



**UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET**

FILIP TOMOVIĆ

**ANALIZA FAKTORA SNAGE I TOTALNE HARMONIJSKE
DISTORZIJE MREŽNO POVEZANOG SOLARNOG
INVERTORA**

MASTER RAD

Podgorica, novembar, 2025.

PODACI I INFORMACIJE O KANDIDATU

Ime i prezime: Filip Tomović

Datum i mjesto rođenja: 10.08.2001. godine, Podgorica, Crna Gora

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

INFORMACIJE O MASTER RADU

Naziv osnovnih studija: Energetika i automatika, smjer elektroenergetski sistemi

Naslov master rada: Analiza faktora snage i totalne harmonijske distorzije mrežno povezanog solarnog invertora

Fakultet na kojem je rad odbranjen: Elektrotehnički fakultet, Podgorica

UDK, OCJENA I ODBRANA MASTER RADA

Datum prijave master rada: 05.09.2025. godine

Datum sjednice Vijeća univerzitetske jedinice na kojoj je prihvaćena tema: 16.06.2025. godine

Komisija za ocjenu rada:

Prof. Dr. Martin Čalasan

Prof. Dr. Vladan Vujičić

Prof. Dr. Vladan Radulović

Komisija za odbranu rada:

1. Prof. Dr. Martin Čalasan
2. Prof. Dr. Vladan Vujičić
3. Prof. Dr. Vladan Radulović

Datum odbrane: 29.12.2025. godine

Datum promocije: _____

PREDGOVOR

Istraživanje ovog master rada motivisano je izazovima sa kojima se suočavaju savremene elektroenergetske mreže usljed sve većeg udjela distribuiranih izvora električne energije, posebno fotonaponskih sistema. I pored brojnih prednosti koje obnovljivi izvori energije donose, njihova integracija u mrežu uvodi niz tehničkih poteškoća. Nestabilna proizvodnja koja se javlja kod obnovljivih izvora energije, može dovesti do odstupanja napona, pojave harmonijskih izobličenja i promjene faktora snage.

Rad invertora u velikoj mjeri zavisi od snage sunčevog zračenja – iradijacije, koja se mijenja u zavisnosti od doba dana, ali i od uslova okoline (oblaci, prašina, smog itd.). Smanjena iradijacija negativno utiče na ključne parametre kvaliteta električne energije: faktor snage (PF) i faktor totalne harmonijske distorzije (THDi). Održavanje ovih faktora u propisanim granicama je od suštinskog značaja za stabilan i pouzdan rad elektroenergetskog sistema. Zbog toga je neophodno istražiti uticaj atmosferskih uslova na rad solarne elektrane, kako bi se bolje razumio rad invertora i osigurala isporuka električne energije propisanog kvaliteta.

Cilj ovog rada je da se, kroz kombinaciju simulacionih testiranja i eksperimentalnih mjerenja, odrede uticaji iradijacije i temperature na THDi i faktor snage mrežno povezanog solarnog invertora. Za potrebe istraživačkog rada i simulacionih testiranja koristilo se okruženje MATLAB/Simulink.

Konačni cilj ovog rada jeste da se eksperimentalno verifikuju tvrdnje o povezanosti promjenljivih ulaznih parametara i kvaliteta električne energije, te da se odredi matematički model koji može poslužiti kao alat za dalju analizu i optimizaciju rada fotonaponskih sistema. Time se daje doprinos efikasnijoj integraciji solarnih elektrana u elektroenergetsku mrežu.

IZVOD RADA

Ovaj master rad se bavi analizom faktora snage (PF) i totalne harmonijske distorzije struje (THDi) kod mrežno povezanog solarnog invertora, sa ciljem sagledavanja uticaja fotonaponskih (PV) sistema na kvalitet električne energije.

Istraživanje za potrebe master rada realizovano je kroz kombinaciju simulacionih testiranja i eksperimentalnih mjerenja. U prvoj fazi izvršeno je simulaciono testiranje solarnog sistema sa mrežno povezanim invertorom u MATLAB/Simulink okruženju. Promjenom ulaznih parametara, iradijacije i temperature, simulirani su različiti radni uslovi radi određivanja THDi i PF. Za potrebe simulacionih testiranja korišćen je unaprijed definisan “100-kW Grid-Connected PV Array”, dok je za praćenje tačke maksimalne snage primjenjen algoritam inkrementalne konduktanse. U drugoj fazi, na osnovu dobijenih rezultata simulacije, regresionom analizom i metodama statističkog fitovanja dobijena je zavisnost THDi i PF od ulaznih parametara. U trećoj fazi, u cilju validacije zaključaka dobijenih simulacionim testiranjima, rezultati dobijeni u drugoj fazi upoređeni su sa rezultatima eksperimentalnih mjerenja na nekim od realnih solarnih elektrana.

Rezultati istraživanja potvrdili su da promjena uslova okoline utiče na izlaznu snagu, totalnu harmonijsku distorziju i faktor snage, odnosno na kvalitet električne energije. Smanjenje nivoa solarne iradijacije negativno utiče na totalnu harmonijsku distorziju struje i faktor snage na izlazu invertora, smanjujući njegovu vrijednost. To potvrđuje da razvijeni matematički model za predviđanje totalne harmonijske distorzije i faktora snage mrežno povezanog solarnog invertora, može dobro poslužiti za povećanje stabilnosti i pouzdan rad elektroenergetskog sistema u slučaju fluktuacija solarne iradijacije i ambijentalne temperature.

Ključne riječi: iradijacija, fotonaponski sistemi, mrežno povezani inverter, totalna harmonijska distorzija (THD), faktor snage.

ABSTRACT

This paper focuses on the analysis of Power Factor (PF) and Total Harmonic Distortion of Current (THDi) of a grid-connected solar inverter, with the aim of examining the impact of photovoltaic (PV) systems on power quality.

The research was conducted through a combination of simulation and experimental measurements. In the first phase, the operation of a solar system with a grid-connected inverter was simulated in the MATLAB/Simulink environment. By varying the input parameters, namely irradiance and temperature, different operating conditions were examined to determine THDi and PF. For the purposes of simulation, a predefined "100-kW Grid-Connected PV Array" model was used, while the Maximum Power Point Tracking (MPPT) was implemented using the "Incremental Conductance" algorithm. In the second phase, based on the obtained simulation results, regression analysis and statistical fitting methods were used to establish the dependence of THDi and PF on the input parameters. In the third phase, in order to validate the conclusions derived from the simulations, the results obtained in the second phase were compared with experimental measurements from several real solar power plants.

The research results confirmed that changes in environmental conditions affect output power, total harmonic distortion, and power factor, and thus impact the overall quality of electrical energy. A decrease in solar irradiance negatively affects the total harmonic distortion of current and the power factor at the inverter output, reducing their values. This confirms that the developed mathematical model for predicting total harmonic distortion and power factor in a grid-connected solar inverter can serve as a valuable tool for improving the stability and reliable operation of the power system in the presence of fluctuations in solar radiation and ambient temperature.

Keywords: irradiation, photovoltaic systems, grid-connected inverter, total harmonic distortion (THD), power factor.

Univerzitet Crne Gore
Elektrotehnički fakultet

IZJAVA O AUTORSTVU

Kandidat, Filip Tomović,

Na osnovu člana 22 Zakona o akademskom integritetu, ja, dolje potpisani/potpisana

IZJAVLJUJEM

pod punom krivičnom i materijalnom odgovornošću da je master rad pod nazivom:

**„ ANALIZA FAKTORA SNAGE I TOTALNE HARMONIJSKE DISTORZIJE MREŽNO
POVEZANOG SOLARNOG INVERTORA“**

rezultat sopstvenog istraživačkog rada, da nijesam kršio autorska prava i koristio intelentualnu svojinu drugih lica i da je navedeni rad moje originalno djelo.

Podgorica, 17. novembar 2025.



Potpis studenta

Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Sunčeva energija.....	4
2.1. Energetski potencijal Sunčevog zračenja u svijetu i Crnoj Gori	4
2.2. Osnovi solarne geometrije	6
2.3. Solarne elektrane	9
3. Fotonaponski sistemi.....	10
3.1. Podjela fotonaponskih sistema	11
3.2. Integracija fotonaponskih sistema u elektroenergetski sistem.....	13
3.3. Ekološki aspekti fotonaponskih sistema.....	14
3.4. Ekonomski i politički aspekti fotonaponskih sistema	15
4. Princip rada fotonaponskih ćelija i invertora	17
4.1. Princip rada fotonaponskih (PV) ćelija	17
4.1.1. Struktura i tipovi fotonaponskih ćelija	17
4.1.2. Ekvivalentna zamjenska šema fotonaponskih ćelija	18
4.1.3. Uticaj sunčevog zračenja i temperature na parametre PV ćelije	20
4.1.4. Fotonaponski moduli i paneli	22
4.2. Princip rada invertora	23
4.2.1. Uloga i značaj invertora.....	23
4.2.2. Klasifikacija invertora	23
4.2.3. Dobijanje naizmjeničnog napona pravougaonog talasnog oblika	25
4.2.4. Širinsko-impulsna modulacija	25
4.2.5. Praćenje tačke maksimalne snage	26
5. Parametri kvaliteta električne energije (PF i THDi).....	30
5.1. Indikatori kvaliteta električne energije	31
5.2. Totalna harmonijska distorzija – THD.....	34
5.3. Faktor snage.....	35
5.4. Regulative i standardi za PF i THDi.....	36
6. Rezultati simulacionih mjerenja.....	38
6.1. Uvod u simulaciju.....	38
6.2. Matematički model i rezultati simulacije	42
6.3. Uticaj iradijacije na THD i PF	44
6.3.1. Uticaj iradijacije na THDi	46
6.3.1.1. Predloženi aproksimativni metod.....	47
6.3.2. Uticaj iradijacije na faktor snage.....	49
6.3.2.1. Predloženi aproksimativni metod.....	50
6.4. Uticaj iradijacije i temperature na THDi i <i>PF</i>	52
6.4.1. Uticaj iradijacije i temperature na THDi.....	52
6.4.2. Uticaj iradijacije i temperature na faktor snage.....	54
7. Rezultati eksperimentalnih mjerenja	55
7.1. Primjer 1	55
7.2. Primjer 2	57
7.2.1. THDi.....	57
7.2.2. Faktor snage.....	60
7.3. Primjer 3	63
7.4. Zavisnost THDi od iradijacije i temperature	66
8. Zaključak.....	70
Literatura	72

1.Uvod

Suočen sa posljedicama klimatskih promjena, intenzivnim porastom broja stanovnika, neracionalnom upotrebom prirodnih resursa, zagađenom životnom sredinom i nedostatkom ekološke svesti, svijet se danas nalazi na prekretnici ekološke krize [1]. Prema podacima Ujedinjenih Nacija (UN), očekuje se da će globalna populacija do 2050. godine porasti za 20% [2]. Uz procjenu porasta svjetske populacije, koji prate razvoj industrije i elektrifikacija transporta očekuje se i porast potražnje za električnom energijom. Pored toga, razvoj vještačke inteligencije podstiče potrebu za centrima podataka koji zahtijevaju mnogo energije. Američka kompanija NextEra Energy predviđa skok potražnje za električnom energijom od 55% u narednih 20 godina u odnosu na prethodne dvije decenije [3]. Uporedo sa porastom potreba za električnom energijom, raste i zabrinutost za životnu sredinu.

Energetske potrebe u današnje vrijeme se uglavnom podmiruju iz fosilnih goriva, kao što su ugalj, nafta i prirodni gas [4]. Upotreba fosilnih goriva ima višestruka negativna dejstva, uključujući emisije štetnih gasova koji doprinose efektu staklene bašte i globalnom zagrijavanju. Pored toga, rezerve fosilnih goriva su ograničene. Prema podacima kompanije MET Group, postojeće globalne rezerve primarnih fosilnih energenata, dovoljne su za sljedeći vremenski period, uzimajući u obzir sadašnju potrošnju energije [5]:

- ugalj: 139 godina,
- nafta: 54 godine,
- prirodni gas: 49 godina.

Zbog ovih razloga, obnovljivi izvori energije (OIE) dobijaju na sve većem značaju. Međunarodna agencija za energiju (*International Energy Agency* - IEA) je definiše kao energiju dobijenu iz prirodnih procesa koja se obnavlja brže nego što se troši. U ove izvore energije spadaju energija Sunca, energija vjetra, hidroenergija, geotermalna energija i biomasa. OIE imaju niz prednosti u odnosu na fosilna goriva, među kojima su očuvanje životne sredine, energetska nezavisnost i dugoročna održivost. Oni ne emituju emisije štetnih gasova, ne zagađuju okolinu i neiscrpn su. Investicije u OIE podstiču razvoj novih tehnologija, kao što su pametne mreže i sistemi skladištenja energije. Proizvodne jedinice koje koriste OIE su relativno malih snaga pa se obično vezuju na niskonaponsku i srednjenaponsku distributivnu mrežu [6]. Ovo doprinosi smanjenju gubitaka i ulaganja u prenosnu mrežu. OIE poput solarnih, vjetro i hidroelektrana, imaju značajne ekonomske koristi zahvaljujući niskim troškovima eksploatacije. Međutim, uprkos brojnim prednostima, postoje i određene mane i ograničenja ovih izvora energije. Najveća mana je zavisnost od vremenskih uslova, što ograničava pouzdanost proizvodnje u realnom vremenu. Promjenljivost proizvodnje, zahtjeva drugačiji pristup u upravljanju elektroenergetskim sistemom (EES). Iako ekološki prihvatljivi, ovi izvori mogu ostaviti negativan uticaj na biljni i životinjski svijet, dok izgradnja većih elektrana narušava estetski izgled okoline.

U procesu pristupanja Evropskoj Uniji (EU), Crna Gora je preuzela obaveze prema međunarodnim i evropskim klimatskim regulativama, uključujući Kyoto protokol, Parišku klimatsku konvenciju i direktive EU o obnovljivim izvorima energije. Pomenuti protokoli i regulative predstavljaju ključne mehanizme globalnog odgovora na izazove klimatskih promjena. Njihova osnovna svrha je da obavežu države potpisnice na smanjenje emisija štetnih gasova i podstaknu prelazak ka održivim i čistim izvorima energije. Jedna od ključnih strategija EU je Evropski Zeleni Dogovor (engl. *European Green Deal*), kojim se predviđa postizanje klimatske neutralnosti do 2050. godine, odnosno da neto emisija gasova sa efektom staklene bašte budu nula [7]. Danas su u EU dostupni razni mehanizmi tržišne podrške OIE, kao što su aukcije i feed in premium šeme. Aukcije podstiču konkurenciju među investitorima, što doprinosi smanjenju troškova proizvodnje energije iz obnovljivih izvora. Sistemi garantovanog otkupa (*feed-in tariffs*) su imali ključnu ulogu u ranijim fazama razvoja OIE [8]. Pored tržišnih instrumenata, finansijski mehanizmi EU, poput Modernizacijskog fonda i programa InvestEU, obezbjeđuju kapital za projekte koji doprinose energetske tranziciji. Evropska Unija snažno podržava i koncept energetske demokratije, podstičući građane, lokalne zajednice i energetske zadruga da aktivno učestvuju u proizvodnji obnovljive energije.

U energetske tranziciji, ključnu ulogu igraju fotonaponski (engl. *photovoltaic* - PV) sistemi, jer spajaju održivost, ekonomsku isplativost i fleksibilnu primjenu na različitim nivoima potrošnje [9]. Solarna energija i fotonaponske elektrane, se mogu definisati kao najsavremeniji elektroenergetski izvori [6]. Fotonaponski sistemi su i najbrže rastući OIE. Naime, ova vrsta energije je besplatna, ne zagađuje životnu sredinu i ima niske operativne troškove. Istovremeno, solarna energija je čista, neiscrpna i laka za korišćenje – sve ove prednosti je čine atraktivnijom u poređenju sa drugim obnovljivim izvorima energije [10].

Solarni panel pretvara solarnu energiju sunca u električnu energiju. Brojna istraživanja su pokazala da jače sunčevo zračenje dovodi do povećane proizvodnje električne energije u fotonaponskim ćelijama. Međutim, ono što nije dovoljno istraženo je kako nepovoljni uslovi utiču na kvalitet električne energije.

Kvalitet električne energije proizvedene u PV sistemu značajno se smanjuje pri niskim vrijednostima zračenja. Faktor snage sistema opada, dok se vrijednost totalne harmonijske distorzije struje (THDi) povećava [10]. Sve ovo je posljedica rada invertora, koji u sebi sadrži elemente energetske elektronike. Invertor vrši konverziju jednosmjerne struje (DC) u odgovarajući oblik naizmjenične struje (AC) pogodan za priključenje na elektroenergetsku mrežu. Pored toga, invertor omogućava rad PV sistema na tački maksimalne snage uz primjenu MPPT algoritama [11]. Tokom ranih jutarnjih i kasni popodnevni sati, povezanih sa niskim zračenjem, PV sistem u mrežu injektira veći nivo harmonika [12]. Može se zaključiti da kada je iradijacija niska, mrežno povezani invertor „ubacuje“ više harmonika struje u elektroenergetsku mrežu u poređenju sa situacijom kada je iradijacija visoka [13]. Visok THD u mrežno povezanim PV sistemima, negativno utiče na stabilnost mreže, pouzdanost opreme i kvalitet električne energije. Da bi se prevazišli ovi problemi, neophodno je kreiranje filterskih kola za uklanjanje harmonika.

Predmet istraživanja ovog rada fokusira se na analizu faktora snage (engl. *power factor* - PF) i totalne harmonijske distorzije (THD) mrežno povezanog invertora. Ova dva parametra predstavljaju ključne pokazatelje kvaliteta električne energije, čije održavanje u propisanim granicama obezbjeđuje stabilan i pouzdan rad elektroenergetske mreže. Prema IEEE standardu 519-1992, vrijednost THD treba da bude ispod 5% [14].

Ovo istraživanje je zasnovano na sljedećoj hipotezi:

Smanjenje solarne iradijacije značajno utiče na porast totalne harmonijske distorzije (THDi) i smanjenje faktora snage ($\cos\phi$) na izlazu mrežno povezanih solarnih invertora, što se može tačno matematički modelovati i potvrditi eksperimentalnim mjerenjima.

U ovom master radu koristila se kombinacija simulacionih testiranja, rezultata eksperimentalnih mjerenja i statističke analize podataka kako bi se testirala postavljena hipoteza i odgovorilo na istraživačka pitanja. Simulacija rada PV sistema je sprovedena u MATLAB/Simulink okruženju. Za potrebe simulacije i modelovanja koristio se već definisan “100-kW Grid-Connected PV Array” model, dok je za potrebe praćenja tačke maksimalne snage (engl. *maximum power point tracking* - MPPT) korišćena metoda inkrementalne konduktanse (engl. *Incremental Conductance* – IC). Tokom simulacije, poseban fokus je stavljen na uticaj solarne iradijacije na THD struje i faktor snage ($\cos\phi$). Ispitvao se i uticaj temperature na ova dva faktora. Primjenom regresione analize i metoda statističkog fitovanja, na osnovu rezultata simulacionih testiranja, razvijene su matematičke relacije koje opisuju zavisnost THD struje i faktora snage od ulaznih parametara (temperature i iradijacije). Rezultati eksperimentalnih mjerenja korišćeni su za potvrdu prethodnih predviđanja dobijenih simulacijom.

Ovaj rad se sastoji od osam poglavlja i literature:

- U drugom poglavlju dat je pregled solarne energije, sa posebnim osvrtom na energetski potencijal Sunčevog zračenja u svijetu i Crnoj Gori, kao i kratak prikaz osnova solarne geometrije.
- U trećem poglavlju prikazana je analiza fotonaponskih sistema, sa naglaskom na njihov doprinos i značaj u elektroenergetskim sistemima (EES).
- U četvrtom poglavlju opisan je princip rada fotonaponske ćelije i invertora.
- U petom poglavlju analizirani su parametri kvaliteta električne energije.
- U šestom poglavlju predstavljen je model razvijen u MATLAB/Simulink okruženju i dobijeni rezultati simulacionog testiranja. Opisana je zavisnost THDi i PF od promjena ulaznih parametara.
- U sedmom poglavlju prikazani su rezultati eksperimentalnih mjerenja. Analizom dobijenih rezultata potvrđena je relevantnost razvijenih modela i validirane su teorijske pretpostavke o uticaju atmosferskih uslova na rad sistema.
- U osmom poglavlju sumirani su najvažniji rezultati istraživanja i dati ključni zaključci o uticaju iradijacije i temperature na kvalitet električne energije. Predloženi su pravci budućih istraživanja.

2. Sunčeva energija

Solarna energija predstavlja jedan od najčistijih i najdostupnijih oblika obnovljive energije u savremenom svijetu. Njena osnovna prednost leži u direktnom iskorišćavanju sunčevog zračenja, koje se putem različitih tehnologija – prvenstveno fotonaponskih sistema i solarnih termalnih sistema – pretvara u korisnu električnu ili toplotnu energiju. Budući da Sunce svakodnevno emituje više energije nego što je cjelokupno čovječanstvo potroši za godinu dana, solarna energija pruža gotovo neograničen potencijal za zadovoljenje globalnih energetske potreba. Sunce kao daleko najveći obnovljivi i za čovjeka neograničen izvor energije, predstavlja potencijal kakav nema ni jedan drugi izvor energije [6].

Sunce je najveći izvor energije na Zemlji. Svake sekunde, Sunce oslobađa ogromne količine energije. Samo mali dio te energije dopijeva do Zemljine površine, ali i taj mali dio višestruko premašuje ukupne energetske potrebe čovječanstva. Snaga sunčevog zračenja iznosi 3.8×10^{26} W. Procjenjuje se da Zemlja prima 173000 TW Sunčeve energije u svakom trenutku. Tokom 2023. godine, globalne potrebe za električnom energijom iznosile su 29471 TWh [15], odakle se može zaključiti da je jedan sat Sunčevog zračenja dovoljan da podmiri energetske potrebe svjetske populacije za cijelu godinu. Ovaj ogroman potencijal je ključni faktor zbog kojeg solarna energija igra sve važniju ulogu u globalnoj energetske tranziciji [16].

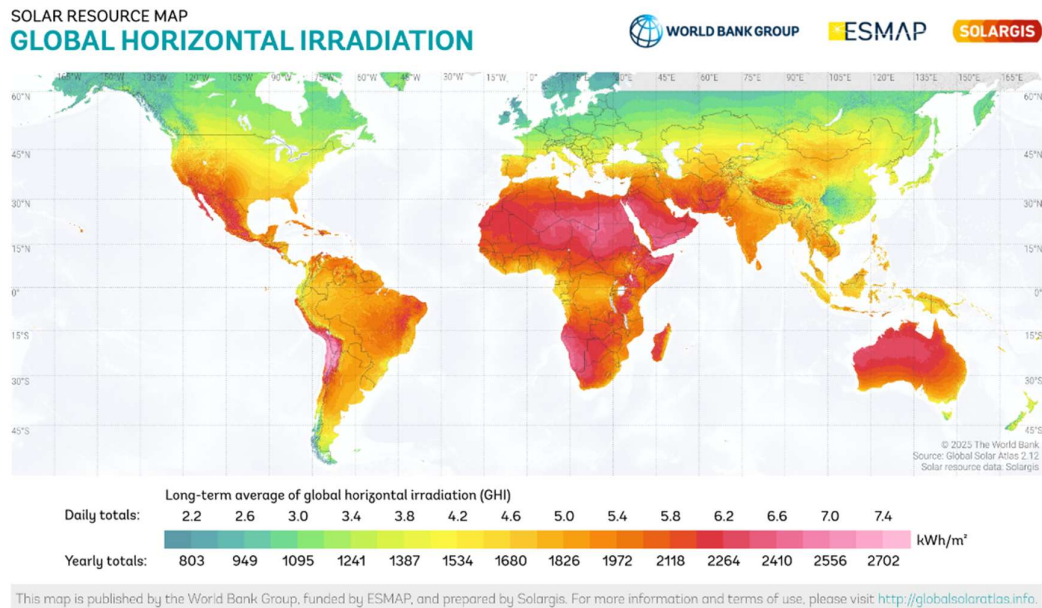
Postoje dva načina iskorištavanja solarne energije, a to su toplotna i fotonaponska konverzija. Toplotna konverzija podrazumijeva pretvaranje solarne energije u toplotnu energiju, koja se kasnije koristi za zagrijavanje vode, prostorija, plastenika itd. Fotonaponska konverzija podrazumijeva pretvaranje energije Sunca u električnu energiju putem fenomena koji se naziva fotoelektrični efekat.

2.1. Energetski potencijal Sunčevog zračenja u svijetu i Crnoj Gori

Snaga Sunčevog zračenja na površini zemlje zavisi od više faktora, između ostalog od: geografske širine, oblačnosti, godišnjeg doba, doba dana i dr. [17]. Snaga Sunčevog zračenja po jedinici površine se definiše kao iradijacija i izražava se u kW/m^2 . Insolacija predstavlja količinu Sunčeve energije, apsorbovanu po jedinici površine u toku određenog vremena i izražava se u kWh/m^2 .

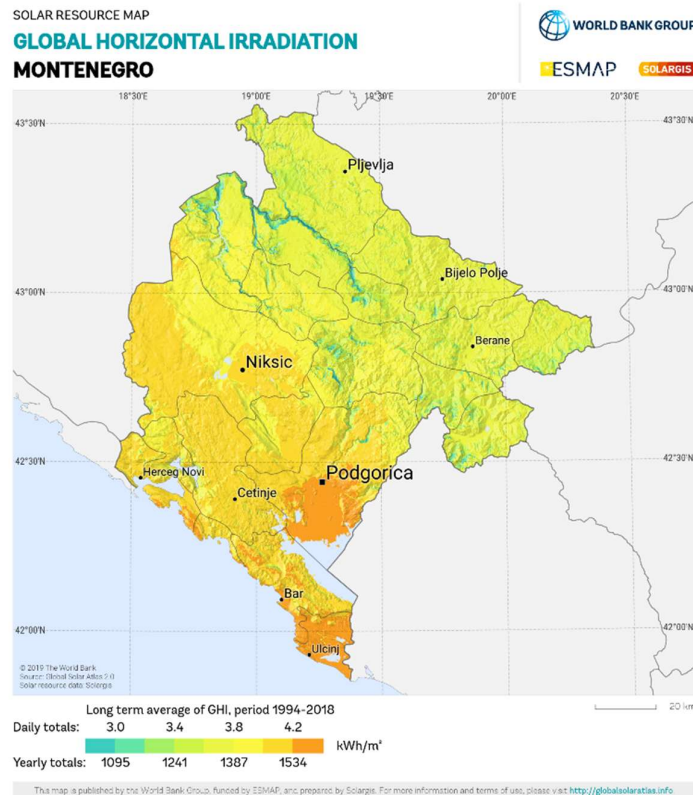
Iradijacija Sunca na ulazu u Zemljinu atmosferu naziva se ekstraterestrička iradijacija. Zbog eliptične putanje Zemlje oko Sunca, vrijednost ekstraterestričke iradijacije se mijenja u toku godine. Prosječna godišnja vrijednost ekstraterestričke iradijacije po jedinici površine Zemljine atmosfere upravne na Sunčevo zračenje iznosi $SC = 1367 \text{ W}/\text{m}^2$ i naziva se solarna konstanta. Iradijacija Sunca koja nakon prolaska kroz Zemljinu atmosferu dopijeva na površinu Zemlje naziva se terestrička iradijacija. Kada je Sunce u zenitu, pri čistoj atmosferi i vedrom danu, maksimalna vrijednost terestričke iradijacije na horizontalnoj površini Zemlje iznosi $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ [6].

Na slici 2.1 prikazana je godišnja energija Sunčevog zračenja na horizontalnoj površini Zemlje [$\text{kWh}/\text{m}^2/\text{god}$].



Slika 2.1. Količina energije Sunčevog zračenja na horizontalnoj površini Zemlje [18]

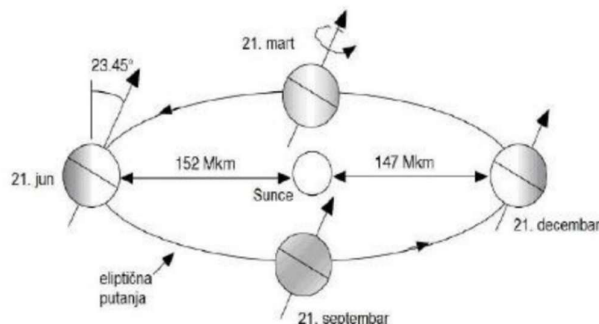
Crna Gora ima izuzetno povoljne uslove za korišćenje solarne energije. Prema podacima sa sajta Global Solar Atlas, prosječno godišnje globalno horizontalno zračenje (engl. *global horizontal irradiance* - GHI) u Crnoj Gori iznosi između 1350 i 1750 kWh/m² godišnje [18]. Na slici 2.2 prikazana je godišnja energija Sunčevog zračenja na horizontalnoj površini u Crnoj Gori. Crna Gora u prosjeku ima između 200 i 240 sunčanih dana godišnje, uz godišnju insolaciju od oko 2000 do 2500 sunčanih sati, što je izuzetan energetski potencijal za korišćenje solarne energije.



Slika 2.2. Količina energije Sunčevog zračenja na horizontalnoj površini u Crnoj Gori [18]

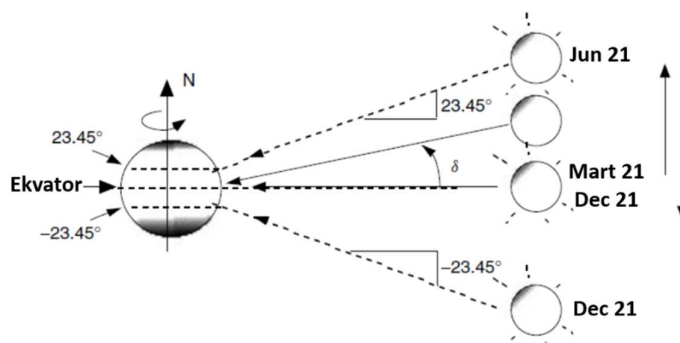
2.2. Osnovi solarne geometrije

Vremenski profil snage koju generiše fotonaponski panel je dominantno uslovljen intenzitetom Sunčevog zračenja na površini fotonaponskog panela. Intenzitet zračenja na površini fotonaponskog panela je uslovljen rotacijom Zemlje oko svoje ose (dnevne promjene zračenja), kao i rotacijom Zemlje oko Sunca (sezonske promjene) (slika 2.3) [6].



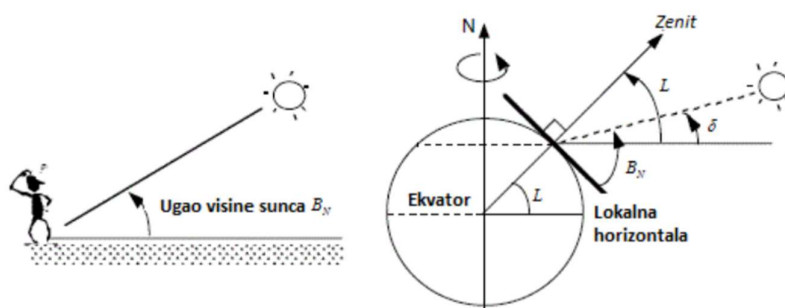
Slika 2.3. Eliptična putanja Zemlje oko Sunca Gori [19]

Ravan koja sadrži Zemljinu eliptičnu putanju naziva se ekliptička ravan. Ugao između Zemljinog ekvatora i ekliptičke ravni iznosi 23.45° . Ugao formiran između ravni ekvatora i linije povučene iz centra Sunca naziva se solarna deklinacija i označava se sa δ . Ovaj ugao varira između $\pm 23.45^\circ$ i razlikuje se za svaki dan u godini [20]. Promjena ugla deklinacije Sunca tokom godine prikazana je na slici 2.4 gdje su naznačena i četiri karakteristična dana u godini glede položaja Zemlje u odnosu na Sunce.



Slika 2.4. Solarna deklinacija [20]

Na slici 2.5 je ilustrovan položaj sunca u odnosu na horizontalno položen modul na geografskoj širini L pri proizvoljnoj deklinaciji δ u solarno podne.

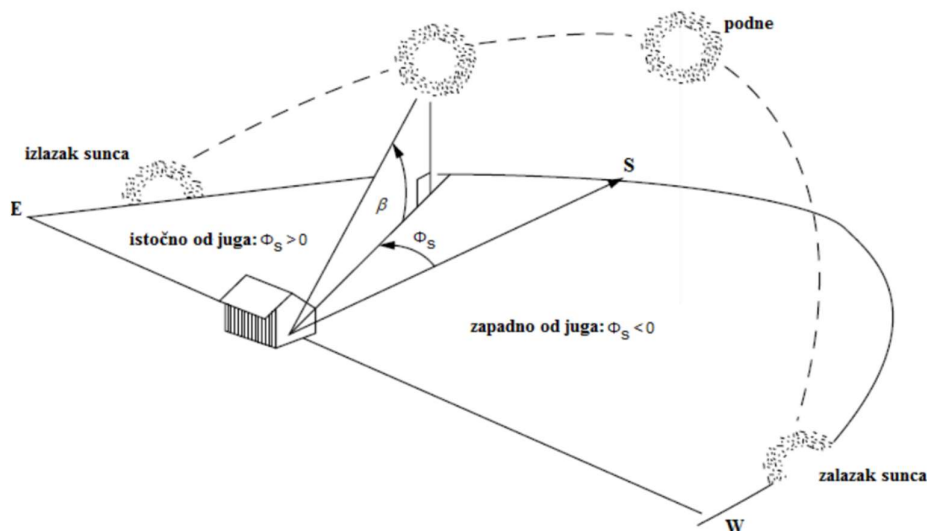


Slika 2.5. Položaj sunca u odnosu na horizontalno položen modul [20]

Ugao β_N definiše visinu Sunca, i on se kreće u opsegu od -90° do $+90^\circ$. Ovaj ugao pokazuje pod kojim uglom posmatrač na Zemlji vidi Sunce [6]. Ugao visine Sunca je pozitivan kada je Sunce iznad horizonta, a negativan kada je ono ispod njega.

Da bi iradijacija na površini fotonaponskog panela bila najveća, potrebno je da površina panela bude normalna na upadno Sunčevo zračenje. U tom pogledu, najbolji nagibni ugao fotonaponskog panela je nagibni ugao jednak uglu geografske širine mjesta na kome se nalazi taj panel (latitudni ugao L) pri čemu se ostvaruje najveća prosječna iradijacija [6].

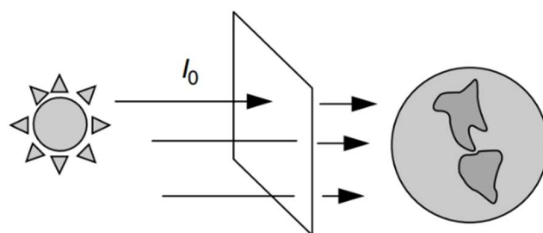
Položaj Sunca u odnosu na neki objekat na Zemlji je određen je njegovim altitudnim uglom β i njegovim azimutnim uglom φ_S (slika 2.6) [6].



Slika 2.6. Položaj Sunca na nebu, altitudni ugao β i azimutni ugao Sunca φ_S [6]

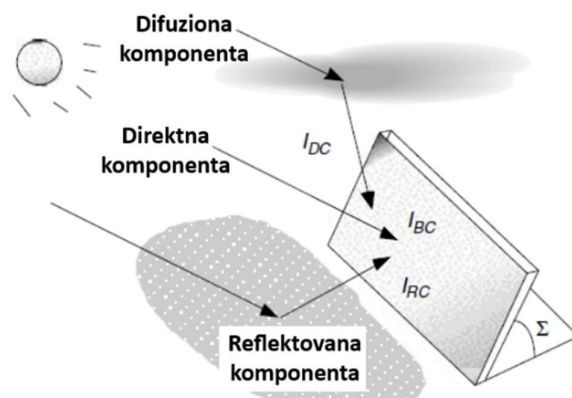
Azimutni i altitudni ugao zavise od geografske širine posmatranog mjesta, dana u godini i doba dana.

Usljed promjene rastojanja Zemlje od Sunca u toku godine, i jačine Sunčevog zračenja, intenzitet ekstraterestričke iradijacije se mijenja. Slabljenje dolaznog zračenja zavisi od udaljenosti koju snop mora proći kroz atmosferu, kao i od faktora kao što su prašina, zagađenje vazduha, atmosferska vodena para, oblaci i zamućenost (slika 2.7) [6] [21].



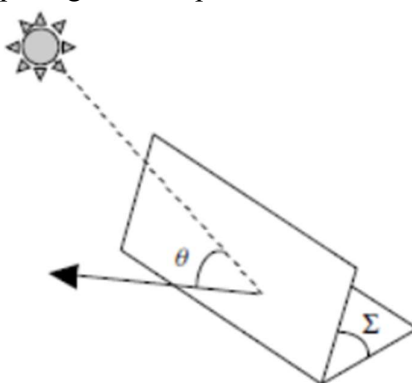
Slika 2.7. Ekstraterestrički solarni fluks [21]

Ukupno zračenje koje dopire do modula sastoji se od tri komponente: direktnog (I_{BC}), difuzionog (I_{DC}) i reflektovanog (I_{RC}) (slika 2.8). Reflektovana komponenta predstavlja dio Sunčevog zračenja koje se odbilo od površinu tla ili nekog objekta [21].



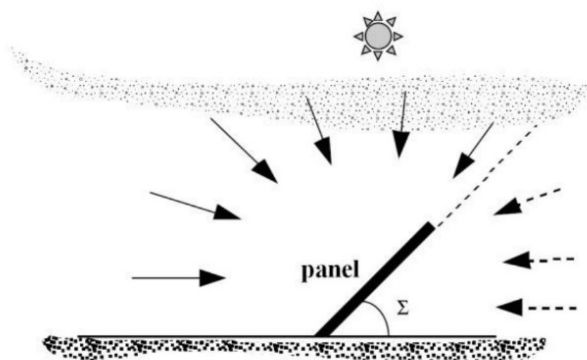
Slika 2.8. Komponente zračenja [20]

Direktno zračenje predstavlja zrake koji dolaze direktno od Sunca, bez prelamanja ili rasipanja u atmosferi [21]. Ti zraci padaju pod uglom θ na posmatrani modul (slika 2.9).



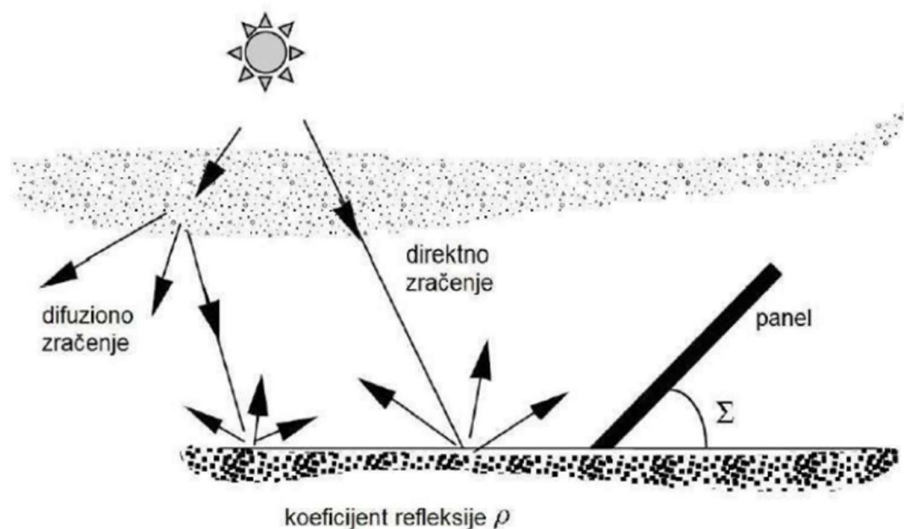
Slika 2.9. Direktna komponenta zračenja [20]

Difuziona komponenta nastaje pri raspršavanju sunčevih zraka u atmosferi, i dolazi iz svih pravaca neba (slika 2.10) [21]. Iz ovog razloga je intenzitet difuzionog zračenja na površini fotonaponskog panela teže precizno odrediti [6].



Slika 2.10. Difuziono zračenje [6]

Radi određivanja udjela reflektovanog zračenja u ukupnom zračenju koje stiže do površine panela potrebno je koristiti model koji uvažava pretpostavku da se od podloge reflektuje direktno i difuziono horizontalno zračenje u svim pravcima [6] (slika 2.11).



Slika 2.11. Model reflektovanog zračenja [6]

Solarni zraci koji padnu na zemlju se dijelom reflektuju, pri čemu intenzitet refleksije zavisi od refleksionih karakteristika površine [20].

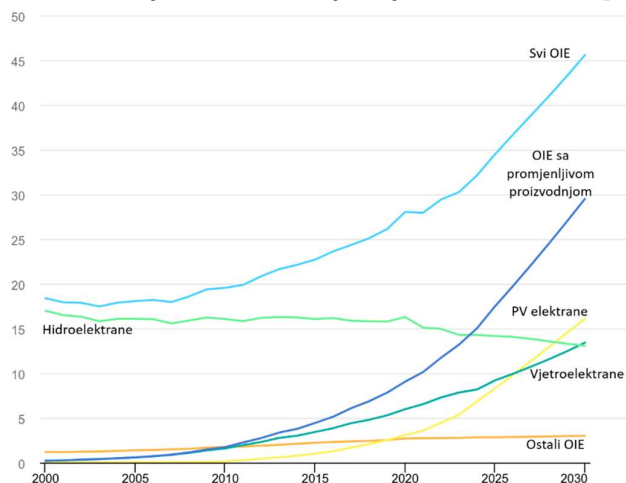
U prethodno pomenutom, ukratko je objašnjen postupak proračuna ukupne iradijacije fotonaponskog panela pri vedrom danu na osnovu ekstraterestričke iradijacije. U realnim uslovima zbog oblačnosti, lokalne zagađenosti atmosfere i drugih sličnih uticaja neophodno je vršiti mjerenje iradijacije kako bi se korektno odredio solarni potencijal, odnosno potrebno je vršiti mjerenje horizontalne iradijacije za duži period, od najmanje godinu dana i to na mjestu na kome će biti postavljen panel. Postoje dva principijelna senzora za mjerenje solarne iradijacije, a to su piranometar i pirheliometar. Piranometar mjeri ukupnu iradijaciju koja dopijeva na njegovu aktivnu površinu uključujući direktnu i difuzionu komponentu. Pirheliometar mjeri samo direktnu komponentu zračenja [6].

2.3.Solarne elektrane

Solarne elektrane su postrojenja u kojima se vrši pretvaranje energije Sunca u električnu energiju. Kod solarnih elektrana postoje dva pristupa proizvodnji električne energije. Direktni pristup se bazira na upotrebi fotonaponskih ćelija koje vrše pretvaranje solarne u električnu energiju. Drugi pristup je indirektni, gdje se upotrebom termalnih tehnologija (engl. *concentrated solar power* - CSP) solarna energija prvo pretvara u toplotnu, a zatim se toplotna energija koristi za dobijanje električne energije.

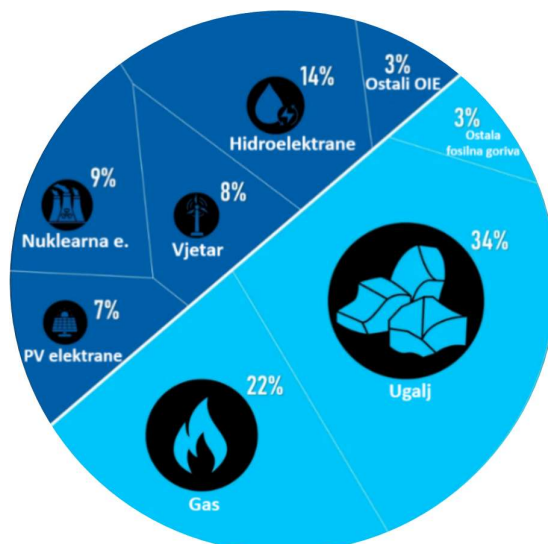
3. Fotonaponski sistemi

Fotonaponski sistemi predstavljaju najbrže rastući oblik OIE. Prema podacima IEA očekuje se da će do kraja ove decenije udio PV sistema u OIE postati najveći. PV će vrlo brzo prevazilazeći vjetroelektrane i hidroelektrane, koje trenutno imaju najveći udio u OIE [22] (slika 3.1).



Slika 3.1. Trend rasta OIE 2000-2030 [23]

Upotreba solarne energije bilježi rast, podstaknut poboljšanjem efikasnosti fotonaponskih panela, i smanjenjem troškova solarnih elektrana. Prema izvještaju organizacije SolarPower Europe, tokom 2024. godine ugrađeno je rekordnih 597 GW, što predstavlja rast od 33% u odnosu na 2023. godinu. Ukupna instalisana snaga je premašila 2 TW krajem 2024. godine, a očekuje se da će do 2030. godine dostići 7 TW [24]. U strukturi globalne proizvodnje električne energije, solarne elektrane su u 2024. godini činile 6,9% ukupnog energetskeg miksa, prema podacima međunarodne istraživačke organizacije Ember (slika 3.2) [27]. Kada je riječ o Crnoj Gori, prema informacijama portala Balkan Green Energy News, ukupna instalisana snaga solarnih elektrana u zemlji iznosila je oko 80 MW u 2025. godini [25].



Slika 3.2. Globalni energetskei miks 2024. godine [26]

3.1. Podjela fotonaponskih sistema

Fotoponski sistemi se najčešće klasifikuju na osnovu njihove povezanosti sa EES i prema načinu rada. Tu razlikujemo tri osnovne kategorije:

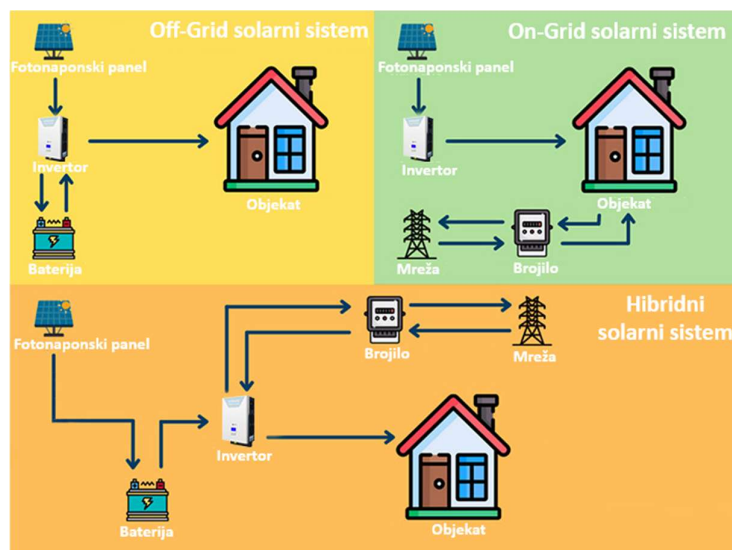
- Mrežno povezani PV sistemi (engl. *On-grid*),
- Izolovani PV sistemi (engl. *Off-Grid*),
- Hibridni PV sistemi.

Mrežno povezani sistemi su direktno povezani sa elektroenergetskom mrežom i najčešće se koriste. Ne zahtijevaju baterijske sisteme jer se višak energije koju ovi sistemi proizvedu direktno isporuči u mrežu. Nedostatak ovih sistema je što ne funkcionišu u slučaju prekida snadbijevanja električnom energijom iz mreže, zbog zaštite od ostrvskog režima rada.

Izolovani PV sistemi su u potpunosti odvojeni od mreže. Ovi sistemi se koriste na udaljenim ili nepristupačnim područjima, gdje nije moguće ili nije isplativo povezati se na mrežu. Višak proizvedene energije čuva se u baterijama predviđenim za solarne sisteme čime se obezbjeđuje energetska nezavisnost.

Hibridni fotonaponski sistemi mogu raditi nezavisno od mreže, biti povezani na mrežu ili kombinovati oba režima rada, čime obezbjeđuju visoku fleksibilnost i pouzdanost u napajanju. Prednosti ovih sistema su efikasnije korišćenje solarne energije, naročito u periodima kada mreža nije dostupna. Međutim, ovi sistemi zahtijevaju veće početne investicije u odnosu na prethodna dva tipa sistema, složeniju instalaciju i potrebu za naprednim upravljačkim sistemima.

Na slici 3.3 prikazan je sastav ovih sistema.



Slika 3.3. Tipovi fotonaponskih sistema [27]

Prema lokaciji instalacije PV sistemi mogu biti:

- Krovne (engl. *Roof-top*) instalacije,
- Zemaljske (engl. *Ground-mounted*) instalacije,
- Instalacije na vodi (engl. *Floating PV*),
- Fasadni PV sistemi (engl. *Building integrated PV*).

Krovne instalacije montiraju se na krovne površine objekata i omogućavaju efikasno iskorišćenje postojećeg prostora bez dodatnog zauzimanja zemljišta (slika 3.4). Značajno doprinose decentralizaciji proizvodnje električne energije, jer omogućavaju korisnicima da proizvode energiju na licu mjesta, smanjujući gubitke u mreži i zavisnost od centralnih izvora.



Slika 3.4. Krovna instalacija [28]

Zemaljski fotonaponski sistemi se postavljaju na tlo, uglavnom u okviru većih solarnih elektrana. Ovakvi sistemi se uglavnom nalaze izvan urbanih područja (slika 3.5). Za razliku od krovnih sistema, ovi sistemi omogućavaju izbor optimalne orijentacije i nagiba panela prema geografskoj širini lokacije, čime se ostvaruje veća efikasnost i proizvodnja tokom godine.



Slika 3.5. Solarna elektrana na zemlji – Čevo solar [29]

Solarne elektrane na vodi postavljaju se na površine vodenih tijela kao što su jezera, rezervoari i akumulacije čime se štedi kopneni prostor (slika 3.6). Pored toga, voda prirodno hladi panele, što povećava njihovu efikasnost i vijek trajanja. Takođe, studije pokazuju da ovakve instalacije pozitivno utiču i na ekosistem vodenih površina [30].



Slika 3.6. Plutajuća solarna elektrana [31]

Integrirani PV sistemi predstavljaju fotonaponske sisteme koji su strukturno integrirani u građevinske elemente objekta, kao što su fasade, krovovi ili prozori (slika 3.7).



Slika 3.7. Integrirana solarna elektrana [32]

Fotonaponski sistemi se mogu klasifikovati i na osnovu načina povezivanja panela sa inverterima:

- Centralizovani sistemi – koriste jedan veliki inverter na koji se povezuju svi moduli. Prednost ovog sistema je ušteda, ali mana je što performanse jednog modula mogu negativno da utiču na cijeli sistem.
- Decentralizovani sistem – koristi veći broj manjih invertora, pri čemu je svaki inverter povezan sa jednim nizom PV modula. Ovaj pristup nudi bolju kontrolu performansi, povećava pouzdanost sistema i olakšava održavanje.
- Sistem sa mikroinverterima – koriste poseban inverter za svaki pojedinačni modul. Ovi sistemi omogućavaju maksimalno praćenje tačke maksimalne snage za svaki modul i imaju veću otpornost na promjenljive atmosferske uslove. Međutim, ovaj tip sistema je skuplji u odnosu na prethodne.

3.2. Integracija fotonaponskih sistema u elektroenergetski sistem

Fotonaponski sistemi predstavljaju ključnu komponentu savremenih elektroenergetskih sistema. Njihova integracija u savremene EES predstavlja ključan korak ka ostvarivanju globalnih ciljeva dekarbonizacije i energetske tranzicije. Integracija solarnih elektrana može biti realizovana na dva nivoa:

- Na distributivnom nivou,
- Na prenosnom nivou.

Na distributivnom nivou, fotonaponski sistemi dolaze u okviru manjih sistema koji se vežu na srednjenaponsku ili niskonaponsku mrežu. Ovi sistemi omogućavaju direktno snadbijevanje lokalnih potrošača, čime se smanjuju gubici i povećava lokalna energetska nezavisnost.

Integracija solarnih elektrana na prenosnom nivou podrazumijeva izgradnju velikih solarnih elektrana koje se vežu na visokonaponsku mrežu. Ove elektrane omogućavaju proizvodnju velikih količina električne energije. Instalacijom ovih sistema direktno se smanjuje zavisnost od uvoznih energenata i fosilnih goriva. Međutim, integracija na prenosnom nivou ima mnogo izazova. Rad solarnih elektrana u velikoj mjeri zavisi od vremenskih uslova, što predstavlja značajan izazov za stabilnost napona i frekvencije [33].

Fotonaponski sistemi imaju veoma nisku inerciju, te integracija velikih solarnih elektrana može ostaviti uticaj na inerciju cijelog EES-a. Shodno tome, sistem ne bi bio u stanju da upravlja fluktuacijama frekvencije izazvane čestim promjenama potražnje opterećenja [34]. Moderni invertori omogućavaju brzo reagovanje na promjene frekvencije (engl. *fast frequency response* - FFR), čime se poboljšava stabilnost mreže. Zbog potrebe održavanja određene količine rezerve aktivne snage za uslugu brzog frekventnog odziva, PV sistemi moraju da rade u režimu rada sa smanjenim opterećenjem, odnosno ispod svoje tačke maksimalne snage. Solarne elektrane u ovom režimu čuvaju 3-10% snage svojih kapaciteta kao rezervu [35]. Iako PV sistemi nemaju mehaničku inerciju kao klasične elektrane, pomoću softverskih rješenja može se simulirati efekat inertnosti, usporavajući promjene frekvencije u mreži. Virtuelna inercija predstavlja dodatni kontrolni krug koji učestvuje u regulaciji frekvencije a sastoji se od sistema za skladištenje energije (engl. *energy storage system* - ESS), invertora kojim se upravlja i upravljačkog kruga koji sadrži logiku upravljanja [36].

Povećan udio PV sistema u EES takođe negativno utiče i na naponsku stabilnost. Naponska stabilnost se definiše kao sposobnost sistema da održava prihvatljive nivoje napona u čvorovima. Kada su vremenski uslovi povoljni lokalna proizvodnja može premašiti potrošnju, što dovodi do porasta napona u distributivnoj mreži. Suprotno tome, pri nepovoljnim uslovima, na primjer usljed nailaska oblaka i zalaska Sunca, proizvodnja iz PV sistema opada naglo što može izazvati padove napona. Iz tog razloga, savremeni invertori se sve češće opremaju funkcijama kontrole reaktivne snage (engl. *Volt-VAR control*) i kontrole napona (engl. *Volt-Watt control*). Ove funkcije omogućavaju inverterima da aktivno učestvuju u regulaciji napona, generišući ili apsorbujući reaktivnu snagu prema trenutnim potrebama mreže. Ove funkcionalnosti su dio tehničkih zahtjeva u standardima kao što je IEEE 1547-2018 koji se odnosi na interkonekciju distribuiranih izvora sa mrežom [37].

3.3. Ekološki aspekti fotonaponskih sistema

Fotonaponski sistemi igraju ključnu ulogu u energetskej tranziciji. Iako se često deklariraju kao „zeleni” izvor energije, neophodno je razmotriti sve ekološke aspekte njihove proizvodnje, eksploatacije i odlaganja, kako bi se stekla objektivna slika o njihovom uticaju na životnu sredinu.

Najveća prednost PV sistema je što tokom rada ne emituju gasove sa efektom staklene bašte niti druge zagađujuće materije. Na taj način, fotonaponske elektrane direktno doprinose smanjenju emisije CO₂ i borbi protiv klimatskih promjena. Prema podacima međunarodne agencije za obnovljivu energiju (*International Renewable Energy Agency* - IRENA), solarni PV sistemi imaju potencijal da omoguće izbjegavanje milijardi tona CO₂ godišnje, što ih čini ključnim u borbi protiv klimatskih promjena [38]. Prosječna emisija CO₂ po proizvedenom kWh električne energije iz PV sistema iznosi oko 40 gCO₂/kWh, dok kod konvencionalnih termoelektrana na ugalj iznosi oko 1000 gCO₂/kWh [39]. Treba napomenuti da štetne emisije gasova za fotonaponske sisteme nastaju tokom procesa proizvodnje solarnih panela.

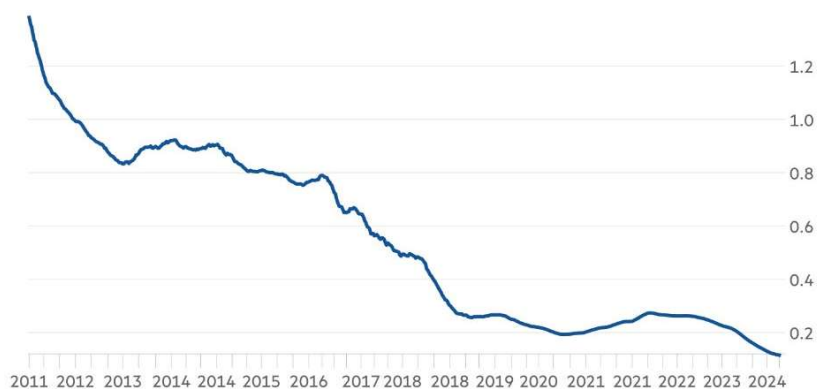
Također, PV sistemi doprinose smanjenju potrošnje vode u energetske sektoru. Za razliku od termoelektrana koje troše velike količine vode za hlađenje, solarne elektrane zahtijevaju zanemarjive količine vode, uglavnom za povremeno čišćenje panela [40]. Inovativna rješenja poput plutajućih solarnih elektrana smanjuju isparavanje vode iz jezera, ograničavaju razvoj algi i doprinose kvalitetu vode [30].

Međutim, velike fotonaponske elektrane mogu zahtijevati znatne površine zemljišta, što potencijalno dovodi do gubitka obradivih površina, erozije tla i fragmentacije ekosistema. Ipak, pravilnim planiranjem i integracijom solarnih sistema u druge sisteme moguće je znatno umanjiti negativan uticaj na zemljište i eventualno doprinijeti poljoprivredi i stočarstvu [41]. Izgradnja velikih solarnih elektrana na tlu često podrazumijeva i narušavanje prirodnog zemljišta, što može dovesti do gubitka staništa za mnoge životinjske vrste. Ovo naročito pogađa ptice, koje tokom leta mogu zamijeniti površine solarnih panela sa vodom, zbog čega u pokušaju sletanja dolazi do povreda ili smrti [42].

Odlaganje i reciklaža PV modula predstavlja rastući izazov. S obzirom na to da je očekivani životni vijek panela 25–30 godina, veliki broj modula će uskoro postati elektronski otpad. Prema podacima IRENA-e očekuje se da će do 2050. godine nastati više od 78 miliona tona PV otpada širom svijeta [43]. Ipak, PV sistemi imaju potencijal za visoku stopu reciklaže koja može iznositi i 95% [44]. Evropska Unija je 2003. godine usvojila direktivu koja reguliše zbrinjavanje električnog i elektronskog otpada (engl. *Waste Electrical and Electronic Equipment - WEEE*). WEEE obuhvata i PV module, čime se proizvođači obavezuju da osiguraju ekološki prihvatljivo upravljanje panelima kada završe svoj radni vijek [45].

3.4. Ekonomski i politički aspekti fotonaponskih sistema

U posljednjih desetak godina, cijene PV panela su drastično pale što je omogućilo širu primjenu ove tehnologije širom svijeta. Prema [46], cijena PV panela 2011. godine po je bila oko 1.4 \$/W, dok danas iznosi oko 0.1 \$/W (slika 3.8).



Slika 3.8. Cijena PV modula [\$/W] [46]

Najveća prednost fotonaponskih sistema je što za proizvodnju električne energije nije potrebno gorivo. Kada se solarna elektrana instalira, proizvedena energija postaje potpuno besplatna. Operativni troškovi fotonaponskih elektrana su relativno niski, a kada se ugrade, zahtijevaju minimalnu pažnju osim povremenog čišćenja [47].

Cijena električne energije proizvedene iz PV sistema se najčešće izražava kao LCOE indikator (engl. *levelized cost of electricity* - LCOE). LCOE troškovi se odnose na procijenjeni period potreban za izgradnju i rad postrojenja tokom određenog perioda povratka troškova [48]. Ovaj indikator predstavlja prosječnu cijenu proizvodnje električne energije, uključujući sve troškove investicije, rada, održavanja i poslovanja, podijeljene sa ukupnom proizvedenom energijom [49]. Prema najnovijim podacima Evropske platforme za tehnologiju i inovacije u oblasti fotonaponskih sistema (engl. *European Technology and Innovation Platform for Photovoltaics* - ETIP-PV), LCOE za velike solarne elektrane u južnoj Evropi je tokom 2024. godine iznosio oko 24 €/MWh, i očekuje se da će se ova vrijednost dodatno smanjiti na 19 €/MWh do 2030. godine, a na samo 13 €/MWh do 2050. godine, usljed tehnološkog napretka, optimizacije proizvodnje i ekonomije obima [50].

Mnoge vlade širom svijeta sprovele su politike podrške i podsticaje za instalaciju PV sistema. Ove mjere uključuju subvencije, poreske olakšice, garantovane otkupne cijene za električnu energiju proizvedenu iz OIE (poznatu kao *feed-in* tarifa) i različite oblike podrške za istraživanje i razvoj u oblasti OIE [51]. Mjere su učinile PV sisteme pristupačnijim i ubrzale energetska tranziciju ka održivim izvorima energije. Pored finansijskih podsticaja, EU je kroz Zeleni dogovor (engl. *European Green Deal*) i paket *Fit for 55* postavila ciljeve za povećanje udjela OIE, uključujući i solarnu energiju. Direktiva o obnovljivoj energiji (RED II) obavezuje države članice da uklone administrativne barijere i pojednostave procedure za instalaciju solarnih sistema, naročito u sektoru malih proizvođača. Otvaranjem pregovaračkog poglavlja 15, koje obuhvata sektor energetike, Crna Gora je preuzela obavezu usklađivanja sa direktivama EU i međunarodnim sporazumima.

4.Princip rada fotonaponskih ćelija i invertora

Osnovni elementi fotonaponskih sistema su fotonaponski panel i inverter. Fotonaponski paneli proizvode električnu energiju u jednosmjernom obliku. Da bi solarna elektrana mogla isporučivati energiju u elektroenergetsku mrežu, ona mora biti povezana preko invertora, koji vrši njeno pretvaranje u naizmjenični oblik. Razumijevanje načina rada ovih komponenti je od suštinskog značaja za analizu performansi cjelokupnog sistema, naročito u kontekstu efikasnosti, stabilnosti i kvaliteta električne energije.

4.1. Princip rada fotonaponskih (PV) ćelija

Fotonaponske ćelije funkcionišu na osnovu fotonaponskog efekta, procesa pri kojem se sunčeva energija pretvara u električnu. Fotonaponski efekat predstavlja osnovni fizički princip na kojem se zasniva rad solarnih ćelija. To je proces u kojem dolazi do generisanja napona ili električne struje u fotonaponskoj ćeliji kada je izložena sunčevom zračenju.

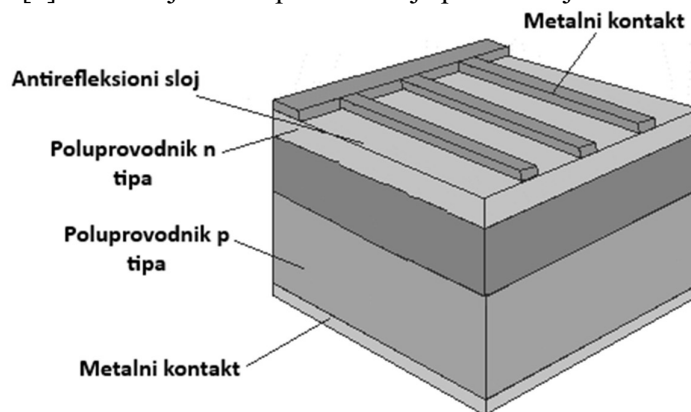
4.1.1.Struktura i tipovi fotonaponskih ćelija

Fotonaponska ćelija je poluprovodnički element koji pretvara sunčevo zračenje u električnu energiju pomoću fotoelektričnog efekta. U osnovi ćelije nalazi se PN spoj formiran od poluprovodničkih slojeva različite provodnosti. Kada fotoni dovoljno velike energije padnu na površinu ćelije, njihova energija oslobađa elektrone iz valentne zone i omogućava im prelazak u provodnu zonu. Pod uticajem električnog polja, slobodni elektroni počinju da se kreću i stvaraju električnu struju.

Razlika između provodnika, poluprovodnika i izolatora je upravo u količini energije koju je potrebno dovesti da bi elektroni prešli u provodnu zonu, tj. da bi postali slobodni elektroni i kao takvi nosioci naelektrisanja, a ta razlika energije između valentne i provodne zone se naziva energetska barijera. Da bi fotonaponska ćelija bila efikasna, neophodno je da energetska barijera poluprovodničkog materijala od koga je izrađena, odgovara određenom dijelu energetskog spektra sunčeve svjetlosti. Vrijednost optimalne energetske barijere za Sunčevu svjetlost se kreće u opsegu od 1.4 do 1.6 eV. Iako silicijum ima nešto manju energetsku barijeru od optimalne (1.12 eV), njegova široka dostupnost, hemijska stabilnost i razvijena tehnologija obrade čine ga najčešće korišćenim materijalom u proizvodnji PV ćelija.

Treba napomenuti da je električna provodnost čistih poluprovodnika jako mala. Zbog toga se, u praktičnim primjenama koriste sa dodatkom drugih elemenata, koji se nazivaju primjese. Zavisno od vrsta primjese razlikuju se n-tip, odnosno p-tip poluprovodnika [52]. Spajanjem ova dva tipa nastaje PN spoj.

Struktura fotonaponske ćelije sastoji se od dva poluprovodnička sloja, antirefleksionog materijala i metalnih kontakata [6]. Ilustracija fotonaponske ćelije prikazana je na slici 4.1.



Slika 4.1. Princip fotonaponske konverzije i silicijumska fotonaponska ćelija [6]

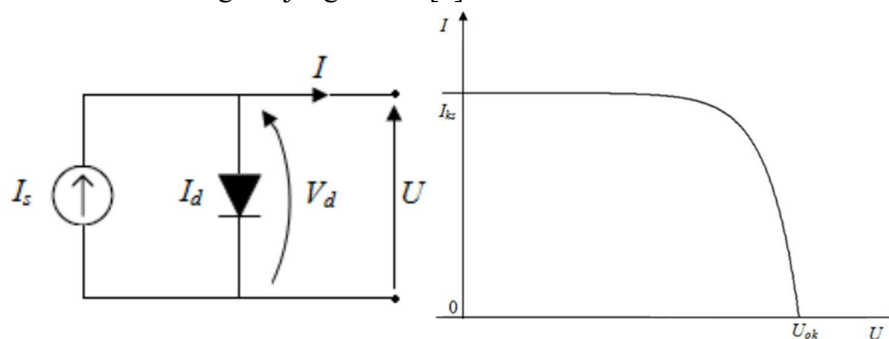
Najčešća klasifikacija fotonaponskih ćelija zasniva se na tipu silicijumskog materijala, odnosno na načinu povezivanja atoma unutar pojedinačnih kristala. Razlikuju se:

- monokristalne (napravljene od jednog kristala),
- multikristalne (napravljene su od većeg broja velikih kristala),
- polikristalne (napravljene su od velikog broja malih kristalnih zrna),
- mikrokristalne (napravljene su od veoma sitnih kristalnih zrna),
- amforne (u njima ne postoje kristalne strukture).

Fotonaponske ćelije se mogu podijeliti i na osnovu toga da li su p-tip i n-tip poluprovodnika izrađeni od istog materijala ili od različitog, odnosno da li su homogene ili heterogene [6].

4.1.2. Ekvivalentna zamjenska šema fotonaponskih ćelija

Fotonaponska ćelija se može predstaviti zamjenskom šemom prikazanom na slici 4.2 koja se sastoji od jedne diode i idealnog strujnog izvora [6].



Slika 4.2. Ekvivalentna zamjenska šema i strujno-naponska karakteristika fotonaponske ćelije [6]

S obzirom na sliku 4.2, može se napisati izraz za struju PV ćelije:

$$I = I_s - I_d, \quad (1)$$

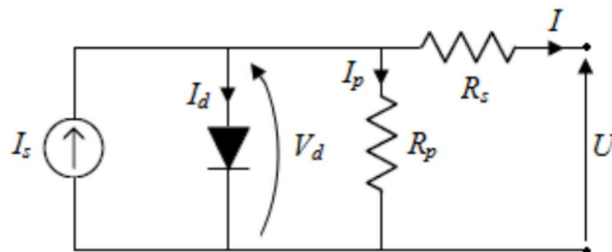
gdje su I [A] – izlazna struja fotonaponske ćelije, I_s [A] – fotostruja i I_d [A] – struja diode.

Solarna ćelija u mraku je u potpunosti ekvivalentna diodi i može se opisati sledećom jednačinom [20]:

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{qV_d}{kT}} - 1 \right), \quad (2)$$

gdje su I_0 [A] – inverzna struja zasićenja diode, q – naelektrisanje elektrona (1.602×10^{-19} C), V_d – napon na diodi, k – Bolcmanova kosntanta (1.381×10^{-23} J/C) i T apsolutna temperatura ćelije.

Međutim, realna fotonaponska ćelija se sastoji od serijskog i paralelnog otpora. Serijski otpor (R_s) predstavlja gubitke zbog prolaska struje kroz različite slojeve ćelije. Paralelni otpor (R_p) predstavlja gubitke usljed „lutajućih“ struja [53]. Na slici 4.3 je prikazana šema realne PV ćelije.

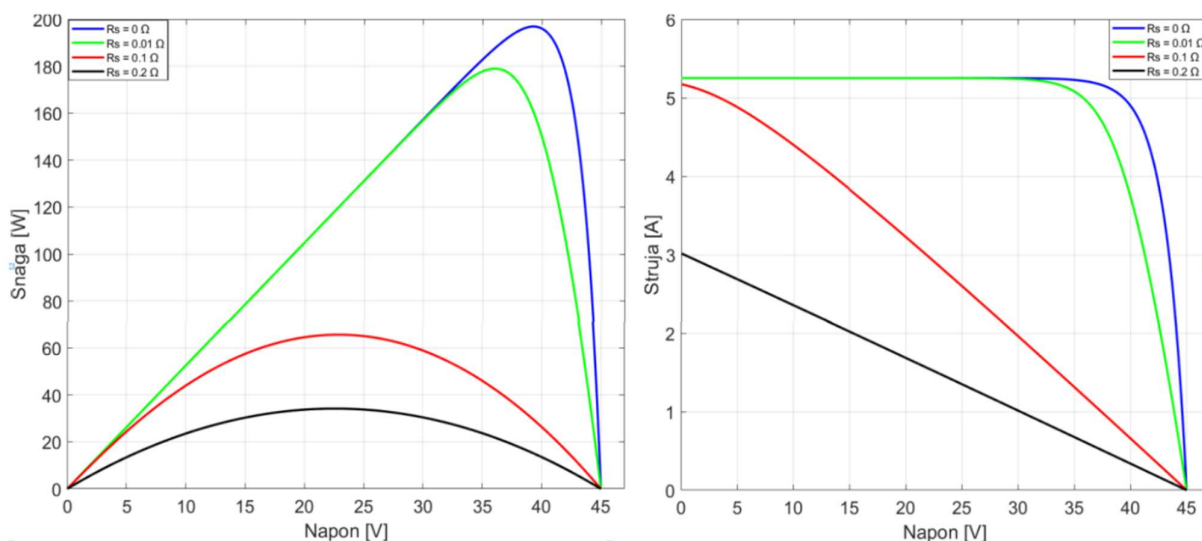


Slika 4.3. Najčešće korišćena zamjenska šema fotonaponske ćelije [6]

Jednačina koja opisuje realnu PV ćeliju:

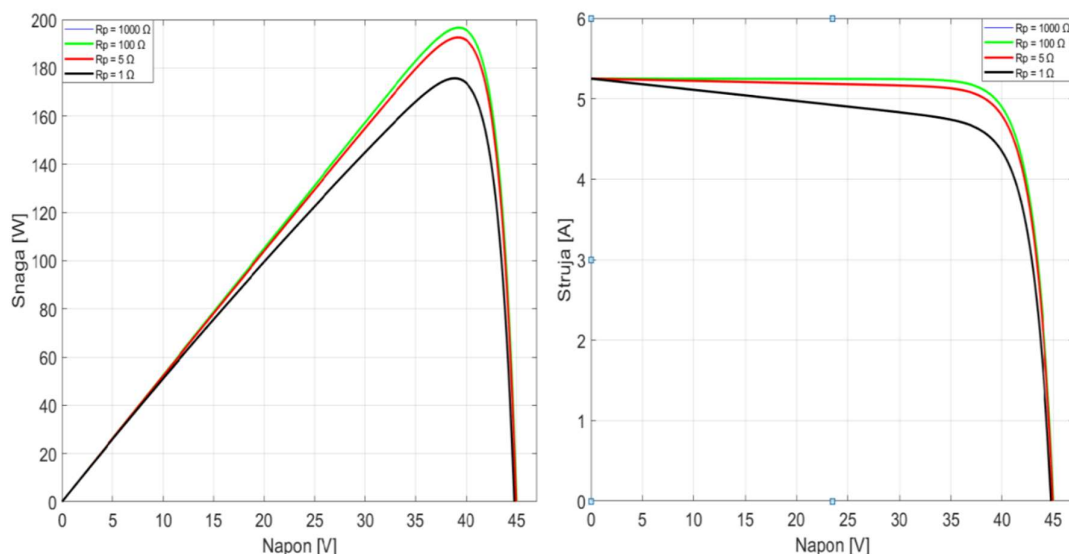
$$I = I_s - I_0 \left(e^{\frac{q(U+IR_s)}{kT}} - 1 \right) - \frac{U + IR_s}{R_p}. \quad (3)$$

Na slici 4.4 je vidljivo kako povećanje R_s znatno smanjuje struju kratkog spoja I_{sc} dok napon kratkog spoja U_{oc} ostaje nepromijenjen. Takođe, smanjenje struje kratkog spoja vodi i smanjenju proizvedene snage [53].



Slika 4.4. Uticaj serijskog otpora na P-U i I-U karakteristiku PV panela [53]

Na slici 4.5. je vidljivo kako smanjenje paralelnog otpora utiče i na smanjenje napona praznog hoda te na smanjenje snage, dok struja kratkog spoja ostaje nepromijenjena [53].



Slika 4.5. Uticaj paralelnog otpora na P-U i I-U karakteristiku PV panela [53]

4.1.3. Uticaj sunčevog zračenja i temperature na parametre PV ćelije

Svaki proizvođač fotonaponskih modula daje osnovne karakteristike modula koje se odnose na standardne uslove (engl. *Standard Test Conditions* - STC). Standardni uslovi testiranja su [20]:

- modul je čist (bez prašine i drugih nečistoća koje se javljaju u realnim uslovima)
- temperatura modula je 25°C
- solarna iradijacija na površini modula je 1000 W/m^2
- solarni spektar odgovara vazdušnoj masi $AM=1.5$.

Realni uslovi rada odstupaju od standardnih tako da se efikasnost modula i ostali tehnički parametri u realnim eksploatacionim uslovima u manjoj ili većoj meri razlikuju od standardnih [20].

Uticaj temperature i sunčevog zračenja na fotostruju I_s može se prikazati izrazom (4) [53]:

$$I_s = \frac{G}{G_{ref}} [I_{sc} + \alpha(T - T_{ref})], \quad (4)$$

gdje je: $G [\text{W/m}^2]$ – sunčevo zračenje, $G_{ref} [\text{W/m}^2]$ – sunčevo zračenje pri standardnim uslovima testiranja, $I_{sc} [\text{A}]$ – struja kratkog spoja pri STC, $T_{ref} [\text{K}]$ – temperatura pri STC i $\alpha [\text{mA/K}]$ – temperaturni koeficijent struje.

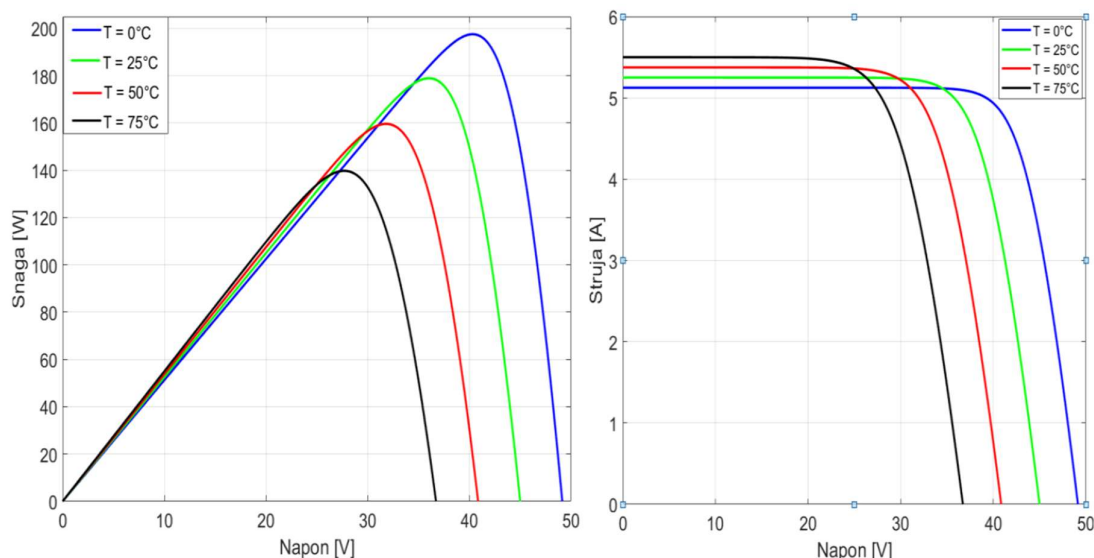
Uticaj temperature i sunčevog zračenja na struju zasićenja diode I_0 može se prikazati izrazom (5):

$$I_0 = \frac{I_{sc} + \alpha(T - T_{ref})}{e^{\frac{q(V_{oc} + \beta(T - T_{ref}))}{kT}} - 1}. \quad (5)$$

Uvrštavajući izraze (4) i (5) u izraz (3) dobija se izraz (6) koji opisuje realnu PV ćeliju u zavisnosti od promjene temperature i sunčevog zračenja:

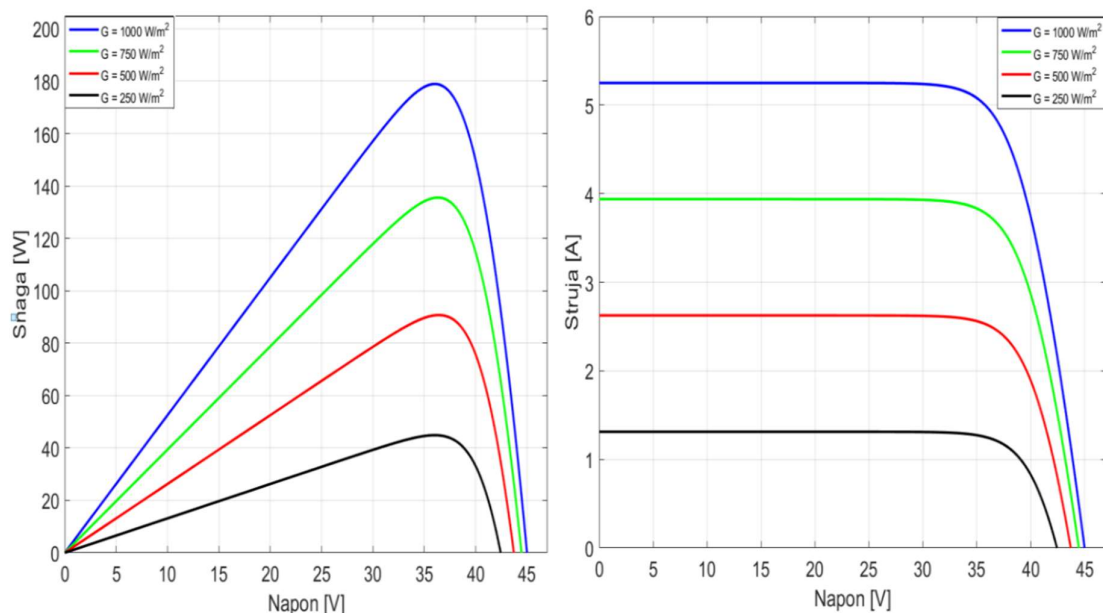
$$I = \frac{G}{G_{ref}} [I_{sc} + \alpha(T - T_{ref})] - \frac{I_{sc} + \alpha(T - T_{ref})}{q(V_{oc} + \beta(T - T_{ref}))} \left(e^{\frac{q(U + IR_s)}{kT}} - 1 \right) - \frac{U + IR_s}{R_p}. \quad (6)$$

Na slici 4.6 prikazan je uticaj promjene temperature na I-U i P-U karakteristiku PV panela. Može se uočiti kako povećanje temperature PV panela povećava struju kratkog spoja, te smanjuje napon praznog hoda. Smanjenje napona je dosta osjetljivije nego povećanje struje kratkog spoja, stoga se i ukupna proizvedena snaga smanjuje.



Slika 4.6. Uticaj promjene temperature na P-U i I-U karakteristiku PV panela [53]

Na slici 4.7 prikazan je uticaj promjene sunčevog zračenja na I-U i P-U karakteristiku PV panela. Smanjenje sunčevog zračenja znatno smanjuje struju kratkog spoja i snagu PV panela [53].



Slika 4.7. Uticaj promjene sunčevog zračenja na P-U i I-U karakteristiku PV panela [53]

4.1.4. Fotonaponski moduli i paneli

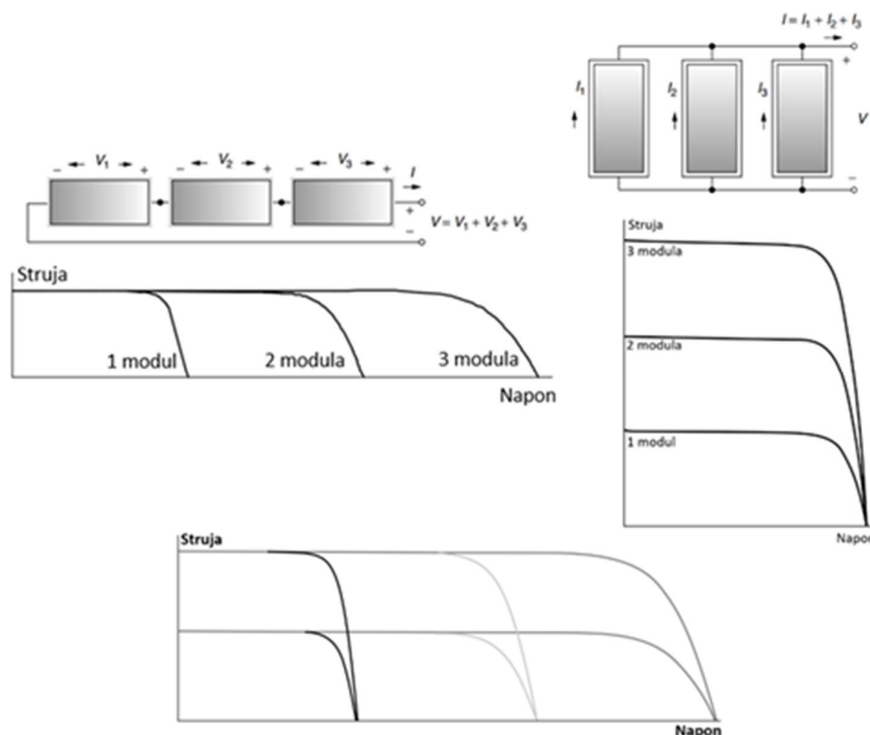
Jedna fotonaponska ćelija proizvodi svega 0.6 V. S obzirom na činjenicu da je snaga koju proizvodi jedna fotonaponska ćelija relativno mala, u praksi se više ćelija redno-paralelno povezuje i spaja u blokove koji se nazivaju fotonaponski moduli. Na ovaj način se postižu struja, napon i snaga većeg intenziteta. Tipičan fotonaponski modul sadrži 36 redno vezanih ćelija koje daju napon od 12 V. Postoje i moduli od 72 ćelije koji daju napon od 24 V. Kada se fotonaponske ćelije u modulu vežu redno, one u tom slučaju proizvode istu struju, a naponi im se sabiraju [6].

Da bi se dobio veći napon na izlazu više modula se veže redno, a da bi se dobila veća struja više modula se veže paralelno. Povezivanjem više modula nastaju solarni paneli (slika 4.8). S obzirom da je snaga proizvod napona i struje, potrebno je pronaći optimalnu spregu u cilju dobijanja željenih vrijednosti napona i struja na priključcima panela.



Slika 4.8. Fotonaponska ćelija, modul, panel i niz

Slika 4.9 prikazuje uticaj serijskog, paralelnog i kombinovanog povezivanja modula na ukupni napon i struju sistema.



Slika 4.9. Serijsko, paralelno i kombinovano povezivanje modula [55]

Na sličan način, povezivanjem više solarnih panela nastaju nizovi. Nizovi predstavljaju skup fotonaponskih panela koji međusobno spojeni proizvode viši napon potreban za rad invertora ili za direktno napajanje potrošača. Međutim, prilikom vezivanja panela u nizove treba voditi računa o zračenju koje pada na nizove. Ako jedan panel u nizu bude djelimično zasijenčen, to može smanjiti performanse cijelog niza.

4.2.Princip rada invertora

Fotonaponski paneli proizvode električnu energiju u jednosmjernom obliku. Da bi solarna elektrana mogla isporučivati energiju u elektroenergetsku mrežu, ona mora biti povezana preko invertora, koji vrši njeno pretvaranje u naizmjenični oblik. Pored navedene funkcije, inverter također omogućava rad PV sistema na tački maksimalne snage uz primjenu MPPT algoritama. Razumijevanje rada invertora je od suštinskog značaja za analizu performansi cjelokupnog sistema, naročito u kontekstu efikasnosti, stabilnosti i kvaliteta električne energije.

4.2.1.Uloga i značaj invertora

Inverter je ključni element PV sistema, jer omogućava pretvaranje jednosmjerne struje iz solarnih panela u naizmjeničnu struju koja zadovoljava mrežne standarde i potrebe potrošača. Ova konverzija ne predstavlja samo energetska transformaciju, već i ključni korak za upravljanje kvalitetom isporučene električne energije. Pored osnovne funkcije konverzije, inverter omogućava i maksimalno iskorišćenje snage PV sistema, te igra ključnu ulogu u sinhronizaciji sa elektroenergetskom mrežom. Naime, da bi inverter efikasno i bezbjedno radio u paralelnom režimu sa mrežom, on koristi fazno zatvorenu petlju (engl. *phase locked loop* - PLL). Najvažnije svojstvo ovog sistema je da generiše izlaz čija je faza sinhronizovana sa fazom ulaznog signala, odnosno da detektuje fazu, frekvenciju i amplitudu mrežnog napona, i da na osnovu tih parametara generiše sopstveni sinusni referentni signal za kontrolu [54]. Zahvaljujući ovoj sinhronizaciji, inverter može koristiti širinsko-impulsnu modulaciju (engl. *pulse width modulation* - PWM) za generisanje precizno oblikovanog napona koji prati mrežni sinusni talas. PWM je od naročitog značaja jer poboljšava kvalitet isporučene energije.

Pored ovoga, moderni invertori imaju i niz naprednih funkcija za:

- balansiranje i upravljanje opterećenjem,
- kontrolu faktora snage,
- zaštitu od odstupanja frekvencije i napona,
- detekciju i zaštitu od mrežnih poremećaja.

4.2.2.Klasifikacija invertora

Klasifikacija solarnih invertora može se vršiti na više načina, a najznačajnija podjela je prema načinu priključenja u mreži i topologiji.

Prema načinu rada u odnosu na elektroenergetsku mrežu razlikuju se:

- Mrežno povezani (engl. *grid-tied*) invertori,
- Autonomni (engl. *off-grid*) invertori,
- Hibridni invertori.

Mrežno povezani inverter predstavlja najčešće korišćeni tip invertora, koji mora biti povezan na mrežu. Ovaj tip invertora prema standardu IEEE 1547 mora posjedovati zaštitu od ostrvskog rada, koja isključuje inverter u slučaju nestanka napona u mreži [37].

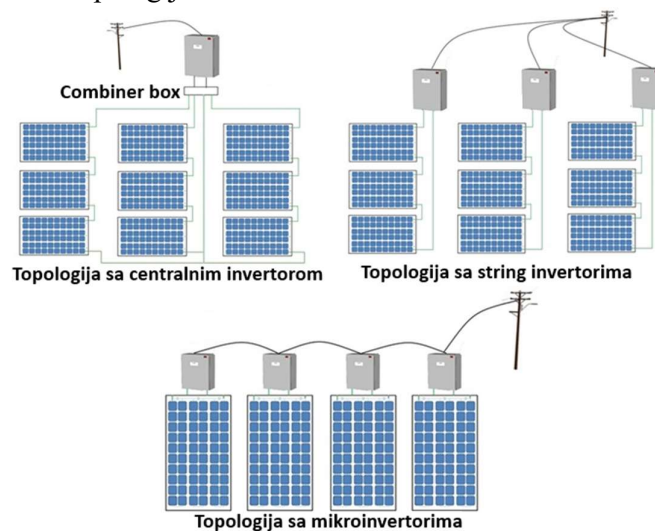
Autonomni inverter je namijenjen za rad u ostrvskom režimu. Radi potpuno nezavisno od mreže, i obezbjeđuje napajanje pomoću PV modula i baterija.

Hibridni inverteri kombinuju funkcije mrežno povezanih i autonomnih invertera. Ovi inverteri mogu raditi u oba režima rada.

Topologija solarnih invertora određuje način na koji su PV moduli povezani s inverterima. U zavisnosti od veličine sistema, lokacije, složenosti instalacije i zahtjeva za nadzorom i optimizacijom performansi, koriste se različite topologije invertora. U zavisnosti od tipa topologije razlikuju se:

- Centralni inverteri,
- String inverteri,
- Mikroinverteri.

Na slici 4.10 su prikazane topologije sistema.



Slika 4.10. Prikaz topologija [55]

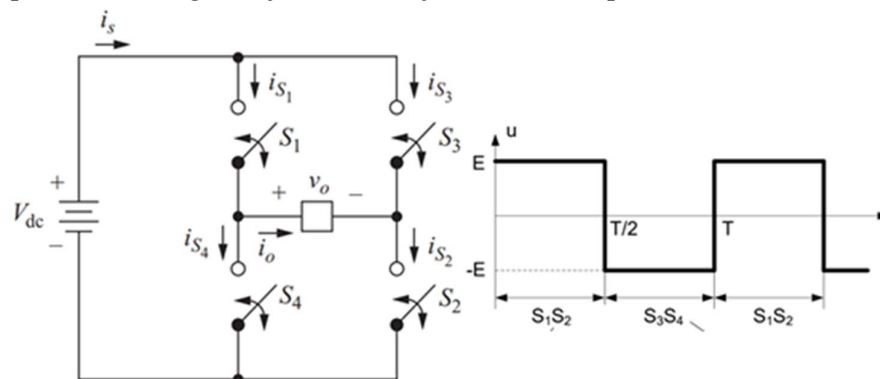
Prema prirodi ulazne promjenljive mogu biti:

- Naponski (engl. *voltage source inverters* - VSI),
- Strujni (engl. *current source inverters* - CSI).

S obzirom da je VSI inverter češće korišćen u fotonaponskim sistemima u nastavku će biti priložen princip rada.

4.2.3. Dobijanje naizmjeničnog napona pravougaonog talasnog oblika

Da bi se dobio naizmjenični napon pravougaonog talasnog oblika koriste se mosni invertori. Slika 4.11 prikazuje šemu monofaznog mosnog invertora i talasni oblik napona na izlazu. U ovoj primjeni, izlaz naizmjenične struje generiše se iz ulaza jednosmjerne struje zatvaranjem i otvaranjem prekidača u odgovarajućem redosljedu. Izlazni napon može biti $+V_{dc}$, $-V_{dc}$ ili nula.



Slika 4.11. Šema monofaznog mosnog invertora i talasni oblik napona na izlazu [55]

U Tabeli 4.1 su prikazane vrijednosti izlaznog napona za sve dozvoljene kombinacije prekidača.

Tabela 4.1. Moguće vrijednosti izlaznog napona [55]

Zatvoreni prekidači	Izlazni napon V_o
S_1 i S_2	$+V_{dc}$
S_3 i S_4	$-V_{dc}$
S_1 i S_3	0
S_2 i S_4	0

Treba napomenuti da su S_1 i S_4 , odnosno S_2 i S_3 nedozvoljene kombinacije iz razloga što bi došlo do kratkog spoja na izvoru napajanja [55].

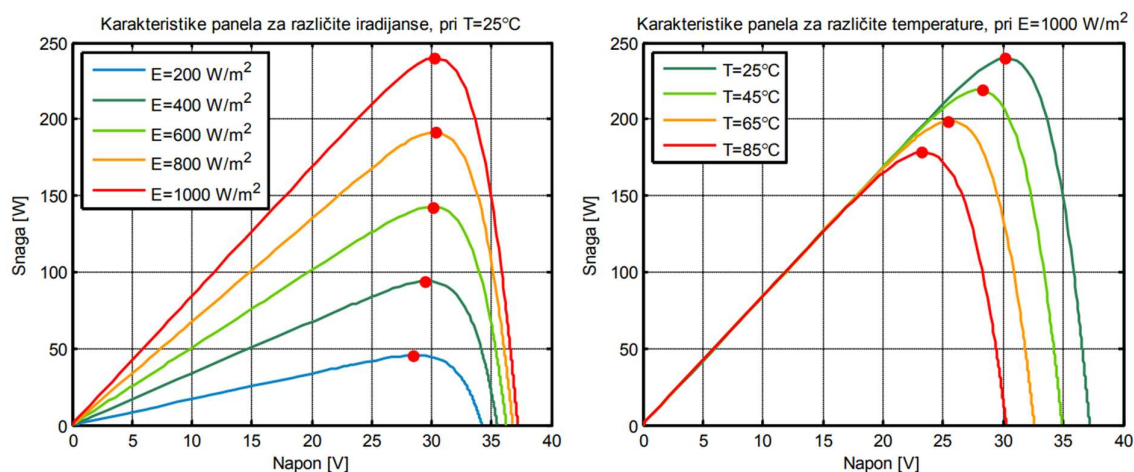
4.2.4. Širinsko-impulsna modulacija

Primjena širinsko-impulsne modulacije (PWM) omogućava smanjenje totalne harmonijske distorzije (THD) izlazne struje. Kombinovanjem PWM modulacije sa filterima, sadržaj harmonika može se svesti na prihvatljiv nivo. Nefiltrirani izlaz karakteriše visok THD, ali harmonici su visokog reda, što olakšava njihovo filtriranje. Kod PWM-a, amplituda izlaznog napona se kontroliše modulirajućim talasnim oblicima, bez regulacije ulaznog napona. Glavne prednosti ove modulacije su smanjen sadržaj harmonika i kontrola amplitude izlaznog napona, dok se kao nedostaci ističu složeniji upravljački sklopovi prekidača i povećani gubici usljed češćeg preklapanja.

Postoje različiti tipovi širinsko-impulsne modulacije, ali za invertore je najrelevantnija sinusoidalna PWM (engl. *sinusoidal pulse width modulation* - SPWM). Postoje dva tipa sinusoidalne PWM, a to su bipolarna SPWM i unipolarna SPWM.

4.2.5. Praćenje tačke maksimalne snage

Metoda za praćenje tačke maksimalne snage ima ključnu ulogu u fotonaponskim sistemima, jer omogućava da u svakom trenutku sistem generiše maksimalnu moguću snagu. Strujno-naponska karakteristika PV panela (modula) je nelinearna, pa panel ostvaruje maksimalnu snagu samo u jednoj radnoj tački, poznatoj kao tačka maksimalne snage (engl. *maximum power point* - MPP). Vrijednosti napona i struje panela pri kojima je snaga panela maksimalna, zavise od iradijacije i temperature panela, kao što je to prikazano na slici 4.12. Treba napomenuti da kod djelimično osijenčenih modula postoji više lokalnih maksimuma snage [56].



Slika 4.12. Snaga PV panela u zavisnosti od napona, pri različitoj iradijaciji i temperaturi panela [56]

U cilju postizanja što veće efikasnosti PV sistema, neophodno je obezbijediti da pri svim radnim uslovima paneli rade u tački maksimalne snage. Ovo se postiže podešavanjem napona ili struje panela algoritmom za praćenje tačke maksimalne snage, pomoću energetskog pretvarača koji je priključen na izlaz panela [56]. U nastavku će biti opisani neki od MPPT algoritama.

Metoda napona praznog hoda (engl. *open circuit* - OC) temelji se na pretpostavci konstantnog odnosa maksimalnog napona U_{mpp} i napona praznog hoda U_{OC} :

$$U_{mpp} = kU_{OC}. \quad (7)$$

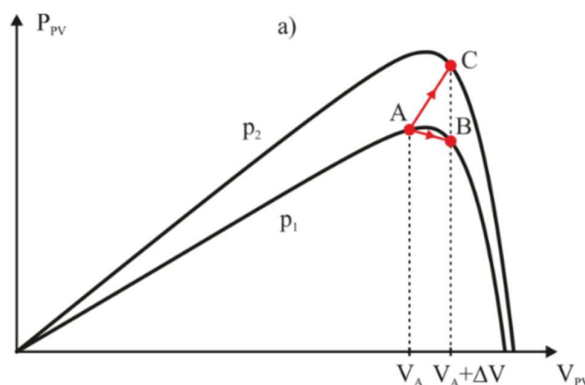
Autori u [53] navode da k uzima vrijednosti u opsegu od 0.65-0.8. Vrijednost koeficijenta k nije konstantna, već zavisi od temperature i iradijacije. Napon praznog hoda se određuje tako što se opterećenje isključuje na 10-50 ms svake minute, te se mjeri U_{OC} , a zatim se na osnovu dobijene vrijednosti U_{OC} i koeficijenta k , određuje napon radne tačke panela. Ova metoda je veoma jednostavna za implementaciju i zahtijeva samo uređaj za mjerenje napona panela. Međutim, s obzirom na to da se radna tačka praktično nikada ne nalazi tačno u tački maksimalne snage, efikasnost ove MPPT metode je relativno mala. Maloj efikasnosti doprinose i intervali u kojima panel radi u praznom hodu, u toku kojih se energija ne prenosi opterećenju [53] [56].

Metoda struje kratkog spoja (engl. *short circuit* - SC) temelji se na pretpostavci konstantnog odnosa maksimalne struje I_{mpp} i struje kratkog spoja I_{SC} :

$$I_{mpp} = k_1 I_{SC}. \quad (8)$$

Autori u [53] navode da koeficijent k_1 može uzeti vrijednosti u opsegu od 0.78-0.92. Nakon što se odredi struja kratkog spoja, uz poznavanje koeficijenta k_1 , može se dobiti struja I_{mpp} pri kojoj je izlazna snaga panela maksimalna. Prednost ove metode je jednostavnost, jer ova metoda zahtijeva samo uređaj za mjerenje struje kratkog spoja panela. Međutim mana ove metode je mala efikasnost. Takođe, metoda zahtijeva i dodatni prekidač kojim se krajevi panela dovode u kratki spoj [53]. Takođe, koeficijent k_1 nije konstantan i zavisi od iradijacije [56].

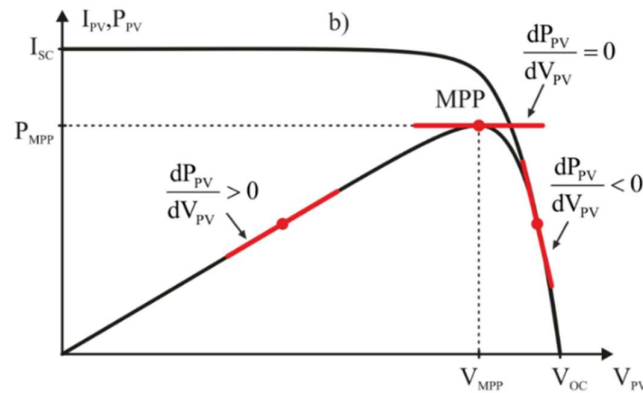
Metoda perturbacije (engl. *petrurb & observe* - P&O) je najčešće korišćena metoda u praksi [53]. Ovom metodom napon panela se periodično mijenja (povećava ili smanjuje) sa određenim fiksnim korakom (u unaprijedenoj varijanti metode korak je promjenljiv), te se nakon svake promjene napona prati promjena snage. Ukoliko je promjena snage pozitivna, sledeća promjena napona će se izvršiti u istom smjeru kao i prethodna. Ukoliko je promjena snage negativna, sledeća promjena napona biće u suprotnom smjeru. Mana ove metode je u tome što će nakon dostizanja reference napon oscilovati oko vrijednosti V_{mpp} , što dovodi do smanjenja efikasnosti algoritma. Amplituda ovih oscilacija može da se smanji smanjenjem koraka promjene napona, ali se time ujedno smanjuje i brzina praćenja tačke maksimalne snage. Druga bitna mana metode perturbacije je da ova metoda može da divergira pri nagloj promjenjivoj iradijaciji, što je ilustrovano na slici 4.13. Naime, nakon pozitivne perturbacije napona panela za ΔV , radna tačka će se pomjeriti iz A u B, pod uslovom da se iradijacija nije mijenjala (kriva p_1). Međutim, ako se iradijacija poveća u intervalu između dvije promjene napona, radna tačka će se nakon promjene napona sa V_A na $V_A + \Delta V$ pomjeriti iz tačke A u tačku C koja se nalazi na krivoj p_2 . Algoritam sada pretpostavlja da je do povećanja snage došlo samo zbog promjene napona i u sledećem koraku ponovo povećava napon panela, udaljavajući tako radnu tačku od MPP [56].



Slika 4.13. Ilustracija divergencije P&O algoritma pri brznoj promjeni iradijacije [56]

Da bi se eliminisale oscilacije oko tačke maksimalne snage, predložena je metoda tri tačke. Ovom metodom praćenje tačke maksimalne snage se vrši mjerenjem snage u tri tačke: u trenutnoj radnoj tački X, Y (koja predstavlja X + jednu pozitivnu perturbaciju) i Z (koja predstavlja Y + dvije negativne perturbacije). Nakon ovoga se vrši poređenje snaga u tačkama X i Y, i u tačkama X i Z. Ako je $P(Y) \geq P(X)$ i $P(Z) < P(X)$, tada se povećava napon. Ako je $P(Y) < P(X)$ i $P(Z) \geq P(X)$ napon se smanjuje. U ostalim slučajevima se pretpostavlja da je dostignuta MPP ili da je došlo do nagle promjene iradijacije, i napon se ne mijenja. P&O metoda i metoda tri tačke zahtijevaju senzore za mjerenje napona i struje panela [56]. Ova metoda predstavlja jednu od varijanti P&O algoritma.

Metoda inkrementalne konduktanse (engl. *incremental conductance* - IC) je nastala iz potrebe da se eliminišu oscilacije oko MPP koje postoje kod P&O metode, kao i da se omogući praćenje MPP i pri naglim promjenama iradijacije. Princip rada ove metode prikazan je na slici 4.14.



Slika 4.14. Ilustracija principa rada metode inkrementalne konduktanse [56]

Na slici 4.14 se vidi da je izvod snage jednak nuli u tački MPP, da je veći od nule lijevo od MPP, a da je manji od nule desno od MPP. Prema tome, važe jednačine [56]:

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = 0, \text{ u tački MPP,} \quad (9)$$

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} > 0, \text{ lijevo od MPP,} \quad (10)$$

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} < 0, \text{ desno od MPP,} \quad (11)$$

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = \frac{d(V_{PV}I_{PV})}{dV_{PV}} = I_{PV} + V_{PV} \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} \cong I_{PV} + V_{PV} \frac{\Delta I_{PV}}{\Delta V_{PV}}. \quad (12)$$

Jednačine (18), (19) i (20) sada postaju:

$$\frac{\Delta I_{PV}}{\Delta V_{PV}} = -\frac{I_{PV}}{V_{PV}}, \text{ u tački MPP,} \quad (13)$$

$$\frac{\Delta I_{PV}}{\Delta V_{PV}} > -\frac{I_{PV}}{V_{PV}}, \text{ lijevo od MPP,} \quad (14)$$

$$\frac{\Delta I_{PV}}{\Delta V_{PV}} < -\frac{I_{PV}}{V_{PV}}, \text{ desno od MPP.} \quad (15)$$

Dakle, informacija o potrebnom smjeru promjene napona panela dobija se na osnovu poređenja inkrementalne konduktanse panela sa trenutnom konduktansom panela. Nakon dostizanja MPP, algoritam ne mijenja napon sve dok se ne detektuje promjena struje panela, koja je indikator promjene atmosferskih uslova. Teorijski posmatrano, na ovaj način su izbjegnute oscilacije oko MPP, pa je samim tim povećana efikasnost praćenja MPP. U praksi, međutim, može doći do malih oscilacija oko MPP usljed šuma i kvantizacije. Kao i u slučaju P&O algoritma, i IC algoritam zahtjeva dva senzora: senzor napona panela i senzor struje panela [56]. U Tabeli 4.2 izvršeno je poređenje pomenutih metoda. Pomenute efikasnosti dobijene su iz različitih referenci, korišćenih u radu [56].

Tabela 4.2. Osnovne karakteristike predstavljenih MPPT metoda [56]

Metoda	Maksimalna efikasnost	Brzina	Složenost	Broj senzora	Cijena
OC	93.1%, 94.56%, 92.1%	srednja	mala	1	niska
SC	90.72 %	srednja	umjerena	1	srednja
P&O	98.7%, 98.85%, 96.6%	varira	mala	2	srednja
Tri tačke	87.68%	varira	umjerena	2	srednja
IC	98.7%, 98.73%	varira	umjerena	2	srednja

Iz Tabele 4.2 se može zaključiti da je IC metoda blago efikasnija od ostalih. Sa druge strane, ako je cijena implementacije najvažniji kriterijum, tada prednost ima OC metoda, koja može jednostavno da se implementira i analognim kolima (SC metoda zahtjeva dodatni prekidač, pa je zbog toga skuplja, a P&O metoda zahtjeva dva senzora). Ako se u sistemu očekuju brze promjene iradijacije, tada se može očekivati da će IC metoda obezbijediti veću efikasnost, u odnosu na ostale metode [56].

5. Parametri kvaliteta električne energije (PF i THDi)

Električna energija je komercijalni proizvod posebne vrste, koji zbog svog značaja u životu savremenog čovjeka podliježe nekim normama, propisima, standardima, ili preporukama u pogledu kvaliteta. Zbog toga se svi akti, u kojima se specificuju pokazatelji kvaliteta električne energije isporučene potrošačima, obično donose od strane državnih organa, ili stručnih organizacija. U njima se kvantitativno specificuju pojedini pokazatelji kvaliteta i dozvoljeni opsezi njihove promjene [57].

Osnovni pokazatelj kvaliteta isporuke električne energije je neprekidnost napajanja potrošača. Ostali pokazatelji kvaliteta isporuke električne energije, koji su predmet normiranja i standardizacije, obično su vezani za dvije najvažnije promjenljive koje karakterišu rad svakog EES-a: učestanost i napon. Oni se posebno normiraju za normalni radni režim, a posebno za abnormalne režime rada [58]. Poželjno je da se te dvije veličine održavaju u propisanim granicama. Kvalitet električne energije ima značajnu ulogu u energetskej efikasnosti. Loš kvalitet električne energije uzrokuje povećanje gubitaka u gotovo svim elementima EES-a, smanjuje njihovu pouzdanost i skraćuje životni vijek. Pored toga, loš kvalitet električne energije može biti uzrok zastoja u radu potrošača u domaćinstvima i industriji, a često i uzrok kvarova na osjetljivoj opremi, kao i uzrok grešaka pri mjerenju električne energije [57].

Kvalitet električne energije je vezan za odstupanje talasnih oblika napona i struja od idealnog prostoperiodičnog oblika. To odstupanje se definiše preko određenih pokazatelja kvaliteta električne energije, a to su [57]:

- harmonijska i interharmonijska izobličenja,
- fluktacije napona,
- prekidi napajanja, dugotrajni i kratkotrajni,
- padovi napona,
- nesimetrije napona,
- tranzijenti napona,
- odstupanje frekvencije od nominalne vrijednosti.

Uzroci i mjesto nastanka navedenih poremećaja mogu biti različiti i vezani za razne aspekte rada EES-a i uticaja okoline na njega. Neki poremećaji mogu nastati u prenosnoj ili distributivnoj mreži i zatim biti "isporučeni" potrošačima, a neke može generisati potrošač (nelinearni potrošač) i isporučiti ih u mrežu, dok neki poremećaji nastaju usljed dejstva prirodnih faktora (atmosferske nepogode). Upravljačke operacije u mreži takođe mogu imati uticaj na kvalitet električne energije [57] [59]. Problem kvaliteta električne energije u posljednje vrijeme ima veliki značaj. Sa jedne strane, prisustvo savremenih i "osjetljivih" potrošača (računara, telekomunikacione opreme, procesne opreme u industriji i dr.) povećava zahtjev za stabilnim i kvalitetnim napajanjem. Sa druge strane, masovna integracija OIE, uvodi varijabilnost i nesigurnost proizvodnje što direktno utiče na kvalitet isporučene energije. Pored tehničkih aspekata, razvoj tržišta podrazumijeva da kvalitet električne energije direktno utiče na ekonomsku vrijednost i konkurentnost, pa održavanje propisanog kvaliteta postaje i regulatorno i tržišno pitanje.

5.1. Indikatori kvaliteta električne energije

Postoje različiti indikatori, koji opisuju ili kvantifikuju nivoe odstupanja kvaliteta od željenog ili nominalnog. Oni imaju za zadatak da kondenzuju kompleksne pojave u vremenskom i frekventnom domenu u jedan jedini broj. Svi indikatori se mogu izraziti jasnim matematičkim formulama, ali se neki moraju dopuniti i statističkim prikazima. Njihova zajednička osobina je da se mogu relativno lako izračunati ili izmjeriti, te da su postupci računanja i mjerenja standardizovani, tako da se rezultati mogu porediti sa velikom tačnošću. To takođe omogućava i donošenje standarda, preporuka i drugih tehničkih propisa vezanih za limitiranje njihovih nivoa, dužine trajanja i učestanosti pojavljivanja [59].

Kao što je i pomenuto, kvalitet električne energije predstavlja odstupanje nesinusoidalnih talasnih oblika napona i struja od idealnog prostoperiodičnog oblika. Shodno Furijeovoj analizi, nesinusoidalni signal se može razložiti na veći broj sinusoidalnih komponenti. Sinusoidalni signal osnovne frekvencije se naziva fundamentalni signal, dok se svi ostali harmonici nazivaju viši harmonici. Svaki harmonik je opisan svojom frekvencijom, početnim uglom i amplitudom. Najčešće se amplitude harmonika izražavaju u odnosu na amplitudu osnovnog harmonika, i to u procentima [60] [57].

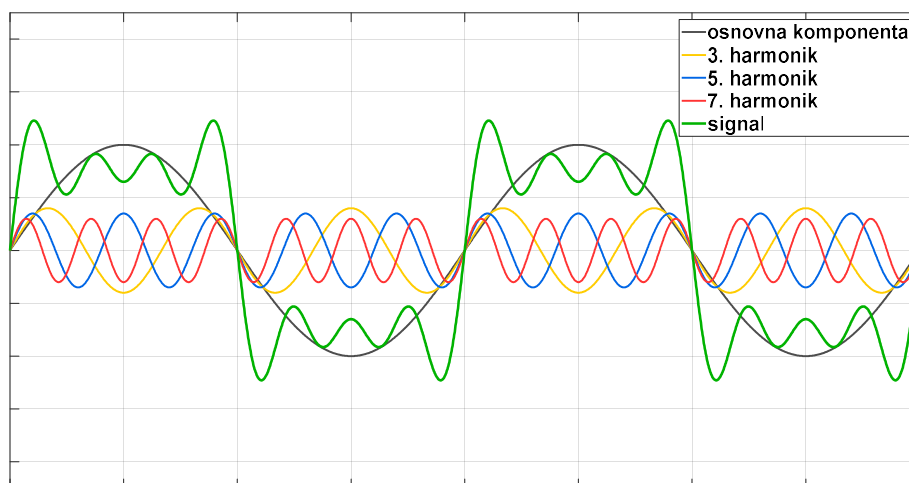
Matematički, prethodno se može zapisati u sledećem obliku:

$$u = U_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \sqrt{2U_k \sin(k\omega_1 t + \alpha_k)}, \quad (16)$$

$$i = I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \sqrt{2I_k \sin(k\omega_1 t + \beta_k)}, \quad (17)$$

gdje U_0 i I_0 predstavljaju jednosmjerne (DC) komponente signala struje i napona, respektivno, dok su U_k i I_k efektivne vrijednosti k-tog harmonika napona i struje, respektivno, dok su α_k i β_k korespondentni fazni pomjeraji k-tih harmonika napona i struje, respektivno [60].

Tipičan talasni oblik nesinusoidalnog signala, i odgovarajuće Furijeove komponente istog, prikazan je na slici 5.1.



Slika 5.1. Nesinusoidalni signal

Da bi se okarakterisao signal sa stanovišta viših harmonika, definiše se [60]:

- Nivo harmonika, koji predstavlja odnos efektivne vrijednosti harmonijske komponente k (I_k) u odnosu na efektivnu vrijednost harmonika osnovne frekvencije (I_1):

$$\gamma_k(\%) = \frac{I_k}{I_1} 100. \quad (18)$$

- Jednosmjerna (DC) komponenta, se definiše kao integral signala u toku jednog perioda:

$$\langle DC \rangle = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} i(t) dt. \quad (19)$$

- Crest faktor se definiše kao odnos maksimalne vrijednosti nesinusoidalnog signala (i_{MAX}) i efektivne vrijednosti istog signala (i_{RMS}):

$$crest = \frac{I_{MAX}}{I_{RMS}}. \quad (20)$$

- Efektivna vrijednost se definiše kao:

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots} = \sqrt{\sum_{k=0}^n I_k^2}. \quad (21)$$

- Rezidualna komponenta se definiše kao kvadratni korijen razlike kvadrata efektivne vrijednosti ukupnog signala (I_{RMS}) i kvadrata efektivne vrijednosti osnovne komponente signala (I_1):

$$I_{REZ} = \sqrt{I_{RMS}^2 - I_1^2}. \quad (22)$$

- Totalna harmonijska distorzija se definiše kao odnos efektivne vrijednosti rezidualne komponente (I_{REZ}) i efektivne vrijednosti osnovne komponente (I_1):

$$THD = \frac{I_d}{I_1} = \frac{\sqrt{I_{RMS}^2 - I_1^2}}{I_1}. \quad (23)$$

- Faktor distorzije se računa kao odnos rezidualne komponente signala i efektivne vrijednosti ukupnog signala:

$$DF = \frac{I_d}{I_{RMS}} = \frac{\sqrt{I_{RMS}^2 - I_1^2}}{I_{RMS}}. \quad (24)$$

- Jednofazna aktivna snaga se definiše kao:

$$P = \frac{1}{mT} \int_{t_0}^{t_0+m} p dt = \frac{1}{mT} \int_{t_0}^{t_0+m} u i dt = \sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \cos(\varphi_k), \quad (25)$$

gdje je m broj posmatranih perioda i φ fazni pomjeraj k -tih komponenti napona i struje.

- Aktivna energija se definiše kao:

$$W_a = \frac{1}{T} \int_{\tau}^{\tau+T} P dt. \quad (26)$$

- Reaktivna jednofazna snaga se definiše kao:

$$Q = \sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \sin(\varphi_k). \quad (27)$$

— Reaktivna energija se definiše kao:

$$W_r = \frac{1}{T} \int_{\tau}^{\tau+T} Q dt. \quad (28)$$

— Snaga distorzije se definiše kao:

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}. \quad (29)$$

— Prividna snaga se definiše kao:

$$S = I_{RMS} U_{RMS} = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots} \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + \dots} = \sqrt{\sum_{k=0}^n I_k^2} \sqrt{\sum_{k=0}^n U_k^2}. \quad (30)$$

— Faktor snage se definiše kao:

$$\lambda = PF = \frac{P}{S} = \frac{\sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \cos(\varphi_k)}{I_{RMS} U_{RMS}}. \quad (31)$$

— Faktor pomjeraja snage (engl. *displacement power factor* - DPF) se definiše kao:

$$\lambda_1 = DPF = \frac{P_1}{S_1} = \frac{U_1 I_1 \cos(\varphi_1)}{U_1 I_1} = \cos(\varphi_1). \quad (32)$$

Prividna snaga potrošača se može rastaviti na 3 komponente – aktivna snaga, reaktivna snaga i snaga distorzije, koja je posljedica viših harmonika. Jedina korisna snaga je aktivna snaga, pa se shodno njoj i definiše faktor snage koji se može napisati i u sljedećem obliku [60]:

$$\lambda = PF = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}}. \quad (33)$$

Reaktivna snaga, kao i snaga distorzije se mogu predstaviti preko odgovarajućih faktora – reaktivnog faktora (ρ) i faktora distorzije (τ):

$$\rho = \frac{Q}{P} = \tan(\varphi), \quad (34)$$

$$\tau = \frac{D}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \tan(\psi). \quad (35)$$

5.2. Totalna harmonijska distorzija – THD

Jedan od najčešćih razloga lošeg kvaliteta električne energije je prisustvo harmonijskih izobličenja talasnog oblika napona i struja. Razlikuju se različite vrste harmonijskih izobličenja [57]:

- Harmonijsko izobličenje je takvo izobličenje gdje je talasni oblik nesinusoidalni, ali periodičan sa periodom osnovne funkcije. U većini slučajeva je prihvatljiva aproksimacija da se izobličenje talasnog oblika usvaja kao harmonijsko izobličenje.
- Interharmonijsko izobličenje se matematički posmatra isto kao i harmonijsko, ali se razlikuje po tome što frekvencija njegovih komponenti nije cjelobrojni umnožak osnovne mrežne frekvencije (npr. 70 Hz).
- Subharmonijske komponente su komponente čija je frekvencija niža od osnovne mrežne frekvencije.
- Šum predstavlja sva neperiodična izobličenja talasnog oblika koja su superiorna na osnovni signal. Često se pod šumom u EES-u podrazumijevaju i visokofrekventne harmonijske komponente čija je frekvencija veća od 5 kHz.
- Prisustvo jednosmjerne komponente se može posmatrati kao poseban oblik harmonijskog izobličenja, ali se često posmatra odvojeno zbog razlika u mjernim tehnikama i posljedicama.

Invertori predstavljaju jedne od glavnih izvora viših harmonika. Invertori u sebi sadrže komponente energetske elektronike koji vrše transformaciju korišćenjem prekidača sa širinsko-impulsnom modulacijom. Da bi se generisali precizniji sinusoidni talasni oblici napona i održala mala veličina filtra, koriste se visoke modulacione frekvencije. Međutim, svaka PWM metoda inherentno generiše harmonike i šum, koji nastaju tokom prelaznih procesa prekidača. Brz porast struje, bilo u pozitivnom ili negativnom smjeru, dovodi do generisanja harmonika. To rezultira nesinusoidnom prirodom talasnog oblika napona koji generiše inverter [62].

Pored toga, interakcije između invertora i mreže mogu izazvati harmonike usljed neusklađenosti impedanse, rezonantnih fenomena ili poremećaja u naponu mreže [63]. Naime, mrežno povezani invertori sinhronizuju svoju izlaznu frekvenciju i fazu sa mrežom koristeći PLL, što im omogućava da generišu struju u skladu sa naponom mreže. Međutim, kvalitet mreže ima značajan uticaj na harmonike koje inverter injektira. Ako mreža sadrži distorzije ili ima promjenljivu impedansu, PLL može pogrešno detektovati fazu i frekvenciju, što dovodi do nesavršenog sinhronog rada i pojačanja već postojećih harmonika. Kao rezultat toga, harmonici se reflektuju nazad u mrežu, čime se povećava THD struje i napona [64].

Nestabilnost DC-link napona u PV inverterima, uzrokovana promjenama u iradijaciji ili oscilacijama MPPT algoritma, značajno utiče na kvalitet izlazne struje. Kako MPPT algoritam stalno prilagođava tačku rada panela sa ciljem izvlačenja maksimalne snage, u slučaju naglih promjena solarnog zračenja može doći do oscilatornog rada. Kao rezultat ovoga, u izlaznoj struji generišu se dodatni harmonici, koji se, ako nisu adekvatno filtrirani, reflektuju u mrežu [65].

Djelimično zasjenčenje fotonaponskog panela može biti jedan od razloga povećanog THD-a. Kada su solarne ćelije izložene nejednakom sunčevom zračenju zbog djelimičnog zasjenčenja ili prašine, dolazi do debalansa. Ova neravnoteža dovodi do pojave oscilacija i nestabilnih radnih tačaka, što za posljedicu ima injektiranje harmonijskih komponenti u izlaznu struju [66].

Rad invertora u velikoj mjeri zavisi od uslova okoline, kao što su iradijacija i doba dana. Iradijacija predstavlja faktor koji se dinamički mijenja u toku dana, a te promjene mogu ostaviti nepovoljan uticaj na THD. Dosadašnja istraživanja pokazuju da se tokom perioda dana sa niskom iradijacijom, odnosno tokom jutarnjih i večernjih sati, generiše više harmonika, dok je THD niži tokom dana pri višim nivoima iradijacije. U radu [13], rezultati su pokazali da se vrijednost THDi povećava kako solarna iradijacija opada. Na primjer, pri 1000 W/m^2 THDi iznosi 1.83%, dok pri 100 W/m^2 raste na 4.72%, što ukazuje na obrnuto proporcionalan odnos između iradijacije i THDi-a. Može se zaključiti da kada je iradijacija niska, mrežno povezani inverter „ubacuje“ više harmonika struje u elektroenergetsku mrežu u poređenju sa situacijom kada je iradijacija visoka [13].

Zaključuje se da harmonici kod invertora nastaju kao posljedica:

- Prekidačkog rada poluprovodničkih elemenata,
- Modulacionih tehnika (PWM, SPWM),
- Nelinearnog karaktera opterećenja,
- Neidealnosti komutacionih procesa,
- Interakcije sa mrežom,
- Nestabilnosti DC-linka i uticaja izvora,
- Uticaj djelimičnog zasjenčenja,
- Niske vrijednosti iradijacije.

Prisustvo viših harmonika uzrokuje povećanje THD i smanjenje faktora snage, odnosno podstiče degradaciju kvaliteta električne energije. Takođe, prisustvo doprinosi i povećanju gubitaka u inverteru i filterima, kao i otežanoj sinhronizaciji sa mrežom.

5.3. Faktor snage

Faktor snage predstavlja jedan od ključnih parametara u analizi mrežno povezanih fotonaponskih sistema, jer direktno utiče na efikasnost prenosa i korišćenja električne energije. U idealnim uslovima faktor snage iznosi 1, što znači da su struja i napon na izlazu invertora u fazi i da nema reaktivne snage. Međutim, u realnim uslovima javljaju se odstupanja najčešće usljed pojave harmonika. Nizak faktor snage u mrežno povezanom fotonaponskom sistemu dovodi do niza problema u pogledu efikasnosti, pouzdanosti i stabilnosti rada sistema. Najznačajnije posljedice su sledeće [63]:

- povećanje gubitaka u uređajima korišćenim u mrežno povezanom solarnom sistemu,
- povećani padovi napona,
- smanjenje kapaciteta za prenos snage,
- smanjenje radnog vijeka sistema,
- poremećaji u radu prekidačkih elemenata,
- smanjena stabilnost mreže i sistema.

Zbog navedenih negativnih posljedica, od ključne je važnosti da se faktor snage u mrežno povezanom fotonaponskom sistemu održava u granicama propisanim standardima i regulativama. Savremeni fotonaponski sistemi igraju ključnu ulogu u regulaciji faktora snage i održavanju stabilnosti elektroenergetske mreže. Moderni invertori su opremljeni funkcijama za upravljanje reaktivnom snagom i podešavanje faktora snage. Na primjer, prema standardu IEEE 1547-2018, zahtjeva se da svi distribuirani izvori električne energije (DIEE) uključujući i PV sisteme, moraju biti sposobni za rad u više režima upravljanja reaktivnom snagom, među kojima je i konstantni faktor snage [37]. Evropska Unija je u svoju regulativu EN 50549-1, ugradila iste principe i dodala radni opseg faktora snage. Prema regulativi, radni opseg faktora snage bi trebao biti u opsegu od 0.9 induktivno do 0.9 kapacitivno [67].

Kako bi se to postiglo invertori koriste različite kontrolne funkcije:

1. konstantan faktor snage,
2. konstantna reaktivna snaga,
3. faktor snage kao funkcija aktivne snage,
4. reaktivna snaga kao funkcija mrežnog napona.

Moderni invertori mogu isporučivati i reaktivnu snagu čak i kada nema proizvodnje aktivne snage, što se u industriji označava terminom *Q-at-Night*. Na ovaj način invertori mogu doprinosti regulaciji faktora snage i tokom noći, kada nema sunčeve energije.

Sve navedeno pokazuje da savremeni fotonaponski sistemi više nisu pasivni proizvođači energije, već aktivni učesnici u regulaciji napona i faktora snage.

5.4.Regulative i standardi za PF i THDi

Kvalitet električne energije u elektroenergetskim mrežama definiše se kroz niz parametara, među kojima su najznačajniji faktor snage i totalna harmonijska distorzija. Da bi se obezbijedilo pouzdano i stabilno funkcionisanje sistema, međunarodne organizacije poput IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) i IEC (*International Electrotechnical Commission*), kao i evropski standardi, propisuju granične vrijednosti koje moraju poštovati svi proizvođači električne energije, uključujući i solarne elektrane.

Najzastupljeniji standard IEEE 519-2014 daje dozvoljene granične vrijednosti pojedinačnih strujnih harmonika i THDi, i to u zavisnosti od naponskog nivoa i struje kratkog spoja na mjestu priključka. Takođe, standard propisuje i dozvoljene harmonike napona u zavisnosti od naponskog nivoa mreže. Standard se primjenjuje na tački zajedničkog priključka (engl. *point of common coupling* - PCC) između korisnika i elektroenergetske mreže. Dozvoljeni opsezi prikazani su u Tabelama 5.1., 5.2 i 5.3.

Tabela 5.1. Dozvoljeni opsezi strujne distorzije za sisteme od 120 V do 69 kV [68]

Maksimalna distorzija struje izražena u procentima od I_{avmax}						
Nivo harmonika (neparni harmonici)						
I_{SC}/I_{avmax}	$3 \leq h < 11$ [%]	$11 \leq h < 17$ [%]	$17 \leq h < 23$ [%]	$23 \leq h < 35$ [%]	$35 \leq h \leq 50$ [%]	THD_{max} [%]
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20 < 50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50 < 100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100 < 1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Tabela 5.2. Dozvoljeni opsezi strujne distorzije za sisteme od 69 kV do 161 kV [68]

Maksimalna distorzija struje izražena u procentima od I_{avmax}						
Nivo harmonika (neparni harmonici)						
I_{SC}/I_{avmax}	$3 \leq h < 11$ [%]	$11 \leq h < 17$ [%]	$17 \leq h < 23$ [%]	$23 \leq h < 35$ [%]	$35 \leq h \leq 50$ [%]	THD_{max} [%]
< 20	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20 < 50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50 < 100	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
100 < 1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
> 1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0

Tabela 5.3. Dozvoljeni opsezi strujne distorzije za sisteme naponskog nivoa većeg od 161 kV [68]

Maksimalna distorzija struje izražena u procentima od I_{avmax}						
Nivo harmonika (neparni harmonici)						
I_{SC}/I_{avmax}	$3 \leq h < 11$ [%]	$11 \leq h < 17$ [%]	$17 \leq h < 23$ [%]	$23 \leq h < 35$ [%]	$35 \leq h \leq 50$ [%]	THD_{max} [%]
< 20	1.0	0.5	0.38	0.15	0.1	1.5
25 < 50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
≥ 50	3.0	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75

Sve vrijednosti u tabelama su prikazane u procentima prosječne maksimalne struje potrošača I_{avmax} . Parni harmonici su ograničeni na 25% granične vrijednosti neparnih harmonika [57].

Standard EN 50549-1 propisuje da invertori, kao glavni pretvarači u PV sistemima, moraju raditi u opsegu faktora snage od 0.9 induktivno do 0.9 kapacitivno pri nazivnoj snazi [67]. Na globalnom nivou IEEE 1547-2018 definiše da svi DIEEE moraju biti sposobni za kontrolu faktora snage i isporuke reaktivne snage u cilju podrške mrežnom naponu i smanjenja naponskih odstupanja [37].

6.Rezultati simulacionih mjerenja

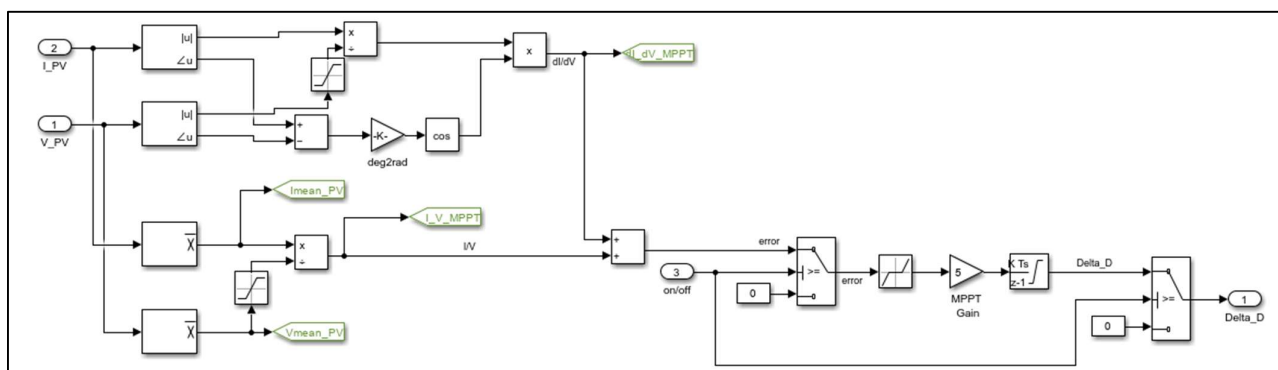
6.1.Uvod u simulaciju

Za potrebe istraživanja ovog rada, sprovedeno je simulaciono testiranje u okruženju Matlab/Simulink-a, korišćenjem ugrađenog modela “*100-kW Grid-Connected PV Array*” (slika 6.1) [69]. Tokom testiranja, analiziran je uticaj solarne iradijacije i temperature na totalnu harmonijsku distorziju struje (THDi) i faktor snage ($\cos\phi$).

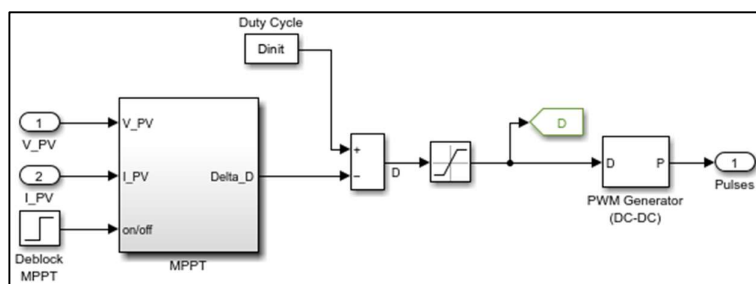
Fotonaponski sistem prikazan na slici 6.1, snage 100 kW povezan je elektroenergetsku mrežu naponskog nivoa 25 kV preko DC-DC boost konvertera i trofaznog VSC (*voltage source converter*) konvertora. Za praćenje tačke maksimalne snage primijenjena je metoda inkrementalne konduktanse u kombinaciji sa integralnim regulatorom.

Fotonaponski sistem sa slike 6.1 sadrži sledeće komponente [69]:

- Fotonaponski niz koji čini 330 modula tipa SunPower SPR-305E-WHT-D, organizovanih u 66 paralelnih grana sa po 5 modula u seriji. Pri standardnim testnim uslovima (1000 W/m^2 i $25 \text{ }^\circ\text{C}$) ukupna izlazna snaga niza iznosi približno 100.7 kW, dok napon pri maksimalnoj snazi iznosi 273 V.
- DC-DC boost konverter, čija je osnovna funkcija podizanje napona na 500 V na DC sabirnici. Konverter radi na frekvenciji 5 kHz i implementira MPPT regulator zasnovan na metodi inkrementalne konduktanse u kombinaciji sa integralnim regulatorom (slika 6.2). Regulator u realnom vremenu podešava radni odnos (*duty cycle*) kako bi se održala radna tačka PV niza u zoni maksimalne snage i pri promjenama iradijacije i temperature (slika 6.3).
- Trofazni VSC pretvarač sa tri nivoa ($33 \times 60 \text{ Hz}$), koji pretvara jednosmjerni napon od 500 V u naizmjenični napon od 260 V i održava faktor snage blizak jedinici. Kontrolni sistem pretvarača realizovan je u dq-koordinatnom sistemu i sadrži dvije petlje: unutrašnju, za kontrolu aktivne i reaktivne komponente struje (I_d i I_q) i spoljašnju, za regulaciju napona DC-linku (slika 6.4). Referentna struja I_d je izlaz spoljnog kontrolera napona DC linka. Referentna vrijednost reaktivne struje podešena je na nulu, čime se obezbeđuje rad sa jediničnim faktorom snage. Sinhronizacija pretvarača sa mrežom ostvarena je pomoću PLL sistema.
- Kondenzatorska baterija od 10 kVAr koja služi za filtriranje harmonika koje generiše VSC
- Trofazni transformator snage 100 kVA, naponskog odnosa 260 V/25 kV
- Elektroenergetska mreža (slika 6.5)

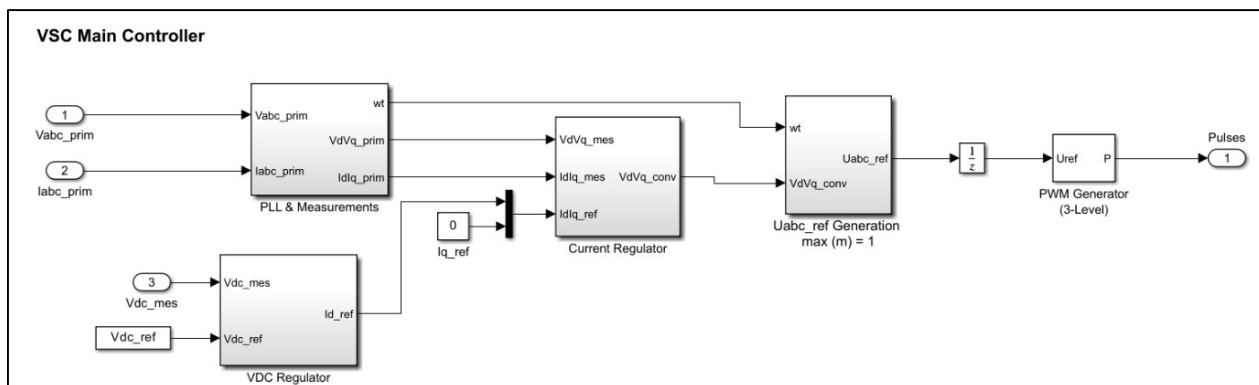


Slika 6.2. MPPT blok realizovan korišćenjem IC tehnike [69]



Slika 6.3. Kontroler za DC-DC boost pretvarač [69]

Blok prikazan na slici 6.3. predstavlja kontroler DC-DC pretvarača, čija je osnovna funkcija praćenje tačke maksimalne snage i generisanje PWM impulsa za upravljanje prekidačkim elementom. Na ulaz MPPT regulatora dovode se trenutne vrijednosti napona i struje fotonaponskog niza, dok dodatni logički signal omogućava ili blokira rad MPPT algoritma. Struktura MPPT bloka je prikazana na slici 6.2, dok je matematički opis postupka dat jednačinama (9)-(15). Izlazni signal MPPT regulatora se potom sabira sa početnom vrijednošću radnog ciklusa (*Dinit*), čime se formira trenutni radni ciklus DC-DC konvertera. Signal se potom dovodi na ulaz PWM generatora koji formira upravljački signal za IGBT prekidač. Na ovaj način se reguliše izlazni DC napon i obezbjeđuje optimalan rad PV niza, uz maksimalno iskorišćenje raspoložive solarne energije.



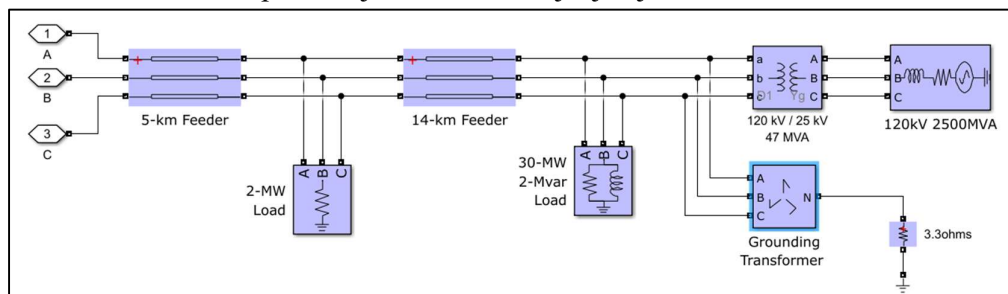
Slika 6.4. VSC Main Controller [69]

Na slici 6.4 je prikazan blok koji kontrolise rad invertora i obezbjeđuje sinhronizovan rad sa mrežom. Na njegov ulaz dovode se vrijednosti mrežnih napona i struja, koji se potom transformišu u dq referentni okvir pomoću PLL sistema. VDC regulator upoređuje izmjerenu i referentnu vrijednost DC napon i generiše referentnu d-komponentu struje (I_{d_ref}) za regulaciju aktivne snage. Referentna q-komponenta (I_{q_ref}) postavljena je na nulu, čime se obezbjeđuje rad sa jediničnim faktorom snage. *Current Regulator* poredi izmjerene i referentne dq komponente struje i generiše naponske reference u dq-domenu. Dobijene vrijednosti se zatim transformišu nazad u abc sistem i koriste za generisanje referentnih napona faza (U_{abc_ref}). Na osnovu ovih signala PWM generator formira impulse za upravljanje IGBT prekidačima u trofaznom invertoru.

Invertor u ovom modelu je realizovan korišćenjem *Universal Bridge* bloka, koji koristi IGBT prekidače sa antiparalelnim diodama. Invertor pretvara jednosmjerni napon sa DC sabirnice u trofazni sinusoidalni napon sinhronizovan sa mrežom. Upravljački signali za IGBT prekidače obezbjeđuju se iz bloka *VSC Main Controller*. Na ovaj način invertor održava konstantan DC napon, prenosi željenu aktivnu snagu u mrežu i radi sa jediničnim faktorom snage.

Kondenzatorska baterija od 10 kVAr služi za stabilizaciju sistema u toku naglih promjena iradijacije, čime se poboljšava dinamički odziv i osigurava stabilan rad sistema.

Na slici 6.5 prikazan je blok koji predstavlja model elektroenergetske mreže. On obuhvata dalekovod, transformator, opterećenje, sistem uzemljenja i jaku mrežu.



Slika 6.5. Elektroenergetska mreža [69]

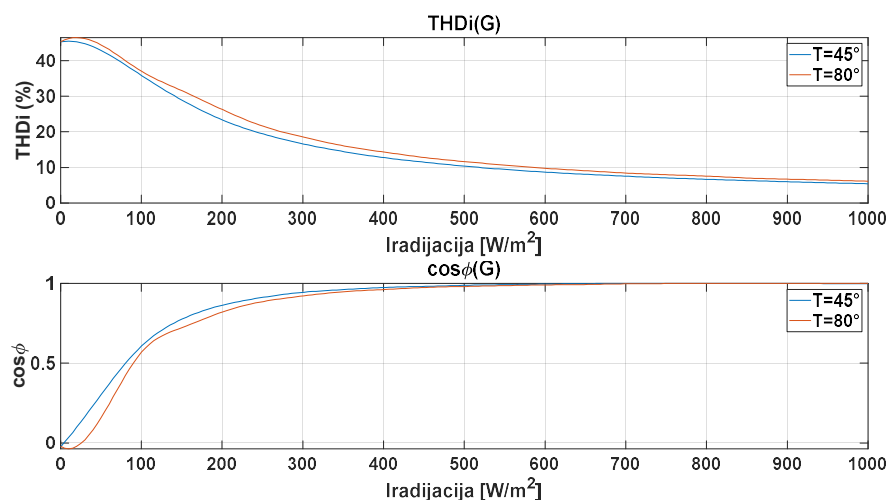
6.2. Matematički model i rezultati simulacije

U okviru ovog istraživanja sprovedeno je simulaciono testiranje mrežno povezanog solarnog invertora u MATLAB/Simulink okruženju. Brojna istraživanja su pokazala da jače Sunčevo zračenje dovodi do povećane proizvodnje električne energije u fotonaponskim ćelijama. Međutim, ono što nije dovoljno istraženo je kako nepovoljni uslovi utiču na kvalitet električne energije.

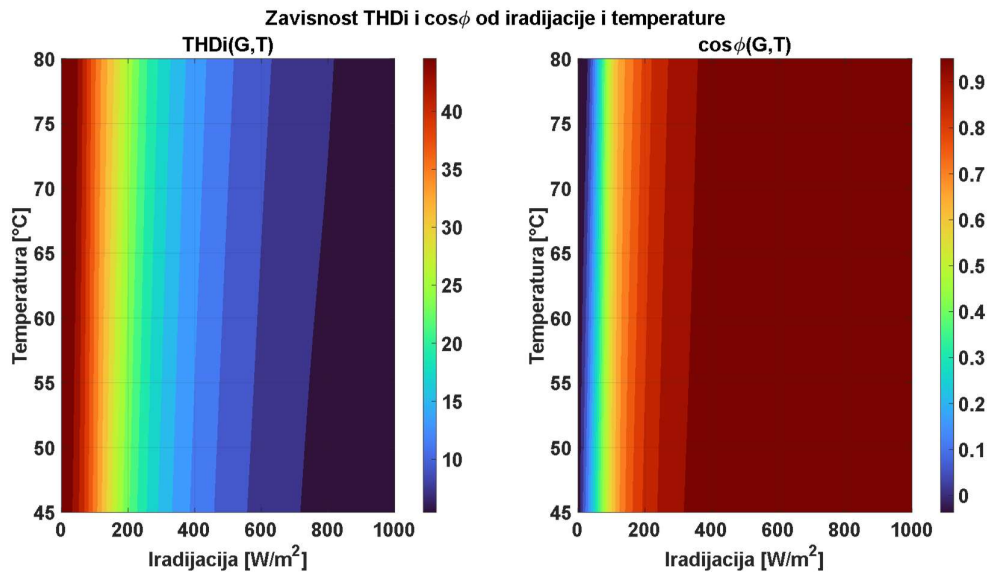
Cilj sprovedenog testiranja bio je da se analizira uticaj promjene atmosferskih parametara na kvalitet električne energije, odnosno na faktor snage i totalnu harmonijsku distorziju struje na izlazu invertora. Tokom ispitivanja analizirani su talasni oblici napona i struje na izlazu invertora, kao i vrijednosti faktora snage i THDi u funkciji ulaznih parametara. Na osnovu dobijenih simulacionih rezultata izvedeni su matematički izrazi koji omogućavaju bolje razumijevanje interakcije između fotonaponskog sistema i elektroenergetske mreže, te mogu poslužiti kao osnova za razvoj naprednih metoda analize i kontrole mrežno povezanih PV sistema. U prvom dijelu testiranja ispitivan je uticaj temperature PV ćelija na kvalitet električne energije. Pri tome su primijenjene različite vrijednosti solarne iradijacije uz konstantne temperature. Razmatrana su dva slučaja:

- 45 °C kao tipična radna temperatura pri jakom sunčevom zračenju,
- 80 °C kao ekstremni slučaj koji može nastati pri visokoj temperaturi okoline i intenzivnoj insolaciji.

Na slikama 6.6 i 6.7 prikazani su rezultati simulacionog testiranja za navedene slučajeve.

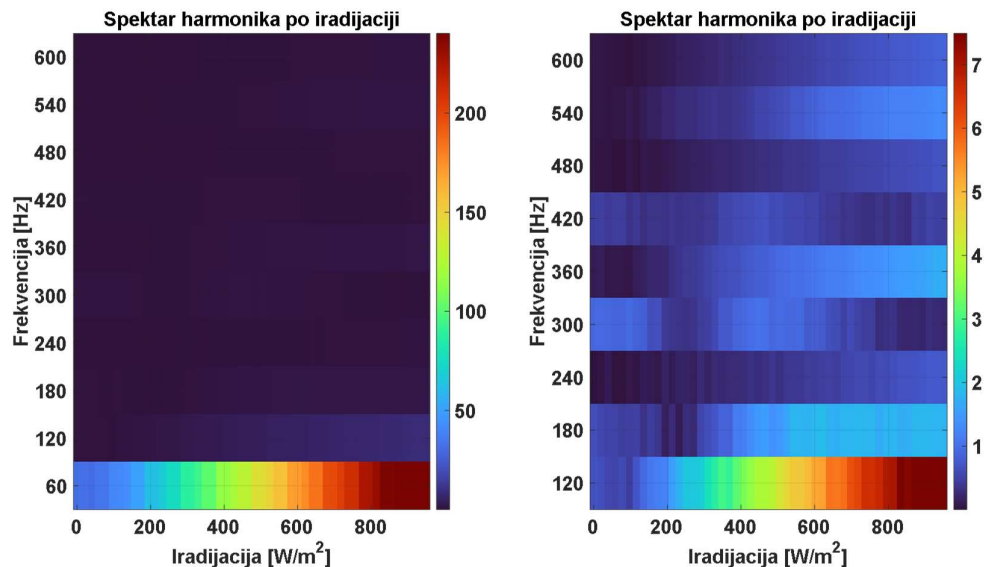


Slika 6.6. Zavisnost parametara kvaliteta električne energije od temperature

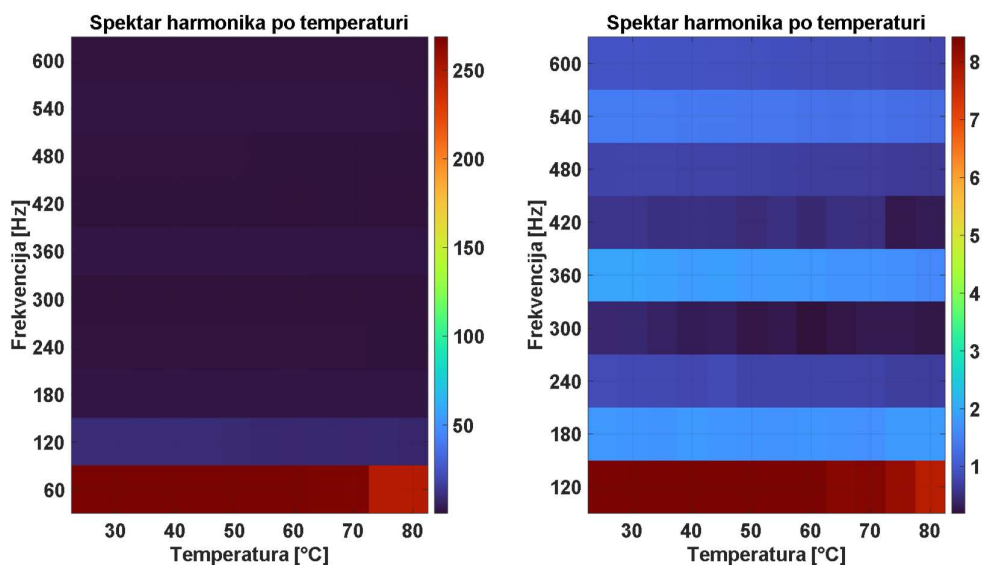


Slika 6.7. Zavisnost parametara kvaliteta električne energije od atmosferskih uslova

Rezultati pokazuju da promjena temperature između ove dvije vrijednosti ima minimalan uticaj na PF i THDi, što potvrđuje da promjena temperature ne predstavlja dominantan faktor koji utiče na rad invertora. Razlog tome leži u činjenici da se promjena temperature prvenstveno odražava na napon praznog hoda (V_{oc}) i struju kratkog spoja (I_{sc}) PV modula, ali u znatno manjoj mjeri nego što to čini solarna iradijacija. Sa porastom temperature dolazi do blagog smanjenja napona i neznatnog povećanja struje, zbog čega ukupna izlazna snaga modula ostaje približno ista u posmatranom temperaturnom opsegu. Slike 6.8 i 6.9 prikazuju promjene amplituda harmonijskih komponenti u zavisnosti od promjene ulaznih parametara sistema.



Slika 6.8. Spektar harmonika pri promjenljivoj iradijaciji i temperaturi od 45°C



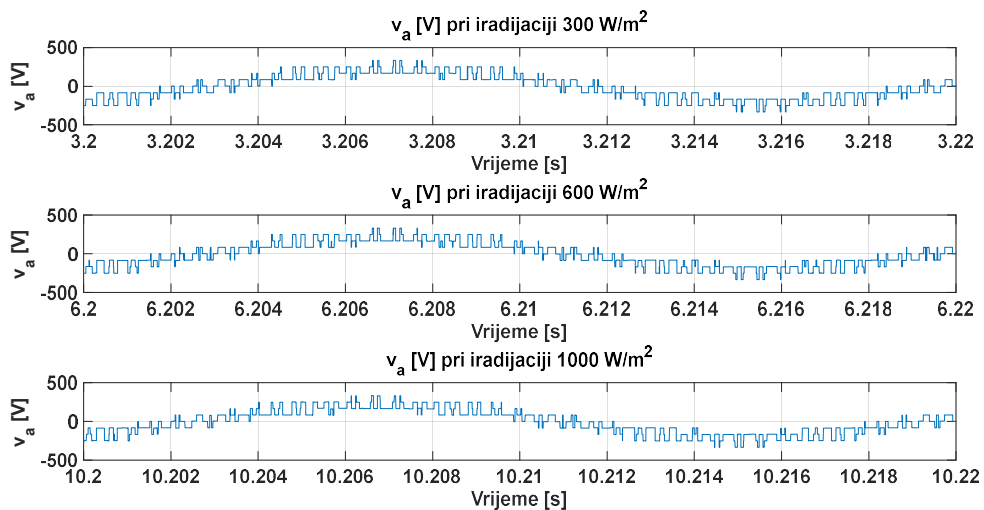
Slika 6.9. Spektar harmonika pri promjenljivoj temperaturi i iradijaciji od 1000W/m^2

Na slikama 6.8 i 6.9 prikazano je da amplitude harmonijskih komponenti pokazuju znatno manji priraštaj u slučaju promjene temperature u odnosu na promjenu iradijacije. Ovi rezultati potvrđuju da dominantan uticaj na kvalitet električne energije ima upravo promjena iradijacije, dok se uticaj temperature može smatrati sekundarnim i u velikoj mjeri zanemarljivim u kontekstu analize kvaliteta električne energije. Takav odnos proizilazi iz činjenice da MPPT upravljački algoritam kontinuirano prilagođava radnu tačku fotonaponskog sistema kako bi se održala maksimalna snaga, čime se varijacije izazvane promjenom temperature brzo kompenzuju i ne odražavaju značajno na talasne oblike struje i napona na izlazu invertora. S obzirom na to, dalja analiza je usmjerena na uticaj solarne iradijacije na kvalitet električne energije.

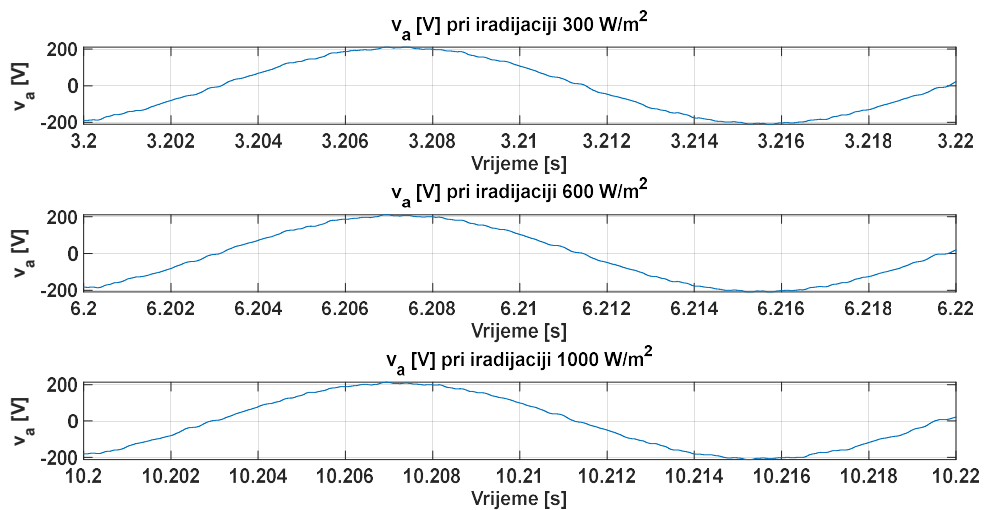
6.3. Uticaj iradijacije na THD i PF

S obzirom na preliminarne nalaze da je uticaj temperature sekundaran, u ovom dijelu rada fokus je stavljen na kvantitativnu analizu uticaja solarne iradijacije na kvalitet električne energije, odnosno na THDi i PF. Analiza je sprovedena pri konstantnoj temperaturi modula od 45°C , dok iradijacija uzima vrijednosti od 0 W/m^2 do 1000 W/m^2 , sa inkrementom od 50 W/m^2 . Ovakav izbor parametara omogućava detaljno ispitivanje uticaja invertora u čitavom radnom opsegu – od uslova potpunog odsustva sunčevog zračenja do nominalnih uslova rada. Simulaciono testiranje je sprovedeno u stabilnom režimu rada sistema.

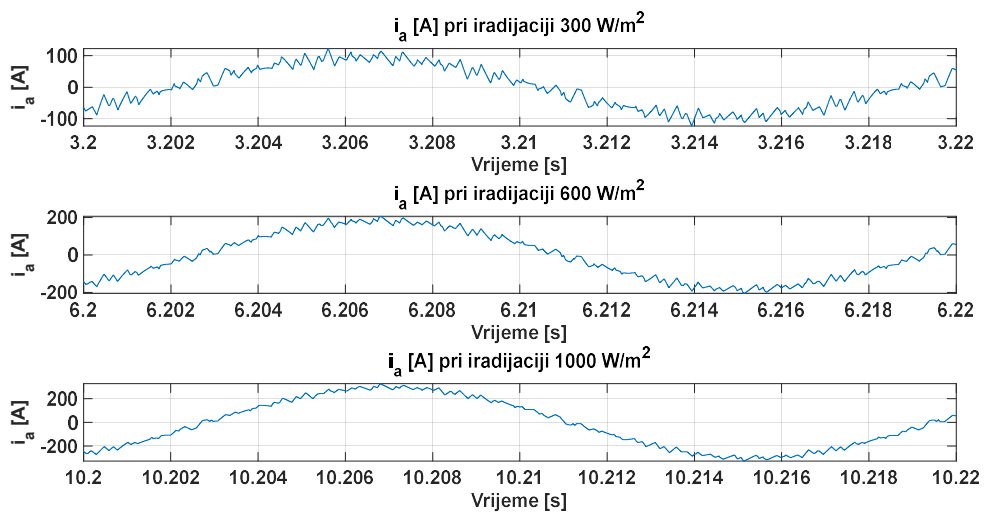
Slika 6.10 prikazuje talasne oblike napona faze a na izlazu invertora za različite nivoe iradijacije tokom dana. Prikazani talasni oblici obuhvataju nivoe iradijacije od 100 W/m^2 , 300 W/m^2 i 1000 W/m^2 . Na talasnim oblicima napona uočava se karakteristična PWM modulacija faznog napona, pri čemu izlazni signal predstavlja niz impulsa čija se širina mijenja u skladu sa referentnim sinusnim signalom. Takav napon sadrži značajnu komponentu viših harmonika, koja se na izlazu invertora filtrira putem filtera. Primjena filtera uklanja visokofrekventne komponente i omogućava da talasni oblik napona poprimi praktično sinusni oblik. Na slici 6.11 prikazan je talasni oblik napona nakon filtriranja. Slika 6.12 prikazuje talasni oblik struje faze a za različite nivoe iradijacije tokom dana. Analiza rezultata potvrđuje da se amplituda viših harmonika u talasnom obliku struje smanjuje sa rastom iradijacije.



Slika 6.10. Prikaz napona v_a prije filtriranja



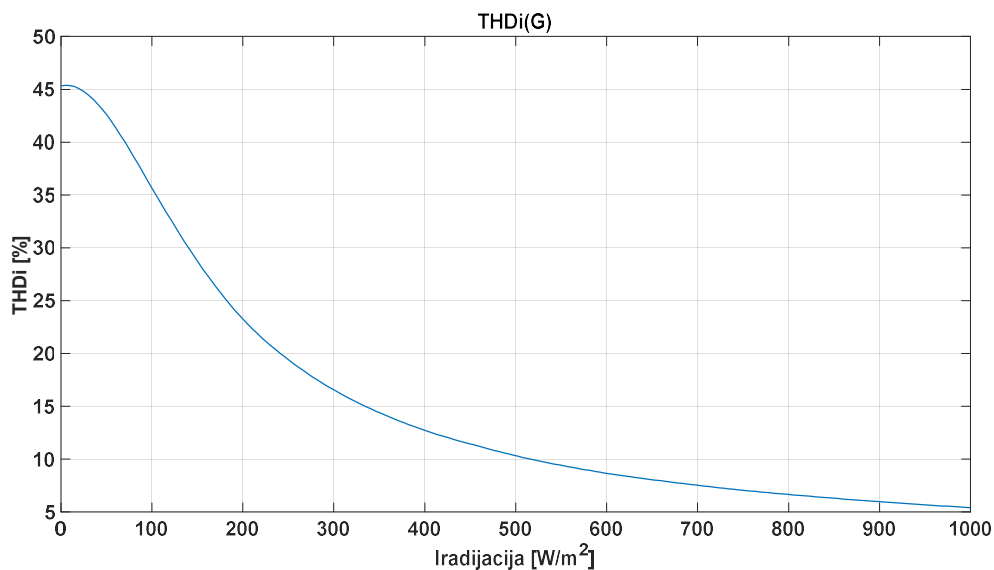
Slika 6.11. Prikaz napona v_a nakon filtriranja



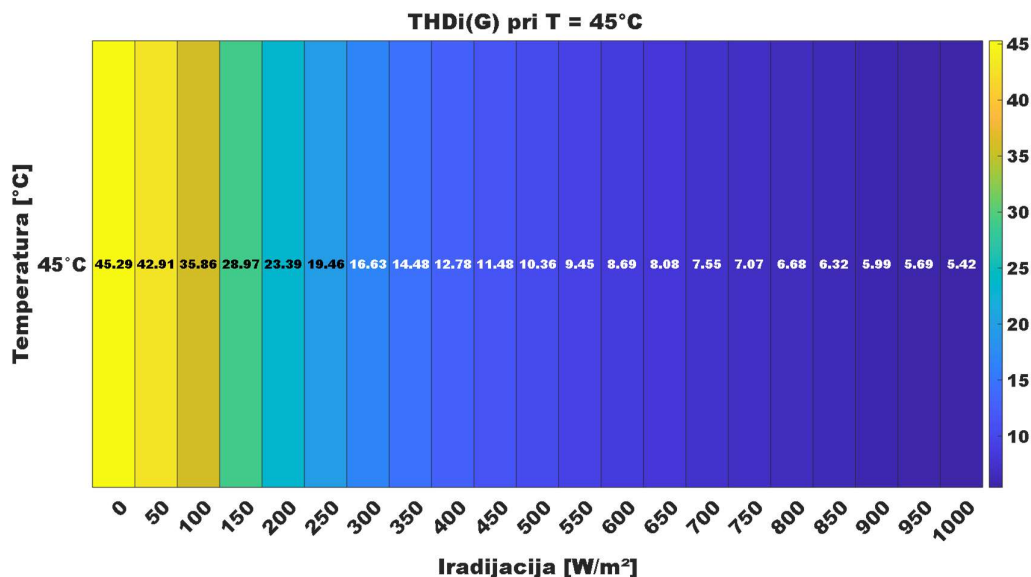
Slika 6.12. Prikaz struje i_a

6.3.1. Uticaj iradijacije na THDi

Na slici 6.13 prikazana je zavisnost THDi od iradijacije, gdje se jasno uočava trend rasta harmonijskog sadržaja struje pri nižim nivoima osvjetljenja. Slika 6.14 prikazuje dobijene srednje vrijednosti THDi u zavisnosti od iradijacije.



Slika 6.13. Zavisnost THDi od iradijacije



Slika 6.14. Prosječne vrijednosti THDi(G)

Na osnovu dobijenih simulacionih rezultata, izvršeno je nelinearno regresiono fitovanje radi dobijanja empirijske formule koja opisuje zavisnost THDi od iradijacije:

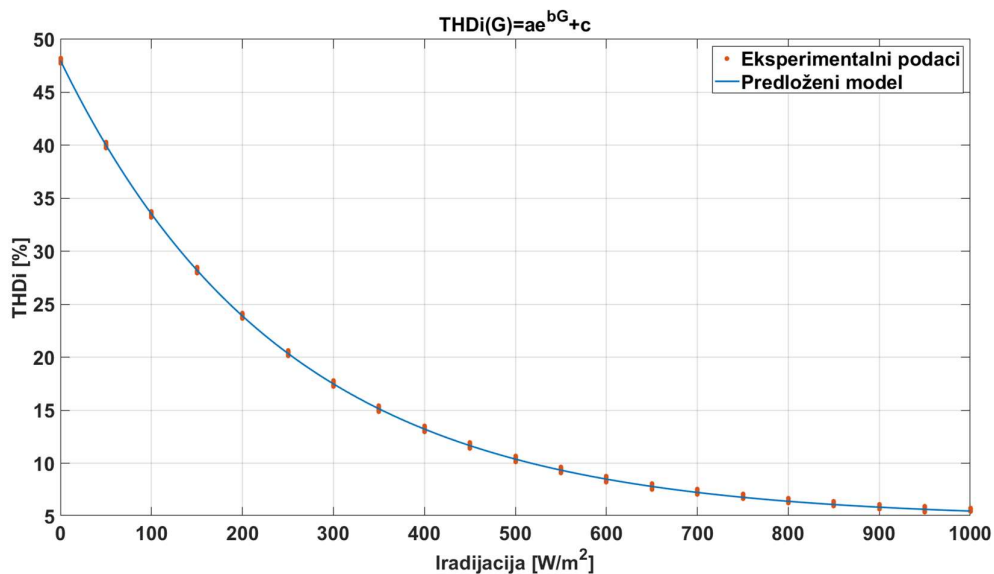
$$THDi(G) = ae^{bG} + c, \quad (36)$$

gdje G označava iradijaciju izraženu u W/m^2 , dok a , b i c predstavljaju koeficijente određene metodom najmanjih kvadrata.

Kao rezultat fitovanja, dobijena je jednačina:

$$THDi(G) = 43.4e^{-0.00} + 4.72. \quad (37)$$

Na slici 6.15 prikazani su rezultati simulacionog testiranja, kao i odgovarajuća eksponencijalna aproksimacija.



Slika 6.15. Prikaz aproksimativne funkcije THDi(G)

Koeficijent determinacije (R^2), za fitovanu funkciju iznosi 0.9897, što ukazuje na visok nivo poklapanja između funkcije i posmatranih podataka. Ova vrijednost pokazuje koliko dobro model opisuje varijabilnost THDi u zavisnosti od iradijacije.

Ovaj pristup omogućava precizno opisivanje nelinearne zavisnosti između iradijacije i totalne harmonijske distorzije, što je karakteristično za rad mrežno povezanog solarnog invertora. Empirijska funkcija omogućava praćenje promjena THDi pri različitim nivoima iradijacije. Model zahtijeva mali broj parametara, što olakšava interpretaciju fizičkog uticaja iradijacije na harmonike i doprinosi efikasnijoj integraciji solarnih elektrana u elektroenergetsku mrežu.

6.3.1.1. Predloženi aproksimativni metod

Jednostavnost usvojenog modela omogućava primjenu brzog aproksimativnog postupka za procjenu vrijednosti THDi, bez potrebe za izvođenjem vremenski zahtjevnih simulacija fotonaponskog sistema. Postupak se zasniva na prethodno definisanom eksponencijalnom modelu koji omogućava interpolaciju i predikciju THDi pri različitim nivoima solarne iradijacije. U nastavku je objašnjen način određivanja parametara modela.

Neka se parametar c definiše kao minimalna vrijednost THDi ($THDi_{min}$), koja se javlja pri maksimalnoj iradijaciji:

$$c = THDi_{min}. \quad (38)$$

Koeficijent a određuje se tako da obezbijedi da model odgovara maksimalnoj vrijednosti THDi, pri vrlo niskoj iradijaciji ($G_{min} \rightarrow 0$):

$$THDI_{max}(G_{min}) = THDi_{min} + ae^{bG_{min}}, \quad (39)$$

odnosno,

$$a = THDI_{max} - THDi_{min}. \quad (40)$$

Na osnovu poznatih vrijednosti parametara a i c , kao i poznate vrijednosti THDi za neku vrijednost iradijacije blisku srednjem opsegu, moguće je izračunati parametar b . Na ovaj način formira se eksponencijalni model koji omogućava efikasnu procjenu THDi za različite nivoe iradijacije, bez potrebe za izvođenjem složenih simulacija fotonaponskog sistema.

U sledećem primjeru primijenjen je brzi aproksimativni postupak na rezultate simulacionog testiranja. Pri određivanju parametara modela usvojeno je da koeficijent c odgovara minimalnoj vrijednosti THDi u analiziranom skupu podataka:

$$c = THDi_{min} = 6.077. \quad (41)$$

Primjenom izraza (40) može se odrediti koeficijent a , kao razlika maksimalne i minimalne vrijednosti THDi:

$$a = THDI_{max} - THDi_{min} = 45.303 - 6.077. \quad (42)$$

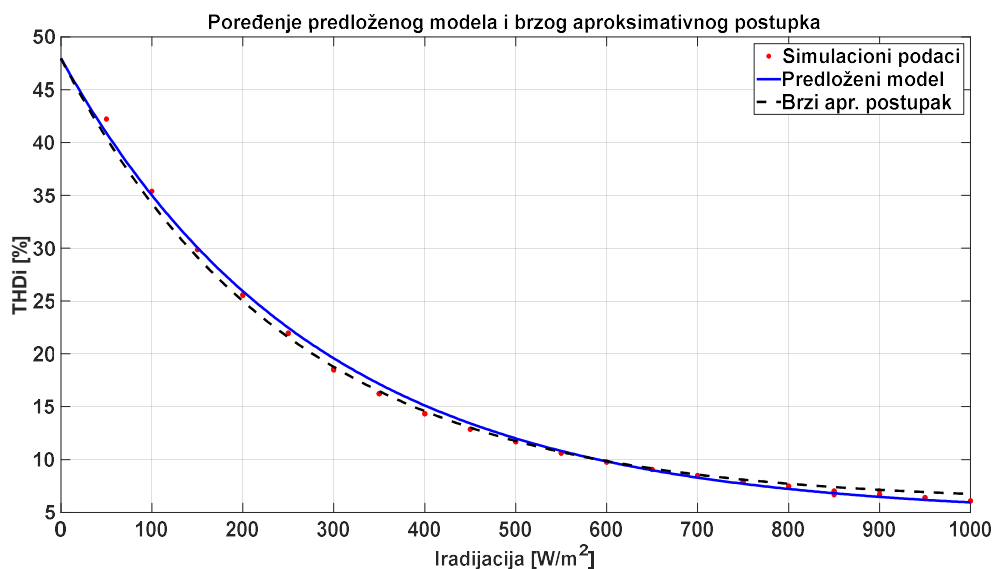
Poznavanjem parametara a i c , te korišćenjem vrijednosti iradijacije $G=500\text{W}/\text{m}^2$, može se odrediti koeficijent b prema izrazu (36):

$$b = -0.0039. \quad (43)$$

Primjenom brzog aproksimativnog postupka na rezultate simulacionog testiranja dobijena je sledeća jednačina:

$$THDi(G) = 39.226e^{-0.0039} + 6.077. \quad (44)$$

Slika 6.16 prikazuje krive dobijene primjenom predloženog modela i brzog aproksimativnog postupka.

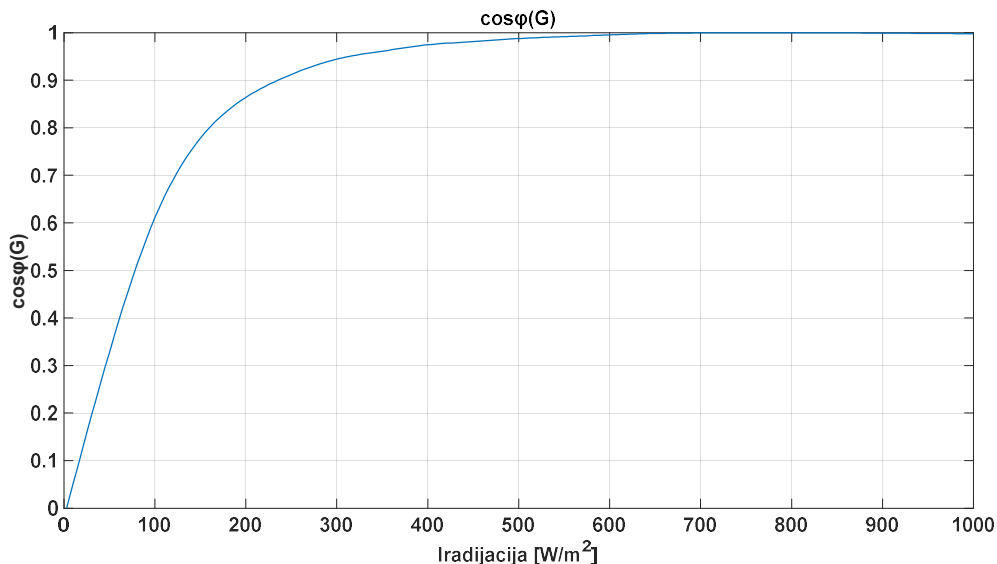


Slika 6.16. Poređenje predloženog modela i brzog aproksimativnog postupka

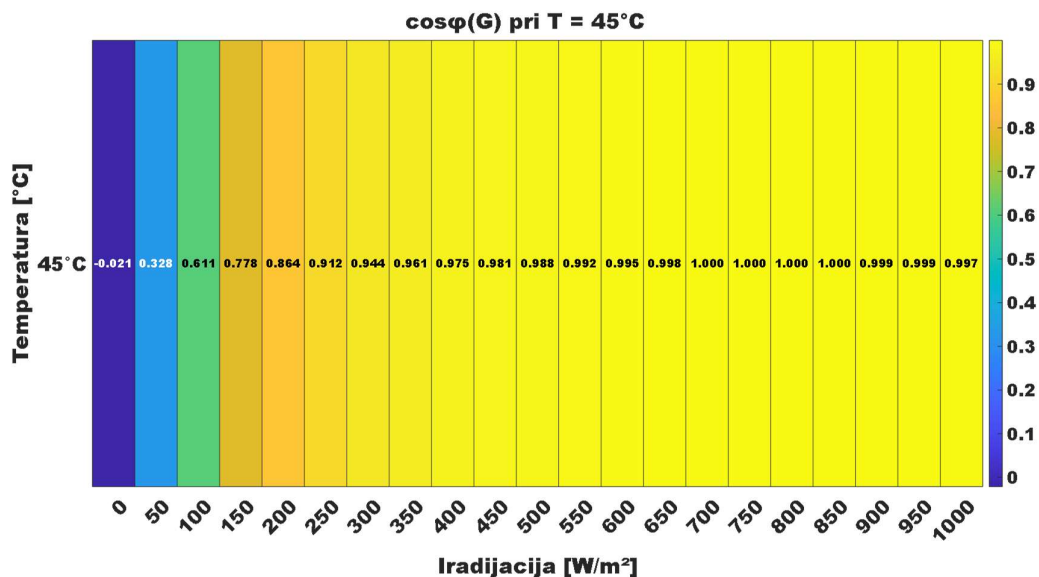
Faktor determinacije za predloženi pristup modelovanja iznosi 0.9897, dok u slučaju brzog aproksimativnog postupka iznosi 0.97752. Rezultati ukazuju na to da brzi aproksimativni postupak, pruža dovoljno pouzdane rezultate za potrebe brze procjene zavisnosti THDi od atmosferskih uslova.

6.3.2. Uticaj iradijacije na faktor snage

Slika 6.17 prikazuje zavisnost faktora snage ($\cos\phi$) od iradijacije, gdje se jasno uočava pad vrijednosti $\cos\phi$ pri nižim nivoima osvjetljenja. Slika 6.18 prikazuje dobijene srednje vrijednosti $\cos\phi$ u zavisnosti od iradijacije.



Slika 6.17. Zavisnost $\cos\phi$ od iradijacije



Slika 6.18. Prosječne vrijednosti $\cos\phi(G)$

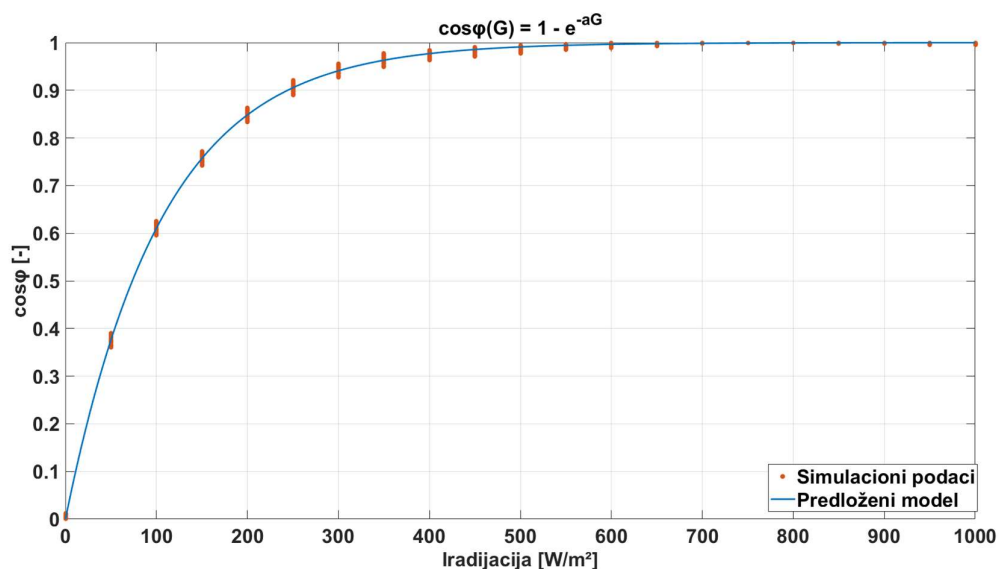
Na osnovu dobijenih simulacionih rezultata, izvršeno je nelinearno regresiono fitovanje radi dobijanja empirijske formule koja opisuje zavisnost faktora snage od iradijacije:

$$\cos\varphi(G) = 1 - e^{-aG}, \quad (45)$$

gdje G označava iradijaciju izraženu u W/m^2 , dok a predstavlja koeficijent određen metodom najmanjih kvadrata. Kao rezultat fitovanja, dobijena je jednačina:

$$\cos\varphi(G) = 1 - e^{-0.009G}. \quad (46)$$

Na slici 6.19 prikazani su diskretno uzrokovani simulacioni podaci dobijeni iz MATLAB/Simulink modela, kao i odgovarajuća eksponencijalna aproksimacija.



Slika 6.19. Prikaz aproksimativne funkcije $\cos\varphi(G)$

Koeficijent determinacije (R^2), za fitovanu funkciju iznosi 0.9788 , što ukazuje na visok nivo poklapanja između funkcije i simulacionih podataka.

Ovaj pristup omogućava precizno opisivanje nelinearne zavisnosti između iradijacije i faktora snage. Empirijska funkcija omogućava praćenje promjena faktora snage pri različitim nivoima iradijacije. Pored toga, model zahtijeva samo jedan parametar za efikasno aproksimiranje podataka. Time se daje doprinos kvantitativnoj analizi uticaja iradijacije na kvalitet električne energije i efikasnijoj integraciji solarnih elektrana u elektroenergetsku mrežu.

6.3.2.1. Predloženi aproksimativni metod

Jednostavnost usvojenog modela omogućava primjenu brzog aproksimativnog postupka za procjenu vrijednosti faktora snage, bez potrebe za izvođenjem vremenski zahtjevnih simulacija fotonaponskog sistema. Postupak se zasniva na prethodno definisanom eksponencijalnom modelu koji omogućava interpolaciju i predikciju faktora snage pri različitim nivoima solarne iradijacije. U nastavku je objašnjen način određivanja parametara modela.

Za proizvoljnu vrijednost iradijacije G_I i odgovarajuću vrijednost faktora snage $\cos\varphi(G_I)$, odabranih sa dijela krive gdje dolazi do zasićenja, može se izraziti funkcionalna zavisnost između ova dva parametra u obliku:

$$\cos\varphi(G_1) = 1 - e^{-aG_1} \quad (47)$$

Iz prethodnog izraza slijedi:

$$e^{-aG_1} = 1 - \cos\varphi(G_1), \quad (48)$$

$$\ln e^{-aG_1} = \ln(1 - \cos\varphi(G_1)), \quad (49)$$

$$aG_1 = \ln(1 - \cos\varphi(G_1)). \quad (50)$$

Na osnovu čega se koeficijent a može odrediti kao:

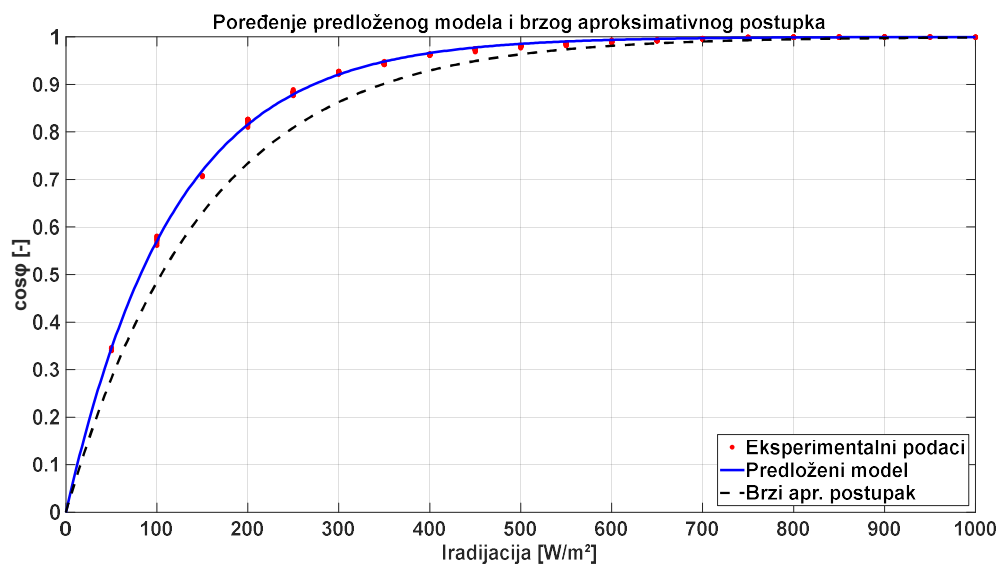
$$a = \frac{\ln(1 - \cos\varphi(G_1))}{G_1}. \quad (51)$$

U sledećem primjeru primijenjen je brzi aproksimativni postupak na rezultate simulacionog testiranja. Rješavanjem izraza (51) za vrijednost iradijacije $G=800\text{W/m}^2$, dobijena je vrijednost parametra $a = 0.0066$

Primjenom brzog aproksimativnog postupka na rezultate simulacionog testiranja dobijena je sledeća jednačina:

$$\cos\varphi(G) = 1 - e^{-0.0066G} \quad (52)$$

Slika 6.20 prikazuje krive dobijene primjenom predloženog modela i brzog aproksimativnog postupka.



Slika 6.20. Poređenje predloženog modela i brzog aproksimativnog postupka

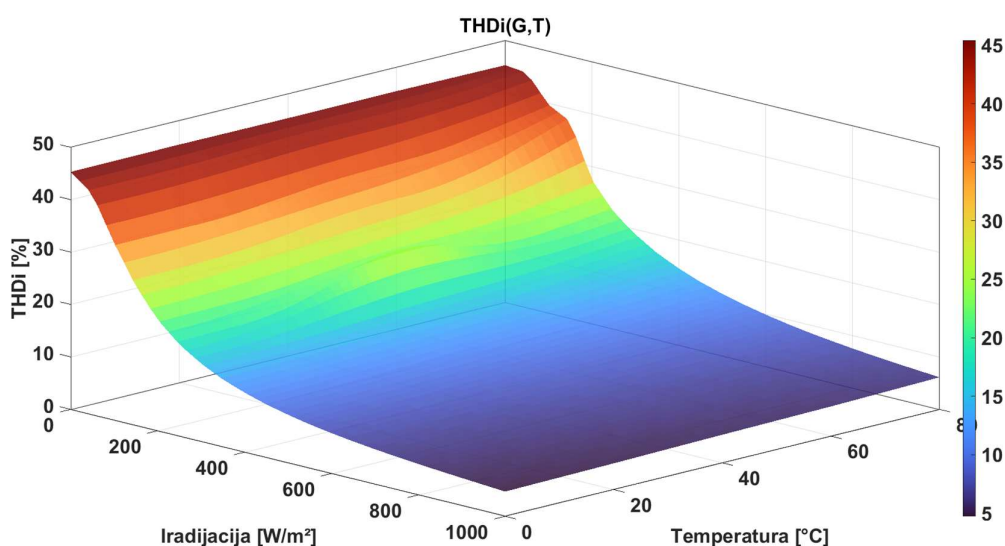
Faktor determinacije za predloženi pristup modelovanja iznosi 0.9788, dok u slučaju brzog aproksimativnog postupka iznosi 0.9193. Rezultati ukazuju na to da brzi aproksimativni postupak, iako ne toliko precizan kao predloženi model, daje dovoljno pouzdane rezultate za potrebe brze procjene zavisnosti faktora snage od atmosferskih uslova.

6.4. Uticaj iradijacije i temperature na THDi i PF

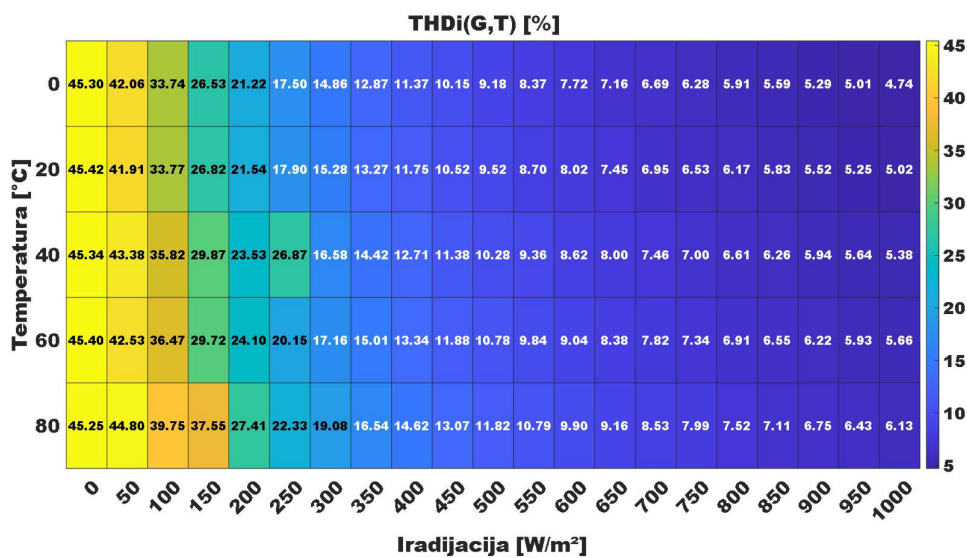
U okviru ovog poglavlja analiziran je kombinovani uticaj atmosferskih uslova (iradijacije i temperature) na kvalitet električne energije. Analiza je izvršena pri promjenljivim ulaznim parametrima. Iradijacija uzima vrijednosti od 0 W/m² do 1000 W/m², sa korakom od 50 W/m², dok temperatura uzima vrijednosti od 0°C do 80°C, sa korakom od 10 °C. Ovaj izbor parametara omogućava detaljno ispitivanje rada invertora u različitim uslovima. Simulacioni testovi su izvedeni u stabilnom režimu rada sistema.

6.4.1. Uticaj iradijacije i temperature na THDi

Na slici 6.21 prikazana je zavisnost THDi od iradijacije i temperature, gdje se može uočiti kako ulazni parametri utiču na harmonijski sadržaj struje. Slika 6.22 prikazuje dobijene srednje vrijednosti THDi u zavisnosti od iradijacije.



Slika 6.21. Zavisnost THDi od iradijacije i temperature



Slika 6.22. Prosječne vrijednosti THDi (G,T)

Slika 6.21 prikazuje kombinovani uticaj iradijacije i temperature na THDi. Može se uočiti da se najveći kvalitet električne energije postiže pri vrlo visokoj iradijaciji i niskim temperaturama. Takođe, može se uočiti da temperatura ima veći uticaj pri nižim vrijednostima iradijacije.

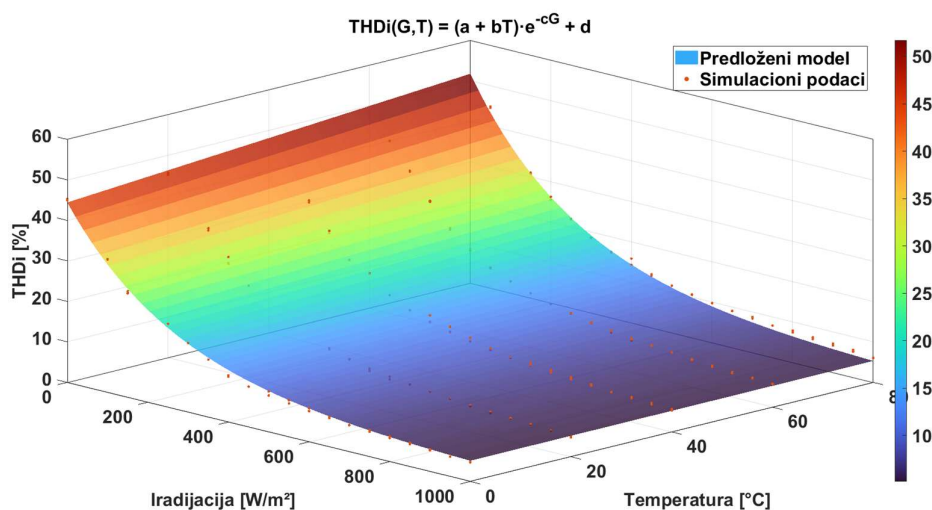
Na osnovu dobijenih simulacionih rezultata, izvršeno je nelinearno regresiono fitovanje, radi određivanja empirijske funkcije koja opisuje zavisnost THDi od ulaznih parametara:

$$\text{THDi}(G, T) = (a + bT)e^{-cG} + d, \quad (53)$$

gdje G označava iradijaciju izraženu u W/m^2 , T označava temperaturu u $^{\circ}\text{C}$, dok a , b , c i d predstavljaju koeficijente određene metodom najmanjih kvadrata. Kao rezultat fitovanja, dobijena je jednačina:

$$\text{THDi}(G, T) = (40.11 + 0.09T)e^{-0.004G} + 4.32. \quad (54)$$

Na slici 6.23 su prikazani diskretno uzrokovani simulacioni podaci dobijeni iz MATLAB/Simulink modela, kao i odgovarajuća aproksimacija.

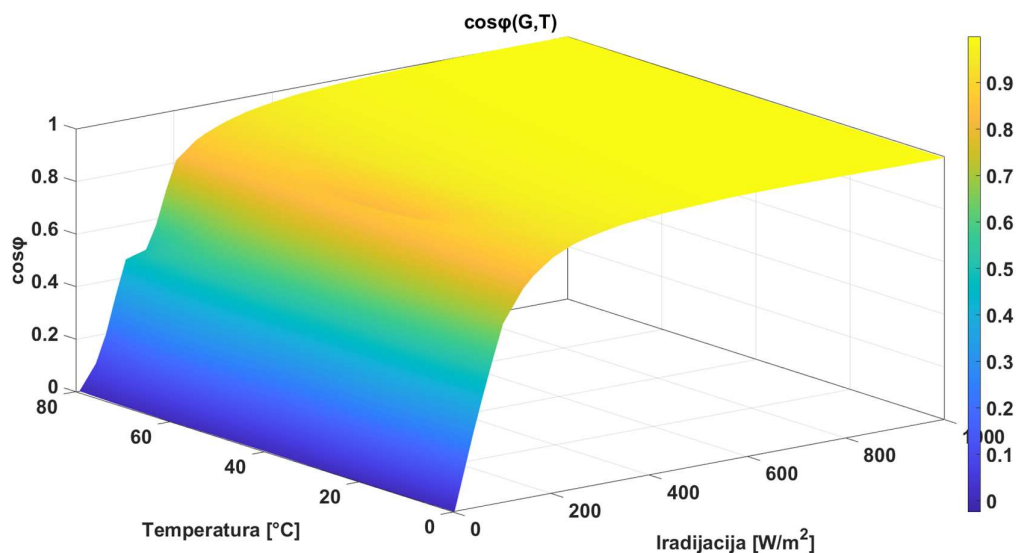


Slika 6.23. Prikaz stvarnih podataka i fitovane funkcije

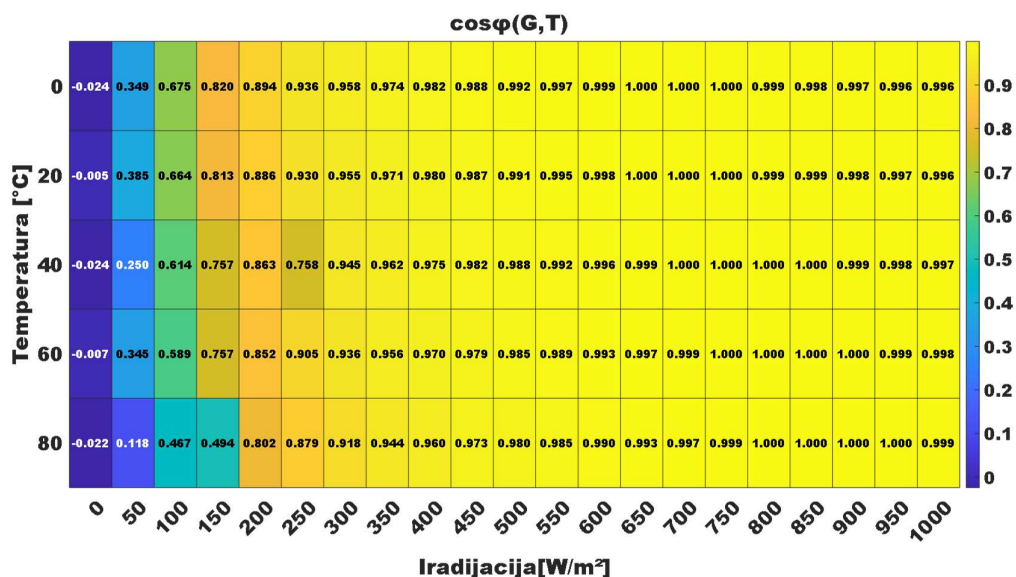
Koeficijent determinacije (R^2), za fitovanu funkciju iznosi 0.966, što ukazuje na visok nivo poklapanja između funkcije i simulacionih rezultata. Vizuelizacija rezultata jasno prikazuje oblasti sa većim i manjim vrijednostima THDi, što omogućava identifikaciju kritičnih radnih tačaka sistema. Ovakva analiza doprinosi razumijevanju uticaja atmosferskih uslova na kvalitet električne energije i pruža osnovu za dalja poboljšanja u radu sistema, uključujući optimizaciju kontrole i smanjenje harmonika.

6.4.2. Uticaj iradijacije i temperature na faktor snage

Na slici 6.24 prikazana je zavisnost faktora snage od iradijacije i temperature, gdje se može uočiti kako ulazni parametri utiču na faktor snage fotonaponskog sistema. Slika 6.25 prikazuje dobijene srednje vrijednosti faktora snage u zavisnosti od iradijacije.



Slika 6.24. Zavisnost $\cos\phi$ od iradijacije i temperature



Slika 6.25. Prosječne vrijednosti $\cos\phi$ (G,T)

Na osnovu rezultata simulacionog testiranja utvrđeno je da temperatura ima veoma mali uticaj na faktor snage. Zbog toga, za potrebe daljih analiza i kvantitativne procjene faktora snage nije neophodno modelovati kombinovani uticaj iradijacije i temperature. Dovoljno je sagledati zavisnost izlaznih parametara invertora samo u funkciji iradijacije, što pojednostavljuje modeliranje i omogućava efikasnu analizu bez gubitka relevantnih informacija.

7. Rezultati eksperimentalnih mjerenja

Ovo poglavlje obrađuje rezultate eksperimentalnih mjerenja sprovedenih na mrežno povezanom fotonaponskom sistemu sa ciljem analize kvaliteta električne energije. Poseban akcenat stavljen je na ispitivanje uticaja iradijacije na faktor snage i totalnu harmonijsku distorziju struje na izlazu PV invertora.

Rezultati eksperimentalnih mjerenja korišćeni u ovom istraživanju prikupljeni su iz više izvora kako bi se obezbijedila reprezentativnost i pouzdanost metoda. U tu svrhu korišćeni su podaci mjereni na realnom PV sistemu u laboratorijskim i terenskim uslovima, kao i arhivirani zapisi sa sistema za praćenje proizvodnje i kvaliteta električne energije. Mjerenja su realizovana korišćenjem više tipova mjernih instrumenata i različitih metodologija. Ovakav pristup smanjuje mogućnost sistematskih grešaka i povećava pouzdanost zaključaka izvedenih na osnovu obrađenih podataka.

Cilj ovog dijela istraživanja je eksperimentalna verifikacija tvrdnji o povezanosti promjenljivih ulaznih parametara i kvaliteta električne energije, kao i potvrda matematičkih modela dobijenih na osnovu simulacija u prethodnim poglavljima. Dobijeni rezultati predstavljaju osnovu za dalju analizu i optimizaciju rada PV sistema sa aspekta kvaliteta električne energije, uz uvažavanje važećih standarda (IEEE 519-2014) [68].

7.1. Primjer 1

Za potvrdu matematičkog modela koji opisuje zavisnost THDi od iradijacije, korišćeni su eksperimentalni podaci predstavljeni u radu [70]. U navedenom istraživanju analiziran je kvalitet izlazne struje kod više tipova solarnih invertora, pri čemu su autori sprovedli detaljna mjerenja harmonijske distorzije struje u zavisnosti od promjene ulazne snage. Mjerenja su realizovana kako u stacionarnom režimu, tako i tokom tranzijentnih stanja izazvanih procesom praćenja tačke maksimalne snage.

Eksperimentalna ispitivanja sprovedena su u laboratorijskim uslovima na prototipu mikromreže koja emulira rad distribuiranih izvora energije. Ispitivanje je obavljeno na više mrežnih invertora, pri čemu je korišćen programabilni DC izvor (ITECH IT6000C), sposoban da simulira karakteristike PV modula i baterijskih sistema. DC izvor je kontrolisan softverom SAS1000L (verzija 2.2.0), koji omogućava generisanje I-V karakteristika modula na osnovu zadatih tehnoloških i ekoloških parametara [70]. Laboratorijski sistem uključivao je lokalna induktivna i omska opterećenja, instrumente za analizu harmonika i sistem upravljanja mikromrežom zasnovan na PLC i SCADA platformi. Mjerenje izlazne struje invertora, DC komponente i harmonika realizovano je pomoću preciznog analizatora snage tipa LMG i virtuelne instrumentacije LabVIEW, dok je proračun harmonika i totalne distorzije nazivne struje (TRD) obavljen na računaru u skladu sa standardom IEEE 1547-2018.

U radu su prikazane vrijednosti harmonika i totalne distorzije nazivne struje (TRD), za različite vrijednosti ulazne snage. Tabela 7.1. prikazuje vrijednosti TRD za različite vrijednosti ulazne snage, na invertoru SOLIS S5-EH1P3.6K-1.

Tabela 7.1. Vrijednosti TRDi za inverter SOLIS S5-EH1P3.6K-1 [70]

Ulazna snaga	100%	75%	50%	25%	5%
TRDi [%]	3.59	3.53	3.65	3.83	3.88

U radu [70], data je jednačina za TRD:

$$TRDi = \frac{\sqrt{I_{RMS}^2 - I_1^2}}{I_r}, \quad (55)$$

gdje I_{RMS} predstavlja efektivnu vrijednost generisane struje u A, I_1 predstavlja efektivnu vrijednost amplitude osnovnog harmonika u A, dok je I_r nominalna vrijednost struje invertora u A. Nominalna vrijednost struje za posmatrani inverter iznosi 15.6 A.

Ako se jednačina (50) uvrsti u jednačinu (23) za THD, dobija se:

$$THDi = \frac{TRDi * I_r}{I_1}. \quad (56)$$

Na osnovu jednačine (51) mogu se dobiti vrijednosti THDi, za različite vrijednosti ulazne snage (Tabela 7.2):

Tabela 7.2. Vrijednosti THDi za inverter SOLIS S5-EH1P3.6K-1

Ulazna snaga	100%	75%	50%	25%	5%
THDi [%]	0.6	0.78	1.2	2.53	14.5

Zbog malog broja prikupljenih eksperimentalnih podataka izvršena je ekstrapolacija kako bi se generisale dodatne tačke, čime je omogućeno preciznije i reprezentativnije fitovanje eksponencijalne funkcije.

Na osnovu obrađenih podataka, primijenjeno je nelinearno regresiono fitovanje radi određivanja odgovarajućih koeficijenata modela. Jednačina (39) u ovom slučaju sada glasi:

$$THDi(G) = 19.69e^{-0.008G} + 0.66. \quad (57)$$

U slučaju primjene brzog aproksimativnog postupka, parametri eksponencijalnog modela određuju se na sljedeći način:

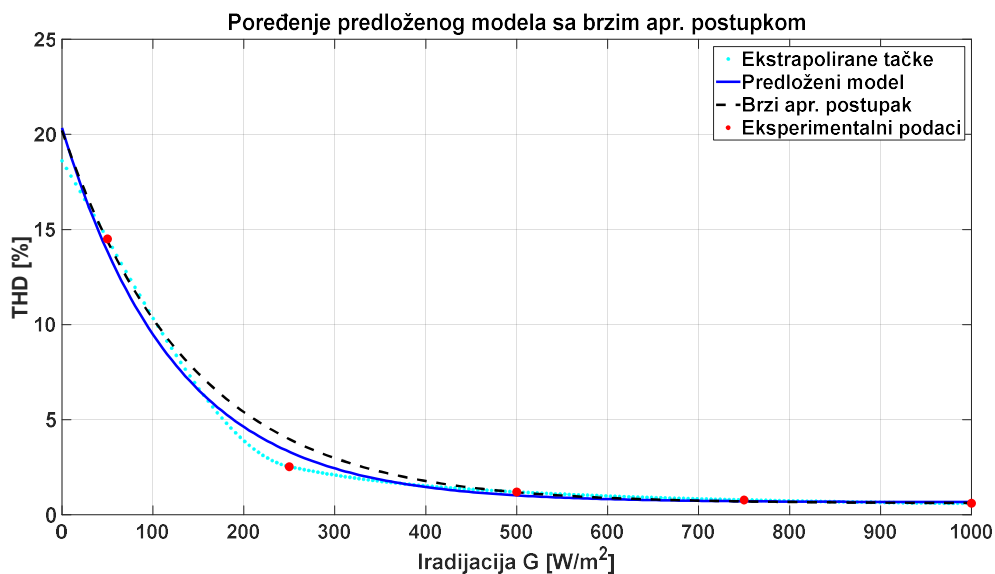
$$c = THDi_{min} = 0.6, \quad (58)$$

$$THDi_{max}(G_{min}) = THDi_{min} + ae^{bG_{min}}, G_{min} \rightarrow 0, \quad (59)$$

$$a = THDi_{max} - THDi_{min}, \quad (60)$$

$$a = 19.61. \quad (61)$$

Za određivanje preostalog parametra b , koristi se poznata vrijednost THDi za srednji nivo iradijacije. Ako se uzme vrijednost $G=500W/m^2$, rješavanjem jednačine (39) dobija se da b iznosi -7.03×10^{-3} . Na slici 7.1. su prikazane stvarne vrijednosti THD struje, vrijednosti dobijene ekstrapolacijom, kao i krive dobijene fitovanjem i brzim aproksimativnim postupkom.



Slika 7.1. Prikaz stvarnih podataka, fitovane funkcije i funkcije dobijene brzim aproksimativnim postupkom

Dobijena fitovana funkcija, čiji faktor determinacije iznosi 0.9914, pokazuje izuzetno dobro poklapanje sa eksperimentalnim podacima. Dodatno, brzi aproksimativni postupak, iako pojednostavljen, postiže koeficijent determinacije 0.9820. Vrijednost koeficijenta potvrđuje da ovaj pristup pruža zadovoljavajući nivo tačnosti za potrebe analize i brze procjene THDi u različitim radnim uslovima.

7.2.Primjer 2

Za dodatnu verifikaciju razvijenih matematičkih modela prikazanih u prethodnim poglavljima, korišćeni su rezultati eksperimentalnih istraživanja iz rada [10]. Mjerenja su vršena na realnoj fotonaponskoj elektrani u Turskoj, tokom marta 2021. godine. Autori su analizirali uticaj niskih nivoa iradijacije na kvalitet električne energije u mrežno povezanom PV sistemu. Za kvantitativnu analizu zavisnosti između PF i THDi od iradijacije, autori su primijenili statističke metode nelinearnog fitovanja pomoću softvera SPSS, čime su dobijeni analitički izrazi koji omogućavaju predviđanje navedenih parametara u različitim uslovima rada.

7.2.1.THDi

Rezultati mjerenja THDi prikazani su u Tabeli 7.3.

Tabela 7.3. Vrijednosti THDi za mrežno povezani solarni sistem [10]

Iradijacija [W/m^2]	THDi [%]	Iradijacija [W/m^2]	THDi [%]
9	55.45	520	7.39
10	62.36	541	9.37
12	59.15	562	6.65
13	26.19	593	6.16
16	60.63	602	7.39
18	53.73	608	6.41
25	54.96	621	7.14
28	52.74	629	4.92
31	48.80	641	7.39
36	47.81	649	5.67
37	50.03	661	7.64
39	38.69	671	5.67
42	52.00	682	7.15
45	43.87	692	5.68
48	46.58	700	7.39
66	42.14	704	6.90
74	35.00	712	6.90
87	31.55	724	5.67
89	38.45	735	7.39
90	28.83	739	5.91
93	26.87	750	6.65
116	27.11	757	5.18
145	26.62	767	6.65
146	23.66	776	4.92
166	24.89	782	6.41
168	21.69	794	5.42
177	24.15	801	7.15
193	23.91	809	6.16
204	21.44	819	5.67
245	17.75	826	7.15
263	20.70	838	5.18
266	15.77	853	4.44
284	16.27	863	8.13
314	15.28	885	4.19
317	13.80	889	7.64
349	15.28	910	4.19
369	13.80	913	7.64
388	12.08	927	3.20
414	13.31	931	6.16
437	10.59	945	3.45
440	13.80	954	3.69
467	10.97	966	2.71
493	10.84	984	2.10
500	8.89	990	2.40
517	10.10	1010	2.19

Na osnovu rezultata mjerenja prikazanih u Tabeli 7.3, autori iz rada [10] su razvili analitički izraz koji prikazuje zavisnost THDi od različitih uslova rada:

$$THDi(G) = 447.0632G^{-0.642}. \quad (62)$$

Na iste prikupljene eksperimentalne rezultate primijenjen je postupak modelovanja opisan u poglavlju 6.3.1 ovog master rada. Naime, primjenom nelinearnih regresionih metoda izvršeno je fitovanje eksponencijalnog modela, čime su određeni koeficijenti koji opisuju zavisnost THDi od iradijacije. U tom slučaju, jednačina (39) se izražava kao:

$$THDi(G) = 51.1678e^{-0.005876G} + 5.5155. \quad (63)$$

U slučaju primjene brzog aproksimativnog postupka opisanog u poglavlju 6.3.1.1, parametri eksponencijalnog modela određuju se na sljedeći način:

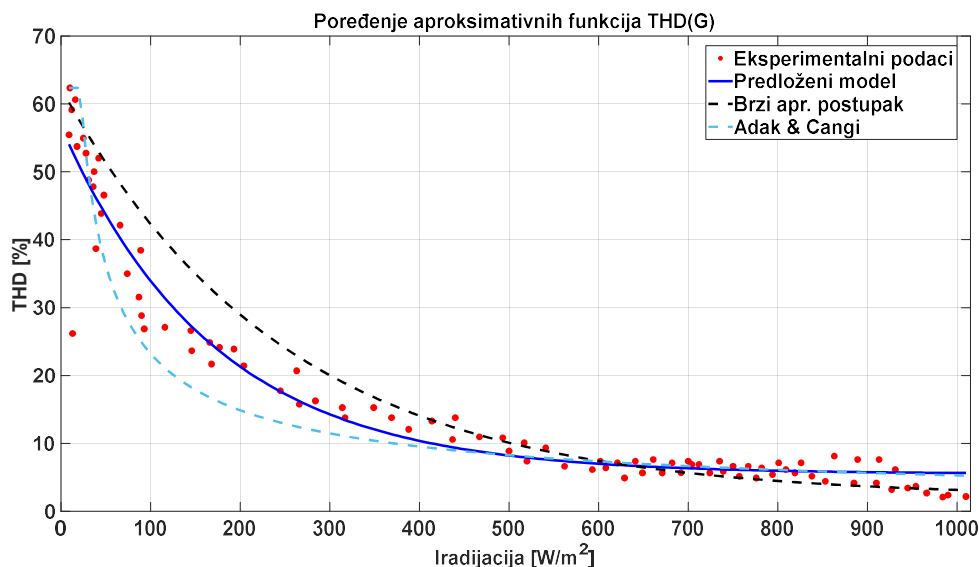
$$c = THDi_{min} = 2.1 \quad (64)$$

$$THDi_{max}(G_{min}) = THDi_{min} + ae^{bG_{min}}, G_{min} \rightarrow 0 \quad (65)$$

$$a = THDi_{max} - THDi_{min} \quad (66)$$

$$a = 60.26. \quad (67)$$

Za određivanje preostalog parametra b , koristi se poznata vrijednost THDi za srednji nivo iradijacije. Ako se u uzme vrijednost $G=500W/m^2$, rješavanjem jednačine (39) dobija se da b iznosi -4.037×10^{-3} . Na slici 7.2 su prikazane stvarne vrijednosti THDi, kriva predstavljena u radu [10], kao i krive dobijene fitovanjem i brzim aproksimativnim postupkom u ovom master radu.



Slika 7.2. Prikaz eksperimentalnih podataka, fitovanih funkcija i funkcije dobijene brzim aproksimativnim postupkom

Tabela 7.4 prikazuje vrijednosti koeficijenta determinacije (R^2) za svaku od navedenih funkcija, što omogućava procjenu tačnosti i pouzdanosti pojedinačnih modela.

Tabela 7.4. Vrijednosti faktora determinacije

Funkcija	Faktor determinacije – R^2
Fitovana funkcija $THDi(G) = 51.1678e^{-0.005876G} + 5.5155$	0.9437
Brzi aproksimativni postupak $THDi(G) = 60.26e^{-4.037 \cdot 10^{-3}G} + 2.1$	0.8659
Adak & Cangi $THDi(G) = 447.0632G^{-0.642}$	0.8873

Dobijene vrijednosti faktora determinacije ukazuju na to da predloženi pristup modelovanja promjene THDi u funkciji iradijacije, predstavljen u ovom radu, adekvatno opisuje i najbolje reprezentuje prikupljene mjerenje podatke. Brzi aproksimativni postupak, iako jednostavniji, pokazuje nešto manju tačnost, ali i dalje pruža dovoljno pouzdane rezultate za potrebe brze procjene i preliminarnih analiza zavisnosti THDi od atmosferskih uslova. Ovi rezultati potvrđuju da je razvijeni model primjenljiv u praksi, posebno u situacijama kada su potrebne efikasne procjene bez detaljnog numeričkog modelovanja.

7.2.2. Faktor snage

Rezultati mjerenja faktora snage prikazani su u Tabeli 7.5.

Tabela 7.5. Vrijednosti faktora snage pri različitim uslovima

Iradijacija [W/m ²]	Cosφ [-]	Iradijacija [W/m ²]	Cosφ [-]
26	0.02091	227	0.94913
35	0.04599	230	0.91986
37	0.07108	239	0.97422
44	0.10453	262	0.97839
47	0.13798	282	0.95749
59	0.14216	295	0.97839
62	0.20069	314	0.97422
68	0.26342	341	0.98258
70	0.17143	364	0.96585
75	0.22578	390	0.97422
77	0.29268	422	0.97839
79	0.39721	439	0.97839
83	0.34704	461	0.97422
85	0.42648	481	0.96167
88	0.30941	500	0.97422
94	0.38885	522	0.98676
96	0.33867	539	0.98258
99	0.50174	568	0.92822
108	0.36376	585	0.97422
112	0.42230	620	0.98258
115	0.47274	647	0.94495
120	0.50592	675	0.99094
126	0.59791	699	0.96585
128	0.56028	717	0.99094
132	0.63972	734	0.95331
135	0.66899	753	0.98676
137	0.71080	771	0.96585
140	0.62718	783	0.99512
141	0.58955	797	0.95749
149	0.73171	803	0.99855
150	0.66063	818	0.96167
153	0.70662	824	0.99930
158	0.76934	838	0.97003
161	0.68989	846	0.99512
163	0.72334	867	0.96585
164	0.78606	876	0.99512
170	0.75679	884	0.97422
173	0.81533	903	0.97422
179	0.78606	917	0.98676
185	0.84042	932	0.97839
189	0.81951	949	0.98676
190	0.86132	974	0.97422
196	0.80697	984	0.95749
200	0.83512	993	0.98676
202	0.92404	1010	0.99432
207	0.87805	1050	0.99540
213	0.87514	1070	0.98919
220	0.89365	1090	0.99891

Na osnovu rezultata mjerenja prikazanih u Tabeli 7.5, autori iz rada [10] su razvili analitički izraz koji prikazuje zavisnost faktora snage od iradijacije:

$$\cos\varphi(G) = \begin{cases} 0.004G + 0.049 & \text{za } G \leq 220 \frac{W}{m^2} \\ 0.9752 & \text{za } G > 220 \frac{W}{m^2}. \end{cases} \quad (68)$$

Na iste prikupljene eksperimentalne rezultate primijenjen je postupak modelovanja opisan u poglavlju 6.3.2 ovog master rada. Naime, primjenom nelinearnih regresionih metoda izvršeno je fitovanje eksponencijalnog modela, čime su određeni koeficijenti koji opisuju zavisnost THDi od iradijacije. U tom slučaju, jednačina (46) se izražava kao:

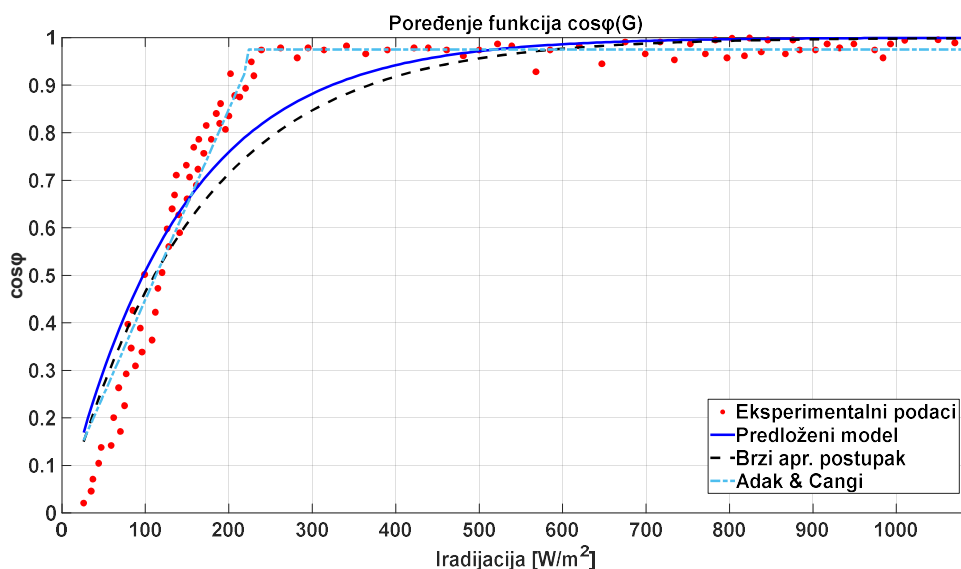
$$\cos\varphi(G) = 1 - e^{-0.007121G}. \quad (69)$$

U slučaju primjene brzog aproksimativnog postupka opisanog u poglavlju 6.3.1.1, parametri eksponencijalnog modela određuju se na sljedeći način:

$$a = \frac{\log(1 - \cos\varphi_{\max})}{G_{\max}}, \quad (70)$$

$$a = \frac{\log(1 - 0.99891)}{1090} = -0.0063. \quad (71)$$

Na slici 7.3. su prikazane stvarne vrijednosti faktora snage, kriva predstavljena u radu [10], kao i krive dobijene fitovanjem i brzim aproksimativnim postupkom u ovom master radu.



Slika 7.3. Prikaz stvarnih podataka, fitovanih funkcija i funkcije dobijene brzim aproksimativnim postupkom

Tabela 7.6. daje pregled vrijednosti koeficijenta determinacije za sve posmatrane funkcije, na osnovu kojih se može procijeniti stepen poklapanja modelovanih i eksperimentalnih rezultata.

Tabela 7.6. Vrijednosti faktora determinacije

Funkcija	Faktor determinacije – R^2
Fitovana funkcija $\cos\varphi(G) = 1 - e^{-0.007121G}$	0.9101
Brzi aproksimativni postupak $\cos\varphi(G) = 1 - e^{-0.0063G}$	0.8956
Adak & Cangi $\cos\varphi(G) = \begin{cases} 0.004G + 0.049 & \text{za } G \leq 220 \frac{W}{m^2} \\ 0.9752 & \text{za } G > 220 \frac{W}{m^2} \end{cases}$	0.9644

Dobijene vrijednosti faktora determinacije ukazuju na to funkcija iz rada [10] najpreciznije opisuje eksperimentalne podatke, što ukazuje na visok stepen poklapanja između mjerenih i modelovanih vrijednosti. Predloženi pristup modelovanja promjene faktora snage u funkciji iradijacije, predstavljen u ovom radu, takođe pokazuje dobro poklapanje. Brzi aproksimativni postupak daje nešto manju tačnost, ali i dalje na zadovoljavajućem nivou opisuje zavisnost faktora snage od atmosferskih uslova.

Mjerenja pokazuju karakterističan izgled faktora snage od iradijacije – pri vrijednostima iradijacije veće od 250 W/m^2 dolazi do zasićenja sa stanovišta $\cos\varphi$, što znači da faktor snage dalje ne raste u značajnoj mjeri. Ovaj efekat zasićenja je praktičan za iradijacije veće od 250 W/m^2 , jer pokazuje da pri visokim nivoima iradijacije faktor snage dostiže stabilnu vrijednost.

7.3.Primjer 3

Za potvrdu razvijenih matematičkih modela iz prethodnih poglavlja, korišćeni su rezultati eksperimentalnih istraživanja iz rada [63], u kojem je analiziran faktor snage mrežno povezanog fotonaponskog invertora pod različitim nivoima iradijacije tokom dana. Eksperiment je sproveden u jugoistočnom dijelu Turske, pri čemu je autor pratio promjene napona, struje, aktivne i reaktivne snage na tački zajedničkog priključenja između PV sistema i elektroenergetske mreže.

Rezultati mjerenja prikazani su u Tabeli 7.7.

Tabela 7.7. Vrijednosti faktora snage pri različitim uslovima

Iradijacija [W/m^2]	$\text{Cos}\varphi$ [-]	Iradijacija [W/m^2]	$\text{Cos}\varphi$ [-]
25	0.1591	231	0.9689
32	0.1780	240	0.9497
36	0.1930	263	0.9199
43	0.2211	284	0.9499
46	0.2331	297	0.9699
58	0.2811	315	0.9752
63	0.3011	341	0.9889
67	0.3180	367	0.9675
71	0.3330	393	0.9784
74	0.3460	422	0.9742
77	0.3571	439	0.9826
80	0.3690	461	0.9658
84	0.3841	481	0.9742
85	0.3638	500	0.9784
90	0.4265	522	0.9784
95	0.3094	539	0.9742
97	0.3888	568	0.9617
100	0.3387	585	0.9852
107	0.5017	620	0.9868
111	0.3638	647	0.9826
115	0.4223	675	0.9682
120	0.4727	699	0.9742
126	0.5069	717	0.9826
128	0.5989	734	0.9449
132	0.5604	753	0.9759
137	0.6397	771	0.9909
140	0.6690	783	0.9668
155	0.7108	985	0.9868
164	0.6277	988	0.9658
173	0.6691	993	0.9551
184	0.7050	996	0.9899
192	0.7451	1002	0.9883
204	0.7849	1006	0.9824
211	0.8177	1010	0.9812
218	0.9847	1013	0.9877
228	0.9641		

Na osnovu rezultata mjerenja prikazanih u Tabeli 7.7, autor je razvio analitički izraz koji prikazuje zavisnost faktora snage od različitih uslova rada:

$$\cos\varphi(G) = 0.1576 \ln(G) - 0.0063 \cos(G) - \frac{20.7703}{G}. \quad (72)$$

Na iste prikupljene eksperimentalne rezultate primijenjen je postupak modelovanja opisan u poglavlju 6.3.2 ovog master rada. Naime, primjenom nelinearnih regresionih metoda izvršeno je fitovanje eksponencijalnog modela, čime su određeni koeficijenti koji opisuju zavisnost THDi od iradijacije. U tom slučaju, jednačina (46) se izražava kao:

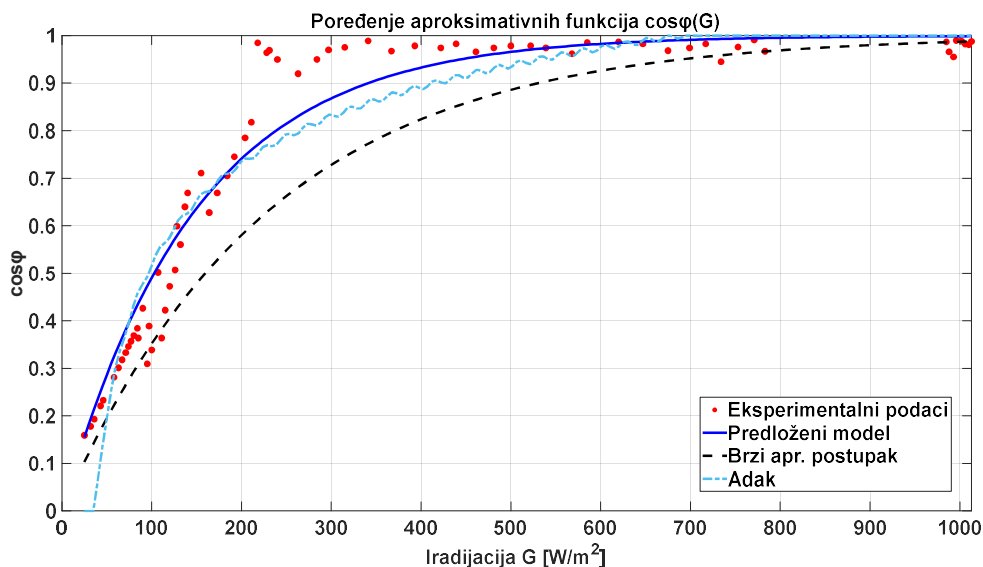
$$\cos\varphi(G) = 1 - e^{-0.006749G}. \quad (73)$$

U slučaju primjene brzog aproksimativnog postupka opisanog u poglavlju 6.3.2.1, parametri eksponencijalnog modela određuju se na sljedeći način:

$$a = \frac{\log(1 - \cos\varphi_{\max})}{G_{\max}}, \quad (74)$$

$$a = \frac{\log(1 - 0.98769)}{1013} = -0.0043. \quad (75)$$

Na slici 7.4. su prikazane stvarne vrijednosti faktora snage, kriva predstavljena u radu [63], kao i krive dobijene fitovanjem i brzim aproksimativnim postupkom u ovom master radu. Rezultati mjerenja pokazuju određena odstupanja i nisu savršeni, što odražava realne uslove rada solarne elektrane.



Slika 7.4. Prikaz stvarnih podataka, fitovanih funkcija i funkcije dobijene brzim aproksimativnim postupkom

Tabela 7.8. prikazuje faktore determinacije za svaku od funkcija.

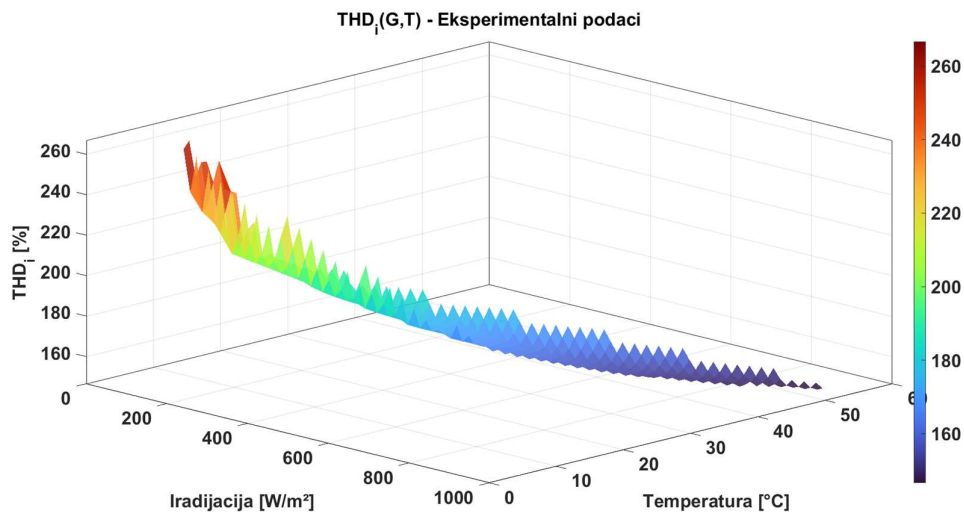
Tabela 7.8. Vrijednosti faktora determinacije

Funkcija	Faktor determinacije – R ²
Fitovana funkcija $\cos\varphi(G) = 1 - e^{-0.006749G}$	0.9423
Brzi aproksimativni postupak $\cos\varphi(G) = 1 - e^{-0.0043G}$	0.8493
Adak & Cangi $\cos\varphi(G) = 0.1576 \ln(G) - 0.0063 \cos(G) - \frac{20.7703}{G}$	0.8977

Dobijene vrijednosti faktora determinacije ukazuju na to da predloženi pristup modelovanja promjene $\cos\varphi$ u funkciji iradijacije, predstavljen u ovom radu, najpreciznije opisuje prikupljene mjerene podatke. Zavisnost razvijena u radu [63], takođe dobro opisuje prikupljene mjerene podatke, ali sa nešto manjim faktorom determinacije, te se može smatrati manje preciznom. Treba napomenuti da se u ovom slučaju mora uvesti ograničenje da $\cos\varphi$ ne prelazi 1. Najmanju tačnost pokazuje brzi aproksimativni postupak, koji iako na zadovoljavajućem nivou opisuje zavisnost faktora snage od atmosferskih uslova, daje veća odstupanja u odnosu na mjerenja.

7.4. Zavisnost THDi od iradijacije i temperature

Za potvrdu razvijenog matematičkog modela iz poglavlja 6.4, korišćeni su rezultati eksperimentalnih mjerenja iz rada [71], koji je za cilj imao razvoj analitičkog izraza koji opisuje zavisnost THDi od atmosferskih uslova, iradijacije i temperature. Eksperiment je realizovan u laboratoriji Elektrotehničkog odsijeka Visoke škole Univerziteta „Mardin Artuklu University“, smještenoj u jugoistočnom dijelu Turske, u gradu Mardin. Laboratorija posjeduje krovnu platformu za ispitivanja solarnih sistema, opremljenu fotonaponskim panelima, instrumentima za mjerenje električnih veličina, temperaturom i iradijacijom. Eksperimentalni sistem radi u ostrvskom režimu rada i sastoji se od tri solarna panela snage 315 W, montirana pod fiksnim uglom na krovu laboratorijske zgrade. Rezultati mjerenja prikazani su u Tabeli 7.9 i na slici 7.5.



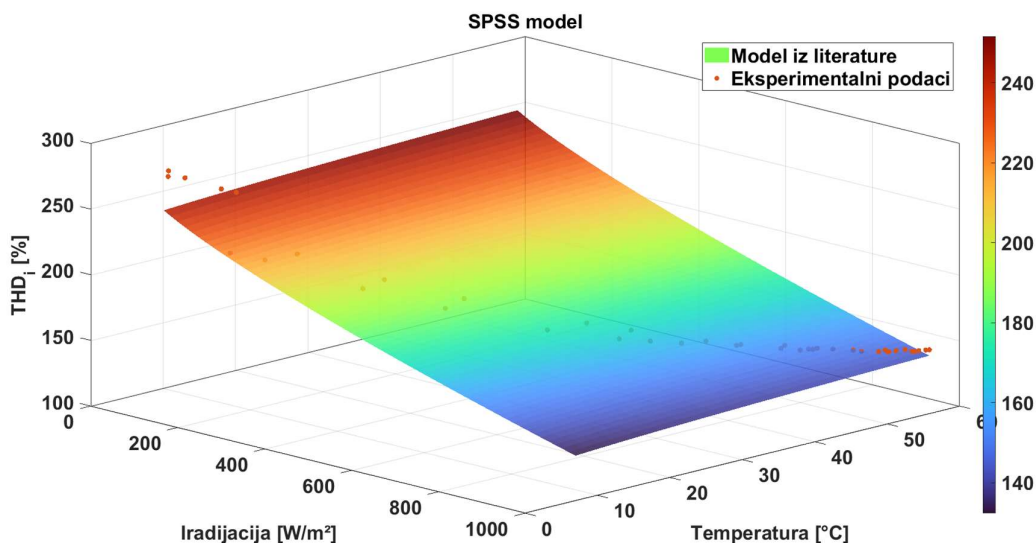
Slika 7.5. Prikaz eksperimentalnih podataka

Tabela 7.9. Rezultati eksperimentalnih mjerenja

Vrijeme	Iradijacija [W/m^2]	Temperatura [$^{\circ}\text{C}$]	THDi [%]
06:00	50	6.0	268.5
06:30	60	7.4	265.9
07:00	120	8.0	209.9
08:00	155	14.0	202.2
08:30	280	14.3	186.8
08:45	390	15.0	175.3
09:00	560	16.0	161.4
09:15	620	16.5	157.5
09:30	725	17.0	152.2
09:45	770	17.6	150.5
10:00	820	19.0	149.8
10:15	860	19.7	148.0
10:30	880	20.0	147.6
10:45	920	20.2	147.1
11:00	940	20.7	146.9
11:15	952	21.0	146.8
11:30	955	21.7	146.8
11:45	979	22.0	146.7
12:00	981	22.4	146.7
12:15	985	23.0	146.6
12:30	988	23.2	146.6
12:45	975	22.0	146.7
13:00	960	22.5	146.7
13:15	950	21.0	146.8
13:30	940	21.6	146.9
13:45	910	20.0	147.8
14:00	860	19.1	148.0
14:15	855	19.0	148.1
14:30	850	18.3	148.2
14:45	825	18.0	148.8
15:00	770	17.0	150.5
15:15	710	15.0	152.9
15:30	675	14.0	154.5
15:45	640	13.0	156.4
16:00	550	11.5	162.0
16:15	405	11.0	173.9
16:30	290	10.4	185.7
16:45	150	10.0	202.9
16:50	110	9.8	253.4
17:00	90	9.6	255.5
17:25	40	7.0	271.1

Za kvantitativno opisivanje zavisnosti THDi od atmosferskih uslova, ambijentalne temperature i iradijacije, autori su razvili analitičku funkciju korišćenjem statističke regresije u SPSS softveru (slika 7.6):

$$\text{THDi}(G, T) = 2.052T^{0.5} - 0.683G^{0.75} + 247.064. \quad (76)$$

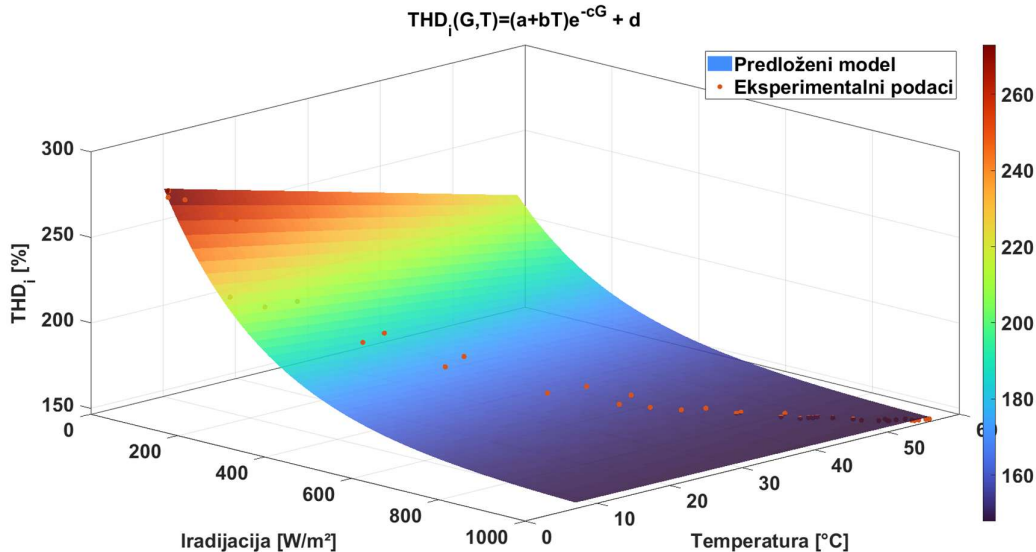


Slika 7.6. Prikaz fitovane površine dobijene korišćenem SPSS metoda

Na iste prikupljene eksperimentalne rezultate primijenjen je postupak modelovanja opisan u poglavlju 6.4.1 ovog master rada. Naime, primjenom nelinearnih regresionih metoda izvršeno je fitovanje modela, čime su određeni koeficijenti koji opisuju zavisnost THDi od iradijacije i temperature. U tom slučaju, jednačina (53) se izražava kao:

$$\text{THDi}(G, T) = (160.8117 - 1.3377T)e^{-0.00} + 146.8185. \quad (77)$$

Slika 7.7 prikazuje površinu dobijenu fitovanjem predloženog modela u master radu.



Slika 7.7. Prikaz predloženog modela

Rezultati pokazuju da predloženi pristup modelovanja promjene THDi u funkciji iradijacije i temperature, predstavljen u najpreciznije opisuje prikupljene mjerene podatke, sa faktorom determinacije 0.9728. Ova vrijednost ukazuje na vrlo dobro poklapanje između modela i mjerenih podataka, što potvrđuje pouzdanost razvijenog matematičkog izraza za predikciju THDi u različitim uslovima iradijacije i temperature. Za upoređivanje, korišćen je SPSS model iz rada [71], koji daje zadovoljavajuću predikciju THDi sa koeficijentom determinacije 0.8740. Iako i ovaj model pruža korisne informacije, njegov stepen poklapanja sa eksperimentalnim podacima je niži, što naglašava prednost predloženog modela razvijenog u okviru ovog master rada.

8. Zaključak

Savremeno društvo suočeno je sa kontinuiranim rastom potrošnje energije, uzrokovanim ubrzanim industrijskim razvojem, povećanjem broja stanovnika i sve većom prisutnošću tehnologije u svakodnevnom životu. Intenzivna upotreba fosilnih goriva dovela je do ozbiljnih ekoloških posljedica, što je pokrenulo globalnu tranziciju ka obnovljivim izvorima energije (OIE). Ključnu ulogu u ovom procesu imaju fotonaponski sistemi, koji omogućavaju direktnu konverziju sunčeve energije u električnu. Njihova široka primjena i razne mogućnosti integracije u elektroenergetski sistem, čine ih ključnim u procesu dekarbonizacije elektroenergetskog sektora. Međutim, ta integracija predstavlja i novi izazov, naročito u pogledu stabilnosti i kvaliteta električne energije.

Da bi solarna elektrana mogla biti povezana u mrežu, ona mora posjedovati inverter koji vrši pretvaranje električne energije. Rad invertora zavisi od uslova okoline, kao što su iradijacija i doba dana. Iradijacija predstavlja faktor koji se dinamički mijenja tokom dana, a te promjene ostavljaju uticaj na PF i THDi. Razumijevanje ovog uticaja je ključno za očuvanje kvaliteta električne energije, pogotovo u sistemima sa velikim udjelom OIE.

Predmet istraživanja ovog rada fokusirao se na analizu faktora snage (PF) i totalne harmonijske distorzije (THD) mrežno povezanog invertora. Cilj istraživanja ovog rada je bio da se kroz analizu uticaja iradijacije i doba dana, sagledaju efekti na THDi i PF, kao i da se matematički opiše njihova zavisnost.

Za potrebe istraživanja sprovedeno je simulaciono testiranje, uz korištenje Simulink "100-kW Grid-Connected PV Array" modela. Model omogućava detaljno ispitivanje ponašanja mrežno povezanog fotonaponskog sistema u različitim uslovima rada. Promjenom vrijednosti ulaznih parametara, inteziteta sunčevog zračenja i temperature modula, dobijeni su rezultati koji su omogućili sagledavanje međuzavisnosti između klimatskih uslova i kvaliteta električne energije koju proizvodi PV sistem. Dobijeni simulacioni rezultati ukazali su na to da porast iradijacije dovodi do smanjenja THDi i poboljšanja faktora snage, dok je uticaj temperature znatno manji i u većini slučajeva može biti zanemaren.

Na osnovu dobijenih podataka predloženi su empirijski izrazi koji matematički opisuju zavisnost THDi i PF od iradijacije i temperature. Ovi izrazi su omogućili kvantitativnu analizu i poređenje između eksperimentalnih i simulacionih rezultata, čime je potvrđena visoka korelacija između mjerenja i modela. Pored toga, razvijeni izrazi odlikuju se jednostavnom formom i malim brojem parametara, što ih čini praktičnim i pogodnim za brze proračune i preliminarne procjene kvaliteta električne energije u fotonaponskim sistemima. Uprkos svojoj jednostavnosti, ovi modeli pokazuju zadovoljavajuće preklapanje sa eksperimentalnim rezultatima, što potvrđuje njihovu primjenu u analitičkim i inženjerskim proračunima.

Primjenjivost predloženog pristupa za modelovanje provjerena je na tri različita primjera, odnosno na tri različita seta eksperimentalnih podataka. U prvom slučaju, mjerenja su sprovedena u laboratorijskim uslovima na prototipu mikromreže koja emulira rad DİEE. U drugom slučaju, set eksperimentalnih podataka dobijen je iz mjerenja na realnoj fotonaponskoj elektrani u Turskoj. Mjerenja su sprovedena tokom marta 2021. godine i obuhvatila su uticaj niskih nivoa iradijacije na PF i THDi. U trećem slučaju, mjerenja su sprovedena na mrežno povezanom fotonaponskom sistemu u jugoistočnom dijelu Turske, pri čemu su praćene promjene napona, struje, aktivne i reaktivne snage na tački zajedničkog priključenja između PV sistema i mreže. Za verifikaciju razvijenog matematičkog modela koji opisuje zavisnost THDi od iradijacije i temperature, korišćen je set eksperimentalnih podataka prikupljenih iz mjerenja sprovedenih u laboratoriji Elektrotehničkog odsjeka Visoke škole Univerziteta „Mardin Artuklu University“, smještenoj u jugoistočnom dijelu Turske, u gradu Mardin. U svim slučajevima, rezultati pokazuju dobra poklapanja između mjerenih i modelovanih vrijednosti dobijenih na osnovu predloženog modela zavisnosti faktora snage ($\cos \varphi$) i totalne harmonijske distorzije (THDi) od iradijacije. Pored toga, brzi aproksimativni postupci takođe pokazuju zadovoljavajuću tačnost. U poređenju sa rezultatima modelovanja predstavljenim u literaturi, predloženi pristupi pokazuju bolje poklapanje sa eksperimentalnim rezultatima, što potvrđuje njihovu pouzdanost i praktičnu primjenu u analizi kvaliteta električne energije PV sistema.

Rezultati ovog istraživanja su potvrdili postojanje jasne povezanosti između promjenljivih ulaznih parametara i kvaliteta električne energije u mrežno povezanom fotonaponskom sistemu. Time je dat značajan doprinos unapređenju razumijevanja ovih odnosa i efikasnijoj integraciji solarnih elektrana u savremene elektroenergetske mreže.

Ipak, i pored zadovoljavajućeg poklapanja eksperimentalnih i simulacionih rezultata, treba ukazati na potencijalna ograničenja razvijenih modela. Budući da su izrazi izvedeni na osnovu empirijskih podataka, njihova tačnost može biti ograničena na specifične tipove invertora i fotonaponskih modula, kao i na opseg uslova u kojima su merenja sprovedena. Takođe, nelinearne pojave i interakcije sa mrežom mogu uzrokovati odstupanja u rezultatima. Stoga je potrebno sprovesti dalja istraživanja u pravcu proširenja i verifikacije modela u realnim mrežnim uslovima, kako bi se obezbijedila šira primjenjivost, robusnost i pouzdanost u praksi.

U daljem istraživačkom radu preporučuje se proširenje i verifikacija razvijenih modela na različite tipove invertora. Pored toga, korisno bi bilo istražiti uticaj ostalih faktora na kvalitet električne energije, kao što su uticaj mreže i dinamički rad u hibridnim sistemima sa baterijama. Razvijeni model u ovome radu može da predstavlja polaznu osnovu za buduća istraživanja usmjerena na unapređenje filtracionih rješenja i razvoj naprednih algoritama kontrole invertora, koji bi automatski prilagođavali radne parametre u zavisnosti od trenutnih atmosferskih uslova, sa ciljem smanjenja THD-a i poboljšanja faktora snage.

Literatura

- [1] Arsić L, Vučinić I. Obnovljivi izvori energije: potencijali i trendovi u zemljama Evropske unije i Zapadnog Balkana. *Ecologica*. 2022;29(108):476-484. doi:10.18485/ecologica.2022.29.108.2. Dostupno na: https://www.researchgate.net/publication/366624680_Obnovljivi_izvori_energije_potencijali_i_trendovi_u_zemljama_Evropske_unije_i_Zapadnog_Balkana
- [2] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. *World Population Prospects 2022: Summary of Results*. New York, NY: United Nations; 2022. Dostupno na: https://www.un.org/development/desa/pd/sites/www.un.org.development.desa.pd/files/wpp_2022_summary_of_results.pdf
- [3] McCartney G. NextEra Energy expects 55% jump in global power demand over the next 20 years, CEO says. Reuters. 10. mart 2025. Dostupno na: <https://www.reuters.com/business/energy/ceraweek-nextera-energy-expects-55-jump-global-power-demand-over-next-20-years-2025-03-10/> Pristupljeno: 15. novembar 2025.
- [4] Gvero P, Vasković S, eds. Priručnik: Obnovljivi izvori energije i održivi razvoj lokalnih zajednica. Banja Luka, Istočno Sarajevo: Univerzitet u Banjoj Luci & Univerzitet u Istočnom Sarajevu; 2016. ISBN: 978-99938-39-65-1 Dostupno na: https://www.researchgate.net/publication/302588518_PRIRUCNIK_OBNOVLJIVI_IZVORI_ENERGIJE_I_ODRZIVI_RAZVOJ_LOKALNIH_ZAJEDNICA
- [5] MET Group. When will fossil fuels run out? 18. januar 2021. Dostupno na: <https://group.met.com/en/mind-the-fyouture/mindthefyouture/when-will-fossil-fuels-run-out/> Pristupljeno: 15. novembar 2025.
- [6] Babić IM. Modelovanje uticaja vremenskog profila solarnog zračenja na efekte rada fotonaponskih sistema u elektroenergetskom sistemu. [doktorska disertacija]. Beograd, Srbija: Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet; 2016. Dostupno na: https://www.etf.bg.ac.rs/uploads/files/javni_uvid/izvestaji/doktorske/2016/Iva_Babic_doktorska_disertacija.pdf
- [7] European Commission. *The European Green Deal: Striving to be the first climate-neutral continent*. Brussels; [n.d.]. Dostupno na: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en Pristupljeno: 15. novembar 2025.
- [8] Held A, Ragwitz M, Resch G, et al. Design Features of Support Schemes for Renewable Electricity. Ecofys; 2014. Dostupno na: <https://erranet.org/download/design-features-of-support-schemes-for-renewable-electricity/>
- [9] Proto D. Renewable Energy Communities as an Enabling Framework to Boost Flexibility and Promote the Energy Transition. *Energies*. 2022;15(23):8874. doi:10.3390/en15238874 Dostupno na: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/23/8874>
- [10] Cangi SA, Cangi H. The quality problems in low irradiance at grid-connected photovoltaic systems. Research Square. Objavljeno: 12. avgust 2022. Dostupno na: <https://www.researchsquare.com/article/rs-1924195/v1>

- [11] Du Y, Lu DD-C, James G, Cornforth DJ. Modeling and analysis of current harmonic distortion from grid-connected PV inverters under different operating conditions. *Solar Energy*. 2013;94:182-194. doi: 10.1016/j.solener.2013.05.010 Dostupno na: https://www.researchgate.net/publication/277539152_Modeling_and_analysis_of_current_harmonic_distortion_from_grid_connected_PV_inverters_under_different_operating_conditions/
- [12] Roy S, Dey A, Tiwari M, Barman M, Saha A. Characterizing Current THD's Dependency on Solar Irradiance and Supraharmonics Profiling for a Grid-Tied Photovoltaic Power Plant. *Sustainability*. 2023;15(2):1214. doi: 10.3390/su15021214 Dostupno na: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/2/1214>
- [13] Muda WM, Ahmad N. Analysis of total harmonic distortion in single-phase single-stage grid-connected photovoltaic system. *Int J Power Electron Drive Syst (IJPEDS)*. 2023;14:1-10. doi:10.11591/ijpeds.v14.i1.pp471-479 Dostupno na: https://www.researchgate.net/publication/368886683_Analysis_of_total_harmonic_distortion_in_single-phase_single-stage_grid-connected_photovoltaic_system
- [14] Jha K, Shaik AG. A comprehensive review of power quality mitigation in the scenario of solar PV integration into utility grid. *e-Prime – Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*. 2023;3:100103. doi:10.1016/j.prime.2022.100103. Dostupno na: https://www.researchgate.net/publication/369372600_A_comprehensive_review_of_power_quality_mitigation_in_the_scenario_of_solar_PV_integration_into_utility_grid
- [15] Ember. Global Electricity Trends. [Internet]. Dostupno na: <https://ember-energy.org/latest-insights/global-electricity-review-2024/global-electricity-trends/>
Pristupljeno: 15. novembar 2025.
- [16] Mit D. Jedan sat sunčeve svjetlosti može napajati Zemlju cijelu godinu. CEFOR. 13. oktobar 2024. [Internet]. Dostupno na: <https://cefor-see.com/2024/10/13/jedan-sat-sunceve-svjetlosti-moze-napajati-zemlju-cijelu-godinu/>
Pristupljeno: 15. novembar 2025.
- [17] Radičević B, Mikičić D, Vukić Đ. Energetski potencijal sunca u Srbiji i primena energije sunca u poljoprivredi. *Poljoprivredna tehnika*. 2009;34(4):53-62. ISSN: 0554-5587. Dostupno na: <https://aspace.agrif.bg.ac.rs/bitstream/id/801/1936.pdf>
- [18] Global Solar Atlas. [Internet]. Dostupno na: <https://globalsolaratlas.info/>
Pristupljeno: 15. novembar 2025.
- [19] Hodžić N. Solarna (Sunčeva) energija. SeminarSKI rad. Sarajevo, Bosna i Hercegovina: Univerzitet u Sarajevu, Elektrotehnički fakultet; decembar 2015. doi:10.13140/RG.2.1.2059.1767 Dostupno na: https://www.researchgate.net/publication/299368864_Solarna_energija
- [20] Đuričić Ž. Obnovljivi izvori energije: projektovanje fotonaponskih sistema. 2009. Dostupno na: <https://www.scribd.com/document/463650237/Projektovanje-PV-sistema-zadaci>
- [21] Masters GM. *Renewable and Efficient Electric Power Systems*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc.; 2004. ISBN: 0-471-28060-7.
- [22] Bojek P. Why is solar PV important? IEA. 3. februar 2025. [Internet]. Dostupno na: <https://www.iea.org/energy-system/renewables/solar-pv>
Pristupljeno: 15. novembar 2025.
- [23] IEA. Share of renewable electricity generation by technology, 2000-2030. 2024. [Internet]. Dostupno na: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/share-of-renewable-electricity-generation-by-technology-2000-2030>
Pristupljeno: 15. novembar 2025.

- [24] SolarPower Europe. New report: World installed 600 GW of solar in 2024, could be installing 1 TW per year by 2030. SolarPower Europe. 6. maj 2025. [Internet]. Dostupno na: <https://www.solarpowereurope.org/press-releases/new-report-world-installed-600-gw-of-solar-in-2024-could-be-installing-1-tw-per-year-by-2030?> Pristupljeno: 15. novembar 2025.
- [25] Spasić V. Montenegro's power consumption grows 25%. Balkan Green Energy News. 16. april 2025. [Internet]. Dostupno na: <https://balkangreenenergynews.com/montenegros-power-consumption-grows-25/> Pristupljeno: 15. novembar 2025.
- [26] Showdhan. A Breakdown of Global Electricity Demand in 2024. Voronoi. 17. april 2025. [Internet]. Dostupno na: <https://www.voronoioapp.com/energy/A-Breakdown-of-Global-Electricity-Demand-in-2024-4752> Pristupljeno: 15. novembar 2025.
- [27] Xindun Power Technology Co., Ltd. We need to understand the difference between off-grid, on-grid and hybrid inverters to select solar inverters suitable for different places. 2. decembar 2022. [Internet]. Dostupno na: <https://www.xindun-power.com/faq/difference-between-off-grid-on-grid-and-hybrid-inverter.html> Pristupljeno: 15. novembar 2025..
- [28] Intermountain Wind & Solar. How a Rooftop Solar Array Creates Electricity for Your Home. [Internet]. Dostupno na: <https://www.intermtwindandsolar.com/> Pristupljeno: 15. novembar 2025.
- [29] Spasić V. Puštena u rad prva solarna elektrana na zemlji u Crnoj Gori. Balkan Green Energy News. 21. decembar 2023. [Internet]. Dostupno na: <https://balkangreenenergynews.com/rs/pustena-u-rad-prva-solarna-elektrana-na-zemlji-u-crnoj-gori/> Pristupljeno: 15. novembar 2025.
- [30] Sahu AK, Yadav N, Sudhakar K. Floating photovoltaic power plant: A review. *Renew Sustain Energy Rev.* 2016;66:815–824. doi:10.1016/j.rser.2016.08.051. Dostupno na: <https://dacemirror.sci-hub.se/journal/article/2946050b98362df05c64916a9f640a86/sahu2016.pdf>
- [31] Ivanova T. North Rhine-Westphalia seeks legal reform to expand floating PV. *Renewables Now.* 27. maj 2025. [Internet]. Dostupno na: <https://renewablesnow.com/news/north-rhine-westphalia-seeks-legal-reform-to-expand-floating-pv-1275937/> Pristupljeno: 15. novembar 2025.
- [32] Hoymiles. Building-integrated photovoltaics: The A to Z of BIPV systems. 26. septembar 2026. [Internet]. Dostupno na: <https://www.hoymiles.com/solar-insider/building-integrated-photovoltaics-the-a-to-z-of-bipv-systems.html> Pristupljeno: 15. novembar 2025..
- [33] Jha RK, Shah BK, Patel A. Advanced control strategies for resilient voltage and frequency regulation in smart grids. *Journal of Electrical Engineering and Automation.* 2024;6(1):1–18. doi:10.36548/jeea.2024.1.001 Dostupno na: https://www.researchgate.net/publication/378658525_Advanced_Control_Strategies_for_Resilient_Voltage_and_Frequency_Regulation_in_Smart_Grids
- [34] Mansouri N, Lashab A, Sera D, Guerrero JM, Cherif A. Large Photovoltaic Power Plants Integration: A Review of Challenges and Solutions. *Energies.* 2019;12(19):3798. doi:10.3390/en12193798. Dostupno na: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/19/3798>
- [35] Garozzo D, Tina GM. Evaluation of the Effective Active Power Reserve for Fast Frequency Response of PV with BESS Inverters Considering Reactive Power Control. *Energies.* 2020;13(13):3437. doi: 10.3390/en13133437. Dostupno na: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/13/3437>

- [36] Bogetić M. Realizacija adaptivne virtuelne inercije EES-a upotrebom fuzzy logic kontrole za različite nivoe penetracije iz OIE. Master rad. Podgorica, Crna Gora: Univerzitet Crne Gore; 2024. Dostupno na:
<https://ucg.ac.me/radovi/13/Master%20rad%20MILENA%20BOGETIC.pdf>
- [37] IEEE. IEEE Standard 1547-2018: Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces. New York, NY: IEEE; 2018. p. 1-138. doi:10.1109/IEEESTD.2018.8332112. Dostupno na:
<https://ieeexplore.ieee.org/document/8332112>
- [38] IRENA. Future of Solar Photovoltaic: Deployment, Investment, Technology, Grid Integration and Socio-Economic Aspects. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency; novembar 2019. ISBN 978-92-9260-156-0. Dostupno na:
<https://www.irena.org/publications/2019/Nov/Future-of-Solar-Photovoltaic>
- [39] NREL. Life cycle greenhouse gas emissions from solar photovoltaics. 2013. Dostupno na:
<https://docs.nrel.gov/docs/fy13osti/56487.pdf>
- [40] McArdle P. U.S. electric power sector continues water efficiency gains. EIA. 14. jun 2023. [Internet]. Dostupno na: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=56820#>
Pristupljeno: 15. novembar 2025..
- [41] emtsolar. Solarni paneli u poljoprivredi: koegzistencija agrara i energije (2023). Solarno.net. 23. mart 2023. [Internet]. Dostupno na: <https://solarno.net/solarni-paneli-u-poljoprivredi-koegzistencija-agrara-i-energije-2023/>
Pristupljeno: 15. novembar 2025.
- [42] N.B. Solarni paneli i zaštita ptica: Kako umanjiti negativne efekte. Ecoportal.me. 11. maj 2023. [Internet]. Dostupno na: <https://www.ecoportal.me/solarni-paneli-i-zastita-ptica-kako-umanjiti-negativne-efekte/>
Pristupljeno: 15. novembar 2025.
- [43] IRENA & IEA-PVPS. End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency; 2016. ISBN 978-92-95111-99-8. Dostupno na:
https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_IEAPVPS_End-of-Life_Solar_PV_Panels_2016.pdf
- [44] Wesoff E. New startup aims to recycle 95% of high-value content from solar panels. Canary Media. 14. jun 2022. [Internet]. Dostupno na:
<https://www.canarymedia.com/articles/solar/new-startup-aims-to-recycle-95-of-high-value-content-from-solar-panels>
Pristupljeno: 15. novembar 2025..
- [45] European Union (EU). Waste from Electrical and Electronic Equipment (WEEE). European Commission. [Internet]. Dostupno na: https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/waste-electrical-and-electronic-equipment-weee_en
Pristupljeno: 15. novembar 2025..
- [46] Jomaux J. The rise of vertical solar. 8. april 2024. [Internet]. Dostupno na:
<https://gemenergyanalytics.substack.com/p/the-rise-of-vertical-solar>
Pristupljeno: 15. novembar 2025..
- [47] Jingsun. Poređenje troškova između solarnog sistema za proizvodnju energije i tradicionalne termalne proizvodnje. Jingsun-Power. 12. maj 2023. [Internet]. Dostupno na:
<https://ba.jingsun-power.com/info/cost-comparison-between-solar-power-generation-82139128.html>
Pristupljeno: 15. novembar 2025.

- [48] U.S. Energy Information Administration. Levelized Costs of New Generation Resources in the Annual Energy Outlook 2022. Washington, DC: U.S. Energy Information Administration; 2022. Dostupno na: https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/electricity_generation.pdf
- [49] CFI Team. Levelized Cost of Energy (LCOE). Corporate Finance Institute. [Internet]. Dostupno na: <https://corporatefinanceinstitute.com/resources/valuation/levelized-cost-of-energy-lcoe/>
Pristupljeno: 15. novembar 2025..
- [50] „pv magazine. Solar LCOE may decrease by up to 20% in Europe by 2030. 14. decembar 2023. [Internet]. Dostupno na: <https://www.pv-magazine.com/2023/12/14/solar-lcoe-may-decrease-by-up-to-20-in-europe-by-2030/>
Pristupljeno: 15. novembar 2025..
- [51] Pavlík M, Bereš M, Kurimský F. Analyzing the Impact of Volatile Electricity Prices on Solar Energy Capture Rates in Central Europe: A Comparative Study. Appl Sci. 2024;14(15):6396. doi: 10.3390/app14156396.
Dostupno na: <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/15/6396>
- [52] Stanković SR-M, Laković RM. Elektronika. Podgorica: Elektrotehnički fakultet, Univerzitet Crne Gore; 1999.
- [53] Baškarad T, Ilić S, Kovačević I. Modeliranje fotonaponske elektrane. CIGRE. 2018. Dostupno na: https://www.researchgate.net/publication/329034189_MODELIRANJE_FOTONAPONSK_E_ELEKTRANE
- [54] Teodorescu R, Liserre M, Rodríguez P. Grid converters for photovoltaic and wind power systems. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd.; 2011. ISBN: 978-0-470-05751-3.
- [55] Hart DW. Power Electronics. New York, NY: McGraw-Hill Education; 2010. ISBN: 978-0-07-338067-4
- [56] Srdić S, Radaković Z, Đorđević N. Izbor metode za praćenje tačke maksimalne snage fotonaponskih panela. Zbornik Međunarodne konferencije o obnovljivim izvorima električne energije – MKOIEE. 2018;2(1):1-7. Dostupno na: <https://izdanja.smeits.rs/index.php/mkoiee/article/download/3421/3547/>
- [57] Filipović M. Uticaj obnovljivih izvora na kvalitet električne energije. [diplomski rad]. Beograd: Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet; septembar 2011. Dostupno na: <https://www.scribd.com/document/434063646/DIPLOMSKI-RAD>
- [58] Vujošević I. Eksploatacija i planiranje elektroenergetskih sistema. Podgorica: Elektrotehnički fakultet; 2005. [Predavanja].
- [59] Katić V, Tokić A, Konjić T. Kvalitet električne energije. Novi Sad: CEFES, Fakultet tehničkih nauka; 2007. Dostupno na: <https://www.scribd.com/document/221733853/V-katic-a-tokic-T-konjic-Kvalitet-Elek-Energ-Skripta-2007>
- [60] Čalasan M. Kompenzacija reaktivne energije u elektroenergetskim sistemima. Podgorica: Elektrotehnički fakultet; 2021. [Predavanja].
- [61] Harris M. Harmonics: What are They, and Why Do I Care? Power Quality Components. [Internet]. Dostupno na: <https://pqcomponents.com/harmonics-what-are-they-and-why-do-i-care/>
Pristupljeno: 15. novembar 2025..
- [62] Matre M. Harmonics in Photovoltaic Inverters & Mitigation Techniques. decembar 2020. Dostupno na: <https://www.sterlingandwilsonre.com/images/knowledge-corner/pdfs/Harmonics%20in%20Photovoltaic%20Inverters%20%26%20Mitigation%20Techniques.pdf>

- [63] Adak S. Power Factor Analysis of Grid-Connected Solar Inverter under Different Irradiance Levels. *Energies*. 2024;17(15):3632. doi:10.3390/en17153632. Dostupno na: <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/15/3632>
- [64] Seifi K, Moallem M. Synchronization and Control of a Single-Phase Grid-Tied Inverter under Harmonic Distortion. *Electronics*. 2023;12(4):860. doi:10.3390/electronics12040860. Dostupno na: <https://www.mdpi.com/2079-9292/12/4/860>
- [65] Eltamaly AM, Almutairi ZA. Synergistic Coordination Between PWM Inverters and DC-DC Converters for Power Quality Improvement of Three-Phase Grid-Connected PV Systems. *Sustainability*. 2025;17(8):3748. doi:10.3390/su17083748. Dostupno na: <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/8/3748>
- [66] H. Rahimi Mirazizi, Shafiyi MA. A comprehensive analysis of partial shading effect on output parameters of a grid-connected PV system. *Int J Electr Comput Eng (IJECE)*. 2018;8(2):749-762. doi:10.11591/ijece.v8i2.pp749-762. Dostupno na: <https://ijece.iaescore.com/index.php/IJECE/article/view/9331>
- [67] CENELEC. EN 50549-1:2019 – Requirements for generating plants connected to the LV distribution network – Part 1: Connection to a LV distribution network. Brussels: CENELEC; 2019.
- [68] IEEE. IEEE Std 519-2014: Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. New York, NY, USA: IEEE; 2014. ISBN 978-0-7381-9005-1.
- [69] MathWorks T. Detailed Model of a 100-kW Grid-Connected PV Array. The MathWorks, Inc. [Internet]. Dostupno na: <https://www.mathworks.com/help/sps/ug/detailed-model-of-a-100-kw-grid-connected-pv-array.html>. Pristupljeno: 15. novembar 2025.
- [70] Dimitrijević M, Petronijević M, Klimenta D. Evaluation of Photovoltaic Inverters According to Output Current Distortion in a Steady-State and Maximum Power Point Tracking. *Appl Sci*. 2025;15(3):1110. doi:10.3390/app15031110. Dostupno na: <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/3/1110>
- [71] Adak S, Cangi H. Developed analytical expression for current harmonic distortion of the PV system's inverter in relation to the solar irradiance and temperature. *Electrical Engineering*. 2021;103:697-704. doi: 10.1007/s00202-020-01110-7. Dostupno na: https://www.researchgate.net/publication/346028467_Developed_analytical_expression_for_current_harmonic_distortion_of_the_PV_system's_inverter_in_relation_to_the_solar_irradiance_and_temperature

Izjava o istovjetnosti štampane i elektronske verzije master rada

Ime i prezime autora: Filip Tomović

Broj indeksa/upisa: 24/23

Studijski program: Elektroenergetski sistemi Naslov rada: „Analiza faktora snage i totalne harmonijske distorzije mrežno povezanog solarnog invertora

Mentor: Prof. Dr. Martin Čalasan

Potpisani/a Filip Tomović

Izjavljujem

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

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

U Podgorici, 17. novembra 2025. godine

Potpis magistranda



IZJAVA O KORIŠĆENJU

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

"Analiza faktora snage i totalne harmonijske distorzije mrežno povezanog solarnog invertora"

koji je moje autorsko djelo.

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

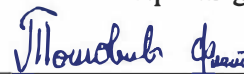
Moj master rad pohranjen u Digitalnom arhivu Univerziteta Crne Gore mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučio/la.

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

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

U Podgorici, 17. novembra 2025. godine

Potpis magistranda



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

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