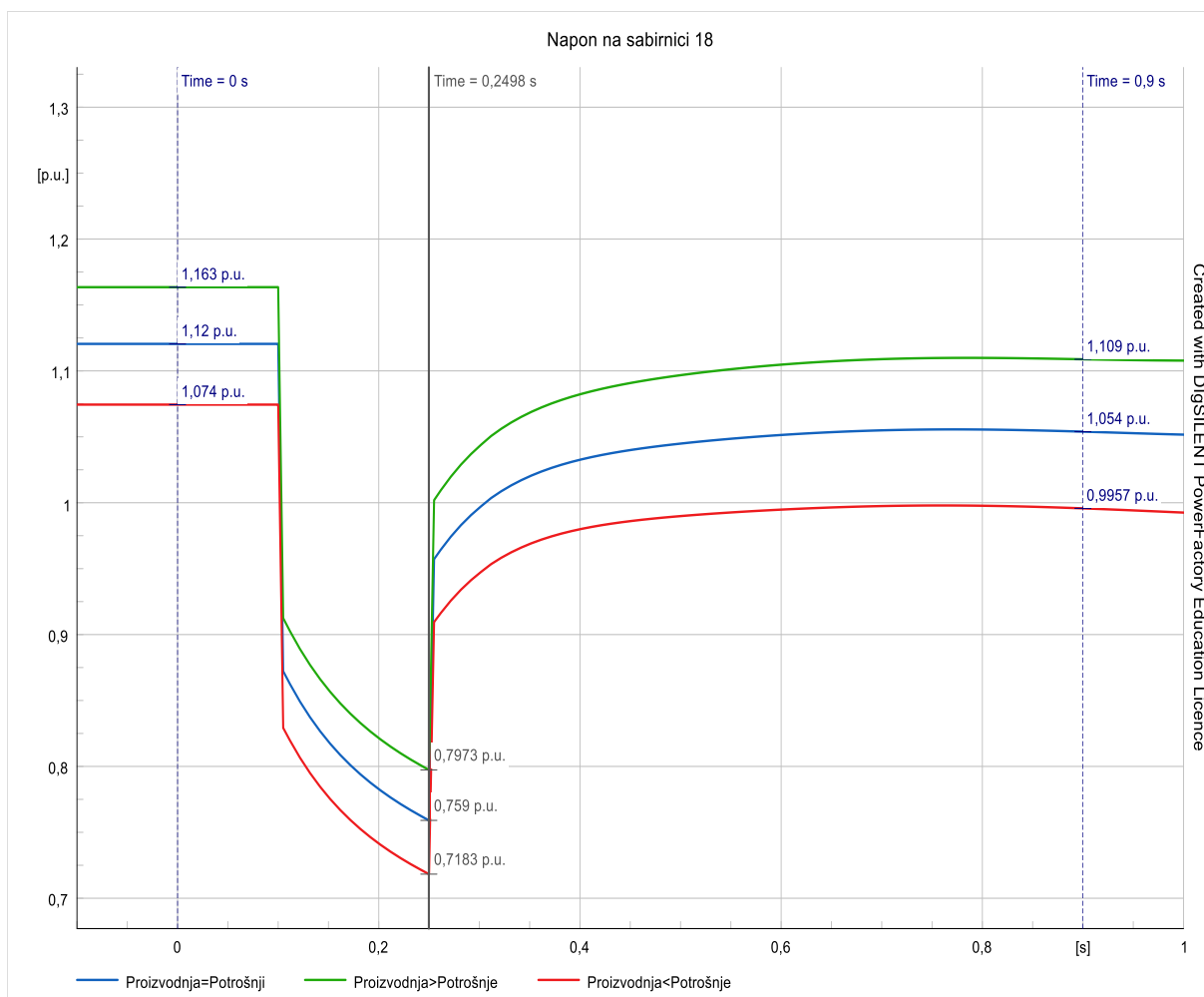
Sabirnica	Početno stanje, f [Hz]	Prijelazno stanje, f [Hz]	Ustaljeno stanje, f [Hz]
18	49.99997	49.33207	45.29639
17	49.99998	49.33244	45.29639
4	50	49.34944	45.29638
2	50	50	50



Slika 4.54. Frekvencija - ustaljeno stanje

#### 4.3.4. Usporedba rezultata po sabirnicama

Rezultati analize su prikazani za sabirnice 18, 4 i 2, te ponašanje mreže i distribuirane proizvodnje DG1 i DG4. Sabirnice su odabrane zbog njihovih specifičnih lokacija i uloga u elektroenergetskom sustavu, što omogućava detaljno praćenje različitih aspekata mrežnog ponašanja i reakcija na promjene u sustavu. Sabirnica 18 je najbliža distribuiranoj proizvodnji DG1. Njena blizina izvoru proizvodnje omogućava praćenje neposrednog utjecaja DG1 na mrežu, uključujući promjene u naponu, frekvenciji i tokovima snage. Ova sabirnica je ključna za razumijevanje kako lokalna proizvodnja utječe na stabilnost i rad mreže u neposrednoj blizini izvora. Sabirnica 4 je najudaljenija od distribuirane proizvodnje DG2. Praćenjem ove sabirnice moguće je analizirati kako se promjene uvjetovane DG1 prenose kroz mrežu do njezinih udaljenih dijelova. Ovo omogućava razumijevanje dinamike napona i frekvencije na krajnjim točkama mreže, te kako udaljenost od izvora proizvodnje utječe na stabilnost i kvalitetu napajanja. Sabirnica 2 je uzeta kao točka promatranja izvan otočnog pogona. Ona je povezana s glavnom mrežom i nije izravno pod utjecajem lokalne distribuirane proizvodnje DG2.

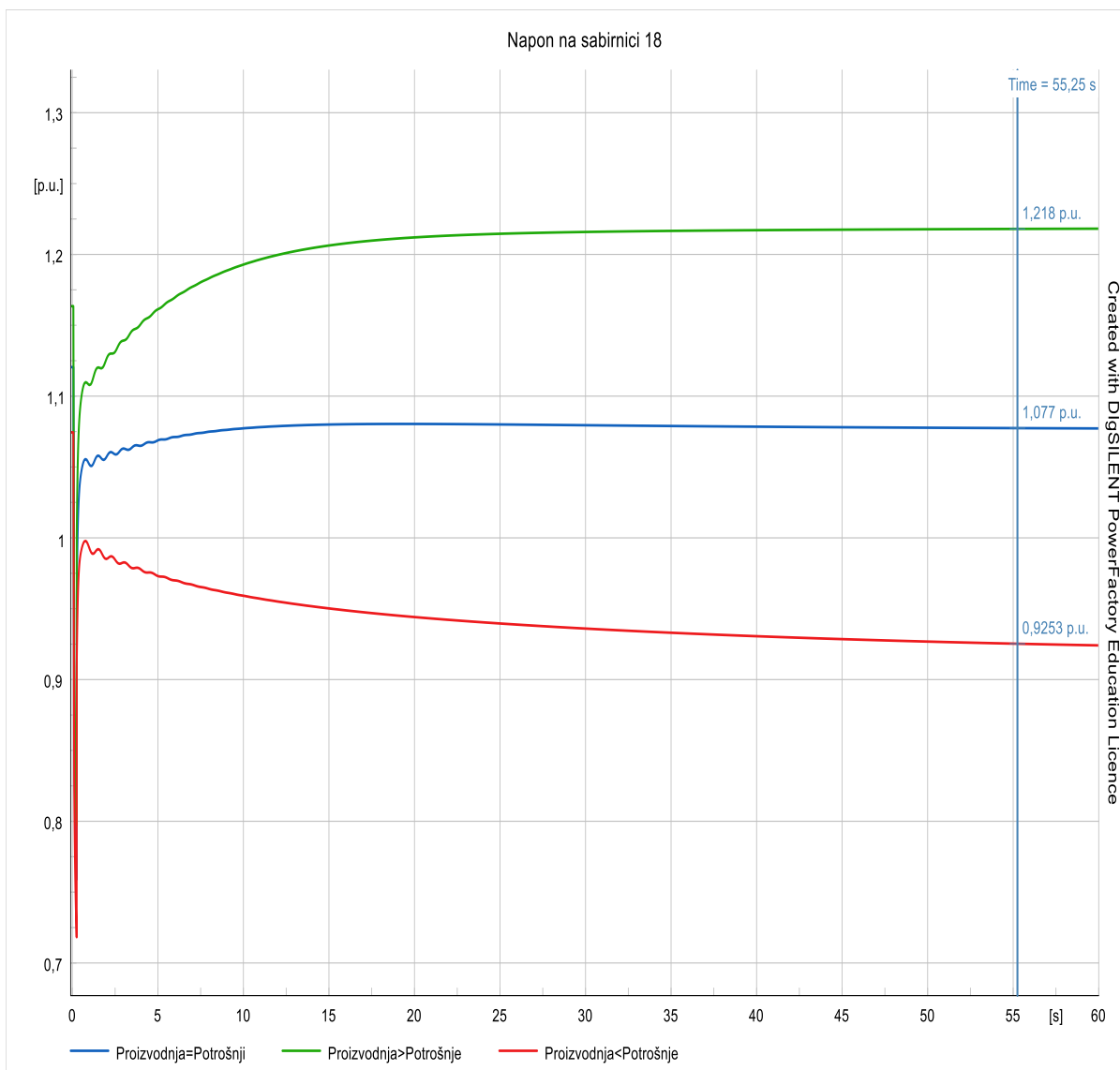


Slika 4.55. Sabirnica 18 – napon – prijelazno stanje

Praćenje sabirnice 2 omogućava analizu ponašanja glavne mreže i utjecaja lokalnih događaja u otočnom pogonu na ostatak sustava. To uključuje promjene u naponu i frekvenciji koje mogu nastati zbog poremećaja poput kratkih spojeva ili isključenja voda.

Promatranje ovih sabirnica omogućava sveobuhvatno razumijevanje ponašanja mreže i DG1 u različitim scenarijima, uključujući kratke spojeve, isključenje voda i promjene u omjeru proizvodnje i potrošnje, a ova analiza pruža ključne uvide u stabilnost i učinkovitost rada elektroenergetskog sustava, te omogućava identificiranje kritičnih točaka i potrebnih mjera za osiguranje pouzdanog i stabilnog napajanja.

Slika 4.55. prikazuje napon na sabirnici 18 u prijelaznom stanju. U početnom stanju, napon je iznad 1 p.u. neovisno o tome je li proizvodnja veća, manja ili jednaka potrošnji. To se događa jer je sabirnica 18 najbliža DG1 koji ima veliku proizvodnju.

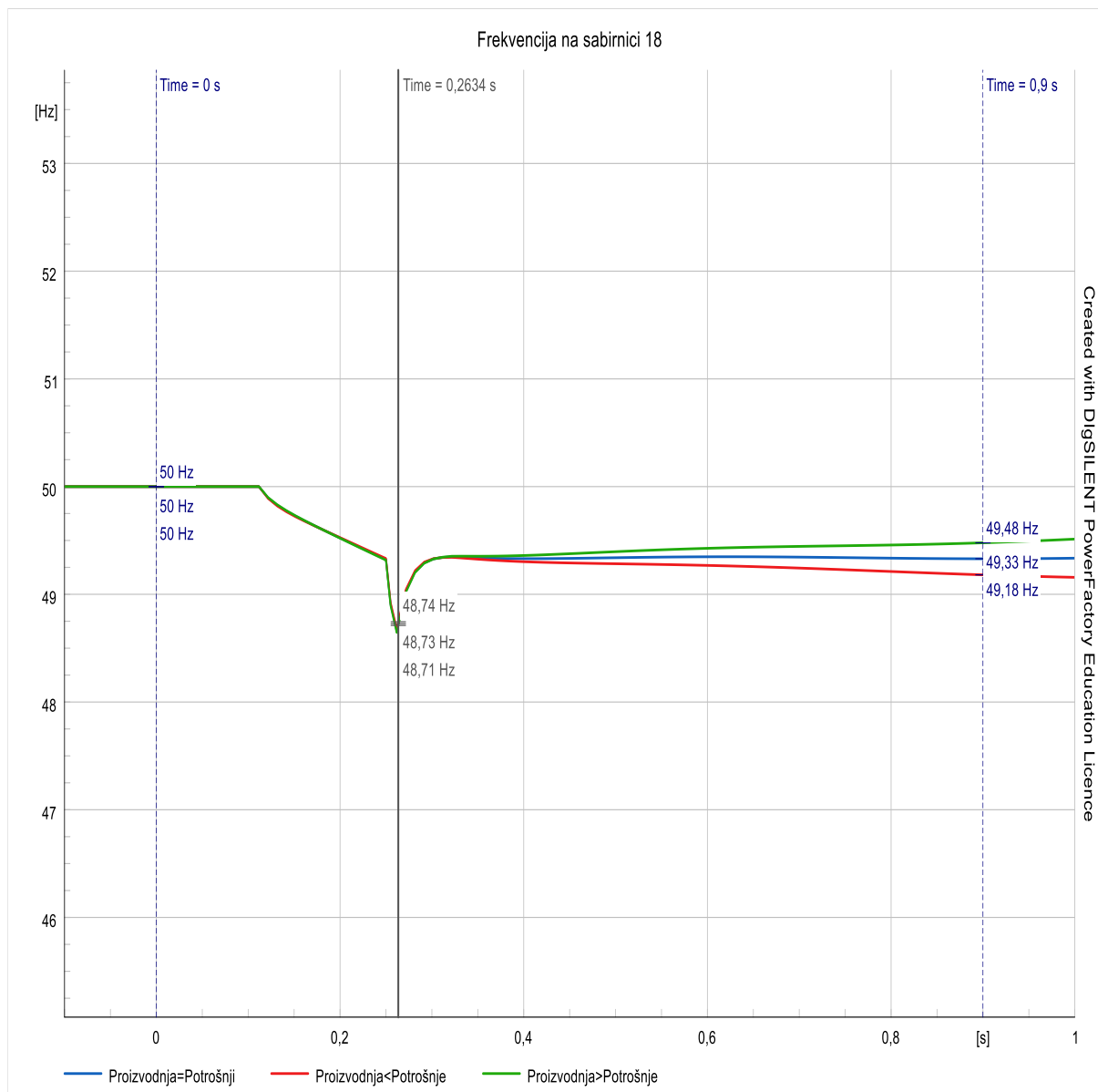


Slika 4.56. Sabirnica 18 – napon – ustaljeno stanje



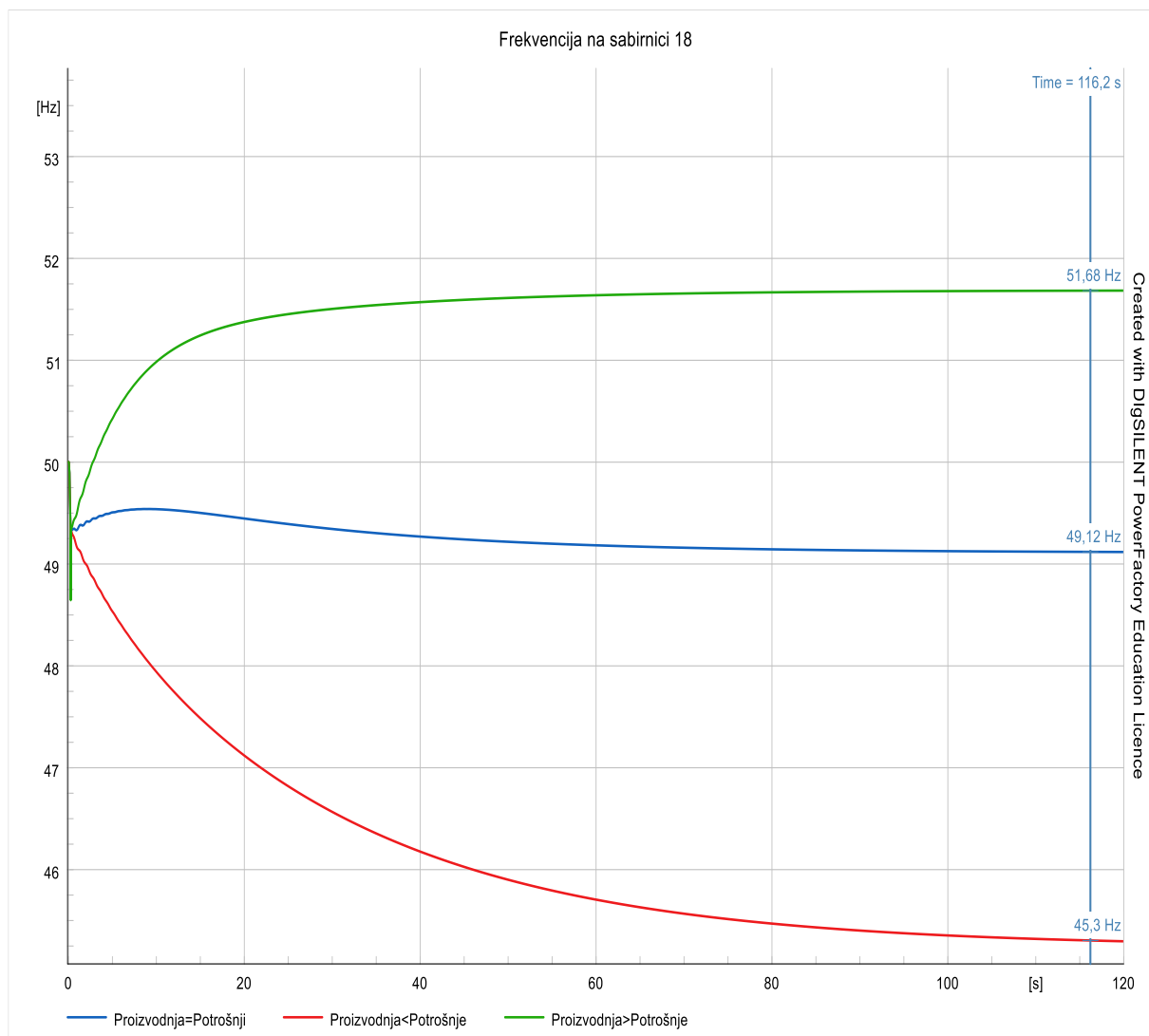
Zbog toga, čak i male promjene u proizvodnji značajno utječu na napon na toj sabirnici. Kada je proizvodnja smanjena za 25%, napon na sabirnici 18 je također snižen. S druge strane, kada je proizvodnja povećana za 25%, napon je proporcionalno povećan. U trenutku kratkog spoja, napon naglo padne zbog iznenadnog povećanja opterećenja i pada u stabilnost sustava. Nakon tog naglog pada, napon nastavlja polako padati sve do trenutka isključenja voda 3.

Nakon što se vod 3 isključi, dolazi do naglog skoka napona jer se sustav pokušava vratiti u normalno stanje. Napon tada nastavlja rasti sve dok se ne ustali, kao što je prikazano na slici 4.56. Na toj slici je vidljivo i lagano titranje napona prije nego se konačno stabilizira. Ovo titranje je rezultat dinamičkog odgovora sustava na promjenu uvjeta, kao i pokušaja balansiranja između proizvodnje i potrošnje.



Slika 4.57. Sabirnica 18 – frekvencija prijelazno stanje

U konačnom stanju, napon se ustali na vrijednosti koja ovisi o balansu proizvodnje i potrošnje. Ako je proizvodnja manja od potrošnje, ustaljeni napon će biti niži, a ako je proizvodnja veća, ustaljeni napon će biti viši. Vrijednosti ustaljenog napona su unutar granica dozvoljenog odstupanja, što pokazuje da sustav može postići stabilnost nakon početnih oscilacija i prilagodbi. Ovaj scenarij jasno ilustrira kako promjene u proizvodnji i potrošnji utječu na napon na sabirnicama, posebno onima koje su najbliže izvorima proizvodnje. Također, prikazuje važnost adekvatnog upravljanja i balansiranja unutar elektroenergetskog sustava kako bi se održala stabilnost napona i spriječile neželjene oscilacije.

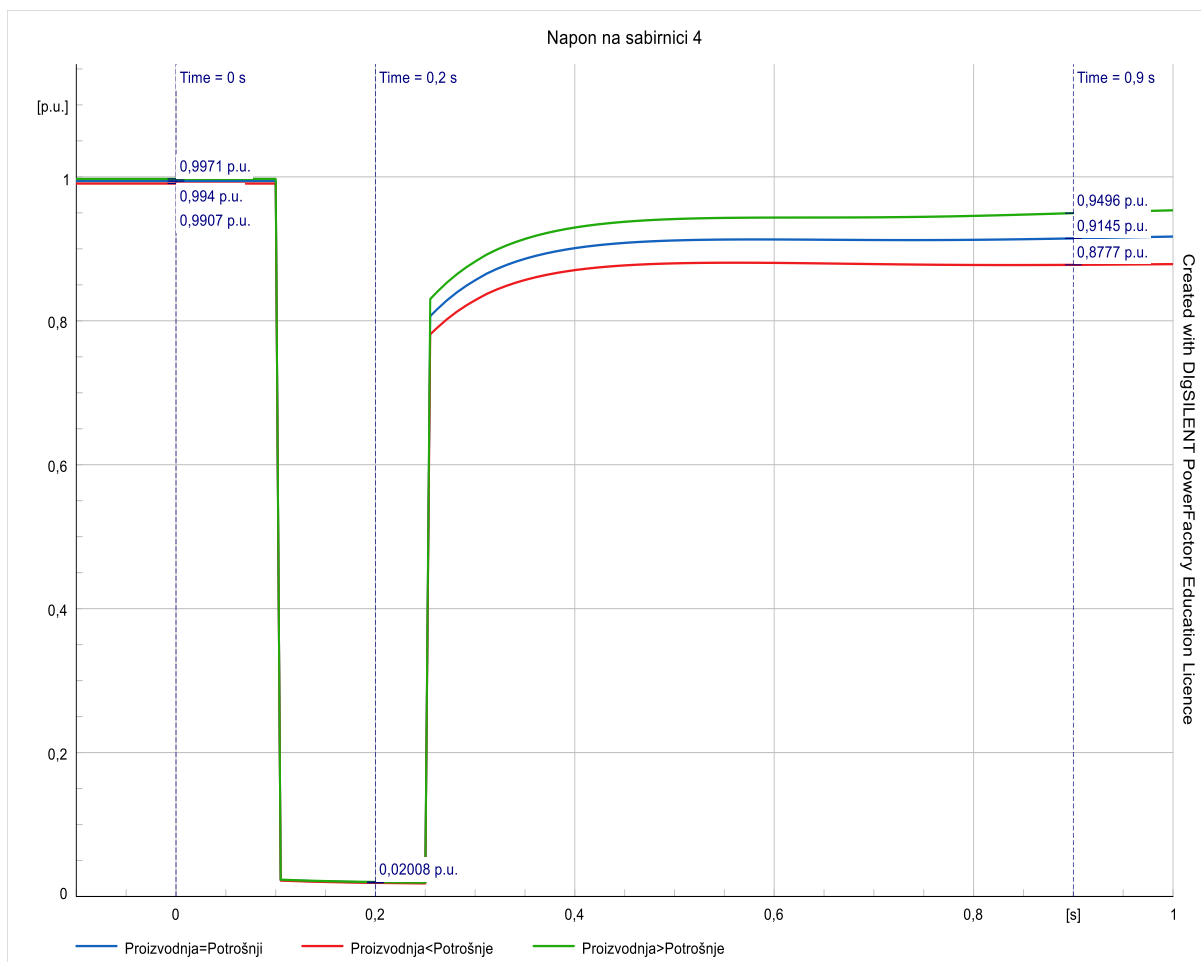


Slika 4.58. Sabirnica 18 – frekvencija – ustaljeno stanje

Frekvencija je u početnom stanju 50 Hz, što je nominalna vrijednost. Kada se dogodi kratki spoj, frekvencija počinje padati zbog naglog porasta opterećenja u sustavu. Nakon što se isključi vod 3, frekvencija pada još jače, kako je prikazano na slici 4.57. Taj dodatni pad frekvencije nakon isključenja voda 3 je rezultat iznenadnog smanjenja ukupne proizvodnje koja je bila u mogućnosti

opskrbljivati sustav. Međutim, taj pad ne traje dugo. Nakon snažnog pada, frekvencija počinje rasti dok se sustav pokušava stabilizirati i uspostaviti novi ravnotežni režim rada.

Konačna vrijednost na kojoj se frekvencija ustali ovisi o odnosu proizvodnje i potrošnje u sustavu. U slučaju kada je proizvodnja veća od potrošnje, frekvencija se ustali na višoj vrijednosti. Konkretno, kada je proizvodnja veća za 25%, frekvencija iznosi 51,68 Hz. Ako je proizvodnja jednaka potrošnji, frekvencija se ustali na 49,12 Hz. Kada je proizvodnja manja za 25%, frekvencija se ustali na 45,3 Hz, a vrijednosti tijekom cijelog prijelazno razdoblja vidljive su na slici 4.58.

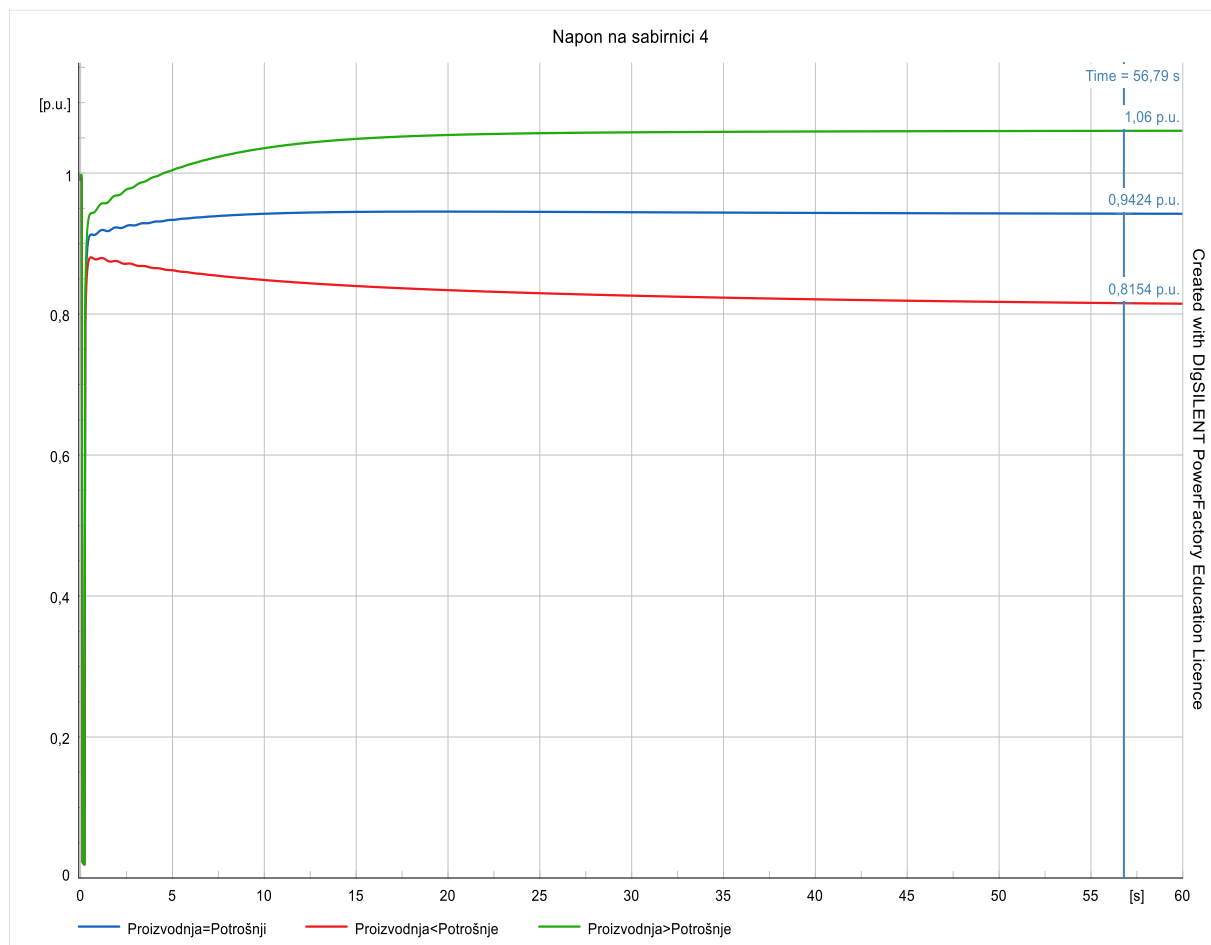


Slika 4.59. Sabirnica 4 – napon – prijelazno stanje

Ove promjene frekvencije jasno pokazuju kako proizvodnja i potrošnja direktno utječu na stabilnost i radni režim elektroenergetskog sustava. Frekvencija je ključan parametar koji odražava balans između proizvodnje i potrošnje. Ako proizvodnja premašuje potrošnju, frekvencija raste jer višak energije ubrzava generatore. Nasuprot tome, ako je proizvodnja manja od potrošnje, frekvencija pada jer opterećenje usporava generatore. Upravo zbog tih razloga, održavanje ravnoteže između proizvodnje i potrošnje je od vitalne važnosti za stabilan rad elektroenergetskog sustava.

Napon na sabirnici 4 u početnom stanju je gotovo jednak za sva tri slučaja, jer je DG1 daleko od sabirnice 4, pa on ne povećava napon značajno. Razlika u naponu uočljiva je tek u trećoj decimali. Ova udaljenost uzrokuje da napon na sabirnici 4 ostane stabilan i ne pokazuje značajne promjene pod normalnim uvjetima. Međutim, u trenutku kratkog spoja na vodi 3, na koji je sabirnica 4 spojena, dolazi do naglog pada napona gotovo do nule kako je i vidljivo na slici 4.59.

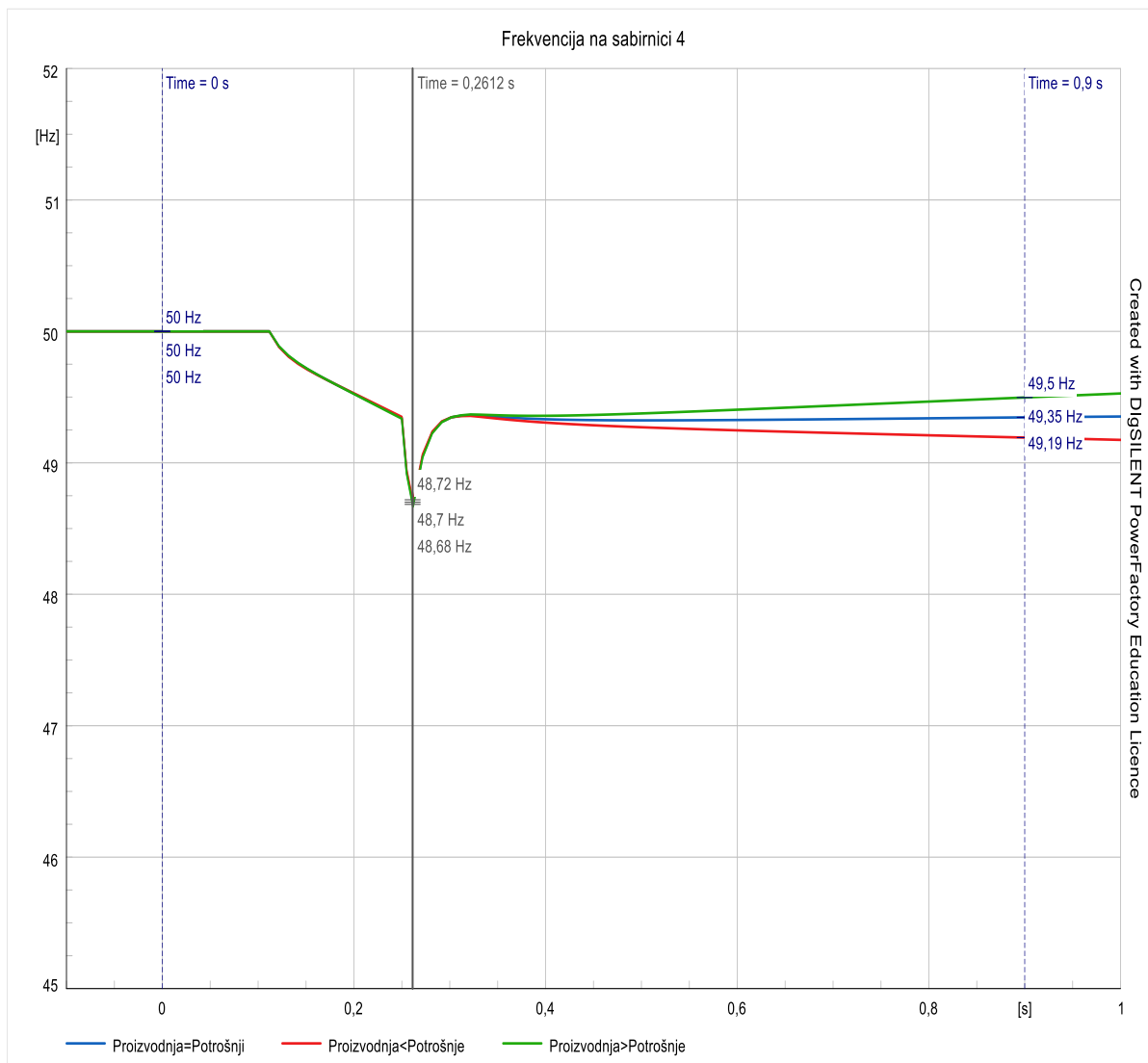
To se događa jer kratki spoj stvara put gotovo nulte impedancije, uzrokujući ogroman porast struje kroz vod, što rezultira velikim padom napona na sabirnici 4. Nakon što se kratki spoj ukloni i vod isključi, napon na sabirnici 4 počinje se vraćati na svoju normalnu razinu.



Slika 4.60. Sabirnica 4 – napon – ustaljeno stanje

Na slici 4.60 vidljivo je titranje napona prije nego što se postigne potpuno ustaljenje. Ovo titranje je rezultat tranzijentnih pojava u sustavu, gdje različite komponente pokušavaju ponovno uspostaviti ravnotežu nakon poremećaja uzrokovanog kratkim spojem. Ova tranzijentna pojava može uključivati oscilacije zbog induktivnih i kapacitivnih elemenata u mreži. Naponi na sabirnici 4 se ustale ovisno o tome je li proizvodnja iz DG1 veća, manja ili jednaka potrošnji. Ako je proizvodnja veća od potrošnje, napon na sabirnici 4 će biti viši zbog viška proizvedene energije koja povećava napon u sustavu. Ako je proizvodnja manja od potrošnje, napon će biti niži jer

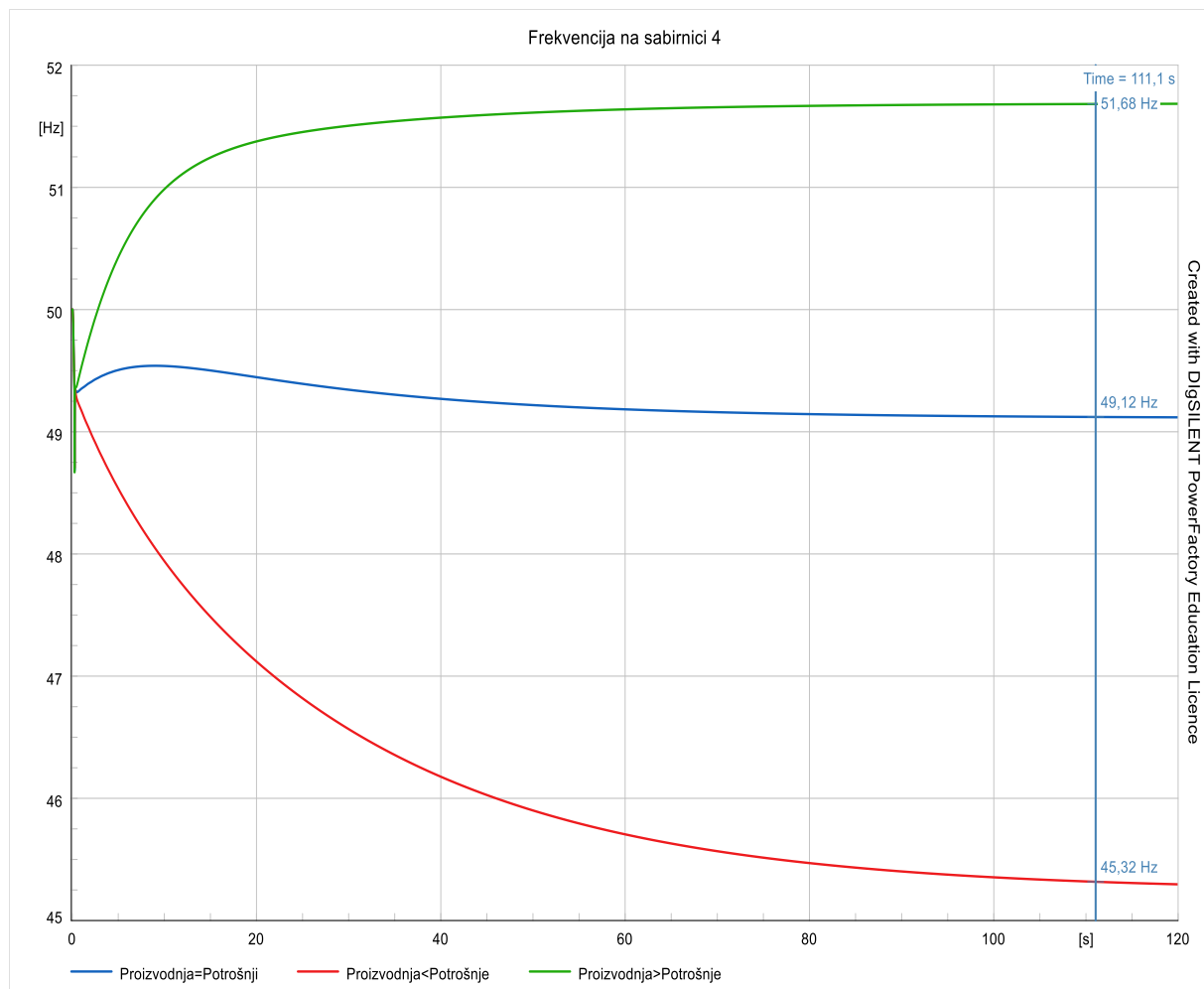
potrošnja nadmašuje proizvodnju, što dovodi do pada napona. Uspoređujući napon na sabirnici 4 s naponom na sabirnici 18, jasno je da je napon na sabirnici 4 niži. Ovo je zbog gubitaka koji se događaju jer je sabirnica 4 udaljenija od izvora DG1 nego sabirnica 18. Električna energija koja putuje kroz sustav do udaljenijih sabirnica doživljava veće gubitke zbog otpora i impedancije u vodičima i drugim komponentama sustava. Kao rezultat toga, sabirnica 18, koja je bliže DG1, ima manje gubitke i viši napon u usporedbi sa sabirnicom 4.



Slika 4.61. Sabirnica 4 – frekvencija – prijelazno stanje

Slika 4.61. prikazuje frekvenciju na sabirnici 4 u početnom i prijelaznom stanju. U početnom stanju, frekvencija je stabilna i u normalnim granicama operativne frekvencije. Međutim, u trenutku kratkog spoja dolazi do naglog pada frekvencije. Kratki spoj uzrokuje drastično povećanje struje, što rezultira smanjenjem frekvencije zbog povećanog opterećenja na generatorima i smanjenja efektivnog prijenosa snage. Nakon isključenja voda i uklanjanja kratkog spoja, frekvencija doživljava mali skok prema višim vrijednostima. Ovo je rezultat naglog

smanjenja opterećenja na mreži kada se kratki spoj ukloni, što uzrokuje privremeni višak proizvodnje u odnosu na potrošnju, prije nego što se sustav ponovno uravnoteži.

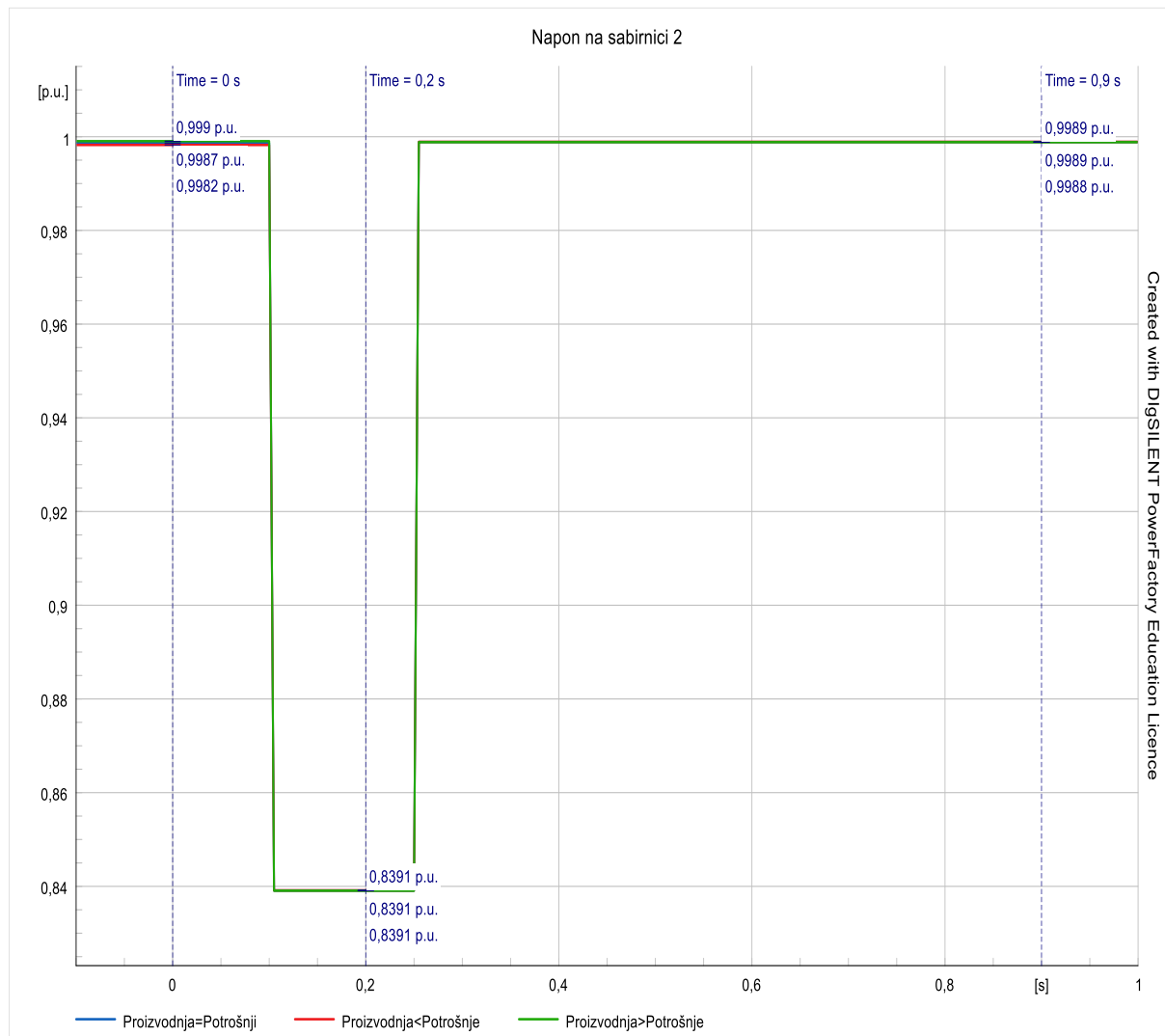


Slika 4.62. Sabirnica 4 – frekvencija – ustaljeno stanje

Frekvencija se zatim stabilizira ovisno o omjeru proizvodnje i potrošnje električne energije. Ako je proizvodnja veća od potrošnje, frekvencija se ustali na višoj vrijednosti od nominalne. U ovom slučaju, stabilna frekvencija je 51,68 Hz. Višak proizvodnje znači da generatori proizvode više snage nego što je potrebno, što rezultira povećanjem frekvencije. Ako je proizvodnja jednaka potrošnji, frekvencija se ustali na nominalnoj vrijednosti, ali nešto nižoj od idealne. U ovom slučaju, frekvencija se stabilizira na 49,12 Hz. To je blizu standardne frekvencije od 50 Hz, koja je često ciljana vrijednost za mnoge elektroenergetske sustave, ali može biti niža zbog specifičnih uvjeta u sustavu. Ako je proizvodnja manja od potrošnje, frekvencija se ustali na još nižoj vrijednosti. U ovom slučaju, stabilna frekvencija je 45,32 Hz. Ustaljene vrijednosti su vidljive na slici 4.62. Nedostatak proizvodnje u odnosu na potrošnju uzrokuje pad frekvencije jer opterećenje sustava nadmašuje kapacitet proizvodnje, što rezultira smanjenjem brzine vrtnje generatora i time smanjenjem frekvencije. Ova dinamika frekvencije je ključna za stabilnost elektroenergetskog

sustava. Odstupanja od nominalne frekvencije mogu imati značajan utjecaj na performanse i sigurnost mreže.

Kontrola frekvencije uključuje regulaciju proizvodnje i potrošnje kako bi se osigurala stabilnost sustava. U praksi, operateri elektroenergetskih mreža koriste različite metode i tehnologije za održavanje stabilne frekvencije, uključujući automatsku regulaciju frekvencije (Automatic Frequency regulation, AFR) i druge sustave upravljanja opterećenjem i proizvodnjom.



Slika 4.63. Sabirnica 2 - napon

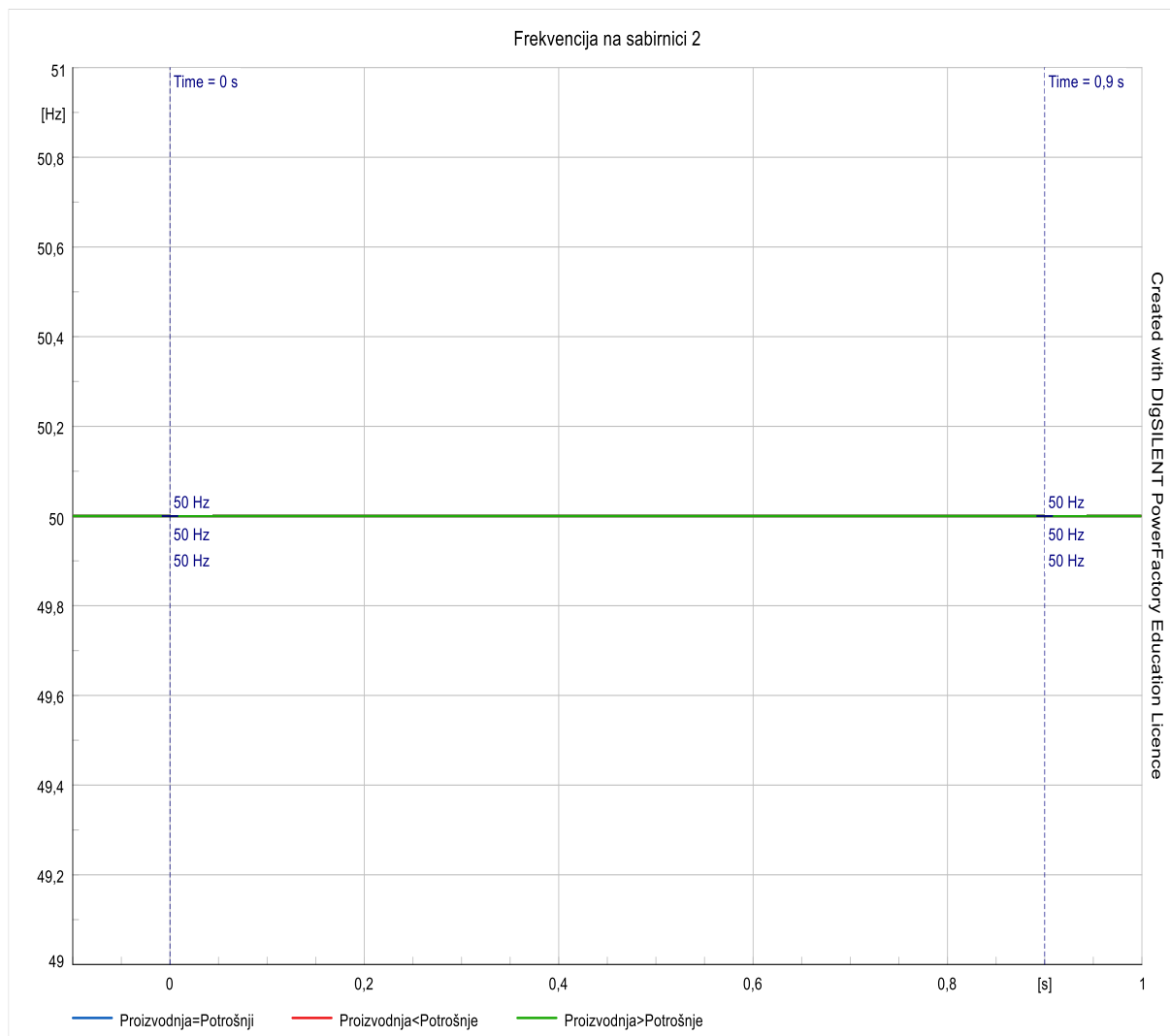
Na slici 4.63. prikazano je ponašanje napona na sabirnici 2. Početno stanje napona je za sva tri slučaja identično, s razlikama koje su primjetne tek u četvrtoj decimali. Ova stabilnost u početnom stanju napona ukazuje na uravnotežene uvjete u elektroenergetskom sustavu, bez značajnih poremećaja ili varijacija. U trenutku kratkog spoja dolazi do pada napona na sabirnici 2 na vrijednost od 0,8391 p.u. Ovaj pad napona je posljedica povećanog opterećenja i smanjenja efektivnog prijenosa snage zbog kratkog spoja, koji uzrokuje povećanje struje kroz sustav i

rezultirajući pad napona zbog otpora i impedancije u mreži. Nakon isključenja voda 3, kada se kratki spoj ukloni, napon na sabirnici 2 skoči na 0,9989 p.u. Ovaj nagli porast napona je rezultat uklanjanja kratkog spoja, što smanjuje opterećenje i omogućava sustavu da se vrati na normalnu razinu napona. Ustaljeno stanje napona na sabirnici 2 je praktički jednako početnom stanju, s naponom od približno 1 p.u., neovisno o proizvodnji iz DG1. Razlog za ovu stabilnost je činjenica da sabirnica 2 nije u otočnom pogonu, već se napaja iz šire mreže. To znači da promjene u proizvodnji iz DG1 nemaju značajan utjecaj na napon na sabirnici 2, jer se ona napaja iz drugih izvora u mreži. Mreža djeluje kao veliki stabilizirajući element koji amortizira fluktuacije koje bi mogle proizaći iz lokalnih promjena u proizvodnji ili potrošnji. Ova situacija ilustrira važnost povezivanja elektroenergetskih sustava u širu mrežu. Kroz ovakvu povezanost, lokalni poremećaji ili promjene mogu biti neutralizirani, osiguravajući stabilnost napona i pouzdanost opskrbe električnom energijom. Kada su sabirnice povezane u veću mrežu, one mogu dijeliti opterećenje i resurse, što omogućava održavanje stabilnog napona i frekvencije, čak i u prisutnosti lokalnih poremećaja poput kratkih spojeva. Također, ovo ponašanje naglašava važnost koordinacije između različitih dijelova elektroenergetskog sustava. U slučaju kratkih spojeva i drugih poremećaja, brza reakcija i isključivanje pogođenih vodova može brzo vratiti sustav u stabilno stanje, minimizirajući utjecaj na potrošače i opremu. U konačnici, stabilnost napona na sabirnici 2 u uvjetima kratkog spoja i nakon isključenja voda 3 pokazuje učinkovitost sustava upravljanja i stabilizacije unutar šire elektroenergetske mreže, omogućujući pouzdanu i stabilnu opskrbu električnom energijom.

Na slici 4.64. prikazana je frekvencija sabirnice 2. Krivulja frekvencije na sabirnici 2 pokazuje promjene, ali te promjene su praktički zanemarive jer se razlikuju u osmoj decimali. Dakle, može se reći da je frekvencija na sabirnici 2 cijelo vrijeme konstantna i iznosi 50 Hz. Ova konstanta frekvencija od 50 Hz, koja je standardna operativna frekvencija u mnogim elektroenergetskim sustavima, ukazuje na visoku stabilnost i pouzdanost mreže. Činjenica da su promjene u frekvenciji zanemarive i razlikuju se tek u osmoj decimali znači da su svi dijelovi sustava dobro sinkronizirani i da sustav učinkovito održava ravnotežu između proizvodnje i potrošnje električne energije. Stabilna frekvencija je ključna za pravilno funkcioniranje električnih uređaja i opreme, jer mnogi uređaji ovise o točnoj frekvenciji za ispravan rad. Odstupanja od nominalne frekvencije mogu uzrokovati probleme poput pregrijavanja, smanjenja učinkovitosti, ili čak oštećenja opreme. Frekvencijska stabilnost na sabirnici 2 također naglašava važnost povezivanja lokalnih elektroenergetskih sustava u širu mrežu. Kada su sabirnice povezane u veliku mrežu, promjene u proizvodnji ili potrošnji u jednom dijelu sustava mogu biti uravnotežene proizvodnjom ili



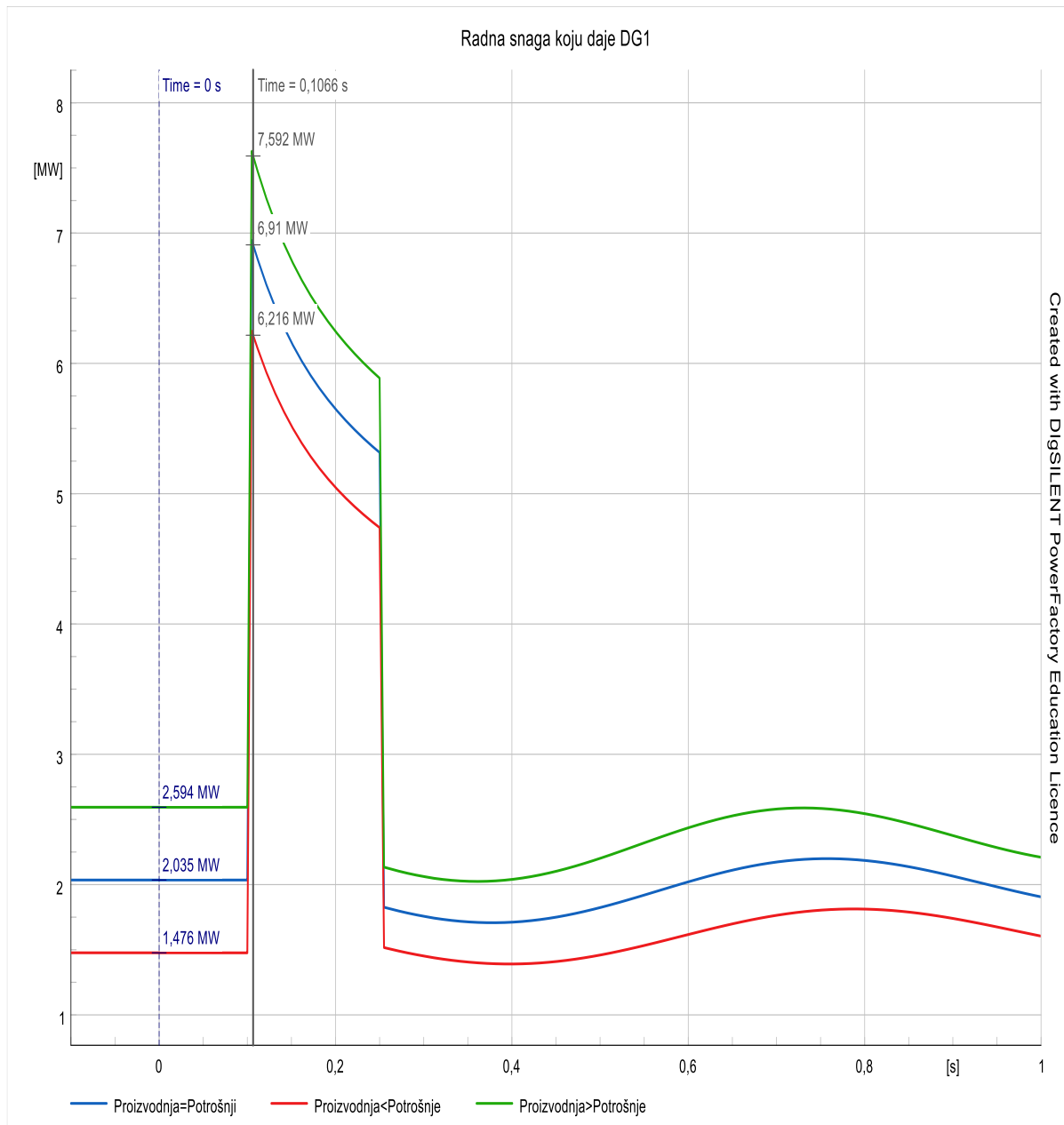
potrošnjom u drugim dijelovima sustava. To omogućava cijeloj mreži da održava stabilnu frekvenciju, čak i u prisutnosti lokalnih poremećaja.



Slika 4.64. Sabirnica 2 - frekvencija

Kako je prikazano na slici 4.65., početno stanje radne snage DG1 varira ovisno o slučaju, odnosno o tome je li proizvodnja DG1 veća, manja ili jednaka potrošnji. Ovi početni uvjeti određuju početnu razinu radne snage u sustavu i ravnotežu između proizvodnje i potrošnje. U trenutku kratkog spoja dolazi do naglog skoka radne snage DG1. Ovaj skok je uzrokovan iznenadnim povećanjem struje zbog kratkog spoja, što uzrokuje privremeno povećanje opterećenja na DG1. Kao rezultat, DG1 povećava svoju radnu snagu kako bi odgovorio na ovaj neočekivani poremećaj. Nakon inicijalnog skoka, radna snaga DG1 polagano pada dok se sustav pokušava prilagoditi novonastalim uvjetima. Pad radne snage je posljedica pokušaja sustava da stabilizira stanje unatoč kratkom spoju, pri čemu se opterećenje redistribuira i sustav traži novu ravnotežu. Kada se vod 3 isključi, dolazi do titranja radne snage DG1. Ova titranja su posljedica tranzijentnih pojava koje se javljaju nakon isključenja, gdje sustav prolazi kroz fazu oscilacija prije nego što se postigne

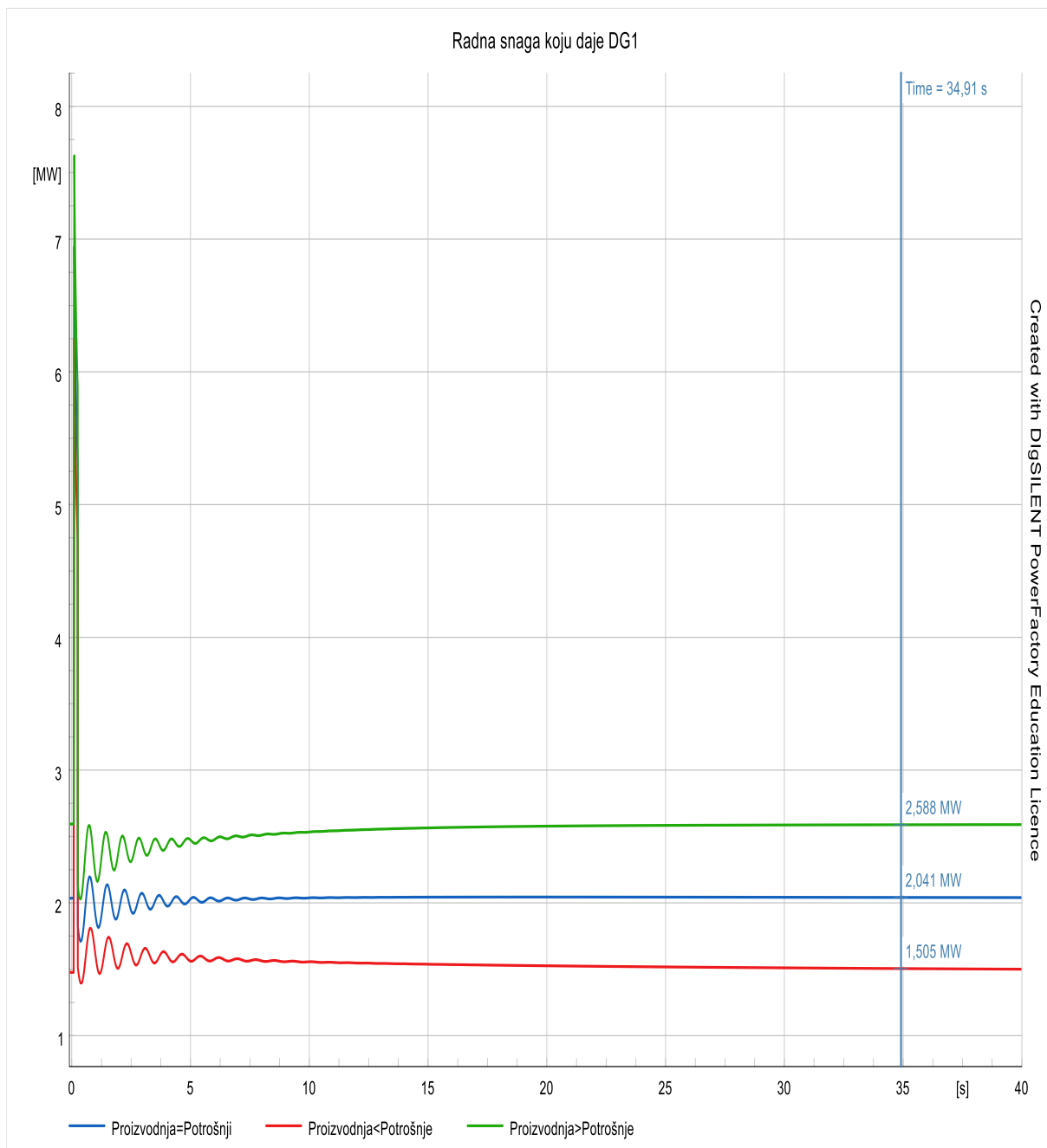
nova ravnoteža. Oscilacije mogu biti uzrokovane reakcijama generatora, promjenama u opterećenju, te dinamičkim interakcijama unutar elektroenergetskog sustava.



Slika 4.65. DG1 – radna snaga – prijelazno stanje

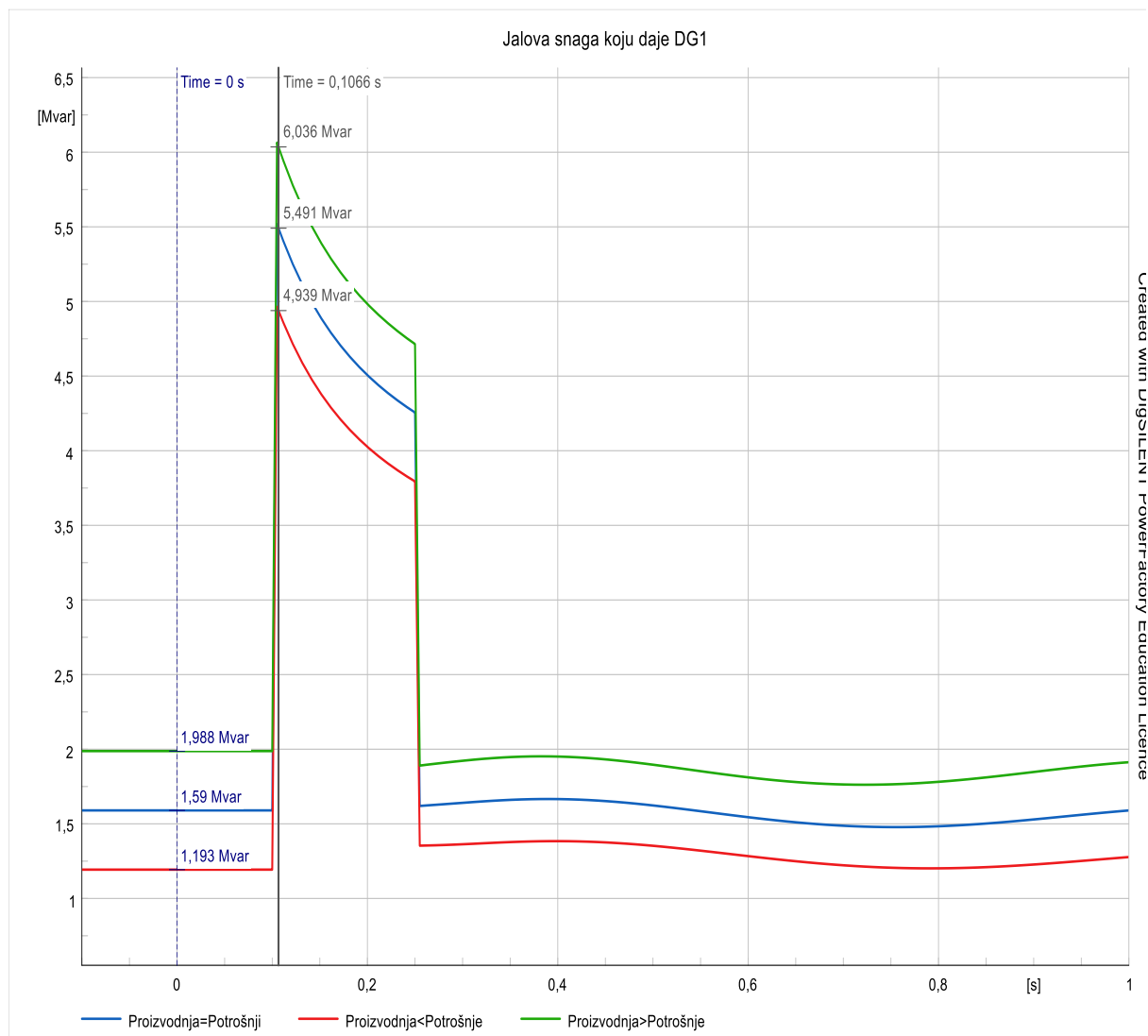
Na slici 4.66. prikazano je kako se radna snaga DG1 nakon titranja postupno ustaljuje i vraća na vrijednost koja je bila u početnom stanju. Ovo vraćanje na početnu vrijednost ukazuje na učinkovito funkcioniranje sustava upravljanja i kontrole unutar mreže, koji omogućuju sustavu da se oporavi i stabilizira nakon poremećaja. Ova stabilizacija je ključna za održavanje pouzdanosti i stabilnosti elektroenergetskog sustava. Sustavi za regulaciju radne snage, kao što su automatski regulatori napona (Automatic Voltage Regulation, AVR) i sustavi za upravljanje frekvencijom i opterećenjem (Load Frequency Control, LFC), igraju važnu ulogu u ovom procesu. Oni

kontinuirano prate stanje mreže i prilagođavaju rad generatora kako bi osigurali stabilnost radne snage i frekvencije. U zaključku, ponašanje radne snage DG1 prikazano na slikama 4.65. i 4.66. ilustrira dinamičku prirodu elektroenergetskog sustava i važnost učinkovitih sustava upravljanja i kontrole. Početno stanje radne snage DG1 određeno je ravnotežom između proizvodnje i potrošnje. U trenutku kratkog spoja dolazi do naglog skoka radne snage, koja potom polagano pada dok se sustav prilagođava. Nakon isključenja voda 3, radna snaga DG1 titra prije nego što se ponovno ustali na početnu vrijednost, pokazujući sposobnost sustava da se prilagodi i stabilizira unatoč poremećajima.



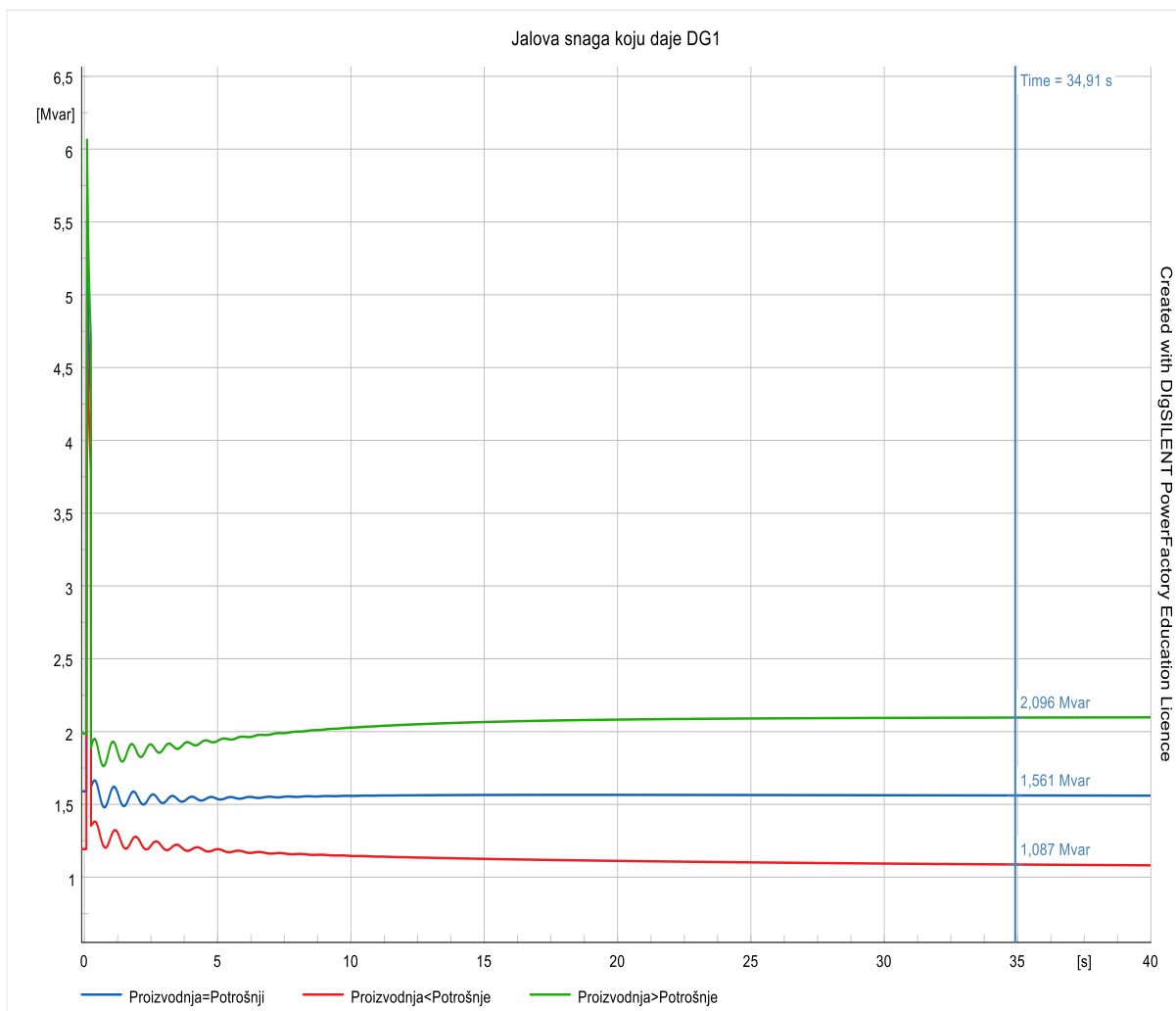
Slika 4.66. DG1 – radna snaga – ustaljeno stanje

Ponašanje jalove snage koju daje DG1 je slično kao i s radnom snagom, što je detaljno prikazano na slikama 4.67. i 4.68. Početno stanje jalove snage ovisi o početnim uvjetima, odnosno o tome je li proizvodnja DG1 veća, manja ili jednaka potrošnji. Jalova snaga također igra ključnu ulogu u održavanju naponskih profila i stabilnosti sustava. U trenutku kratkog spoja dolazi do naglog skoka jalove snage koju daje DG1. Ovaj skok je rezultat povećanog opterećenja uslijed kratkog spoja, što uzrokuje povećanu potrebu za jalovom snagom kako bi se održali naponski profili i podržala stabilnost sustava. Kao i kod radne snage, DG1 odgovara na ovaj poremećaj povećanjem proizvodnje jalove snage.



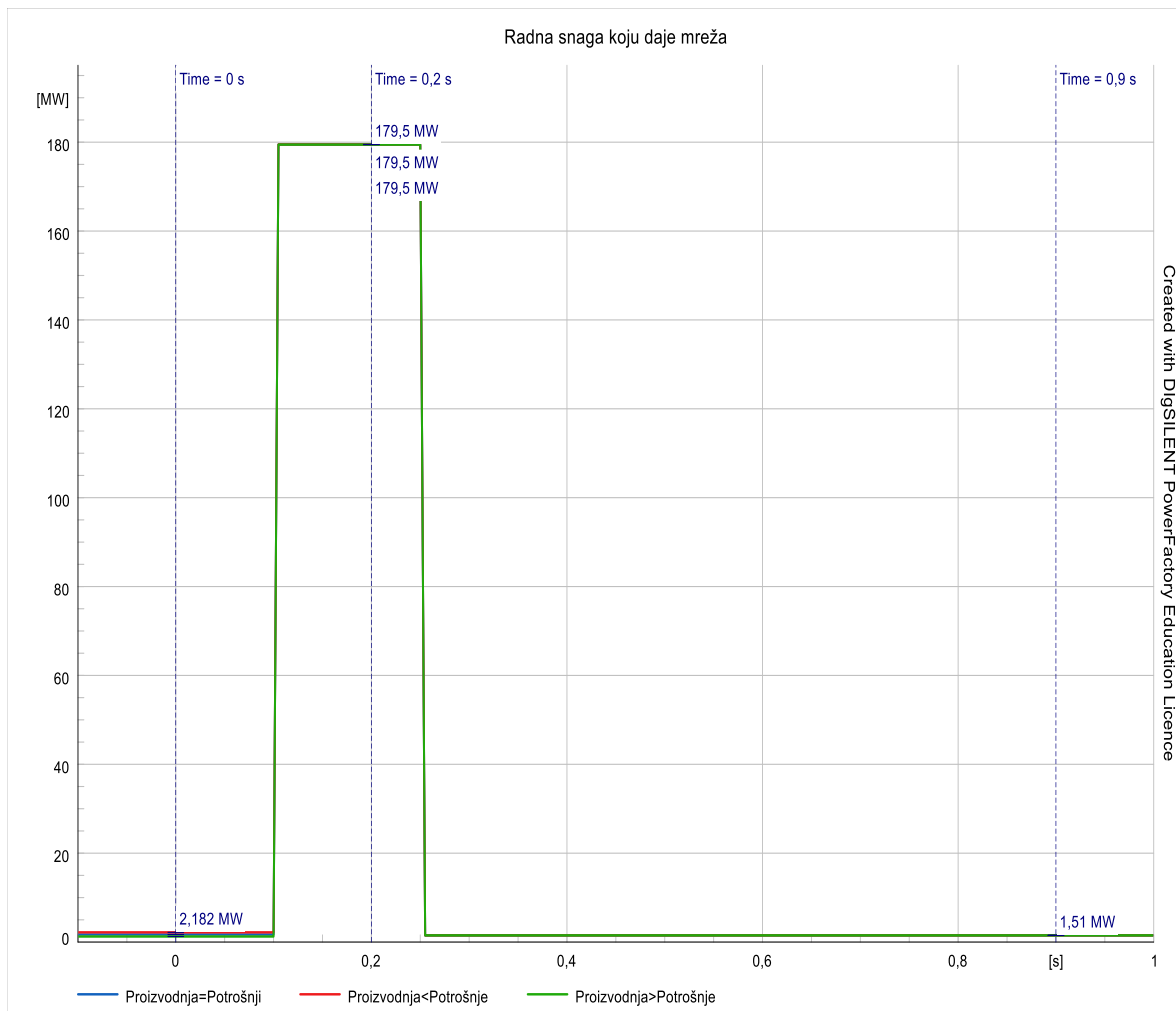
Slika 4.67. DG1 – jalova snaga – prijelazno stanje

Nakon inicijalnog skoka, jalova snaga polagano pada dok se sustav prilagođava novonastalim uvjetima. Pad jalove snage rezultat je pokušaja sustava da se stabilizira i ponovno uspostavi ravnotežu nakon poremećaja. Sustav upravljanja i regulacije kontinuirano radi na održavanju optimalnih naponskih profila i ravnoteže jalove snage u sustavu. Kada se vod 3 isključi, dolazi do titranja jalove snage koju daje DG1. Ova titranja su posljedica tranzijentnih pojava koje se javljaju nakon isključenja, kada sustav prolazi kroz fazu oscilacija prije nego što se postigne nova ravnoteža. Oscilacije jalove snage mogu biti uzrokovane dinamičkim reakcijama generatora, promjenama u opterećenju, te međusobnim interakcijama unutar elektroenergetskog sustava. Na slici 4.68. prikazano je kako se jalova snaga nakon titranja postupno ustaljuje i vraća na vrijednost koja je bila u početnom stanju. Ova stabilizacija ukazuje na učinkovitost sustava upravljanja jalovom snagom i kontrole unutar mreže, koji omogućuju sustavu da se oporavi i stabilizira nakon poremećaja. Jalova snaga se vraća na početnu vrijednost, bez obzira na početne uvjete proizvodnje, zahvaljujući sofisticiranim mehanizmima regulacije jalove snage. Sustavi za regulaciju jalove



Slika 4.68. DG1 – jalova snaga – ustaljeno stanje

snage, poput automatskih regulatora napona (AVR) i sustava za upravljanje reaktivnom snagom, igraju ključnu ulogu u ovom procesu. Oni kontinuirano prate stanje napona i prilagođavaju proizvodnju jalove snage kako bi osigurali stabilnost naponskih profila i ravnotežu unutar elektroenergetskog sustava.

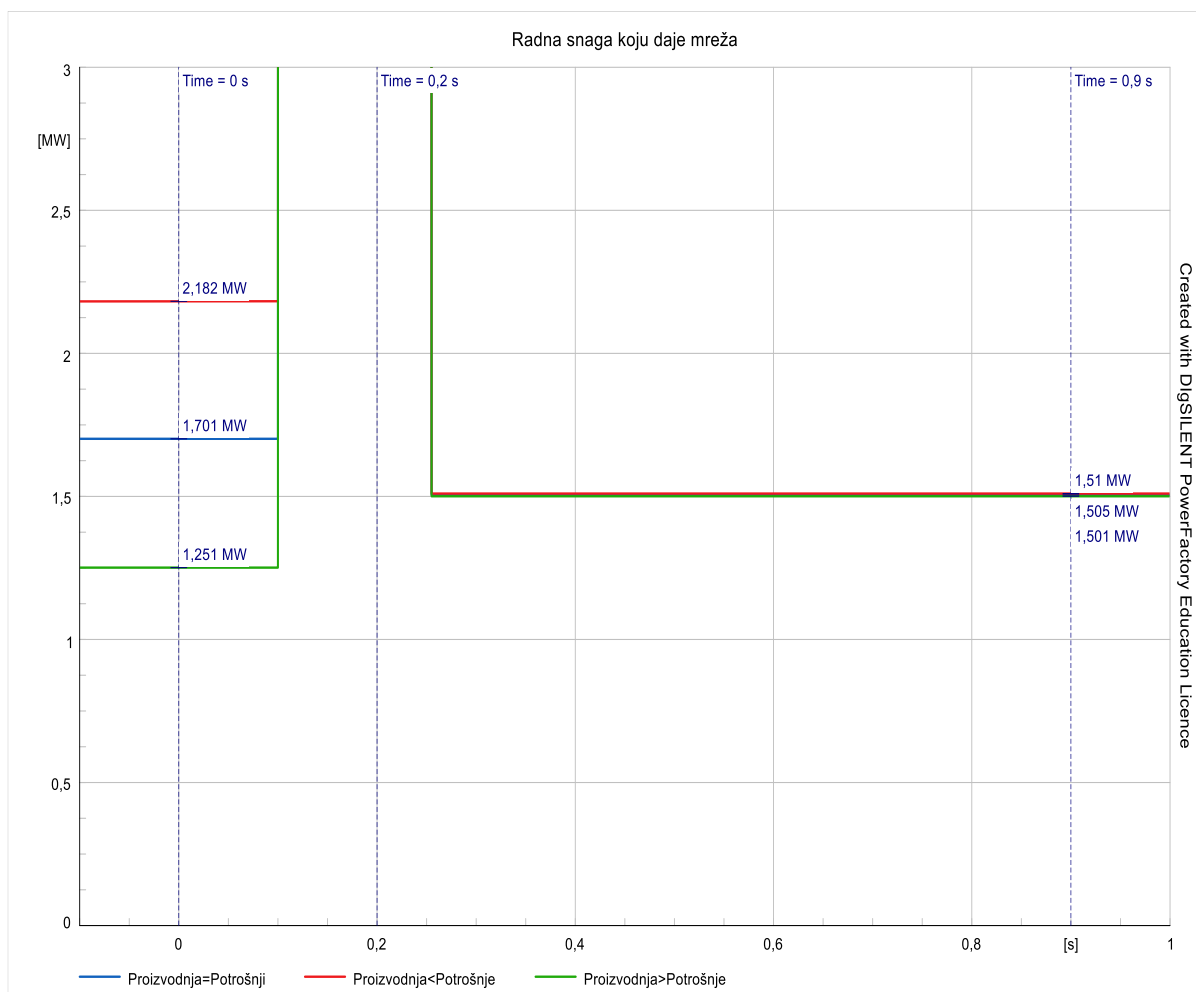


Slika 4.69. Mreža –radna snaga - snaga kratkog spoja

Mreža u početnom stanju prilagođava svoju proizvodnju energije kako bi nadomjestila razliku između proizvodnje DG1 i ukupne potrošnje. Kada je proizvodnja DG1 manja, mreža daje više energije kako bi nadomjestila taj manjak. Nasuprot tome, kada je proizvodnja DG1 veća, mreža daje manju snagu u sustav, jer je DG1 u stanju pokriti veći dio opterećenja. U trenutku kratkog spoja, radna snaga koju daje mreža naglo skače na 179,5 MW, kao što je prikazano na slici 4.69. Ovaj skok je rezultat povećanog opterećenja uzrokovanog kratkim spojem, koji izaziva trenutni porast potražnje za energijom iz mreže. Sustav reagira povećanjem proizvodnje kako bi pokušao održati stabilnost i opskrbu električnom energijom unatoč poremećaju. Nakon što se dogodi isključenje voda 3, radna snaga koju daje mreža drastično pada na vrijednost od 1,5 MW, neovisno o proizvodnji DG1. Ovo se događa jer je DG1 odvojen od mreže, što znači da mreža više ne mora

nadomještati njegovu proizvodnju. Umjesto toga, sustav prelazi u stanje u kojem je DG1 izoliran, a mreža sada opskrbljuje samo ono opterećenje koje je ostalo povezano s njom.

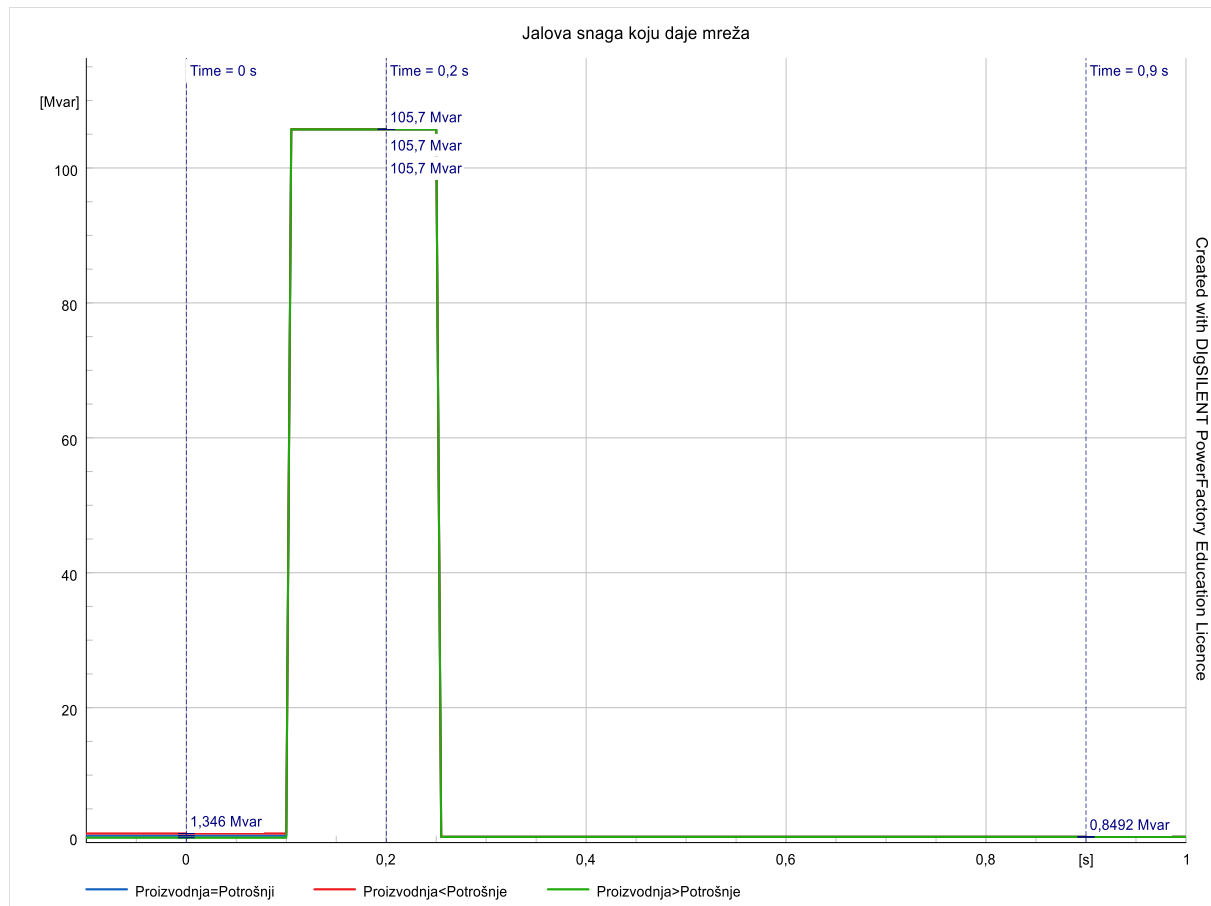
Promjena u radnoj snazi mreže prije i nakon isključenja voda 3 ukazuje na dinamičku prilagodljivost elektroenergetskog sustava. U normalnim uvjetima, mreža funkcionira zajedno s DG1 kako bi osigurala stabilnu i kontinuiranu opskrbu energijom, prilagođavajući svoju proizvodnju prema potrebama sustava. U slučaju kratkog spoja i kasnijeg isključenja, sustav pokazuje svoju sposobnost brzog prilagođavanja novonastalim uvjetima kako bi se minimizirao utjecaj poremećaja na potrošače. Ova sposobnost mreže da brzo odgovori na poremećaje je ključna za održavanje stabilnosti sustava. Mehanizmi kao što su sustavi za automatsku regulaciju frekvencije i napona, te sustavi za brzo isključivanje i ponovno uključivanje dijelova mreže, igraju važnu ulogu u ovom procesu. Oni omogućuju mreži da brzo detektira promjene u opterećenju i odgovori na njih, održavajući stabilnost i pouzdanost opskrbe.



Slika 4.70. Mreža – radna snaga - početno stanje

U zaključku, ponašanje radne snage mreže, kako je prikazano na slikama 4.69. i 4.70., ilustrira fleksibilnost i prilagodljivost elektroenergetskog sustava u različitim uvjetima. U početnom stanju,

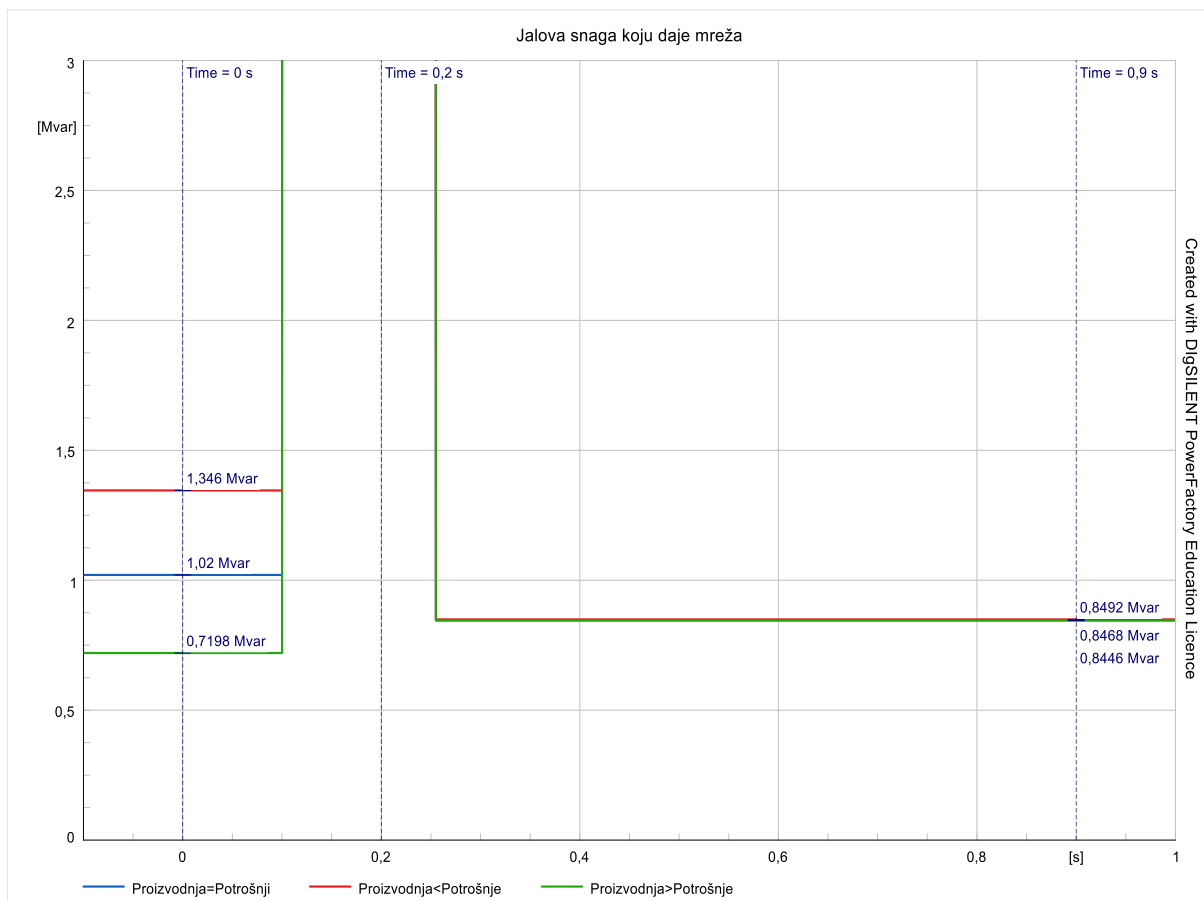
mreža prilagođava svoju proizvodnju prema proizvodnji DG1. U trenutku kratkog spoja, radna snaga mreže naglo skače kao odgovor na povećano opterećenje, dok nakon isključenja voda 3 radna snaga pada na minimalnu vrijednost jer je DG1 odvojen od mreže. Ova dinamička reakcija osigurava stabilnost sustava i kontinuiranu opskrbu električnom energijom unatoč poremećajima.



Slika 4.71. Mreža – jalova snaga – snaga kratkog spoja

Jalova snaga mreže pokazuje slično ponašanje kao i radna snaga mreže, što je detaljno prikazano na slikama 4.71. i 4.72. U početnom stanju, mreža prilagođava svoju proizvodnju jalove snage kako bi nadomjestila razliku između proizvodnje DG1 i ukupne potrošnje. Kada je proizvodnja DG1 manja, mreža daje više jalove snage kako bi održala potrebne naponske profile i podržala stabilnost sustava. S druge strane, kada je proizvodnja DG1 veća, mreža daje manju jalovu snagu, jer DG1 pokriva veći dio potreba za jalovom snagom u sustavu. U trenutku kratkog spoja, jalova snaga koju daje mreža naglo skače, slično kao i radna snaga. Ovaj skok je rezultat povećanog opterećenja i potrebe za održavanjem stabilnosti naponskih profila u sustavu. Kratki spoj uzrokuje iznenadni porast potražnje za jalovom snagom kako bi se održao stabilan napon i minimizirale oscilacije koje bi mogle dovesti do daljnjih poremećaja.

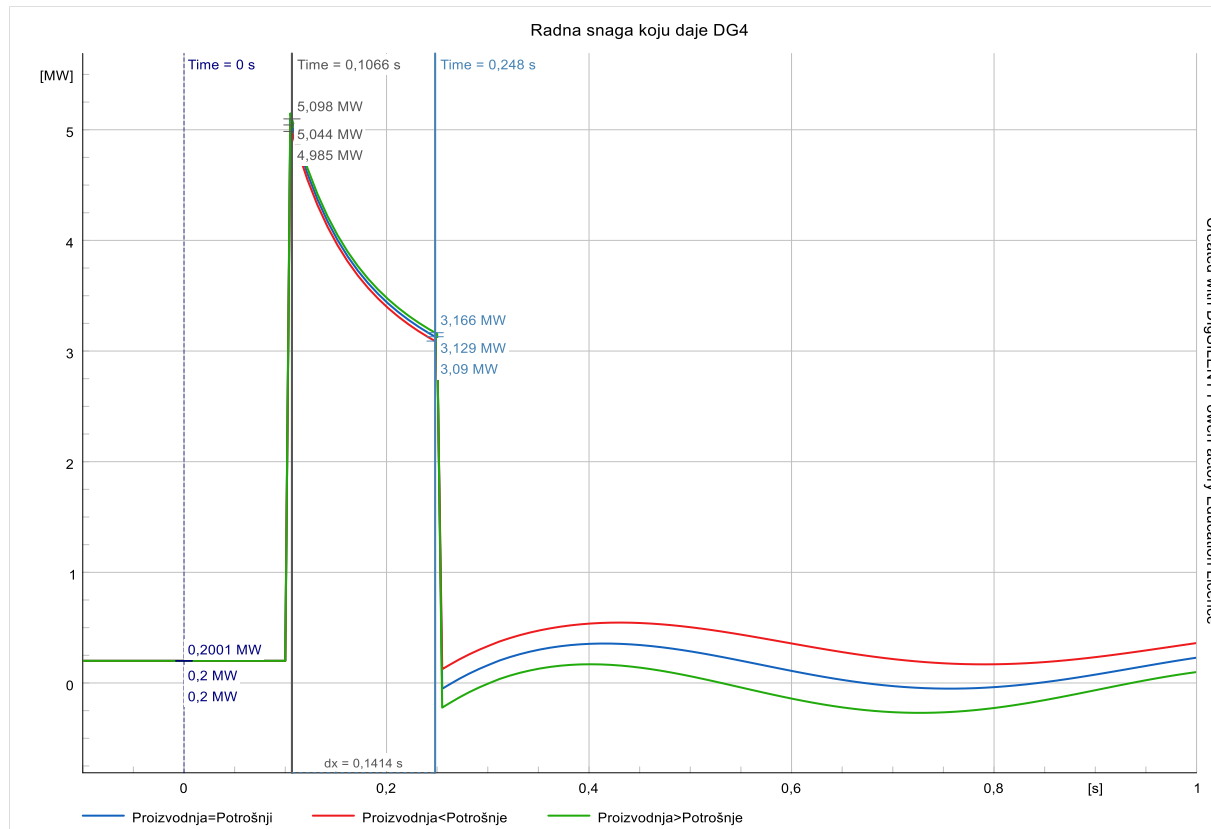




Slika 4.72. Mreža – jalova snaga – početno stanje

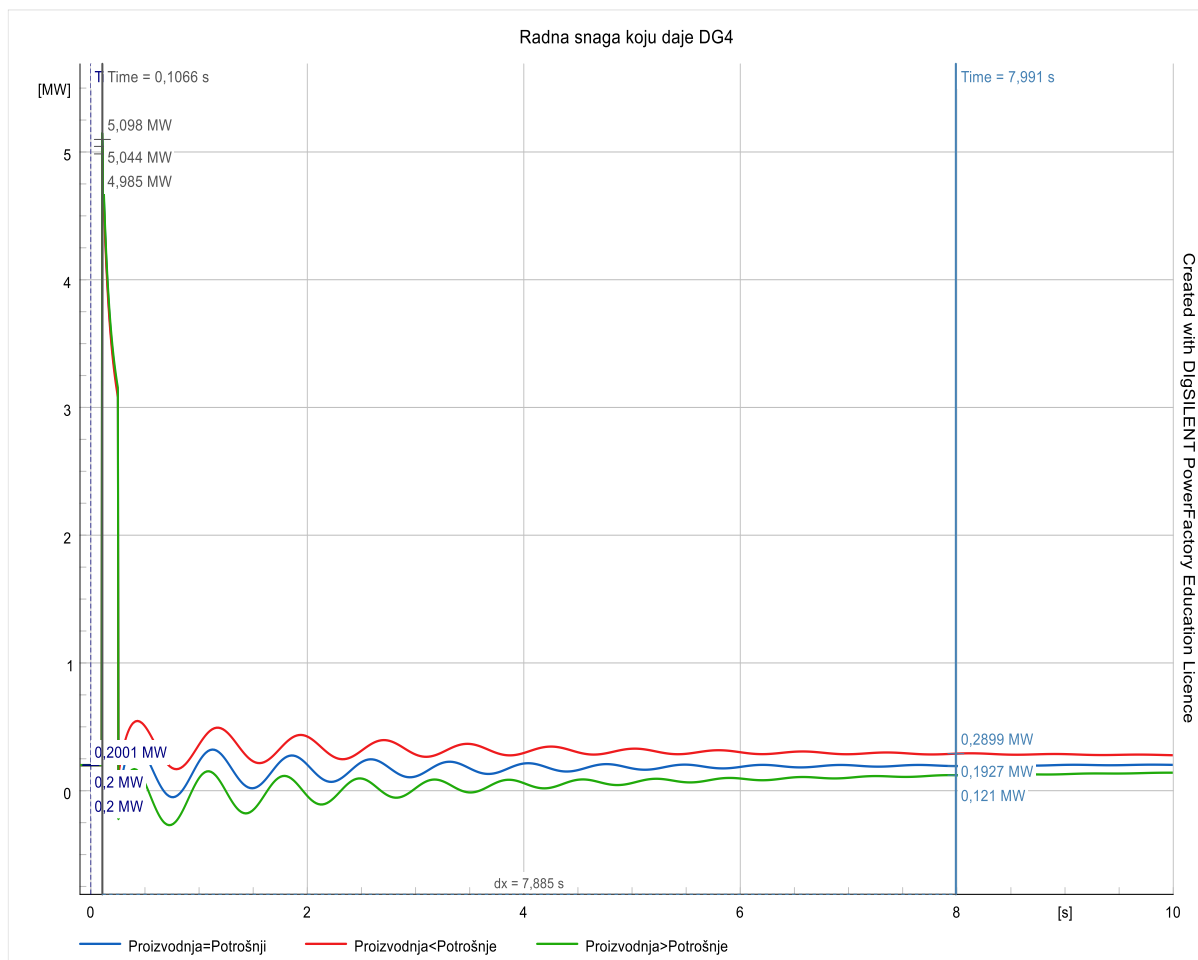
Kada se dogodi isključenje voda 3, jalova snaga koju daje mreža drastično pada, sličan obrazac kao i kod radne snage. Nakon isključenja voda 3, mreža više ne mora nadomještati proizvodnju jalove snage DG1, jer je DG1 sada odvojen od mreže. Jalova snaga mreže pada na minimalnu vrijednost jer mreža sada opskrbljuje samo ono opterećenje koje je ostalo povezano s njom. Ova reakcija naglašava važnost koordinacije između mreže i generatora kao što je DG1 u održavanju stabilnosti napona i ravnoteže jalove snage u sustavu. Nakon inicijalnih oscilacija uzrokovanih kratkim spojem i isključenjem voda 3, sustav upravljanja jalovom snagom i dalje radi na stabilizaciji mreže.

Početno stanje radne snage koju daje DG4 je zadano i iznosi 0,2 MW (slika 4.73.). U početku, sustav je u ravnoteži, a DG4 proizvodi konstantnih 0,2 MW kako bi zadovoljio dio potrošnje u mreži. Ova vrijednost je određena kao dio planiranog operativnog režima sustava, gdje DG1 doprinosi manjim dijelom ukupne proizvodnje, dok ostatak dolazi iz drugih izvora u mreži.



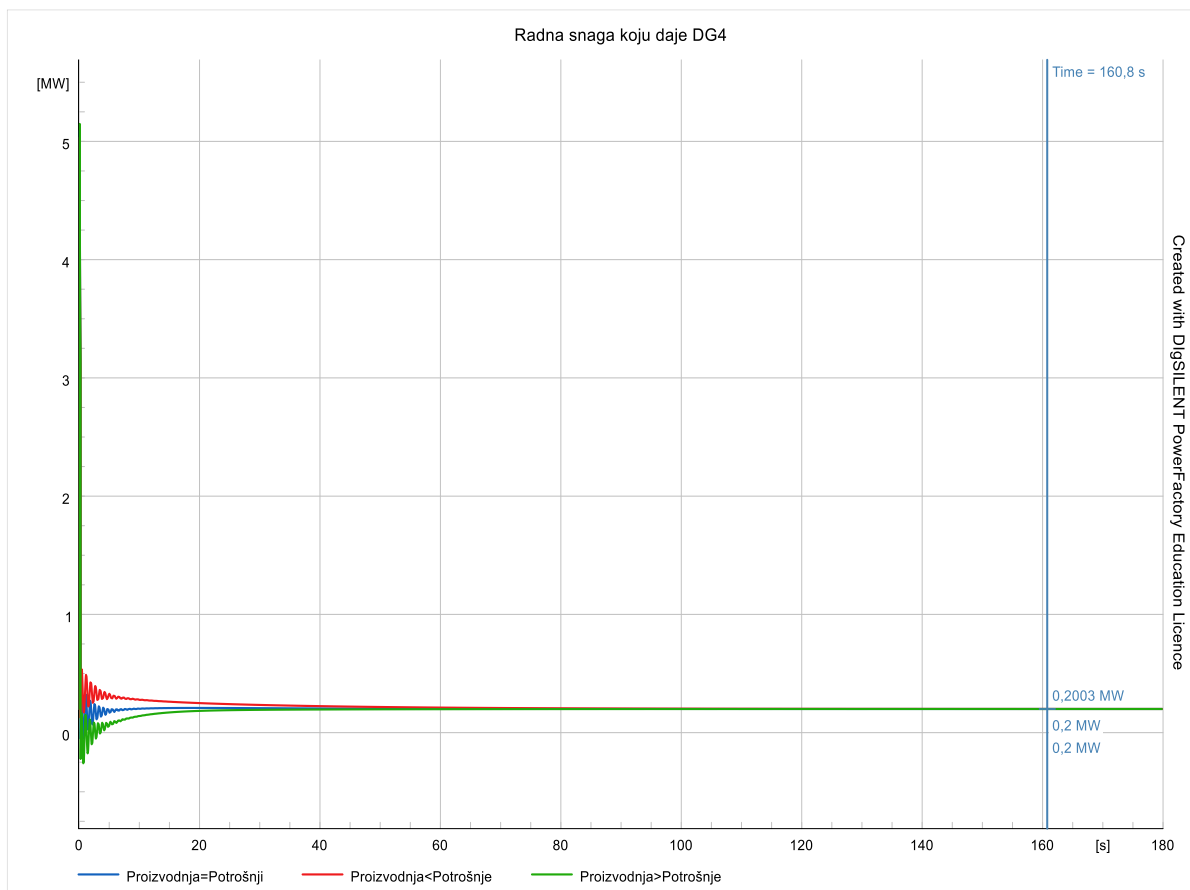
Slika 4.73. DG4 – radna snaga – početno stanje

U trenutku kratkog spoja dolazi do naglog skoka radne snage DG1 na oko 5 MW. Ovaj nagli porast je rezultat iznenadnog povećanja opterećenja uzrokovanog kratkim spojem. DG1 pokušava odgovoriti na ovaj poremećaj povećanjem svoje proizvodnje kako bi održao stabilnost sustava i spriječio veće oscilacije u frekvenciji i naponu. Međutim, ovaj povećani nivo proizvodnje nije održiv na duže vrijeme, te radna snaga DG1 počinje padati dok sustav pokušava pronaći novu ravnotežu. Pad radne snage DG1 nastavlja se sve do trenutka isključenja voda 3. Kada se vod 3 isključi, dolazi do naglog pada radne snage DG1. Ovaj pad je rezultat izolacije DG1 od ostatka mreže, čime se smanjuje potreba za povećanom proizvodnjom koju je izazvao kratki spoj. U ovom trenutku, radna snaga DG1 više nije pod utjecajem poremećaja i može se vratiti svojim normalnim operativnim uvjetima.



Slika 4.74. DG4 – radna snaga – prijelazno stanje

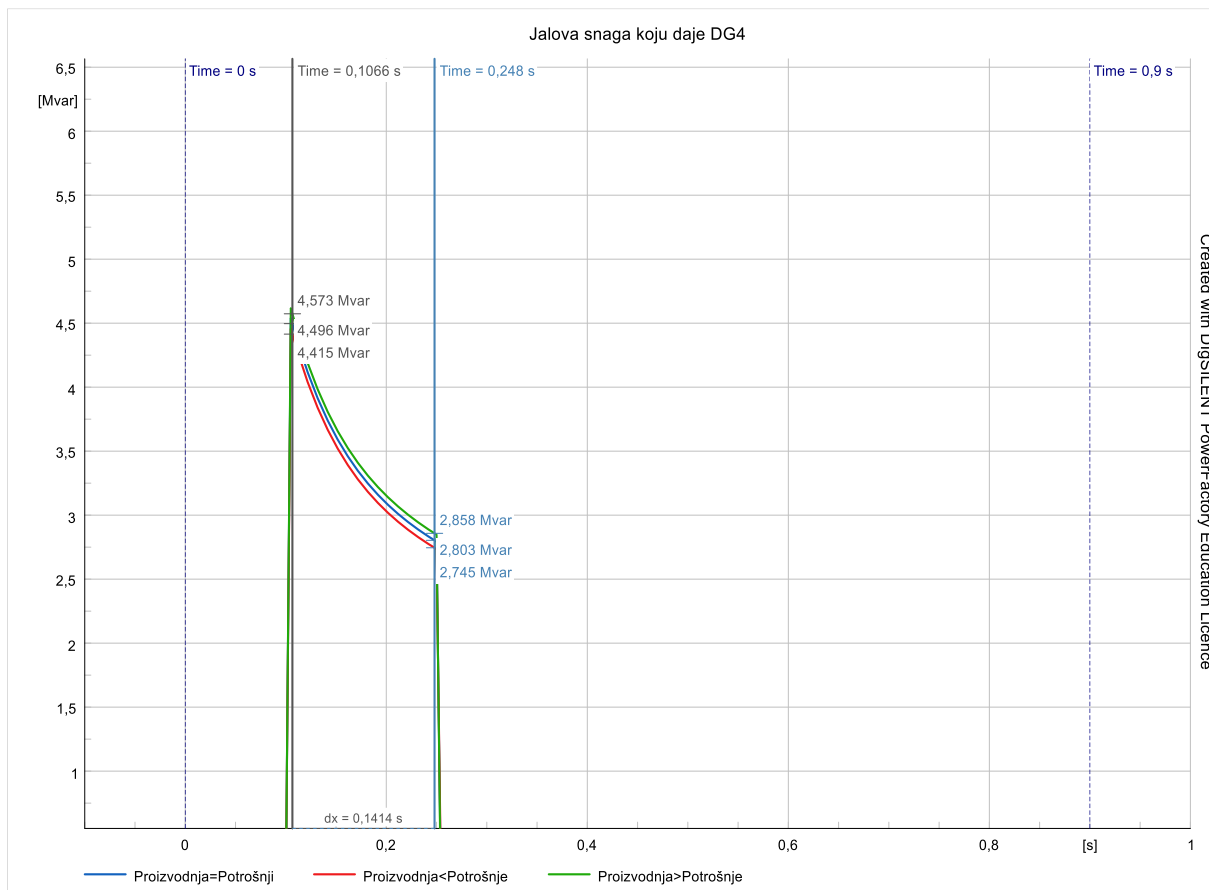
Nakon isključenja voda 3, sustav prolazi kroz fazu titranja (slika 4.74.). Ova titranja su uzrokovana tranzijentnim procesima koji se javljaju kada se sustav pokušava stabilizirati nakon značajnog poremećaja. Oscilacije radne snage su rezultat dinamičkih interakcija unutar sustava, uključujući reakcije generatora, promjene u opterećenju i prilagodbe sustava upravljanja i kontrole. Nakon faze titranja, radna snaga DG1 se postupno ustaljuje na početnu vrijednost od 0,2 MW (slika 4.75.). Ovo vraćanje na početnu vrijednost ukazuje na uspješan oporavak sustava i njegovu sposobnost da se stabilizira nakon ozbiljnog poremećaja. Sustavi za automatsku regulaciju i kontrolu igraju ključnu ulogu u ovom procesu, osiguravajući da se proizvodnja DG1 prilagodi trenutnim potrebama sustava i održi stabilnost. U zaključku, ponašanje radne snage DG1 kroz različite faze poremećaja, kako je opisano, pokazuje sposobnost sustava da se prilagodi i oporavi od ozbiljnih poremećaja. Početno stanje radne snage DG1 je 0,2 MW. U trenutku kratkog spoja, radna snaga naglo skače na oko 5 MW i potom polako pada do trenutka isključenja voda 3. Nakon isključenja, radna snaga naglo padne, uz pojavu titranja, i na kraju se ustali na početnu vrijednost od 0,2 MW, ilustrirajući otpornost i prilagodljivost sustava.



Slika 4.75. DG4 – radna snaga – ustaljeno stanje

DG4 ne daje nikakvu jalovu snagu u normalnim uvjetima rada. Međutim, u trenutku kratkog spoja, jalova snaga DG4 naglo skače na 4,5 MVar (slika 4.76.). Ovaj neočekivani skok jalove snage je posljedica kratkog spoja koji uzrokuje potrebu za dodatnom jalovom snagom radi održavanja stabilnosti napona u sustavu. Jalova snaga se povećava kako bi se kompenzirala jalova snaga koja je iznenada potrebna zbog kratkog spoja. Nakon inicijalnog skoka, jalova snaga DG4 polako pada sve do trenutka isključenja voda 3. Kada se vod 3 isključi, jalova snaga DG4 pada na nulu. Ovaj pad jalove snage je posljedica izolacije DG4 od ostatka mreže, što znači da DG4 više nije uključen u procese pružanja reaktivne snage ili kompenzacije reaktivne moći u sustavu.

Reakcija jalove snage DG4 tijekom kratkog spoja i nakon isključenja voda 3 prikazuje dinamičnu prilagodljivost elektroenergetskog sustava na promjene u uvjetima opterećenja. Sposobnost generatora kao što je DG4 da privremeno pruži potrebnu jalovu snagu u kriznim situacijama, kao što je kratki spoj, ključna je za održavanje stabilnosti napona i sprečavanje širenja poremećaja po mreži.



Slika 4.76. DG4 – jalova snaga

Uz to, brza reakcija generatora na isključenje voda 3 i trenutni pad jalove snage na nulu ilustrira kako se sustav automatski prilagođava novonastalim uvjetima i nastoji povratiti normalan operativni režim. Ovi procesi su podržani sustavima za regulaciju reaktivne snage i upravljanja generatorima, koji su ključni za održavanje stabilnosti elektroenergetskog sustava u svim uvjetima rada.

## 5. ZAKLJUČAK

U ovom radu istraženi su aspekti električnih veličina za vrijeme otočnog pogona koristeći simulacije u programskom paketu DIgSILENT PowerFactory na primjeru IEEE 33 sabirničkog sustava. Glavni fokus bio je na promjenama u mreži uz promjene potrošnje ili proizvodnje električne energije. U kontekstu otočnog pogona, analizirane su ključne električne veličine, kao što su naponi, struje, frekvencije, radna i jalova snaga.

U prvoj simulaciji modeliran je mali otok s četiri sabirnice u otočnom pogonu. U trenutku od 0,1 sekunde dogodio se trolni kratki spoj na vodu 18, koji je prekinut nakon 150 ms. Promatrana su tri scenarija: proizvodnja veća od potrošnje, proizvodnja manja od potrošnje i proizvodnja jednaka potrošnji. U svim scenarijima zabilježen je pad napona tijekom kratkog spoja te njegovo povećanje nakon isključenja. Ustaljeno stanje napona ovisi o proizvodnji DG2. S većom proizvodnjom napon je veći, s manjom proizvodnjom napon je manji, dok su naponi oko 1 p.u. kada su proizvodnja i potrošnja jednake. Frekvencija raste u trenutku kratkog spoja, a veća proizvodnja rezultira većom vrijednošću frekvencije. Nakon toga, frekvencija opada i ustaljuje se. Radna i jalova snaga DG2 padaju tijekom kratkog spoja, a nakon isključenja se vraćaju na početne vrijednosti. Mreža kompenzira manjak ili višak snage, povećavajući svoju snagu kada DG2 proizvodi manje i obrnuto.

U drugoj simulaciji modeliran je veliki otok s 23 sabirnice u otočnom pogonu. Kratki spoj se dogodio na vodu 3 u trenutku od 0,1 sekunde, a prekinut je nakon 150 ms. Pad napona je zabilježen tijekom kratkog spoja, ali je bio znatno manji nego u malom otoku, osim na sabirnici koja je povezana s vodom 3 na kojem se dogodio kratki spoj. Veća proizvodnja rezultira manjim padom napona, dok manja proizvodnja uzrokuje veći pad napona. Na sabirnicama bliže DG1 zabilježen je veći napon, dok su najudaljenije sabirnice imale manji napon. Frekvencija pada od trenutka kratkog spoja do isključenja voda 3, nakon čega se stabilizira. Ustaljeno stanje frekvencije u velikom otoku je veće kada je proizvodnja veća, dok je u slučaju manje proizvodnje frekvencija manja u usporedbi s malim otokom. Na sabirnici 2 zabilježen je mali pad napona, dok frekvencija ostaje stabilna zahvaljujući mreži. DG1 pokazuje veće prijelazno stanje nego DG2 u malom otoku.

Ovaj rad pruža dubinsku analizu i uvid u ponašanje električnih veličina u otočnom pogonu, ističući ključne razlike između malih i velikih otoka te njihovu sposobnost održavanja stabilnosti mreže.

## SAŽETAK

Ovaj rad istražuje ponašanje elektroenergetskog sustava u uvjetima otočnog pogona dijela IEEE 33 sabirničkog sustava koristeći simulacije u programskom paketu DIgSILENT PowerFactory, s naglaskom na modeliranje IEEE 33 sabirničkog sustava. Glavni cilj bio je analizirati promjene električnih veličina poput napona, frekvencije, radne i jalove snage uz promjene potrošnje i proizvodnje. Analizirana su dva slučaja. Prva simulacija obuhvaća mali otok s četiri sabirnice u otočnom pogonu. Druga simulacija modelira veliki otok s 23 sabirnice. Analizirani su scenariji s proizvodnjom većom, manjom ili jednakom potrošnji. Rezultati pokazuju da elektroenergetski sustav dinamički reagira na promjene opterećenja i proizvodnje, održavajući stabilnost kroz prilagodbu napona, frekvencije, radne i jalove snage. Ova analiza doprinosi boljem razumijevanju ponašanja sustava u otočnom pogonu i pruža smjernice za optimizaciju rada otočnih sustava.

Ključne riječi: otočni pogon, elektroenergetski sustav, simulacija, DIgSILENT PowerFactory, napon, frekvencija, radna snaga, jalova snaga, kratki spoj, stabilnost sustava.

## ABSTRACT

This paper investigates the behaviour of an electrical power system under islanding conditions using simulations in the DIgSILENT PowerFactory software package, with a focus on modelling the IEEE 33-bus system. The main objective was to analyse the changes in electrical quantities such as voltage, frequency, active power, and reactive power with varying consumption and production. The study is divided into two main simulations. The first simulation encompasses a small island with four buses operating in islanding mode. The second simulation models a large island with 23 buses. Scenarios with production greater than, less than, or equal to consumption were analysed. The results show that the power system dynamically responds to changes in load and production, maintaining stability through the adjustment of voltage, frequency, active power, and reactive power. This analysis contributes to a better understanding of the system's behaviour in islanding mode and provides guidelines for optimizing the operation of islanded systems.

Keywords: islanding, power system, simulation, DIgSILENT PowerFactory, voltage, frequency, active power, reactive power, short circuit, system stability.

## LITERATURA

- [1] M. Ivas, A. Marusic, J. Havelka, T. Capuder: "Probability risk assessment of island operation event for large scale photovoltaic plant", *Automatika*, 60:2, 181-192, 2019.
- [2] Orkić, D.: Hibridne metode zaštite od otočnog pogona distribuiranih izvora, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, Osijek, 2020.
- [3] DiGSILENT GmbH. (2022). DiGSILENT PowerFactory (Verzija 2022) [Softverska aplikacija]. Dostupno na: <https://www.digsilent.de/en/powerfactory.html>
- [4] Šegota, V.: Otočni pogon niskonaponske mreže sa baterijskim spremnikom električne energije, Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, Rijeka, 2024.
- [5] Crnčan, D.: Utjecaj regulacije uzbude generatora na detekciju otočnog pogona, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, Osijek, 2020.
- [6] Ivas, M.: Vjerojatnost otočnoga pogona fotonaponske elektrane s više mrežnih izmjenjivačkih jedinica priključene na mrežu srednjega napona, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2019.
- [7] S. Misak, L. Prokop: "Off-grid power systems," 2010 9th International Conference on Environment and Electrical Engineering, Prague, Czech Republic, 2010, pp. 14-17
- [8] Nikolovski S., Knežević G.: Zaštita od otočnog pogona elektrana na biomasu u radu s distribucijskom mrežom, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, Osijek, 2016.
- [9] Rakarić, M.: Detekcija i zaštita od otočnog pogona elektrane, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, Osijek, 2016.
- [10] P. Mahat, Z. Chen and B. Bak-Jensen: "Review of islanding detection methods for distributed generation," 2008 Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, Nanjing, China, 2008, pp. 2743-2748,



- [11] Nikolovski S., Marić P., Vukobratović M.: Detekcija i zaštita od otočnog pogona distribuirane proizvodnje, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, Osijek, 2014.
- [12] Tanjić, M.: Analiza osjetljivosti detekcije otočnog pogona u sustavu s povećanjem integracija elektrana iz obnovljivih izvora energije, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, Osijek, 2018.
- [13] Tonkovic, T.: Problematika otočnog pogona u aktivnoj distributivnoj mreži, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, Osijek, 2023.
- [14] Khamis A., Shareef H. and Mohamed A.: Islanding detection and load shedding scheme for radial distribution systems integrated with dispersed generations. *IET Gener. Transm. Distrib.*, 9: 2261-2275., 2015.
- [15] MathWorks. MATLAB®. Natick, Massachusetts: MathWorks. Dostupno na: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>
- [16] Khamis, Aziah & Shareef, Hussain & Mohamed, Azah & Bizkevelci, Erdal. (2014). Islanding detection in a distributed generation integrated power system using phase space technique and probabilistic neural network. *Neurocomputing*. 148. 587–599. 10.1016/j.neucom.2014.07.004.
- [17] M. Ivas: Vjerojatnost otočnog pogona fotonaponske elektrane s više mrežnih izmjenjivačkih jedinica priključene na mrežu srednjeg napona, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2017.
- [18] Kaluđer, S.; Fekete, K.; Čvek, K.; Klaić, Z. Application of Artificial Neural Networks to Islanding Detection in Distribution Grids: A Literature Review. *Appl. Sci.* 2023, 13(24), 13047; <https://doi.org/10.3390/app132413047>.
- [19] T.Sauer, J.A. Yorke, M. Casdagli, *Embedology, J. Stat. Phys* 65(3–4), (1991), 579–616.
- [20] hien-Cheng Lee, Pau-Choo Chung, Jea-Rong Tsai and Chein-I Chang, "Robust radial basis function neural networks," in *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, vol. 29, no. 6, pp. 674-685, Dec. 1999, doi: 10.1109/3477.809023.
- [21] Z. Ghazanfar: Radial Basis Functions Neural Networks All We Need To Know, LinkedIn Corp, 2022. Dostupno na: <https://www.linkedin.com/pulse/radial-basis-functions-neural-networks-all-we-need-know-ghazanfar>

[22] S. Subramanian: Understanding Probabilistic Neural Networks (PNN): A Comprehensive Overview, LinkedIn Corp, 2023. Dostupno na: <https://www.linkedin.com/pulse/understanding-probabilistic-neural-networks-pnn-shreenath-subramanian-8u9oc>

[23] MN, Hajmeer & Basheer, Imad. (2002). A probabilistic neural network (PNN) approach for modeling and classification of bacterial growth/no-growth data. *Journal of microbiological methods*. 51. 217-26.