



**UNIVERZITET CRNE GORE  
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET**

**Srđan Todorović**

**NAPREDNA ANALIZA I OPTIMIZACIJA  
ALGORITAMA ZA PRAĆENJE TAČKE  
MAKSIMALNE SNAGE FOTONAPONSKIH SISTEMA  
PRIMJENOM FUZZY LOGIKE**

**-MASTER RAD-**

**Podgorica, 2025.**

## **INFORMACIJE O KANDIDATU**

Ime i prezime: Srđan Todorović

Datum i mjesto rođenja: 28. 6. 2000. Podgorica, Crna Gora.

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

## **INFORMACIJE O MASTER RADU**

Naziv master studijskog programa: Automatika i industrijska elektrotehnika

Naslov rada: Napredna analiza i optimizacija algoritama za praćenje tačke maksimalne snage foto-naponskih sistema primjenom fuzzy logike

Fakultet: Elektrotehnički fakultet, Univerzitet Crne Gore

## **OCJENA I ODBRANA MASTER RADA**

Datum prijave master rada: 14. 4. 2025.

Datum sjednice Vijeća Univerzitetske jedinice na kojoj je prihvaćena tema: 16. 6. 2025.

Mentor: Prof. dr Martin Čalasan

Komisija za ocjenu i odbranu rada: Prof. dr Milovan Radulović  
Prof. dr Martin Čalasan  
Prof. dr Žarko Zečević

Datum odbrane: 5. 11. 2025.

Datum promocije:

## Izjava o autorstvu

Potpisani-a Srđan Todorović

Broj indeksa/upisa 2/23

### Izjavljujem

da je master rad pod nazivom

**" Napredna analiza i optimizacija algoritama za praćenje tačke maksimalne snage fotonaponskih sistema primjenom fuzzy logike "**

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

U Podgorici, 3.9.2025. godine

Potpis magistranda



---

# Predgovor

Obnovljivi izvori energije sve više oblikuju pravce razvoja modernih društava i postaju oslonac buduće energetske održivosti. Među njima, solarna energija zauzima posebno mjesto, ne samo zbog svoje dostupnosti već i zbog stalne potrebe da se pronađu načini za njeno što efikasnije korišćenje. Upravo ta težnja ka unapređenju efikasnosti fotonaponskih sistema bila je glavni povod za istraživanje koje je predstavljeno u ovom master radu.

Posebnu pažnju u okviru ovog istraživanja zauzima problem praćenja tačke maksimalne snage, jer on objedinjuje teoriju i praksu, nudeći prostor za primjenu metoda koje mogu poboljšati rad fotonaponskih pretvarača u realnim uslovima. U tom kontekstu, fazi logika (eng. *fuzzy logic*) pokazala se kao interesantan pristup, jer omogućava jednostavnije opisivanje složenih pojava i pruža mogućnost stabilnijeg rada sistema pri naglim promjenama uslova osvjetljenja i temperature. Istraživanje predstavljeno u ovom radu usmjereno je na razmatranje upravo tih potencijala i mogućnosti primjene fazi logike u optimizaciji algoritama praćenja tačke maksimalne snage.

Najiskrenija zahvalnost pripada mentoru, čija su podrška, strpljenje i nesebično dijeljenje znanja bili presudni u ovom radu, ali i u mom akademskom sazrijevanju. Veliku zahvalnost dugujem i profesorima Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta Crne Gore, koji su kroz predavanja, savjete i podsticaje pružili znanje i temelje koji su bili neophodni za nastanak ovog rada. Na kraju, posebna riječ zahvalnosti ide mojoj porodici i prijateljima, čija su podrška, razumijevanje i ohrabrenje bili neizostavan oslonac i najvažniji podstrek tokom svih godina studija i istraživanja.

# Sažetak

Fotonaponski (PV) sistemi predstavljaju jedan od ključnih izvora obnovljive energije, a njihova efikasnost u velikoj mjeri zavisi od sposobnosti sistema da u realnom vremenu prati tačku maksimalne snage (MPPT). Iako konvencionalni MPPT algoritmi, poput metode poremećaja i posmatranja (P&O) i metode inkrementalne provodljivosti (IC), omogućavaju jednostavnu implementaciju, oni pokazuju značajna ograničenja pri naglim promjenama osvijetljenosti i temperature, što može dovesti do smanjenja proizvodnje energije. Motiv za ovo istraživanje proističe iz potrebe da se prevaziđu ograničenja postojećih metoda i unaprijedi efikasnost PV sistema primjenom naprednijih upravljačkih tehnika.

U ovom radu analizirani su postojeći MPPT algoritmi i razvijen je algoritam zasnovan na fazi logici, koji omogućava dinamičko praćenje tačke maksimalne snage bez potrebe za detaljnim matematičkim modelom sistema. Fazi kontroler koristi grešku i promjenu greške kao ulazne varijable, dok izlaz predstavlja promjenu faktora ispunjenosti PWM signala, kojom se vrši korekcija radne tačke sistema. Algoritam je testiran kroz simulacije, a rezultati su upoređeni sa performansama konvencionalnih MPPT metoda.

Rezultati simulacija pokazuju da predloženi fazi MPPT algoritam omogućava stabilnije praćenje tačke maksimalne snage, uz smanjene oscilacije i poboljšanu efikasnost PV sistema u odnosu na klasične pristupe. Ovaj pristup ima značajan potencijal za primjenu u savremenim solarnim instalacijama i pametnim energetske mrežama.

**Ključne riječi:** Obnovljiva energija – Fotonaponski sistemi – MPPT algoritam – Fazi logika – Praćenje tačke maksimalne snage

# Abstract

Photovoltaic (PV) systems are one of the key sources of renewable energy, and their efficiency largely depends on the system's ability to track the maximum power point (MPPT) in real time. Although conventional MPPT algorithms such as Perturb and Observe (P&O) and Incremental Conductance (IC) offer simple implementation, they show significant limitations under sudden changes in irradiance and temperature, which can result in reduced energy production. The motivation for this research arises from the need to overcome the limitations of existing methods and improve the efficiency of PV systems through the application of advanced control techniques.

This thesis analyzes existing MPPT algorithms and develops a fuzzy logic-based algorithm that enables dynamic tracking of the maximum power point without the need for a detailed mathematical model of the system. The fuzzy controller uses the error and the change of error as input variables, while the output represents the change of the PWM duty cycle, which is used to adjust the system's operating point. The algorithm was tested through simulations, and the results were compared with the performance of conventional MPPT methods.

The simulation results show that the proposed fuzzy MPPT algorithm enables more stable tracking of the maximum power point, with reduced oscillations and improved efficiency of the PV system compared to conventional approaches. This approach has significant potential for application in modern solar installations and smart energy grids.

**Keywords:** Renewable energy – Photovoltaic systems – MPPT algorithm – Fuzzy logic – Maximum power point tracking

# Sadržaj

<b>Predgovor</b>	<b>i</b>
<b>Sažetak</b>	<b>ii</b>
<b>Abstract</b>	<b>iii</b>
<b>Lista skraćenica</b>	<b>vi</b>
<b>Spisak slika</b>	<b>viii</b>
<b>Spisak tabela</b>	<b>xi</b>
<b>Uvod</b>	<b>1</b>
<b>1 Solarna energija i fotonaponski sistemi</b>	<b>4</b>
1.1 Solarna energija kao obnovljivi izvor . . . . .	4
1.1.1 Karakteristike solarne energije . . . . .	4
1.1.2 Fotonaponske tehnologije i trendovi razvoja . . . . .	5
1.1.3 Ograničenja i izazovi u eksploataciji . . . . .	6
1.1.4 Solarna energija u Crnoj Gori . . . . .	6
1.2 Karakteristike solarne ćelije . . . . .	7
1.2.1 P-N spoj . . . . .	7
1.2.2 Struktura solarne ćelije . . . . .	12
1.3 Modelovanje solarne ćelije . . . . .	13
1.3.1 Jednodiodni model solarne ćelije . . . . .	13
1.3.2 Faktor popunjenosti i efikasnost solarne ćelije . . . . .	21
1.3.3 Povezivanje solarnih ćelija: formiranje modula i panela . . . . .	23
1.3.4 Dvodiodni model solarne ćelije . . . . .	27
1.4 Uticaj iradijanse i temperature na solarni panel . . . . .	29
1.4.1 Uticaj iradijanse . . . . .	29
1.4.2 Uticaj temperature . . . . .	30

<b>2</b>	<b>Klasični pristupi praćenja tačke maksimalne snage (MPPT metode)</b>	<b>32</b>
2.1	Princip rada MPPT sistema sa DC-DC konvertorom . . . . .	32
2.2	Klasifikacija i pregled MPPT algoritama . . . . .	34
2.3	Metoda pomjeraja i posmatranja (eng. <i>Perturb and Observe</i> – P&O) . . .	35
2.4	Metoda inkrementalne provodljivosti (eng. <i>Incremental Conductance</i> – IC) . . .	38
2.5	Metoda konstantne struje (eng. <i>Constant Current</i> – CC) . . . . .	40
2.6	Metoda konstantnog napona (eng. <i>Constant Voltage</i> – CV) . . . . .	41
<b>3</b>	<b>MPPT algoritmi zasnovani na fuzzy logici</b>	<b>42</b>
3.1	Uvod u fazi logiku . . . . .	42
3.2	Teorijski principi fazi logike . . . . .	43
3.2.1	Fazi skupovi i jezičke varijable . . . . .	44
3.2.2	Fazi operatori i pravila . . . . .	47
3.2.3	Osnovne komponente fazi sistema . . . . .	48
3.3	Primjena fazi logike u upravljanju fotonaponskim sistemima . . . . .	51
3.3.1	Fazi upravljanje fotonaponskim sistemima . . . . .	51
3.3.2	Napredni fazi pristupi u MPPT algoritmima . . . . .	51
3.3.3	Dizajn fazi MPPT kontrolera . . . . .	52
<b>4</b>	<b>Numerički rezultati</b>	<b>58</b>
4.1	Poređenje P&O i fazi MPPT algoritma . . . . .	59
4.2	Poređenje IC i fazi MPPT algoritma . . . . .	62
4.3	Poređenje fazi algoritma sa 9 pravila i fazi algoritma sa 25 pravila . . . .	65
	<b>Zaključak</b>	<b>67</b>
	<b>Bibliografija</b>	<b>68</b>
	<b>Prilog</b>	<b>74</b>

# Lista skraćenica

- RES** (eng. *Renewable Energy Sources* – obnovljivi izvori energije)
- PV** (eng. *Photovoltaic* – fotonaponski)
- BIPV** (eng. *Building-Integrated Photovoltaics* – fotonaponski sistemi integrisani u objektima)
- PERC** (eng. *Passivated Emitter and Rear Cell* – ćelije sa pasivizovanim emiterom i zadnjom kontakt površinom)
- MPP** (eng. *Maximum Power Point* – tačka maksimalne snage)
- MPPT** (eng. *Maximum Power Point Tracking* – praćenje tačke maksimalne snage)
- P&O** (eng. *Perturb and Observe* – metoda pomjeranja i posmatranja)
- IC** (eng. *Incremental Conductance* – metoda inkrementalne provodljivosti)
- ANN** (eng. *Artificial Neural Networks* – vještačke neuronske mreže)
- NEKP** (eng. *National Energy and Climate Plan* – Nacionalni energetska i klimatski plan)
- EPCG** (Elektroprivreda Crne Gore)
- PWM** (eng. *Pulse Width Modulation* – Modulacija širine impulsa)
- FF** (eng. *Filling Factor* – Faktor popunjenosti)
- ANFIS** (eng. *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System* – Adaptivni neuro-fazi inferencijski sistem)
- GA** (eng. *Genetic Algorithm* – Genetski algoritam)
- CC** (eng. *Constant Current* – Metoda konstantne struje)
- CV** (eng. *Constant Voltage* – Metoda konstantnog napona)
- MOM** (eng. *Mean of Maximum* – Metod srednje vrijednosti maksimuma)
- BOA** (eng. *Bi-sector of Area* – Metod bisekcije površine)

**PSO** (eng. *Particle Swarm Optimization* – Optimizacija rojem čestica)

**COG** (eng. *Center of Gravity* – Metod centra gravitacije)

# Spisak slika

1.1	Instalirani kapacitet solarne fotonaponske energije u svijetu i Evropi u periodu od 1970. do 2023. godine. . . . .	5
1.2	Grafički prikaz atoma silicijuma . . . . .	8
1.3	Grafički prikaz nastanka šupljine i rekombinacije . . . . .	9
1.4	Grafički prikaz popunjavanja i pomjeraja šupljine . . . . .	9
1.5	Akceptorsko dopiranje silicijuma – formiranje P-tip materijala . . . . .	10
1.6	Donorsko dopiranje silicijuma – formiranje N-tip materijala . . . . .	10
1.7	PN spoj . . . . .	11
1.8	Dioda . . . . .	12
1.9	Ilustracija fotonaponskog efekta . . . . .	13
1.10	Idealni jednodiodni model solarne ćelije . . . . .	13
1.11	Karakteristični parametri solarne ćelije . . . . .	15
1.12	I–V karakteristika solarne ćelije . . . . .	15
1.13	Prikaz serijski povezanih solarnih ćelija sa opterećenjem, pri čemu jedna ćelija ne generiše struju zbog zasjenjenja ( $I = 0$ ), dok druga ostaje osvijetljena . . . . .	16
1.14	Jednodiodni model solarne ćelije sa dodatom paralelnom otpornošću . . . . .	17
1.15	I-V karakteristika solarne ćelije sa dodatim paralelnim otporom . . . . .	18
1.16	Jednodiodni model solarne ćelija sa dodatom serijskom otpornošću . . . . .	18
1.17	I-V karakteristika solarne ćelije sa dodatim serijskim otporom . . . . .	19
1.18	Jednodiodni model solarne ćelije sa serijskom i paralelnom otpornošću . . . . .	19
1.19	I-V karakteristika solarne ćelije sa dodatim serijskim i paralelnim otporom . . . . .	21
1.20	I–V karakteristika solarne ćelije sa označenim tačkama $I_{sc}$ , $U_{oc}$ i MPP . . . . .	22
1.21	P-V karakteristika solarne ćelije sa označenom tačkom maksimalne snage (MPP) . . . . .	23
1.22	Solarna ćelija, modul i panel . . . . .	24
1.23	Povećanje izlaznog napona pri serijskom spoju PV modula . . . . .	25
1.24	Povećanje izlazne struje pri paralelnom spoju PV modula . . . . .	25
1.25	Kombinovane konfiguracije povezivanja PV modula . . . . .	26
1.26	I–V karakteristike za dvije topologije kombinovanog povezivanja PV modula . . . . .	27

1.27	Električni ekvivalent dvodiodnog modela solarne ćelije . . . . .	28
1.28	I-V karakteristike za različite vrijednosti iradijanse pri konstantnoj temperaturi . . . . .	30
1.29	P-V karakteristike za različite vrijednosti temperature pri konstantnoj iradijansi . . . . .	30
1.30	I-V karakteristike za različite vrijednosti temperature pri konstantnoj iradijansi . . . . .	31
1.31	P-V karakteristike za različite vrijednosti iradijanse pri konstantnoj temperaturi . . . . .	31
2.1	Blok-šema PV sistema . . . . .	33
2.2	Šematski prikaz PV sistema sa Boost pretvaračem . . . . .	33
2.3	Blok dijagram P&O algoritma za praćenje tačke maksimalne snage. . . . .	36
2.4	Ilustracija klizanja radne tačke kod P&O algoritma. . . . .	37
2.5	Prikaz kriterijuma metode inkrementalne konduktanse na P–V karakteristici . . . . .	38
2.6	Blok dijagram metode inkrementalne konduktanse . . . . .	40
3.1	Funkcije pripadnosti za temperaturu: hladno, prijatno i toplo . . . . .	43
3.2	Trougaona funkcija pripadnosti . . . . .	44
3.3	Trapezoidna funkcija pripadnosti . . . . .	45
3.4	Gausova funkcija pripadnosti . . . . .	45
3.5	Sigmoidna funkcija pripadnosti . . . . .	46
3.6	Blok dijagram osnovnih komponenti fazi sistema . . . . .	48
3.7	Blok dijagram fazi MPPT kontrolera sa označenim ulaznim i izlaznim varijablama . . . . .	53
3.8	Funkcije pripadnosti ulazne varijable $E$ . . . . .	55
3.9	Funkcije pripadnosti ulazne varijable $CE$ . . . . .	55
3.10	Funkcije pripadnosti izlazne varijable $\Delta D$ . . . . .	56
4.1	Dinamičko poređenje izlazne snage $P_{pv}$ – P&O i fazi algoritam sa 9 pravila . . . . .	59
4.2	Uveličan prikaz stacionarnog režima izlazne snage – P&O i fazi algoritam (9 pravila) . . . . .	60
4.3	Dinamičko poređenje izlazne snage $P_{pv}$ – P&O i fazi algoritam sa 25 pravila . . . . .	60
4.4	Uveličan prikaz stacionarnog režima izlazne snage – P&O i fazi algoritam (25 pravila) . . . . .	61
4.5	Poređenje napona panela $V_{pv}$ – P&O i fazi algoritam sa 9 pravila . . . . .	61
4.6	Poređenje napona panela $V_{pv}$ – P&O i fazi algoritam sa 25 pravila . . . . .	62
4.7	Uporedni prikaz izlazne snage $P_{pv}$ – IC i fazi algoritam sa 9 pravila . . . . .	62
4.8	Detaljan prikaz stacionarnog režima izlazne snage — IC i fazi (9 pravila) . . . . .	63
4.9	Uporedni prikaz izlazne snage $P_{pv}$ za IC i fazi algoritam sa 25 pravila . . . . .	63
4.10	Detaljan prikaz stacionarnog režima izlazne snage – IC i fazi (25 pravila) . . . . .	64

4.11	Uporedni prikaz napona panela $V_{pv}$ – IC i fazi algoritam sa 9 pravila . . .	64
4.12	Uporedni prikaz napona panela $V_{pv}$ – IC i fazi algoritam sa 25 pravila . .	65
4.13	Izlazna snaga $P_{pv}$ pri upotrebi fazi algoritama sa 9 i 25 pravila . . . . .	65
4.14	Detaljan prikaz stacionarnog režima izlazne snage – fazi 9 i fazi 25 . . . .	66
4.15	Promjena napona panela $V_{pv}$ za fazi algoritme sa 9 i 25 pravila . . . . .	66
5	Simulink model PV sistema sa MPPT regulatorom. . . . .	74

# Spisak tabela

2.1	Logika odlučivanja P&O algoritma . . . . .	37
3.1	Baza pravila fazi MPPT kontrolera – tri funkcije pripadnosti . . . . .	57
3.2	Baza pravila fazi MPPT kontrolera – pet funkcija pripadnosti . . . . .	57
4.1	Karakteristike PV modula Advance Power AP1-P215 . . . . .	58
4.2	Vrijednosti iradijanse i temperature korišćene u simulacijama . . . . .	59

# Uvod

U današnjem društvu energetska pitanja zauzimaju centralnu poziciju u gotovo svim aspektima društvenog, industrijskog i tehnološkog razvoja. Neprekidan porast potrošnje energije prvenstveno je uslovljen rastom populacije, intenzivnom urbanizacijom i ubrzanim tehnološkim napretkom [1]. Ipak, ovakav trend nosi niz izazova, naročito u pogledu zaštite životne sredine, klimatskih promjena i dugoročne održivosti prirodnih resursa.

Veliki dio svjetskih energetske potreba i dalje se zadovoljava korišćenjem neobnovljivih izvora energije, među kojima dominiraju ugljen, nafta i prirodni gas. Iako ovi izvori omogućavaju stabilno i kontinuirano snabdijevanje energijom, njihova eksploatacija ima višestruke negativne posljedice – od iscrpljivanja ograničenih resursa i nestabilnosti tržišta do emisije gasova sa efektom staklene bašte, što direktno doprinosi globalnom zagrijavanju i degradaciji životne sredine [1, 2]. Osim toga, geopolitičke zavisnosti vezane za fosilna goriva dodatno komplikuju pitanja energetske sigurnosti i dostupnosti [3].

U tom kontekstu, prelazak na održivije energetske modele postaje neophodan. Obnovljivi izvori energije (eng. *Renewable Energy Sources* – RES), kao što su solarna, vjetrova, hidroenergija, biomasa i geotermalna energija, nude dugoročno rješenje koje može zadovoljiti energetske potrebe savremenog društva bez ugrožavanja životne sredine. Oni ne proizvode štetne emisije, čime doprinose dugoročnoj stabilnosti energetske sistema [1, 4]. Posebno mjesto među njima zauzima solarna energija, koja se izdvaja zahvaljujući lakoj dostupnosti, tihoj i čistoj eksploataciji, te mogućnosti decentralizovane proizvodnje električne energije [2]. Direktna konverzija sunčevog zračenja u električnu energiju, bez upotrebe mehaničkih dijelova, čini fotonaponske (eng. *Photovoltaic* – PV) sisteme tehnički jednostavnim, ali pouzdanim rješenjem za širok spektar primjena [5, 6].

Osnovni elementi svakog PV sistema su solarne ćelije koje funkcionišu na principu fotoelektričnog efekta, pri čemu se sunčeva svjetlost direktno pretvara u električnu energiju. Njihova efikasnost zavisi od više faktora, uključujući temperaturu, nivo osunčanosti i osobine upotrijebljenih materijala. Savremene komercijalne solarne ćelije ostvaruju efikasnost u rasponu od 15 do 22%, dok eksperimentalne višeslojne ćelije u laboratorijskim uslovima mogu premašiti i 40% [7, 8]. Uz ove rezultate, kontinuirani napredak u dizajnu ćelija – uključujući tehnologije sa pasivizovanim emiterom i zadnjom kontakt površinom (eng. *Passivated Emitter and Rear Cell* – PERC), tandem strukture i heterostrukturne materijale – značajno doprinosi povećanju efikasnosti, pouzdanosti i ukupnih performansi PV modula [5, 8].

---

Prema izvještaju Međunarodne agencije za energiju (eng. *International Energy Agency* – IEA) iz 2023. godine, ukupna instalirana snaga PV sistema u svijetu premašila je 1200 GW uz prosječan godišnji rast iznad 20% [2].

Ipak, PV sistemi se suočavaju sa određenim tehničkim ograničenjima. Proizvedena snaga direktno zavisi od spoljašnjih faktora kao što su osunčanost, temperatura, zaprljanost panela, ugao nagiba i spektralni sastav sunčevog zračenja. Uz to, nelinearni odnos između napona i struje (I–V karakteristike) dovodi do postojanja jedinstvene tačke maksimalne snage (eng. *Maximum Power Point* – MPP), koju je neophodno precizno identifikovati i održavati tokom rada sistema.

U tu svrhu razvijeni su algoritmi za praćenje tačke maksimalne snage (eng. *Maximum Power Point Tracking* – MPPT), koji predstavljaju sastavni dio svakog savremenog PV sistema. MPPT omogućava kontinuiranu prilagodbu radnih parametara sa ciljem postizanja maksimalne izlazne snage. Kvalitetan MPPT algoritam povećava stepen iskorišćenja sunčeve energije, smanjuje energetske gubitke i doprinosi stabilnijem radu sistema [9, 10].

MPPT metode se najčešće klasifikuju na one koje ne koriste model sistema (model-free) i one koje se oslanjaju na poznate karakteristike modula (model-based) [10, 11]. Među model-free pristupima najzastupljenije su metoda pomjeranja i posmatranja (eng. *Perturb and Observe* – P&O) i metoda inkrementalne provodljivosti (eng. *Incremental Conductance* – IC). Iako jednostavne za implementaciju, ove metode su sklone oscilacijama i greškama u promjenljivim uslovima rada. S druge strane, model-based algoritmi koriste dodatne informacije o sistemu za preciznije određivanje MPP, ali zahtijevaju veću računarsku složenost i prethodno poznavanje parametara sistema.

Posebnu pažnju unutar model-based pristupa privukle su metode zasnovane na soft-computing tehnikama, kao što su vještačke neuronske mreže (eng. *Artificial Neural Networks* – ANN), genetski algoritmi i posebno fazi logika. Ove metode se odlikuju sposobnošću obrade nelinearnih i neizvjesnih podataka, čime se povećava adaptivnost algoritama i smanjuje zavisnost od preciznog matematičkog modela sistema [12, 13].

Fazi logika (eng. *Fuzzy logic*) predstavlja jednu od najčešće primjenjivanih tehnika u okviru soft-computing kada je riječ o nelinearnim i slabo definisanim sistemima. Zahvaljujući svojoj sposobnosti da formalizuje neizvjesnost i subjektivnu procjenu, posebno se ističe u aplikacijama gdje klasični pristupi ne pružaju zadovoljavajuće rezultate. U kontekstu MPPT algoritama, primjena fazi logike omogućava kompromis između brzog odziva, minimalizacije oscilacija i stabilnog praćenja tačke maksimalne snage u realnim i promjenljivim radnim uslovima [14, 15].

S obzirom na sve izraženije zahtjeve za efikasnijim, bržim i robusnijim MPPT strategijama, ovaj rad istražuje mogućnosti primjene čistog fazi MPPT algoritma, bez integracije sa drugim tehnikama. Fokus je usmjeren na dizajn fazi logičkog kontrolera, uključujući izbor ulazno-izlaznih veličina, oblikovanje funkcija pripadnosti i definisanje pravila zaključivanja. Funkcionalnost algoritma biće evaluirana u uslovima promjenljivog osunčanja pomoću simulacija, pri čemu će se analizirati ključni parametri performansi poput

---

vremenskog odziva, stabilnosti praćenja i odstupanja od referentne tačke.

Na taj način, cilj rada nije samo da ispita teorijske prednosti fazi pristupa, već i da pruži konkretan doprinos njegovoj primjeni u realnim uslovima rada PV sistema. Dobijeni rezultati mogu poslužiti kao osnova za dalji razvoj optimizovanih MPPT rješenja zasnovanih na soft-computing metodama.

Kako bi se obradio zadati problem i obezbijedio jasan pregled cjelokupnog istraživanja, rad je strukturiran u četiri međusobno povezana poglavlja, između uvodnog i zaključnog dijela.

U prvom poglavlju obrađuju se osnovni pojmovi vezani za solarnu energiju i rad PV sistema. Prikazan je princip pretvaranja sunčevog zračenja u električnu energiju, struktura i karakteristike PV ćelija i panela, kao i ključni faktori koji utiču na njihov rad.

Drugo poglavlje obuhvata pregled i analizu konvencionalnih MPPT algoritama koji se najčešće primjenjuju u praksi.

Treće poglavlje detaljno obrađuje teorijske osnove fazi logike i opisuje njen konkretan dizajn i primjenu u okviru MPPT zadatka.

U četvrtom poglavlju prikazani su rezultati simulacija koje upoređuju ponašanje fazi pristupa sa klasičnim metodama u različitim uslovima rada.

Na kraju rada iznose se zaključci, sumiraju glavni doprinosi istraživanja i predlažu pravci budućih istraživanja.

# Glava 1

## Solarna energija i fotonaponski sistemi

U ovom poglavlju biće predstavljeni osnovni koncepti vezani za solarnu energiju i principe rada PV sistema. Nakon uvodnog razmatranja same solarne energije, fokus će biti na modelovanju fotonaponske ćelije, analiziranju njenog ponašanja u različitim uslovima, te načinu na koji se više ćelija integriše u fotonaponske module i panele. Dodatno, biće obrađeni osnovni električni modeli PV ćelija, kao i karakteristične izlazne osobine PV sistema, što predstavlja osnovu za kasnije razmatranje algoritama za praćenje maksimalne tačke snage.

### 1.1 Solarna energija kao obnovljivi izvor

Razvoj obnovljivih izvora energije posljednjih decenija stavio je solarnu energiju u fokus kao ključni faktor energetske tranzicije. Kao globalno dostupna i tehnološki sve pristupačnija, ona nudi značajan potencijal za diversifikaciju izvora električne energije i smanjenje zavisnosti od fosilnih goriva.

#### 1.1.1 Karakteristike solarne energije

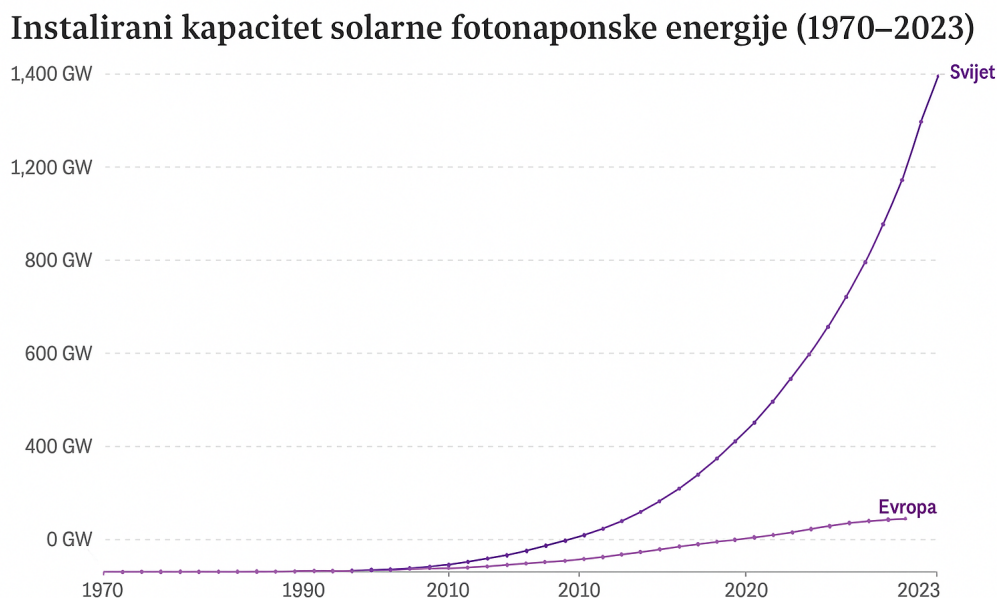
Solarna energija je jedan od najvažnijih obnovljivih izvora energije zbog svoje sveprisutnosti, ekološke prihvatljivosti i dugoročne održivosti. Sunce emituje ogromnu količinu energije svakog dana, a samo mali dio koji dopire do Zemljine površine dovoljan je da zadovolji globalne energetske potrebe više puta [1, 5].

Za razliku od fosilnih goriva, korišćenje solarne energije ne dovodi do emisije gasova staklene bašte ni do zagađenja životne sredine. Njena dostupnost i obnovljivost čine je ključnim energetske resursom u savremenim politikama održivog razvoja [3, 4].

Pored toga, solarna energija se može eksploatirati u raznim oblicima – od direktnog zagrijavanja vode preko termalnih kolektora do konverzije u električnu energiju putem PV ćelija. Velika prednost je mogućnost primjene i u urbanim i u ruralnim područjima, bez potrebe za kompleksnom infrastrukturom. Zahvaljujući razvoju tehnologije i sve nižim cijenama opreme, solarna energija je postala dostupnija i korisnicima sa ograničenim

resursima.

Na globalnom nivou, uloga solarne energije raste iz godine u godinu, ne samo kao tehnološki izbor, već i kao strateški alat u borbi protiv klimatskih promjena i energetske zavisnosti.



Slika 1.1: Instalirani kapacitet solarne fotonaponske energije u svijetu i Evropi u periodu od 1970. do 2023. godine.

Kao što je prikazano na slici 1.1, globalni rast solarne energije je višestruko ubrzan u posljednje dvije decenije, što potvrđuje i izvještaj Međunarodne agencije za obnovljive izvore energije [3].

### 1.1.2 Fotonaponske tehnologije i trendovi razvoja

PV sistemi predstavljaju najrašireniju tehnologiju za direktnu pretvorbu sunčevog zračenja u električnu energiju. Njihova osnovna funkcionalnost zasniva se na pojavi fotoelektričnog efekta u poluprovodničkim materijalima. Iako je princip rada ostao isti, tehnologija izrade i performanse sistema su značajno unaprijeđene tokom proteklih decenija [7, 9].

Osim što se kontinuirano poboljšava efikasnost ćelija, poseban akcenat stavlja se na smanjenje troškova proizvodnje, dugoročnu pouzdanost i prilagodljivost različitim uslovima primjene. U tom kontekstu razvijaju se napredne arhitekture modula, poput bifacijalnih i fleksibilnih PV panela, koji omogućavaju efikasniju konverziju energije u specifičnim aplikacijama [16, 17].

Savremeni trendovi uključuju integraciju PV sistema u građevinske objekte (tzv. BIPV – *Building-Integrated Photovoltaics*), razvoj ćelija na bazi tankih filmova i organskih materijala, kao i upotrebu tandem struktura u cilju povećanja konverzijske efikasnosti. Para-

lelno se istražuju i metode skladištenja energije koje omogućavaju stabilnije napajanje i bolje upravljanje viškovima [8, 18].

Ovakva usmjerenost na inovacije pokazuje da PV tehnologije ne predstavljaju samo alternativu konvencionalnim izvorima, već sve više postaju nosioci transformacije energetskeg sektora ka održivom i distribuiranom modelu.

### 1.1.3 Ograničenja i izazovi u eksploataciji

Efikasnost solarnih sistema zavisi od više faktora: intenziteta sunčevog zračenja, temperature ambijenta, ugla postavljanja panela, kao i prisustva oblaka, sjenke ili zaprljanosti modula [6]. Osim toga, proizvodnja solarne energije je varijabilna, zavisi od doba dana i godišnjeg doba, što otežava balansiranje sistema bez dodatnih rješenja.

Radi obezbjeđivanja stabilnog i pouzdanog snabdijevanja električnom energijom, sve češće se koristi kombinacija solarnih sistema sa baterijskim skladištima ili sa drugim izvorima energije, u okviru hibridnih ili pametnih mreža [19, 20].

Dodatni izazov je degradacija performansi tokom vremena, gdje prosječni PV modul gubi 0.5–1% efikasnosti godišnje. Takođe, instalacije zahtijevaju pravilno dimenzionisanje, orijentaciju i održavanje, kako bi se osigurala maksimalna iskoristivost sistema.

Finansijski aspekti takođe igraju ulogu: iako su cijene opreme pale, troškovi montaže, projektovanja i mrežnog povezivanja još uvijek mogu predstavljati prepreku za pojedine korisnike, naročito u nerazvijenim regijama.

### 1.1.4 Solarna energija u Crnoj Gori

Crna Gora posjeduje značajan potencijal za korišćenje solarne energije, zahvaljujući povoljnoj geografskoj lokaciji i velikom broju sunčanih dana godišnje. Prema podacima iz Nacionalnog energetskeg i klimatskeg plana (NEKP), zemlja ima za cilj da do 2030. godine najmanje 50% ukupne finalne potrošnje energije potiče iz obnovljivih izvora [21].

Prema podacima iz aprila 2025. godine, ukupni instalisani kapacitet solarnih elektrana u Crnoj Gori iznosi približno 80 MW, sa očekivanjem da će do kraja godine premašiti 100 MW [22]. Ovaj rast je djelimično rezultat programa „Solari 3000+“ i „Solari 5000+“ koje sprovodi Elektroprivreda Crne Gore (EPCG), omogućavajući postavljanje solarnih sistema na krovove domaćinstava i poslovnih objekata širom zemlje.

Prva solarna elektrana izgrađena na zemlji u Crnoj Gori, "Čevo Solar", puštena je u rad krajem 2023. godine. Elektrana se prostire na površini od 70 000 m<sup>2</sup>, sastoji se od 8112 solarnih panela, sa ukupnom instalisanom snagom od 4,42 MW i planiranom godišnjom proizvodnjom od oko 6 GWh električne energije.

U avgustu 2024. godine, Skupština Crne Gore usvojila je Zakon o korišćenju energije iz obnovljivih izvora, kojim se uspostavlja pravni okvir za promociju i regulisanje obnovljivih izvora energije. Ovaj zakon predviđa podsticaje za proizvodnju energije iz obnovljivih izvora, definiše uloge kupaca, proizvođača i zajednica obnovljivih izvora energije,

te propisuje obavezu izdavanja garancija porekla za energiju iz obnovljivih izvora [23].

Ovi koraci predstavljaju važan pomak ka ostvarivanju nacionalnog cilja da se do 2030. godine najmanje 50% ukupne finalne potrošnje energije pokriva iz obnovljivih izvora, čime se doprinosi održivosti i energetske nezavisnosti Crne Gore.

## 1.2 Karakteristike solarne ćelije

Solarne ćelije predstavljaju osnovne gradivne elemente PV sistema i imaju ključnu ulogu u pretvaranju sunčeve energije u električnu. Njihove karakteristike zavise od strukture poluprovodničkog materijala, procesa dopiranja i fizičkih pojava unutar P–N spoja, koji čini osnovu rada svake PV ćelije.

### 1.2.1 P-N spoj

PV ćelije se izrađuju od materijala poluprovodničke prirode, što omogućava konverziju sunčevog zračenja u električnu energiju. Zahvaljujući sposobnosti takvih materijala da apsorbiraju fotone i pritom generišu nosioce naelektrisanja, moguće je ostvariti direktnu pretvorbu svjetlosne u električnu energiju.

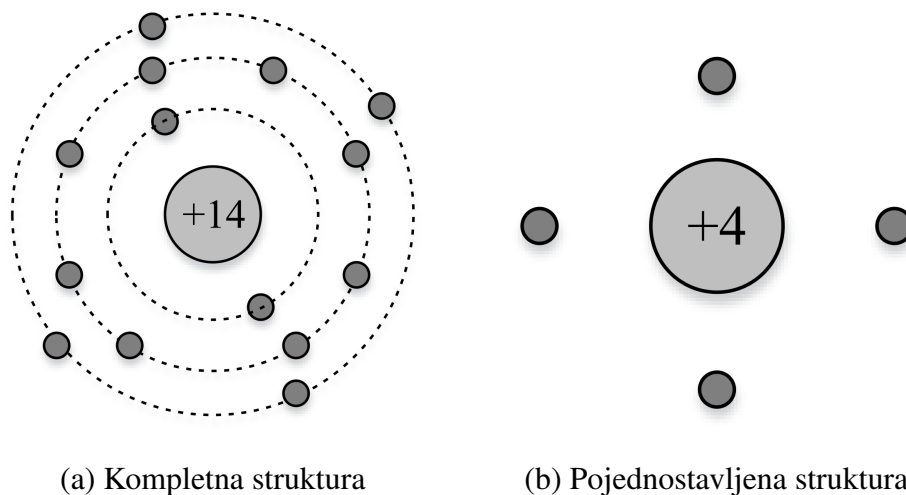
Najzastupljeniji materijal u proizvodnji solarnih ćelija je čisti kristalni silicijum, hemijski element iz IV grupe periodnog sistema. Njegova pogodna elektronska konfiguracija i stabilna kristalna struktura čine ga izuzetno pogodnim za fotonaponske primjene.

Pored silicijuma u određenim slučajevima koristi se i germanijum, koji se takođe nalazi u IV grupi i dijeli slična poluprovodnička svojstva.

Da bi se poboljšala električna provodljivost silicijuma u njegovu kristalnu rešetku se uvode dopanti – atomi iz III ili V grupe periodnog sistema. Na taj način se u zavisnosti od vrste dopanta, dobijaju P-tip ili N-tip poluprovodnički slojevi.

Atomska struktura silicijuma podrazumijeva jezgro sa 14 protona i 14 elektrona raspoređenih u tri elektronske ljuske. Četiri valentna elektrona, smještena u najudaljenijem energetske nivou, od ključnog su značaja za stvaranje kovalentnih veza sa susjednim atomima (slika 1.2a).

Zbog toga što upravo ti spoljašnji elektroni igraju presudnu ulogu u ponašanju silicijuma kao poluprovodnika, često se koristi pojednostavljen prikaz koji ističe samo jezgro sa četiri pozitivna naboja i četiri valentna elektrona (slika 1.2b).

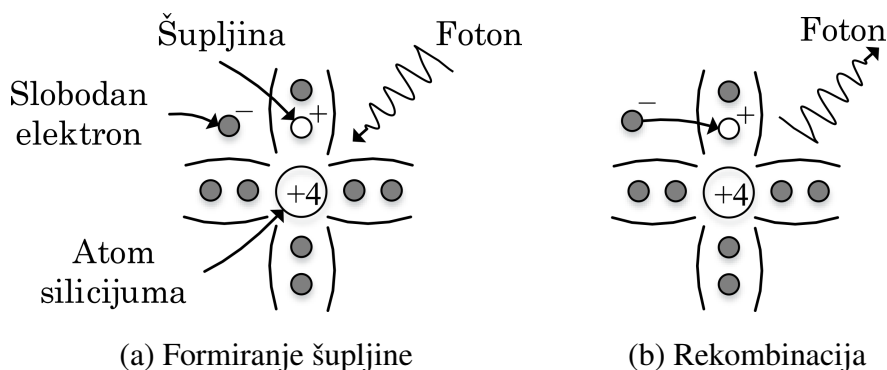


Slika 1.2: Grafički prikaz atoma silicijuma [24]

Na veoma niskim temperaturama, silicijum ne pokazuje sposobnost provođenja električne struje, jer su svi njegovi elektroni vezani u stabilne kovalentne veze, te materijal funkcioniše kao izolator. Međutim, sa porastom temperature dolazi do povećanja termalne energije koju elektroni mogu da apsorbuju. Ukoliko dobiju dovoljnu količinu energije, oni mogu napustiti svoje vezano stanje i preći u vodljivu zonu, čime postaju nosioci električne struje. Ovaj proces rezultira povećanjem ukupne provodljivosti materijala. Ipak, prirodna provodljivost čistog silicijuma pri sobnim uslovima ostaje ograničena, pa se u praksi primjenjuje postupak dopiranja, kojim se u kristalnu strukturu unose atomi drugih elemenata radi poboljšanja električnih karakteristika [24].

Da bi elektron postao slobodan i doprinosio provodljivosti, neophodno je da pređe iz valentne u vodljivu zonu, što zahtijeva određenu količinu energije. Ova energija je poznata kao zabranjena energetska zona ili band-gap, a za silicijum njena vrijednost iznosi 1.12 eV. U slučaju solarnih ćelija, tu energiju elektronima prenose fotoni – kvanti sunčevog zračenja.

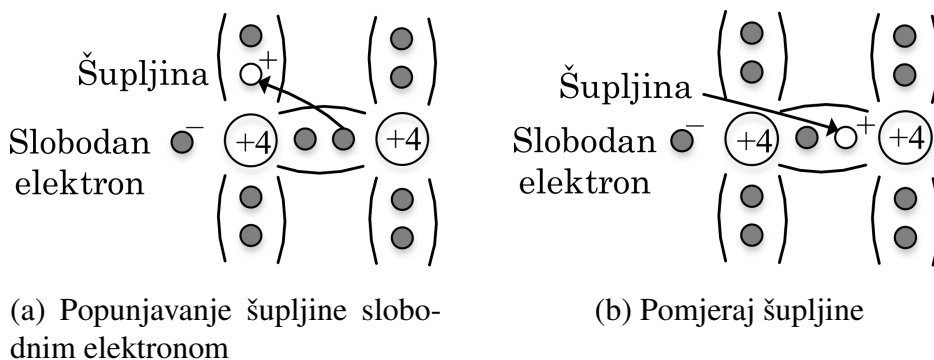
Kada silicijum apsorbuje foton čija energija premašuje 1.12 eV, dolazi do prekida kovalentne veze i oslobađanja jednog elektrona iz valentne zone. Time nastaje slobodan elektron, dok na njegovom prethodnom mjestu ostaje šupljina – pozicija koja se ponaša kao pozitivni nosilac naboja (slika 1.3a). Sljedeći korak u ovom procesu je rekombinacija, kada neki drugi slobodni elektron zauzima šupljinu, pri čemu se oslobađa energija jednaka onoj koju je elektron prethodno primio od fotona (slika 1.3b).



Slika 1.3: Grafički prikaz nastanka šupljine i rekombinacije [24]

Pored elektrona, kao nosilaca negativnog naelektrisanja, važno je istaći da i šupljine učestvuju u provođenju struje u poluprovodnicima i to kao efektivni nosioci pozitivnog naelektrisanja. Kada elektron iz valentne veze pređe u susjednu šupljinu, on je popunjava, ali istovremeno ostavlja prazno mjesto na atomu iz kog je došao. Na taj način šupljina mijenja svoju poziciju – premješta se u pravcu suprotnom od kretanja elektrona.

Ovaj mehanizam omogućava da se šupljine ponašaju kao da se kreću kroz kristalnu rešetku, iako su one zapravo rezultat pomjeranja elektrona. Proces se u literaturi često opisuje kao kretanje para elektron–šupljina, pri čemu oba tipa nosilaca doprinose ukupnoj električnoj struji u materijalu. Na slici 1.4 prikazan je princip nastanka i „kretanja“ šupljina, koje zajedno sa slobodnim elektronima omogućavaju protok struje unutar poluprovodničkog sloja [25].



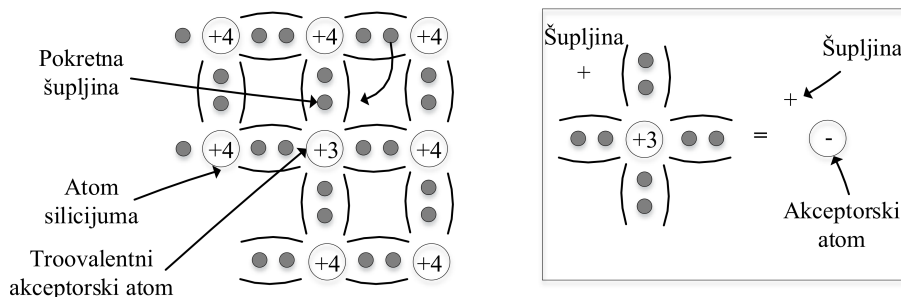
Slika 1.4: Grafički prikaz popunjavanja i pomjeraja šupljine u kristalnoj rešetki [24]

Kada solarna ćelija apsorbuje fotone čija energija premašuje širinu zabranjene zone (eng. *band-gap*) poluprovodničkog materijala, dolazi do generisanja elektronsko-šupljinskih parova. Svaki apsorbovani foton sa dovoljnom energijom može izbaciti elektron iz valentne u provodnu zonu, ostavljajući za sobom šupljinu. Ovi parovi predstavljaju osnovne nosioce naelektrisanja koji mogu doprinijeti generisanju električne struje. Međutim, ukoliko se ovi nosioci ne razdvoje efikasno dolazi do njihove rekombinacije, pri čemu se poništava njihov doprinos ukupnoj struji i smanjuje količina korisne energije.

Da bi se spriječila rekombinacija i omogućilo efikasno razdvajanje nosilaca naelektrisanja unutar solarne ćelije formira se unutrašnje električno polje. To se ostvaruje ko-

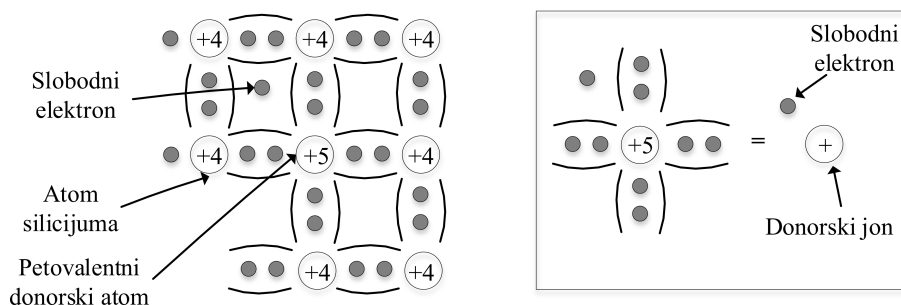
## 1.2. KARAKTERISTIKE SOLARNE ČELIJE

nstruišući P-N spoj u poluprovodničkoj strukturi. P-tip poluprovodničkog materijala dobija se dodavanjem trovalentnih atoma (npr. bora) u kristalnu rešetku silicijuma. Ovi akceptorski atomi imaju tendenciju da prihvate elektron, čime stvaraju višak šupljina – mjesta u valentnoj zoni gdje nedostaje elektron. Proces je prikazan na slici 1.5.



Slika 1.5: Akceptorsko dopiranje silicijuma – formiranje P-tip materijala [26]

Suprotno tome, N-tip materijal nastaje dopiranjem silicijuma petovalentnim donatorskim elementima, poput fosfora. Ovi atomi posjeduju višak jednog elektrona u odnosu na silicijum, koji se lako oslobađa i prelazi u provodnu zonu, povećavajući koncentraciju slobodnih elektrona u materijalu. Mehanizam formiranja N-tip materijala prikazan je na slici 1.6.

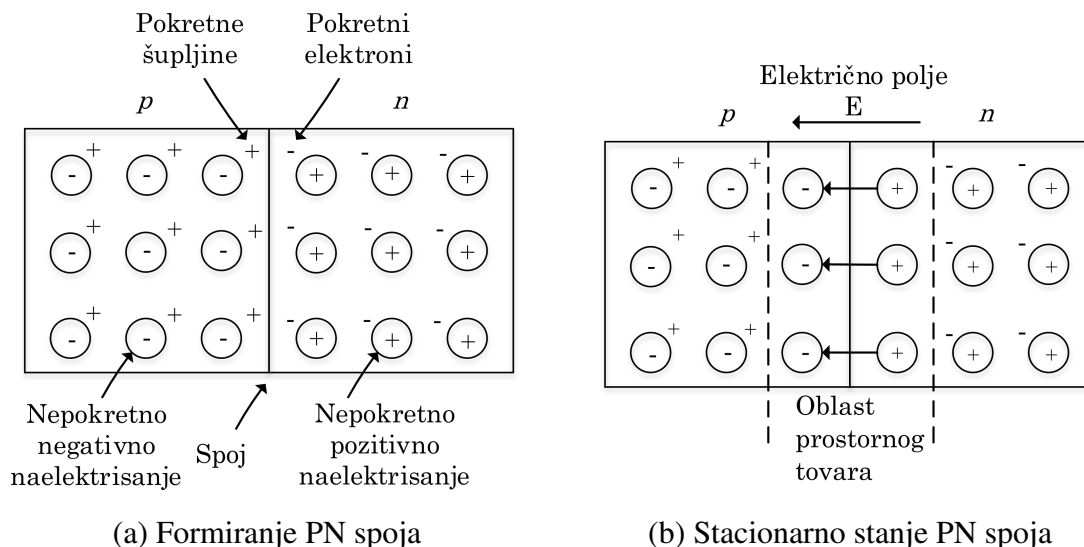


Slika 1.6: Donorsko dopiranje silicijuma – formiranje N-tip materijala [26]

Na spoju između ovako formiranih P i N zona dolazi do difuzije nosilaca: elektroni iz N-zone prelaze u P-zonu i popunjavaju slobodne šupljine, dok se šupljine kreću u suprotnom smjeru. Ova razmjena dovodi do stvaranja tzv. oblasti prostornog tovara (eng. *depletion region*) u kojoj gotovo da nema slobodnih nosilaca. U okviru ove oblasti javlja se unutrašnje električno polje, usmjereno od N prema P strani, koje sprječava dalju difuziju i razdvaja novonastale elektronsko-šupljinske parove.

Kada se spoje materijali tipa P i N, dolazi do difuzije slobodnih nosilaca naelektrisanja između dvije regije. Elektroni iz N-područja prelaze u P-područje, gdje popunjavaju slobodne šupljine, dok se šupljine iz P-područja kreću u suprotnom smjeru – ka N-području. Tokom ovog procesa, pokretni nosioci ostavljaju za sobom nepokretne jone: pozitivne u N-zoni i negativne u P-zoni (slika 1.7a). Ova nepokretna naelektrisanja u blizini spoja stvaraju električno polje, koje se suprotstavlja daljoj difuziji. Nakon što se uspostavi ravnoteža, nastaje oblast bez slobodnih nosilaca, poznata kao oblast prostornog tovara ili

osiromašeno područje (slika 1.7b). Unutrašnje električno polje koje se pritom formira ima ključnu ulogu u odvajanju foto-generisanih nosilaca u fotonaponskim ćelijama, omogućavajući pretvaranje sunčeve energije u električnu.



Slika 1.7: PN spoj [26]

Bez prisustva ovog P-N spoja i pratećeg električnog polja, solarna ćelija ne bi bila u stanju da efikasno razdvaja nosioce naelektrisanja, zbog čega bi većina elektronsko-šupljinskih parova rekombinovala, a proces konverzije energije bio znatno manje efikasan.

Prethodno razmatrani način rada P-N spoja predstavlja osnovu razumijevanja ponašanja diode, koja sama po sebi čini takav spoj [27]. Kada se na krajeve diode primijeni napon  $V_d$  tako da pozitivni pol odgovara anodi, a negativni katodi dolazi do direktne polarizacije i struja  $I_d$  protiče kroz spoj iz P u N oblast. U suprotnom slučaju, kada se polaritet obrne, dioda ulazi u režim obrnute polarizacije i kroz nju protiče veoma mala struja  $I_s$  [28]. Karakteristika napona i struje (I–V karakteristika) diode može se izraziti sljedećom relacijom:

$$I_d = I_s \left[ \exp \left( \frac{qV_d}{nkT} \right) - 1 \right], \quad (1.1)$$

gdje su:

$I_s$  – struja zasićenja diode [A],

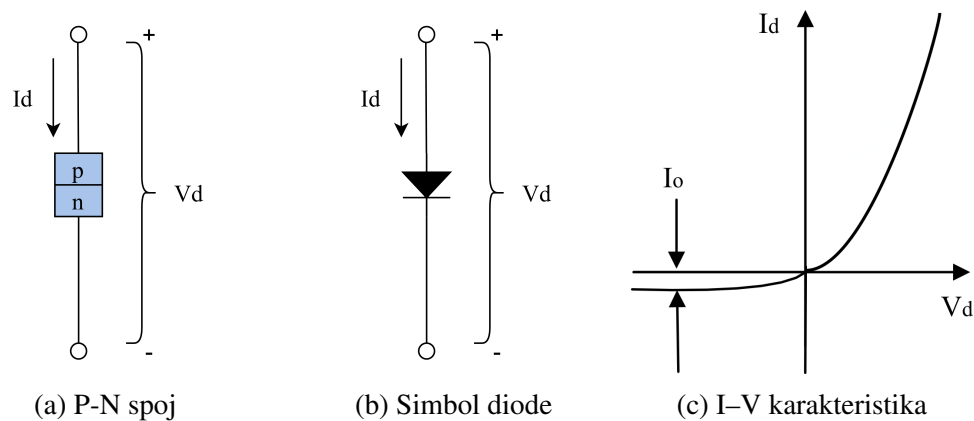
$q$  – količina elementarnog naelektrisanja ( $1.602 \times 10^{-19}$  C),

$V_d$  – napon na diodi [V],

$n$  – faktor kvaliteta (idealnosti) diode,

$k$  – Bolcmanova konstanta ( $1.381 \times 10^{-23}$  J/K),

$T$  – apsolutna (termodinamička) temperatura [K].



Slika 1.8: Dioda [26]

### 1.2.2 Struktura solarne ćelije

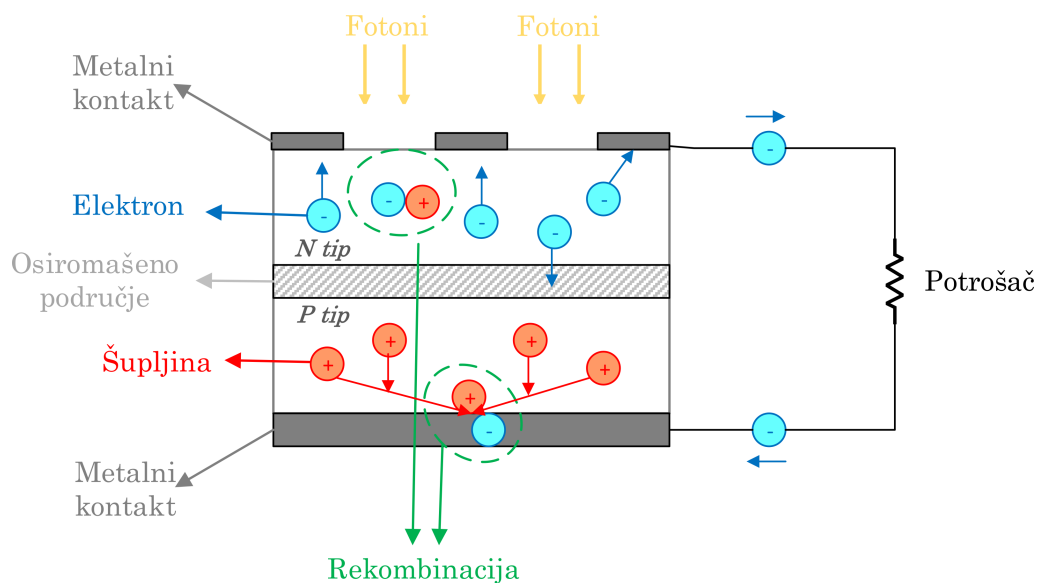
Solarna ćelija najčešće se zasniva na P–N spoju izrađenom od poluprovodničkog materijala, čija je osnovna funkcija pretvaranje sunčeve svjetlosti u električnu energiju pomoću fotonaponskog efekta. Kada sunčevo zračenje dopiye na površinu solarne ćelije, fotoni se apsorbiraju u aktivnom sloju materijala. Ako foton ima dovoljnu energiju, veću ili jednaku energiji zabranjene zone, dolazi do prelaska elektrona iz valentne u provodnu zonu, čime nastaje par elektron–šupljina [29].

Električno polje u osiromašenom području P–N spoja ima presudnu ulogu u razdvajanju ovih nosilaca. Elektroni se usmjeravaju ka N sloju, dok se šupljine kreću ka P sloju. Tako se uspostavlja potencijalna razlika između prednjeg i zadnjeg kontakta ćelije. Ukoliko se ti kontakti povežu sa spoljnim opterećenjem, elektroni će se kretati kroz kolo od N sloja prema P sloju, pri čemu obavljaju rad i na kraju se rekombinuju sa šupljinama, zatvarajući električni krug [30].

Za ostvarenje efikasnog fotonaponskog efekta, materijal mora omogućiti da apsorbirani fotoni efikasno generišu nosioce naboja, ali i da ti nosioci mogu da migriraju prema kontaktima prije nego što se rekombinuju. Osim same funkcionalnosti P–N spoja, važnu ulogu imaju i površinski slojevi ćelije, uključujući antirefleksione premaze i metalne kontakte, koji omogućavaju efikasniji ulazak svjetlosti i preuzimanje generisane struje.

Struktura savremenih solarnih ćelija oblikovana je tako da omogućava visoku efikasnost u apsorpciji sunčeve svjetlosti i njenoj pretvorbi u električnu energiju, iako je sloj aktivnog materijala vrlo tanak. Kada se ćelija priključi na spoljašnje električno kolo, generisani elektroni prolaze kroz opterećenje, pri čemu dolazi do stalnog protoka struje. Na taj način ostvaruje se direktna konverzija sunčeve energije u korisnu električnu energiju, bez potrebe za dodatnim izvorima napajanja ili pokretnim dijelovima.

Opisani proces se naziva fotonaponski efekat, koji predstavlja osnovu rada svih PV sistema (slika 1.9).



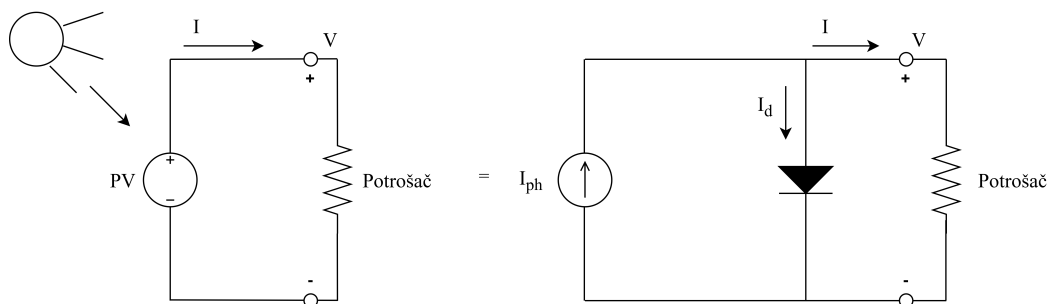
Slika 1.9: Ilustracija fotonaponskog efekta [26]

## 1.3 Modelovanje solarne ćelije

Nakon razmatranja fotonaponskog efekta, potrebno je preći na opisivanje rada solarne ćelije kroz njen električni model. Ovakav pristup omogućava realističnu procjenu ponašanja ćelije pod različitim uslovima, kao što su promjene temperature i iradijancije. Najčešće korišćeni model se zasniva na električnom ekvivalentu koji uključuje izvor struje, diodu i otpornosti koje predstavljaju gubitke u stvarnim uslovima rada [31].

### 1.3.1 Jednodiodni model solarne ćelije

Jedan od najjednostavnijih pristupa u analizi rada solarne ćelije podrazumijeva njeno predstavljanje putem električnog ekvivalentnog modela, koji obuhvata idealni izvor struje  $I_{ph}$  povezan paralelno sa nelinearnim elementom – realnom diodom  $D$ . Kao što je prikazano na slici 1.10, ovakav model omogućava osnovno razumijevanje pretvaranja sunčeve energije u električnu.



Slika 1.10: Idealni jednodiodni model solarne ćelije [26]

Idealni izvor struje u ovom kontekstu predstavlja struju generisanu djelovanjem su-

nčevog zračenja na površinu PV ćelije, pri čemu je intenzitet te struje proporcionalan jačini upadnog solarnog zračenja, odnosno solarnog fluksa. Iako pojednostavljen, ovaj model pruža solidnu osnovu za matematičku i numeričku analizu rada PV ćelije u idealnim uslovima.

Ukupna izlazna struja iz solarne ćelije može se dobiti primjenom Kirhofovog zakona struja, što daje:

$$I = I_{ph} - I_d, \quad (1.2)$$

gdje je  $I_{ph}$  fotonaponska struja koju generiše strujni izvor, dok  $I_d$  predstavlja struju koja protiče kroz diodu.

$$I_d = I_s \left[ \exp \left( \frac{qV_d}{nkT_c} \right) - 1 \right], \quad (1.3)$$

gdje su:

$I_s$  – struja zasićenja diode [A],

$q$  – elementarno naelektrisanje ( $1.602 \times 10^{-19}$  C),

$V_d$  – napon na diodi, u ovom modelu jednak naponu ćelije [V],

$n$  – faktor idealnosti (kvaliteta) diode, tipično između 1 i 2,

$k$  – Bolcmanova konstanta ( $1.381 \times 10^{-23}$  J/K),

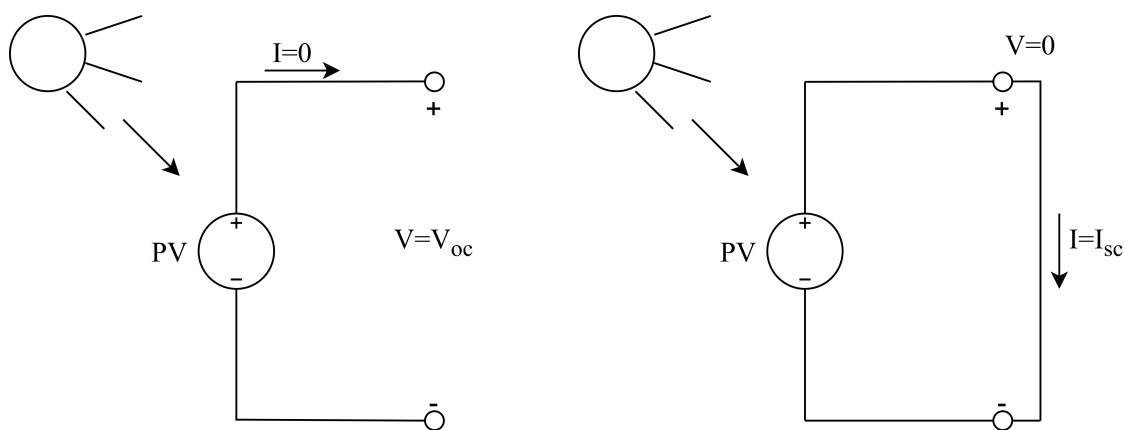
$T_c$  – temperatura solarne ćelije [K].

Model predstavljen na slici 1.10, zajedno sa odgovarajućim matematičkim izrazima, pruža osnovu za analizu električnog ponašanja solarne ćelije pod različitim uslovima temperature i iradijancije [25]. Ovaj model, iako idealizovan, često se koristi kao početna tačka u simulacijama i proračunima performansi PV sistema zbog svoje jednostavnosti i relativno dobre tačnosti u predikciji osnovnih karakteristika.

Takođe, važno je istaći da se ovim modelom definišu dva slučaja od praktičnog značaja, koja su relevantna kako za realnu solarnu ćeliju, tako i za njeno električno ekvivalentno kolo. Na osnovu predstavljenog modela moguće je izvesti izraze za neke od ključnih parametara solarne ćelije, među kojima se posebno izdvajaju napon praznog hoda i struja kratkog spoja (slika 1.11).

U uslovima otvorenog kola, kada je kolo prekinuto, ne dolazi do proticanja struje, ali se između krajeva ćelije uspostavlja napon praznog hoda  $V_{oc}$  (slika 1.11a). Taj napon predstavlja maksimalnu vrijednost napona koju solarna ćelija može da ostvari.

Suprotno tome, u uslovima kratkog spoja, kada su krajevi kola direktno spojeni, kroz spoljašnje kolo protiče struja kratkog spoja  $I_{sc}$ . U tom režimu, struja ne protiče kroz diodu, pa  $I_{sc}$  odgovara foto-generisanoj struji  $I_{ph}$  koju izvor proizvodi (slika 1.11b). Ova struja predstavlja maksimalnu vrijednost struje koju solarna ćelija može da generiše.

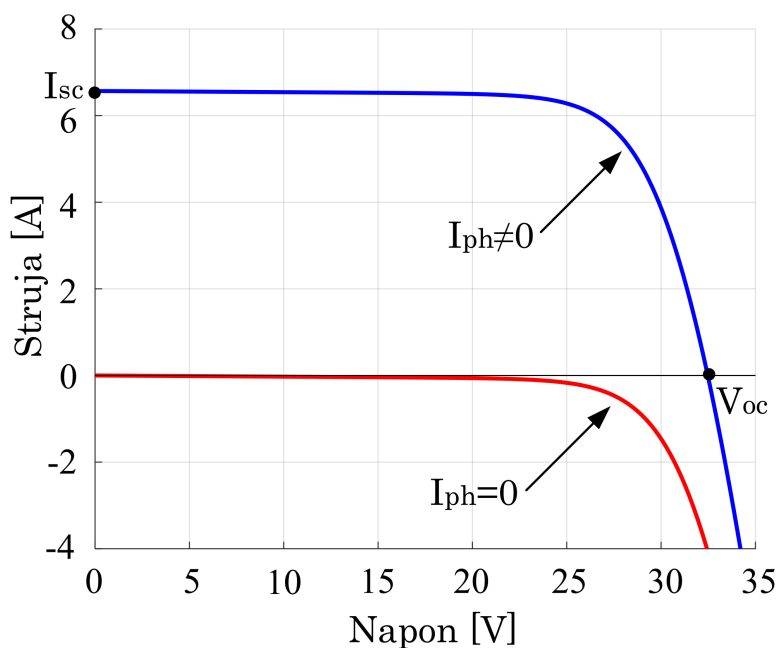


(a) Uslov otvorenog kola – napon praznog hoda ( $V = V_{oc}$ ,  $I = 0$ )

(b) Uslov kratkog spoja – struja kratkog spoja ( $V = 0$ ,  $I = I_{sc}$ )

Slika 1.11: Karakteristični parametri solarne ćelije [26]

Na osnovu jednačine (1.2) može se izvesti zaključak o obliku I–V karakteristike solarne ćelije. Fotostruja  $I_{ph}$  predstavlja konstantnu komponentu, što se grafički prikazuje kao horizontalna linija. Sa druge strane, prisustvo diode i njene struje  $I_d$ , koja ima negativan predznak, utiče na oblik karakteristike izazivajući zakretanje krive u odnosu na osu napona  $V$ . Kombinovanjem ove dvije komponente dobija se ukupna karakteristika izlazne struje ćelije  $I$  u zavisnosti od izlaznog napona  $V$ . Na slici 1.12 prikazane su I–V karakteristike za dva slučaja: kada je ćelija izložena osvjetljenju ( $I_{ph} \neq 0$ ) i kada je u stanju potpunog zasjenjenja ( $I_{ph} = 0$ ). Uočavaju se osnovni parametri kao što su struja kratkog spoja  $I_{sc}$  i napon u otvorenom kolu  $V_{oc}$ , koji su od ključnog značaja za karakterizaciju performansi solarne ćelije [25].

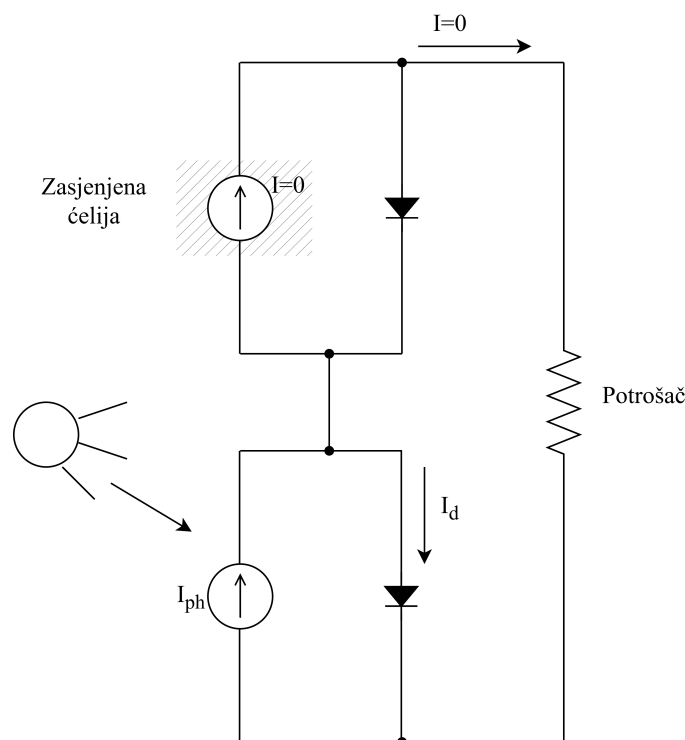


Slika 1.12: I–V karakteristika solarne ćelije [24]

U realnim uslovima rada kada se solarne ćelije povezuju serijski, često je neophodno koristiti složenije modele od osnovnog jednodiodnog modela, kako bi se realno opisalo njihovo ponašanje u različitim operativnim uslovima. Osnovni model može biti dovoljno precizan u idealnim uslovima osvjetljenja, ali pri pojavi odstupanja, kao što su promjene temperature, degradacija materijala ili djelimično zasjenjenje, zahtijeva se detaljnije modeliranje. Posebnu pažnju zahtijevaju upravo situacije u kojima dolazi do djelimičnog ili potpunog zasjenjenja jedne ili više ćelija, jer tada osnovni model više ne opisuje adekvatno električno ponašanje sistema.

U takvim slučajevima, kao što je prikazano na slici 1.13, dolazi do pojave koja značajno utiče na ukupnu funkcionalnost niza. Problem nastaje kada jedna od ćelija u serijskom nizu nije izložena sunčevom zračenju, zbog čega ne može da proizvodi struju ( $I_{ph} = 0$ ). Iako su ostale ćelije u nizu osvijetljene i sposobne da proizvode električnu energiju, njihova struja ne može da se prenese dalje kroz niz zbog prekida koji stvara zasjenjena ćelija.

Kod idealnog jednodiodnog modela, zasjenjena ćelija sadrži diodu koja je polarizovana u smjeru blokade i nalazi se paralelno sa fotostrujnim izvorom. U tom slučaju, čak i ako ostale ćelije u nizu proizvode struju, ona ne može proći kroz zasjenjenu ćeliju, jer dioda ne omogućava provođenje struje u obrnutom smjeru. Kao posljedica toga, ukoliko ne postoji alternativni put za struju, dolazi do prekida u strujnom kolu, pa ukupna struja kroz potrošač postaje jednaka nuli[25].



Slika 1.13: Prikaz serijski povezanih solarnih ćelija sa opterećenjem, pri čemu jedna ćelija ne generiše struju zbog zasjenjenja ( $I = 0$ ), dok druga ostaje osvijetljena [24]

### 1.3. MODELOVANJE SOLARNE ČELIJE

Jedan od načina za prevazilaženje prethodno opisanog problema jeste uvođenje otpornosti  $R_p$  koja se povezuje paralelno sa strujnim izvorom. Na taj način, struja koju generišu osvijetljene ćelije može proći i kroz zasjenjenu ćeliju putem paralelnog otpornika  $R_p$ , a zatim nastaviti ka potrošaču. Model solarne ćelije sa uključenom paralelnom otpornosti  $R_p$  prikazan je na slici 1.14.

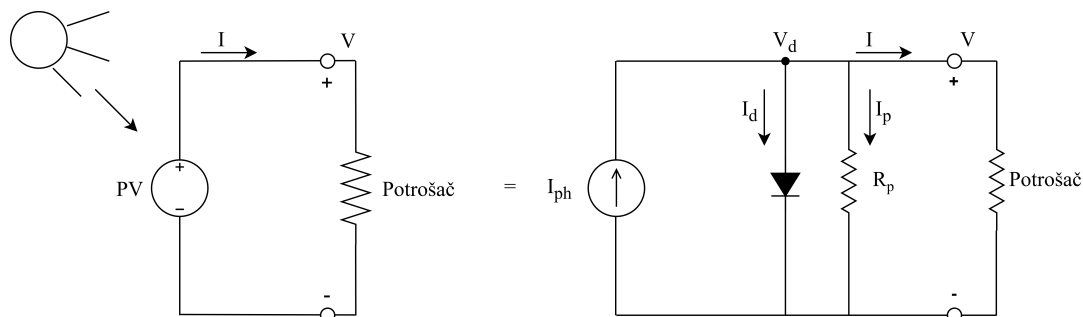
Izlazna struja solarne ćelije u ovom modelu izražava se sljedećom relacijom:

$$I = I_{ph} - I_d - I_p, \quad (1.4)$$

gdje je  $I_p$  struja koja prolazi kroz paralelni otpornik, određena odnosom između izlaznog napona  $V$  i otpornosti  $R_p$ :

$$I_p = \frac{V}{R_p}. \quad (1.5)$$

Paralelna otpornost  $R_p$  ujedno modeluje prisustvo nečistoća i mikrodefekata unutar strukture solarne ćelije, koji direktno utiču na njene električne karakteristike.



Slika 1.14: Jednodiodni model solarne ćelije sa dodatom paralelnom otpornošću [24]

Na slici 1.15 prikazan je uticaj paralelne otpornosti ( $R_p$ ) na I–V karakteristiku PV ćelije. U idealizovanom modelu, gdje je serijska otpornost  $R_s$  zanemarljiva ( $R_s = 0$ ), a paralelna otpornost beskonačna ( $R_p = \infty$ ), izlazna struja ostaje gotovo konstantna pri promjeni napona sve do približavanja tački maksimalne snage. Međutim, u realnim uslovima, kada je  $R_p$  konačna, dolazi do pojave parazitske struje koja „curi” kroz paralelnu otpornost, čime se efektivna izlazna struja smanjuje – posebno u dijelu I–V karakteristike gdje su naponi veći.

Degradacija karakteristike može se kvantitativno opisati relacijom:

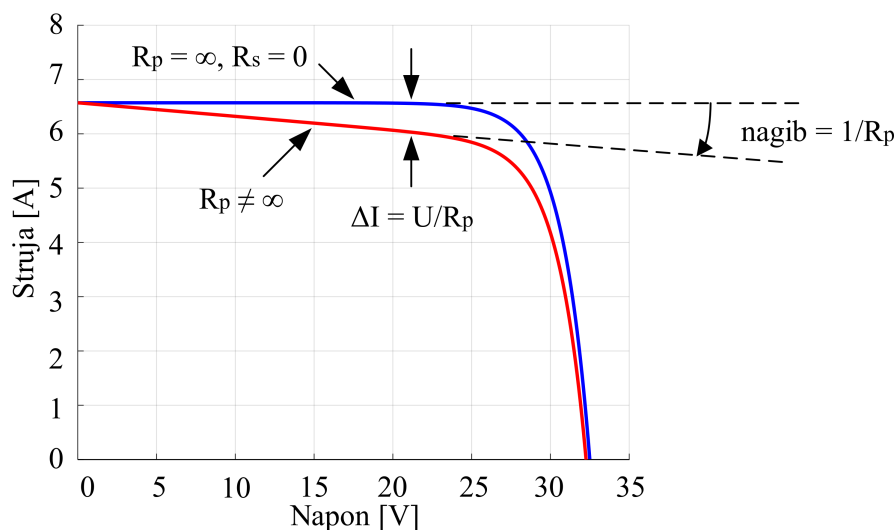
$$\Delta I = \frac{U}{R_p}, \quad (1.6)$$

gdje su:

$\Delta I$  – pad struje izazvan ograničenom paralelnom otpornosti [A],

$U$  – napon na ćeliji [V],

$R_p$  – paralelna otpornost solarne ćelije [ $\Omega$ ].

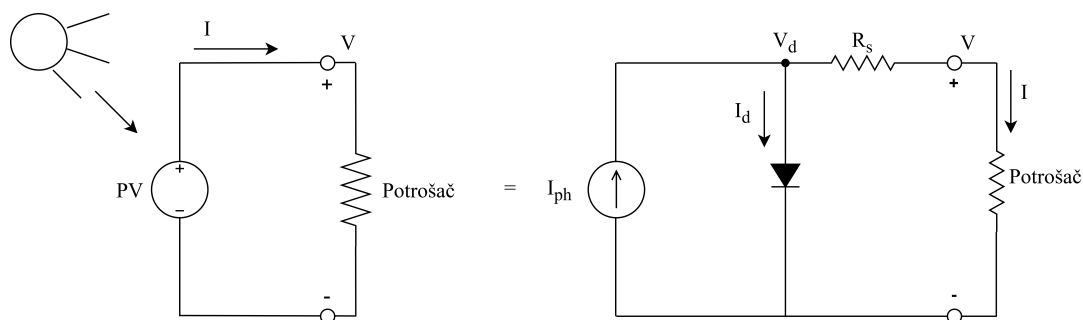


Slika 1.15: I-V karakteristika solarne ćelije sa dodatim paralelnim otporom [26]

Kako se  $R_p$  smanjuje, nagib u dijelu I–V karakteristike pri većim naponima postaje strmiji, što ukazuje na izraženiji pad izlazne struje. Ovakvo ponašanje direktno utiče na performanse PV ćelije, jer dolazi do smanjenja raspoložive izlazne snage, kao i pada faktora popunjenosti (eng. *fill factor* – *FF*), što u krajnjem ishodu umanjuje ukupnu efikasnost sistema.

Zbog toga je razumijevanje i uvažavanje uticaja parametra  $R_p$  od suštinskog značaja prilikom modelovanja realnih fotonaponskih modula i sistema, jer omogućava precizniju simulaciju njihovog ponašanja pod različitim radnim uslovima [25].

Pored uvođenja paralelne otpornosti radi realističnijeg modelovanja, idealnom jednodiodnom modelu solarne ćelije može se dodati i serijska otpornost  $R_s$ , koja u praksi predstavlja otpornost između P i N slojeva solarne ćelije. Takav prošireni model prikazan je na slici 1.16.



Slika 1.16: Jednodiodni model solarne ćelije sa dodatom serijskom otpornošću [24]

Izlazna struja solarnog modela sa dodatom serijskom otpornošću dobija sljedeći oblik:

$$I = I_{ph} - I_d = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{qV_d}{nkT_c}\right) - 1 \right], \quad (1.7)$$

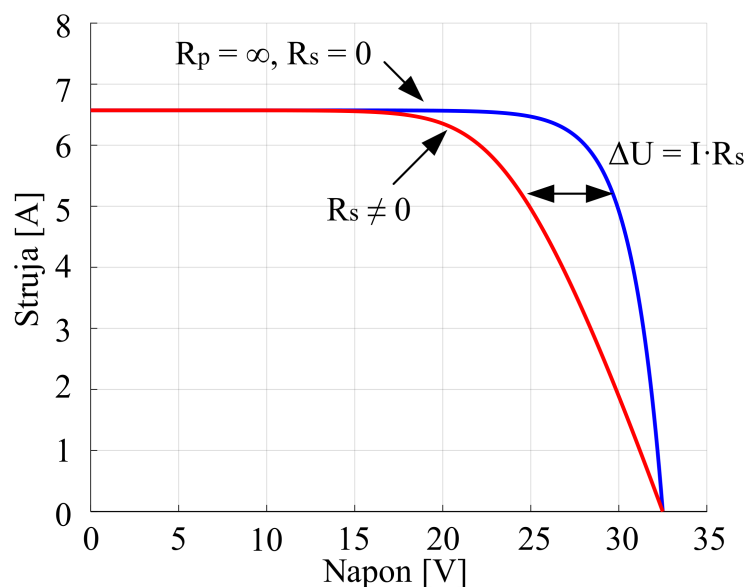
### 1.3. MODELOVANJE SOLARNE ČELIJE

gdje je  $V_d$  – napon na diodi, koji predstavlja zbir izlaznog napona  $V$  i napona na serijskoj otpornosti:

$$V_d = V + IR_s. \quad (1.8)$$

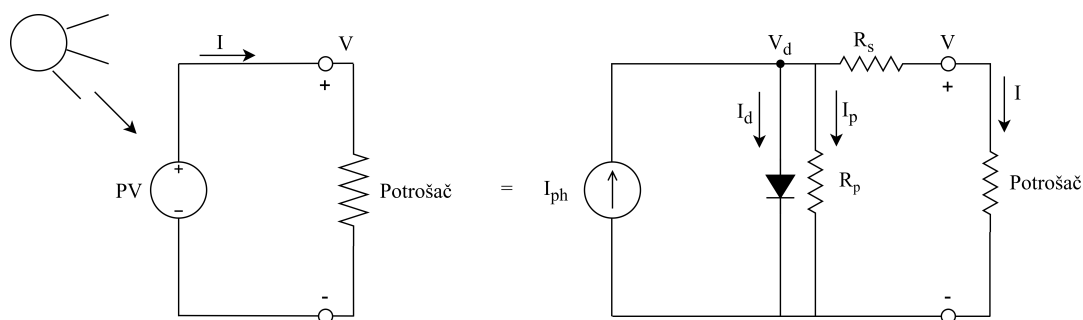
Uticaj serijske otpornosti  $R_s$  na I–V karakteristiku solarne ćelije prikazan je na slici 1.17. U idealizovanom slučaju, kada je  $R_s = 0$  i  $R_p = \infty$ , karakteristika pokazuje gotovo konstantan napon sve do tačke maksimalne snage, jer u modelu ne postoji unutrašnji otpor koji bi izazvao pad napona.

U slučaju kada serijska otpornost ima konačnu vrijednost, dolazi do pojave naponskog gubitka  $\Delta U = I \cdot R_s$ , koji se manifestuje kao zakrivljenje I–V karakteristike u dijelu gdje struja dostiže veće vrijednosti. Ovaj efekat rezultira smanjenjem napona i posljedično smanjenjem izlazne snage PV ćelije [25].



Slika 1.17: I-V karakteristika solarne ćelije sa dodatim serijskim otporom [26]

Najpotpuniji oblik jednodiodnog modela solarne ćelije dobija se uvođenjem i serijske ( $R_s$ ) i paralelne otpornosti ( $R_p$ ), čime se model dodatno približava stvarnom ponašanju ćelije (slika 1.18).



Slika 1.18: Jednodiodni model solarne ćelije sa serijskom i paralelnom otpornošću [24]

Jednačina kojom se opisuje izlazna struja solarne ćelije, prema prikazanom modelu, glasi:

$$I = I_{ph} - I_d - I_p, \quad (1.8)$$

gdje je struja diode definisana izrazom:

$$I_d = I_s \left[ \exp \left( \frac{q(V + IR_s)}{nkT_c} \right) - 1 \right], \quad (1.9)$$

dok se struja kroz paralelnu otpornost definiše kao:

$$I_p = \frac{V + IR_s}{R_p}. \quad (1.10)$$

Uvrštavanjem jednačina (1.9) i (1.10) u izraz (1.8), dobija se ukupna izlazna struja solarne ćelije:

$$I = I_{ph} - I_s \left[ \exp \left( \frac{q(V + IR_s)}{nkT_c} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p}. \quad (1.11)$$

Radi pojednostavljenja izraza (1.11), u praksi se često koristi aproksimacija da je struja  $I_{ph}$  približno jednaka struji kratkog spoja  $I_{sc}$ :

$$I_{ph} \approx I_{sc}, \quad (1.12)$$

gdje je  $I_{sc}$  struja kratkog spoja, čija vrijednost zavisi od intenziteta sunčevog zračenja i radne temperature solarne ćelije.

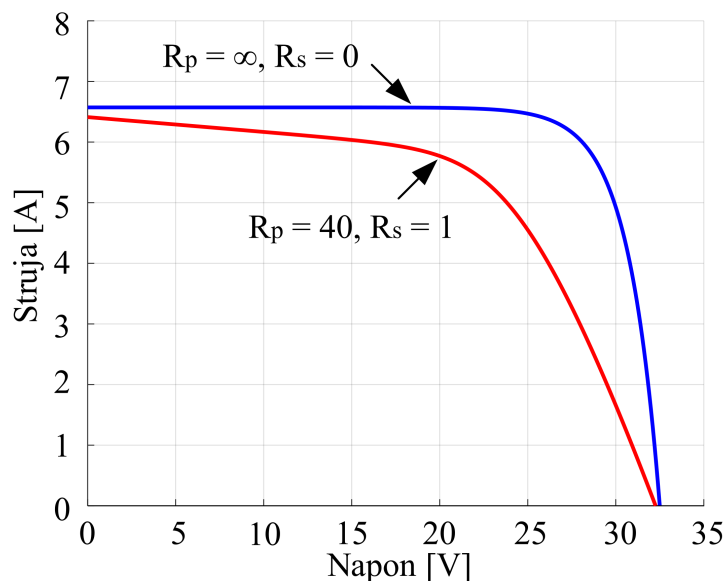
Uzimajući ovu aproksimaciju u obzir, izraz za izlaznu struju ćelije postaje:

$$I = I_{sc} - I_s \left[ \exp \left( \frac{q(V + IR_s)}{nkT_c} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p}. \quad (1.13)$$

Nakon što su pojedinačno razmotreni uticaji serijske i paralelne otpornosti, korisno je analizirati kako njihovo zajedničko prisustvo utiče na I–V karakteristiku solarne ćelije. Na slici 1.19 prikazano je poređenje između idealnog slučaja, kada su  $R_s = 0$  i  $R_p = \infty$ , i realnog modela u kojem obje otpornosti imaju konačne vrijednosti.

Serijska otpornost  $R_s$  utiče na ponašanje ćelije tako što pri većim strujama dolazi do naponskog pada, što uzrokuje smanjenje izlaznog napona. Ovaj efekat se naročito izražava u dijelu karakteristike bližem tački kratkog spoja. S druge strane, paralelna otpornost  $R_p$  ima veći uticaj pri višim naponima, gdje dolazi do gubitka dijela struje usljed njenog „curenja” kroz unutrašnje puteve u strukturi ćelije.

Zajednički efekat serijske i paralelne otpornosti dovodi do vidljivog odstupanja I–V karakteristike od idealne, što rezultira smanjenjem maksimalne izlazne snage i ukupne efikasnosti solarne ćelije. Zbog toga je važno da oba parametra budu pravilno uključena u modele koji se koriste za simulaciju i analizu rada fotonaponskih sistema u realnim uslovima.



Slika 1.19: I-V karakteristika solarne ćelije sa dodatim serijskim i paralelnim otporom [26]

Nelinearna priroda matematičkog modela koji opisuje ponašanje solarne ćelije zahtijeva primjenu numeričkih metoda za pronalaženje rješenja. Analitičko rješavanje takvih jednačina najčešće nije izvodljivo, te se koriste iterativne metode koje omogućavaju približno pronalaženje korijena funkcije. U praksi, ovakvi modeli uključuju kompleksne nelinearne relacije između struje i napona, koje dodatno komplikuju analizu. Pored toga, karakteristike solarne ćelije zavise od promjenljivih faktora kao što su temperatura i iradijansa, što dodatno otežava formulaciju zatvorenog oblika rješenja. Zbog toga se u inženjerskim primjenama sve češće pribjegava numeričkom pristupu, koji omogućava stabilnu i efikasnu obradu podataka. Jedna od najpoznatijih i najčešće korišćenih metoda ovog tipa je Njutn-Rafsonova metoda (eng. *Newton-Raphson method*), poznata po svojoj brzini konvergencije i efikasnosti u blizini tačnog rješenja [32].

Princip rada ove metode zasniva se na razvoju funkcije u Tejlorov red i zanemarivanju viših redova, čime se dolazi do sledeće rekurentne relacije:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}, \quad (1.14)$$

gdje  $x_n$  označava vrijednost promjenljive  $x$  u  $n$ -toj iteraciji,  $f(x)$  je nelinearna funkcija čije nulto mjesto tražimo, dok  $f'(x)$  predstavlja prvi izvod funkcije  $f$  po promjenljivoj  $x$ .

U kontekstu modelovanja fotonaponskih sistema, promjenljiva  $x$  može predstavljati napon  $V_{pv}$  ili struju  $I_{pv}$ , u zavisnosti od konkretne implementacije algoritma.

### 1.3.2 Faktor popunjenosti i efikasnost solarne ćelije

Faktor popunjenosti (eng. *filling factor* – FF) predstavlja značajnu mjeru performansi solarne ćelije, jer pokazuje koliki je procenat teoretski maksimalne snage moguće prak-

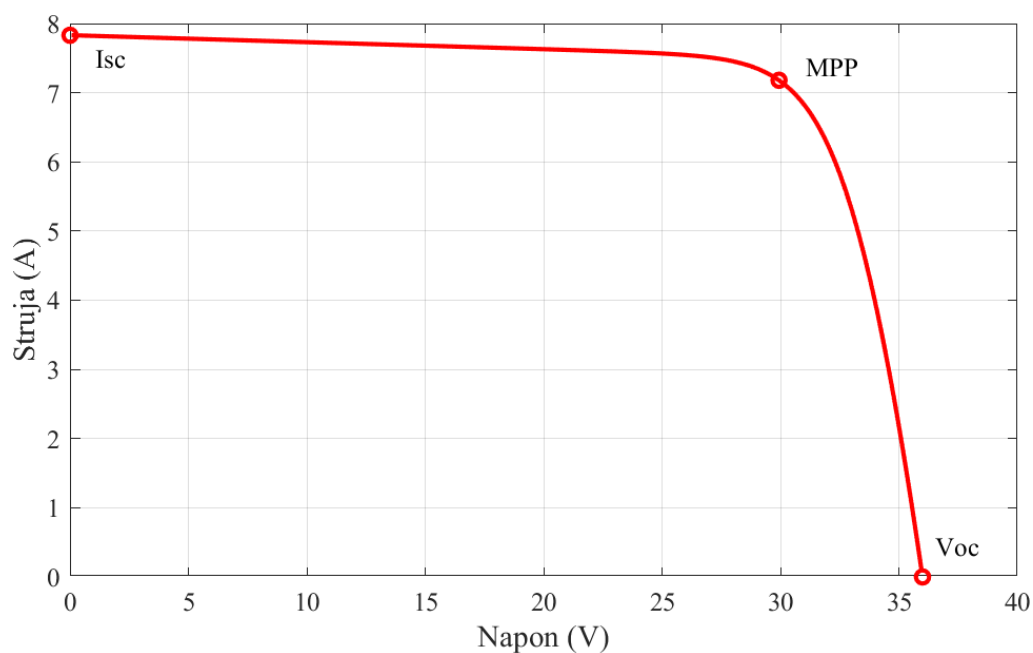
### 1.3. MODELOVANJE SOLARNE ČELIJE

tično iskoristiti. On se definiše kao odnos između realne maksimalne snage generisane u tački maksimalne snage i idealne snage određene proizvodom struje kratkog spoja i napona u praznom hodu. Matematički izraz za faktor popunjenosti je:

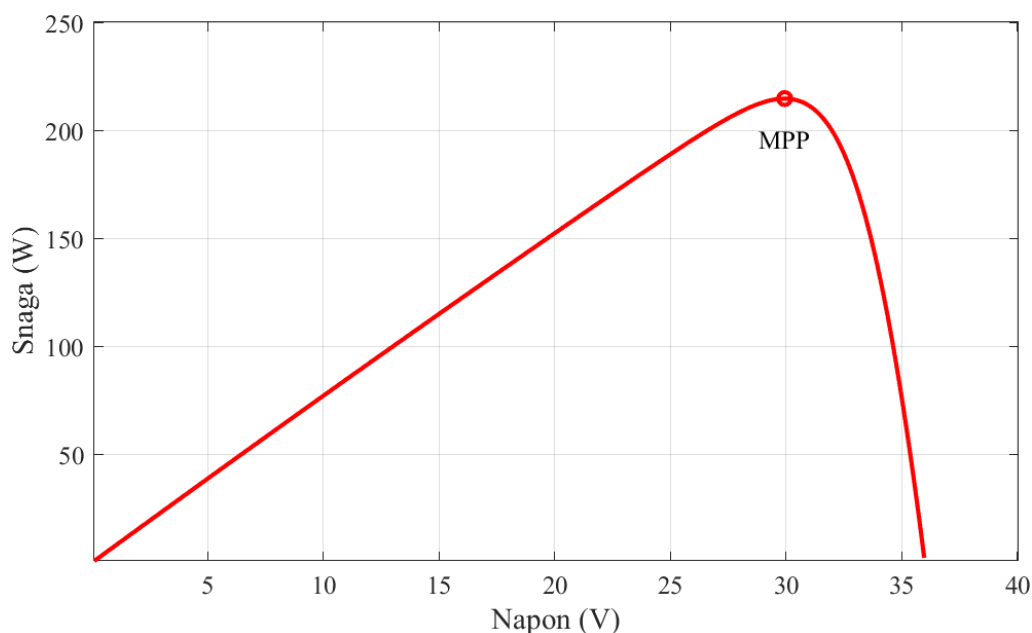
$$FF = \frac{U_{mpp} \cdot I_{mpp}}{U_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (1.15)$$

U praksi, vrijednosti faktora popunjenosti se obično kreću u rasponu od 0.7 do 0.9, u zavisnosti od kvaliteta ćelije i uslova mjerenja [33, 34].

Na slikama 1.20 i 1.21 prikazane su I–V i P–V karakteristike solarne ćelije sa jasno ucrtanim ključnim tačkama: strujom kratkog spoja  $I_{sc}$ , naponom u praznom hodu  $U_{oc}$  i tačkom maksimalne snage. Ove tačke omogućavaju vizuelnu identifikaciju faktora popunjenosti i njegove uloge u određivanju realnih izlaznih performansi panela.



Slika 1.20: I–V karakteristika solarne ćelije sa označenim tačkama  $I_{sc}$ ,  $U_{oc}$  i MPP



Slika 1.21: P-V karakteristika solarne ćelije sa označenom tačkom maksimalne snage (MPP)

Efikasnost solarne ćelije  $\eta$  se izračunava kao:

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = \frac{U_{\text{mpp}} \cdot I_{\text{mpp}}}{G \cdot S} = \frac{FF \cdot U_{\text{oc}} \cdot I_{\text{sc}}}{G \cdot S} \quad (1.16)$$

gdje su:

$I_{\text{mpp}}$  – struja u optimalnoj tački [A],

$U_{\text{mpp}}$  – napon u optimalnoj tački [V],

$G$  – gustina sunčevog zračenja [ $\text{W}/\text{m}^2$ ],

$S$  – površina solarne ćelije [ $\text{m}^2$ ],

$FF$  – faktor popunjenosti [bezdimeziona veličina],

$\eta$  – efikasnost solarne ćelije [bezdimeziona veličina].

Na osnovu izraza za efikasnost može se zaključiti da ona zavisi od napona i struje u optimalnoj tački, gustine sunčevog zračenja, površine ćelije, kao i samog faktora popunjenosti. Povećanjem vrijednosti  $U_{\text{oc}}$  i  $I_{\text{sc}}$  dolazi do većeg faktora popunjenosti, a samim tim i do više efikasnosti solarne ćelije [25].

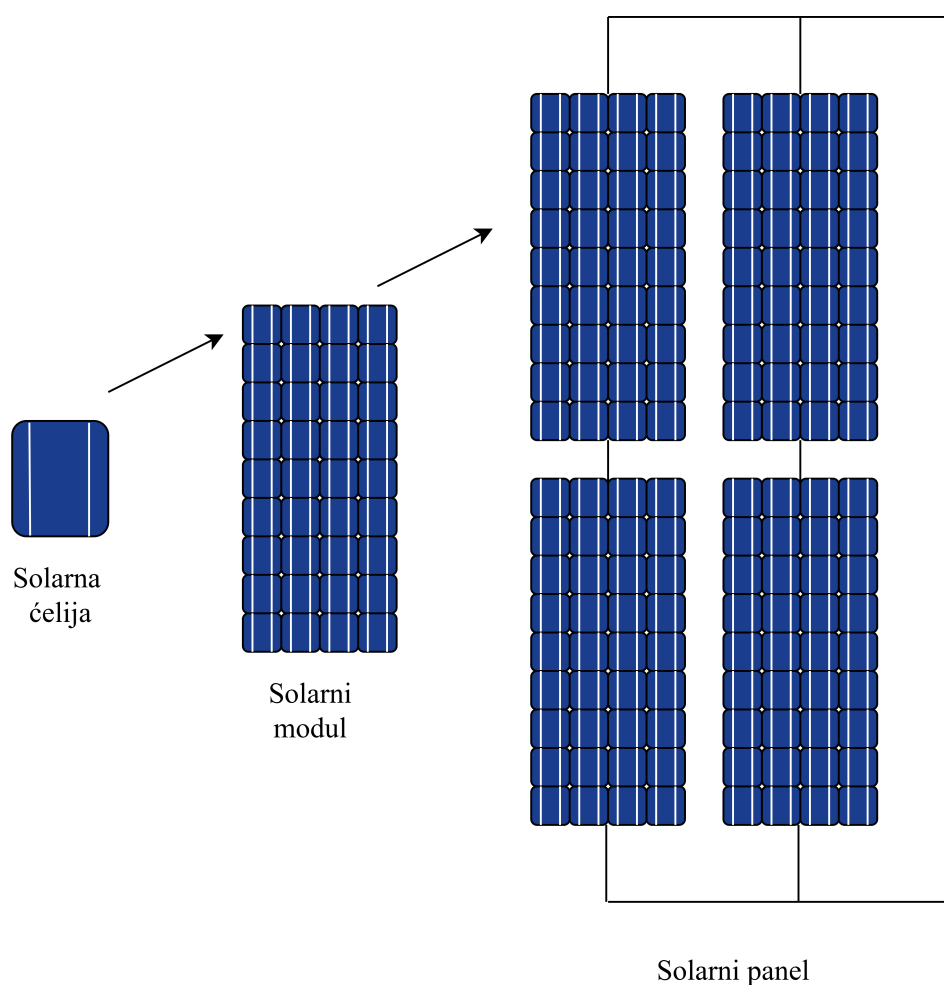
### 1.3.3 Povezivanje solarnih ćelija: formiranje modula i panela

Solarna ćelija predstavlja osnovni funkcionalni element PV sistema. Ipak, zbog niskog napona koji proizvodi u prosjeku oko 0.5V gotovo nikada se ne koristi samostalno u praktičnim primjenama. Umjesto toga, više ćelija se povezuje u cjelinu i formira se solarni modul, koji omogućava dobijanje korisnih vrijednosti napona i snage.

### 1.3. MODELOVANJE SOLARNE ČELIJE

Solarni moduli nastaju povezivanjem većeg broja solarnih ćelija u seriju, paralelno ili kombinovano u zavisnosti od željenih električnih karakteristika. Najčešće se koriste moduli koji sadrže 36 ćelija povezanih u seriju, čime se postiže izlazni napon od približno 12V. Sve češće se primjenjuju i moduli sa 72 ćelije, koji omogućavaju veću fleksibilnost serijskim povezivanjem svih ćelija dobija se napon od 24V, dok se paralelnim povezivanjem dvije serijske grupe od po 36 ćelija može formirati modul sa izlazom od 12V.

Na slici 1.22 prikazana je struktura solarnog sistema kroz tri osnovna nivoa: od pojedinačne ćelije, preko modula pa sve do panela, čime je jasno prikazana njihova međusobna povezanost i funkcionalna uloga u cjelokupnom PV sistemu.

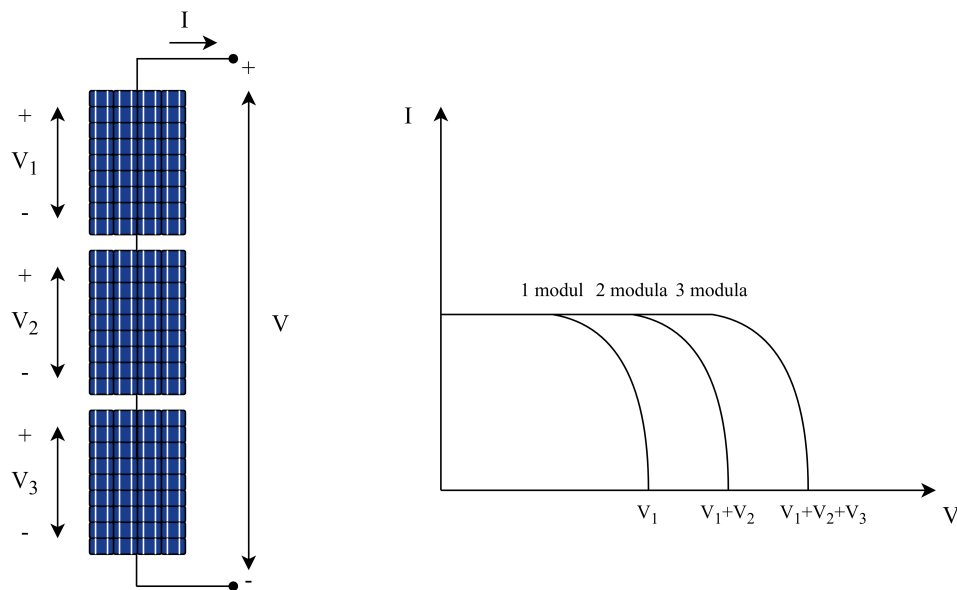


Slika 1.22: Solarna ćelija, modul i panel

PV moduli se povezuju u panele kako bi se ostvarili potrebni izlazni parametri sistema. Serijskim povezivanjem modula povećava se ukupni napon na izlazu, dok se paralelnim vezivanjem ostvaruje povećanje izlazne struje. Zbog toga je pri projektovanju PV sistema od suštinske važnosti pravilno definisati broj modula koji će biti povezani serijski i paralelno, kako bi se obezbijedila tražena izlazna snaga.

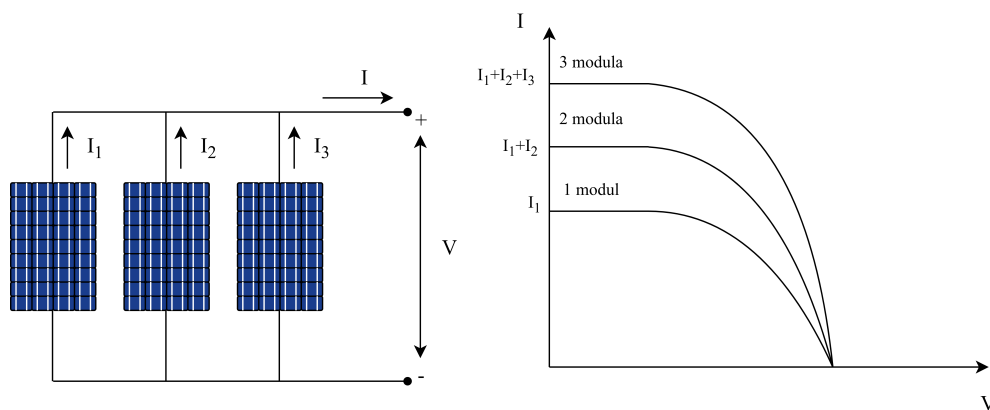
U slučaju serijskog spoja, kroz sve module protiče ista struja, dok se ukupni izlazni napon dobija kao zbir napona svakog pojedinačnog modula. Promjenom izlaznog napona,

I–V karakteristika se pomjera duž  $V$ -ose, što je prikazano na slici 1.23.



Slika 1.23: Povećanje izlaznog napona pri serijskom spoju PV modula

Kod paralelnog povezivanja, svi moduli imaju isti izlazni napon, dok ukupna izlazna struja predstavlja zbir struja koje generišu pojedinačni moduli. U zavisnosti od promjene vrijednosti izlazne struje, I–V karakteristika se pomjera duž  $I$ -ose, što je ilustrovano na slici 1.24.



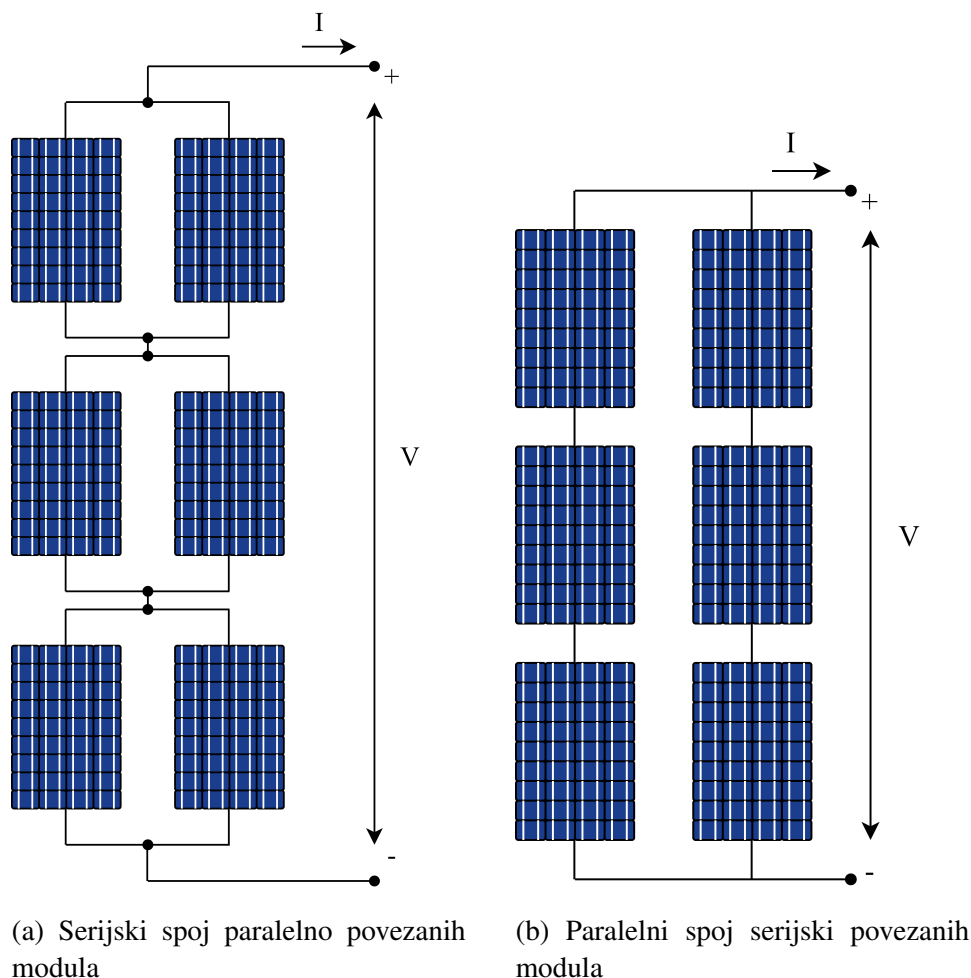
Slika 1.24: Povećanje izlazne struje pri paralelnom spoju PV modula

Kada je neophodno ostvariti visoku izlaznu snagu fotonaponskog (PV) sistema, moduli se najčešće povezuju u kombinovane konfiguracije koje obuhvataju i serijsko i paralelno povezivanje. Takav pristup omogućava formiranje panela sa prilagođenim izlaznim parametrima, kako u pogledu napona, tako i u pogledu struje. Ukupna I–V karakteristika tako povezanih panela predstavlja superpoziciju I–V krivih svih pojedinačnih modula u sistemu, pri čemu se oblik rezultatne krive značajno razlikuje u zavisnosti od načina povezivanja.

### 1.3. MODELOVANJE SOLARNE ČELIJE

Postoje dvije osnovne topologije ovakvog kombinovanog povezivanja. Prva topologija podrazumijeva da se moduli najprije povezuju serijski u nizove, a zatim se ti nizovi povezuju paralelno, kako bi se povećala struja bez gubitka napona (slika 1.25a). Ova struktura omogućava dobijanje višeg napona uz proporcionalno povećanje ukupne struje u skladu s brojem paralelnih grana. Druga konfiguracija funkcioniše obrnutim redoslijedom moduli se prvo povezuju paralelno u grupe, nakon čega se te grupe povezuju serijski (slika 1.25b). Na taj način se postiže povećanje napona kroz serijske veze, dok se osnovna struja određuje paralelnim granama unutar grupa.

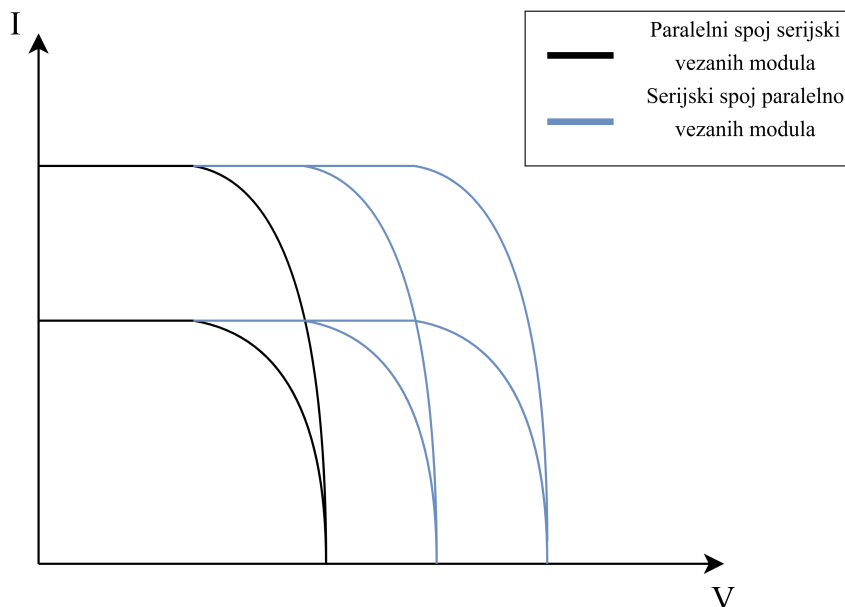
Zbog tehničke jednostavnosti pri zamjeni i održavanju, prva topologija se u praksi pokazala efikasnijom i pouzdanijom. U slučaju kvara jednog serijskog niza, moguće ga je izolovati ili isključiti iz rada bez potpunog ispadanja cijelog sistema. Ova fleksibilnost značajno olakšava servisne intervencije i doprinosi većoj pouzdanosti sistema u cjelini, što je naročito važno u većim PV postrojenjima gdje dostupnost i stabilnost napajanja igraju ključnu ulogu.



Slika 1.25: Kombinovane konfiguracije povezivanja PV modula

Na slici 1.26 prikazane su uporedne I–V karakteristike za pomenute konfiguracije. Kriva koja predstavlja paralelnu vezu serijski povezanih modula karakteriše se povećanja

njem ukupne izlazne struje, a rezultat je širenje krive duž  $I$ -ose. Ovakvo ponašanje odražava sposobnost sistema da isporuči veću količinu električne struje pri konstantnom naponu. Nasuprot tome, kod serijskog spoja paralelno povezanih modula izraženije je povećanje napona, pri čemu se kriva proteže po  $V$ -osi, što omogućava napajanje potrošača koji zahtijevaju viši ulazni napon. Oba pristupa imaju primjenu u zavisnosti od specifičnih potreba sistema[25].



Slika 1.26: I–V karakteristike za dvije topologije kombinovanog povezivanja PV modula

#### 1.3.4 Dvodiodni model solarne ćelije

Za razliku od jednodiodnog modela, dvodiodni model solarne ćelije uključuje dvije diode, čime se postiže veća preciznost u modelovanju realnog ponašanja ćelije, posebno pri niskim nivoima osvijetljenosti i u uslovima niskih temperatura [35, 36]. Ovaj model detaljnije opisuje rekombinacione gubitke u materijalu, ali za posljedicu ima povećanje broja parametara koje je potrebno identifikovati, što dodatno komplikuje računsku obradu [34, 37].

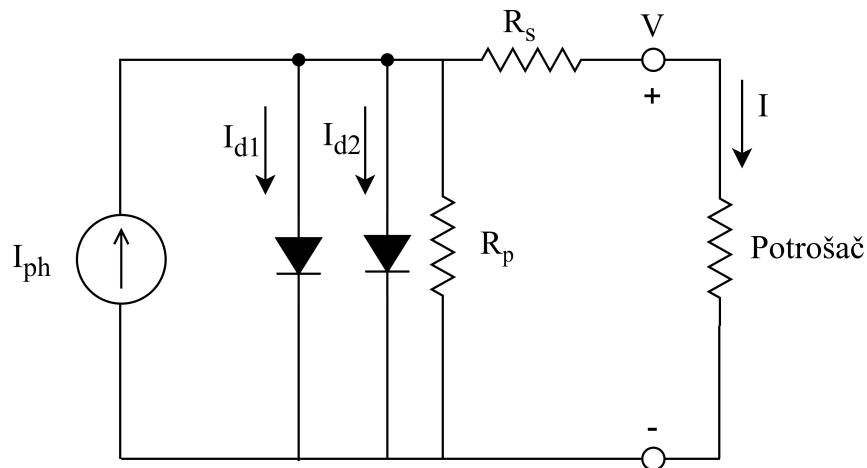
Matematičke jednačine koje definišu dvodiodni model su nelinearne i implicitne, što znači da ih nije moguće riješiti direktnim analitičkim metodama. U stručnoj literaturi prepoznaju se dva osnovna pristupa za estimaciju parametara ovog modela. Prvi pristup podrazumijeva numeričku optimizaciju kojom se teorijska I-V karakteristika usklađuje sa eksperimentalno dobijenim podacima [36, 37]. Drugi metod se oslanja na korišćenje tačno određenih karakterističnih tačaka sa I-V krive (poput napona u praznom hodu, struje kratkog spoja, tačke maksimalne snage itd.), koje su najčešće dostupne iz tehničkih specifikacija proizvođača [34, 35].

Drugi metod je dominantan u industrijskoj praksi zbog jednostavne primjene i brzine izračuna. Međutim, njegova preciznost i konvergencija rješenja u velikoj mjeri zavise od

### 1.3. MODELOVANJE SOLARNE ČELIJE

pravilnog izbora početnih vrijednosti za parametre modela. Pogrešna inicijalizacija može dovesti do nestabilnosti i neuspjeha u pronalaženju validnog rješenja [34].

U cilju preciznijeg modelovanja rada solarne ćelije, na slici 1.27 prikazan je dvodiodni ekvivalentni model. Ovaj model predstavlja unapređenje u odnosu na jednodiodni, jer omogućava realističnije opisivanje nelinearnog odnosa između struje i napona u različitim radnim uslovima.



Slika 1.27: Električni ekvivalent dvodiodnog modela solarne ćelije

U cilju što tačnijeg matematičkog opisivanja ponašanja solarne ćelije, izlazna struja modela sa dvije diode izražava se sljedećom relacijom:

$$I = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - \left( \frac{V + IR_s}{R_p} \right), \quad (1.17)$$

gdje su struje kroz diode definisane kao:

$$I_{d1} = I_{s1} \left[ \exp \left( \frac{V + IR_s}{n_1 V_t} \right) - 1 \right], \quad (1.18)$$

$$I_{d2} = I_{s2} \left[ \exp \left( \frac{V + IR_s}{n_2 V_t} \right) - 1 \right], \quad (1.19)$$

gdje su:

$I$  – izlazna struja ćelije [A],

$I_{ph}$  – fotostruja generisana sunčevim zračenjem [A],

$I_{s1}, I_{s2}$  – zasićene struje dioda [A],

$n_1, n_2$  – faktori idealnosti dioda [bezdimenziona veličina],

$V$  – izlazni napon ćelije [V],

$R_s$  – serijska otpornost [ $\Omega$ ],

$R_p$  – paralelna otpornost [ $\Omega$ ],

$V_t$  – termalni napon [V].

Kako bi se smanjila kompleksnost numeričkog rješavanja u praksi se često koristi aproksimacija gdje se uzima da su faktori idealnosti  $n_1 = 1$ , a  $n_2 = 2$ , što odgovara predloženim vrijednostima zasnovanim na Shockley-jevom modelu difuzionih i rekombinacionih struja [34, 35, 37]. Iako ovaj pristup nije univerzalno tačan, u mnogim slučajevima pruža zadovoljavajuću preciznost u simulacijama.

Primjenom pomenute aproksimacije, izrazi za  $I_{d1}$  i  $I_{d2}$  mogu se pojednostaviti, pa izlazna struja dobija sljedeći oblik:

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left[ \exp \left( \frac{V + IR_s}{V_t} \right) - 1 \right] - I_{s2} \left[ \exp \left( \frac{V + IR_s}{2V_t} \right) - 1 \right] - \left( \frac{V + IR_s}{R_p} \right). \quad (1.20)$$

Ovakvom modifikacijom smanjuje se broj nepoznatih parametara sa sedam na pet, što značajno olakšava proces identifikacije modela iz eksperimentalnih podataka [35, 36].

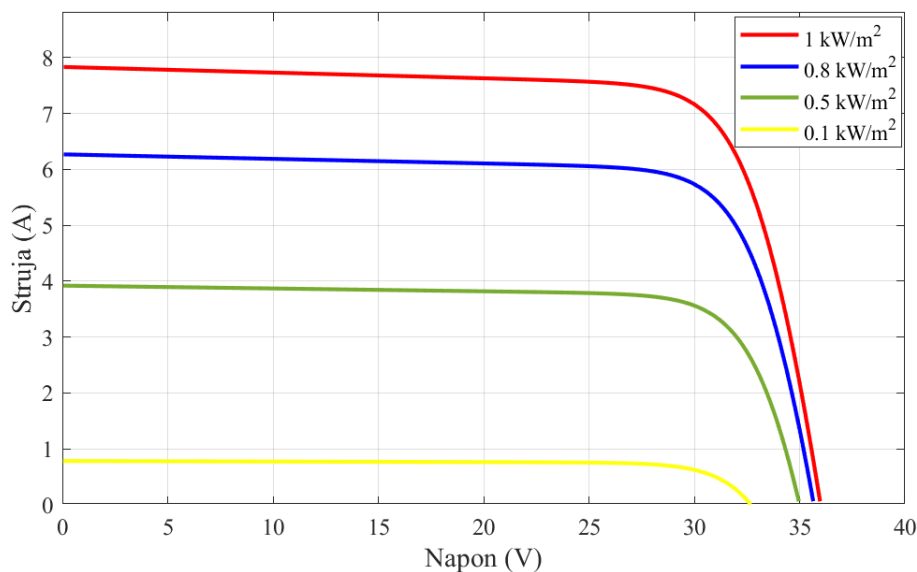
## 1.4 Uticaj iradijanske i temperature na solarni panel

Radni parametri PV panela, uključujući napon, struju i izlaznu snagu, značajno zavise od spoljašnjih faktora, među kojima se iradijansa i temperatura izdvajaju kao najuticajniji [25]. Shodno tome, efikasno praćenje tačke maksimalne snage zahtijeva detaljno razumijevanje ponašanja PV sistema pod različitim uslovima okoline.

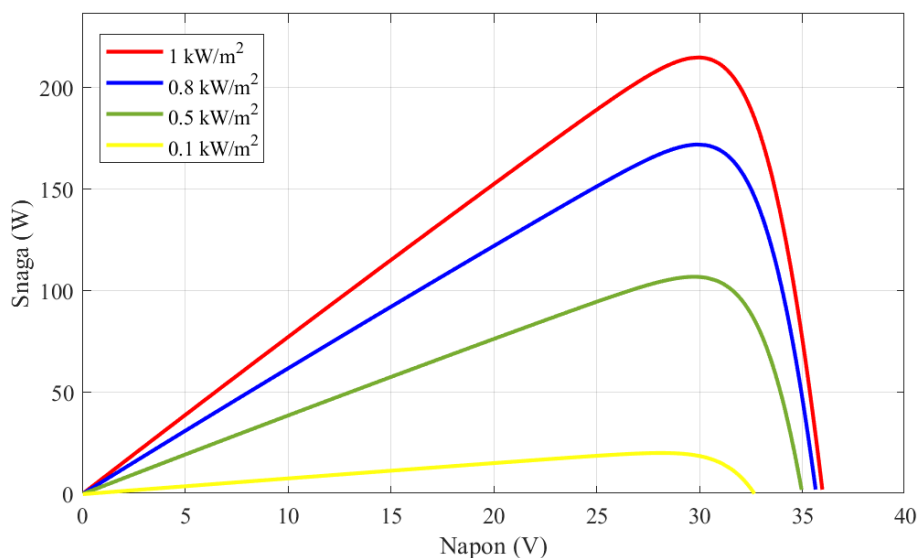
### 1.4.1 Uticaj iradijanske

Iradijansa predstavlja gustinu sunčevog zračenja koje pada na površinu PV panela i ima direktan uticaj na generisanu električnu struju. Povećanjem iradijanske, povećava se broj fotona koji dopijeva do aktivnog sloja solarne ćelije, što uzrokuje stvaranje većeg broja nosilaca naelektrisanja. Kao posljedica toga, dolazi do povećanja struje i ukupne izlazne snage sistema.

Važno je istaći da napon u MPP ostaje relativno stabilan u širokom opsegu nivoa osunčanja, dok se snaga mijenja pretežno usljed promjena u struji. Ova osobina omogućava predvidljivije ponašanje PV sistema u promjenljivim vremenskim uslovima, što je od velikog značaja za dizajn i implementaciju efikasnih MPPT algoritama [25].



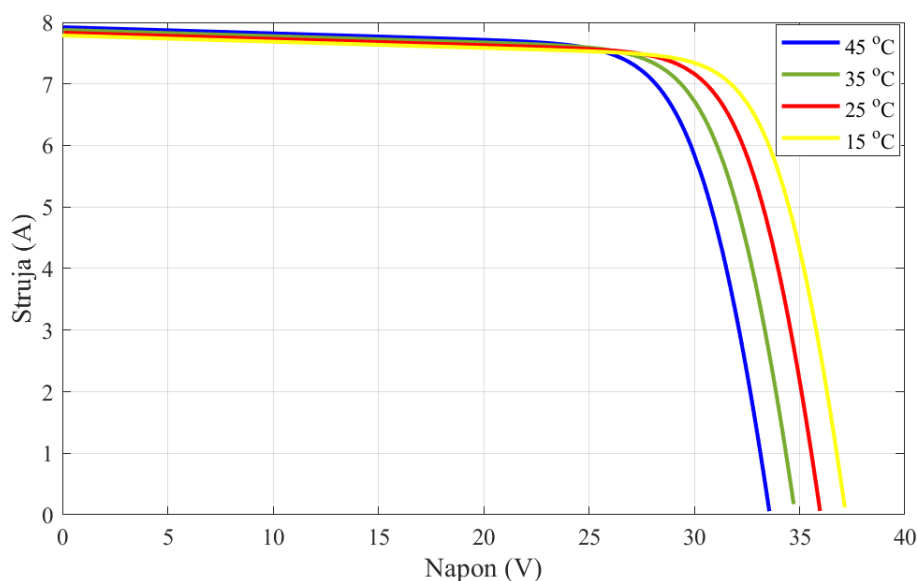
Slika 1.28: I-V karakteristike za različite vrijednosti iradijance pri konstantnoj temperaturi



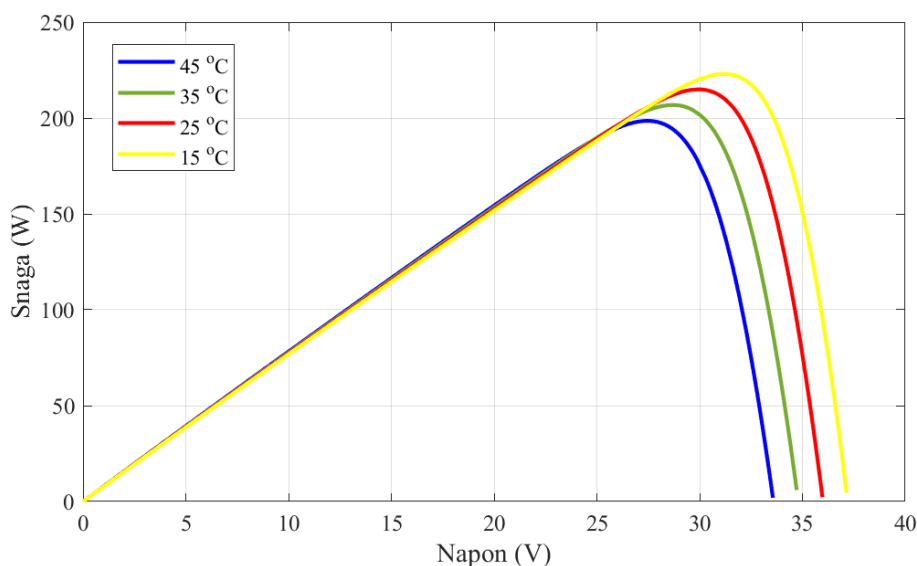
Slika 1.29: P-V karakteristike za različite vrijednosti temperature pri konstantnoj iradijansi

## 1.4.2 Uticaj temperature

Za razliku od iradijance, koja generalno pozitivno utiče na rad PV panela, porast temperature ima nepovoljan efekat. Povećanje temperature dovodi do smanjenja napona solarne ćelije, prvenstveno usljed rasta unutrašnjih gubitaka i izraženijih termičkih uticaja. Iako dolazi do blagog porasta struje, taj efekat nije dovoljan da nadoknadi gubitak u naponu, što rezultira padom ukupne izlazne snage PV sistema [25].



Slika 1.30: I-V karakteristike za različite vrijednosti temperature pri konstantnoj iradijansi



Slika 1.31: P-V karakteristike za različite vrijednosti iradijance pri konstantnoj temperaturi

Opisane karakteristike jasno ukazuju na važnost primjene dinamičkih MPPT metoda koje su sposobne da u realnom vremenu odgovore na promjene uslova okoline. Posebno je značajno da algoritam efikasno kompenzuje negativne uticaje varijacija temperature i iradijance, kako bi se obezbijedila optimalna tačka rada i postigla maksimalna iskorišćenost energetskeg potencijala PV sistema [25].

## Glava 2

# Klasični pristupi praćenja tačke maksimalne snage (MPPT metode)

Radna tačka PV sistema zavisi od odnosa između napona i struje, koji se mijenja usljed varijacija u sunčevoj iradijansi i temperaturi. Na osnovu karakteristike napon–struja ( $I-V$ ) i snaga–napon ( $P-V$ ) jasno je da za svaki skup uslova postoji jedna optimalna tačka MPP, pri kojoj PV sistem isporučuje najveću moguću snagu.

Međutim, tačka maksimalne snage nije fiksna, već se mijenja tokom dana u zavisnosti od klimatskih uslova. Kako bi se sistem održavao u režimu maksimalne efikasnosti, neophodna je implementacija algoritama koji u realnom vremenu prate ovu tačku i prilagođavaju radni napon ili struju sistema. Ovi algoritmi se nazivaju MPPT metode.

U ovom poglavlju biće predstavljeni klasični pristupi MPPT-u, koji se najčešće koriste zbog svoje jednostavne implementacije i relativno dobrih performansi u stabilnim uslovima. Fokus će biti na dvije metode: P&O i IC, koje su postale standard u mnogim komercijalnim rješenjima. Biće opisana njihova osnovna načela rada, prednosti i ograničenja, kao i njihov odgovor na promjene u uslovima osunčanosti i temperature.

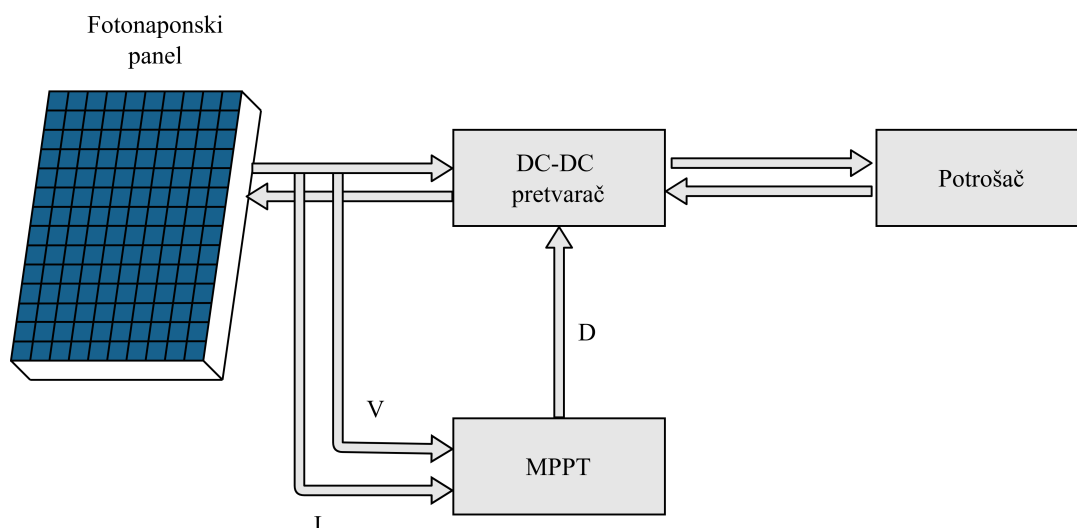
### 2.1 Princip rada MPPT sistema sa DC-DC konvertorom

Radna tačka PV sistema zavisi od uslova osunčanosti i temperature, koji se konstantno mijenjaju tokom dana. Kako bi se osigurao rad u režimu maksimalne isporuke snage, savremeni PV sistemi koriste MPPT algoritme. Osnovna funkcija MPPT algoritma jeste da, na osnovu mjerenja trenutnih vrijednosti napona  $V$  i struje  $I$  u realnom vremenu odredi upravljačku veličinu kojom se optimizuje rad sistema.

U tipičnoj konfiguraciji, MPPT algoritam je integrisan sa DC–DC pretvaračem koji vrši prilagođavanje napona PV panela potrebama potrošača ili mreže. Uobičajen pristup u implementaciji MPPT algoritama podrazumijeva direktno upravljanje odnosom impulsa (eng. *duty cycle* -  $D$ ), čime se eliminiše potreba za dodatnim regulatorom napona. Na taj način, algoritam neposredno određuje novu vrijednost  $D$ , koja se zatim primjenjuje

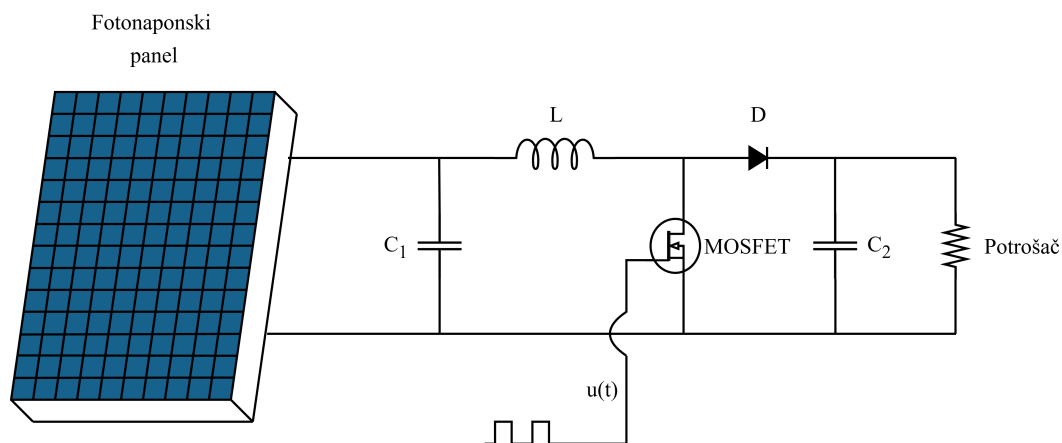
na PWM upravljački modul DC-DC pretvarača, što omogućava prilagođavanje ulazno-izlaznih karakteristika pretvarača u skladu sa lokacijom tačke maksimalne snage. U tu svrhu najčešće se koristi boost ili buck-boost topologija pretvarača, zavisno od potrebnog nivoa konverzije i radnog režima sistema [10, 38].

Ovakva arhitektura omogućava jednostavniju implementaciju i bržu dinamiku odziva, što je posebno značajno u uslovima promjenljive iradijancije. Na slici 2.1 prikazana je blok-šema implementacije MPPT algoritma koji direktno upravlja radom DC-DC pretvarača.



Slika 2.1: Blok-šema PV sistema

U nastavku je dat opis principa rada MPPT algoritma koji se implementira putem DC-DC boost pretvarača. Ovakva topologija omogućava efikasno usklađivanje izlazne snage PV izvora sa zahtjevima potrošača, pri čemu se upravljanje vrši pomoću impulsno-širinske modulacije (eng. *Pulse Width Modulation – PWM*). Promjenom radnog ciklusa PWM signala reguliše se rad prekidačkog elementa, čime se ostvaruje kontinuirano prilagođavanje radne tačke sistema kako bi se osigurao rad u zoni MPP.



Slika 2.2: Šematski prikaz PV sistema sa Boost pretvaračem

Boost čoper, koji se široko primjenjuje u fotonaponskim sistemima za transformaciju napona, predstavlja jednu od najčešće korišćenih topologija DC-DC pretvarača. Njegova osnovna funkcija je povećanje ulaznog napona na viši nivo, čime se obezbjeđuje efikasniji prenos energije ka potrošaču ili energetsom skladištu. Rad boost konvertora može se opisati sljedećom matematičkom relacijom:

$$V = V_o(1 - D), \quad (2.1)$$

gdje su:

$V$  – izlazni napon pretvarača [V],

$V_o$  – ulazni napon sa PV panela [V],

$D$  – faktor popunjenosti PWM signala [bezdimezionna veličina].

U ovoj konfiguraciji, tranzistor unutar boost čopera se periodično uključuje i isključuje pomoću PWM signala čiji radni ciklus određuje vrijednost faktora popunjenosti  $D$ . Vrijednost  $D$  može se kretati u intervalu od 0 do 1, pri čemu povećanje faktora popunjenosti dovodi do smanjenja izlaznog napona, dok njegovo smanjenje uzrokuje povećanje napona na izlazu. Ova kontrola omogućava efikasnu konverziju energije u skladu sa zahtjevima sistema [38].

## 2.2 Klasifikacija i pregled MPPT algoritama

Efikasnost PV sistema u velikoj mjeri zavisi od sposobnosti da u realnom vremenu održava radnu tačku u blizini tačke maksimalne snage (MPP), uprkos stalnim promjenama osunčanosti i temperature. Upravo iz tog razloga razvijen je veliki broj algoritama za praćenje MPP-a, čiji se principi rada, složenost implementacije i osjetljivost na spoljašnje uslove međusobno razlikuju.

Jedna od najčešće korišćenih klasifikacija MPPT algoritama temelji se na zavisnosti algoritma od poznavanja modela PV sistema. Na osnovu toga, metode se mogu svrstati u dvije osnovne kategorije: metode koje ne zahtijevaju poznavanje matematičkog modela sistema (*model-free*) i metode koje eksplicitno koriste parametre modela (*model-based*) [10, 11].

*Model-free* algoritmi oslanjaju se isključivo na trenutna mjerenja napona i struje PV modula, bez potrebe za informacijama o unutrašnjim parametrima sistema. Njihove glavne prednosti su jednostavnost implementacije, niski hardverski zahtjevi i relativno dobra robusnost u stabilnim uslovima rada. Međutim, u uslovima brze promjene iradijance ili temperature, ove metode mogu pokazati oscilacije oko MPP-a i spor odziv. Najpoznatiji predstavnici ove grupe su metode P&O i IC [9, 10, 11].

Suprotno tome, *model-based* metode zahtijevaju detaljnije informacije o karakteristikama PV sistema – kao što su fotostruja, napon otvorenog kola, struja zasićenja diode,

### 2.3. METODA POMJERAJA I POSMATRANJA (ENG. PERTURB AND OBSERVE – P&O)

serijski otpori i drugi parametri. Ove metode omogućavaju bržu i precizniju adaptaciju na promjenljive uslove rada, ali su ujedno i složenije za implementaciju, često zahtijevajući dodatne senzore za mjerenje iradijance i temperature. Taj nedostatak se djelimično može prevazići korišćenjem algoritama za estimaciju ulaznih parametara [39, 40].

Posebnu podgrupu unutar model-based pristupa čine *soft computing* metode, koje primjenjuju inteligentne algoritme sposobne da efikasno funkcionišu u nelinearnim, neizvjesnim i dinamičkim uslovima. U ovu grupu spadaju vještačke neuronske mreže (eng. *Artificial Neural Networks – ANN*), fazi logika (eng. *Fuzzy Logic*), adaptivni neuro-fazi sistemi (eng. *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System – ANFIS*) i genetski algoritmi (eng. *Genetic Algorithms – GA*) [12, 14, 15, 41]. Njihova primjena omogućava visok nivo fleksibilnosti i prilagodljivosti bez potrebe za preciznim matematičkim modelom. Genetski algoritmi se često koriste za optimizaciju strukture fazi kontrolera i poboljšanje konvergencije MPPT strategije [40], dok se u novijim radovima primjenjuju i hibridne optimizacione tehnike, poput GWO–PSO pristupa, koji pokazuju odlične performanse u uslovima djelimičnog zasjenjenja [42].

Pored navedenih pristupa, značajan broj model-based metoda koristi aproksimacije PV modula putem ekvivalentnih električnih kola (npr. jednodiodni i dvodiodni modeli), čime se omogućava precizna simulacija ponašanja PV sistema u različitim uslovima rada [31, 36].

### 2.3 Metoda pomjeraja i posmatranja (eng. *Perturb and Observe – P&O*)

P&O algoritam ubraja se među najčešće korišćene metode za pronalaženje MPP-a u PV sistemima. Princip rada zasniva se na povremenom mijenjanju radne tačke PV generatora i praćenju promjene izlazne snage, na osnovu čega se određuje da li će sljedeća korekcija napona ili struje biti u istom smjeru ili će se promijeniti pravac perturbacije. Popularnost metode proističe iz jednostavne realizacije, malih zahtjeva za resursima i pouzdanog rada pri umjerenim promjenama iradijance i temperature [43].

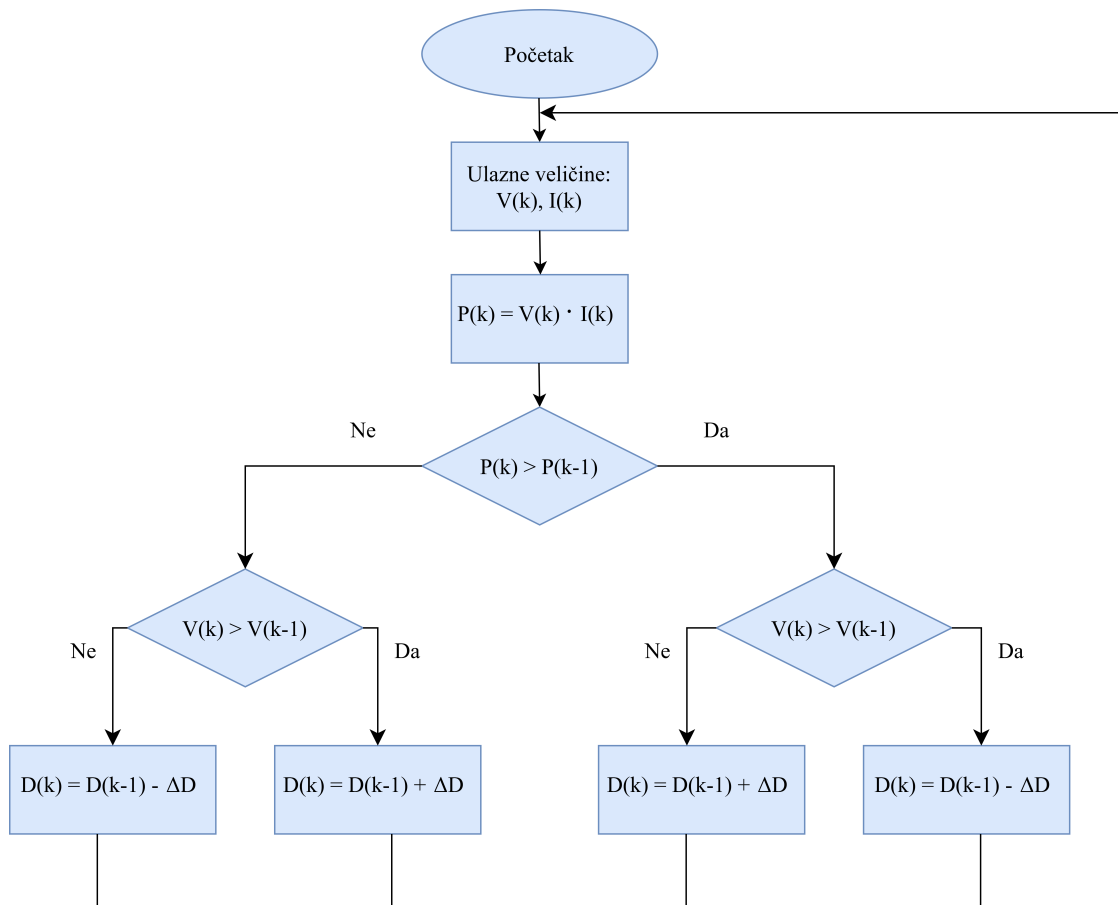
Rad algoritma odvija se u diskretnim koracima podešavanjem radnog ciklusa DC-DC pretvarača, čime se indirektno mijenja napon jednosmjerne veze između fotonaponskog sistema i energetskog pretvarača. Kada povećanje napona izazove rast izlazne snage, radna tačka nastavlja kretanje u istom pravcu kao i u prethodnom koraku, dok se u suprotnom smjer perturbacije mijenja, tj. invertuje se predznak promjene napona. Na taj način radna tačka osciluje oko MPP-a, a napon se koriguje u istom pravcu sve dok je ispunjen uslov:

$$\frac{dP}{dV} > 0. \quad (2.2)$$

Na slici 2.3 dat je blok dijagram koji prikazuje princip rada P&O algoritma u PV

### 2.3. METODA POMJERAJA I POSMATRANJA (ENG. PERTURB AND OBSERVE – P&O)

sistemu. Dijagram prikazuje logiku odlučivanja zasnovanu na poređenju trenutnih i prethodnih vrijednosti izlazne snage i napona, na osnovu čega se određuje smjer promjene radnog ciklusa DC-DC pretvarača.



Slika 2.3: Blok dijagram P&O algoritma za praćenje tačke maksimalne snage.

Osnovna funkcija P&O algoritma jeste određivanje smjera pomjerenja radne tačke fotonaponskog sistema na osnovu periodičnog povećanja ili smanjenja napona, odnosno faktora popunjenosti DC-DC pretvarača. Nakon svake perturbacije posmatra se promjena izlazne snage kako bi se procijenilo da li se radna tačka približila tački maksimalne snage. Ukoliko je u trenutnom koraku izlazna snaga  $P(k)$  veća u odnosu na prethodno izmjerenu vrijednost  $P(k-1)$ , smjer perturbacije napona  $V(k)$  ostaje nepromijenjen. Suprotno tome, ako dolazi do opadanja izlazne snage, pravac korekcije napona se mijenja, odnosno invertuje se prethodni predznak promjene. Na ovaj način radna tačka se kontinuirano usmjerava ka tački maksimalne snage, dok oscilacije nastaju usljed periodičnog povećanja ili smanjenja napona za iznos  $\Delta V$  [44, 45].

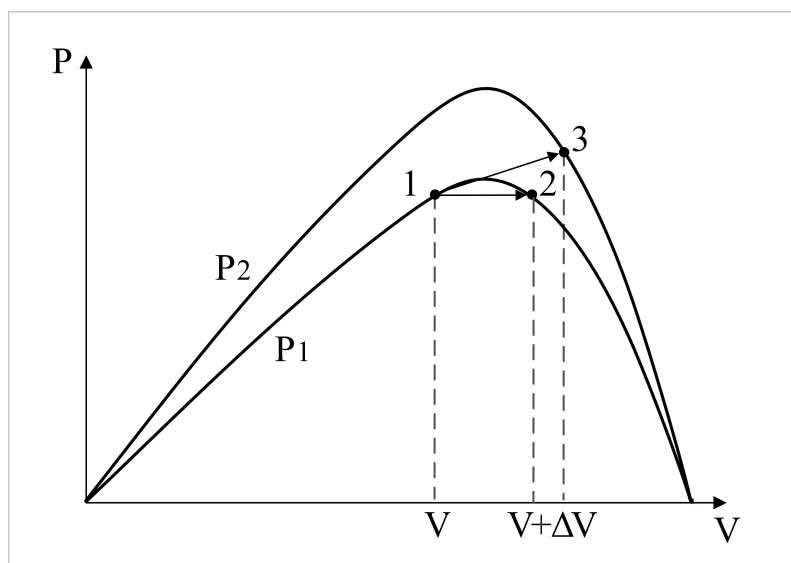
Princip odlučivanja P&O algoritma prikazan je u tabeli 2.1, gdje je na osnovu kombinacije promjene napona  $\Delta V$  i promjene snage  $\Delta P$  definisan smjer u kojem će se izvršiti sljedeća perturbacija.

Tabela 2.1: Logika odlučivanja P&O algoritma

$\Delta V$	$\Delta P$	Sljedeća perturbacija
+	+	+
+	-	-
-	+	-
-	-	+

Jedno od najvažnijih ograničenja P&O algoritma posebno je izraženo u uslovima kada dolazi do naglih promjena atmosferskih parametara, naročito kod brzog povećanja iradijancije. Rad PV možemo posmatrati kroz situaciju u kojoj se početna radna tačka nalazi na položaju 1 na karakteristici P1, veoma blizu MPP. U stabilnim uslovima osunčanja, budući da su u prethodnom koraku napon i snaga rasli, perturbacija napona  $\Delta V$  zadržava isti predznak, pa se radna tačka postepeno pomjera do položaja 2, ostajući u zoni blizu optimalne tačke i bez značajnog uticaja na ukupnu efikasnost sistema.

Međutim, u slučaju iznenadnog porasta iradijancije dolazi do naglog povećanja izlazne snage, dok algoritam nastavlja korekciju napona istim predznakom, ne uzimajući u obzir promijenjene uslove rada. Na taj način radna tačka prelazi u položaj 3, koji je primjetno udaljen od MPP-a. Ako se povećanje iradijancije nastavi, radna tačka se još više udaljava od optimalnog radnog režima, što dovodi do značajnih gubitaka u prikupljanju energije. Ova pojava, poznata kao **klizanje radne tačke**, jasno je ilustrovana na slici 2.4. Takvo ponašanje je posebno nepovoljno u sistemima s čestim promjenama osunčanja, jer smanjuje ukupnu isporučenu energiju u dužem vremenskom intervalu. Zbog toga se u novijim pristupima razvijaju modifikovane verzije P&O algoritma s ciljem da se efekat klizanja značajno umanj[10, 44, 46, 47].



Slika 2.4: Ilustracija klizanja radne tačke kod P&O algoritma.

## 2.4 Metoda inkrementalne provodljivosti (eng. *Incremental Conductance – IC*)

IC metoda spada među najpouzdanije MPPT metode u PV sistemima. Osnovni princip zasniva se na praćenju nagiba P–V krive, čime se precizno određuje položaj radne tačke u odnosu na MPP. Na ovaj način moguće je brzo reagovati na promjene iradijance i temperature, uz smanjene oscilacije oko tačke maksimalne snage u odnosu na klasične metode, poput P&O metode [48, 49, 50].

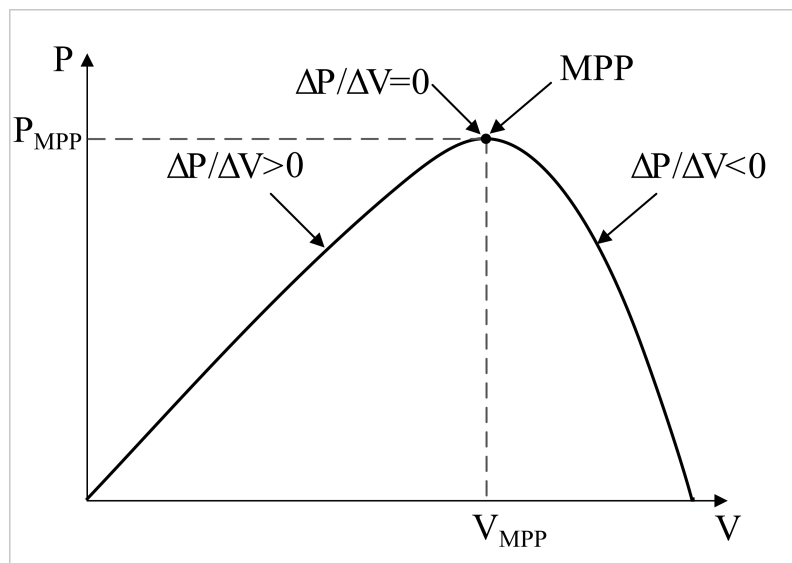
Metoda inkrementalne provodljivosti se zasniva na praćenju nagiba P–V krive PV panela, pri čemu važe sljedeći uslovi:

$$\frac{\partial P}{\partial V} = 0 \text{ – u tački MPP,} \quad (2.3a)$$

$$\frac{\partial P}{\partial V} > 0 \text{ – lijevo od MPP,} \quad (2.3b)$$

$$\frac{\partial P}{\partial V} < 0 \text{ – desno od MPP.} \quad (2.3c)$$

Ovi uslovi su prikazani na slici 2.5.



Slika 2.5: Prikaz kriterijuma metode inkrementalne konduktanse na P–V karakteristici

Tada se zavisnost snage od napona može zapisati u obliku:

$$\frac{\partial P}{\partial V} = \frac{\partial(V \cdot I)}{\partial V} = I + V \cdot \frac{\partial I}{\partial V}, \quad (2.4)$$

na osnovu čega se formulišu kriterijumi za određivanje položaja radne tačke u odnosu

na MPP [51]:

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} - \text{u tački MPP,} \quad (2.5a)$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V} - \text{lijevo od MPP,} \quad (2.5b)$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V} - \text{desno od MPP.} \quad (2.5c)$$

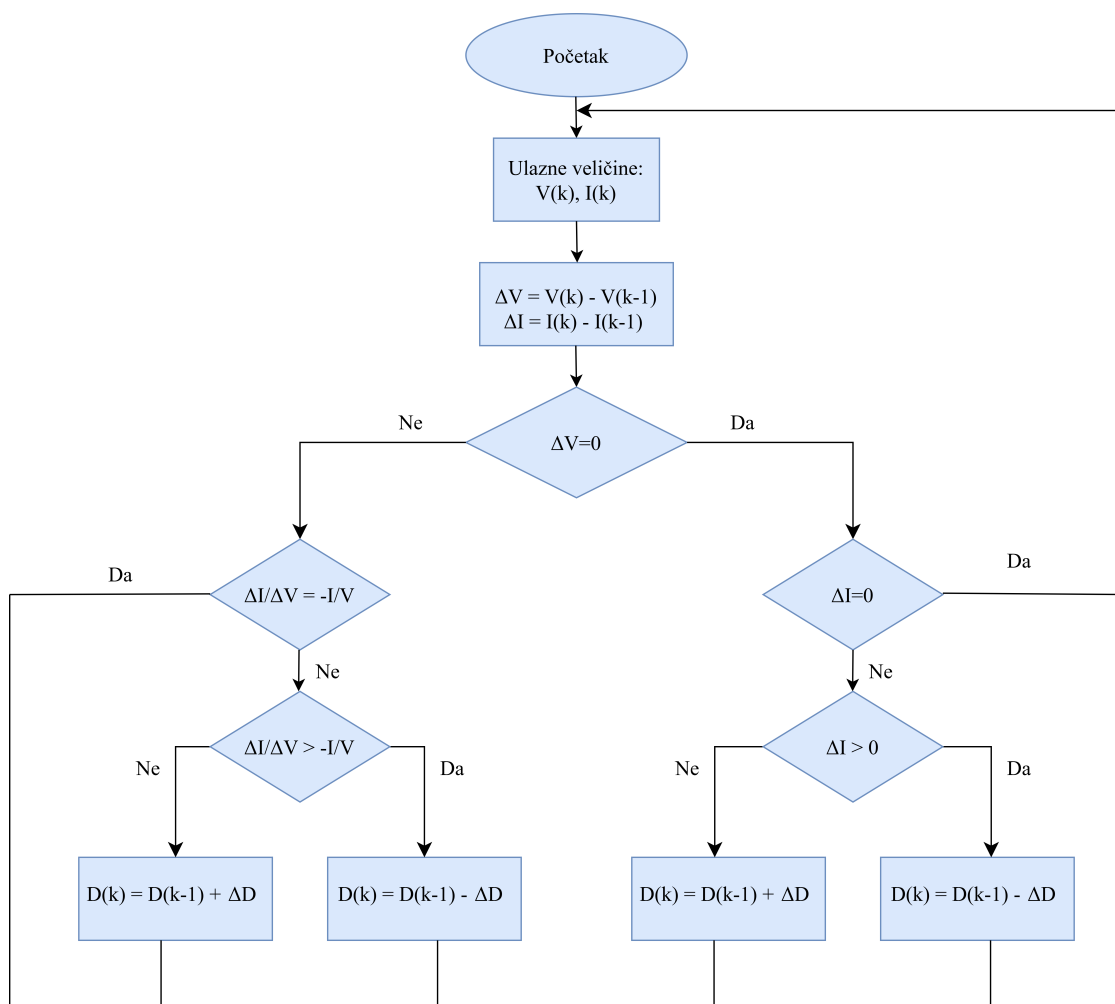
Praktično, optimalna radna tačka se kontinuirano prati poređenjem trenutne provodljivosti ( $I/V$ ) sa inkrementalnom provodljivosti ( $\Delta I/\Delta V$ ). Na osnovu dobijenog rezultata određuje se smjer korekcije radnog napona, čime se radna tačka pomjera ka MPP-u [52].

Glavna prednost ove metode, u poređenju sa klasičnom P&O metodom, ogleda se u mogućnosti preciznog određivanja položaja radne tačke u realnom vremenu, bez izazivanja značajnih oscilacija u stacionarnom stanju. Ova karakteristika omogućava stabilan rad i brži odziv u uslovima naglih promjena iradijance i temperature [52, 53].

Dodatno, kada se dostigne optimalna tačka, metoda detektuje MPP i zaustavlja dalju promjenu napona, čime se smanjuju energetske gubici i povećava ukupna efikasnost sistema [54]. Ipak, IC metoda zahtijeva precizna i brza mjerenja struje i napona, što uslovljava složeniji hardver i povećanu računarsku kompleksnost u odnosu na jednostavnije MPPT metode [51].

Kako bi se dodatno smanjile oscilacije i skratilo vrijeme konvergencije, savremena istraživanja predlažu primjenu varijabilnog koraka perturbacije. Na taj način, koraci podešavanja napona su veći pri udaljavanju od MPP-a radi bržeg odziva, dok se u blizini MPP-a smanjuju radi postizanja visoke preciznosti [51, 54].

Blok dijagram metode inkrementalne konduktanse prikazan je na slici 2.6.



Slika 2.6: Blok dijagram metode inkrementalne konduktanse

## 2.5 Metoda konstantne struje (eng. *Constant Current – CC*)

Metoda konstantne struje (eng. *Constant Current – CC*) spada u najjednostavnije tehnike MPPT-a u PV sistemima. Princip rada zasniva se na činjenici da se struja u MPP mijenja znatno manje u odnosu na napon pri promjenama iradijancije i temperature, što omogućava približno konstantnu vrijednost struje u MPP-u [10].

Osnovna ideja metode podrazumijeva prethodno eksperimentalno određivanje odnosa između struje u tački maksimalne snage ( $I_{mpp}$ ) i struje kratkog spoja ( $I_{sc}$ ), koji se približno izražava kao:

$$I_{mpp} \approx k \cdot I_{sc}, \quad (2.6)$$

gdje je  $k$  proporcionalni koeficijent čija se vrijednost određuje za konkretan tip PV modula.

Tokom rada MPPT kontroler periodično mjeri struju kratkog spoja i na osnovu izraza

(2.6) održava radnu struju PV generatora približno konstantnom, pomjerajući radnu tačku ka MPP-u [10].

Glavne prednosti CC metode su jednostavna implementacija, niska računarska složenost i minimalni zahtjevi za hardverom, što je čini pogodnom za male i niskobudžetne PV sisteme. Ipak, tačnost metode je ograničena jer se koeficijent  $k$  mijenja sa temperaturom i starenjem modula, što dovodi do odstupanja od stvarne tačke maksimalne snage. Zbog toga se CC metoda u savremenim sistemima uglavnom koristi u kombinaciji sa drugim MPPT tehnikama ili kao početna aproksimacija MPP-a [10].

## 2.6 Metoda konstantnog napona (eng. *Constant Voltage – CV*)

Jedan od prvih razvijenih pristupa MPPT-u u PV sistemima jeste metoda konstantnog napona (eng. *Constant Voltage – CV*). Ideja ove metode je da se optimalna radna tačka može procijeniti održavanjem napona panela na gotovo fiksnoj vrijednosti, jer promjene napona u tački maksimalne snage ostaju ograničene čak i pri varijacijama iradijance i temperature [55].

Metoda zahtijeva prethodno određivanje proporcionalnog odnosa između napona u tački maksimalne snage ( $V_{mpp}$ ) i napona praznog hoda ( $V_{oc}$ ), koji se za većinu PV modula kreće u granicama od 70% do 80% i može se izraziti kao:

$$V_{mpp} \approx k \cdot V_{oc}, \quad (2.7)$$

gdje je  $k$  empirijski određen koeficijent karakterističan za dati tip PV modula.

MPPT kontroler periodično mjeri napon praznog hoda i na osnovu izraza (2.7) održava radni napon na nivou koji približno odgovara MPP-u [55].

CV metoda je veoma jednostavna za implementaciju, ne zahtijeva složene algoritme niti precizna mjerenja struje, zbog čega je pogodna za male i niskobudžetne PV sisteme. Ipak, tačnost metode je ograničena jer se koeficijent  $k$  mijenja sa temperaturom, osvjetljajem i starenjem panela, što može dovesti do značajnih odstupanja od stvarne tačke maksimalne snage. Zbog toga se CV metoda u savremenim primjenama uglavnom koristi u kombinaciji sa naprednijim MPPT tehnikama ili kao početna procjena MPP-a [55].

## Glava 3

# MPPT algoritmi zasnovani na fuzzy logici

U prethodnom poglavlju razmatrani su najčešće korišćeni konvencionalni MPPT algoritmi koji ne zahtijevaju precizan matematički model PV sistema. Iako su takvi pristupi jednostavni za implementaciju i funkcionalni u stabilnim uslovima, njihova efikasnost opada u prisustvu naglih promjena iradijance i temperature, kada se javljaju oscilacije oko MPP i smanjenje ukupnog energetskeg iskorišćenja.

Kao alternativa konvencionalnim metodama, u savremenim istraživanjima sve češće se primjenjuju pristupi iz oblasti *soft computing*-a. Među njima, fazi logika se ističe kao posebno pogodna za upravljanje nelinearnim i dinamičkim sistemima sa izraženom nesigurnošću u ulaznim parametrima — karakteristično za rad PV sistema.

U ovom poglavlju najprije je dat kratak uvod u osnovne koncepte fazi logike, nakon čega slijedi teorijska razrada njenih ključnih principa. Zatim je razmotrena njena primjena u upravljanju PV sistemima, a na kraju je predstavljen detaljan dizajn fazi MPPT regulatora razvijenog u okviru ovog istraživanja.

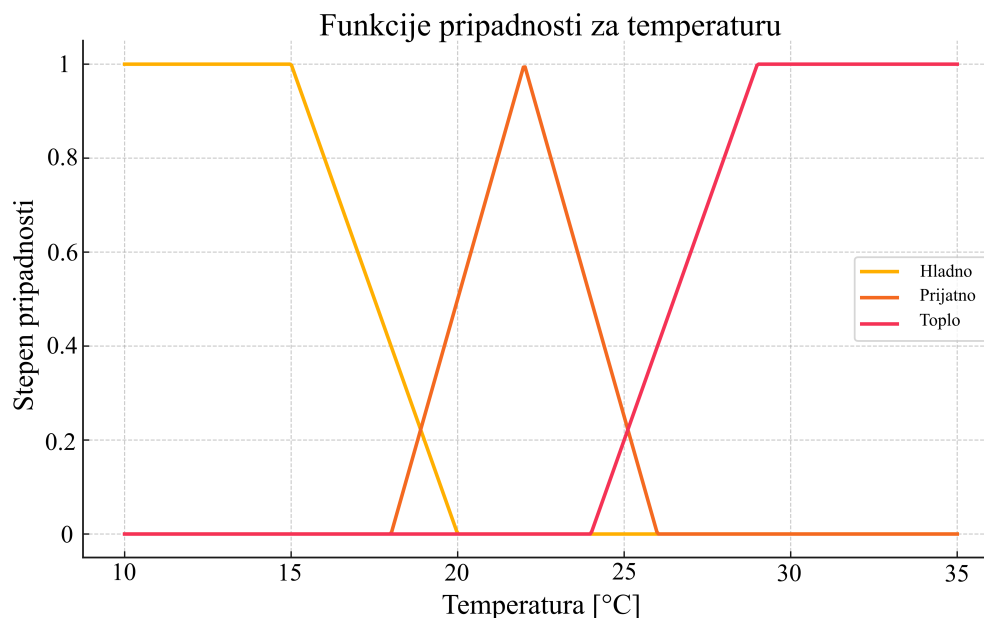
### 3.1 Uvod u fazi logiku

Fazi logika predstavlja proširenje tradicionalne Bulove (eng. *Boolean*) logike koje omogućava obradu nepreciznih, nesigurnih i subjektivnih informacija. Umjesto stroge binarne klasifikacije istinitosti, ovaj pristup koristi stepen pripadnosti izražen u intervalu  $[0, 1]$ , čime omogućava modelovanje djelimične istinitosti. Takva fleksibilnost je naročito korisna u slučajevima kada su sistemi nelinearni, kompleksni ili nedovoljno definisani za klasično matematičko modelovanje. Zahvaljujući tim karakteristikama, fazi logika je našla široku primjenu u raznim tehničkim oblastima, poput automatike, upravljanja, obrade signala i energetske elektronike, uključujući i upravljanje PV sistemima.

U mnogim stvarnim sistemima, ponašanje nije moguće precizno opisati jednostavnim pravilima ili isključivo numeričkim podacima. Složenost procesa, promjenljivi uslovi ra-

da, nesigurnost mjerenja i subjektivni faktori često onemogućavaju tačno matematičko modelovanje. U takvim okolnostima, javlja se potreba za pristupom koji omogućava donošenje odluka i kada su informacije nepotpune, neprecizne ili izražene kroz jezik, a ne brojeve. Fazi logika je razvijena upravo iz tih razloga, jer omogućava rad sa djelimično tačnim informacijama i koristi stepen pripadnosti kako bi se opisao intenzitet u kojem neka vrijednost pripada određenoj kategoriji. Na taj način, jedna veličina može istovremeno pripadati više kategorija u različitom stepenu, što je bliže ljudskom načinu razmišljanja i naročito korisno u sistemima gdje su procjena i iskustvo važniji od stroge tačnosti.

Na primjer, kada opisujemo temperaturu prostorije, često koristimo izraze poput „hladno“, „prijatno“ ili „toplo“, umjesto konkretnih vrijednosti. Ti izrazi nisu precizno definisani i zavise od ličnog osjećaja. Fazi logika omogućava da se ovakvi izrazi kvantifikuju kroz funkcije pripadnosti. Na slici 3.1 prikazane su funkcije koje predstavljaju ove tri kategorije, gdje se svakoj vrijednosti temperature dodjeljuje stepen pripadnosti izražen u intervalu  $[0, 1]$ .



Slika 3.1: Funkcije pripadnosti za temperaturu: hladno, prijatno i toplo

Ovaj koncept se može primijeniti i na druge fizičke veličine, kao što su brzina, pritisak, vlažnost ili osvjetljenje. Time fazi pristup omogućava fleksibilnije odlučivanje u složenim i nelinearnim tehničkim sistemima, kao što su automatizovani sistemi upravljanja ili energetske instalacije.

## 3.2 Teorijski principi fazi logike

Savremena primjena fazi logike u upravljačkim i dijagnostičkim sistemima zahtijeva detaljno razumijevanje njenih teorijskih osnova. Ključni koncepti koji čine osnovu fazi

pristupa uključuju formalizaciju neizvjesnosti putem fazi skupova, reprezentaciju znanja kroz jezičke varijable, logičku manipulaciju pomoću fazi operatora i zaključivanje na osnovu pravila. U nastavku su prikazane temeljne komponente ovog pristupa, kao i njihova formalna struktura.

### 3.2.1 Fazi skupovi i jezičke varijable

Koncept fazi skupova predstavlja osnovu teorijskog okvira fazi logike. Za razliku od klasičnih skupova, gdje je članstvo elementa strogo određeno (0 ili 1), fazi skupovi omogućavaju gradaciju pripadnosti kroz kontinuum vrijednosti u intervalu  $[0, 1]$  [56]. Na taj način se formalizuje ideja djelimične pripadnosti, čime se stvara osnova za obradu nesigurnih, nepotpunih ili subjektivno definisanih informacija.

Fazi skup  $\tilde{A}$  nad univerzumom diskursa  $X$  definiše se kao skup uređenih parova:

$$\tilde{A} = \{(x, \mu_{\tilde{A}}(x)) \mid x \in X\} \quad (3.1)$$

pri čemu funkcija pripadnosti  $\mu_{\tilde{A}}(x) : X \rightarrow [0, 1]$  određuje stepen u kojem element  $x$  pripada skupu  $\tilde{A}$ . Vrijednosti bliže jedinici označavaju jaču pripadnost, dok vrijednosti bliže nuli ukazuju na slabiju ili nepostojeću pripadnost.

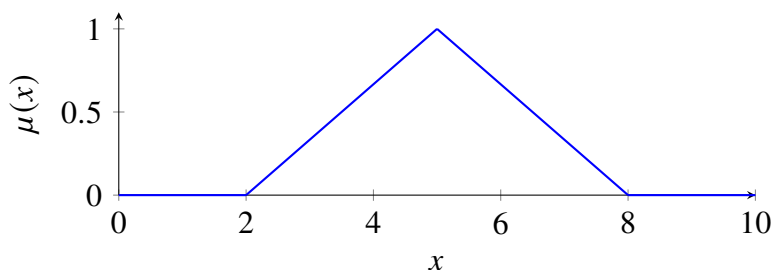
U inženjerskoj praksi, oblik funkcije pripadnosti značajno utiče na odziv fazi sistema. Najčešće korišćene funkcije pripadnosti uključuju:

**Trougaona funkcija** (slika 3.2) koristi se kada je potreban jednostavan i simetričan model tranzicije između vrijednosti:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & a < x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & b < x < c \\ 0 & x \geq c \end{cases}$$

gdje su:

$a, b, c$  – granične vrijednosti koje određuju bazu i vrh trougla.



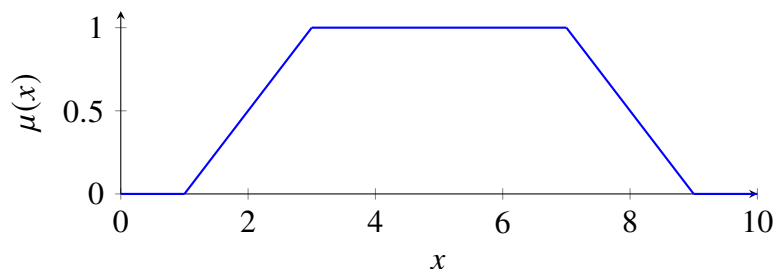
Slika 3.2: Trougaona funkcija pripadnosti

**Trapezoidna funkcija** (slika 3.3) omogućava definisanje zone konstantne maksimalne pripadnosti između dvije unutrašnje granice:

$$\mu_{\bar{A}}(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & a < x \leq b \\ 1 & b < x < c \\ \frac{d-x}{d-c} & c \leq x < d \\ 0 & x \geq d \end{cases}$$

gdje su:

$a, b, c, d$  – granične tačke koje definišu oblik trapeza.



Slika 3.3: Trapezoidna funkcija pripadnosti

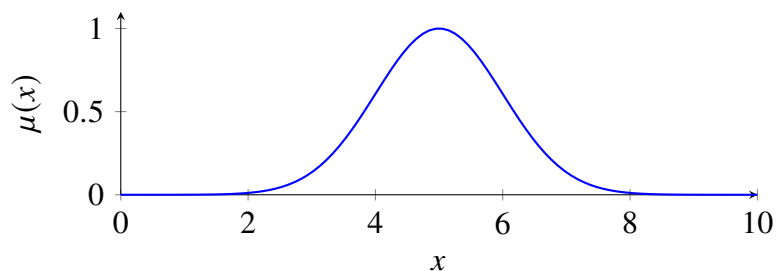
**Gausova funkcija** (slika 3.4) koristi se kada je potreban gladak i neprekidan odziv, posebno u adaptivnim sistemima:

$$\mu_{\bar{A}}(x) = \exp\left(-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}\right)$$

gdje su:

$c$  – centar funkcije,

$\sigma$  – standardna devijacija (širina).



Slika 3.4: Gausova funkcija pripadnosti

**Sigmoidna funkcija** (slika 3.5) koristi se za modelovanje prelaza između dvije klase

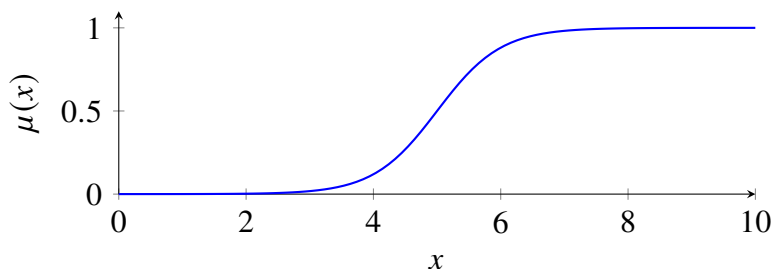
sa asimetričnim odzivom:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \frac{1}{1 + e^{-a(x-c)}}$$

gdje su:

$a$  – strmost prelaza,

$c$  – centar prelaza.



Slika 3.5: Sigmoidna funkcija pripadnosti

Pored funkcija pripadnosti, ključnu komponentu fazi sistema čine jezičke varijable, koje omogućavaju opis numeričkih veličina pomoću lingvističkih termina [13, 57]. Svaka jezička varijabla ima definisani skup termina (npr. *nizak*, *srednji*, *visok*) i pripadajuće fazi skupove koji im daju značenje.

Formalno, jezička varijabla  $L$  definiše se kao petorka:

$$L = \langle \text{ime varijable}, T, X, G, M \rangle$$

gdje su:

*ime varijable* – naziv koji opisuje fizičku veličinu (npr. napon, brzina),

$T$  – skup lingvističkih vrijednosti (npr. nizak, srednji, visok),

$X$  – univerzum diskursa, tj. numerički opseg vrijednosti varijable,

$G$  – skup sintaktičkih pravila za formiranje izraza,

$M$  – skup funkcija pripadnosti koje definišu značenje svakog termina.

U kontekstu tehničkih aplikacija, jezičke varijable omogućavaju interpretaciju kompleksnih veličina kroz ekspertska pravila izražena u prirodnom jeziku. Na primjer, promjena izlaznog napona u pretvaraču može biti opisana terminima poput „naglo opada“, „blago raste“ ili „stabilna“, a svaki od tih termina kvantitativno je definisan odgovarajućom funkcijom pripadnosti. Ovakav pristup omogućava implementaciju inženjerskog znanja u formalni sistem upravljanja bez potrebe za preciznim matematičkim modelima [58].

Fazi skupovi i jezičke varijable zajedno čine osnovu na kojoj se gradi logički mehanizam zaključivanja. Operacije kombinovanja fazi skupova, kao i pravila zaključivanja

zasnovana na njima, predstavljaju ključnu komponentu svakog fazi sistema, i biće detaljno obrađeni u narednom potpoglavlju.

### 3.2.2 Fazi operatori i pravila

U fazi logici, odlučivanje se zasniva na skupu jezičkih pravila koja povezuju ulazne i izlazne varijable preko logičkih veza. Ova pravila su formulisana u obliku „*Ako–tada*“ (eng. *IF–THEN*), gdje se ulazne varijable izražavaju u obliku lingvističkih opisa, kao što su „nisko“, „srednje“ ili „visoko“ [57, 59]. Takva pravila čine osnovu fazi inferencijskog sistema, koji omogućava donošenje zaključaka na osnovu nepreciznih i subjektivnih informacija.

Za kombinovanje više ulaznih uslova unutar jednog pravila koriste se fazi logički operatori. Na primjer, jedno intuitivno fazi pravilo u kontekstu vožnje može glasiti: „*Ako je brzina vozila visoka i je udaljenost do vozila ispred mala, tada je potreba za kočenjem velika*“. Ovakvo pravilo kombinuje dvije ulazne veličine koje su često neprecizne ili subjektivne, posebno u realnim uslovima vožnje. Upotrebom fazi konjunkcije (AND), sistem može procijeniti stepen opasnosti i reagovati proporcionalno, bez potrebe za tačno definisanim graničnim vrijednostima. Ovakav pristup je osnova mnogih savremenih sistema asistencije u vožnji i autonomnih vozila. Ovakvi izrazi često ne mogu biti kvantitativno određeni s potpunom preciznošću, ali su intuitivno razumljivi ljudima, što fazi logici daje posebnu praktičnu vrijednost [13, 58].

Najčešće korišćeni fazi operatori su:

- **AND (konjunkcija)** – najčešće implementiran kao minimum:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x))$$

Alternativno, može se koristiti i algebraički proizvod:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(x)$$

- **OR (disjunkcija)** – tipično definisan kao maksimum:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x))$$

- **NOT (negacija)** – definisana kao komplement vrijednosti:

$$\mu_{\neg A}(x) = 1 - \mu_A(x)$$

Pored osnovnih logičkih operatora, u fazi logici se koriste i različite t-norme i s-norme, kao što su algebraički proizvod i suma, probabilistički operatori, Lukasiewiczova t-norma

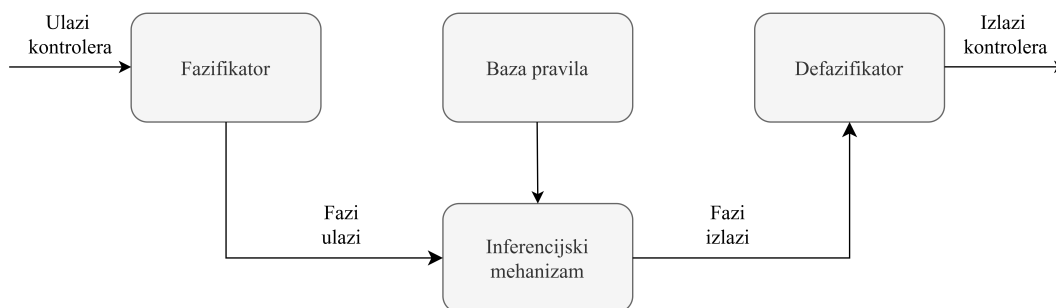
i dr. Odabir konkretnih operatora zavisi od prirode sistema i željenog ponašanja logike [59, 60].

Fazi pravila, u kombinaciji sa operatorima, čine osnovu fazi inferencijskog mehanizma. Najpoznatiji metodi inferencije su Mamdani i Takagi–Sugeno pristupi. Mamdani metod koristi fazi skupove i lingvističke izraze i pogodan je za intuitivne sisteme, dok Sugeno metod koristi numeričke funkcije i često se koristi u optimizaciji i adaptivnim sistemima [57, 59].

Zahvaljujući fleksibilnosti u formulisanju pravila i robusnosti u radu sa nesigurnim i nepreciznim podacima, fazi operatori omogućavaju pouzdano modelovanje čak i u kompleksnim sistemima koji bi inače bili teško modelovani tradicionalnim metodama [56, 58].

### 3.2.3 Osnovne komponente fazi sistema

Efikasnost i pouzdanost fazi sistema u velikoj mjeri zavise od jasnoće i međusobne povezanosti njegovih osnovnih komponenti. Tipičan fazi kontroler sastoji se od četiri funkcionalna modula: fazifikatora, baze pravila, inferencijskog mehanizma i defazifikatora. Svaki od njih ima precizno definisanu ulogu u procesu transformacije numeričkih ulaznih podataka u konkretne izlazne akcije. Na slici 3.6 prikazan je standardni blok dijagram fazi sistema.



Slika 3.6: Blok dijagram osnovnih komponenti fazi sistema

#### Fazifikator

Fazifikator predstavlja prvi korak u radu fazi sistema. Njegova funkcija je da numeričke ulazne veličine (kao što su napon, temperatura ili brzina) pretvori u fazi reprezentaciju, odnosno u stepen pripadnosti određenim lingvističkim kategorijama. Na taj način se omogućava dalja obrada nepreciznih i nesigurnih informacija [56, 59].

Funkcija pripadnosti formalno se definiše kao:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) : X \rightarrow [0, 1] \quad (3.2)$$

gdje su:

$x$  – konkretna ulazna vrijednost,

$X$  – univerzum diskursa,

$\mu_{\tilde{A}}(x)$  – stepen pripadnosti elementa  $x$  fazi skupu  $\tilde{A}$ .

Oblik funkcije pripadnosti bira se u zavisnosti od prirode problema, a najčešće se koriste trougaone, trapezoidne, Gausove i sigmoidne funkcije, koje su detaljno objašnjene u potpoglavlju 3.2.1.

#### Baza pravila

Ova komponenta sadrži skup logičkih veza izraženih u formi „Ako–tada“ (eng. *IF–THEN*), koje definišu odnose između ulaznih i izlaznih varijabli. Tipično fazi pravilo ima sljedeću strukturu:

$$\text{Ako je } x_1 A_1 \text{ i } x_2 A_2, \text{ onda je } y B \quad (3.3)$$

gdje su:

$x_1, x_2$  – ulazne varijable,

$A_1, A_2$  – fazi skupovi ulaznih lingvističkih vrijednosti,

$y$  – izlazna varijabla,

$B$  – fazi skup koji predstavlja izlaznu lingvističku vrijednost.

Pravila se formulišu na osnovu iskustva, ekspertskog znanja ili empirijskih podataka [57, 58].

#### Inferencijski mehanizam

Ova komponenta zadužena je za obradu svih pravila iz baze znanja, određuje stepen njihove aktivacije i kombinuje rezultate u jedinstveni fazi izlaz. U praksi se najčešće koriste dva pristupa: Mamdani i Takagi–Sugeno metod.

**Mamdani metod** koristi fazi skupove i lingvističke izraze u izlaznom dijelu pravila. Nakon što se odredi stepen aktivacije premise  $w_i$  (najčešće minimum operatorom), izlazna funkcija pripadnosti svakog pravila ograničava se tim stepenom:

$$\mu_{B'_i}(z) = \min(w_i, \mu_{B_i}(z)) . \quad (3.4)$$

Svi tako dobijeni parcijalni izlazi zatim se kombinuju pomoću maksimum operatora:

$$\mu_{AGG}(z) = \max_i \mu_{B'_i}(z), \quad (3.5)$$

pri čemu  $\mu_{AGG}(z)$  predstavlja ukupnu agregiranu fazi funkciju.

**Takagi–Sugeno metod** umjesto lingvističkih izraza koristi numerički definisane funkcije kao izlaze pravila. Tipično je riječ o linearnim funkcijama:

$$y_i = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n + b \quad (3.6)$$

gdje su:

$x_1, \dots, x_n$  – ulazne varijable,

$a_1, \dots, a_n, b$  – koeficijenti funkcije.

Konačni izlaz određuje se kao prosjek koji je više ponderisan pravilima sa većim stepenom aktivacije:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^N w_i y_i}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad (3.7)$$

gdje su:

$w_i$  – stepen aktivacije i-tog pravila,

$y_i$  – numerički izlaz tog pravila.

Ovaj pristup posebno je efikasan u adaptivnim sistemima gdje je potrebna velika brzina i preciznost [59, 60].

#### Defazifikator

Kada fazi sistem koristi Mamdani metod, rezultat inferencijskog mehanizma je fazi skup. Da bi se taj rezultat mogao primijeniti u realnom sistemu, mora se konvertovati u konkretan broj, ovaj proces se naziva defazifikacija.

Najčešće korišćena metoda je metoda težišta (centroid), koja se računa po formuli:

$$z^* = \frac{\int z \cdot \mu(z) dz}{\int \mu(z) dz} \quad (3.8)$$

gdje su:

$\mu(z)$  – agregirana fazi funkcija pripadnosti,

$z^*$  – konačna defazifikovana vrijednost.

Pored metode težišta, koriste se i alternativne tehnike: metoda najveće vrijednosti (MAX), metoda sredine maksimuma (MOM) i metoda prepolovljene površine (eng. *Bisector of Area* – BOA), u zavisnosti od aplikacije i potrebne tačnosti [59, 58].

Jasna modularna podjela fazi sistema omogućava njegovu laku implementaciju i prilagodljivost, dok sposobnost da upravlja nepreciznim i promjenljivim podacima čini ovaj

pristup posebno korisnim u savremenim inženjerskim aplikacijama.

## 3.3 Primjena fazi logike u upravljanju fotonaponskim sistemima

PV sistemi proizvode električnu energiju koristeći sunčevu svjetlost, ali njihova efikasnost u velikoj mjeri zavisi od vremenskih uslova, poput oblačnosti, temperature i sjenčenja. Da bi se u svakom trenutku izvukla maksimalna snaga iz sistema, koristi se MPPT algoritam. Klasični algoritmi poput P&O i IC pokazali su dobre rezultate u stabilnim uslovima, ali imaju ograničenja u scenarijima gdje se uslovi brzo mijenjaju [61].

Fazi logika predstavlja napredniji pristup koji omogućava donošenje odluka na osnovu nepreciznih ili nepotpunih informacija. Ona oponaša ljudski način rezonovanja, gdje se ne barata preciznim brojkama, već se koristi opisnim kategorijama kao što su „nizak“, „srednji“ ili „visok“. Kada se primijeni u PV sistemima, ovaj pristup omogućava inteligentnije i fleksibilnije upravljanje, posebno u dinamičnim uslovima rada [62].

### 3.3.1 Fazi upravljanje fotonaponskim sistemima

Za razliku od tradicionalnih pristupa koji se oslanjaju na striktno definisane matematičke modele, fazi kontroleri koriste pravila zasnovana na lingvističkim opisima.

Uobičajena konfiguracija uključuje dva ulazna signala – grešku ( $E$ ) i promjenu greške ( $CE$ ). Na osnovu njih, izlaz iz fazi kontrolera predstavlja prilagođavanje PWM signala (faktora popunjenosti), kojim se određuje tačka rada pretvarača [61, 62]. Na ovaj način sistem automatski teži optimalnoj tački proizvodnje bez potrebe za kompleksnim računanjima u realnom vremenu.

Posebna prednost fazi logike dolazi do izražaja kod djelimičnog sjenčenja, kada klasični algoritmi često ne uspijevaju identifikovati pravi MPP. U takvim slučajevima, fazi kontroler, zahvaljujući svojoj sposobnosti da „osjeti“ ponašanje sistema, omogućava preciznije i stabilnije upravljanje [63].

### 3.3.2 Napredni fazi pristupi u MPPT algoritmima

Kako bi se dodatno poboljšale performanse fazi kontrolera, razvijeni su napredni pristupi, među kojima se izdvaja primjena tzv. Type-2 fazi logike. Ovaj koncept omogućava modelovanje dodatne nesigurnosti unutar samih funkcija pripadnosti, što dovodi do robusnijeg ponašanja algoritma u nestabilnim uslovima. Prema rezultatima iz literature, Type-2 fazi kontroleri obezbjeđuju veću stabilnost i smanjenu oscilaciju izlazne snage u realnim scenarijima [64].

Pored toga, sve je češća i kombinacija fazi logike sa tehnikama vještačke inteligencije, poput algoritma rojenja čestica (eng. *Particle Swarm Optimization* - PSO) i GA. Ovi

hibridni pristupi omogućavaju automatsko podešavanje parametara fazi sistema, čime se povećava njegova adaptivnost i sposobnost učenja tokom rada [63].

Fazi logika takođe nalazi primjenu i u širem kontekstu upravljanja energijom, posebno u sistemima gdje se PV izvori kombinuju sa baterijama ili drugim energetske resursima. U takvim slučajevima omogućava koordinisano upravljanje višestrukim ulazima i izlazima, uzimajući u obzir šire ciljeve, kao što su stabilnost mreže i energetska efikasnost [62].

#### 3.3.3 Dizajn fazi MPPT kontrolera

Ovo poglavlje opisuje proces projektovanja fazi MPPT kontrolera razvijenog u okviru ovog rada. Pristup se zasniva na izboru i definisanju relevantnih ulaznih i izlaznih varijabli, formiranju odgovarajućih funkcija pripadnosti i fazi skupova, te konstruisanju baze pravila sa pripadajućim inferencijskim mehanizmom. Projektovani kontroler koristi mjerene električne veličine iz PV sistema za izračunavanje greške i promjene greške, koje se zatim obrađuju u fazi logičkom sistemu. Na osnovu rezultata inferencijskog procesa, određuje se optimalna promjena faktora popunjenosti PWM signala za upravljanje DC/DC pretvaračem. Na ovaj način se omogućava brzo i stabilno praćenje MPP-a uz minimalne oscilacije.

##### Definisanje ulaznih i izlaznih varijabli

Za realizaciju fazi MPPT kontrolera, od suštinske važnosti je precizno definisanje ulaznih i izlaznih varijabli koje čine osnovu upravljačkog procesa. U ovom radu, kao ulazne varijable izabrane su *greška* ( $E$ ) i *promjena greške* ( $CE$ ), dok je izlazna varijabla *promjena faktora popunjenosti* ( $\Delta D$ ).

##### Greška ( $E$ )

Greška  $E$  opisuje trenutno odstupanje radne tačke PV sistema od MPP-a. U opštem slučaju, može se definisati izrazom:

$$E(k) = \frac{P(k) - P(k-1)}{V(k) - V(k-1)} \quad (3.9)$$

gdje su:

- $P(k)$  – trenutna izlazna snaga PV modula u  $k$ -tom uzorku,
- $P(k-1)$  – izlazna snaga PV modula u prethodnom uzorku,
- $V(k)$  – trenutni izlazni napon PV modula,
- $V(k-1)$  – izlazni napon u prethodnom uzorku.

Pozitivna vrijednost  $E$  ukazuje da povećanje napona dovodi do povećanja snage, dok

negativna vrijednost označava smanjenje snage. Vrijednost  $E \approx 0$  znači da je radna tačka blizu MPP-a.

#### Promjena greške ( $CE$ )

Promjena greške definiše se kao razlika trenutne i prethodne vrijednosti greške:

$$CE(k) = E(k) - E(k - 1) \quad (3.10)$$

gdje su:

$E(k)$  – trenutna vrijednost greške,

$E(k - 1)$  – vrijednost greške u prethodnom uzorku.

Pozitivna vrijednost  $CE$  označava da greška raste, dok negativna ukazuje na smanjenje greške.

#### Izlazna varijabla ( $\Delta D$ )

Izlaz fazi kontrolera je promjena faktora popunjenosti, koja određuje korekciju radnog ciklusa PWM signala za upravljanje DC/DC pretvaračem:

$$D_{\text{novi}} = D_{\text{stari}} + \Delta D \quad (3.11)$$

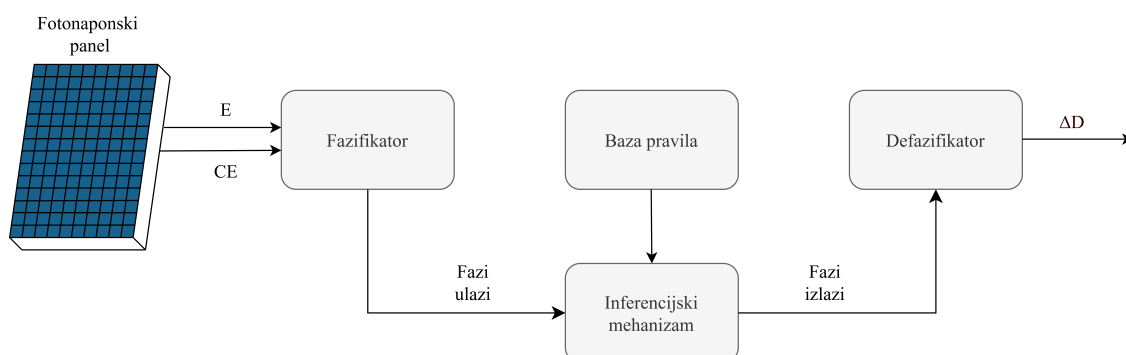
gdje su:

$D_{\text{novi}}$  – novi faktor popunjenosti PWM signala,

$D_{\text{stari}}$  – prethodni faktor popunjenosti,

$\Delta D$  – promjena faktora popunjenosti određena fazi kontrolerom.

Pozitivna vrijednost  $\Delta D$  povećava radni ciklus, dok negativna vrijednost smanjuje radni ciklus. Raspon  $\Delta D$  je podešen u skladu sa ograničenjima pretvarača, kako bi se obezbijilo brzo praćenje MPP-a uz minimalne oscilacije.



Slika 3.7: Blok dijagram fazi MPPT kontrolera sa označenim ulaznim i izlaznim varijablama

#### Funkcije pripadnosti i fazi skupovi

Rad i preciznost fazi MPPT kontrolera u velikoj mjeri zavise od pravilnog izbora funkcija pripadnosti i odgovarajuće raspodjele fazi skupova. U okviru ovog rada razvijena su dva modela kontrolera različite složenosti: jedan sa tri funkcije pripadnosti po svakoj ulaznoj i izlaznoj varijabli (ukupno devet pravila) i drugi sa pet funkcija pripadnosti po varijabli (ukupno 25 pravila). Ovakva postavka omogućava analizu uticaja rezolucije fazi sistema na performanse praćenja tačke maksimalne snage.

Za potrebe formiranja baze pravila korišćene su lingvističke oznake koje opisuju fazi skupove i pojednostavljuju formulaciju upravljačke logike. U slučaju jednostavnijeg modela sa tri funkcije pripadnosti po varijabli (kontroler sa 9 pravila), korišćene su oznake **N** (eng. *Negative* – negativno), **Z** (eng. *Zero* – nula) i **P** (eng. *Positive* – pozitivno). Ove oznake omogućavaju razlikovanje da li je greška ili promjena greške negativna, približno nula ili pozitivna, što je dovoljno za osnovno praćenje tačke maksimalne snage.

Kod složenijeg modela sa pet funkcija pripadnosti po varijabli (kontroler sa 25 pravila), primijenjene su standardne lingvističke oznake: **NB** (eng. *Negative Big* – veliko negativno odstupanje), **NS** (eng. *Negative Small* – malo negativno odstupanje), **ZE** (eng. *Zero* – nula), **PS** (eng. *Positive Small* – malo pozitivno odstupanje) i **PB** (eng. *Positive Big* – veliko pozitivno odstupanje).

Na ovaj način postiže se jasnije razlikovanje greške i njenih promjena, čime se povećava preciznost upravljačkog sistema. Na primjer, pripadnost  $E$  skupu **NB** (*Negative Big*) označava da je radna tačka znatno ispod optimalne vrijednosti, dok skup **PS** (*Positive Small*) ukazuje na malo pozitivno odstupanje. Isti princip važi i za  $CE$  i  $\Delta D$ , što obezbjeđuje konzistentno i jasno modelovanje oba kontrolera.

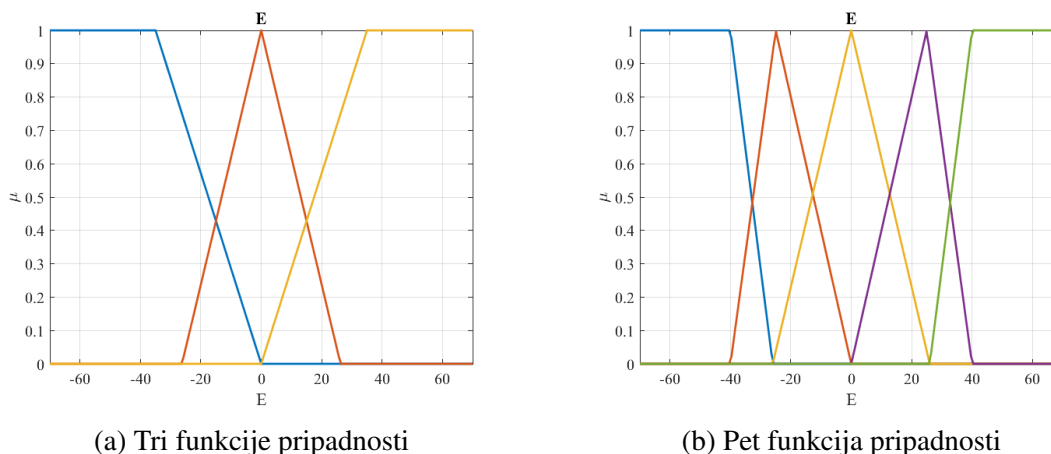
Za opis ulaznih i izlaznih veličina korišćene su *trougaone* i *trapezne* funkcije pripadnosti, koje se odlikuju jednostavnom implementacijom i mogućnošću dobrog modelovanja nelinearnih procesa. Trougaone funkcije omogućavaju jasnu podjelu radnog opsega na međusobno povezane segmente, dok trapezne obezbjeđuju šira područja pune pripadnosti, smanjujući osjetljivost kontrolera na male promjene signala.

Granice funkcija pripadnosti u ovom radu određene su na osnovu vrijednosti dobijenih simulacijom korišćenog PV panela i DC/DC pretvarača. Umjesto normalizacije na mali interval (npr.  $[-1, 1]$ ), korišćen je realni radni raspon sistema, tako da fazi kontroler obrađuje fizičke veličine koje se zaista pojavljuju u radu. Ovakav pristup omogućava tačnije podešavanje kontrolera za konkretan slučaj, ali podrazumijeva da bi se pri upotrebi panela drugačijih karakteristika (veće ili manje snage, drugačiji nazivni napon) granice morale redefinisati.

#### Ulazna varijabla $E$ – greška

Opseg ulazne varijable  $E$  određen je na osnovu vrijednosti greške koje se javljaju pri pomjeranju radne tačke duž P-V karakteristike panela u simulaciji. Na slici 3.8 prikazan je

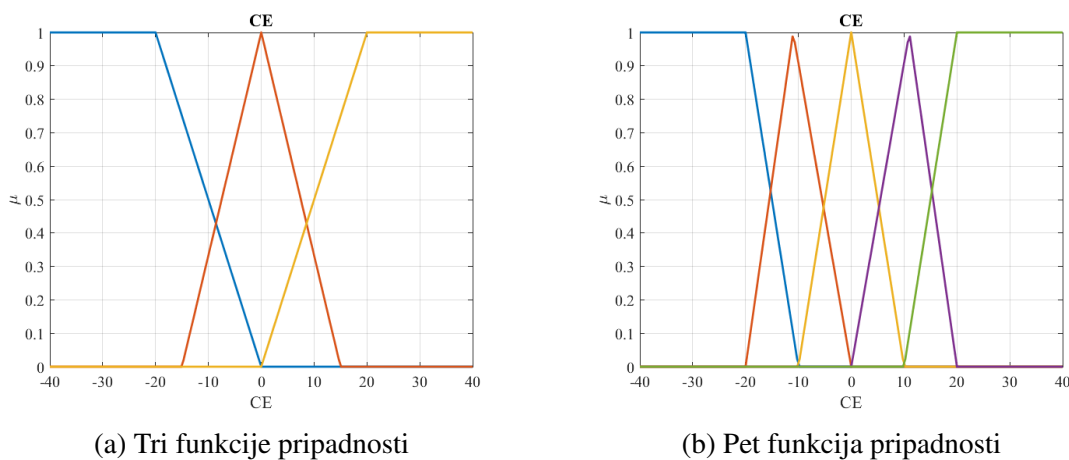
oblik funkcija pripadnosti za konfiguracije sa tri i sa pet funkcija, pri čemu se obezbeđuje da fazi kontroler prepozna i vrlo mala odstupanja u blizini MPP-a, kao i veće devijacije kada sistem radi dalje od optimalne tačke. Kod panela sa drugačijim naponom ili snagom, vrijednosti  $E$  bile bi različite, pa bi i funkcije pripadnosti morale biti ponovo kalibrisane.



Slika 3.8: Funkcije pripadnosti ulazne varijable  $E$

### Ulazna varijabla $CE$ – promjena greške

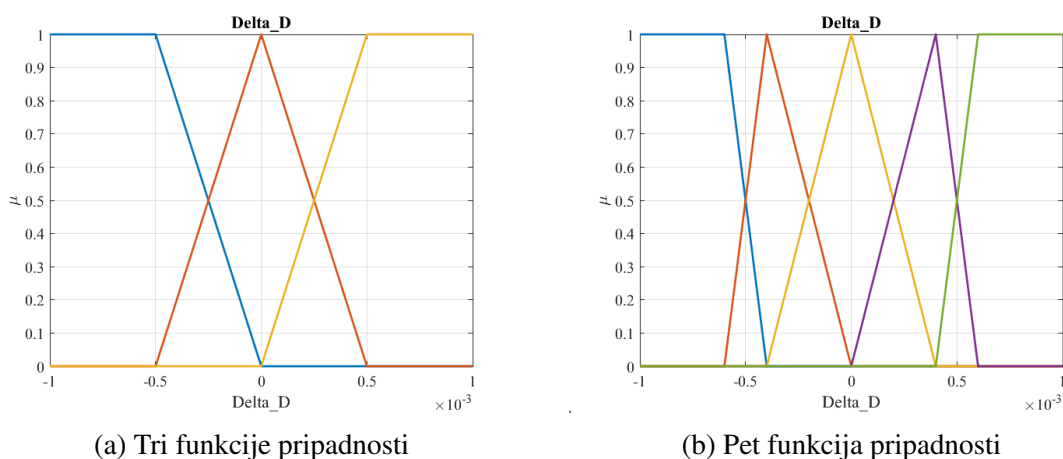
Granice varijable  $CE$  određene su na osnovu simulacija koje obuhvataju tipične promjene osunčanosti i temperature, čime su obuhvaćene stvarne brzine promjene greške između dva uzastopna mjerenja. Funkcije pripadnosti prikazane na slici 3.9 definišu opseg koji je dovoljno širok da obuhvati nagle prelaze, poput prolaska oblaka, a istovremeno dovoljno uzak da sistem ostane otporan na manje oscilacije i šumove. Budući da ovaj raspon zavisi od karakteristika konkretnog panela, svaka promjena tih parametara zahtijevala bi novo podešavanje granica.



Slika 3.9: Funkcije pripadnosti ulazne varijable  $CE$

### Izlazna varijabla $\Delta D$ – promjena faktora popunjenosti

Raspon izlazne varijable  $\Delta D$  definisan je da obezbijedi ravnotežu između brzog praćenja i stabilnog rada. Funkcije pripadnosti na slici 3.10 pokazuju da je dozvoljena promjena faktora popunjenosti podešena tako da omogući efikasno približavanje MPP-u bez izazivanja oscilacija. Kako ove vrijednosti zavise od parametara pretvarača i karakteristika panela, svaka promjena opreme zahtijevala bi novu kalibraciju granica.



Slika 3.10: Funkcije pripadnosti izlazne varijable  $\Delta D$

### Baza pravila i inferencijski mehanizam

Baza pravila predstavlja ključni element fazi MPPT kontrolera, jer definiše način na koji se kombinovane informacije o ulaznim varijablama  $E$  i  $CE$  prevode u odgovarajuću korekciju izlazne varijable  $\Delta D$ . Pravila su formulisana u obliku *Ako–tada* (eng. *IF–THEN*) izraza, koji povezuju lingvističke vrijednosti ulaza sa željenim izlazom.

U ovom radu razvijene su dvije verzije baze pravila:

- kontroler sa **tri funkcije pripadnosti** po svakoj varijabli — ukupno devet pravila (tabela 3.1);
- kontroler sa **pet funkcija pripadnosti** po svakoj varijabli — ukupno 25 pravila (tabela 3.2).

Logika formiranja pravila zasniva se na odnosu promjene snage i napona PV sistema, pri čemu se greška  $E$  i njena promjena  $CE$  koriste za procjenu smjera i intenziteta prilagođavanja radne tačke ka MPP-u. Pravila su definisana tako da svaka promjena faktora popunjenosti ( $\Delta D$ ) doprinosi približavanju optimalnoj tački rada.

Formulacije prikazane u tabelama 3.1 i 3.2 obezbjeđuju da izlazna promjena faktora popunjenosti uvijek približava radnu tačku maksimalnoj snazi, čime fazi kontroler funkcioniše na sličan način kao klasični MPPT algoritmi. Iako bi pri primjeni na drugi PV panel bilo potrebno ponovo kalibrisati granice funkcija pripadnosti, osnovna logika postavljenih pravila ostaje nepromijenjena.

Tabela 3.1: Baza pravila fazi MPPT kontrolera – tri funkcije pripadnosti

<i>E / CE</i>	<b>N</b>	<b>Z</b>	<b>P</b>
<b>N</b>	P	P	Z
<b>Z</b>	P	Z	N
<b>P</b>	Z	N	N

Tabela 3.2: Baza pravila fazi MPPT kontrolera – pet funkcija pripadnosti

<i>E / CE</i>	<b>NB</b>	<b>NS</b>	<b>ZE</b>	<b>PS</b>	<b>PB</b>
<b>NB</b>	ZE	ZE	PB	PB	PB
<b>NS</b>	ZE	ZE	PB	PS	PS
<b>ZE</b>	PS	ZE	ZE	ZE	NS
<b>PS</b>	NS	NS	ZE	ZE	ZE
<b>PB</b>	NB	NB	ZE	ZE	ZE

### Inferencijski mehanizam

U oba modela primijenjen je **Mamdani** tip inferencije, uz *min* operator za fazi presjek (*AND*) i *max* operator za fazi uniju (*OR*). Agregacija izlaznih skupova vršena je *max* metodom, dok je za defazifikaciju korišćena **metoda centra težišta** (*COG*). Ovakva kombinacija metoda obezbjeđuje stabilan izlaz i glatke promjene faktora popunjenosti, što doprinosi smanjenju oscilacija oko MPP-a.

# Glava 4

## Numerički rezultati

Simulacije su realizovane u okruženju *MATLAB/Simulink*, pri čemu je fotonaponski panel modelovan pomoću bloka *PV Array*. Na izlaz PV niza povezan je **boost** DC–DC pretvarač, čija je uloga regulacija radne tačke i obezbjeđivanje optimalnog rada MPPT algoritma. Na taj način formiran je simulacioni model cjelovitog fotonaponskog sistema, korišćen za poređenje performansi različitih MPPT metoda.

PV niz je konfigurisan kao **5 paralelnih grana**, pri čemu se u svakoj grani nalazi po jedan PV modul (ukupno 5 modula).

Referentni modul je *Advance Power AP1-P215*, čije osnovne električne karakteristike pri standardnim testnim uslovima ( $G = 1000 \text{ W/m}^2$ ,  $T_{\text{cell}} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ) prikazane su u tabeli 4.1. Ulazni uslovi u vidu stepenastih promjena iradijancije i temperature, korišćeni tokom simulacija, dati su u tabeli 4.2.

Tabela 4.1: Karakteristike PV modula Advance Power AP1-P215

Parametar	Oznaka	Vrijednost
Maksimalna snaga	$P_{\text{mpp}}$	214.97 W
Broj ćelija u modulu	$N_{\text{cell}}$	60
Napon praznog hoda	$V_{\text{oc}}$	36 V
Struja kratkog spoja	$I_{\text{sc}}$	7.83 A
Napon MPP	$V_{\text{mpp}}$	29.94 V
Struja MPP	$I_{\text{mpp}}$	7.18 A
Koeficijent $V_{\text{oc}}$	$\alpha_{V_{\text{oc}}}$	-0.3342 %/°C
Svjetlosno generisana struja	$I_{\text{L}}$	7.85 A
Saturaciona struja diode	$I_0$	$1.03 \times 10^{-10}$ A
Faktor idealnosti diode	$n$	0.934
Otpornost šanta	$R_{\text{sh}}$	98.72 $\Omega$

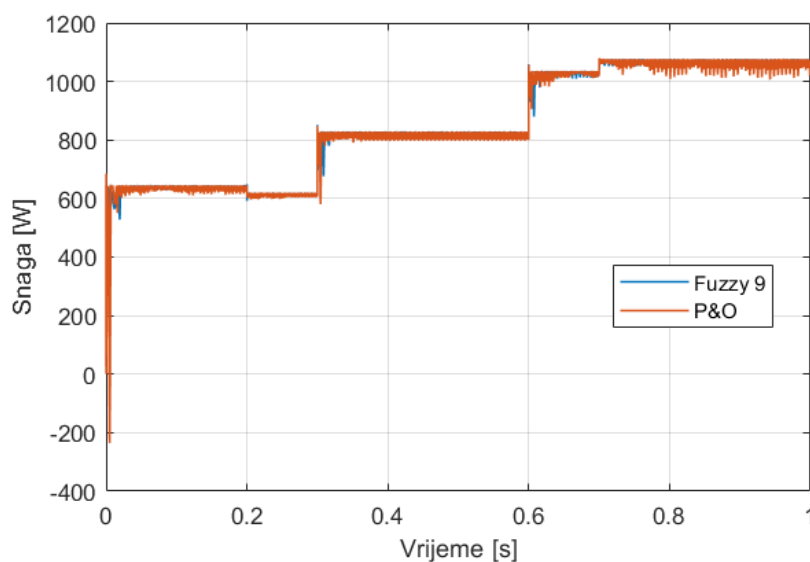
Tabela 4.2: Vrijednosti iradijance i temperature korišćene u simulacijama

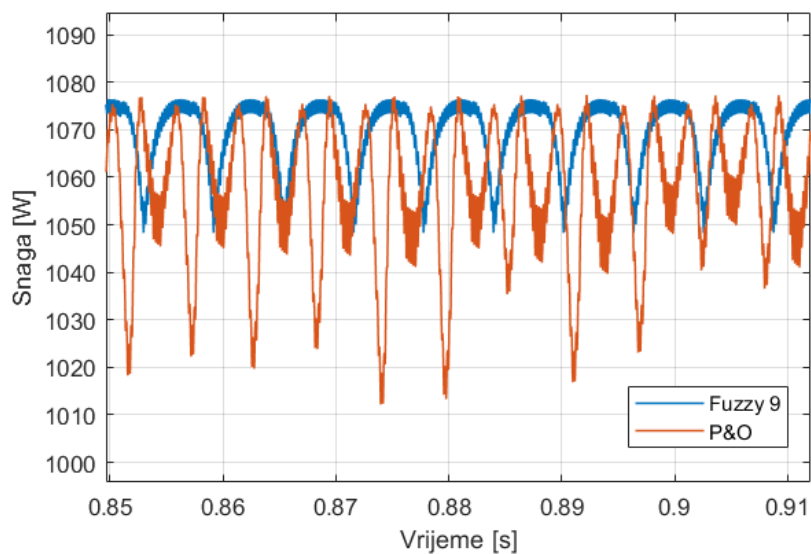
Vrijeme $t$ [s]	Iradijansa $G$ [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]	Temperatura $T_{\text{cell}}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]
0.0 – 0.2	600	25
0.2 – 0.3	600	35
0.3 – 0.6	800	35
0.6 – 0.7	1000	35
0.7 – 1.0	1000	25

Promjene iradijance i temperature uvedene su u vidu stepenastih funkcija kako bi se ocijenila dinamička i stacionarna karakteristika MPPT algoritama.

## 4.1 Poređenje P&O i fazi MPPT algoritma

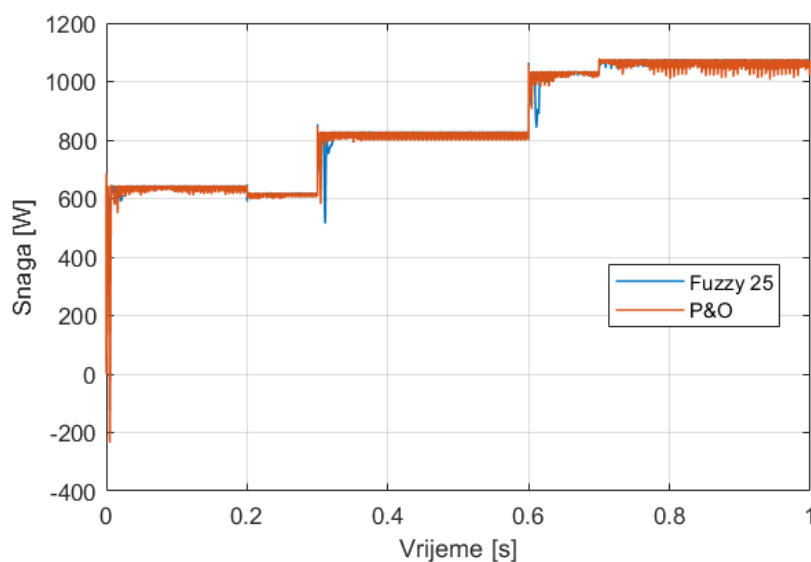
Na slikama 4.1 i 4.2 prikazano je poređenje izlazne snage PV sistema za P&O metodu i fazi algoritam sa 9 pravila. Može se uočiti da oba algoritma uspješno prate promjene iradijance i temperature, ali fazi pristup ostvaruje stabilnije ponašanje u stacionarnom režimu. Na uveličanom prikazu jasno je vidljivo da fazi algoritam osciluje sa manjom amplitudom i ostvaruje veću prosječnu snagu u odnosu na P&O, što direktno ukazuje na efikasnije iskorišćenje PV sistema.

Slika 4.1: Dinamičko poređenje izlazne snage  $P_{pv}$  – P&O i fazi algoritam sa 9 pravila

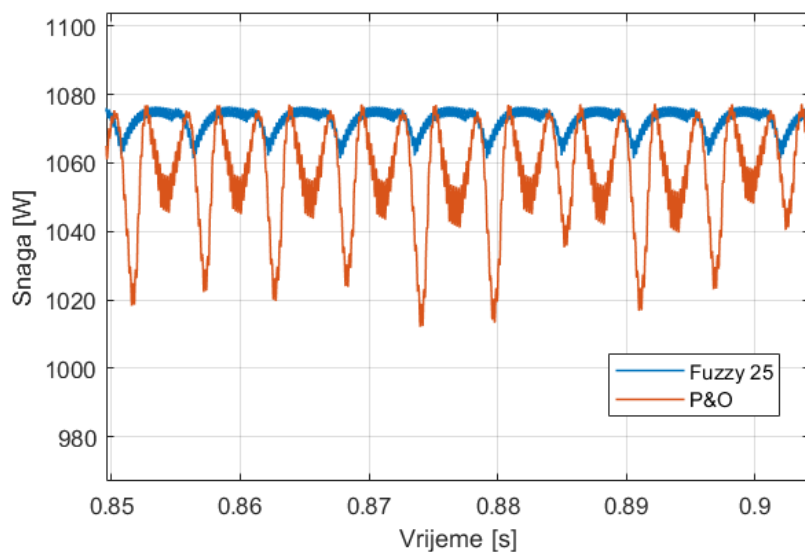


Slika 4.2: Uveličan prikaz stacionarnog režima izlazne snage – P&O i fazi algoritam (9 pravila)

Na slikama 4.3 i 4.4 prikazani su rezultati za fazi kontroler sa 25 pravila u poređenju sa P&O metodom. I u ovom slučaju fazi pristup pokazuje superiorne performanse, pri čemu veći broj pravila dodatno doprinosi smanjenju oscilacija oko MPP tačke i omogućava stabilniji izlaz snage. Time se potvrđuje da proširenje baze pravila unapređuje preciznost praćenja MPP.

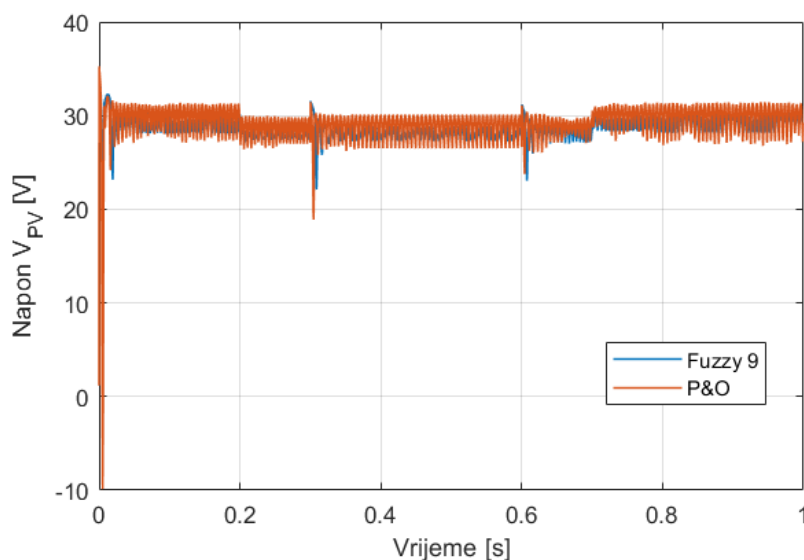


Slika 4.3: Dinamičko poređenje izlazne snage  $P_{pv}$  – P&O i fazi algoritam sa 25 pravila

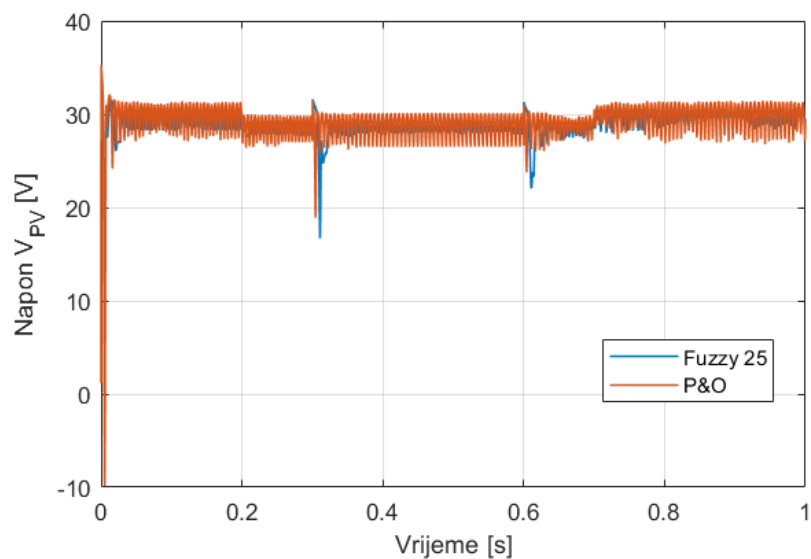


Slika 4.4: Uveličan prikaz stacionarnog režima izlazne snage – P&O i fazi algoritam (25 pravila)

Na slikama 4.5 i 4.6 prikazana je dinamika napona panela  $V_{pv}$  za poređenje P&O i fazi algoritama. Primjećuje se da fazi metod, kako sa 9 tako i sa 25 pravila, ostvaruje stabilniji radni napon u poređenju sa P&O metodom. Smanjene oscilacije napona direktno doprinose manjem gubitku snage i stabilnijem radu sistema u stacionarnom režimu.

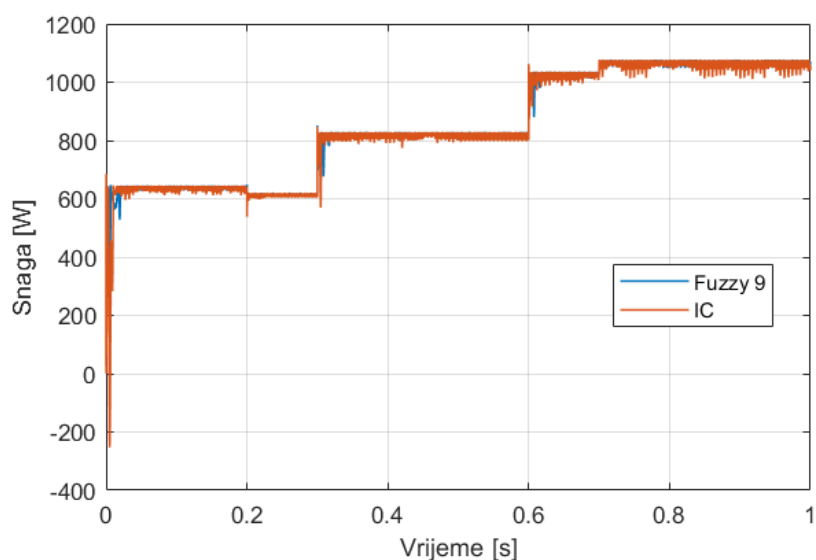


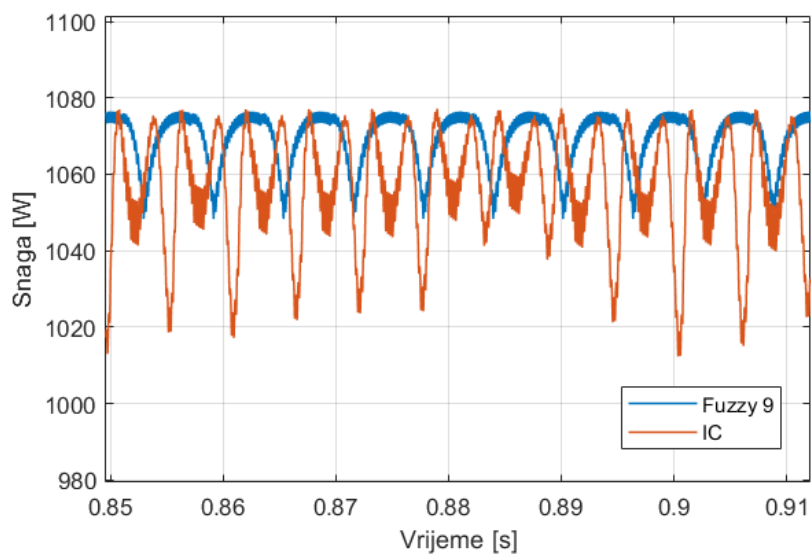
Slika 4.5: Poređenje napona panela  $V_{pv}$  – P&O i fazi algoritam sa 9 pravila

Slika 4.6: Poređenje napona panela  $V_{pv}$  – P&O i fazi algoritam sa 25 pravila

## 4.2 Poređenje IC i fazi MPPT algoritma

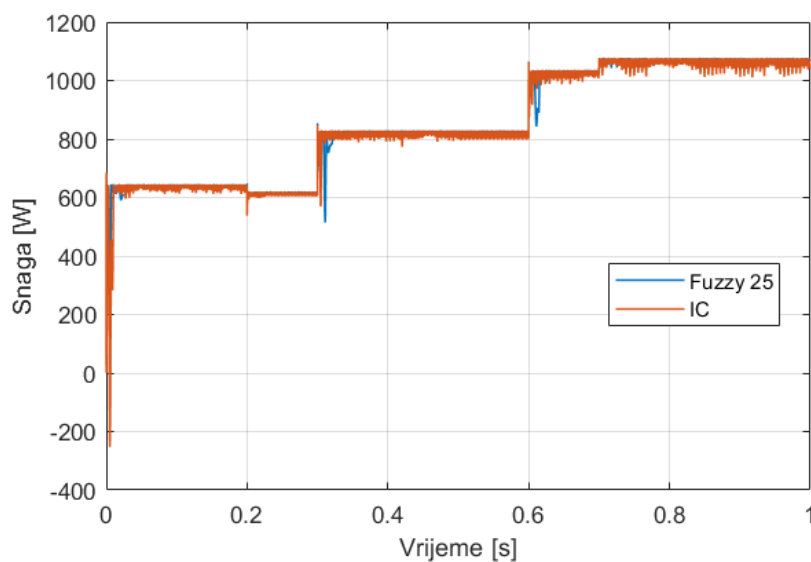
Na slikama 4.7 i 4.8 prikazan je odziv izlazne snage PV sistema za IC metod i fazi algoritam sa 9 pravila. Uočava se da oba pristupa pravilno prate promjene iradijance i temperature, ali fazi metod pokazuje smireniji odziv i manja kolebanja oko radne tačke. Na detaljnom prikazu stacionarnog režima primjećuje se da fazi kontroler omogućava veću prosječnu snagu u odnosu na IC.

Slika 4.7: Uporedni prikaz izlazne snage  $P_{pv}$  – IC i fazi algoritam sa 9 pravila

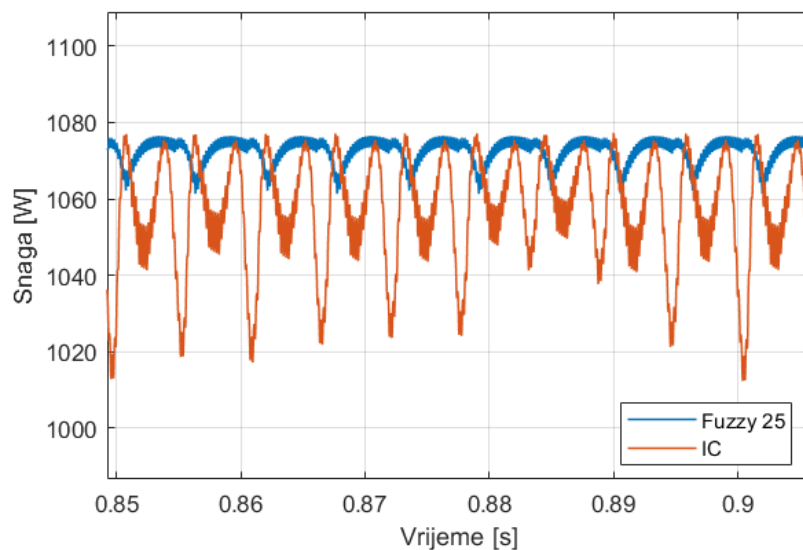


Slika 4.8: Detaljan prikaz stacionarnog režima izlazne snage — IC i fazi (9 pravila)

Na slikama 4.9 i 4.10 prikazani su rezultati kada se koristi fazi algoritam sa 25 pravila. Veća baza pravila doprinosi smanjenju oscilacija i omogućava stabilniji rad u poređenju sa IC metodom. Time se potvrđuje da fazi pristup, naročito sa detaljnijom strukturom pravila, obezbeđuje efikasnije iskorišćenje raspoložive snage.

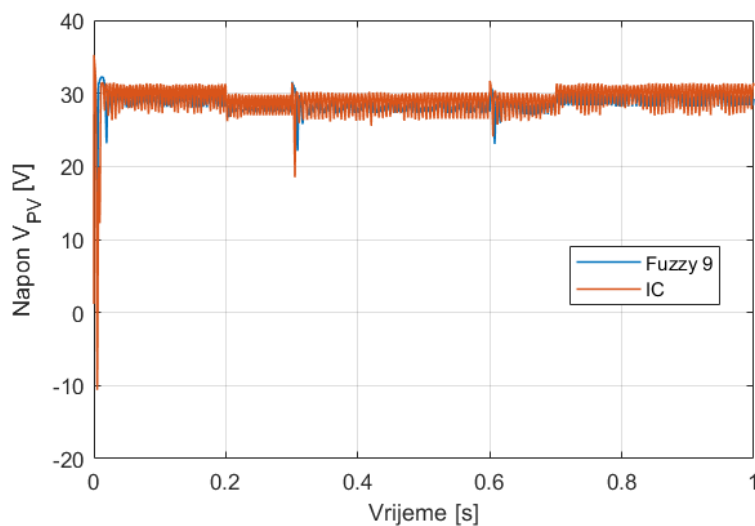


Slika 4.9: Uporedni prikaz izlazne snage  $P_{pv}$  za IC i fazi algoritam sa 25 pravila

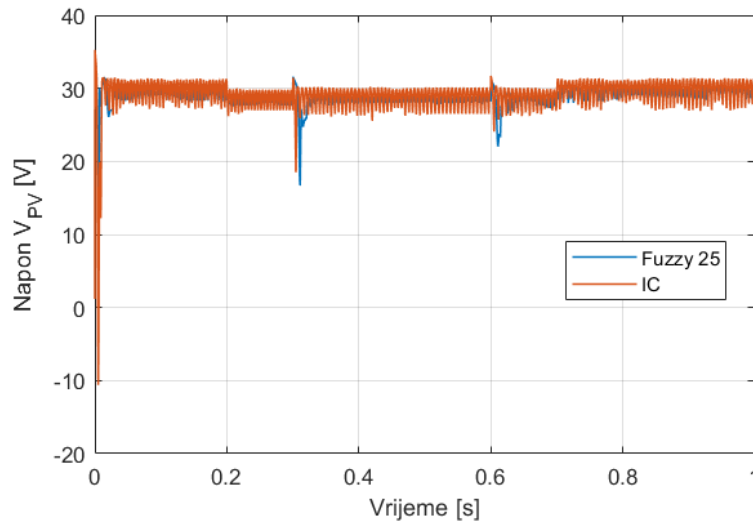


Slika 4.10: Detaljan prikaz stacionarnog režima izlazne snage – IC i fazi (25 pravila)

Na slikama 4.11 i 4.12 dat je odziv napona panela  $V_{pv}$ . Primjećuje se da fazi kontroleri (9 i 25 pravila) obezbjeđuju stabilniji radni napon sa manjim oscilacijama u odnosu na IC algoritam. Ovakvo ponašanje je značajno jer smanjuje gubitke energije i doprinosi većoj pouzdanosti sistema pri promjenljivim uslovima rada.



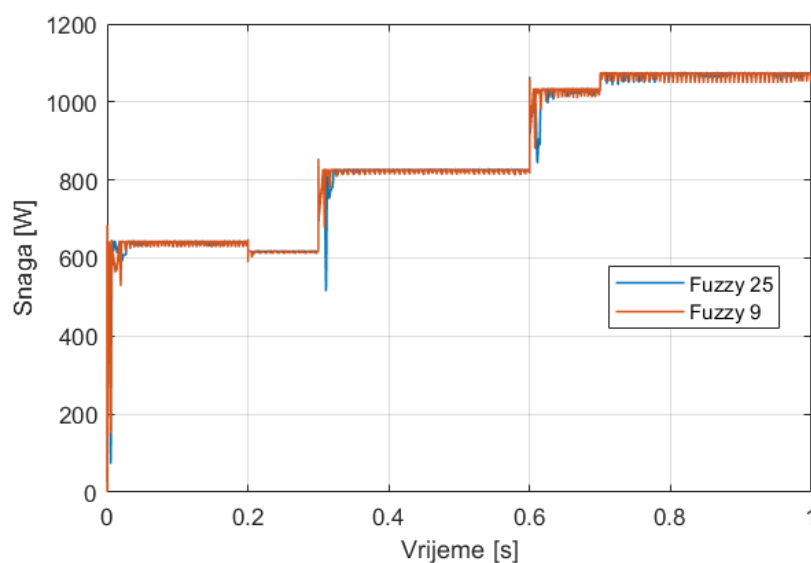
Slika 4.11: Uporedni prikaz napona panela  $V_{pv}$  – IC i fazi algoritam sa 9 pravila



Slika 4.12: Upporedni prikaz napona panela  $V_{pv}$  – IC i fazi algoritam sa 25 pravila

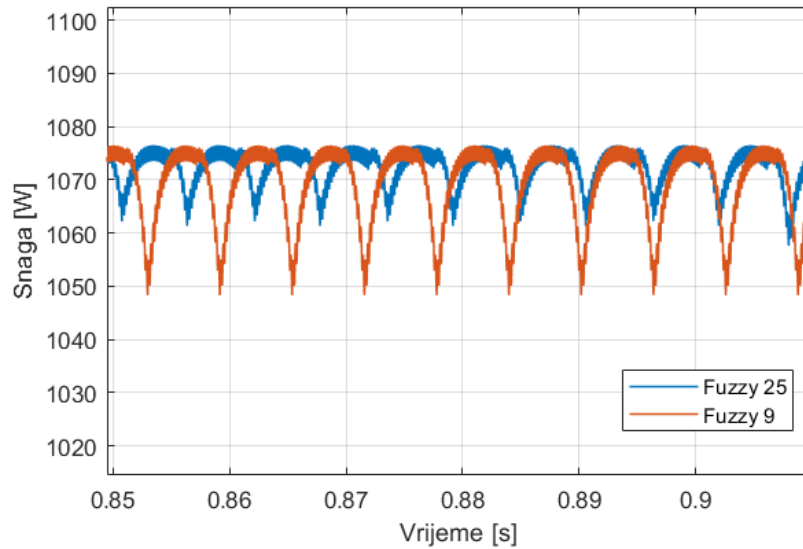
### 4.3 Poređenje fazi algoritma sa 9 pravila i fazi algoritma sa 25 pravila

Na slikama 4.13 i 4.14 prikazana je izlazna snaga PV sistema pri primjeni fazi kontrolera sa 9 i 25 pravila. Iako oba algoritma pravilno prate promjene iradijancije i temperature, uočava se razlika u kvalitetu stacionarnog odziva. Kontroler sa 25 pravila ostvaruje znatno mirniji rad oko maksimalne tačke snage, dok verzija sa 9 pravila pokazuje izraženija koledbanja. Na detaljnom prikazu stacionarnog režima vidi se da veća baza pravila doprinosi smanjenju oscilacija i omogućava višu prosječnu vrijednost izlazne snage.



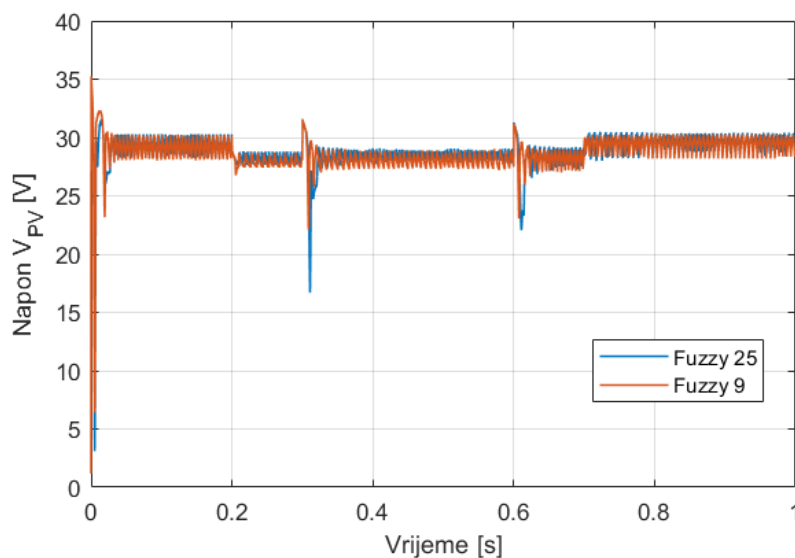
Slika 4.13: Izlazna snaga  $P_{pv}$  pri upotrebi fazi algoritama sa 9 i 25 pravila

#### 4.3. POREĐENJE FAZI ALGORITMA SA 9 PRAVILA I FAZI ALGORITMA SA 25 PRAVILA



Slika 4.14: Detaljan prikaz stacionarnog režima izlazne snage – fazi 9 i fazi 25

Na slici 4.15 prikazan je odziv napona panela  $V_{pv}$  za ista dva kontrolera. Oba algoritma održavaju napon blizak optimalnom, ali se može primijetiti da fazi sa 25 pravila obezbjeđuje stabilniji profil napona i smanjuje varijacije tokom promjena radnih uslova. Time se potvrđuje da povećanje broja pravila pozitivno utiče na preciznost i robusnost MPPT algoritma, bez narušavanja brzine odziva.



Slika 4.15: Promjena napona panela  $V_{pv}$  za fazi algoritme sa 9 i 25 pravila

# Zaključak

U ovom radu obrađena je problematika praćenja MPP-a u PV sistemima, sa posebnim fokusom na primjenu fazi logike. U okviru teorijskog dijela detaljno su analizirani osnovni principi fotonaponskih ćelija i panela, kao i najčešće korišćeni MPPT algoritmi: metode P&O i IC. Istaknute su prednosti i ograničenja klasičnih pristupa, što je motivisalo razmatranje fazi logike kao naprednijeg i fleksibilnijeg rješenja.

Razvijeni su fazi MPPT algoritmi sa bazom od 9 i 25 pravila, pri čemu je u radu sprovedena detaljna simulaciona analiza njihovih performansi i poređenje sa pomenutim konvencionalnim metodama. Simulacije su realizovane u MATLAB/Simulink okruženju, pri čemu su korišćeni realni parametri fotonaponskog modula i različiti profili promjena iradijance i temperature. Rezultati su pokazali da fazi pristup u svim scenarijima ostvaruje bolje performanse u odnosu na P&O i IC algoritam, kako u pogledu brzine praćenja maksimalne tačke, tako i u pogledu stabilnosti u stacionarnom režimu.

Posebno značajan rezultat je smanjenje oscilacija izlazne snage i napona oko tačke maksimalne snage. Kod P&O i IC metoda uočene su izraženije oscilacije u ustaljenom stanju, što dovodi do smanjenja ukupne iskorišćenosti sistema. Fazi algoritam sa 9 pravila već pokazuje primjetno unapređenje, dok algoritam sa 25 pravila dodatno smanjuje oscilacije i omogućava stabilniji rad. Analiza napona  $V_{pv}$  potvrdila je da fazi pristup omogućava mirniji profil napona, što doprinosi povećanoj efikasnosti i smanjenju gubitaka. Ovi rezultati jasno ukazuju da primjena fazi logike doprinosi većoj robusnosti i pouzdanosti PV sistema pri promjenljivim uslovima rada.

Upoređivanjem fazi algoritama sa 9 i 25 pravila može se zaključiti da veća baza pravila donosi bolje performanse, posebno u pogledu stabilnosti i preciznosti. Ipak, povećanje složenosti algoritma povlači i određene zahtjeve u pogledu računarske implementacije, što može biti značajan faktor u praktičnim primjenama, naročito kod mikrokontrolerskih sistema ograničenih resursa. Stoga se izbor između jednostavnije i složenije fazi strukture može prilagoditi konkretnim aplikacijama i kompromisu između performansi i složenosti.

Može se zaključiti da fazi MPPT algoritam predstavlja efikasniju alternativu klasičnim metodama uz značajno poboljšanje stabilnosti i preciznosti praćenja tačke maksimalne snage. Rezultati rada pokazuju da fazi pristup omogućava smanjenje oscilacija i ostvarivanje stabilnijeg rada sa većom prosječnom izlaznom snagom u svim razmatranim scenarijima.

Buduća istraživanja treba usmjeriti ka praktičnoj implementaciji fazi MPPT algori-

tama u realnim fotonaponskim sistemima i validaciji dobijenih simulacionih rezultata u laboratorijskim i terenskim uslovima. Posebna pažnja može se posvetiti optimizaciji strukture fazi pravila u cilju postizanja balansa između performansi i složenosti implementacije. Takođe, u budućem radu mogu se razmatrati i druge metode zasnovane na soft-computing pristupima, kao što su neuronske mreže ili optimizacione tehnike zasnovane na populacionim algoritmima, koje bi u kombinaciji sa fazi logikom mogle dodatno unaprijediti rad MPPT algoritama i efikasnost kompletnog PV sistema. Pored toga, istraživanja se mogu usmjeriti i ka razvoju fazi sistema sa proširenom bazom pravila, čime bi se omogućila još preciznija kontrola i smanjenje oscilacija u stacionarnom režimu uz analizu kompromisa između složenosti implementacije i ostvarenih performansi.

# Bibliografija

- [1] J. Twidell and T. Weir, *Renewable Energy Resources*. Routledge, 4 ed., 2021.
- [2] International Energy Agency, “Tracking Clean Energy Progress 2023,” 2023.
- [3] International Renewable Energy Agency, “World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5deg C Pathway,” 2023.
- [4] G. Boyle, ed., *Renewable Energy: Power for a Sustainable Future*. Oxford University Press, 2012.
- [5] S. A. Kalogirou, *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. Academic Press, 2 ed., 2013.
- [6] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*. Wiley, 4 ed., 2013.
- [7] M. A. Green, *Solar Cells: Operating Principles, Technology, and System Applications*. Prentice-Hall, 1982.
- [8] D. Wagman, *Renewable Energy: A Nontechnical Guide*. PennWell Books, 2024.
- [9] R. Messenger and J. Ventre, *Photovoltaic Systems Engineering*. CRC Press, 3 ed., 2010.
- [10] T. Eswam and P. L. Chapman, “Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, no. 2, pp. 439–449, 2007.
- [11] L. Piegari and R. Rizzo, “Adaptive Perturb and Observe Algorithm for Photovoltaic Maximum Power Point Tracking,” *IET Renewable Power Generation*, vol. 4, no. 6, pp. 628–636, 2010.
- [12] S. A. Rizzo and G. Scelba, “ANN Based MPPT Method for Rapidly Variable Shading Conditions,” *Applied Energy*, vol. 145, pp. 124–132, 2015.
- [13] L. A. Zadeh, “Fuzzy Logic = Computing With Words,” *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 4, no. 2, pp. 103–111, 1996.

- [14] L. M. Elobaid, A. K. Abdelsalam, and E. E. Zakzouk, "Artificial Neural Network-Based Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Techniques: A Survey," *IET Renewable Power Generation*, vol. 9, no. 8, pp. 1043–1053, 2015.
- [15] S. S. Kumar and K. Balakrishna, "A Novel Design and Analysis of Hybrid Fuzzy Logic MPPT Controller for Solar PV System Under Partial Shading Conditions," *Scientific Reports*, vol. 14, no. 1, 2024.
- [16] V. Sivaram and S. Kann, "Solar Power Needs a More Ambitious Cost Target," *Nature Energy*, vol. 1, no. 4, pp. 1–3, 2016.
- [17] Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, "Photovoltaics Report," 2025.
- [18] K. Menou and M. Lopez, "The Future of Solar Energy: An Interdisciplinary Analysis," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 121, 2020.
- [19] Y.-K. Tan and S. K. Panda, "Energy Harvesting From Hybrid Indoor Ambient Light and Thermal Energy Sources for Enhanced Performance of Wireless Sensor Nodes," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 9, pp. 4424–4435, 2011.
- [20] S. White, *Solar Photovoltaic Basics: A Study Guide for the NABCEP Entry Level Exam*. Taylor & Francis, 2 ed., 2014.
- [21] Vlada Crne Gore, "Nacionalni Energetski i Klimatski Plan Crne Gore do 2030. Godine," 2023.
- [22] Balkan Green Energy News, "Montenegro's Power Consumption Grows 25%," 2025.
- [23] Skupština Crne Gore, "Zakon o Korišćenju Energije iz Obnovljivih Izvora," 2024.
- [24] M. Rolevski, "Modelovanje i Praćenje Tačke Maksimalne Snage Fotonaponskog Panela Primjenom Neuralnih Mreža," magistarski rad, Elektrotehnički Fakultet, Univerzitet Crne Gore, 2020.
- [25] G. M. Masters, *Renewable and Efficient Electric Power Systems*. John Wiley & Sons, 2013.
- [26] A. Kapić, "Prijedlog Algoritma za Praćenje Tačke Maksimalne Snage Fotonaponskih Panela," magistarski rad, Elektrotehnički Fakultet, Univerzitet Crne Gore, 2018.
- [27] J. H. Leck, *Theory of Semiconductor Junction Devices: A Textbook for Electrical and Electronic Engineers*. Elsevier, 2013.
- [28] S. M. Sze and K. K. Ng, *Physics of Semiconductor Devices*. John Wiley & Sons, 2006.

- [29] A. Fahrenbruch and R. Bube, *Fundamentals of Solar Cells: Photovoltaic Solar Energy Conversion*. Elsevier, 2012.
- [30] A. McEvoy, T. Markvart, and L. Castaner, *Solar Cells: Materials, Manufacture and Operation*. Academic Press, 2 ed., 2012.
- [31] M. G. Villalva, J. R. Gazoli, and E. R. Filho, "Modeling and Circuit-Based Simulation of Photovoltaic Arrays," *Brazilian Journal of Power Electronics*, vol. 14, no. 1, pp. 35–45, 2009.
- [32] I. K. Argyros, *Convergence and Applications of Newton-Type Iterations*. Springer, 2011.
- [33] D. K. Sharma and G. Purohit, "Analysis of the Effect of Fill Factor on the Efficiency of Solar PV System for Improved Design of MPPT," in *6th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-6)*, (Kyoto, Japan), 2014.
- [34] D. S. Chan and J. C. H. Phang, "Analytical Methods for the Extraction of Solar Cell Single- and Double-Diode Model Parameters From IV Characteristics," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 34, no. 2, pp. 286–293, 1987.
- [35] S. B. Prakash, G. Singh, and S. Singh, "Modeling and Performance Analysis of Simplified Two-Diode Model of Photovoltaic Cells," *Frontiers in Physics*, vol. 9, 2021.
- [36] A. Dehghanzadeh, G. Farahani, and M. Maboodi, "A Novel Approximate Explicit Double-Diode Model of Solar Cells for Use in Simulation Studies," *Renewable Energy*, vol. 103, pp. 468–477, 2017.
- [37] A. Hovinen, "Fitting of the Solar Cell IV-Curve to the Two Diode Model," *Physica Scripta*, vol. T54, p. 175, 1994.
- [38] R. W. Erickson and D. Maksimović, *Fundamentals of Power Electronics*. Springer, 2 ed., 2001.
- [39] H. Bounechba, A. Bouzid, K. Nabti, and H. Benalla, "Comparison of Perturb & Observe and Fuzzy Logic in Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic System," *Energy Procedia*, vol. 50, pp. 402–409, 2014.
- [40] F. Yahiaoui, F. Chabour, O. Guenounou, M. Bajaj, S. S. H. Bukhari, M. S. Nazir, M. Pushkarna, D. E. M. Wapet, and A. Mohammadzadeh, "An Experimental Testing of Optimized Fuzzy Logic-Based MPPT for a Standalone PV System Using Genetic Algorithms," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2023, 2023.

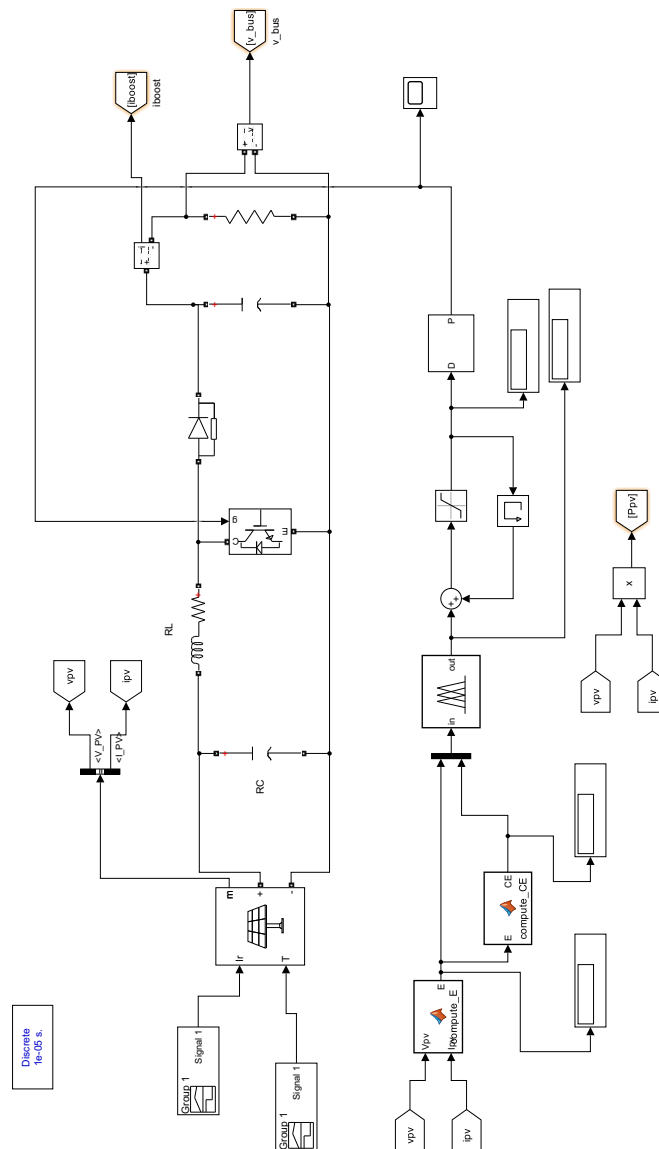
- [41] A. Chikh and A. Chandra, “An Optimal Maximum Power Point Tracking Algorithm for PV Systems With Climatic Parameters Estimation,” *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 6, no. 2, pp. 644–652, 2015.
- [42] S. Chtita, S. Motahhir, A. El Hammoumi, A. Chouder, A. S. Benyoucef, A. El Ghzizal, A. Derouich, M. Abouhawwash, and S. S. Askar, “A Novel Hybrid GWO–PSO-Based Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic Systems Operating Under Partial Shading Conditions,” *Scientific Reports*, vol. 12, 2022.
- [43] U. Patel, D. Sahu, and D. Tirkey, “Maximum Power Point Tracking Using Perturb & Observe Algorithm and Compare With Another Algorithm,” *International Journal of Digital Application & Contemporary Research*, vol. 2, 2013.
- [44] J. J. Nedumgatt, K. B. Jayakrishnan, S. Umashankar, D. Vijayakumar, and D. P. Kothari, “Perturb and Observe MPPT Algorithm for Solar PV Systems—Modeling and Simulation,” in *IEEE Annual India Conference (INDICON)*, pp. 1–6, 2011.
- [45] S. Bhattacharyya, D. S. K. Patnam, S. Samanta, *et al.*, “Steady Output and Fast Tracking MPPT (SOFT MPPT) for P&O and InC Algorithm,” *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2020.
- [46] Y. Yang and F. P. Zhao, “Adaptive Perturb and Observe MPPT Technique for Grid-Connected Photovoltaic Inverters,” in *Procedia Engineering*, vol. 23, pp. 468–473, 2011.
- [47] F. Zhang, K. Thanapalan, A. Procter, S. Carr, and J. Maddy, “Adaptive Hybrid Maximum Power Point Tracking Method for a Photovoltaic System,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 28, no. 2, pp. 353–360, 2013.
- [48] D. A. Asoh, B. D. Noumsi, and E. N. Mbinkar, “Maximum Power Point Tracking Using the Incremental Conductance Algorithm for PV Systems Operating in Rapidly Changing Environmental Conditions,” *Smart Grid and Renewable Energy*, vol. 13, pp. 89–108, 2022.
- [49] A. Asnil, R. Nazir, K. Krismadinata, and M. N. Sonni, “Performance Analysis of an Incremental Conductance MPPT Algorithm for Photovoltaic Systems Under Rapid Irradiance Changes,” *TEM Journal*, vol. 13, no. 2, pp. 1087–1094, 2024.
- [50] A. Harrison, N. H. Alombah, and J. D. D. Nguimfack Ndongmo, “A New Hybrid MPPT Based on Incremental Conductance-Integral Backstepping Controller Applied to a PV System Under Fast-Changing Operating Conditions,” *International Journal of Photoenergy*, 2023.
- [51] S. André, F. Silva, S. Pinto, and P. Miguens, “Novel Incremental Conductance Feedback Method With Integral Compensator for Maximum Power Point Tracking: A Comparison Using Hardware in the Loop,” *Applied Sciences*, vol. 13, no. 7, 2023.

- [52] I. Banu and M. Istrate, “Comparative Analysis of the Perturb-and-Observe and Incremental Conductance MPPT Methods.” IEEE Dataport, 2022.
- [53] N. E. Zakzouk, M. A. Elsharty, A. K. Abdelsalam, A. A. Helal, and B. W. Williams, “Improved Performance Low-Cost Incremental Conductance PV MPPT Technique,” *IET Renewable Power Generation*, vol. 10, no. 4, pp. 561–574, 2016.
- [54] C. Sun, J. Ling, and J. Wang, “Research on a Novel and Improved Incremental Conductance Method,” *Scientific Reports*, vol. 12, 2022.
- [55] A. Dolara, R. Faranda, and S. Leva, “Energy Comparison of Seven MPPT Techniques for PV Systems,” *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, vol. 1, no. 3, pp. 152–162, 2009.
- [56] L. A. Zadeh, “Fuzzy Sets,” *Information and Control*, vol. 8, no. 3, pp. 338–353, 1965.
- [57] G. Chen and T. T. Pham, *Introduction to Fuzzy Systems*. Chapman & Hall/CRC, 2001.
- [58] J. K. Peckol, *Introduction to Fuzzy Logic*. Wiley, 2021.
- [59] T. J. Ross, *Fuzzy Logic With Engineering Applications*. John Wiley & Sons, 2 ed., 2004.
- [60] G. J. Klir and B. Yuan, *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications*. Prentice Hall, 1995.
- [61] D. Toumi *et al.*, “Maximum Power Point Tracking of Photovoltaic Array Using Fuzzy Logic Control,” *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, vol. 13, no. 4, pp. 2440–2449, 2022.
- [62] K. Ullah, M. Ishaq, F. Tchier, H. Ahmad, and Z. Ahmad, “Fuzzy-Based Maximum Power Point Tracking (MPPT) Control System for Photovoltaic Power Generation System,” *Results in Engineering*, vol. 20, 2023.
- [63] M. Melhaoui *et al.*, “Hybrid Fuzzy Logic Approach for Enhanced MPPT Control in Photovoltaic Systems,” *Scientific Reports*, vol. 15, 2025.
- [64] A. Boudia, S. Messalti, S. Zeghlache, and A. Harrag, “Type-2 Fuzzy Logic Controller-Based Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic System,” *Electrical and Computer Engineering*, 2025.

# Prilog

## Simulink model

Na slici 5 prikazan je model PV sistema sa DC–DC konvertorom i MPPT kontrolerom, razvijen u okruženju *MATLAB/Simulink*.



Slika 5: Simulink model PV sistema sa MPPT regulatorom.

## MATLAB kod za P&amp;O

```
1 function D = pandO(Vpv, Ipv)
2
3 persistent Dprev Vprev Pprev
4
5 if isempty(Dprev)
6     Dprev = 0.45; % Inicijalna vrijednost za D
7     Vprev = Vpv; % Inicijalna vrijednost za Vprev
8     Pprev = Vpv * Ipv; % Inicijalna vrijednost za Pprev
9 end
10
11 % Fiksni korak perturbacije
12 deltaD = 0.001;
13
14 % Granice duty cycle-a
15 Dmin = 0.2;
16 Dmax = 0.8;
17
18 % Trenutna snaga
19 Ppv = Vpv * Ipv;
20
21 % Poreenje snage
22 if abs(Ppv - Pprev) > 0
23     if Ppv > Pprev
24         if Vpv > Vprev
25             D = Dprev - deltaD; % Smanji D
26         else
27             D = Dprev + deltaD; % Poveaj D
28         end
29     else
30         if Vpv > Vprev
31             D = Dprev + deltaD; % Poveaj D
32         else
33             D = Dprev - deltaD; % Smanji D
34         end
35     end
36 else
37     D = Dprev; % Zadri D
38 end
39
40 % Primjena ogranijenja na duty cycle
41 D = max(Dmin, min(D, Dmax));
```

```
42
43 % Auriraj prethodne vrijednosti
44 Dprev = D;
45 Vprev = Vpv;
46 Pprev = Ppv;
47
48 end
```

## MATLAB kod za IC

```
1 function D = incCondMPPT(Vpv, Ipv)
2
3 % Persistentne promjenljive za prethodne vrijednosti
4 persistent Dprev Vprev Iprev
5
6 % Inicijalizacija persistentnih promjenljivih
7 if isempty(Dprev)
8     Dprev = 0.45;
9     Vprev = Vpv;
10    Iprev = Ipv;
11 end
12
13 deltaD = 0.001; % Korak promjene faktora D
14
15 % Promjene u naponu i struji
16 dV = Vpv - Vprev;
17 dI = Ipv - Iprev;
18
19 % Logika Incremental Conductance algoritma
20 if dV == 0
21     % Kada je napon konstantan
22     if dI == 0
23         D = Dprev;
24     elseif dI > 0
25         D = Dprev - deltaD;
26     else
27         D = Dprev + deltaD;
28     end
29 else
30     % Kada napon nije konstantan
31     incrementalConductance = dI / dV;
```

```
32     instantaneousConductance = -Ipv / Vpv;
33
34     if incrementalConductance == instantaneousConductance
35         D = Dprev;
36     elseif incrementalConductance > instantaneousConductance
37         D = Dprev - deltaD;
38     else
39         D = Dprev + deltaD;
40     end
41 end
42
43 % Ograniavanje
44 D = max(0.2, min(D, 0.8));
45
46 % Auriranje prethodnih vrijednosti
47 Dprev = D;
48 Vprev = Vpv;
49 Iprev = Ipv;
50
51 end
```

## Izjava o istovjetnosti štampane i elektronske verzije master rada

Ime i prezime autora Srđan Todorović

Broj indeksa/upisa 2/23

Studijski program Automatika i industrijska elektrotehnika

Naslov rada Napredna analiza i optimizacija algoritama za praćenje tačke maksimalne snage fotonaponskih sistema primjenom fuzzy logike

Mentor Prof. dr Martin Čalasan

Potpisani/a Srđan Todorović

### 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, 1.11.2025. godine

Potpis magistranda



## IZJAVA O KORIŠĆENJU

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

**" Napredna analiza i optimizacija algoritama za praćenje tačke maksimalne snage fotonaponskih sistema primjenom fuzzy logike "**

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

U Podgorici, 1.11.2025. godine

Potpis magistranda



---