

# Hibridni sustavi za autonomno napajanje električnom energijom

---

Štemberga, Helena

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:340757>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-04**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Sveučilišni diplomski studij elektrotehnike

Diplomski rad

**HIBRIDNI SUSTAVI ZA AUTONOMNO NAPAJANJE  
ELEKTRIČNOM ENERGIJOM**

Rijeka, srpanj 2024.

Helena Štemberga  
0069086764

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Sveučilišni diplomski studij elektrotehnike

Diplomski rad

**HIBRIDNI SUSTAVI ZA AUTONOMNO NAPAJANJE  
ELEKTRIČNOM ENERGIJOM**

Mentor: prof. dr. sc. Vitomir Komen

Rijeka, srpanj 2024.

Helena Štemberga  
0069086764

Rijeka, 19.03.2024.

Zavod: Zavod za elektroenergetiku  
Predmet: Tehnika visokog napona

## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Helena Štemberga (0069086764)**  
Studij: Sveučilišni diplomski studij elektrotehnike (1300)  
Modul: Elektroenergetika (1332)

Zadatak: **HIBRIDNI SUSTAVI ZA AUTONOMNO NAPAJANJE ELEKTRIČNOM ENERGIJOM**

### Opis zadatka:

Potreba i opravdanost za sustavima autonomnog napajanja električnom energijom. Osnovna struktura i elementi sustava za autonomno napajanje. Tehnička rješenja i dimenzioniranje sustava za autonomno napajanje električnom energijom. Ekonomsko opravdanje sustava za autonomno napajanje.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanja diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

Zadatak uručen pristupniku: 20.03.2024.

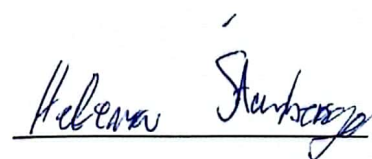
Mentor:  
prof. dr. sc. Vitomir Komen

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:  
prof. dr. sc. Dubravko Franković

## IZJAVA

U skladu s člankom 9. Pravilnika o diplomskom radu, diplomskom ispitu i završetku diplomskih sveučilišnih studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, od 2017., izjavljujem da sam ovaj diplomski rad izradila samostalno, uz pomoć mentora i navedene literature prema zadatku, Klasa:602-04/18-07/45, Ur. br.: 2170-15-14-18-1,

Rijeka, 04.07.2024.



Helena Štemberga



## Sadržaj

<b>1. UVOD</b> .....	1
<b>2. HIBRIDNI SUSTAVI ZA AUTONOMNO NAPAJANJE ELEKTIČNOM ENERGIJOM</b> .....	2
<b>3. POTREBA I OPRAVDANOST ZA SUSTAVIMA AUTONOMNOG NAPAJANJA ELEKTRIČNOM ENERGIJOM</b> .....	5
3.1. Ekonomski aspekt primjene autonomnih sustava napajanja .....	5
3.2. Društveni čimbenici.....	7
3.3. Dekarbonizacija i zaštita okoliša .....	8
3.4. Izazovi u primjeni autonomnih sustava napajanja.....	9
<b>4. OSNOVNA STRUKTURA I ELEMENTI SUSTAVA ZA AUTONOMNO NAPAJANJE</b> .....	11
4.1. Baterijsko skladište električne energije .....	11
4.2. Dvosmjerni pretvarač .....	13
4.3. Solarni paneli.....	14
4.4. Vjetroturbine.....	14
4.5. Dizel generator .....	14
<b>5. TEHNIČKA RJEŠENJA I DIMENZIONIRANJE SUSTAVA ZA AUTONOMNO NAPAJANJE ELEKTRIČNOM ENERGIJOM</b> .....	15
5.1. Primjena autonomnih sustava napajanja u rudnicima .....	17
5.2. Primjena autonomnih sustava na otocima .....	19
5.3. Primjer analize stabilnosti otočnog rada.....	20
5.4. Primjena autonomnih sustava u ruralnim (udaljenim) zajednicama .....	27
<b>6. PRIMJER OTOČNOG HIBRIDNOG SUSTAVA ZA AUTONOMNO NAPAJANJE (MIKROMREŽE)</b> .....	32
6.1. Tehnički podaci mikromreže .....	36
6.2. Upravljanje energijom u sustavu .....	38
6.3. Operativni problemi i vremenske nepogode.....	38
6.4. Poboljšanje performansi sustava .....	41
<b>7. EKONOMSKO OPRAVDANJE SUSTAVA ZA AUTONOMNO NAPAJANJE</b> ....	43
7.1. Poslovni slučaj za otočni komunalni sustav .....	43
7.2. Ekonomski model otočne mikromreže .....	49

<b>8. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>55</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>56</b>
<b>POPIS SLIKA.....</b>	<b>58</b>
<b>Sažetak i ključne riječi.....</b>	<b>59</b>
<b>Summary and key words .....</b>	<b>60</b>



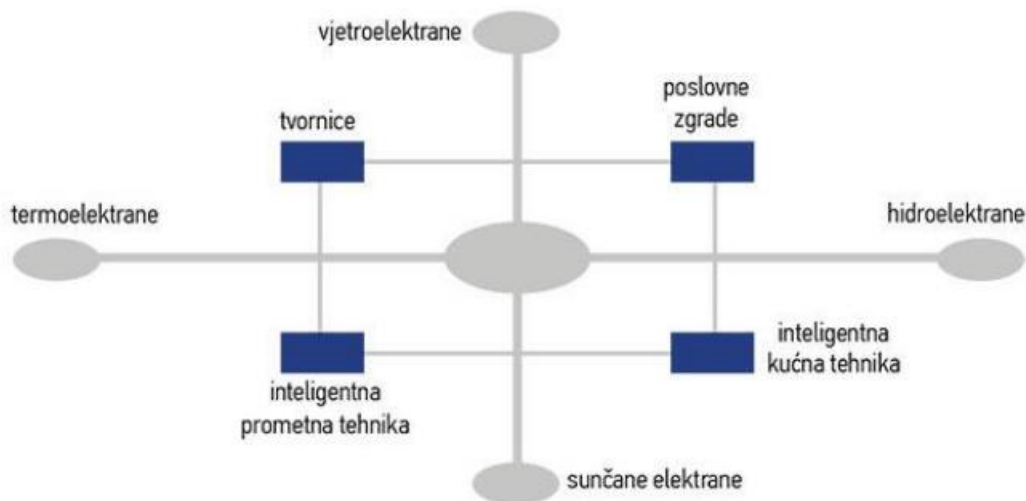
## 1. UVOD

U današnje doba, električna energija igra ključnu ulogu u gotovo svim aspektima ljudskog života, od rasvjete i grijanja domova do pokretanja industrijskih postrojenja i napajanja električnih uređaja. Sveprisutna potreba za električnom energijom u svakodnevnom životu čini je vitalnim resursom u gospodarstvu i društvu u cjelini. Dostupnost električne energije spada u neke od osnovnih čimbenika kvalitetnog životnog standarda. Javlja se sve veća potrošnja električne energije uzrokovana porastom broja stanovnika i povećanjem korištenja energije po stanovniku i povećanja broja tehnoloških rješenja u svijetu. Od 60-ih godina do današnjice, broj stanovnika je od 3.3 milijarde dosegno 7.8 milijardi stanovnika prema podacima iz 2021. godine. Zbog razvoja tehnologije, industrije, modernog načina i kvalitete života, raste i potrošnja energije po osobi. Iako ljudi u razvijenim civilizacijama dostupnost električnoj energiji smatraju standardom, u svijetu još uvijek postoji oko 1.1 milijarda ljudi koji nemaju pristupa električnoj energiji posebice u zemljama u razvoju gdje većina stanovnika živi u ruralnim područjima. Ukoliko bi se elektrifikacija tih područja provodila pomoću ožičavanja ili izgradnje novih energetske kapaciteta baziranih na starim tehnologijama i fosilnim gorivima, zbog eksponencijalnog porasta stanovništva, istraživanja estimiraju da bi 2030. godine električna energija bila nedostupna za 1.4 milijarde stanovnika. Osim stanovnika ruralnih područja, problema sa opskrbom električne energije ima i nekoliko tisuća autonomnih sustava napajanja kao što su rudnici, otoci ili udaljene zajednice. Većina njih električnu energiju proizvode iz fosilnih goriva što u konačnici rezultira velikim cijenama električne energije, visokim emisijama CO<sub>2</sub> i razljevima goriva prilikom transporta. Ugrožen je i sam pristup fosilnim gorivima zbog njihovog općeg nedostatka te u takvim sredinama često transport ovisi o ekstremnim vremenskim uvjetima.

Hibridni sustavi za autonomno napajanje postaju ključan dio rješenja. Integracijom različitih obnovljivih izvora poput solarnih panela, vjetroelektrana i hidroelektrana s konvencionalnim izvora energije poput generatora na fosilna goriva ili baterija, hibridni sustavi mogu pružiti stabilno, pouzdano i u većini slučajeva održivo napajanje električnom energijom. Osim što nude ekološke prednosti dekarbonizacije u autonomnim područjima, u ovom radu biti će pokazana i njihova financijska isplativost kroz smanjenje troškova električne energije, optimizacija radnih procesa i smanjena ovisnost o tradicionalnim, često skupim izvorima energije.

## **2. HIBRIDNI SUSTAVI ZA AUTONOMNO NAPAJANJE ELEKTRIČNOM ENERGIJOM**

Hibridnim sustavom smatra se energetska rješenje koje koristi kombinaciju dva ili više izvora koji se međusobno nadopunjuju i osiguravaju stabilno napajanje električnom energijom. Ovakav pristup napajanju omogućuje iskorištavanje prednosti svakog izvora energije, dok se istovremeno smanjuju nedostaci pojedinog izvora kako bi se osigurala kontinuirana opskrba električnom energijom. Hibridni sustavi mogu kombinirati širok spektar izvora energije uključujući obnovljive izvore energije poput solarne energije, energije vjetra, hidroenergije ili biomase sa konvencionalnim izvorima poput fosilnih goriva. Integracijom različitih izvora energije u sustav napajanja omogućuje prilagodljivost i otpornost na promjene u uvjetima okoline i potražnji energije. Iako se kroz energetska tranziciju teži potpunoj dekarbonizaciji, hibridni sustavi još uvijek se smatraju najučinkovitijim sustavima proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora. Kako su obnovljivi izvori energije skloni dnevnim i sezonskim promjenama, odnosno varijabilnost sunca kroz dan i godinu, jačinu vjetra ili razinu vode, važno je energiju pohranjivati u spremnicima kako bi sustav osigurao neprekidno napajanje. Spremnici električne energije smatraju se vodećim rješenjem za osiguranje neprekidnog napajanja industrije ili kućanstava, a sami hibridni sustavi posebni su jer ne ovise samo o jednom prirodnom resursu, već o više njih koji se nadopunjuju. Time se učinkovitost sustava i količina energije za uporabu povećava osiguravajući pouzdano napajanje. Po svom začetku, hibridni sustavi najviše su se koristili u industriji i za napajanje većih poslovnih zgrada i postrojenja jer su za manja napajanja dovoljni samostalni prirodni izvori, ali se zbog potrebe za dekarbonizacijom i napretkom tehnologije takvi sustavi šire i na kućanstva i autonomne sustave. [1]



Slika 2.1. Hibridni sustav[2]

Pojedine zgrade ili industrije, kako je prikazano na slici 2.1. ne moraju nužno koristiti iste izvore energije. Na slici 2.1. je prikazan hibridni sustav napajanja četiri jedinice od kojih neke koriste zajedničke izvore. Slika prikazuje kako jedan izvor može proizvesti dovoljno energije za napajanje više jedinica i mogućnost prestanka proizvodnje iz jednog izvora bez prestanka napajanja pojedinog objekta.[2]

U nastavku su navedene neke od prednosti i mogućih nedostataka hibridnih sustava koji se moraju uzeti u obzir prilikom razmatranja njihove primjene. Neke od glavnih prednosti hibridnih sustava su njihova pouzdanost, odnosno kombinacijom različitih izvora se osigurava kontinuirano i stabilno napajanje čak i u uvjetima kada je jedan od izvora u kombinaciji nedostupan. Osim pouzdanosti, hibridni sustavi predstavljaju održivo rješenje na globalnoj razini, odnosno njihovom integracijom smanjuju se emisije stakleničkih plinova i negativan utjecaj na okoliš. Fleksibilni su i mogu se prilagoditi različitim uvjetima, zahtjevima i promjenama u potrošnji električne energije. Ukoliko se optimizira korištenje pojedinih izvora u hibridnom sustavu, konačni troškovi električne energije mogu se bitno smanjiti u odnosu na troškove u tradicionalnim energetske sustavima. Prednosti su se pokazale posebno važnima u udaljenim i izoliranim područjima gdje nije dostupna javna mreža pa se javlja potreba za autonomnim napajanjem.

Međutim, važno je razmotriti pojedine potrebe i uvjete svakog projekta prije donošenja odluke o implementaciji hibridnog sustava jer usprkos brojnim prednostima, hibridni sustavi nose i određene nedostatke. Primjerice, projekti i integracije hibridnih sustava često zahtijevaju velike početne troškove i investicije u odnosu na integracije tehnologija tradicionalnog energetske sustava. Također zbog zastarjele infrastrukture energetske

sustava sama implementacija takvih tehnologija može povećati troškove i složenost sustava što zahtijeva potrebu za dodatnim obrazovanjem kako bi se održavanje i upravljanje sustava uspješno provodilo. Velika je ovisnost o vremenskim uvjetima jedan je od bitnijih nedostataka jer se hibridni sustavi najčešće oslanjaju na obnovljive izvore energije koji su podložni promjenama što može utjecati na dostupnost električne energije. Prije samog projektiranja hibridnog sustava važno je u obzir uzeti meteorološke podatke iz područja na kojem se planira izgradnja hibridnog sustava. Također, potrebno je osigurati dovoljno prostora za izgradnju tehnologija koje bi zajedno radile, u većini slučajeva, instalacija komponenata za hibridni sustav često iziskuje više prostora od tradicionalnih tehnologija. Primjerice, iako ugradnja svake elektrane ovisi o nekoliko čimbenika, grubo se može napraviti usporedba prostora koju bi zauzimala jedna solarna elektrana u usporedbi sa jednom klasičnom termoelektranom na ugljen [3]. Ukoliko se želi izgraditi solarna elektrana snage 200 MW, zauzimala bi znatno veći prostor od termoelektrane jednake snage. Budući da se solarni paneli postavljaju na otvorenom kako bi uhvatili sunčevu energiju tipično solarna elektrana snage 200 MW zauzela bi prostor od oko 2 000 000 m<sup>2</sup> dok bi termoelektrana na ugljen jednake snage zauzimala oko 10-20 hektara, odnosno između 100 000- 200 000 m<sup>2</sup> ovisno o tehnologijama koje se koriste [4]. Kako su neka područja reljefno ili kulturno prostorno ograničena, implementacija hibridnih sustava može biti veoma zahtjevna. Osim ovih čimbenika, hibridni sustavi zahtijevaju redovito održavanje i edukaciju osoblja kako bi se osigurale optimalne performanse i produžio životni vijek sustava [5].

Sagledaju li se zajedno prednosti i nedostaci, prednosti često nadmašuju nedostatke posebno u sredinama gdje su stabilnosti napajanja, održivost i autonomnost od ključne važnosti.

### **3. POTREBA I OPRAVDANOST ZA SUSTAVIMA AUTONOMNOG NAPAJANJA ELEKTRIČNOM ENERGIJOM**

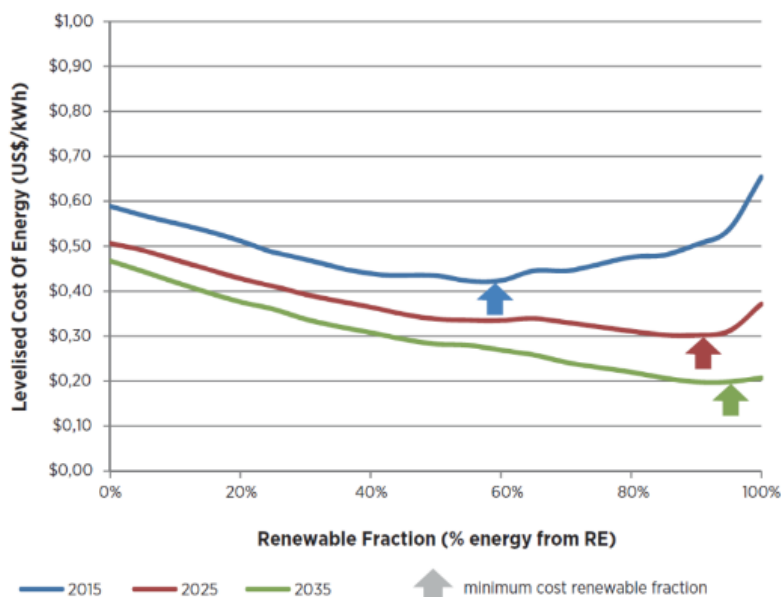
Hibridni energetske sustavi temeljeni na lokalno dostupnim obnovljivim izvorima energije predstavljaju atraktivno rješenje iz ekonomskih, ekoloških i društvenih razloga [1]. Ovakvi sustavi, osim pružanja pouzdanog i održivog napajanja električnom energijom, također mogu ubrzati razvoj ruralnih područja. Mnogi elektroenergetski sustavi diljem svijeta se oslanjaju na dizel agregate koji sa sobom nose određene nedostatke kao što su visoki troškovi goriva, nestabilne cijene i ograničena dostupnost u ruralnim i udaljenim područjima. Za razliku od dizel agregata, obnovljivi izvori energije i tehnologije skladištenja energije postaju sve jeftiniji i pouzdaniji, što njihovu implementaciju čini sve atraktivnijim izborom za opskrbu energijom u ruralnim područjima. Kao i u gusto naseljenim dijelovima svijeta, povećava se potražnja za električnom energijom i u ruralnim područjima što potiče potrebu za novijim pristupima opskrbi energijom. Tehnologije hibridnih sustava mogu zadovoljiti potražnju na održiv i ekonomski isplativ način uzimajući u obzir zaštitu okoliša. Hibridni sustavi su na taj način u prednosti u odnosu na tradicionalne pristupe opskrbi energijom u ruralnim područjima. Osim ekonomske isplativosti i povećane potražnje za električnom energijom, povećava se i svijest o smanjenju emisija CO<sub>2</sub> i potrebi za dekarbonizacijom radi suzbijanja klimatskih promjena. Dekarbonizacija, odnosno odmicanje od fosilnih goriva i prihvaćanje obnovljivih i održivih izvora energija je ključna komponenta energetske tranzicije industrije, zajednica i otoka. Važna je za zadržavanje globalnog zatopljenja ispod 2°C u odnosu na predindustrijsko doba, a regulatorni okviri i propisi koji potiču dekarbonizaciju se svakodnevno razvijaju.

#### **3.1. Ekonomski aspekt primjene autonomnih sustava napajanja**

Ekonomija autonomnih sustava često je određena nizom čimbenika poput cijene goriva na određenoj lokaciji, dostupnost lokalnih energetske resursa ili postojeće energetske infrastrukture. Pojedina mjesta i slučajevi su specifični pa se za svaki zahtjeva lokalno istraživanje, ali dodirne točke i zajednički problemi autonomnih sustava mogu pružati uvid u opći ekonomski aspekt opskrbe električnom energijom u autonomnim područjima. Iako su obnovljivi izvori kompetentni sa fosilnim gorivima, ekonomska isplativost obnovljivih izvora energije često ovisi o nacionalnoj politici i variranju međunarodnih cijena energije. Prepreku u potpunoj tranziciji prema održivim izvorima energije posebno predstavljaju države koje subvencioniraju fosilna goriva, odnosno države čije vlade pružaju financijsku podršku u proizvodnji, distribuciji i potrošnji fosilnih goriva kroz direktne financijske podrške ili porezne

olakšice. U zemljama gdje se fosilna goriva subvencioniraju kako bi troškovi opskrbe energije ostali niski, obnovljivi izvori energije ne mogu uvijek konkurirati s fosilnim gorivima. Subvencije za fosilna goriva mogu predstavljati značajan financijski teret za vlade koje te subvencije pružaju. Iako potrošači plaćaju električnu energiju po niskoj cijeni, subvencioniranje fosilnih goriva rezultira značajnim povećanjem emisija stakleničkih plinova i potiče neodgovornu potrošnju kod krajnjih potrošača. Kako rezerve fosilnih goriva nestaju, ovakve države i udaljene zajednice se sve više okreću hibridnim sustavima. Ovakav je slučaj bio, kao primjer, u Indoneziji 2007. godine, gdje su subvencije za gorivo činile više od 20% državnog proračuna. Indonezija je smanjenjem ovih subvencija potaknula prelazak na obnovljive izvore energije i od tada bilježi značajan rast hibridnih sustava. Države sve manje subvencioniraju fosilna goriva, a u 2022. najveću subvenciju fosilnih goriva imao je Katar i iznosila je 19% ukupnog državnog proračuna.

Ključna prednost obnovljivih izvora energije je njihova održivost i mogućnost raznolikosti opskrbe energijom. Solarna energija i energija iz vjetroagregata predstavljaju velike mogućnosti opskrbe. Razvojem tehnologije njihova je cijena sve niža, a kontinuirani pad troškova potiču njihovo korištenje u autonomnim sustavima napajanja. Osim smanjenja rezervi fosilnih goriva, ona su često skupa i njihove su tehnologije neučinkovite. Krajnji potrošači električne energije sustava autonomnih napajanja često električnu energiju plaćaju više nego krajnji potrošači na kopnu, a ta cijena može doseći od 2-5 puta veću od one na kopnu zbog troškova transporta. Istraživanja IRENA-e pokazala su kako uvođenje obnovljivih izvora energije zajedno s pametnim tehnologijama, automatizacijom i skladištenjem energije može smanjiti troškove napajanja autonomnih zajednica za čak 25% ili više.



Slika 3.1. Troškovi električne energije u ovisnosti udjela obnovljivih izvora energije[1]

Kako je prikazano na slici 3.1. crvenom linijom (2025) i zelenom linijom (2035), IRENA (Međunarodna agencija za obnovljive izvore energije) predviđa kako će tehnološke inovacije smanjiti troškove električne energije u autonomnim zajednicama, bez obzira na količinu implementirane i korištene obnovljive energije. Smatra se kako će se najveće uštede postići povećanim korištenjem obnovljivih izvora. Dakle, korištenje obnovljive energije će smanjiti prosjek cijene električne energije, uz to da postoji optimalan iznos ulaganja kako bi se minimizirali troškovi električne energije u autonomnim zajednicama. Značajan dio svjetske energije se troši u rudnicima, gdje je ključno pouzdano i stabilno napajanje. Povećanje obnovljivih izvora u rudarstvu imalo bi značajan utjecaj na globalnu dekarbonizaciju.

### 3.2. Društveni čimbenici

Dostupnost pouzdane energije ključno je sredstvo za smanjenje siromaštva. Cilj održivog razvoja je poboljšati pouzdanost i kvalitetu energije za društvo što uključuje i poboljšanje kvalitete života za jednu milijardu ljudi koji žive u sirotinjskim četvrtima građenim bez plana koje su povezane s lošim životnim uvjetima, prenaseljenosti i kriminalom. Pouzdano napajanje omogućilo bi ruralnim zajednicama da napajaju škole ili bolnice te manja poduzeća i na taj način energija bi se koristila produktivno, a ruralne zajednice ostvarivale bi određene prihode potrebne za poboljšanje životnih uvjeta. Stabilna opskrba energijom i učinkovito korištenje tih usluga pomaže u poticanju gospodarskog rasta i uz pristupačne cijene električne energije omogućuje brži razvoj tržišta, lakši pristup pitkoj vodi i učinkovitim javnom

prijevozu. Prema izvještaju Programa pomoći u upravljanju energetskim sektorom (ESMAP) iz 2015. godine, izazov pristupa energiji ne odnosi se samo na 1.1 milijardu kućanstava koje nemaju pristup električnoj energiji već se odnosi i na stotine milijuna kućanstava diljem svijeta koja ima nepouzdanu i lošu opskrbu električnom energijom. U izvještaju se također ističe kako opskrba električnom energijom mora biti pouzdana odnosno primjenjuje se niz zahtjeva i čimbenika kao što su prikladna količina energije, dostupnost, dobra kvaliteta te pristupačnost i sigurnost. Hibridni sustavi napajanja predstavljaju ključnu tehnologiju za ostvarenje cilja održivog razvoja UN-a koji se zalaže za „pristupačnu, pouzdanu, održivu i modernu energiju za sve“ do 2030. godine. Hibridni sustavi imaju potencijal da razvojem pružaju kvalitetnu uslugu koja se može usporediti s onom u najrazvijenijim sustavima diljem svijeta poput Sjeverne Amerike, Australije, Europe i sjeveroistočne Azije. Mnogo zemalja doniraju različitim sektorima u skladu s njihovim preferencijama i prioritetima razvoja. Međutim, kako bi lokalna i nacionalna ekonomija imala koristi od donacija, važno je da se razvoju ne pristupa na razini jednog sektora već kao cjelini. Takav integrirani pristup zahtjeva bolju koordinaciju među donatorima kako bi se postigla maksimalna sinergija.

### **3.3. Dekarbonizacija i zaštita okoliša**

Dekarbonizacija postaje ključna za mnoge sektore i velike industrije među kojima su i rudnici. Industrije sve više prepoznaju važnost održivosti te se sve više teži dekarbonizaciji i ulaganjima pritiskane visokim cijenama emisija CO<sub>2</sub>. Također, kako cijene emisija i fosilnih goriva rastu, tako se cijene obnovljivih izvora energije smanjuju i postaju sve dostupnije.

Na mnogim otocima zaštita okoliša i eko sistema je već dugo prioritet. Osnovane su globalne inicijative od kojih je među poznatijima inicijativa „Ozelenjavanje otoka“ sa oko 7000 otoka članica od kojih su značajni oni u turističkim područjima poput Arube i Robben Islanda. U Europi, prvi od otoka koji je implementirao obnovljive izvore energije je otok Kythnos u Grčkoj sa ugradnjom vjetrovika 1982. godine, a uskoro nakon toga implementiran je i solarni sustav. U Grčkoj se u posljednjih nekoliko godina regulatorni okvir vezan za obnovljive izvore sve više razvija kako bi se povećala integracija obnovljivih izvora u sustav posebno da se omogući veći prodor obnovljivih izvora u međusobno ne povezane otoke uvođenjem hibridnih sustava i skladišta.

Nadalje, mnoge udaljene zajednice se nalaze u osjetljivim ekosustavima te su prisiljene da smanje svoj utjecaj na okoliš kako ne bi ugrozile kvalitetu zraka i utjecale na biljni i životinjski svijet. Ova činjenica dodatno potiče potrebu za prelaskom na održive načine proizvodnje i potrošnje energije.



### **3.4. Izazovi u primjeni autonomnih sustava napajanja**

#### **Financiranje projekata**

Hibridni sustavi mogu zahtijevati značajna ulaganja unaprijed, a dobivanje pristupa investicijama može biti izazovno posebice u udaljenim područjima koja često imaju poteškoća sa dobivanjem kredita ili visokim i promjenjivim kamatnim stopama koje mogu smanjiti troškove financiranja investicija ukoliko je područje u koje se ulaže visoko rizično što se tiče povrata sredstava. Svakako postoje autonomne zajednice koje bilježe velike uspjehe s uvođenjem hibridnih sustava. Neke od njih su udaljene zajednice na Aljasci i u Australiji. Aljaska je među prvim zemljama koje su integrirale vjetroturbine u sustav mreže pomoću dizel agregata sa ciljem da smanji ovisnost o uvozu goriva. Prema podacima iz 2022. Australija ima 9126 MW instalirane snage iz vjetroelektrana. Ono što je zajedničko ovim regijama jest to što se nalaze u zemljama s uspješnim gospodarstvom. Prepreke s kojima su se ove zajednice suočavale kod implementacije hibridnih sustava su rizici vezani uz upravljanje ovim tehnologijama i primjena metoda te implementacija novih algoritama koji se nikada prije nisu primjenjivali. Međutim, kako je veći broj rudnika instalirao hibridne sustave uz pozitivne rezultate na okoliš i troškove, povjerenje u nove tehnologije svakodnevno raste.

#### **Operativno upravljanje**

Modeli temeljeni na zajednici ili uslužnim djelatnostima igraju ključnu ulogu u provedbi projekata ruralne elektrifikacije i diljem svijeta su već isprobani. Sudjelovanje zajednice kroz financiranje ili neke druge načine ključno je za uspjeh provedbe projekata. Zajednice se često suočavaju s problemima lošeg upravljanja, tehničkih i administrativnih problema, gdje se posebno naglašava važnost poslovnog planiranja u ruralnim zajednicama. Također se koriste i modeli temeljeni na uslužnim djelatnostima koji su se diljem svijeta pokazali učinkovitima. Komunalna poduzeća obično imaju više iskustva, kadra i tehničkih sposobnosti za provođenje projekata ruralne elektrifikacije. Mogu iskoristiti svoj središnji položaj za isporuku zahtijevanih rješenja iako mnogima od njih nedostaje stručnost na lokalnoj razini. Kako bi ovaj model poslovanja bio uspješan mora se voditi poslovno orijentiranim pristupom gdje je važna opremljenost stručnim kadrom i profit, a često se koriste privatni i javni korisni modeli. Rano uključivanje lokalne zajednice, potencijalnih korisnika i drugih sudionika, uključujući nevladine organizacije, ključno je za postizanje lokalnog prihvaćanja projekta. Rano sudjelovanje može olakšati bolje razumijevanje potrebe za izgradnjom kapaciteta, odgovarajućom tarifnom strukturom, obrazovanjem i obukom. Ranim uključivanjem zajednice se može osigurati da rezultirajuća ponuda zadovoljava zahtjeve zajednice.

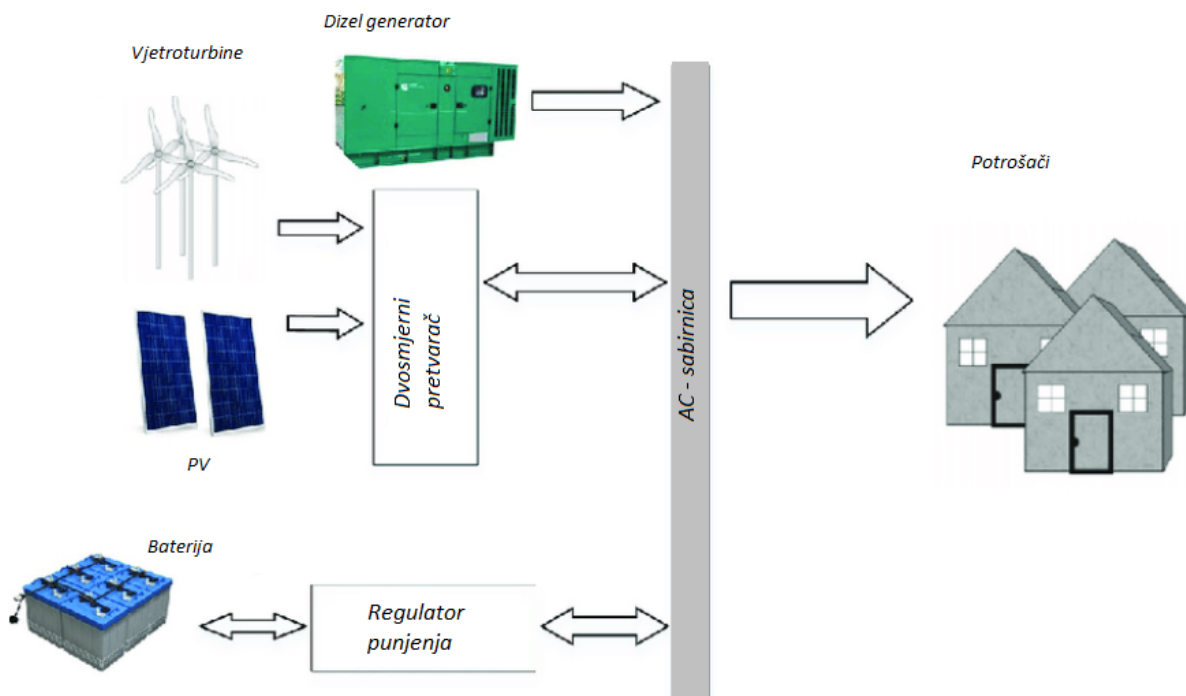
Dovođenje energije do prethodno neopskrbljenih zajednica uključuje i tehnološke i društvene inovacije, a hibridni sustavi nude lokalnim poduzetnicima mogućnosti za ulaganje i pokretanje poslova.

### **Sektorsko upravljanje**

Upravljanje projektima i velikim ulaganjima često uključuje širok raspon sudionika, od međunarodnih do lokalnih što u autonomnim jedinicama zbog udaljenosti može otežati suradnju. Primjerice, Svjetska banka podržala je elektrifikaciju autonomnih zajednica koje imaju za cilj poboljšati pristup električnoj energiji za stanovništvo u udaljenim zajednicama gdje su šanse za dobivanje električne energije proširenjem mreže u razumnom vremenskom roku niske. Ovi projekti često uključuju aranžman drugih sudionika osim vlada, kao što su privatni sektori kako bi se smanjio pritisak na već preopterećene komunalne usluge. Ovisno o perspektivi vlade, moguće je da dođe do neusklađenosti što može dodatno otežati financiranje. U Europi je pokrenuta „Inicijativa za čistu energiju za otoke EU“ s ciljem proizvodnje visokoučinkovite i održive energije na otocima. Potrebno je testirati protokole, ekonomske čimbenike i zahtjeve za ruralna i udaljena područja te sigurnost i održavanje pogona. Hibridni sustavi nude mogućnosti korištenja lokalno dostupnih izvora energije, pod uvjetom da postoji povoljno poslovno okruženje koje može privući lokalna i međunarodna ulaganja i podržati razvoj zajednice.

## 4. OSNOVNA STRUKTURA I ELEMENTI SUSTAVA ZA AUTONOMNO NAPAJANJE

U ovom se poglavlju obrađuje struktura i elementi sustava za autonomno napajanje te njihove karakteristike.



Slika 4.1. Hibridni sustav za autonomno napajanje (mikro mreža)[6]

### 4.1. Baterijsko skladište električne energije

Baterijsko skladište električne energije je vrsta spremnika energije, a za pohranu koristi skupinu baterija. Skladištenje energije je najbrži izvor energije i stoga se koristi za stabilizaciju mreže. Energija iz baterija može prijeći iz stanja pripravnosti na punu snagu za manje od jedne sekunde i na taj način se nosi s nepredviđenim problemima u mreži. Skladišta se obično dizajniraju tako da mogu nekoliko sati raditi punom nazivnom snagom. Moguće ih je koristiti za kratkotrajna vršna opterećenja, pružanje rezerve i stabilizaciju frekvencije da bi se smanjila mogućnost nestanka struje. Obično se postavljaju u blizini aktivnih elektrana i spajaju na istu mrežu kako bi se smanjili troškovi. Prednost je što baterijska skladišta ne zahtijevaju isporuku goriva što znači da im nisu potrebni veliki dimnjaci ili veliki rashladni sustavi, moguće ih je brzo instalirati i postaviti blizu mjesta potrošnje. Kapaciteti im mogu biti u redovima GWh, dok najčešće mogu otpremiti nekoliko stotina MWh. Baterije ne moraju biti velike, ukoliko ne postoji dovoljno prostora za veće skladište na jednom mjestu

već mogu biti distribuirane širom mreže čime se povećava redundancija i ukupni kapacitet. Cijene baterija rapidno padaju kroz godine pa je estimirana cijena u 2024. godini oko 148 \$/kWh što je oko 18% manje nego u 2023. kada je cijena iznosila oko 180 \$/kWh iako ona uvelike ovisi o kojoj je vrsti baterije riječ [6].

### **Struktura baterijskih skladišta**

Funkcioniraju kao besprekidni sustavi napajanja (UPS), samo što su veće. Radi sigurnosti, baterije se smjeste u skladišta ili kućišta. Baterija ne sprema direktno električnu energiju, već je pretvara u kemijsku i kao takvu skladišti. U mogućnosti su skladištiti energiju koja teče u samo jednom smjeru pa mogu proizvoditi samo DC struju. Električne mreže obično rade s AC strujom zbog čega su potrebni dodatni pretvarači za spajanje baterijskih skladišta na mrežu. Ovisno o omjeru snage i energije, očekivanom životnom vijeku i troškovima mogu se koristiti razne baterije. 80-ih godina koristile su se olovne baterije u prvim skladištima energije, a tokom sljedećih desetljeća razvile su se nikal-kadmij i natrij-sumporne baterije. U današnje vrijeme se najviše koriste litij-ionske baterije zbog brzog pada njihovih cijena na tržištu. Baterijska skladišta zahtijevaju nadzor i praćenje njihovih karakteristika kako bi se baterije mogle zamijeniti u slučaju pada njihove učinkovitosti ili kapaciteta ispod određenog praga. Ponavljanjem ciklusa punjenja i pražnjenja životni vijek baterije se skraćuje. Što su veće brzine punjenja baterije brže stare zbog iskorištenja kemijske tekućine. Kod starenja baterije gube svoj početni kapacitet, sve se više pregrijavaju i ukoliko se na vrijeme ne zamjeni može doći do curenja elektrolita, požara ili eksplozije. Ponekad se baterijska skladišta kombiniraju sa sustavima za pohranu sa zamašnjakom koji pohranjuju električnu energiju rotirajućeg dijela što može produljiti životni vijek baterije [7].

### **Baterije na bazi olovne kiseline**

U početku su se kod baterijskih skladišta koristile olovne baterije. Za razliku od modernijih baterija, olovne baterije imaju relativno nisku gustoću energije. Nisu u stanju isporučiti visoke udarne struje. Nezabrtvljene olovne baterije proizvode vodik i kisik iz elektrolita kada se prepune. Potrebno je redovito puniti vodu kako bi se izbjeglo oštećenje baterije i zapaljivi plinovi se moraju ispuštati kako bi se izbjegla eksplozija baterije. Ovakvo održavanje je skupo u usporedbi s novijim litij-ionskim baterijama [7].

### **Baterije na bazi litija**

Litij-ionske baterije imaju dulji životni vijek bez posebnog održavanja. Često imaju visoku gustoću energije i nisko samopražnjenje. One su glavni predstavnik današnjih baterijskih

spremnika. Jedna od mana litij-ionskih baterija je opasnost od požara. Kroz povijest litij-ionske baterije uzrokovale su mnogo požara poput onog u Illinoisu gdje je evakuirano tisuće stanovnika ili požara u Južnoj Koreji gdje su se u dvije godine dogodila 23 požara u skladištima baterija. Ovakvi požari mogu osloboditi mnogo opasnih plinova kao što je otrovni i visoko korozivni fluorovodik. Zbog toga su provedena mnoga istraživanja kako bi se povećala njihova sigurnost, a u 2024. litij-željezno-fosfatna baterija postala je najkonkurentniji oblik za velika skladišta baterija i visoke sigurnosti u odnosu na druge baterije na bazi litija [7].

### **Baterije na bazi natrija**

Natrij-ionske baterije su jeftinije i sigurnije od litij-ionskih, a imaju slične karakteristike kod isporuke energije, međutim imaju manju gustoću energije. Princip rada i konstrukcija vrlo su slični litij-ionskim baterijama. Neke vrste mogu sigurno raditi na visokim temperaturama (natrij- sumporna). Baterije na bazi natrija još se uvijek razvijaju i nisu u potpunosti komercijalizirane [7].

### **Radne karakteristike**

Skladišta energije nemaju mehaničke dijelove stoga mogu brzo djelovati i imaju kratko vrijeme pokretanja (oko 10 ms). Kada električne mreže rade pri maksimalnom kapacitetu baterije mogu brzo prigušiti oscilacije u naponu i frekvenciji i na taj način spriječiti pojavu nestabilnosti. Također se mogu koristiti za ravnjanje krivulje opterećenja [6].

## **4.2. Dvosmjerni pretvarač**

Pomoću dvosmjernog pretvarača solarna energija može konkurirati tradicionalno proizvedenoj energiji poput one iz fosilnih goriva. Uobičajeni pretvarači rade samo u jednom smjeru, odnosno pretvaraju tipično DC energiju u AC. Dvosmjerni pretvarači imaju mogućnost pretvarati AC-DC i DC-AC. Dodavanje dvosmjernog pretvarača sustavu solarne energije čini ga učinkovitijim, sigurnijim i fleksibilnijim za opcije punjenja što je posebno korisno kada je pojava sunčeve svjetlosti rijetka. U slučaju incidenta, dvosmjerni pretvarači djeluju kao trenutni prekidači, brzo detektiraju događaj i crpe energiju iz baterije te je pretvaraju u izmjeničnu i na taj način osiguravaju napajanje. Uz dvosmjerni pretvarač sustav dobiva dodatni punjač baterije i brzi prekidač. Dvosmjerni pretvarači bazirani su na MOSFET tranzistorima koji imaju veće brzine prebacivanja što ih čini sigurnijima i manje gubitke. Struja koju daju na izlazu ima čisti sinusni signal bez harmonika i distorzija zbog čega ne

dolazi do problema u elektronici. Dvosmjerni tok energije znači da pretvarač može puniti bateriju preko AC utičnice [8].

### **4.3. Solarni paneli**

Solarni paneli pretvaraju sunčevu svjetlost u električnu energiju pomoću fotonaponskih (PV) ćelija. PV ćelije se rade od materijala koji proizvode pobuđene elektrone kada su izloženi svjetlu, elektroni teku kroz strujni krug i proizvode istosmjernu struju (DC). Ćelije se najčešće rade od silicija. Energija nastala iz PV ćelija nema emisija stakleničkih plinova. U fotonaponskoj tehnologiji jedino opterećenje za okoliš je proizvodnja fotonaponskih ploča i uporaba toksičnih materijala poput kadmija te otežano recikliranje ploča. Također kako bi se izgradila fotonaponska elektrana koja proizvodi dovoljnu količinu energije, potrebno je mnogo prostora zbog čega kod hibridnih sustava autonomnog napajanja zahtijevaju dobro planiranje [9].

### **4.4. Vjetroturbine**

Vjetroturbine su strojevi koji kinetičku energiju vjetra pretvaraju u mehanički rad za pogon generatora. One su ključna komponenta vjetroelektrana koje su postale značajan izvor obnovljive energije diljem svijeta. Sastoje se od rotora koji se sastoji od tri lopatice koje hvataju energiju vjetra, a dizajniraju se na način da maksimiziraju učinkovitost pretvaranja energije vjetra, od nacelle odnosno kućišta koje se nalazi na vrhu tornja i sadrži komponente kao što su glavno vratilo, generator, mjenjač i sustav za hlađenje te od kontrolnih sustava koji upravljaju radom turbine. Postoje određeni izazovi koji se mogu pojaviti kod integracije vjetroturbina jer mogu izazvati zvučne i vizualne smetnje za lokalnu zajednicu te utjecati na prirodu u svojoj okolini odnosno život ptica ili šišmiša [10].

### **4.5. Dizel generator**

Dizel generator je uređaj koji pretvara mehaničku energiju u električnu izgaranjem dizelskog goriva. Često su korišteni u udaljenim područjima i sustavima autonomnih napajanja kao rezervni izvori energija ili služe za pokrivanje vršnih opterećenja. Prednost dizel generatora je što u sustavima autonomnih napajanja osigurava pouzdanost, a dizelsko gorivo je široko dostupno i ima visoku gustoću energija što omogućava dugotrajan rad između punjenja. U hibridnim sustavima često rade u paralelnoj topologiji što znači da u kombinaciji s obnovljivim izvorima energije može direktno napajati dio potrošača te na taj način poboljšati performanse u odnosu na sustav koji sadrži samo obnovljive izvore energije [11].

## 5. TEHNIČKA RJEŠENJA I DIMENZIONIRANJE SUSTAVA ZA AUTONOMNO NAPAJANJE ELEKTRIČNOM ENERGIJOM

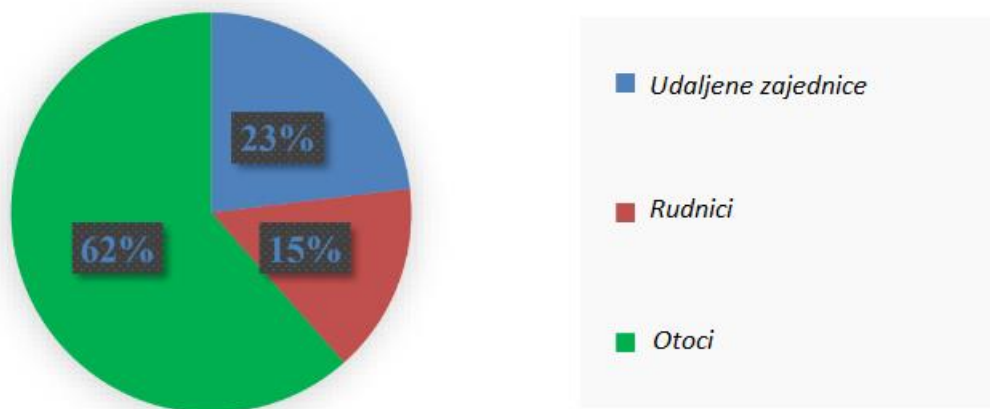
Važnost hibridnih sustava sa solarnim panelima, vjetroturbinama, hidroelektranama i sustavima za pohranu i upravljanjem energije raste u svim područjima energetike, a posebnu važnost ima u područjima autonomnih napajanja zbog smanjenja troškova i poboljšanih karakteristika. U autonomnim mrežama gdje prevladava dizelski pogon, hibridna rješenja osiguravaju neovisnost o gorivu uz smanjenje emisija ugljičnog dioksida. Sustavi autonomnog napajanja razlikuju se od centraliziranih energetske sustava u kapacitetu i naponskoj razini. Autonomni sustavi mogu biti stand-alone sustavi odnosno samostalni ili povezani na centraliziranu mrežu, a u ovom se radu koncentriraju na samostalne sustave gdje je otežano spajanje na veću mrežu. Kapacitet izvanmrežnih sustava je manji od nekoliko stotina MW, dok je kod velikih centraliziranih mreža u redovima GW. U područjima autonomnog napajanja naponske razine variraju od niskonaponske i srednje, dok u centraliziranim mrežama postoje i visokonaponske razine za prijenos. Autonomni sustavi koji će biti obrađeni nisu povezani sa susjednim mrežama pa ne mogu izbalansirati razliku između potrošnje i potražnje na način da dijele ili preuzimaju višak ili nedostatak preko drugih sustava. Nedostatak pristupa vanjskim izvorima može uzrokovati izazove u osiguranju kontinuirane i pouzdane opskrbe energijom, posebice u uvjetima kada proizvodnja varira ili kada postoji nagli porast potražnje zbog čega autonomni sustavi moraju osigurati dovoljno kapaciteta za proizvodnju kako bi se u svakom trenutku mogle zadovoljiti potrebe potrošača bez da se naruši stabilnost sustava. Sustavi autonomnog napajanja imaju nisku inerciju i više slučajeva varijacije frekvencije što znači da sporije reagiraju na promjene u opterećenju i poremećaja u stabilnosti. Veće centralizirane mreže imaju visoku inerciju što ih čini stabilnijima. Autonomni sustavi se tipično dijele na otočne sustave, udaljene ili ruralne zajednice, sustave za komercijalnu ili industrijsku primjenu, institucijske ili sustave za kampuse te vojne jedinice. Hibridizacija sustava uz obnovljive izvore energije koristi sustavu kroz ciljeve dekarbonizacije, digitalizacije i decentralizacije poznatijih i kao 3D. Unatoč nizu prednosti, uključivanje obnovljivih resursa u sustav nosi sa sobom i određene izazove zbog njihovog sezonskog i varijabilnog karaktera zbog čega zahtijevaju povećanje potrebne rezerve kojom se ublažava pojava neravnoteže između potrošnje i proizvodnje. Izazovi kod hibridizacije autonomnih sustava ovise o njihovoj veličini i primjeni. Što je veći prodor obnovljivih izvora to se više rezervi zahtjeva. Kako se udio obnovljivih izvora povećava, operatori distribucijskih mreža na otocima počeli su ograničavati stopu povećanja proizvodnje iz

obnovljivih izvora tražeći da sva postrojenja poštuju lokalne mrežne propise zbog sigurnosti mreže. Različiti otoci mogu imati različite propise. Primjerice, mrežni propisi Puerto Rico-a ograničavaju stopu rasta na manje od 10% instaliranog kapaciteta, dok propisi otoka Hokkaida u Japanu zahtijevaju još strožu stopu rasta od 1% instaliranog kapaciteta. Ova ograničenja odražavaju potrebu za uravnoteženjem brzine rasta obnovljivih izvora s tehničkim kapacitetima i zahtjevima za stabilnost mreže [1]. To znači da se proizvodnja iz obnovljivih izvora mora ograničiti na manje od zadanog postotka instaliranog kapaciteta, odnosno proizvodnja iz obnovljivih izvora ne smije premašiti zadani postotak instaliranog kapaciteta u određenom vremenskom intervalu. U industrijskim okruženjima kao što su rudnici potrebe za istraživanjima ovise o situaciji na terenu. U slučaju promjenjivih opterećenja, dinamičke studije su neophodne kako bi se osigurala stabilna izvedba hibridnog sustava i potrebno je modelirati svaki element. U tablici 5.1. prikazane su pojedine grupe autonomnog napajanja te zahtjevi njihovog strateškog planiranja.

Područje primjene	Zahtjevi planiranja
Rudnici	Istraživanja su potrebna u slučaju visokog udjela obnovljivih izvora energije ili u slučaju naglih promjena opterećenja uzrokovanih teretom ili obnovljivim izvorima
Otoci	Potrebno dokazati da je sustav stabilan za nagle promjene opterećenja, greške, isključenja generatora i kratke pojeve; Variranje frekvencije i napona; Stabilnost signala
Ruralne (udaljene) zajednice	Analiza energetske bilance kroz analizu tokova snaga i rezervi; Dinamička analiza sustava (prijelazna stanja); Provjera zaštite (sigurnost i pouzdanost, smetnje kod okidanja, zone bez detekcije); Stabilnost signala

Tablica 5.1. Zahtjevi planiranja hibridnog sustava u pojedinim sustavima [1]



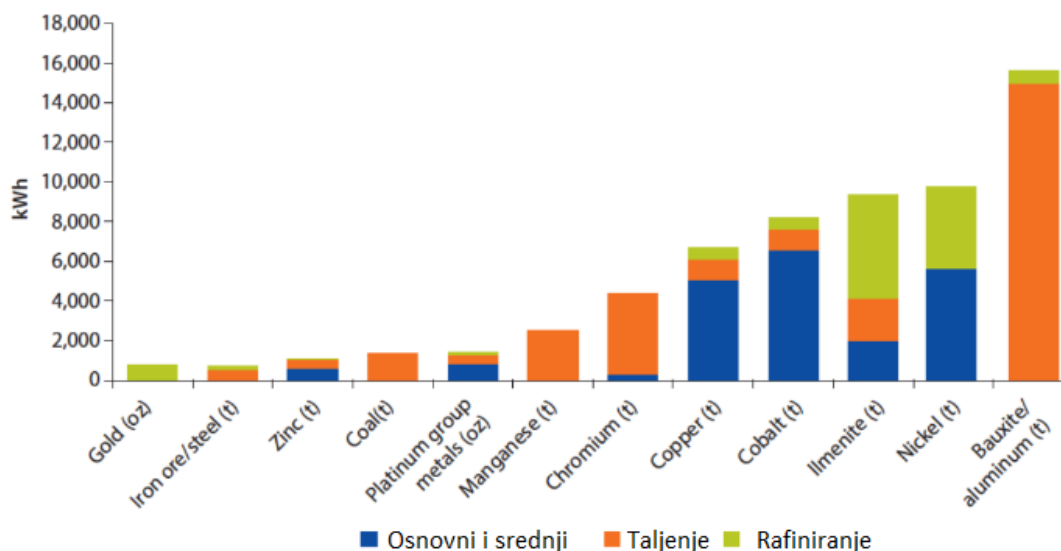


Slika 5.1. Udio pojedine grupe autonomnih sustava napajanja[1]

Na slici 5.1. prikazani su udjeli pojedinih grupa autonomnih sustava napajanja i kao što je sa slike vidljivo, 62% čine otoci.

### 5.1. Primjena autonomnih sustava napajanja u rudnicima

Većina rudnika radi danju i noću, zbog čega sustav ima stalnu potražnju za osnovnim opterećenjem koje može obuhvaćati rad bušilica, transportnih traka, ventilatora i druge opreme bez koje rudnik ne može raditi. Potrebna električna energija u rudnicima ovisi o vrsti minerala koji se crpi te o opsegu obrade ili obogaćivanja minerala. [1]



Slika 5.2. Potrebna količina energije za obradu pojedine količine materijala[1]

Na slici 5.2. prikazani su energetske zahtjevi za pojedine rudarske procese u ovisnosti o materijalu, na temelju baze podataka uzete iz 168 rudnika diljem Afrike prema podacima iz 2014. Osim što rudarenje pojedinih materijala ima različite energetske zahtjeve, na

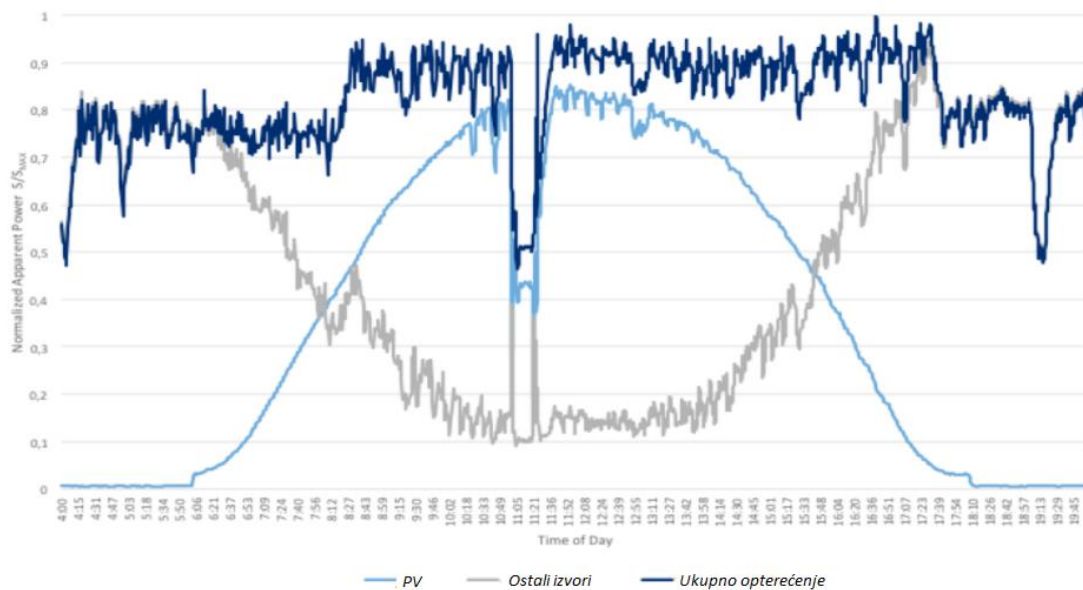
opterećenje rudnika veliki utjecaj imaju i njegov položaj i dizajn, odnosno nalazi li se rudnik pod zemljom ili na površini. Potražnja u podzemnim rudnicima pokazala se je znatno većom nego ona u otvorenim površinskim rudnicima (oko 40% više) zbog većeg porasta zahtjeva za ventilacijom, crpljenjem vode i bušenjem. [1]

Kod rudnika je vrlo važno da je mreža dizajnirana na način da 24 sata dnevno može pokriti potrebnu potražnju. U prošlosti se većina udaljenih nalazišta oslanjala na dizelske generatore koji su pružali stabilno napajanje. Više generatora radi paralelno te se uključuju i isključuju u ovisnosti o potražnji. Generatori najučinkovitije rade od 80% do nazivnog iznosa kapaciteta zbog čega je u sustavu bolje imati nekoliko grupa generatora različitih veličina kako bi pravilno odgovorili na potražnju. Na taj način je učinkovitost čitavog sustava bolja a potrošnja dizela se smanjuje. Kako je demonstrirano u trećem poglavlju na slici 3.2., dostupnost većine obnovljivih izvora mogu omogućiti da se gotovo svi generatori isključe, no dostupnost izvora ovisi o geografskoj lokaciji i vremenskim uvjetima. Primjerice, na globalnom Sjeveru sustavi sa fotonaponskim panelima ne bi bili učinkovito rješenje za udaljene rudnike jer imaju puno manje sunčeve svjetlosti nego ostatak svijeta, posebno u zimskim mjesecima, no za rudnike u Australiji, Južnoj Americi ili Africi solarna energija bila bi učinkovita opcija. Postoje tri moguće opcije koje razmatraju integraciju obnovljivih izvora energije u rudarstvu, a to su:

1. Obnovljivi izvori s pohranom energije
2. Hibridni sustav
3. Hibridni sustav s pohranom energije

Kao najisplativije rješenje pokazao se treći model odnosno hibridni model kao kombinacija obnovljivih izvora i dizel agregata sa skladištima energije kako bi se osiguralo sigurno napajanje u svim trenucima i zadovoljilo osnovno opterećenje.

Slika 5.3. prikazuje odnos proizvodnje hibridnog sustava (solarno-dizelski) i potražnje na sunčan dan u Južnoj Africi na području rudnika Zimbi [1]. Udio solarne energije je 60% u odnosu na dizel gorivo. Dizel generator ima ulogu rezerve ili se koristi za uravnoteženje opterećenja. Generator prati razlike između solarno generirane snage i opterećenja. Postavlja se središnja upravljačka jedinica za upravljanje razinama opskrbe jednog i drugog izvora. Donja granica opterećenja dizel generatora je 25% te je treba uzeti u obzir kako bi se spriječilo oštećenje generatora zbog nepotpunog izgaranja goriva.



Slika 5.3. Odnos dnevne proizvodnje i potražnje na području rudnika Zimbi [1]

Kod površinskih bušotina i podzemnih rudnika postoje elementi koji mogu uzrokovati pad napona i probleme s rezonancijom, kao što su vremenski uvjeti pa ih je kod modeliranja sustava bitno uzeti u obzir.

## 5.2. Primjena autonomnih sustava na otocima

Sve više otoka želi postati ekološki neutralno i u potpunosti dekarbonizirano. Kako bi otočni sustav uz visoki udio obnovljivih izvora energije bio stabilan neki otoci uveli su mrežnu regulativu koje se svi proizvođači moraju pridržavati. Iskustvo je pokazalo kako je važno uvesti određene regulatorne mjere u samom početku integracije obnovljivih izvora u sustav. U fazi projektiranja bitno je dimenzionirati komponente kao što su solarni paneli, vjetroturbine i baterijska skladišta ali i provesti dinamičke analize kako bi se odredilo kakav će utjecaj spomenute komponente imati na sustav. [12]

Proces spajanja interkonektorima na postojeću mrežu se sastoji od sljedećih koraka:

1. Podnošenje zahtjeva traži značajnu dokumentaciju, dokumente o kontroli lokacije i naknade za prijavu
2. Tehnički pregled kojim se određuju pravila između nositelja projekta i operatora prijenosnog sustava, s početnim uputama o dimenzioniranju i lokaciji točke međusobnog povezivanja
3. Tehničke analize utjecaja na elektroenergetski sustav te eventualna potreba za nadogradnjom infrastrukture

4. Faza odobrenja sporazuma
5. Dozvola za rad i spajanje na komunalnu mrežu

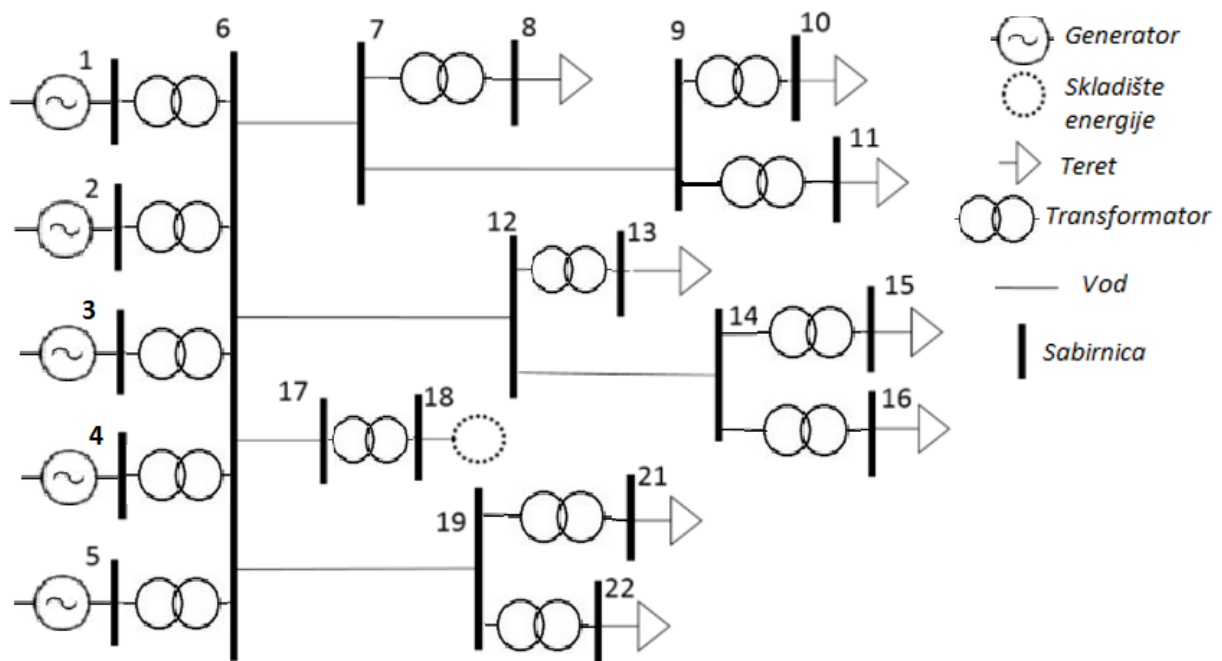
Poštivanje mrežnih regulativa omogućuje pouzdan i stabilan rad sustava tijekom normalnog rada i tijekom poremećaja. Mrežne regulative mogu uključivati ograničenja brzine kod varijacija u proizvodnji, kontrole faktora snage ili aktivnog/reaktivnog napona. U normalnom pogonu moraju se uzeti u obzir odstupanja frekvencije i napona, regulacija jalove i aktivne snage, granice kratkog spoja i harmonička izobličenja. Očekuje se od sustava da ostane operativan čak i u slučaju kada dođe do povremenih fluktuacija napona ili frekvencije. Zahtjev je da generator prevlada smetnje bez da pogorša situaciju. Mogući problemi koji se mogu javiti su isključivanje generatora zbog prorade frekvencijske ili naponske zaštite ili jednopolni ili trolinarni kvarovi. U odnosu na velike međusobno povezane električne mreže otočne mreže imaju manje raznolikost proizvodnje i potražnje, nemaju povezanosti s većim mrežama ili je povezanost slaba, postoji nedostatak pouzdane infrastrukture uz raspršeno stanovništvo, a troškovi opskrbe vanjskim energetskim resursima za proizvodnju energije iz fosilnih goriva su visoki zbog čega je potrebno integrirati veće sustave za pohranu energije koji imaju napredne specifikacije. Osim što je sama integracija obnovljivih izvora energije problematična za bilo koju mrežu zbog navedenih razloga narušavanja stabilnosti i sezonskog karaktera, mnogi otočni pogoni imaju nestabilna opterećenja poput dizalica u lukama koje često rade s promjenjivim opterećenjem ili zahtijevaju visoki početni napon za pokretanje. U izoliranim sustavima hibridni sustav bez baterijskog sustava teško može odgovoriti na promjene i zahtjeve potrošnje zbog čega može doći i do sloma mreže i nestanka struje. Skladištenje energije u tom slučaju nudi brz odgovor na zahtjeve u potražnji i može djelovati kao pomoćni izvor za izgladivanje i kompenzirati nagli porast ili pad u proizvodnji iz obnovljivih izvora. Kada sinkrone generatore zamjenjujemo pretvaračima možemo riskirati inerciju sustava. U tom slučaju sustavi za pohranu energije mogu djelovati kao virtualni generatori i nadomjestiti inerciju u sustavu. [1]

### **5.3. Primjer analize stabilnosti otočnog rada**

Modelirani otok napaja pet dizel generatora, jedan snage 5 MW, jedan 4 MW i tri generatora snage 3 MW [1]. Ukupno otočno opterećenje se kreće od 10 MW do 13 MW.

Elektroenergetski sustav je opremljen zaštitom koja smanjuje opterećenje ako frekvencija odstupa +/-2% od nominalnog iznosa. Otočno napajanje suočava se sa problemom kvalitete električne energije uzrokovanog radom dizalice. Planira se smanjenje emisija ulaganjem u 4 MW obnovljive energije iz energije vjetra. Uzima se da regulativa nalaže da brzina vjetra

ostane unutar 1% od ukupnog instaliranog kapaciteta vjetrova u sekundi. Rad dizalice je promjenjiv i može se povećati ili smanjiti 3 MW u sekundi što može dovesti do variranja frekvencije. Zbog toga se ulaže u sustav za pohranu energije na način da se osigura stabilan rad bez jednog generatora od 3 MW, cilj je smanjiti utjecaj dizalice na kvalitetu energije, osigurati sposobnost izgladivanja i kontrolu brzine te povećati sigurnost napona i frekvencije tijekom nepredviđenih događaja. Veličina skladišta energije je 3 MW sa kapacitetom od 1,5 MWh. Skladište je opremljeno sustavom za pretvorbu energije i sustavom upravljanja otočnom mikromrežom. Koristi se transformator od 3 MVA s impedancijom od 6% za smanjenje napona na 0,4 kV. Otočni elektroenergetski sustav je prikazan na slici 5.4. , gdje je na sabirnicu 18 spojen sustav za skladištenje preko silaznog transformatora, a dizelski generator na sabirnici 5 je odspojen i zamijenjen sustavom za skladištenje kako bi se smanjile emisije CO<sub>2</sub> i troškovi goriva.



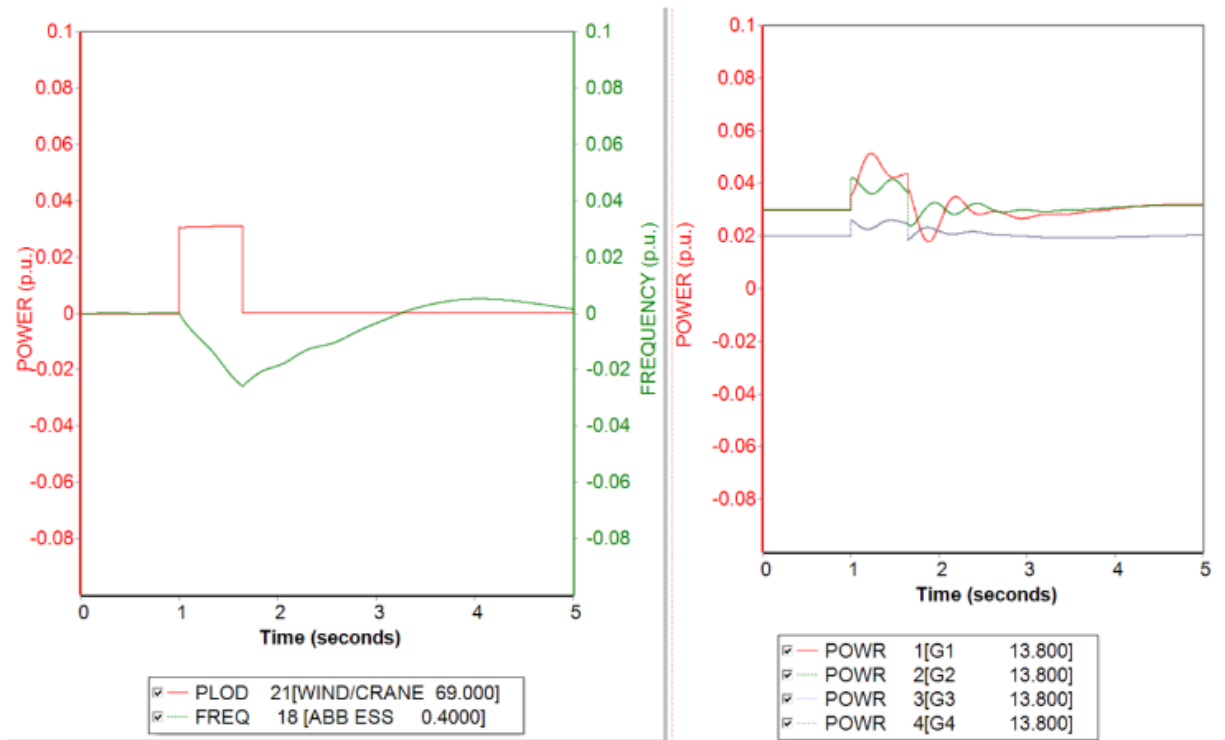
Slika 5.4. Otočni sustav [1]

Testiraju se tri važna događaja:

1. Odgovor skladišta energije na nagli porast potražnje
2. Stabilnost pri isključivanju generatora
3. Performanse sustava tijekom kvara

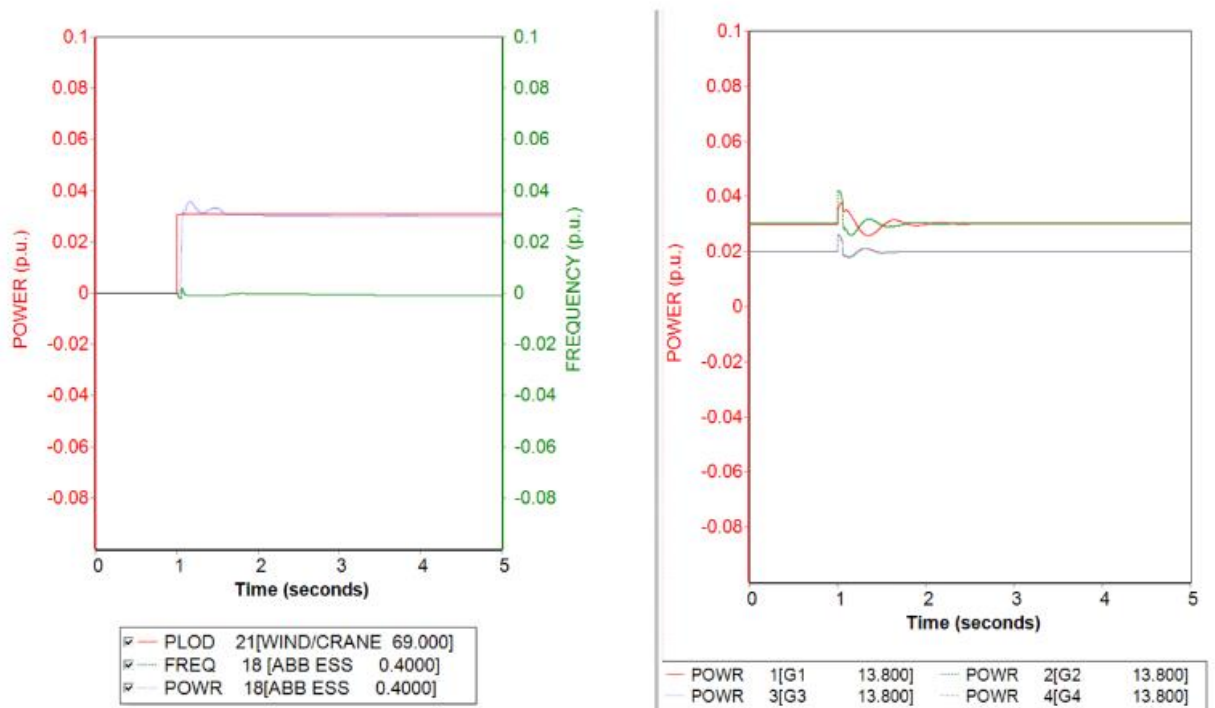
## Odgovor skladišta energije na nagli porast potražnje

Na slikama 5.5. i 5.6. prikazane su simulacije koje demonstriraju promjene prije i nakon integracije baterijskog skladišta energije. Nagle promjene opterećenja od +/- 1 MW, +/- 2MW i +/-3 MW primjenjuju se na sabirnicu 21. Iznenađna promjena opterećenja može se dogoditi zbog rada dizalice ili promjeni u proizvodnji energije iz vjetra. Brzina porasta snage se ograničava na 40 kW/s što je 1% nominalne proizvodnje iz vjetroenergije. Za prilike simulacije analizira se utjecaj nagle promjene opterećenja za + 3 MW. Na slici 5.5. na lijevom grafu crvenom linijom označena je snaga opterećenja, a zelenom frekvencijski odziv sustava. U  $t=1$  s, crvena linija prikazuje skok u opterećenju, a frekvencija pada što je normalna reakcija sustava koji pokušava savladati naglu povećanu potrošnju. Na desnom grafu prikazan je odziv generatora na poremećaj. Četiri krivulje prikazuju snage pojedinih generatora uslijed poremećaja. Svaki generator reagira na promjenu opterećenja, a oscilacije se nakon nekog vremena smiruju te se snaga proizvedena od strane svakog generatora postepeno stabilizira na konstantnu vrijednost. Prije integracije baterijskog sustava frekvencija opada za 0.026 p.u. ispod nazivne. Zbog pada frekvencije, nakon 0,6 sekundi reagira podfrekvencijska zaštita sustava koja isključuje teret (označeno crvenom bojom) i vraća frekvenciju na nazivni iznos. Iako su generatori sposobni prilagoditi svoju snagu kako bi stabilizirali sustav, reakcija sustava nije dovoljno brza pri stabilizaciji frekvencije.



Slika 5.5. Odziv frekvencije prije integracije baterijskog skladišta (lijevo) i odziv generatora (desno)

[1]



Slika 5.6. Odziv frekvencije nakon integracije baterijskog skladišta (lijevo) i odziv generatora (desno)

[1]

Na slici 5.6. je prikazana reakcija sustava na nagli porast opterećenja od +3 MW nakon integracije baterijskog i kontrolnog sustava. Na lijevom grafu crvena linija ponovno predstavlja snagu opterećenja koja se primjenjuje na sustav, zelena linija predstavlja frekvencijski odziv sustava dok plava linija predstavlja snagu koju isporučuje baterijsko skladište uslijed poremećaja. U  $t=1$  s, crvena linija prikazuje skok opterećenja. Baterijsko skladište brzo reagira i isporučuje potrebnu snagu te prati krivulju opterećenja. U ovom slučaju, frekvencija ostaje stabilna unatoč promjeni opterećenja uz manje oscilacije nego u slučaju kada u sustav nije bilo integrirano baterijsko skladište što označava dobru stabilnost sustava. Na desnom grafu ponovno su prikazani odzivi generatora. Sva četiri generatora reagiraju na promjenu opterećenja, ali su oscilacije značajno manje nego u usporedbi s prethodnim slučajem koji je prikazan na slici 5.5. Nakon inicijalne reakcije na opterećenje, izlazna snaga generatora se stabilizira i to značajno brže nego u slučaju bez baterija.

U tablici 5.2. prikazani su rezultati za sva tri slučaja nagle promjene opterećenja, a iz simulacija možemo vidjeti kako skladište energije ima brzu reakciju na promjenu, pa nema potrebe za smanjenjem opterećenja sustava. Skladište energije ne djeluje trenutno jer trajanje reakcije uključuje i kašnjenje senzora i komunikacije te vrijeme ažuriranja i iznosi oko 0,5 sekundi.



Promjena opterećenja (MW)	Parametar	Prije integracije skladišta energije	Nakon integracije skladišta energije
+/- 3	Varijacija frekvencije (p.u.)	0.026	0.002
	Rasterećenje	DA	NE
	Vrijeme odgovora skladišta energije (s)	-	0.06
+/- 2	Varijacija frekvencije (p.u.)	0.021	0.002
	Rasterećenje	DA	NE
	Vrijeme odgovora skladišta energije (s)	-	0.06
+/- 1	Varijacija frekvencije (p.u.)	0.014	0.001
	Rasterećenje	NE	NE
	Vrijeme odgovora skladišta energije (s)	-	0.07

Tablica 5.2. Rezultati simulacije za tri slučaja promjene opterećenja [1]

### Stabilnost u slučaju isključenja generatora

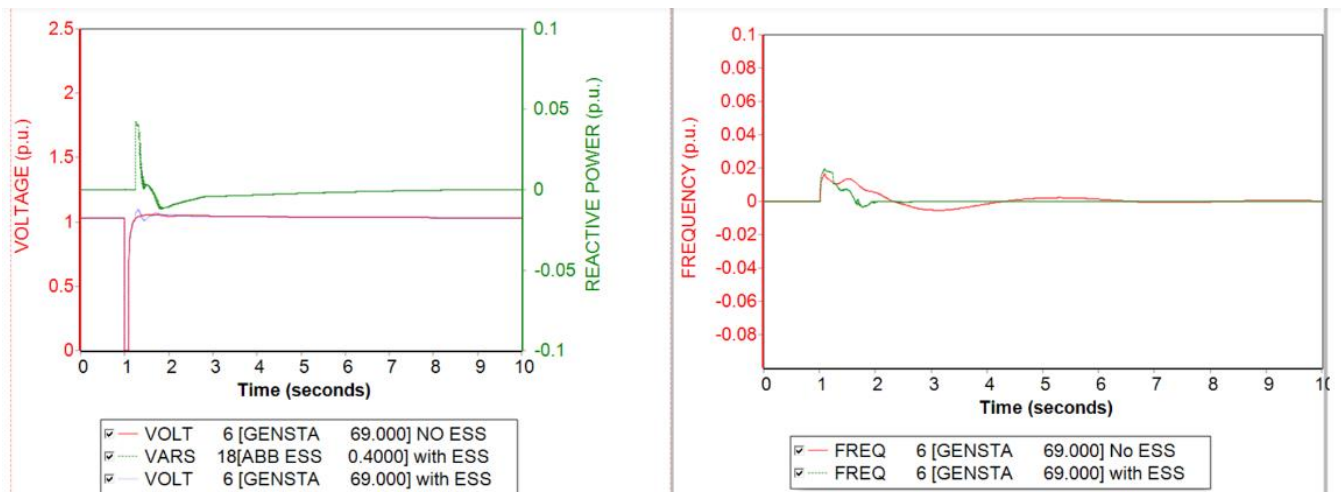
Simulirana su tri scenarija za zadani sustav odnosno okidanje generatora od 5 MW na sabirnici 1, okidanje generatora od 4 MW na sabirnici 2 i okidanje generatora od 3 MW na sabirnici 3. Rezultati simulacije prikazani su u tablici 5.3. za slučajeve isključenja pojedinih generatora prije integracije skladišta energije i poslije integracije skladišta.

Isključenje generatora	Parametar	Prije integracije skladišta energije	Poslije integracije skladišta energije
5 MW, sabirnica 1	Varijacija frekvencije (Hz)	-0.039	-0.004
	Rasterećenje	3.5	0
4 MW, sabirnica 2	Varijacija frekvencije (Hz)	-0.034	-0.005
	Rasterećenje	2	0
3 MW, sabirnica 3	Varijacija frekvencije (Hz)	-0.029	-0.003
	Rasterećenje	1.4	0

*Tablica 5.3. Rezultati simulacije za slučajeve isključenja pojedinih generatora prije i nakon integracije baterijskog skladišta energije [1]*

### **Reakcije sustava uslijed kvara**

Simulirane su performanse baterijskog skladišta energije u slučaju trofaznog kvara na sabirnici 6. Trofazni kvar traje jednu sekundu, a zatim nestaje nakon pet ciklusa. Na slici 5.7. na lijevoj strani prikazan je napon prije integracije baterijskog skladišta crvenom bojom. Jalova snaga prikazana je zelenom bojom i nju baterijsko skladište daje kako bi se sustav vratio na nazivni napon nakon što se kvar otkloni. Ljubičastom bojom na lijevoj slici je prikazana promjena napona sa integriranim skladištem energije u sustavu. Na desnoj slici je prikazano ponašanje frekvencije tijekom kvara. Odziv frekvencije prije integracije baterijskog skladišta prikazan je crvenom bojom, a nakon integracije zelenom bojom. Na lijevoj slici može se vidjeti kako dolazi do značajnog pada napona odmah nakon kvara u slučaju bez baterija, nakon čega se napon u konačnici stabilizira na nižoj vrijednosti. U slučaju kada su baterije integrirane u sustav, napon se također smanjuje odmah nakon kvara, ali se brže stabilizira u odnosu na slučaj bez baterija. Krivulja jalove snage pokazuje kako baterije mogu pomoći u održavanju stabilne jalove snage nakon kvara, što doprinosi stabilizaciji napona. Dakle ukoliko napon padne, baterije mogu u sustav dati određenu količinu jalove snage te na taj način brzo kompenzirati pad napona. Iz desne slike vidi se kako bez baterija frekvencija varira i odmah nakon kvara zbog čega postoji mogućnost nestabilnosti u sustavu iako se ona u konačnici stabilizira. Integracija baterijskog sustava smanjuje variranje frekvencije i pomaže u bržem postizanju stabilnosti.



Slika 5.7. Odziv napona, jalove snage (lijevo) i frekvencije (desno) uslijed trofaznog kvara u sustavu sa i bez baterijskog skladišta energije [1]

#### 5.4. Primjena autonomnih sustava u ruralnim (udaljenim) zajednicama

Jedan od ključnih čimbenika elektroenergetske mreže udaljenih zajednica je da nema mogućnosti za izvoz ili uvoz radne ili jalove snage, pa se snaga mora uravnotežiti iz lokalno dostupnih resursa. Zbog toga postoje veći zahtjevi za rezervom i za radnu pričuvu i za opskrbu gorivom. Također nema mogućnosti izvoza viška energije niti uvoza od drugih elektroenergetskih sustava zbog čega su fluktuacije u naponu i frekvenciji češće i veće nego u centraliziranim sustavima. Valja spomenuti kako profil opterećenja nije isti kao i u centraliziranim sustavima jer stanovnici udaljenih zajednica često imaju drugačiji stil života pa energetske potrebe nisu standardne. Primjer takve zajednice je Old Crow u Kanadi gdje stanovnici prakticiraju lovačko-skupljački stil života, pa nema klasičnih jutarnjih i večernjih vršnih opterećenja. Manji broj potrošača često rezultira većim varijacijama što se tiče energetske potrebe ovisno o profilu i zahtjevima potrošača. Zbog različitih varijabilnosti koje ovise o profilu potrošača, sustavi imaju veću faznu neravnotežu od globalno centraliziranih što može utjecati na valovitost momenta na generatoru što smanjuje njegov životni vijek i povećati gubitke u sustavu.

Neki sustavi mogu biti dostupni samo:

1. Putem zraka
2. Zračnim i pomorskim putem

3. Zračnim putem i ledenom cestom
4. Zračnim putem i manjim brodovima koji mogu ploviti rijekama ili uskim kanalima
5. Zračnim i cestovnim putem

Ovakva ograničenja poskupljuju gorivo, a troškovi povezani s radom opreme se povećavaju ukoliko se oprema mora redovito održavati zbog ograničene dostupnosti. Prekidi u napajanju jedan su od većih problema s kojima se udaljena zajednica može suočiti posebno ako stanovništvo živi u ekstremnim vremenskim uvjetima. Ovakvim zajednicama često nedostaje obrazovani lokalni kadar zadužen za popravke te može proći dugo vremena dok se kvar ne otkloni zbog čega je u ovakvim zajednicama najvažnija pouzdanost napajanja.

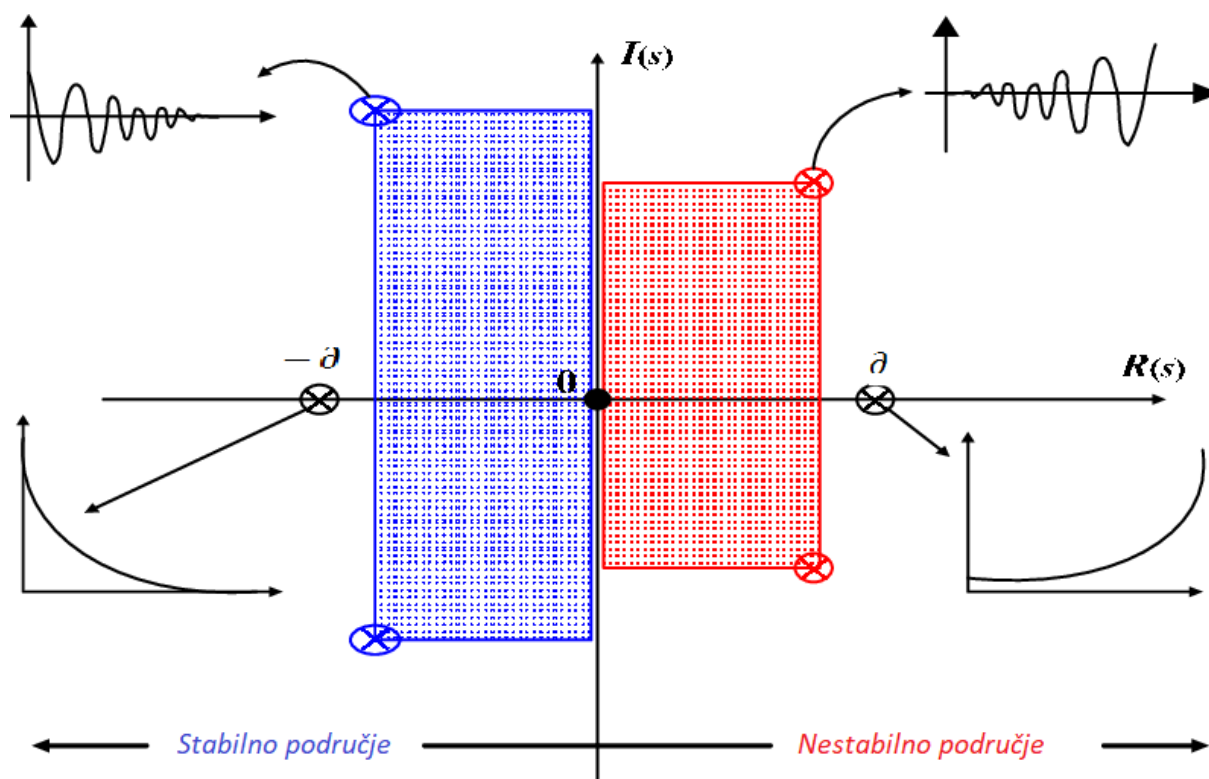
Osim problematike transporta goriva i dostupnosti udaljenih zajednica, integracija obnovljivih izvora nosi sa sobom izazove povezane sa sezonskim karakterom i isprekidanom proizvodnjom obnovljivih izvora kao što su sunce i vjetar te modelom vlasništva nad energetske postrojenjima. Naime mnoge udaljene zajednice se oslanjaju na nezavisne proizvođače energije, što uvodi dodatne komplikacije u sustav. Kada komunalna poduzeća nemaju kontrolu nad proizvodnjom obnovljivih izvora teško je osigurati pouzdanost i stabilnost mreže. Ovakav model vlasništva može zahtijevati dodatne ugovore i tehničke mehanizme za koordinaciju između nezavisnih proizvođača i komunalnih poduzeća [12]. Kako bi se u sustavu osigurala pouzdanost, postavljaju se konzervativna ograničenja na količinu obnovljivih izvora koja se može integrirati zbog čega je obnovljive izvore potrebno postepeno integrirati uz kontinuirano praćenje i prilagodbu regulative.

Potrebno je sagledati četiri glavna čimbenika koja se moraju uzeti u obzir pri integraciji obnovljivih izvora u sustav dizelskog pogona:

1. Adekvatnost – sposobnost opskrbe potrebnom snagom i energijom bez ograničenja
2. Otpornost – sposobnost oporavka od poremećaja u sustavu
3. Sigurnost – sposobnost toleriranja nekog poremećaja bez gubitka opterećenja, naprežanja opreme ili odstupanja od zadanih granica napona i frekvencije
4. Sigurnost u radu – sposobnost prorade zaštite i identifikacija prijetnji sustavu

Provedbom istraživanja se može utvrditi određena granica integracije obnovljivih izvora energije. Adekvatnost sustava se utvrđuje kvazistatičkom vremenskom analizom sustava za procjenu energetske bilance pomoću koje se mogu ocijeniti i prilagoditi konzervativna ograničenja integracije obnovljivih izvora i odrediti optimalna razina integracije. Svrha je osigurati da se ravnoteža sustava može postići u svakom trenutku i za sve moguće radne

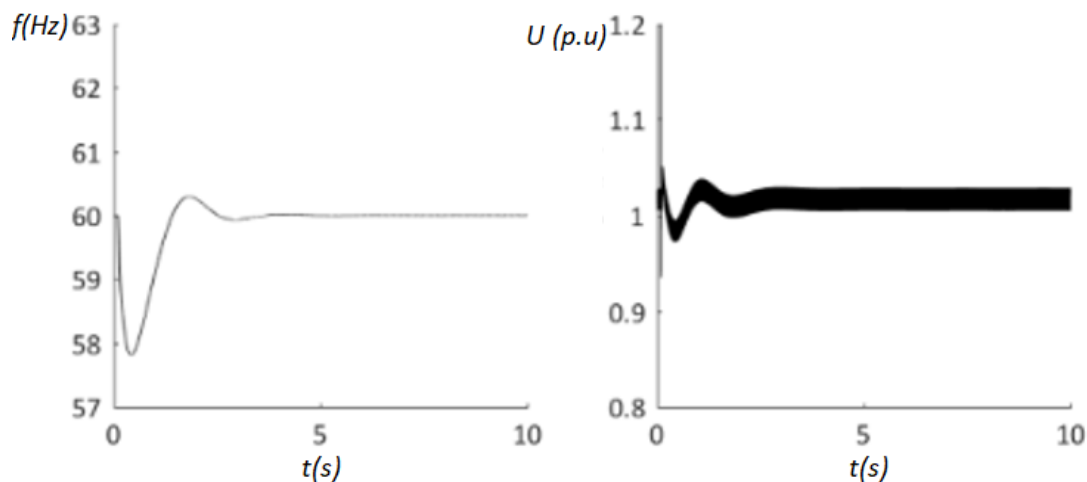
uvjete. Granice rezerve, profili napona sustava i radne karakteristike generatora te drugi distribuirani izvori energije koji se mogu kontrolirati moraju se testirati kako se ne bi prekoračila zadana ograničenja. Pri integraciji novih resursa, odnosno obnovljivih izvora energije, povoljno je spojiti se na postojeću sabirnicu dizel agregata jer se dizel generator može regulirati u točki zajedničkog spajanja bez potrebe za pomoćnim dodatnim izvorom i standardni tok snage od proizvođača prema potrošačima je osiguran pa se na taj način poštuje unaprijed projektirana koordinacija zaštite. Otpornost sustava se procjenjuje analizom stabilnosti malog signala odnosno poremećaja. Ako sustav može podnijeti oscilacije nastale uzrokovane malim opterećenjem na način da u kratkom vremenu suzbije oscilacije sustav se smatra stabilnim. Dinamičke promjene u sustavu se lineariziraju oko kvazistatičkog stanja radne točke što znači da se sustav može smatrati približno stacionarnim, a stanje se mijenja sporije nego kod stvarnih dinamičkih promjena u sustavu što omogućuje analizu stabilnosti sustava. Ukoliko su sve svojstvene vrijednosti (polovi) u lijevom dijelu kompleksne ravnine, sustav se smatra stabilnim kako je prikazano na slici 5.8. u plavom dijelu ravnine.



Slika 5.8. Kompleksna poluravnina [15]

Sigurnost se procjenjuje identificiranjem najveće smetnje kojoj hibridni sustav može biti podvrgnut. Najčešće takvu smetnju predstavlja izravno spajanje ili isključivanje obnovljivog izvora energije. Simulacija odziva sustava na ovakav poremećaj pokazuje je li sustav stabilan

te postoje li prekoračeni pragovi opreme ili cijelog sustava. Ovakvom analizom se sagledava najgori mogući slučaj velikog poremećaja i modeli se ne lineariziraju već moraju prikazati stvarnu dinamiku sustava. Na slici 5.9. prikazana je simulacija već spomenutog Old Crow sustava u slučaju naglog gubitka 265 kW solarne energije.



Slika 5.9. Odziv hibridnog sustava na nagli gubitak solarne energije [1]

Prikazani grafovi prikazuju dinamički odziv elektroenergetskog sustava Old Crow. Na lijevom grafu prikazan je odziv frekvencije u Hz, a na desnom odziv napona u vremenu u per unit (p.u) vrijednostima. Kod frekvencijskog odziva vidi se da frekvencija pada ispod nominalne vrijednosti od 60 Hz što ukazuje na gubitak proizvodnje, odnosno sustav otežano zadovoljava opterećenje. Nakon pada, frekvencija nakon nekoliko sekundi oscilira oko nominalne vrijednosti prije nego što se stabilizira. Dinamički odziv ukazuje na to da sustav nastoji vratiti frekvenciju u stabilno stanje što se može zaključiti iz prigušenja oscilacija na  $t=4$  s koje govori kako sustav ima mehanizme kontrole koji vraćaju frekvenciju u stabilno stanje, međutim postoji opasnost da se sustav dovede u nestabilno stanje zbog gubitka solarne energije. Napon također opada pri nastanku poremećaja ispod nominalne vrijednosti, ali se nakon nekoliko sekundi stabilizira. Iako je sustav uspio savladati poremećaj, ovakvi slučajevi gubitka proizvodnje izazivaju velike udarce na sustav.

Pouzdanost se ocjenjuje analizom sustava zaštite. Simuliraju se:

1. Kvarovi od faznog prema neutralnog vodu
2. Kvarovi od faznog prema faznom vodu
3. Kvarovi od faze prema fazi i neutralnom vodu
4. Kvarovi od faze prema druge dvije faze
5. Greške od faznog voda do neutralnog

Kvarovi mogu nastati zbog visoke ili niske greške impedancije, a mogu se dogoditi pri različitim naponima. Prema rezultatima analize sustav se može opisati kao:

1. Pouzdan – zaštitna oprema je pravilno radila tokom kvara
2. Siguran – zaštitna oprema se nije aktivirala tokom događaja bez kvara

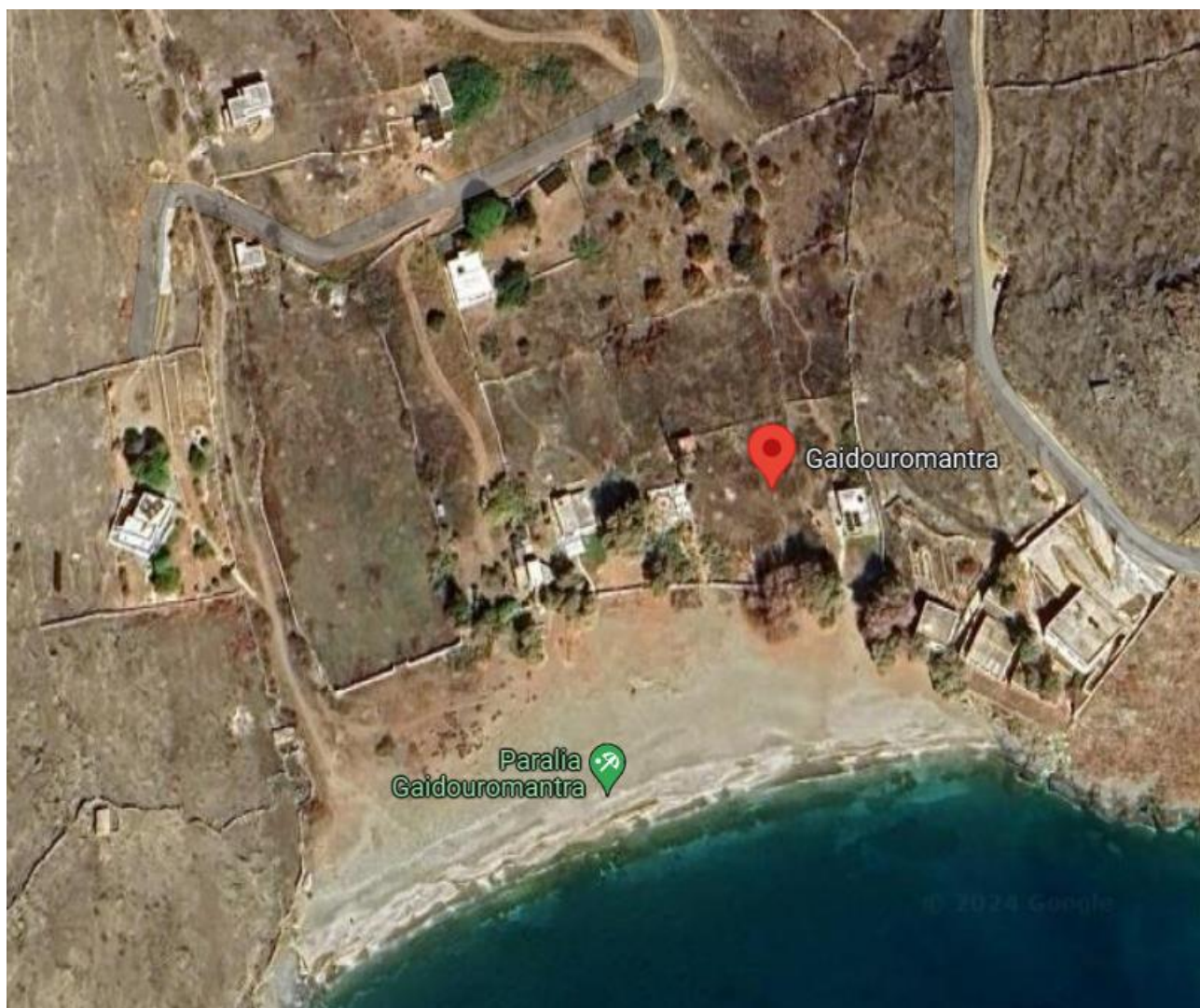
Također se mora procijeniti dvosmjerni tok snage i osigurati da dizel generator ne počne raditi kao motor ukoliko se snaga iz obnovljivih izvora naglo promjeni što se osigurava selektivnošću zaštite. Ukoliko udio obnovljivih izvora energije dosegne određeni postotak, biti će potrebno ugraditi i kontrolni sustav. U tim slučajevima baterijsko skladište energije je nužno za stabilnost sustava i pouzdanu energiju, a u mnogim slučajevima se pokazalo i najekonomičnijim rješenjem. Osim toga nastoje se smanjiti i emisije CO<sub>2</sub> iz sigurnosnih i ekonomskih razloga zbog čega se umjesto velikih elektrana na ugljen, naftu ili plin sve više ispituju lokalno dostupni održivi energetske resursi poput vode, vjetra ili sunca. U mnogim zajednicama gdje se gospodarstvo i ekonomija još razvijaju, potrošači doživljavaju redovite nestanke struje što rezultira velikim ekonomskim gubicima posebice ako se desi da industrijski sektor često gubi napajanje zbog čega je bitno da se sustav pravilno modelira i da postoji pouzdana dodatna rezerva napajanja kao što su dizel generatori [16].

## **6. PRIMJER OTOČNOG HIBRIDNOG SUSTAVA ZA AUTONOMNO NAPAJANJE (MIKROMREŽE)**

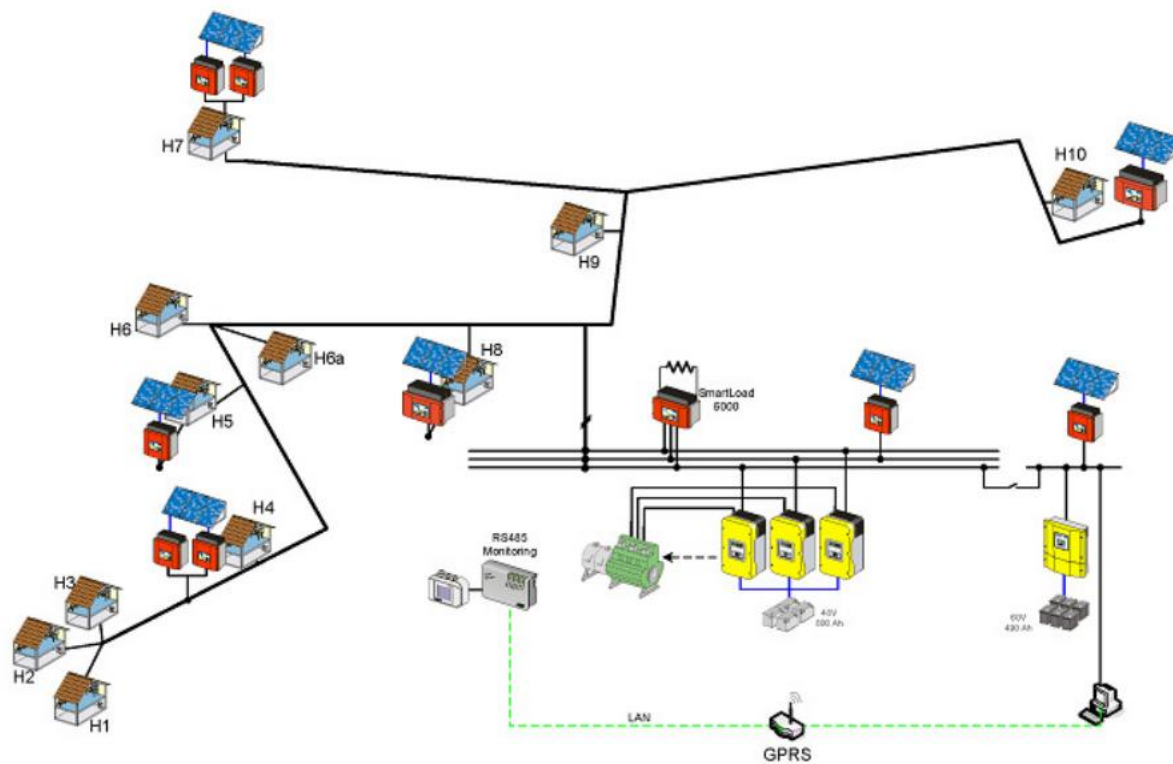
Otok Kythnos u Grčkoj je međunarodno prepoznat po razvoju tehnologije i integraciji solarne i vjetroenergije u autonomni energetska sustav. Povijest sustava je jedinstvena i započinje s integracijom prvog europskog vjetroparka 1982. godine. Tada je instalirano 5 vjetroturbina sa 20 kW snage, ukupno 100 kW. Cilj je bio poboljšati rad i pružiti stabilnije napajanje u slaboj otočnoj mreži. Iz vjetroparka dolazi gotovo 80% ukupne snage i 70% godišnje proizvodnje energije. 1983. godine sustav je nadograđen u prvi i najveći autonomni energetska sustav s visokim udjelom obnovljivih izvora energije sa PV sustavom snage 100 kWp i baterijskim spremnikom snage 500 kW i kapaciteta 500 kWh. Kasnijih godina su vjetroturbine snage 20 kW zamijenjene sa pet turbina snage 33 kW te je instaliran novi pretvarač za solarni sustav tvrtke SMA. Sustav je postigao visoku integraciju i sinergiju obnovljivih izvora energije, mikromreža može raditi bez dizel generatora tijekom niske potrošnje, a rad dizel generatora je potpuno automatski. Napon i frekvencija su stabilni i omogućena je potpuna daljinska kontrola sustava [17].

Mikromreža koja se posebice ističe na otoku Kythnosu je Gaidouromantra koja opskrbljuje 12 kuća za odmor i koristi gotovo isključivo obnovljive izvore energije, a pokrenuta je kao pilot projekt 2001. godine. Lokacija je izabrana jer je u vrijeme osnivanja projekta naselje Gaidouromantra bilo udaljeno pet kilometara od glavne otočne srednjenaponske električne mreže te su u naselju postojale četiri kuće koje su se napajale preko dizel generatora koji su radili nekoliko sati dnevno dok druge kuće nisu imale pristupa električnoj energiji. Centar za obnovljive izvore energije (CRES) koji je ujedno i voditelj projekta, potpisao je ugovore s vlasnicima kuća prema kojima svaka elektrificirana kuća plaća fiksni godišnji iznos od 30 €, a potrošnja se naplaćuje po cijeni od 0,10 €/ kWh. Trošak dizelskog goriva se raspoređuje po kućama u odnosu na njihovu potrošnju električne energije, a sva prikupljena sredstva se koriste za održavanje sustava [18].





*Slika 6.1. Lokacija Gaidouromantra mikromreže, Izvor: Google Maps, 15.06.2024.*



Slika 6.2. Električni dijagram Gaidouromantra mikromreže [1]



Slika 6.3. Interijer upravljačke stanice [17]



*Slika 6.4. Razvodni ormarići [17]*



*Slika 6.5. Izlaz iz upravljačke stanice [17]*



*Slika 6.6. Baterijski sustav 48 kWh [17]*

### **6.1. Tehnički podaci mikromreže**

Tehnički podaci elemenata mreže dani su u nastavku:

1. Vršno opterećenje: 3,7 kW
2. PV sustav: Sustav uključuje 7 distribuiranih PV polja s ukupnom instaliranom snagom od 11 kW.
3. Baterijski sustav: Glavni sustav uključuje baterijsko skladište olovnih baterija s tekućim elektrolitom (OPzS) čiji su glavni sastojci olovo i sumporna kiselina. Baterijsko skladište se sastoji od 24 ćelije od kojih svaka ima nazivni napon 2V. Svaka baterija je kapaciteta 1000 Ah pri C10<sup>1</sup> ocjeni, pružajući ukupni kapacitet pohrane od 48 kWh. Sekundarni sustav ima kapacitet od 480 Ah/60V. Sustavi imaju ograničenje punjenja i pražnjenja te upravljački elementi moraju osigurati da se baterije ne pune na 100% te da se ne prazne ispod 30% već da se održavaju na 30-80% napunjenosti. Na taj način se životni vijek baterije produžuje, smanjuje se rizik od pregrijavanja ili eksplozije i usporava se trošenje elektrolita i starenje. Tijekom dana

---

<sup>1</sup> C10 ocjena označava da ukoliko svaka ćelija ima kapacitet od 1000 Ah pri C10 ocjeni, ukoliko se isprazni u roku od 10 sati, može osloboditi 100 A struje kontinuirano. Kada se 24 ćelije spoje, kapacitet se povećava što rezultira ukupnim kapacitetom baterijskog skladišta od 48 kWh.



su i glavni i sekundarni sustav povezani zajedno na AC strani, a tijekom noći sustavi rade odvojeno i sekundarni preuzima napajanje opreme za kontrolu i nadzor dok glavni sustav osigurava pouzdano napajanje. Glavni baterijski sustav je zamijenjen 2009. godine nakon osam godina rada starog sustava jer se je potrošnja elektrolita značajno povećala te su bile zahtijevane česte nadopune destiliranom vodom.

4. Pretvarači za baterije: Tri jednofazna pretvarača za baterije (SMA-SI5048) sinkronizirana su u master-slave (glavni pretvarač upravlja radom drugih pretvarača) konfiguraciji te pružaju maksimalnu kontinuiranu snagu od 5 kW po fazi, s mogućnošću kratkotrajnog povećanja na 12 kW tijekom vremena od 3 sekunde na 25° C i 120 A tijekom vremena od 60 ms što je korisno ukoliko se u sustavu javi kratkotrajna veća potražnja za energijom ili se želi pokrenuti uređaj koji zahtjeva veću početnu snagu. Koriste se prikladni osigurači za isključivanje kvarova poput kratkih spojeva.
5. Dizel generator za rezervno napajanje: trofazni, 9 kVA dizel generator za rezervno napajanje integriran je u sustav i kontrolira se pomoću kontrolnog sustav baterije (BMS) kada se stanje napunjenosti baterije (SOC) spusti ispod 30%.
6. Distribucijska mreža: Distribucijska mreža je zračna, trofazna mreža 400 V sa pet izoliranih vodiča koji se uvijaju jedan oko drugoga a postavljeni su na drvene stupove visoke oko 9 m.
7. Opterećenja: Tipična opterećenja u sustavu uključuju hladnjake, lampe, pumpe i druge manje aparate.
8. Napajanje: Sustav se napaja jednofazno uz osigurače od 6-8 A
9. Inteligentni regulatori opterećenja (ILC) za upravljanje potrošnjom energije instalirani su na spojnim točkama kuća na mrežu kako bi se sustav zaštitio od preopterećenja ili prevelikog pražnjenja baterije. Ovi uređaji mjere frekvenciju i aktiviraju se kada frekvencija padne ispod 49,14 Hz i isključuju opterećenja. Opterećenje se ponovno spaja najmanje dvije minute nakon što se frekvencija vrati na normalnu vrijednost.
10. Softver/Hardver za centralizirano ili decentralizirano upravljanje energijom: Instaliran je Sunny Webbox s GPRS (General Packet Radio Service) vezom s ciljem praćenja i kontrole. GPRS je tehnologija mobilne komunikacije koja omogućuje prijenos podataka putem GSM (Global System for Mobile Communications) mreže. Tehnologija se koristi za prijenos podataka putem mobilnih telefonskih mreža, omogućujući uređajima kao što je SunnyWebbox komunikaciju s internetom. Ovakva veza omogućuje upravljanje mikromrežom i sa udaljene lokacije. Pomoću ove tehnologije mogu se pratiti performanse solarnih panela i baterijskog skladišta, podaci

o proizvodnji i potrošnji energije, a može se omogućiti i primanje upozorenja ili obavijesti vezanih za stanje sustava ili eventualne probleme u sustavu.

Trendovi potrošnje električne energije se razlikuju od uobičajenih kućnih profila jer se kuće uglavnom koriste tijekom praznika i ljetnih mjeseci [19].

## **6.2. Upravljanje energijom u sustavu**

Za upravljanje energijom i održavanjem stabilnosti najvažniju ulogu igraju pretvarači za baterije jer imaju mogućnost reguliranja frekvencije za smanjenje opterećenja ili smanjenje snage fotonaponskog sustava. Također upravljaju pokretanjem dizel generatora. Frekvencija se koristi kao komunikacijski signal između energetske jedinice što znači da promjene u frekvenciji signaliziraju različita stanja sustava te se pomoću promjena u frekvenciji može upravljati proizvodnjom ili potrošnjom energije i na taj način produžiti životni vijek baterija. Postoje tri radna stanja koja se određuju prema stanju napunjenosti baterije (SOC). Inicijalno energijom upravljaju regulatori opterećenja koji isključuju kada je SOC vrlo nizak (20%). Kada se baterije napune iznad 40%, regulatori opterećenja omogućuju nasumično ponovno povezivanje kuća nakon nekoliko minuta. Baterijski pretvarači omogućuju da frekvencijski signal dođe do regulatora opterećenja. U okviru projekta MORE MICROGRIDS sustav je nadograđen pretvaračima energije sposobnim za rad u otežanim uvjetima upravljanja u otočnom radu [1]. Pet ILC-ova je instalirano u odgovarajućim kućama na odgovarajuće utičnice u svakoj kući, a glavni cilj je bio kontrolirati rad opterećenja, odnosno ispitati isključivanje nekritičnih tereta u slučaju visokih opterećenja. Primjerice, u slučaju nedostatka energije vodena pumpa se smatra nekritičnim opterećenjem te se isključuje. Svaki regulator opterećenja ima Wi-Fi sučelje koje omogućava bežičnu vezu s lokalnom mrežom (LAN). Projekt MORE MICROGRIDS pokazao se uspješnim u povećanju učinkovitosti upravljanja energijom u sustavu [20].

## **6.3. Operativni problemi i vremenske nepogode**

Mikromreža u Gaidouromantri, poput svih sustava nosi se sa određenim izazovima. Jedan od većih kvarova koji je u sustavu nastao bio je kvar dizel generatora. Rijetka upotreba dizel generatora povećala je njegovo trošenje i usprkos mjerama poduzetim za učinkovito hlađenje, smatra se kako je kvar izazvan nedovoljnim hlađenjem generatora koji je većinom radio samo ljeti kada je Gaidouromantra više naseljena, a temperatura okoline visoka. Čitava instalacija mikromreže je tijekom godina rada izdržala jednu ozbiljnu poplavu uzrokovanu jakom kišom koja je uništila dvorišta, biljke te kamene zidove između kuća. Poplava nije nanijela sustavu mikromreže nikakva oštećenja, ali je 2012. godine došlo do velikog požara niskog raslinja uz

vrlo jak vjetar na južnom djelu otoka koji je prošao kroz dolinu i uništio dvije kuće, spalio jedan PV panel od 2 kW snage i drvene stupove nadzemne električne mreže. Tijekom požara sustav se ugasio zbog kratkih spojeva koji su nastali zbog paljena električnih kabela i solarnog panela. Otklanjanje kvarova je trajalo dva dana te je sustav pokrenut. CRES je organizirao zamjenu stupova i popravak dijela mreže gdje su se kvarovi dogodili, uključujući i zamjenu solarnog panela. Nakon požara, radi sigurnosti se paneli postavljaju na minimalnu visinu koja iznosi 2m od tla, daleko od grmlja i drveća [1].



*Slika 6.7. Izgorjeli drveni stup [18]*



*Slika 6.8. Slika naselja Gaidouromantra nakon požara 2012. godine [18]*



*Slika 6.9. Izgorjeli fotonaponski panel i pretvarači [18]*



#### 6.4. Poboljšanje performansi sustava

Provedena je kampanja za praćenje performansi mikromreže u Gaidouromantri. Sustav prati generatore i opterećenja u mikromreži te omogućava rano otkrivanje kvarova komponenti, poboljšanje pouzdanosti, performansi i sigurnosti napajanja za korisnike te daljinski nadzor mikromreže. Napravljena je i implementirana baza podataka performansi. U kolovozu 2008. godine je provedena procjena kvalitete električne energije prema standardu EN50160 provedena u vremenskom trajanju od 7 dana. Provedena analiza je pokazala kako je frekvencija često odstupala od zadanog raspona. Frekvencija se koristi za upravljanje energijom, pa su promjene u frekvenciji signalizirale različita stanja u sustavu. Kada su baterije pune, frekvencija raste iznad 51 Hz, a kada su gotovo prazne, frekvencija pada ispod standardne na 49,14 Hz. Ove promjene frekvencije mogu izazvati isključivanje ili smanjenje opterećenja kako bi se optimizirala upotreba energije i zaštitile baterije. U slučajevima kada frekvencija premaši 51 Hz PV pretvarači smanjuju svoju izlaznu snagu jer je baterija puna, a potrošnja niska. PV pretvarači se automatski prilagođavaju stanju baterije kako bi spriječili prekomjerno punjenje. Kada je baterija nisko napunjena, pretvarači smanjuju frekvenciju mreže. Ukoliko frekvencija padne ispod 49,14 Hz to je znak niske napunjenosti baterije pa se isključuju tereti u kućama kako bi se smanjilo opterećenje i spriječilo pražnjenje baterije ispod dozvoljene granice. Osim variranja frekvencije primijećeno je i povećano variranje napona uzrokovano radom pumpe koja se koristi za crpljenje vode u kuće. Ove vrste pumpi mogu stvoriti fluktuacije napona zbog visokih struja pokretanja ili cikličkog rada. Također je zabilježeno povećano djelovanje harmonika U9 uzrokovano radom hladnjaka te povećano djelovanje harmonika U6 kada su pretvarači smanjili izlaznu snagu. Harmonici su višekratnici vrijednosti osnovne frekvencije koji mogu ometati rad električne mreže. U9 harmonik predstavlja deveti harmonik što znači da je frekvencija devet puta veća od osnovne, a U6 harmonik označava frekvenciju šest puta veću od osnovne. Oba harmonika mogu izazvati izobličenja u struji. Tijekom provođenja ove analize, dnevni omjer performansi (PR) mrežnog sustava varirao je od 0,2 do 0,6. PR predstavlja učinkovitost fotonaponskog sustava u pretvorbi solarne energije u električnu u odnosu na teorijski maksimum te se izračunava uzimajući u obzir gubitke i uvjete rada poput temperature, prljavštine na panelima, kuta pod kojim sunčeva svjetlost pada na panele i druge utjecajne faktore. U idealnim uvjetima PR bi iznosio 1 ili 100%, međutim u realnim uvjetima vrijednosti su niže. Na Kythnosu sustav je radio na 20-60% svoje maksimalne teoretske učinkovitosti. Primjerice u slučajevima kada je  $PR=0,2$  sustav je pretvarao samo 20% dostupne solarne energije u električnu.

Kako bi se poboljšao omjer performansi, predlažu se u nastavku navedene mjere [20]:

1. Višak energije u sustavu mogao bi se iskoristiti za crpljenje, desalinizaciju ili općenito obradu vode koja se može koristiti i za grijanje ili hlađenje prostora.
2. Implementacija regulatora opterećenja i optimizacija potrošnje energije u razdobljima visoke potrošnje može pomoći u izbjegavanju preopterećenja sustava i poboljšanju ukupne učinkovitosti. Ovo znači da bi se uređaji koji nisu od kritične važnosti u danom trenutku mogli isključiti kako bi se bolje raspolagalo raspoloživom energijom.
3. Razvoj potrebnih mjera sigurnosti, zaštite, komunikacije i kontrole za pametni dvosmjerni transformator niskog napona na srednji napon u slučaju da se mikromreža ikad poveže sa otočnim elektroenergetskim sustavom.
4. Optimizacija rada mikromreže u otočnom radu ili kada je povezana s distribucijskom mrežom.
5. Obrazovanje i obuka korisnika

Kroz godine rada mikromreže većina korisnika je dobro prihvatila sustav. Za održavanje i servisiranje projekata, korisničku podršku u slučaju problema i brzu intervenciju u hitnim slučajevima izabran je lokalni električar, a primjena predloženih mjera za razvoj sustava dodatno povećava sigurnost sustava.

## 7. EKONOMSKO OPRAVDANJE SUSTAVA ZA AUTONOMNO NAPAJANJE

### 7.1. Poslovni slučaj za otočni komunalni sustav

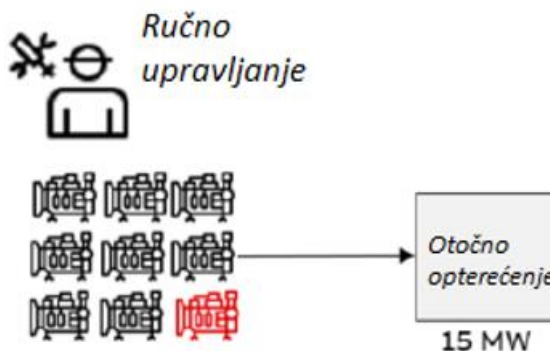
U ovom potpoglavlju predstavljen je primjer poslovnog slučaja za otočni sustav preuzet iz [1]. Odgovarajući alati ključni su za osiguranje uspjeha određenog hibridnog projekta. U početku zasnivanja projekta, treba utvrditi tehničke mogućnosti koje su i ekonomski održive. Ključ za postavljanje učinkovite mikromreže je poznavanje kako najbolje kombinirati tradicionalno proizvedenu i obnovljivu energiju, skladištenje energije i upravljanje opterećenjem uz optimalnu instalaciju sustava i najniži trošak. Ukoliko su svi ovi uvjeti ispunjeni povećava se mogućnost financiranja od investitora. U ovom slučaju razmotrit će se nekoliko scenarija uz mogućnost implementacije projekata s nižim emisijama CO<sub>2</sub> i većim udjelom obnovljivih izvora energije. Kroz predloženi projekt cilj je povećati korištenje obnovljivih izvora energije uz smanjenje ukupnih troškova i identifikacija stopa povrata ulaganja. Povećanjem udjela obnovljivih izvora energije smanjuje se potreba za korištenjem dizela ili nekih drugih fosilnih goriva. Najveći je fokus na solarnim panelima jer zahtijevaju manje održavanja i razvoj projekata nego vjetroelektrane ili hidroelektrane.

Ovaj hipotetski otočni sustav ima malu otočnu mrežu koju u potpunosti pokreću dizel agregati te se istražuje kako razna ulaganja u hibridni sustav mogu poboljšati i pojeftiniti opskrbu energijom. Zadani otok ima prosječno opterećenje od 11,2 MW, s povremenim vršnim opterećenjem do 15 MW. Prilikom vršnih opterećenja obavezno je korištenje rotirajuće rezerve od 2 MW kako bi se osigurala stabilnost prilikom vršnih opterećenja ukoliko jedan od devet dizel agregata prestane raditi. Koristi se dizelsko gorivo čija je estimirana cijena isporuke 0,75 USD/l što uključuje transport, poreze i ostale troškove. Ukupni instalirani kapitalni trošak instaliranog solarnog PV sustava što uključuje i pretvarač iznosi 1,5 USD/Wp<sup>2</sup>. Otok prima prosječno 5,5 kWh/m<sup>2</sup> po danu sunčevog zračenja no treba uzeti u obzir kako sunčevo zračenje varira tijekom godine. Ukoliko uzmemo u obzir povremenu naoblaku, 75% uobičajene izlazne snage PV-a se mora pokriti pomoću dizelskih generatora ili baterijskih sustava. Baterijski sustav koristi litij-ionske baterije i inteligentni pretvarač s dvostrukim načinom rada s 90% učinkovitošću. Baterijski sustav ima kapitalne troškove od 300 USD/kWh i 500 USD/kW te fiksnih 100 000 USD za isporuku, kontrolu i ravnotežu sustava. Kamatna stopa iznosi 9%, a stopa inflacije 2%. U prvoj fazi preporučuje se ulaganje

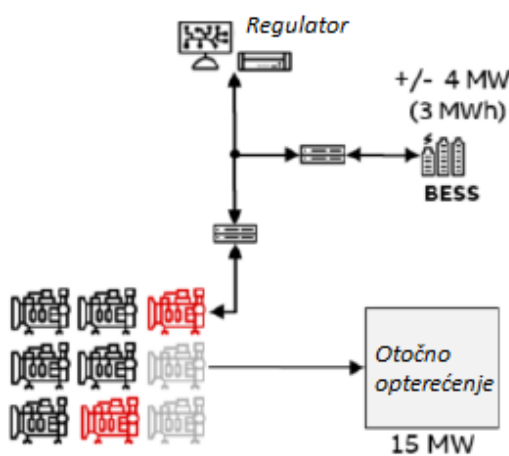
---

<sup>2</sup> Wp (Watt-peak) je indikacija temeljena na standardu. Odgovara maksimalnoj električnoj snazi koju fotonaponski panel može isporučiti u standardnim uvjetima temperature i sunčeve svjetlosti.

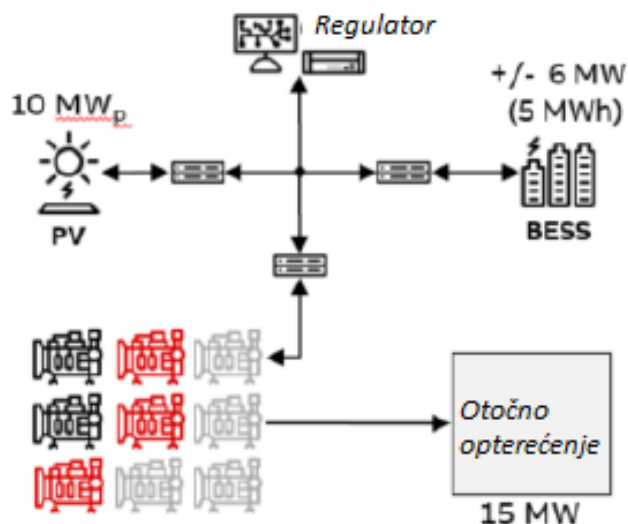
u baterijske sustave za poboljšanje stabilnosti mreže i kvalitete napajanja te osigurati da se naknadna ulaganja u obnovljive izvore koriste optimalno i bez ograničenja. U svim slijedećim fazama ulaže se u fotonaponske panele i dodatne baterijske kapacitete kako bi se smanjili troškovi i povećao udio obnovljivih izvora u sustavu.



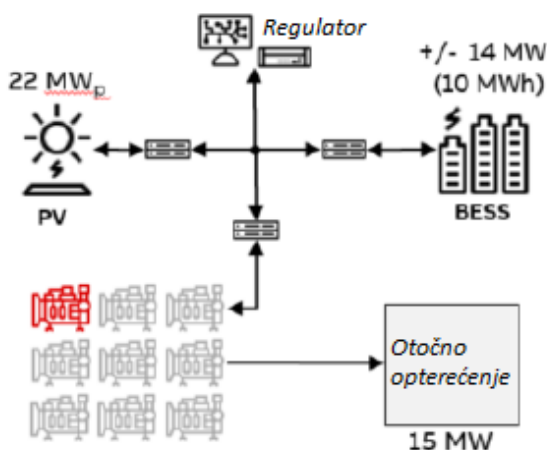
Slika 7.1. Sustav bez obnovljivih izvora i baterijskog skladišta energije [1]



Slika 7.2. Sustav spreman za integraciju obnovljivih izvora energije [1]



Slika 7.3. Sustav sa srednjim udjelom integracije obnovljivih izvora energije [1]



Slika 7.4. Sustav s visokim udjelom obnovljivih izvora energije [1]

Slike 7.1., 7.2., 7.3. i 7.4. prikazuju utjecaj obnovljivih izvora energije na sustav. Dizel generatori obojani u crno označavaju da je generator priključen i da radi, crvenom bojom označeni su generatori koji su priključeni za rezervu, a sivom bojom isključeni generatori.

U prvoj fazi, kako je prikazano na slici 7.1., otočni sustav još uvijek koristi samo dizel agregate gdje se devet generatora pali i gasi ručno, a od njih devet, svi su priključeni. Osam ih služi za napajanje, a deveti predstavlja rezervu od 2 MW. U ovoj fazi sustav još nije opremljen za implementaciju obnovljivih izvora energije u sustav.

U idućoj fazi kada je sustav spreman za implementaciju obnovljivih izvora, odnosno koristi baterijski sustav, dva se generatora mogu isključiti (slika 7.2.). U slučaju vršnih opterećenja

generatori se pokreću pomoću regulatora. Baterijski sustav poboljšava kvalitetu i pouzdanost energije.

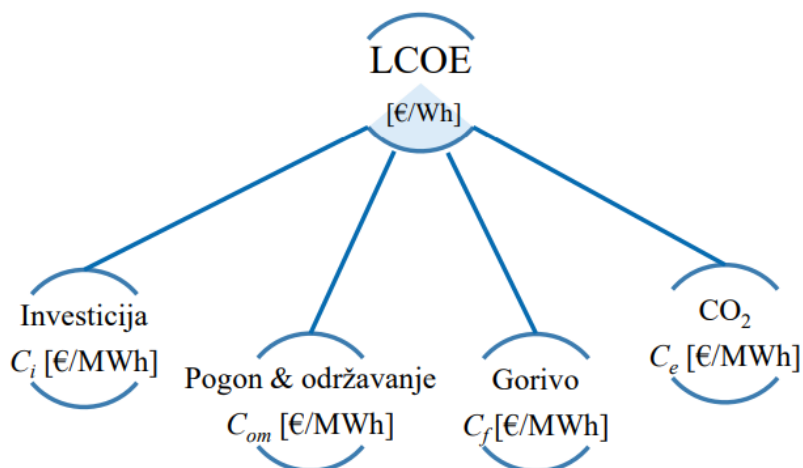
U trećoj fazi je udio obnovljivih izvora na srednjoj razini, odnosno kapacitet baterijskog sustava se povećao sa 3 na 5 MWh, te je na sustav priključena solarna elektrana od 10 MWp (slika 7.3.). Veći kapacitet baterijskog sustava omogućuje veću rezervu pa se još generatora može isključiti, a PV sustav uz skladištenje može odgovarati na određene varijacije kod tereta što znači da PV sustav može odgovoriti na brze promjene opterećenja brže od generatora jer generator ima određena ograničenja u brzini pa se sporije prilagođava promjenama u potražnji. Ukoliko je ovakav sustav pravilno kontroliran i upravljani mogu se postići značajne uštede goriva i smanjiti vrijeme korištenja generatora.

U posljednjoj fazi implementacije obnovljivih izvora (slika 7.4.) udio obnovljivih izvora je velik. Ukoliko se za zadani otočni sustav kapacitet baterijskog skladišta poveća na 10 MWh, a solarnu elektranu nadogradimo da pruža 22 MWp gotovo se svi generatori mogu isključiti osim rezerve, a tokom sunčanog dana sustav mogu pokretati samo obnovljivi izvori uz pomoć baterija.

Slučaj	Ulaganje			Operativni troškovi i gorivo		Ekonomski aspekt			Okoliš	
	PV	BESS	Kapitalni troškovi	Operativni troškovi	Gorivo	LCOE	IRR	Povrat	Doprinos OIE	Integracija OIE
	(MWp)	(MWh)	(MUSD)	(MUSD)	(Tisuće litara/day)	(USD/MWh)	(%)	(a)	(%)	(%)
1	0	0	0	23	71	233	-	-	0%	0%
2	0	3	3	-3,4%	-1.1%	-2.2%	27.0%	3.8	0.0%	0.0%
3	10	5	19.6	-20.6%	-19.8%	-12.7%	24.0%	4.1	20.0%	88.0%
4	22	10	43.1	-35.7%	-35.7%	-18.2%	19.0%	5.3	35.0%	100.0%

Tablica 7.1. Sažetak operativnih i ekonomskih prednosti za otočni sustav uz integraciju hibridnih rješenja [1]

U tablici 7.1. dani su sažeti podaci proračuna operativnih i ekonomskih čimbenika za svaki slučaj integracije obnovljivih izvora energije.



Slika 7.5. LCOE- cijena proizvodnje[23]

Slika 7.5. predstavlja sve troškove uključene u LCOE (Levelised Cost of Energy) izračun. Dakle LCOE je zbroj cijena investicije, pogona i održavanja, goriva i CO<sub>2</sub> emisija.

Prema podacima iz tablice sustav u baznom slučaju, kada koristi samo dizel generatore za napajanje troši 71 000 l/ dan goriva. Pomnoži li se ovaj iznos sa 365 dana u godini, dobije se koliko sustav troši goriva na godinu:

$$71000 \cdot 365 = 25\,915\,000 \text{ l/god} \quad (7.1)$$

Cijena dizela na tržištu iznosi oko 1.2 USD/l goriva, čime dobivamo ukupne troškove goriva na godinu koji iznose:

$$25915\,000 \cdot 1,2 = 31098000 \text{ USD/god} \quad (7.2)$$

Ovakvi troškovi goriva nisu optimalni za otočni sustav jer uvelike utječu na ekonomski i gospodarski razvoj zajednice zbog čega se u daljnjim fazama ulaže u obnovljive izvore energije i baterijske sustave. Iako su investicije u razvoj hibridnog sustava visoke, iz rezultata danih u tablici može se zaključiti kako je stopa povrata visoka. U slučaju kada je otočni sustav spreman za integraciju obnovljivih izvora energije, kapitalni troškovi iznose 3 MUSD, ali se troškovi LCOE, odnosno cijena proizvodnje smanjuje za 2.2% pa prema tome iznose 227.874 USD/MWh. Interna stopa povrata (IRR) je financijski pokazatelj koji se koristi za procjenu profitabilnosti potencijalnih ulaganja. To je diskontna stopa koja izjednačuje neto sadašnju vrijednost (NPV) svih novčanih tokova iz određenog ulaganja na nulu.

Izračunava se pomoću formule [24]:

$$NPV = \sum \left( \frac{C_t}{(1+IRR)^t} \right) - C_0 = 0 \quad (7.3)$$

Gdje je:

$NPV$  – Neto sadašnja vrijednost

$C_t$  – Net cash flow (prihodi minus troškovi) u vremenskom periodu  $t$

$C_0$  – Početni kapitalni trošak

$t$  – Vremenski period (godina)

$IRR$  – Interna stopa povrata

Ukoliko je  $IRR$  veći od troškova kapitala, ulaganje se smatra profitabilnim, ukoliko je jednak troškovima kapitala, nema ni gubitka ni dobitka, a ukoliko je  $IRR$  manji od troškova kapitala ulaganje se smatra nepovoljnim. U slučaju kada je sustav spreman za integraciju obnovljivih izvora, smanjenje potrošnje goriva i operativnih troškova nije značajno, ali ovakvo ulaganje rezultira s najvećom stopom povrata od 27%, što znači da će investitori brzo vidjeti povrat svojih ulaganja. Period povrata sredstava iznosi samo 3.8 godina što se smatra kratkim periodom povrata s obzirom na ulaganje i čini ovu opciju privlačnu investitorima koji traže brzi povrat sredstava. Dodatnim ulaganjem u obnovljive izvore energije, odnosno u trećem slučaju kapitalni troškovi iznose 19.6 MUSD, a LCOE se smanjuje za čak 12.7% u odnosu na bazni slučaj te iznosi 203.409 USD/MWh. Smanjenje operativnih troškova i troškova goriva je značajnije u usporedbi s prvim scenarijem.  $IRR$  je ponovno visok i iznos 24%. Iako je stopa povrata niža nego u drugom slučaju, period povrata sredstava je 4.1 godina što je i dalje privlačna opcija za investitore. Najduži period stope povrata je u posljednjem slučaju kada je otok integrirao 100% dozvoljenog kapaciteta obnovljivih izvora energije. Potrebna su značajna ulaganja sa kapitalnim troškovima od 43.1 MUSD, međutim stopa povrata iznosi 19%, a period povrata 5.3 godine. Iako se razdoblje povrata sredstava povećalo, treći slučaj i se i dalje smatra isplativom opcijom uz smanjenje LCOE za 18.2% te pruža najviše ekološke koristi i dugoročne uštede. Simulirani otok može povećati doprinos obnovljivih izvora energije do 35%, istovremeno smanjujući operativne troškove za oko 36% i potrošnju dizelskog goriva za oko 36%. Simulacija i proračun troškova pokazuju kako su ulaganja u hibridne sustave značajna, no zbog smanjenja troškova same opreme tehnološkim razvojem, postaju sve više isplativa investicija za opskrbu energije u područjima autonomnih napajanja.



## 7.2. Ekonomski model otočne mikromreže

Pri odabiru strukture i dimenzioniranju autonomnih sustava za napajanje električnom energijom (mikromreža) potrebni su alati za izračun troškova proizvodnje električne energije. Izrađen je ekonomski model za izračunavanje troškova proizvodnje energije (LCOE) za dva različita scenarija na primjeru mikromreže na otoku Gaidouromantra. Model uključuje hibridni sustav s obnovljivim izvorima energije (PV paneli) i dizel generatorom te sustav koji koristi samo dizel generatore. U nastavku na slici 7.6. prikazan je blok dijagram toka Python koda koji vrši proračune.



Slika 7.6. Blok dijagram toka obrade podataka u Python kodu (autor diplomant)

U nastavku je dana Python skripta koja prati blok dijagram obrade podataka sa slike 7.6.

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Pretpostavke
diskontna_stopa = 0.06

# Ulazni podaci za Gaidouromantra mikromrežu
kapacitet_pv = 11 # kW
kapacitet_baterija = 48 # kWh
kapacitet_dizel_hibrid = 9 # kVA za hibridni sustav
kapacitet_dizel_samo_dizel = 5 # kVA za sustav s vršnom potrošnjom od 3.7 kW
# Broj agregata
broj_dizel_agregata_samo_dizel = 2 # 1 za osnovno opterećenje + 1 rezervni
```

U kod su nakon učitavanja potrebnih datoteka upisani ulazni podaci kapaciteta mikromreže. Ulazni podaci uključuju kapacitet solarnih panela od 11 kW, kapacitet glavnog baterijskog skladišta od 48 kWh te kapacitet dizel generatora od 9 kVA. Za analizu sustava u slučaju kada ne radi kao hibridni sustav, već radi samo s dizel generatorima uzeta su dva dizel generatora od 5 kVA, gdje jedan služi za rezervu, a jedan za redovitu opskrbu. Za daljnje izračune pretpostavljeno je da diskontna stopa iznosi 6%.

```
# Investicijski troškovi
investicijski_trošak_pv = 1500 * kapacitet_pv # EUR
investicijski_trošak_baterija = 400 * kapacitet_baterija # EUR
investicijski_trošak_dizel_hibrid = 400 * kapacitet_dizel_hibrid #
EUR
investicijski_trošak_dizel_samo_dizel = 500 * 2 *
kapacitet_dizel_samo_dizel # EUR
```

Prateći blok dijagram, u slijedećem koraku program računa početne investicijske troškove solarnih panela, baterija i dizel generatora u oba slučaja. Iz [1] su preuzeti podaci za početne investicijske troškove solarnih panela te troškove baterija, a iz [25] početni investicijski troškovi za dizel generatore u oba slučaja. Troškovi dizel generatora su veći u slučaju rada samo dizel generatora jer su odabrani dizel generatori manje snage što poskupljuje njihovu početnu cijenu. Za solarne panele uzeta je cijena od 1500 €/kWh, za baterije 400 €/kWh. Za dizel generator od 9 kVA uzeta je cijena od 400 €/kVA dok je za dizel generator snage 5 kVA uzeta cijena od 500 €/kVA. Kada se spomenute cijene pomnože sa pripadajućim kapacitetima elemenata, rezultat su cijene početnih investicijskih troškova u eurima.

```
# Operativni troškovi
operativni_trošak_pv = 0.02 # EUR/kWh
operativni_trošak_baterije = 0.015 # EUR/kWh
operativni_trošak_dizel = 0.20 # EUR/kWh
cijena_goriva_po_litri = 1.00 # EUR/lit
emisija_co2_po_litri = 2.68 # kg CO2/lit
cijena_co2_po_kg = 0.07241 # EUR/kg
```

U kodu se zatim navode troškovi održavanja, odnosno operativni troškovi svakog elementa te cijene CO<sub>2</sub> emisija. Cijene operativnih troškova solarnih panela i baterija navedene u kodu predstavljaju procijenjene vrijednosti koje mogu ovisiti o lokalnim uvjetima i tehnologiji, ali se često uzimaju kao standardne vrijednosti u industriji. Troškovi uključuju održavanje, zamjenu komponenti i osiguranje sustava solarnih panela te zamjenu baterijskih ćelija. Cijena dizel goriva od 1 €/l može varirati ovisno o lokaciji, ali smatra se standardom za mnoge europske zemlje. Prema Međunarodnoj agenciji za energiju (IEA), sagorijevanje jedne litre dizel goriva emitira oko 2.68 kilograma CO<sub>2</sub> [26], dok cijena CO<sub>2</sub> po kilogramu iznosi 0.07241 € prema [27].

```

# Trošak goriva po kWh za dizel generator (0.3 lit/kWh) i troškovi CO2
emisija
potrošnja_goriva_po_kwh = 0.3 # lit/kWh
cijena_goriva_po_kwh = potrošnja_goriva_po_kwh *
cijena_goriva_po_litri # EUR/kWh
co2_po_kwh = potrošnja_goriva_po_kwh * emisija_co2_po_litri # kg
CO2/kWh
cijena_co2_po_kwh = co2_po_kwh * cijena_co2_po_kg # EUR/kWh

```

Potom se u kodu računaju cijene goriva i CO<sub>2</sub> emisija po kWh uz specifičnu potrošnju goriva od 0.3 l/kWh.

```

# Godišnja proizvodnja energije
godišnja_proizvodnja_baterije = kapacitet_baterija * 365 * 8 #
kWh/god
godišnja_proizvodnja_pv = kapacitet_pv * 365 * 5 # kWh/god,
pretpostavljamo 5 sunčanih sati dnevno
godišnja_proizvodnja_dizel_obnovljivi = kapacitet_dizel_hibrid * 24
* 365 * 0.2 # 20% vremena radi dizel generator
godišnja_proizvodnja_dizel_samo_dizel = kapacitet_dizel_samo_dizel *
24 * 365 # kWh/god

```

Kod računanja godišnje proizvodnje, potrebno je uzeti u obzir da baterije rade osam sati dnevno u prosjeku, tijekom noći, a proizvodnja solarnih panela ovisi o sunčevom intenzitetu i broju sunčanih sati dnevno, ali se pretpostavlja da kroz godinu ima pet sunčanih sati dnevno. Dizel generator u slučaju hibridnog napajanja radi oko 20% vremena godišnje, najviše tijekom ljetnih mjeseci kada se potražnja ne može zadovoljiti solarnim panelima i baterijskim skladištem energije, dok u slučaju kada sustav radi samo s generatorima, dizel generatori mora raditi 365 dana u godini, 24 sata dnevno kako bi potražnja bila zadovoljena.

```

# Funkcija za izračun troškova investicije (Ci)
def izračun_ci(investicija, diskontna_stopa, godine,
godišnja_proizvodnja):
    return ((investicija * diskontna_stopa) / (1 - (1 +
diskontna_stopa)**-godine)) / godišnja_proizvodnja

# Funkcija za izračun LCOE
def izračun_lcoe(ci, operativni_trošak, cijena_goriva, co2_trošak,
ukupna_proizvodnja):
    ukupni_operativni = operativni_trošak * ukupna_proizvodnja
    ukupni_gorivo = cijena_goriva * ukupna_proizvodnja
    ukupni_co2 = co2_trošak * ukupna_proizvodnja
    lcoe = (ci + ukupni_operativni + ukupni_gorivo + ukupni_co2) /
ukupna_proizvodnja
    return lcoe

```

Nakon izračuna svih potrebnih podataka, u kodu su definirane funkcije za izračun troškova investicije i za izračun LCOE.

Cijena investicija definirana je početnim investicijama, diskontnom stopom, godinama otplate i godišnjom proizvodnjom, a funkcija se računa prema formuli:

$$Ci = \frac{I \cdot a}{1 - (1+a)^{-t}} \cdot \frac{1}{P} \quad (7.4)$$

Gdje je:

$I$  – Investicija [€]

$a$  – Diskontna stopa [%]

$t$  – Vrijeme otplate investicije [godine]

$P$  – Godišnja proizvodnja [kWh]

U kodu je zatim definirana funkcija za izračun LCOE čiji su ulazni podaci cijena investicije  $C_i$ , operativni troškovi, cijena proizvodnje, troškovi CO<sub>2</sub> emisija i godišnja proizvodnja.

```
# Izračun Ci za oba scenarija
ci_pv = izračun_ci(investicijski_trošak_pv, diskontna_stopa, 15,
godišnja_proizvodnja_pv)
ci_baterija = izračun_ci(investicijski_trošak_baterija,
diskontna_stopa, 5, godišnja_proizvodnja_baterije)
ci_dizel_obnovljivi = izračun_ci(investicijski_trošak_dizel_hibrid,
diskontna_stopa, 5, godišnja_proizvodnja_dizel_obnovljivi)

ci_gaidouromantra_obnovljivi = ci_pv + ci_baterija +
ci_dizel_obnovljivi

ci_dizel_samo_dizel =
izračun_ci(investicijski_trošak_dizel_samo_dizel *
broj_dizel_agregata_samo_dizel, diskontna_stopa, 15,
godišnja_proizvodnja_dizel_samo_dizel)

# Izračun LCOE za oba scenarija
lcoe_gaidouromantra_obnovljivi_dizel =
izračun_lcoe(ci_gaidouromantra_obnovljivi, operativni_trošak_pv +
operativni_trošak_dizel + operativni_trošak_baterije, 0, 0,
godišnja_proizvodnja_pv + godišnja_proizvodnja_dizel_obnovljivi +
godišnja_proizvodnja_baterije)

lcoe_gaidouromantra_samo_dizel = izračun_lcoe(ci_dizel_samo_dizel,
operativni_trošak_dizel, cijena_goriva_po_kwh, cijena_co2_po_kwh,
godišnja_proizvodnja_dizel_samo_dizel)
```

U konačnici, u funkciju unosimo potrebne podatke te program računa cijene investicije i LCOE za oba slučaja uzimajući u obzir diskontnu stopu.

```
# Prikaz rezultata
labels = ['Gaidouromantra Obnovljivi + Dizel', 'Gaidouromantra Samo
Dizel']
lcoe_values = [lcoe_gaidouromantra_obnovljivi_dizel,
lcoe_gaidouromantra_samo_dizel]

x = np.arange(len(labels))
width = 0.35

fig, ax = plt.subplots()
rects1 = ax.bar(x, lcoe_values, width, label='LCOE (EUR/kWh)')

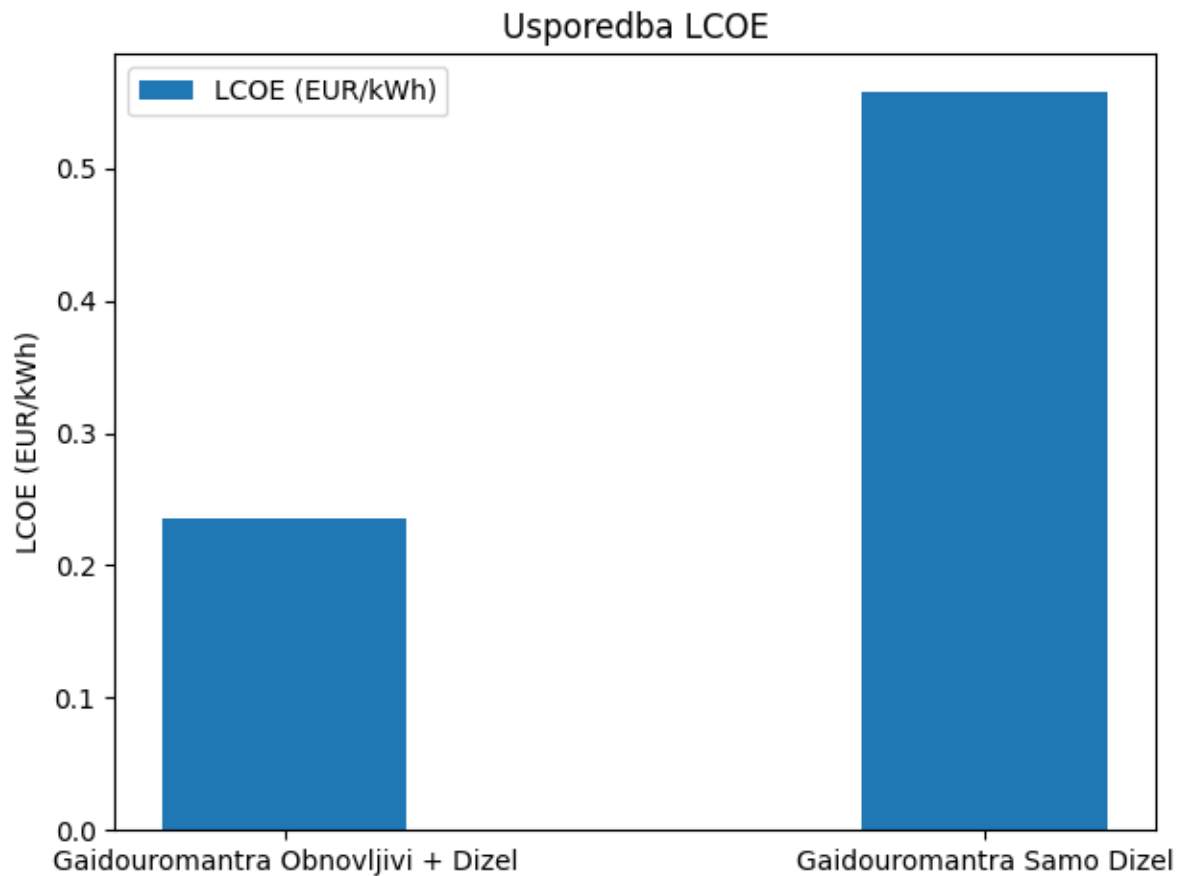
ax.set_ylabel('LCOE (EUR/kWh)')
ax.set_title('Usporedba LCOE')
ax.set_xticks(x)
ax.set_xticklabels(labels)
ax.legend()

fig.tight_layout()

plt.show()

print(f"LCOE za Gaidouromantra Obnovljivi + Dizel:
{lcoe_gaidouromantra_obnovljivi_dizel:.5f} EUR/kWh")
print(f"LCOE za Gaidouromantra Samo Dizel:
{lcoe_gaidouromantra_samo_dizel:.5f} EUR/kWh")
```

Posljednji dio koda priprema podatke za grafički prikaz rezultata i zatim stvara stupičasti dijagram koristeći matplotlib biblioteku. Kod omogućava vizualnu usporedbu ekonomičnosti sustava napajanja u dva različita sustava.



*Slika 7.7. Grafički prikaz rezultata za dva slučaja analize sustava*

Rezultati provedene analize daju slijedeće podatke:

**LCOE za Gaidouromantra Obnovljivi + Dizel: 0.23500 EUR/kWh**

**LCOE za Gaidouromantra Samo Dizel: 0.55822 EUR/kWh**

Na temelju izračuna, hibridni sustav s obnovljivim izvorima energije i dizel generatorom pokazuje značajno niži LCOE u usporedbi sa sustavom koji koristi samo dizel generatore. Primjena hibridnih sustava za autonomno napajanje, koji kombiniraju obnovljive izvore energije s dizel generatorima, predstavljaju ekonomski i ekološki isplativiju opciju u usporedbi s tradicionalnim sustavima koji koriste isključivo dizel generatore. To potvrđuje ekonomsku isplativost ulaganja u obnovljive izvore energije uz podršku dizel generatora za pokrivanje vršnih opterećenja te se pokazuje kao održivije rješenje za napajanje autonomnih sustava.

## 8. ZAKLJUČAK

Hibridni sustavi za autonomno napajanje predstavljaju kombinaciju različitih izvora energije i tehnologija za osiguravanje stabilnog i pouzdanog električnog napajanja. Ovi sustavi uključuju kombinaciju obnovljivih izvora energije poput solarnih panela i vjetroagregata zajedno s baterijskim skladištima električne energije i dizel generatorima. Integracijom različitih izvora energije povećava se pouzdanost sustava, a kombinacija sa baterijskim skladištima omogućuje kontinuirano napajanje čak i u slučajevima kada proizvodnja iz obnovljivih izvora varira. Osim stabilne proizvodnje, hibridni sustavi smanjuju potrebu za fosilnim gorivima poput dizela što doprinosi smanjenju stakleničkih plinova i pozitivnom utjecaju na okoliš.

Osnovni elementi hibridnih sustava za autonomno napajanje električnom energijom su obnovljivi izvori energije, najčešće solarni paneli i vjetroagregati u kombinaciji s dizel generatorima, baterije, dvosmjerni pretvarači te regulatori punjenja baterija.

Područja primjene hibridnih sustava za autonomno napajanje električnom energijom su najčešće otoci, udaljene zajednice, rudnici i ostali koji nemaju pristupa lokalnoj distribucijskoj ili prijenosnoj mreži.

Pri planiranju, izboru sustava i dimenzioniranju hibridnih sustava za autonomno napajanje električnom energijom nužno je analizirati i potvrditi ekonomsku isplativost, a osnovni pokazatelji su: vrijeme povrata ulaganja, odnosno vrijeme potrebno da se investicija vrati kroz uštede ili prihode generirane sustavom, NPV vrijednost, unutarnja stopa povrata i LCOE.

Razvijenim ekonomskim modelom i programiranim kodom istraženi su troškovi više varijanti, odnosno prema podacima dostupnim u navedenoj literaturi, programirani kod računa LCOE u slučaju napajanja otočne mikromreže pomoću hibridnog modela napajanja i u slučaju napajanja iste mreže dizel generatorima.

Iako integracija hibridnih sustava može imati više početne kapitalne troškove u usporedbi s konvencionalnim generatorima na fosilna goriva, često pokazuju dugoročne uštede kroz niže operativne troškove i manju ovisnost o skupim gorivima te mogućnost korištenja besplatnih izvora energije poput sunca, vjetra, vode ili biomase. Hibridni sustavi su prilagodljivi i mogu se podesiti prema potrebama potražnje i zahtjevima prostora što ih čini sve zanimljivijima u slučajevima autonomnog napajanja na mjestima gdje nema pristupa elektroenergetskoj mreži. Zbog svojih pozitivnih karakteristika, hibridni sustavi se rapidno tehnološki razvijaju. Napredak u tehnologiji baterija, solarnih panela, pretvarača i drugih komponenti omogućuje daljnju optimizaciju i povećanje učinkovitosti uz smanjenje cijena energije. U mnogim zajednicama gdje je autonomno napajanje jedina opcija za opskrbu električnom energijom, hibridni sustavi predstavljaju sve popularniju opciju i održivo rješenje.

## LITERATURA

- [1] Bachmann; Suphattana: „Hybrid Systems for Off-Grid Power Supply“, CIGRE, tehnička brošura, 2021.
- [2] <https://www.energetika-net.com/nove-tehnologije/hibridni-energetski-sustavi-buducnost-energetike-27985>, S Interneta, 13.06.2024.
- [3] <https://ryker.hr/hibridni-solarni-sustav/>, S Interneta, 20.05.2024.
- [4] <https://www.basengreen.com/hr/koliko-povr%C5%A1ine-je-potrebno-za-solarnu-elektranu-od-10kw/>, S Interneta, 21.05.2024.
- [5] <https://itm-zg.hr/services/aps/>, S Interneta, 22.05.2024.
- [6] Sufryan, M.; Rahim Abd N. i dr.: „Optimal sizing and energy scheduling of isolated microgrid considering the battery lifetime degradation“, Plos One, 2019.
- [7] [https://en.wikipedia.org/wiki/Battery\\_storage\\_power\\_station](https://en.wikipedia.org/wiki/Battery_storage_power_station), S Interneta, 15.06.2024
- [8] <https://growattportable.com/blogs/news/bidirectional-inverter-technology-explained>, S Interneta, 10.05.2024.
- [9] [https://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_panel](https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_panel), S Interneta, 10.06.2024.
- [10] [https://en.wikipedia.org/wiki/Wind\\_turbine](https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_turbine), S Interneta, 10.06.2024.
- [11] <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/diesel-generator>, S Interneta, 10.05.2024.
- [12] Morales Lassale, J.; Figueroa Martinez, D.; Fernandez Vergara, L.: „Optimisation of hybrid renewable energy systems on islands: A review“, Island Studies Journal, 2021.
- [13] Natividad, E. L.; Benalcazar, P. : „Hybrid renewable energy systems for sustainable rural development: Perspectives and challenges in energy systems modeling“, Energies, 2023.
- [14] Fathima, H.; Parabakaran, N. i dr.: „Hybrid-Renewable Energy Systems in Microgrids: Integration, Developments, and Control“, Woodhead Publishing, 2018.
- [15] Štemberga, H.: „Prijenosne funkcije linearnih vremenski neovisnih sustava“, završni rad, Tehnički Fakultet Sveučilišta u Rijeci, 2022.
- [16] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032114010879>, S Interneta, 10.06.2024.



- [17] <https://www.smarttrue.gr/en/gaidouromandra/> , S Interneta, 11.06.2024.
- [18] Tselepis, S.: „12 years operation of the Gaidouromantra Microgrid in Kythnos island“ , Grčka, 2012.
- [19] <http://www.microgrids.eu/index.php?page=kythnos&id=2> , S Interneta, 13.06.2024.
- [20] Tselepis, S; Neris, A.: „Research issues on stand-alone pv/hybrid systems: state-of-art and future technology perspectives for the integration of  $\mu$ grid topologies on local island grids“ , Grčka, 2006.
- [21] <https://reempowered-h2020.com/pilots/kythnos/> , S Interneta, 13.06.2024,
- [22] <https://kythnos-smartisland.gr/el/about/> , S Interneta, 13.06.2024.
- [23] Franki, V.; Višković, A.: „Cijena proizvodnje“ ,Materijali s kolegija Tržište električne energije, 16.06.2024.
- [24] <https://www.investopedia.com/terms/i/irr.asp> , S Interneta, 16.06.2024.
- [25] <https://www.lectura-specs.hr/hr> , S Interneta, 20.06.2024.
- [26] <https://www.iea.org/> , S Interneta, 20.06.2024.
- [27] <https://tradingeconomics.com/commodity/carbon> , S Interneta, 20.06.2024.

## POPIS SLIKA

Slika 2.1. Hibridni sustav [1] .....	3
Slika 3.1. Troškovi električne energije u ovisnosti udjela obnovljivih izvora energije[1] .....	7
Slika 4.1. Hibridni sustav za autonomno napajanje (mikro mreža) [6].....	11
Slika 5.1. Udio pojedine grupe autonomnih sustava napajanja [1].....	17
Slika 5.2. Potrebna količina energije za obradu pojedine količine materijala [1].....	17
Slika 5.3. Odnos dnevne proizvodnje i potrošnje na području rudnika Zimbi [1].....	19
Slika 5.4. Otočni sustav [1] .....	21
Slika 5.5. Odziv frekvencije prije integracije baterijskog skladišta (lijevo) i odziv generatora (desno) [1] .....	23
Slika 5.6. Odziv frekvencije nakon integracije baterijskog skladišta (lijevo) i odziv generatora (desno) [1] .....	23
Slika 5.7. Odziv napona, jalove snage (lijevo) i frekvencije (desno) uslijed trolnog kvara u sustavu sa i bez baterijskog skladišta energije [1].....	27
Slika 5.8. Kompleksna poluravnina [15].....	29
Slika 5.9. Odziv hibridnog sustava na nagli gubitak solarne energije [1].....	30
Slika 6.1. Lokacija Gaidouromantra mikromreže .....	33
Slika 6.2. Električni dijagram Gaidouromantra mikromreže [1] .....	34
Slika 6.3. Interijer upravljačke stanice [17] .....	34
Slika 6.4. Razvodni ormarići [17] .....	35
Slika 6.5. Izlaz iz upravljačke stanice [17].....	35
Slika 6.6. Baterijski sustav 48 kWh [17].....	36
Slika 6.7. Izgorjeli drveni stup [18].....	39
Slika 6.8. Slika naselja Gaidouromantra nakon požara 2012. godine [18] .....	40
Slika 6.9. Izgorjeli fotonaponski panel i pretvarači [18].....	40
Slika 7.1. Sustav bez obnovljivih izvora i baterijskog skladišta energije [1].....	44
Slika 7.2. Sustav spreman za integraciju obnovljivih izvora energije [1].....	44
Slika 7.3. Sustav sa srednjim udjelom integracije obnovljivih izvora energije [1].....	45
Slika 7.4. Sustav s visokim udjelom obnovljivih izvora energije [1] .....	45
Slika 7.5. LCOE – cijena proizvodnje [23].....	47
Slika 7.6. Blok dijagram toka obrade podataka u Python kodu .....	49
Slika 7.7. Grafički prikaz rezultata za dva slučaja analize sustava .....	54

## **Sažetak i ključne riječi**

Ovaj diplomski rad bavi se istraživanjem hibridnih sustava za autonomno napajanje električnom energijom, s posebnim naglaskom na njihovu primjenu u udaljenim i izoliranim područjima. U radu se analizira potreba i opravdanost uvođenja autonomnih sustava napajanja s obzirom na ekonomske, ekološke i društvene čimbenike. Detaljno su opisani osnovni elementi hibridnih sustava kao što su baterijska skladišta energije, solarni paneli, vjetroturbine i dizel generatori. Također se razmatraju tehnička rješenja i izazovi u integraciji obnovljivih izvora energije u ove sustave, uključujući primjere iz stvarnog svijeta kao što je otočna mikromreža na otoku Kythnos. Ekonomska analiza pokazuje da unatoč visokim početnim investicijama, hibridni sustavi mogu značajno smanjiti operativne troškove i emisije CO<sub>2</sub>, čime pridonose održivom razvoju lokalnih zajednica.

**Ključne riječi:** Hibridni sustavi, autonomno napajanje, obnovljivi izvori energije, baterijska skladišta energije, solarni paneli, vjetroturbine, dizel generatori, mikromreže, ekonomska analiza, dekarbonizacija, održivi razvoj, energetska tranzicija

## **Summary and key words**

This thesis deals with the research of hybrid systems for autonomous power supply, with a special emphasis on their application in remote and isolated areas. The paper analyzes the need and justification for the introduction of autonomous power supply systems with regard to economic, ecological and social factors. Basic elements of hybrid systems such as battery energy storage, solar panels, wind turbines and diesel generators are described in detail. Technical solutions and challenges in integrating renewable energy sources in these systems are also discussed, including real-world examples such as the island microgrid on the island of Kythnos. Economic analysis shows that despite high initial investments, hybrid systems can significantly reduce operating costs and CO<sub>2</sub> emissions, thereby contributing to the sustainable development of local communities.

**Key words:** Hybrid systems, autonomous power supply, renewable energy sources, battery energy storage, solar panels, wind turbines, diesel generators, microgrids, economic analysis, decarbonization, sustainable development, energy transition