



**UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET PODGORICA**

BSc Ivana Krstajić

**PREDLOG NUMERIČKI UNAPRIJEĐENE METODE POREMEĆAJA I
POSMATRANJA ZA
MAKSIMIZACIJU SNAGE U VJETROENERGETSKIM SISTEMIMA**

Master rad

Podgorica, 2026. godina

PODACI I INFORMACIJE O STUDENTU

Ime i prezime: Ivana Krstajić

Datum i mjesto rođenja: 20.04.2001. godine, Nikšić, Crna Gora

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

INFORMACIJE O MASTER RADU

Naziv master studija: Automatika i industrijska elektrotehnika

Naslov master rada: Predlog numerički unaprijeđene metode poremećaja i posmatranja za maksimizaciju snage u vjetroenergetskim sistemima

UDK, OCJENA I ODBRANA MASTER RADA

Datum prijave master rada: 12.06.2025.

Datum sjednice Vijeća na kojoj je prihvaćena tema: 16.06.2025.

Komisija za ocjenu/odbranu rada:

1. Prof. dr Vladan Vujičić, predsjednik,
2. Prof. dr Martin Čalasan, mentor,
3. Prof. dr Vesna Rubežić, član.

Lektor: _____

Datum odbrane: 30.01.2026.

Datum promocije: _____

Izjava o autorstvu

Potpisani-a: Krstajić Ivana

Broj indeksa/upisa: 8/23

Izjavljujem

da je master rad pod nazivom „Predlog numerički unaprijeđene metode poremećaja i posmatranja za maksimizaciju snage u vjetroenergetskim sistemima.”

"Tema master rada"

- 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, 21.11.2025.godine

Potpis magistranda

Krstajić Ivana

Lista korišćenih skraćenica

MPPT	Maximum Power Point Tracking
EES	Elektroenergetski sistem
P&O	Perturb and Observe
MPP	Maximum Power Point
M-P&O	Modified Perturb and Observe
HAWT	Horizontal Axis Wind Turbine
VAWT	Vertical Axis Wind Turbine
PMSG	Permanent Magnet Synchronous Generator
TSR	Tip Speed Ratio
OM	Optimal Moment
PSF	Power Signal Feedback
DC	Direct Current
AC	Alternating Current
DFIG	Doubly-Fed Induction Generator
SRG	Switched Reluctance Generator
PMSM	Permanent Magnet Synchronous Machine
EMF	Electromotive Force
THD	Total Harmonic Distortion
PWM	Pulse Width Modulation
AM	Amplitude Modulation
FM	Frequency Modulation
WECS	Wind Energy Conversion System
OT	Optimal Torque
PSF	Power Signal Feedback
IPC	Indirect Power Control
DPC	Direct Power Control
INC	Incremental Conductance
ORB	Optimal Relation-Based

Predgovor

Savremeni elektroenergetski sistemi (EES) suočavaju se sa rastućim zahtjevima za smanjenjem emisije ugljenika i ubrzanom energetsom tranzicijom, što je uslovalo intenzivan razvoj obnovljivih izvora energije. Posebno značajnu ulogu u tom procesu zauzimaju vjetroenergetski sistemi, koji su sve učestalije prisutni u elektroenergetskoj mreži. Ipak, njihova integracija je otežana zbog varijabilne i teško predvidljive prirode vjetra, što rezultira problemima u pogledu stabilnosti i efikasnosti rada EES-a.

U svrhu maksimalnog iskorišćenja raspoložive energije razvijeni su brojni algoritmi za praćenje tačke maksimalne snage, u literaturi poznati kao *Maximum Power Point Tracking* (MPPT). Njihova primjena omogućava da energetski sistem konstantno radi u režimu maksimalne proizvodnje, uprkos varijabilnim uslovima rada. Jedan od najrasprostranjenijih algoritama među njima je metod poremećaja i posmatranja (engl. *Perturb & Observe* – P&O), koji se ističe svojom jednostavnošću i malim računarskim zahtjevima. Ipak, klasični P&O algoritam suočava se sa značajnim ograničenjima: oscilacijama oko tačke maksimalne snage (engl. *Maximum Power Point* – MPP), smanjenom efikasnošću u uslovima brzih promjena brzine vjetra, te kompromisom između brzine odziva i stabilnosti EES-a.

Kao odgovor na navedene probleme, istraživanje u okviru ovog master rada predlaže unaprijeđenu verziju P&O algoritma koja integriše pravougaonu, trapezoidnu i Simpsonovu numeričku aproksimaciju površine snaga-napon ($P-V$) krive u kombinaciji sa promjenjivim korakom perturbacije. Ovakva kombinacija omogućava precizniju procjenu promjene snage i dinamičko prilagođavanje radnih parametara sistema, čime se značajno unapređuju tačnost, odziv i stabilnost MPPT procesa.

Cilj rada je razvoj numerički optimizovane, adaptivne P&O strategije za praćenje MPP-a u vjetroenergetskim sistemima sa sinhronim generatorom sa stalnim magnetima (engl. *Permanent Magnet Synchronous Generator* - PMSG). U cilju procjene pouzdanosti, algoritam je simuliran u MATLAB/SIMULINK-u za različite scenarije rada vjetroenergetskog sistema, uključujući promjene vjetra, opterećenja i prisustvo šuma.

Izvod rada

Ovaj rad se bavi rješavanjem i unapređivanjem MPPT metoda u vjetroenergetskim sistemima sa PMSG-om, sa ciljem da se postigne bolja efikasnost i stabilnost u radu. Posebno se razmatra P&O algoritam koji je često primjenjivan zbog jednostavne implementacije, ali pokazuje dva ključna ograničenja: kompromis između veličine koraka perturbacije i odnosa brzina–efikasnost, te smjer perturbacije i gubitak pouzdanog praćenja pri naglim promjenama brzine vjetra.

Primarni fokus istraživanja jeste maksimizacija snage i povećanje iskorišćenja energije vjetra kroz unapređenje klasičnog P&O algoritma primjenom numeričkih metoda za aproksimaciju površine snaga–napon ($P-V$) krive i adaptivnog koraka perturbacije. Ove modifikacije omogućavaju preciznije određivanje pravca perturbacije, smanjenje oscilacija oko MPP-a i bržu konvergenciju algoritma.

Cjelokupan vjetroenergetski sistem modelovan je u MATLAB/Simulink okruženju, gdje su uključeni aerodinamički, mehanički i električni podsistemi. Ispitivanje rada predloženog algoritma izvršeno je na modelu vjetroturbine sa PMSG-om i odgovarajućim pretvaračkim sklopovima, pri čemu MPPT algoritam upravlja radom *boost* konvertora, omogućavajući praćenje tačke maksimalne snage. Razmatrani su slučajevi klasičnog P&O algoritma, P&O sa pravougaonom aproksimacijom (lijevom i desnom ivicom), P&O sa trapezoidnim pravilom, P&O sa Simpsonovim pravilom, ali i kombinacija sve tri aproksimacije sa adaptivnim korakom perturbacije. Rezultati sprovedenih simulacija pokazuju da kombinacija trapezoidnog pravila i adaptivnog koraka daje najbolje performanse u pogledu smanjenja oscilacija izlazne snage i napona, ali i skraćenog vremena odziva cjelokupnog vjetroenergetskog sistema. Sa druge strane, pravougaona i Simpsonova aproksimacija omogućavaju brži odziv sistema u odnosu na klasični P&O algoritam. Sumiranjem dobijenih rezultata može se zaključiti da numeričko–adaptivna varijanta predstavlja najpouzdanije rješenje za praktičnu primjenu u vjetroenergetskim sistemima zasnovanim na PMSG tehnologiji, bez potrebe za dodatno složenim hardverskim rješenjima.

Ključne riječi: MPPT, Perturb and Observe, numeričke metode, adaptivni korak, vjetroenergetski sistemi.

Abstract

This paper focuses on the development and improvement of Maximum Power Point Tracking (MPPT) methods in wind energy systems with Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG), aiming to achieve higher efficiency and operational stability. Special attention is given to the Perturb and Observe (P&O) algorithm, which is widely applied due to its simple implementation, but exhibits two major limitations: the trade-off between the perturbation step size and the speed–efficiency ratio, and the direction of perturbation with loss of reliable tracking during sudden wind speed variations.

The primary objective of this research is to maximize power and increase wind energy utilization by enhancing the classical P&O algorithm through the application of numerical methods for approximating the power–voltage (P–V) curve area and adaptive perturbation step control. These modifications enable more accurate determination of the perturbation direction, reduce oscillations around the Maximum Power Point (MPP), and ensure faster algorithm convergence.

The entire wind energy system was modeled in the MATLAB/Simulink environment, including aerodynamic, mechanical, and electrical subsystems. The performance of the proposed algorithm was tested on a wind turbine model with PMSG and appropriate converter circuits, where the MPPT algorithm controls the operation of a boost converter, allowing continuous tracking of the maximum power point. The analyzed cases include the classical P&O algorithm, P&O with rectangular approximation (left and right edge), P&O with the trapezoidal rule, P&O with Simpson’s rule, as well as a combination of all three approximation methods with an adaptive perturbation step.

The results of the conducted simulations show that the combination of the trapezoidal rule and adaptive step provides the best performance in terms of reducing output power and voltage oscillations, as well as shortening the response time of the entire wind energy system. On the other hand, rectangular and Simpson approximations enable a faster system response compared to the classical P&O algorithm.

In summary, the numerical–adaptive variant represents the most reliable solution for practical implementation in wind energy systems based on PMSG technology, without the need for additional complex hardware configurations.

Keywords: MPPT, Perturb and Observe, numerical methods, adaptive step, wind energy systems.

Zahvaljujem mentoru prof. dr Martinu Čalasanu na pruženoj podršci i usmjeravanju tokom izrade rada. Posebnu zahvalnost dugujem svojoj porodici i osobi koja mi je bila najveća podrška kroz sve izazove ovog puta, na neiscrpnjoj ljubavi, strpljenju i podsticaju koji su me pratili na svakom koraku.

Ivana Krstajić

Sadržaj

Lista korišćenih skraćenica	3
Predgovor	4
Izvod rada	5
Abstract	6
1 Uvod	3
2 Vjetrogeneratorski sistemi	6
2.1 Energija vjetra	6
2.2 Vjetroturbine	7
2.2.1 Snaga vjetra	9
2.2.2 Koeficijent snage	11
2.2.3 Tip Speed Ratio	13
2.2.4 Načini upravljanja vjetroturbina	13
2.3 Sinhroni generator sa stalnim magnetima	14
2.3.1 Matematički model PMSM-a	16
3 Sklopovi energetske elektronike i MPPT strategije	17
3.1 Elementi energetske elektronike	18
3.1.1 Diodni most	18
3.1.2 Boost konvertor	20
3.2 MPPT strategije	23
3.2.1 Širinsko impulsna regulacija	25
4 Predlog modifikovane P&O metode	27
4.1 Princip rada i matematička osnova P&O metode	27
4.2 Unapređenje P&O metode primjenom pravila numeričkih aproksimacija	30
4.2.1 Pravougaono integraciono pravilo numeričke integracije	30
4.2.2 Trapezoidno pravilo numeričke integracije	32
4.2.3 Simpsonova pravila numeričke integracije	34

4.3	Adaptivni korak perturbacije	35
5	Simulacioni rezultati	37
5.1	Elementi modela u radu	39
5.1.1	Vjetroturbina	39
5.1.2	Sinhroni generator sa stalnim magnetima	40
5.1.3	Elementi energetske elektronike	41
5.1.4	Upravljačka struktura MPPT algoritma	43
5.2	Primjena pravougaonog numeričkog pravila u određivanju MPP-a	44
5.2.1	Implementacija pravougaonog pravila sa lijevom ivicom	44
5.2.2	Implementacija pravougaonog pravila sa desnom ivicom	49
5.3	Implementacija trapezoidnog pravila	53
5.4	Implementacija Simpsonovog pravila	57
5.5	Komparativna analiza adaptivnih MPPT algoritama	60
	Zaključak	63
	Literatura	65

1. Uvod

Upotreba obnovljivih izvora energije, kao što su sunce, vjetar i voda, bilježi konstantan rast širom svijeta, podstaknuta zabrinutošću za životnu sredinu, iscrpljivanjem fosilnih goriva i potrebom za održivim razvojem. U savremenom energetske sektoru, vjetroenergetski sistemi zauzimaju sve značajniju ulogu i ubrajaju se među najbrže rastuće tehnologije obnovljivih izvora energije.

Vjetar je prirodna pojava koja se sastoji od kretanja vazduha u atmosferi, a njegova energija se može efikasno pretvoriti u električnu pomoću vjetroturbina, koje su tokom posljednjih decenija postale jedan od ključnih stubova razvoja obnovljive energetike. Vjetroturbine kroz aerodinamičke procese pretvaraju energiju vjetra u mehaničku energiju rotora. Dobijena mehanička energija zatim se prenosi na generator, pri čemu se u savremenim rješenjima najčešće primjenjuju PMSG. Ovi generatori omogućavaju direktan pogon (engl. *direct drive*) bez upotrebe reduktora, čime se eliminiše potreba za zupčanicima, smanjuju troškovi održavanja i povećava ukupna pouzdanost konverzije energije. Kako bi se proizvedena električna energija uskladila sa zahtjevima mreže neophodna je primjena pretvaračkih sklopova. Njihova uloga je da izvrše AC–DC konverziju, regulišu napon i struju te obezbijede stabilan rad kompletnog postrojenja.

Za maksimizaciju iskorišćenja energije vjetra ključnu ulogu imaju MPPT algoritmi, koji omogućavaju kontinuirano podešavanje radnih parametara sistema u skladu s promjenama brzine vjetra. U radu [1] prikazana je podjela MPPT metoda u četiri osnovne grupe:

- indirektno upravljanje (engl. *Indirect Power Control* – IPC),
- direktno upravljanje (engl. *Direct Power Control* – DPC),
- pametne (inteligentne) metode i
- hibridne pristupe.

U istom radu sprovedena je i komparativna analiza njihove složenosti, efikasnosti i primjenjivosti. IPC metode zasnivaju se na održavanju rada turbine u skladu sa unaprijed definisanim karakteristikama sistema, dok DPC metode direktno prate promjene električnih veličina poput napona i struje radi određivanja MPP-a. Pametni algoritmi, poput *fuzzy* logike, neuralnih mreža (engl. *Neural Networks* – NN) i metaheurističkih metoda, omogućavaju adaptivno i efikasno praćenje u promjenjivim uslovima, dok hibridni pristupi kombinuju prednosti različitih tehnika kako bi se povećala tačnost i smanjile njihove pojedinačne slabosti. U radu [2] sprovedena je analiza različitih MPPT metoda iz pomenute četiri grupe, sa posebnim akcentom na poređenje njihove složenosti, brzine konvergencije i performansi u uslovima

promjenjive brzine vjetra. Pokazano je da jednostavne metode, kao što su upravljanje odnosom brzina na obodu lopatica (engl. *Tip Speed Ratio* – TSR), metoda optimalnog momenta (engl. *Optimal Moment* – OM) i metoda povratne sprege snage (engl. *Power Signal Feedback* – PSF), imaju prednost u pogledu brze konvergencije i jednostavne implementacije, ali i nedostatke, budući da zahtijevaju mjerenje brzine vjetra i prethodno poznavanje karakteristike turbine. Kao algoritam koji u značajnoj mjeri ublažava nedostatke prethodno navedenih metoda, izdvaja se klasični P&O algoritam. Iako je jednostavan i ne zahtijeva mjerenje brzine vjetra, pokazuje ograničenu tačnost u praćenju tačke maksimalne snage. Adaptivna varijanta ovog algoritma djelimično prevazilazi navedene nedostatke dinamičkim prilagođavanjem koraka perturbacije, čime se postiže veća stabilnost, ali uz cijenu veće složenosti i sporije konvergencije. U radu [3] istaknuto je da klasična P&O metoda zahtijeva kompromis između brzine praćenja i efikasnosti, ali je istaknut i rizik gubitka MPP-a pri naglim promjenama vjetra, što dodatno ograničava njenu primjenu u dinamičnim uslovima. Kao rješenje predložen je adaptivni algoritam zasnovan na korišćenju konstante k_{opt} , koji samostalno prepoznaje maksimalnu tačku, prilagođava veličinu i pravac perturbacije, zadržava radnu tačku kada je dostignut maksimum. U radu [4] predložena je podjela radne karakteristike na četiri sektora, pri čemu se u zavisnosti od pripadnosti sektoru i pratećih parametara prilagođava veličina perturbacije, čime se istovremeno prevazilaze ključni nedostaci klasične P&O metode. U radu [5] predložena je modifikovana P&O metoda, u kojoj se pored promjena napona i snage u proces odlučivanja uključuje i informacija o jednosmjernoj struji, čime se smanjuju oscilacije i drift u blizini MPP-a, eliminišu pogrešne perturbacije pri naglim promjenama vjetra i obezbjeđuje stabilniji rad sistema. Korišćenjem poznate jednačine za snagu vjetra u radu [6] generisana je referentna kriva maksimalne snage, koja se upoređuje sa ostvarenom vrijednošću, a na osnovu tog poređenja određuje se optimalni korak perturbacije P&O algoritma radi pouzdanijeg praćenja MPP-a. U radu [7] predložena je modifikovana P&O metoda, pri čemu je praćenje tačke maksimalne snage realizovano korišćenjem trapezoidnog pravila numeričke integracije. Time se smanjuju oscilacije oko MPP-a i obezbjeđuje pouzdanije i stabilnije praćenje.

Iz pregleda literature mogu se izvući sljedeći zaključci u vezi sa P&O algoritmom i njegovim unapređenjima:

- Klasični P&O je najčešće korišćena MPPT metoda zbog jednostavne implementacije.
- U gotovo svim radovima posebno se ističu ova dva nedostatka, ali se isti prevazilaze različitim modifikacijama pomenutim u prethodnim poglavljima.
- Modifikovani P&O algoritmi pokazuju bolje performanse u pogledu brzine konvergencije i smanjenja oscilacija, ali i dalje predstavljaju kompromis između složenosti implementacije i ostvarene efikasnosti.

U ovom master radu sprovedeno je modelovanje vjetroenergetskog sistema sa PMSG-om i odgovarajućim elementima energetske elektronike. Poseban akcenat stavljen je na implementaciju i unapređenje P&O metode za praćenje tačke maksimalne snage. Za potrebe ovog istraživanja razvijen je MATLAB/Simulink model koji omogućava numeričku optimizaciju P&O algoritma primjenom različitih metoda integracije, kao i adaptivnog koraka perturbacije. Primjenom razvijenog modela izvršena je komparativna analiza između klasičnog i unaprijeđenog P&O algoritma, a rezultati su prikazani u numeričkom i grafičkom obliku.

Rad se sastoji od šest poglavlja.

- Prvo poglavlje sadrži uvodne napomene i obrazložene ciljeve istraživanja.
- Drugo poglavlje obuhvata teorijske osnove vjetroturbine i generatora.
- Treće poglavlje prikazuje pretvaračke sklopove i različite MPPT strategije.
- Četvrto poglavlje posvećeno je razvoju unaprijeđene P&O metode, sa detaljnim opisom numeričke optimizacije pomoću pravougaonog, trapezoidnog i Simpsonovog pravila integracije i primjene adaptivnog koraka.
- Peto poglavlje prikazuje rezultate sprovedenih simulacija i njihovu analizu.
- Šesto poglavlje donosi zaključak i spisak korišćene literature.

2. Vjetrogeneratorski sistemi

U ovom poglavlju analiziraju se osnovni elementi i principi rada jednog vjetrogeneratorskog sistema, koji predstavljaju ključnu komponentu u procesu pretvaranja kinetičke energije vjetra u električnu energiju.

2.1 Energija vjetra

Rastući nivoi zagađenja i zabrinjavajuće klimatske promjene, koje u velikoj mjeri nastaju kao posljedica procesa proizvodnje energije, zahtijevaju smanjenje sve većih emisija štetnih gasova. Proizvodnja električne energije, posebno korišćenjem obnovljivih izvora, pruža značajne mogućnosti za smanjenje tih emisija [8]. Vjetar, sunce, hidroenergija, geotermalna energija, vodonik i biomasa izdvajaju se kao najperspektivnije alternative fosilnim gorivima, koja su glavni uzročnici klimatskih promjena i iscrpljivanja prirodnih resursa. Korišćenje energije vjetra osim što eliminiše emisije CO₂, SO₂, NO_x i drugih zagađujućih materija karakterističnih za termoelektrane na ugalj, u potpunosti izbjegava problem radioaktivnog otpada svojstvenog nuklearnim elektranama. Za razliku od solarne energije, čija je proizvodnja ograničena dnevnim ciklusima i vremenskim uslovima, energija vjetra može biti dostupna i noću, ali je njena osnovna slabost varijabilnost i zavisnost od lokalnih meteoroloških prilika, što zahtijeva primjenu naprednih algoritama upravljanja i skladištenja energije. U poređenju sa hidroenergijom, koja obezbjeđuje stabilnu i predvidljivu proizvodnju, vjetroenergija ima prednost u tome što ne zahtijeva velike infrastrukturne zahvate poput izgradnje brana, ali je i dalje osjetljivija na promjene vremenskih uslova i fluktuacije u dostupnosti resursa. Time se vjetroenergija nameće kao čista, obnovljiva i dugoročno održiva opcija za proizvodnju električne energije, koja doprinosi očuvanju životne sredine i energetske tranziciji.

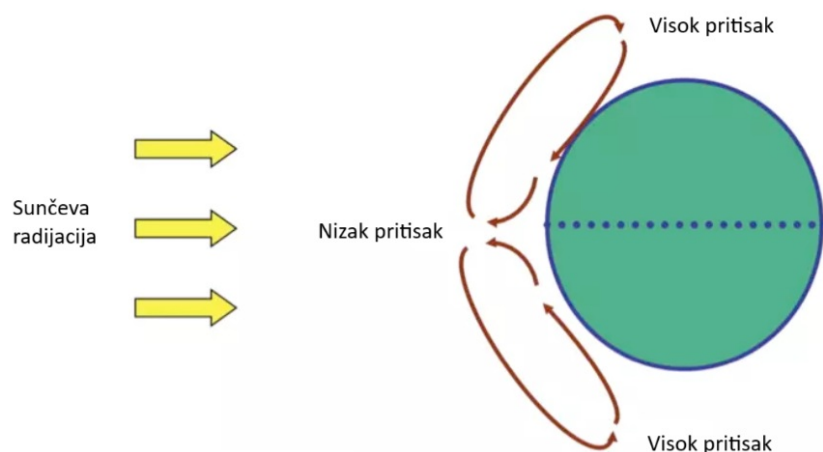
Vjetar nastaje kretanjem vazduha usljed razlika u atmosferskom pritisku, pri čemu se vazduh pomjera iz područja višeg ka nižem pritisku. Što su te razlike izraženije, to je veća brzina vjetra i potencijal za proizvodnju energije.

Na nastanak i kretanje vjetra utiču tri ključna faktora:

- **Neujednačeno zagrijavanje Zemlje** – Sunčevo zračenje neravnomjerno zagrijava površinu planete zbog njenog sfernog oblika, nagiba ose rotacije, različitih reflektivnih svojstava površinskih materijala i raznovrsnog reljefa. Time nastaju razlike u temperaturi i pritisku koje pokreću kretanje toplog zraka od ekvatora prema polovima i hladnog zraka od polova prema ekvatoru, što je prikazano na slici 2.1.1.

- **Korijolisova sila** – Koriolisova sila nastaje usljed Zemljine rotacije i ogleda se u skretanju pravca atmosferskih strujanja. Na sjevernoj hemisferi vjetar skreće udesno, dok se na južnoj hemisferi ulijevo. Intenzitet Koriolisove sile zavisi od geografske širine, na ekvatoru je jednak nuli, dok na polovima dostiže svoju maksimalnu vrijednost.
- **Lokalna geografija** – Površinska hrapavost i prepreke poput brda, šuma i građevina usporavaju strujanje i uzrokuju promjene brzine vjetra u zavisnosti od visine. Određene konfiguracije terena, poput planinskih prolaza, mogu lokalno pojačati brzinu stvaranjem tzv. planinskih mlazova.

Ova tri faktora određuju intenzitet, smjer i stabilnost vjetra, što direktno utiče na efikasnost vjetroturbina i planiranje vjetroelektrana [9].

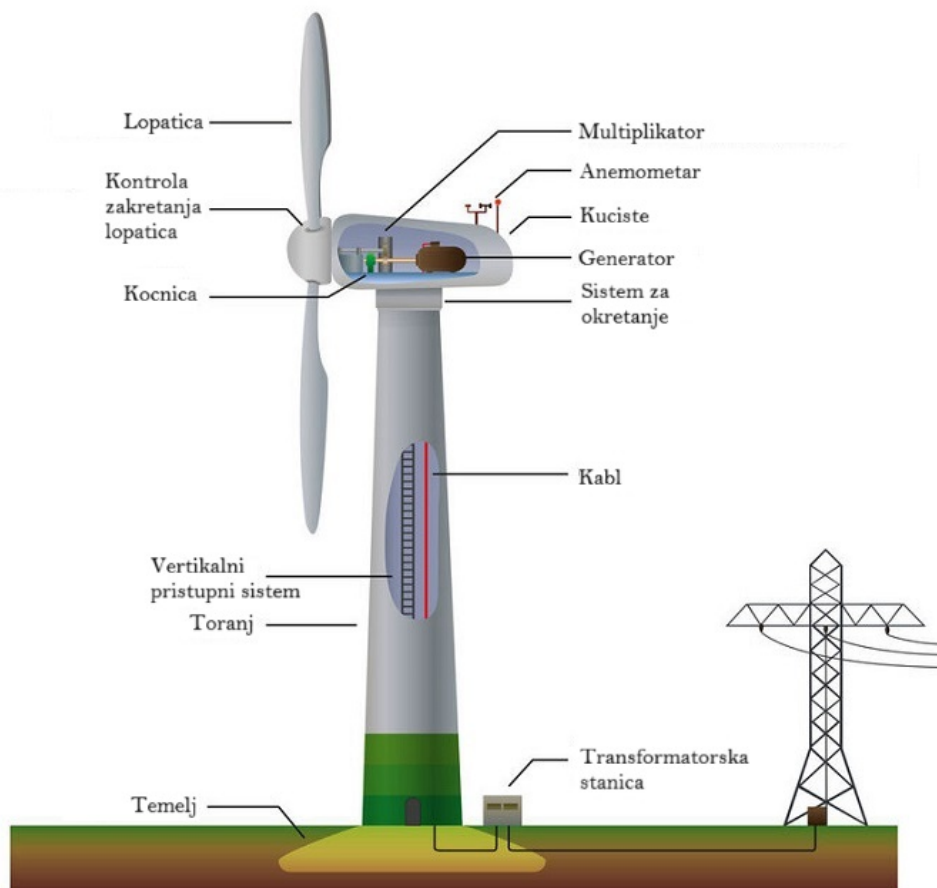


Slika 2.1.1: Zagrijavanje Zemlje Sunčevom energijom [10].

2.2 Vjetroturbine

Vjetroturbine su uređaji koji pretvaraju kinetičku energiju vjetra u mehaničku, a zatim se ta energija pretvara u električnu pomoću generatora. Iako je tehnologija za proizvodnju električne energije pomoću vjetra još uvijek relativno mlada, upotreba energije vjetra ima dugu tradiciju, koja seže u najranije historijske epohe. Jedan od pionira u oblasti vjetroenergetike, Charles Brush, konstruisao je 1888. godine vjetroturbinu snage 12 kW kojom je napajao rasvjetu i električne motore na svom imanju. Ova vjetroturbina je imala 144 lopatice od kedrovine i prečnik rotacije od 17 metara. Glavna razlika između historijskih vjetrenjača i savremenih vjetroturbina ogleda se u obliku i materijalu lopatica [11].

Savremeni vjetroenergetski sistemi sastoje se od nekoliko glavnih komponenti: lopatica, sistema za zakretanje lopatica (engl. *pitch system*), kočnice, multiplikatora (mjenjača), anemometra, kućišta, generatora, sistema za orijentaciju (engl. *yaw system*), kabla, vertikalnog pristupnog sistema (sistem za penjanje), tornja, temelja i transformatorske stanice, koje su prikazane na slici 2.2.1.



Slika 2.2.1: Glavne komponente savremenog vjetroenergetskog sistema. [12].

Kada vjetar struji preko lopatica rotora, razlika u pritisku na njihovim površinama stvara silu uzgona koja pokreće lopatice i uzrokuje njihovu rotaciju. Kroz sistem zupčanika relativno niska brzina rotacije rotora (30–60 obrtaja u minuti) mehanički se prenosi i povećava na veću brzinu rotacije (1.000–1.800 obrtaja u minuti), neophodne za rad generatora.

U literaturi se vjetro turbine najčešće klasifikuju prema tri osnovna kriterijuma:

- **Prema osi rotacije** – razlikuju se vjetro turbine sa horizontalnom osom rotacije (engl. *Horizontal Axis Wind Turbine* – HAWT) i vjetro turbine sa vertikalnom osom rotacije (engl. *Vertical Axis Wind Turbine* – VAWT). HAWT dominiraju u savremenim vjetroenergetskim sistemima zbog visoke efikasnosti konverzije energije vjetra u električnu

energiju. Njihova osovina je paralelna sa pravcem strujanja vjetra, ali zahtijevaju dodatne mehanizme za orijentaciju prema smjeru vjetra i osjetljive su na turbulencije. Suprotno tome, VAWT karakteriše jednostavnija konstrukcija i mogućnost rada bez potrebe za orijentacijom prema smjeru i brzini vjetra, ali imaju nižu efikasnost i rjeđe se primjenjuju u praksi [13].

- **Prema instalisanoj snazi**– razlikuju se mali, srednji i veliki elektroenergetski sistemi. Mali sistemi snage do 100 kW najčešće se koriste za napajanje izolovanih objekata ili udaljenih naselja. Srednji agregati, snage od 100 kW do 1,5 MW, nalaze primjenu u manjim distributivnim mrežama i lokalnim sistemima. Veliki sistemi, čija snaga prelazi 1,5 MW, dominantno se koriste u vjetroparkovima, naročito u morskim (offshore) postrojenjima, gdje su potrebni veliki kapaciteti proizvodnje.
- **Prema lokaciji postavljanja**– razlikuju se kopnene vjetroeletktrane (udaljene više od 3 km od obale), priobalne (do 3 km od obale), morske – offshore vjetroeletktrane (smještene više od 10 km od obale) i visinske vjetroeletktrane, koje predstavljaju inovativan koncept korišćenja strujanja na većim visinama.

Ova klasifikacija omogućava detaljnije razumijevanje tehničkih i infrastrukturnih zahtjeva različitih tipova vjetroturbina i vjetroeletktrana, što je od ključnog značaja za njihovo projektovanje, izgradnju i optimalnu eksploataciju [9].

2.2.1 Snaga vjetra

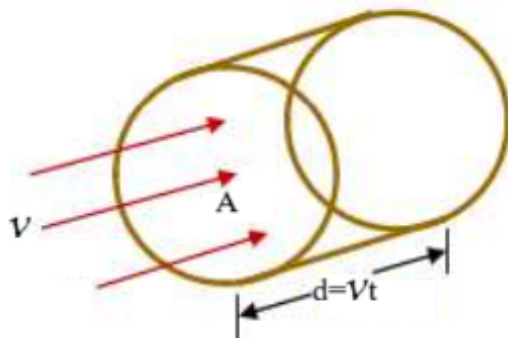
Svako tijelo određene mase u pokretu posjeduje kinetičku energiju, bilo da se kreće pravolinijski ili rotaciono. Kada se to odnosi na vazduh u kretanju njegova kinetička energija može se matematički izraziti kao:

$$E_k = \frac{mv^2}{2}, \quad (1)$$

gdje je m masa vazduha, a v brzina vjetra.

Masa vazduha koji prolazi kroz rotor vjetroturbine može se predstaviti kao masa cilindra vazduha prikazanog na slici 2.2.2, a definiše se preko gustine ρ , površine presjeka A i pređenog puta $d = vt$. Kako je u pitanju masa, ona se može predstaviti kao:

$$m = \rho Avt. \quad (2)$$



Slika 2.2.2: Cilindar vazduha zahvaćen površinom rotora pri brzini vjetra v [14].

Snaga vjetra P može se odrediti kao izvod kinetičke energije po vremenu, pa se koristeći jednačinu (2) dobija se izraz:

$$P = \frac{dE_k}{dt} = \frac{1}{2} \rho A v^3. \quad (3)$$

Iz izraza je jasno da male promjene brzine vjetra imaju značajan uticaj na ukupnu raspoloživu energiju, upravo zbog proporcionalnosti sa kubom brzine.

Snaga vjetroturbine data u jednačini (3) direktno zavisi od gustine vazduha, koji nije konstanta već se mijenja u zavisnosti od pritiska i temperature. Posebno značajan uticaj ima nadmorska visina, jer sa njenim porastom dolazi do opadanja vazdušnog pritiska. Ova zavisnost može se matematički izraziti eksponencijalnom relacijom:

$$p = p_0 e^{-1.185 \cdot 10^{-4} H}, \quad (4)$$

gdje je $p_0 = 101.3$ kPa standardni pritisak na nivou mora, a H nadmorska visina izražena u metrima.

Za standardne uslove na nivou mora ($p_0 = 101.3$ kPa, $T_0 = 288$ K), gustina vazduha iznosi $\rho_0 = 1.225$ kg/m³. Ova vrijednost se koristi kao referentna, ali budući da u realnim uslovima pritisak i temperatura odstupaju od standardnih, uvodi se korekcija gustine preko faktora:

$$\rho = \rho_0 k_p k_T, \quad (5)$$

pri čemu su korekcionni faktori definisani kao:

$$k_p = \frac{p}{101.3}, \quad (6)$$

$$k_T = \frac{288.1}{T}, \quad (7)$$

gdje su p stvarni pritisak [kPa], a T stvarna temperatura [K].

Brzina vjetra generalno raste sa visinom, ali značajno zavisi i od karakteristika površine iznad koje se kreće. Glatke površine, poput mora ili tvrdog tla, dovode do manjeg koeficijenta trenja i sporijeg porasta brzine vjetra sa visinom, dok visoke prepreke poput šuma ili zgrada povećavaju koeficijent trenja i dovode do naglih promjena u profilu brzine.

Za opisivanje uticaja hrapavosti zemljišta koristi se empirijska relacija:

$$\frac{v}{v_0} = \left(\frac{H}{H_0} \right)^\alpha, \quad (8)$$

gdje je v brzina vjetra na visini H , v_0 brzina na referentnoj visini H_0 , dok je α koeficijent trenja zavisian od tipa terena. Vrijednosti koeficijenta trenja α prikazane su u Tabeli 2.1 [14].

Tabela 2.1: Koeficijenti trenja α za različite tipove zemljišta

Osobine zemljišta	Koeficijent trenja α
Glatko tvrdo tlo, mirna voda	0.10
Visoka trava na nivou tla	0.15
Visoki usevi, živa ograda, žbunje	0.20
Šumsko seosko područje	0.25
Mali grad sa drvećem i žbunjem	0.30
Veliki grad sa visokim zgradama	0.40

2.2.2 Koeficijent snage

Snaga koju vjetroturbina može iskoristiti zasniva se na razlici između ulazne brzine vjetra v_1 (brzina neposredno ispred lopatica turbine) i izlazne brzine vjetra v_2 (brzina neposredno iza rotora), te se može izraziti sljedećom relacijom:

$$P_t = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} (v_1^2 - v_2^2), \quad (9)$$

gdje $\frac{dm}{dt}$ predstavlja maseni protok vazduha kroz površinu koju lopatice vjetroturbine zahvataju tokom rotacionog kretanja. Kako bi se izraz pojednostavio, uvodi se pojam srednje brzine vjetra, definisan kao:

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2}. \quad (10)$$

Diferenciranjem izraza za masu po vremenu, maseni protok kroz površinu rotora dobija oblik:

$$\frac{dm}{dt} = \rho A \frac{v_1 + v_2}{2}, \quad (11)$$

a njenim uvrštavanjem u jednačinu (9)) dobija se konačan oblik relacije za snagu vjetroturbine:

$$P_t = \frac{1}{4} \rho A (v_1 + v_2) (v_1^2 - v_2^2). \quad (12)$$

Radi dalje analize, uvodi se bezdimenzioni odnos brzina:

$$x = \frac{v_2}{v_1},$$

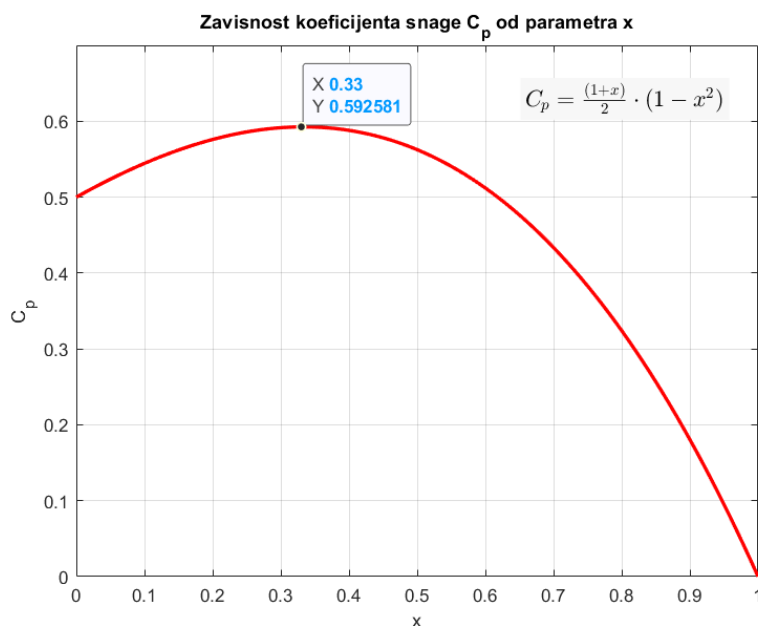
na osnovu kojeg izraz za snagu poprima oblik:

$$P_t = \frac{1}{2} \rho A v_1^3 \cdot \frac{1+x}{2} (1-x^2). \quad (13)$$

Koeficijent snage c_p definiše efikasnost pretvaranja ukupne kinetičke energije vjetra koja prolazi kroz površinu rotora u mehaničke snage rotora, a na osnovu prethodne formule iznosi:

$$c_p = \frac{1+x}{2} (1-x^2). \quad (14)$$

Funkcija prikazana jednačinom (14) ilustrovana je na slici 2.2.3.



Slika 2.2.3: Grafički prikaz koeficijenta snage c_p u zavisnosti od odnosa brzina x .

Još početkom XX vijeka, Lanchester (1915) i Betz (1920) izveli su teorijsku granicu maksimalne efikasnosti vjetroturbine koja iznosi približno 0.593 i važi za odnos brzina $x = \frac{1}{3}$. Zbog brojnih aerodinamičkih gubitaka u vjetroturbini, realne vrijednosti su značajno niže od teorijskog maksimuma i najčešće se kreću između 30% i 45%. Maksimalna efikasnost

vjetroturbine poznata je kao Betzov koeficijent ili Lanchester–Betzov limit.

Koeficijent snage c_p zavisi od odnosa TSR-a (λ) i ugla zakretanja lopatica β , koji zajedno određuju aerodinamičku efikasnost vjetroturbine. Konačni izraz za snagu turbine može se zapisati kao:

$$P_t = c_p(\lambda, \beta) \frac{\rho A}{2} v_1^3. \quad (15)$$

2.2.3 Tip Speed Ratio

TSR opisuje vezu između tangencijalne brzine vrha lopatice i stvarne brzine vjetra. Na ovaj način se dobija bezdimenzioni parametar koji povezuje dinamiku rotora sa brzinom strujanja vazduha.

Za svaku vjetroturbinu postoji karakteristična optimalna vrijednost TSR-a, označena kao λ_{opt} , koja je nezavisna od brzine vjetra. Promjenom brzine vjetra mijenja se i ugaona brzina ω , koja se mora kontinuirano prilagođavati kako bi se održao konstantan odnos λ i time obezbijedio rad u MPP-u.

Matematički, ova veza se opisuje sledećim izrazom:

$$\lambda = \frac{v}{V} = \frac{\omega r}{V}. \quad (16)$$

Regulator koristi izmjerenu brzinu vjetra v i optimalnu vrijednost λ_{opt} kako bi izračunao referentnu ugaonu brzinu ω_{opt} . Dobijena referenca se zatim najčešće poredi sa stvarnom brzinom rotacije generatora, a razlika se koriguje pomoću PI regulatora. Na taj način pretvarač podešava rad generatora tako da turbina stalno radi u režimu maksimalnog iskorišćenja raspoložive snage.

2.2.4 Načini upravljanja vjetroturbina

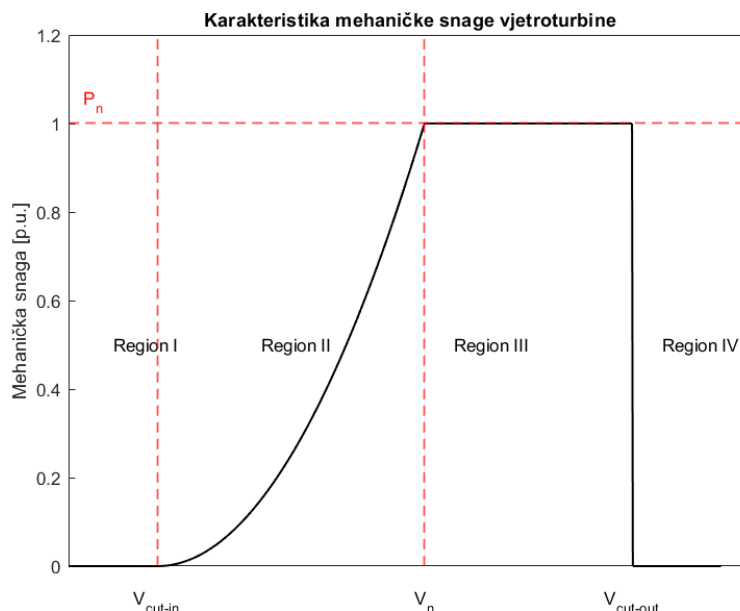
Rad vjetroturbine dijeli se na četiri regiona u zavisnosti od brzine vjetra i mehaničke snage, što je prikazano na slici 2.2.4.

U **Regionu I** (ispod V_{cut-in}) vjetroturbina nije priključena na mrežu i ne proizvodi električnu energiju, jer raspoloživa snaga vjetra nije dovoljna da „prevaziđe“ trenje i gubitke usljed otpora vazduha u sistemu.

U **Regionu II** (između V_{cut-in} i V_n) primjenjuju se MPPT algoritmi za praćenje tačke maksimalne snage kako bi se ostvarila optimalna izlazna snaga. Počevši od brzine uključivanja V_{cut-in} , generator započinje proizvodnju, a izlazna snaga raste s porastom brzine vjetra sve do dostizanja nominalne vrijednosti.

Region III obuhvata rad pri nominalnoj brzini vjetra V_n i iznad nje, gdje se snaga ograničava na nominalnoj vrijednosti P_n radi zaštite turbine i stabilnosti pogona. Kada brzina

dostigne $V_{\text{cut-out}}$, mehanička opterećenja na lopaticama postaju prevelika te se turbina automatski isključuje (npr. zakretanjem lopatica), čime se sprječava njeno oštećenje. (**Region IV**) [6].



Slika 2.2.4: Radni regioni vjetroturbine u zavisnosti od brzine vjetra i mehaničke snage.

U **Regionu III**, gdje je izlazna snaga konstantna i jednaka nominalnoj vrijednosti ($P = P_n$), primjenjuju se dvije osnovne tehnike regulacije — *pitch* i *stall* kontrola — kojima se ograničava mehanička snaga i održava stabilan rad vjetroturbine pri visokim brzinama vjetra.

Uloga *pitch* kontrole je da kontinuirano reguliše ugao zakretanja lopatica (β) radi povećanja efikasnosti konverzije energije vjetra i stabilnosti proizvodnje električne energije, ali i da funkcionira i kao sigurnosni mehanizam u uslovima jakog vjetra ili u slučaju vanrednih situacija.

Pored *pitch* kontrole, *stall* kontrola predstavlja još jedan pristup regulaciji i zaštiti vjetroturbina. Suština ovog metoda zasniva se na tome da se snaga reguliše izazivanjem zastoja lopatica kada se dostigne nominalna brzina vjetra. Kako bi se maksimizovao izlaz snage vjetroturbine i minimizovala asimetrična opterećenja koja djeluju na lopatice rotora i toranj, horizontalno-osna vjetroturbina mora biti orijentisana rotorskom ravni prema pravcu vjetra, što se postiže primjenom aktivnog *yaw* kontrolnog sistema [9].

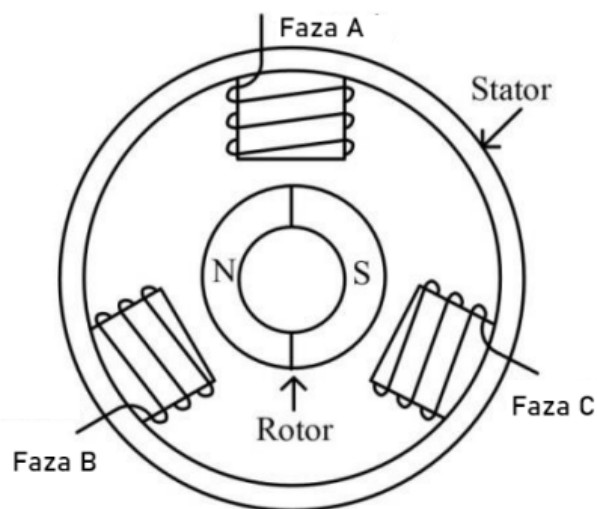
2.3 Sinhroni generator sa stalnim magnetima

U savremenim vjetroenergetskim sistemima koriste se četiri osnovne vrste generatora: jednosmjerni generatori, sinhroni generatori, asinhroni generatori i generatori sa promjenji-

vom reluktansom. Svaka od ovih tehnologija ima specifične prednosti i ograničenja, što određuje njihovu primjenu u zavisnosti od snage, pouzdanosti i uslova rada.

DC generatori se danas rijetko koriste, uglavnom u sistemima sa manjim zahtjevima za snagom, zbog potrebe za komutatorima i četkicama koje povećavaju troškove i zahtjeve za održavanjem. Sinhroni generatori, posebno PMSG, karakterišu se visokom efikasnošću i pouzdanošću, omogućavaju direktni pogon bez reduktora i pogodni su za primjenu u *offshore* vjetroparkovima. Asinhroni generatori, najčešće u izvedbi dvostruko napajanih asinhronih generatora (engl. *Doubly-Fed Induction Generator – DFIG*), najzastupljeniji su u vjetroenergetici zbog jednostavne konstrukcije, pouzdanosti i mogućnosti rada u varijabilnom režimu. generatori sa promjenjivom reluktansom (engl. *Switched Reluctance Generator – SRG*) imaju jednostavnu i robusnu strukturu te visoku pouzdanost, ali im je glavni nedostatak velika masa i dimenzije u odnosu na druge tipove generatora iste snage [15].

PMSG predstavljaju sve značajnije rješenje u savremenim distribuiranim izvorima energije, naročito u vjetroelektranama i manjim hidroelektranama. One omogućavaju direktan pogon, čime se eliminiše potreba za zupčanicima, smanjuju troškovi održavanja i povećava ukupna pouzdanost sistema. Ovo je posebno značajno za *offshore* vjetroparkove, gdje je održavanje skupo i tehnički zahtjevno. Prednosti PMSG-a ogledaju se u većoj efikasnosti, eliminaciji četkica i kliznih prstenova, smanjenju gubitaka i produženju radnog vijeka sistema. Na slici 2.3.1 prikazan je šematski izgled trofaznog PMSG-a, koji se sastoji od rotora sa stalnim magnetima i statora sa namotajima faza A, B i C raspoređenih pod međusobnim uglom od 120° .



Slika 2.3.1: Šematski prikaz trofaznog PMSG-a [16].

Princip rada PMSG-a zasniva se na Faradejevom zakonu elektromagnetne indukcije, prema kojem promjena magnetnog fluksa kroz provodnik izaziva pojavu elektromotorne sile (engl. *Electromotive Force – EMF*). Kada vjetroturbina rotira osovinu, rotor zajedno sa stal-

nim magnetima pričvršćenim na njemu prolazi pored statorskih namotaja, stvarajući promjenjivo magnetno polje. Tokom rotacije, linije magnetnog polja presijecaju statorske namotaje i prema Faradejevom zakonu indukuju elektromotornu silu. Indukovana EMF izaziva protok struje kroz statorske namotaje, a veličina proizvedene električne energije zavisi od brzine rotora, jačine magnetnog polja i broja namotaja u statoru [17]. Indukovani napon u statoru može se opisati izrazom:

$$e = N \frac{d\Phi}{dt}. \quad (17)$$

gdje je N broj namotaja, a Φ magnetski fluks.

2.3.1 Matematički model PMSM-a

Matematički opis sinhronne mašine sa stalnim magnetima (engl. *Permanent Magnet Synchronous Machine* – PMSM) izražava se u dq koordinatnom sistemu. Diferencijalne jednačine iskorišćene za matematičko opisivanje glase:

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_d}v_d - \frac{R}{L_d}i_d + \frac{L_q}{L_d}p\omega_m i_q, \quad (18)$$

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_q}v_q - \frac{R}{L_q}i_q - \frac{L_d}{L_q}p\omega_m i_d - \frac{\lambda p\omega_m}{L_q}, \quad (19)$$

gdje su i_d i i_q struje u dq referentnom okviru, L_d i L_q induktivnosti po d i q osi, R otpornost statora, v_d i v_q naponi po d i q osi, ω_m mehanička ugaona brzina, λ fluks magneta, a p označava broj pari polova.

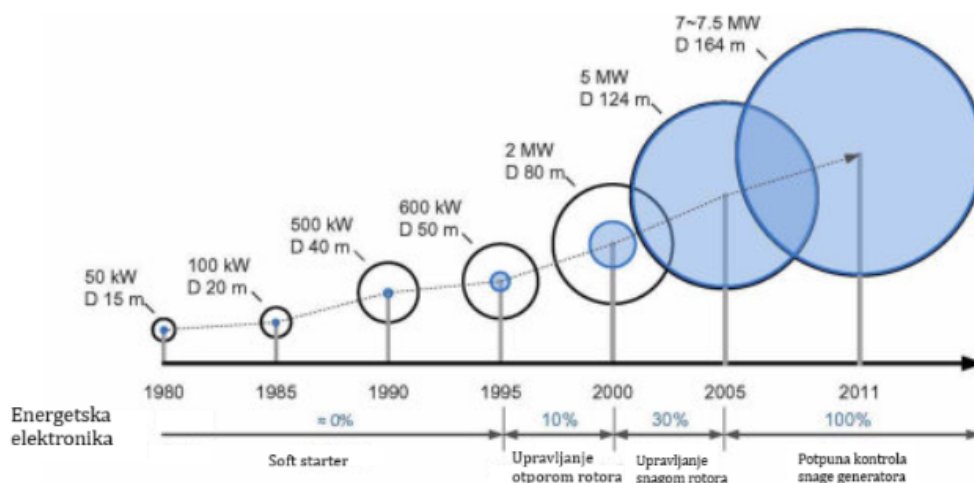
Elektromagnetni moment PMSM-a izražava se formulom:

$$T_e = 1.5p [\lambda i_q + (L_d - L_q)i_d i_q]. \quad (20)$$

Ovaj matematički model omogućava precizno određivanje elektromagnetnih veličina i momenta PMSM-a u različitim režimima rada [18].

3. Sklopovi energetske elektronike i MPPT strategije

Sklopovi energetske elektronike (poluprovodnički energetski pretvarači) u vjetroenergetskim sistemima omogućavaju rad pri promjenjivim brzinama, povezivanje na mrežu i optimalno iskorišćenje energije. Više istraživanja navodi da ovi sklopovi razdvajaju dinamiku generatora od zahtjeva mreže, omogućavaju praćenje MPP-a i unapređuju regulaciju napona i frekvencije. Na slici 3.0.1 prikazana je evolucija vjetroturbina tokom posljednjih decenija, zajedno sa razvojem i rastućom ulogom energetske elektronike u procesima konverzije snage. Ilustrovano je povećanje nominalne snage i dimenzija rotora kroz vrijeme, kao i prelazak sa jednostavnih sistema sa *soft* starterima na savremene koncepte potpune kontrole snage generatora pomoću pretvarača [19].



Slika 3.0.1: Porast nominalne snage vjetroturbina usljed povećanja rotora i primjene energetske elektronike [20].

Pretvarač u vjetroenergetskom sistemu predstavlja ključnu vezu između generatora i elektroenergetske mreže, jer mora istovremeno omogućiti preciznu regulaciju struje statora radi upravljanja momentom i brzinom rotora, kompenzaciju promjena frekvencije i napona na izlazu generatora, te ispuniti mrežne zahtjeve kroz kontrolu aktivne i reaktivne snage, ali i da minimizuje ukupno harmonijsko izobličenje (*Total Harmonic Distortion – THD*). [21]

U radu je pretvarački sklop realizovan kroz diodni trofazni most ispravljača i boost konvertor.

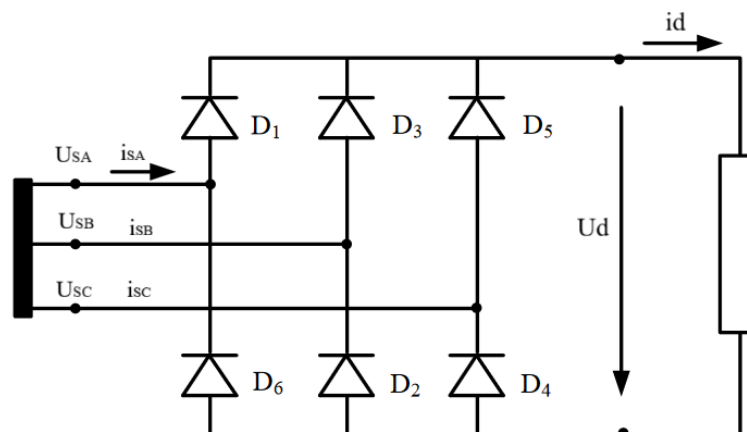
3.1 Elementi energetske elektronike

U ovom poglavlju biće objašnjeni ključni elementi energetske elektronike korišćeni u radu, među kojima su trofazni diodni ispravljač i DC–DC boost pretvarač.

3.1.1 Diodni most

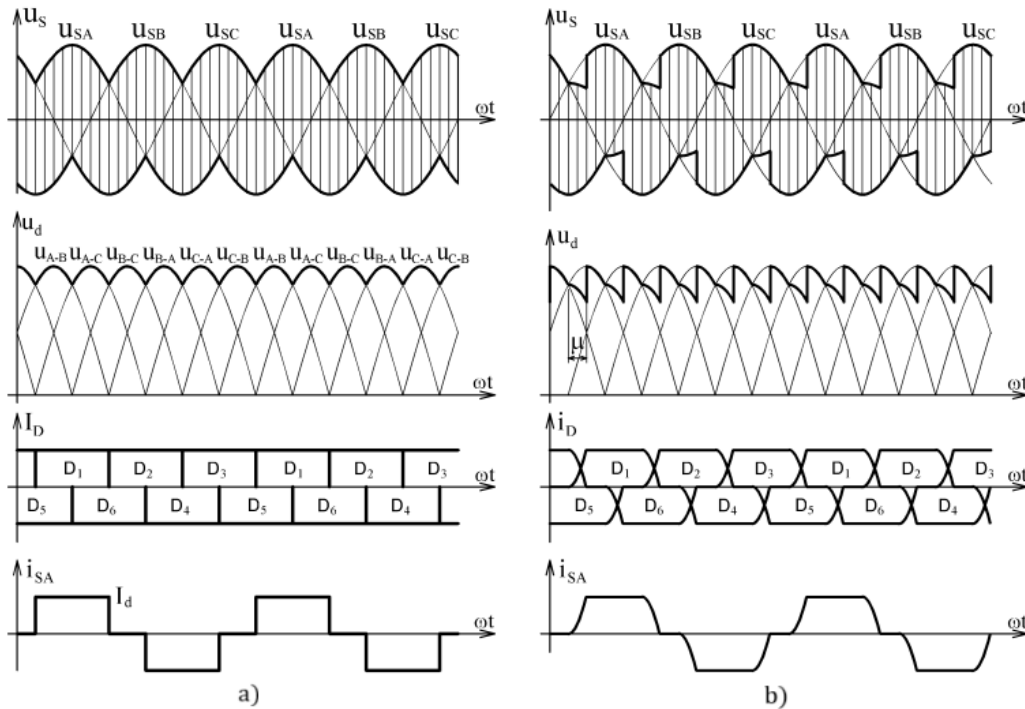
U većini slučajeva kada je potrebna jednosmjerna energija, najčešće korišćeno rješenje je diodni ispravljač, čiji izlaz napaja DC–DC pretvarač u cilju postizanja željenog nivoa jednosmjernog napona.

Trofazni diodni ispravljač je neupravljeni pretvarač koji pretvara trofazni naizmjenični napon u jednosmjerni. Sastoji se od šest dioda u mostnoj konfiguraciji, pri čemu u svakom trenutku provode dvije diode (jedna iz gornje i jedna iz donje grane), svaka tokom ugla od 120° ($2\pi/3$ rad), čime se obezbjeđuje kontinualan tok struje kroz opterećenje. Šematski prikaz trofaznog diodnog mostnog ispravljača dat je na Slici 3.1.1.



Slika 3.1.1: Trofazni diodni mostni ispravljač [22].

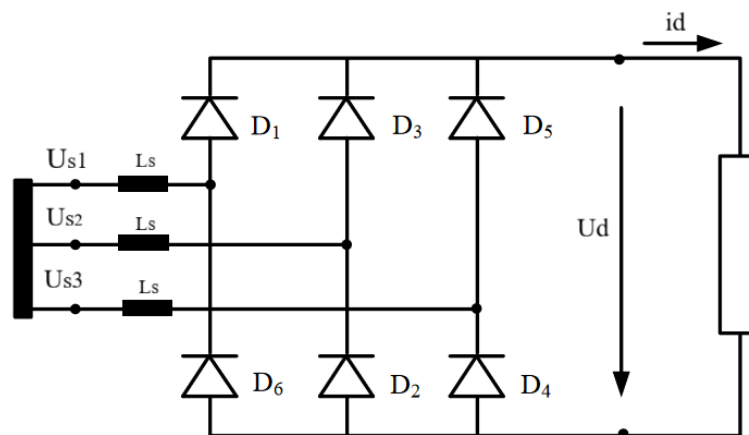
U praksi se trofazni diodni mostni ispravljač najčešće analizira pri RL opterećenju, pri čemu se smatra da je induktivnost dovoljno velika ($L \rightarrow \infty$) kako bi struja ostala konstantna. Idealni talasni oblici napona i struja u tom slučaju prikazani su na Slici 3.1.2a. U ovom režimu izlazna struja i_d je gotovo konstantna, a svaka dioda provodi tokom ugla od $2\pi/3$, čime se obezbjeđuje kontinualan tok struje i formira šestoimpulсни oblik izlaznog napona. Na slici su prikazani fazni naponi U_{SA} , U_{SB} , U_{SC} , izlazni napon U_d , kao i struje kroz diode (i_D) i fazne struje (I_{s1} , I_{s2} , I_{s3})



Slika 3.1.2: Trofazni diodni ispravljač sa RL opterećenjem – talasni oblici napona i struja [23].

U realnim uslovima, zbog prisustva rasipne induktivnosti $L_s \neq 0$, proces komutacije nije trenutni. Tokom prelaza struje između grana mosta, u intervalu poznatom kao ugao komutacije (μ), prelaz struje se ne odvija trenutno, već postepeno. Komutacija je posledica induktivnosti u ulaznom dijelu ispravljača, koje ne dozvoljavaju trenutni skok struje. Na taj način one djeluju filtrirajuće i smanjuju amplitude viših harmonika kod ulaznih struja [24].

Šematski prikaz trofaznog diodnog mostnog ispravljača sa rasipnom induktivnošću L_s prikazan je na slici 3.1.3, a talasni oblici napona i struja 3.1.2 b).



Slika 3.1.3: Trofazni diodni mostni ispravljač sa uključenom rasipnom induktivnošću.

Ovaj efekat uzrokuje pad srednje vrijednosti napona U_d u odnosu na idealni slučaj. U tom slučaju, srednja vrijednost ispravljenog napona određuje se izrazom:

$$U_{dsr} = \frac{p \cdot U_m}{\pi} \sin \frac{\pi}{p} \cos \alpha - \frac{p \cdot X_s}{2\pi} I_d \quad (21)$$

pri čemu su:

- $U_m = \sqrt{2}U$ – amplituda međufaznog napona sekundara transformatora,
- $p = 6$ – broj impulsa ispravljenog napona (šestopulsni ispravljač),
- X_s – ekvivalentna reaktansa jedne faze sekundara transformatora,
- α – ugao paljenja (za diodni ispravljač $\alpha = 0^\circ$),
- I_d – srednja vrijednost jednosmjerne struje na izlazu ispravljača.

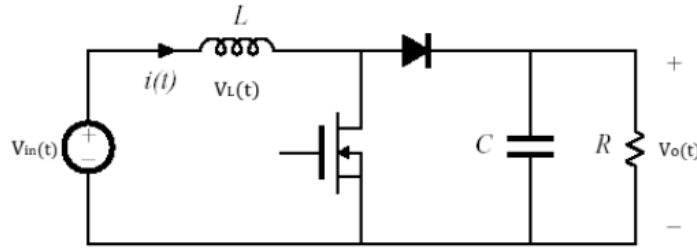
Pošto izlaz diodnog ispravljača nije idealno ispravljen, neophodna je primjena filtera. Najčešće se koristi kondenzatorski (C) filter, dok se radi smanjenja talasanja napona i sadržaja viših harmonika primjenjuju LC ili L filteri, pri čemu induktivna komponenta dodatno doprinosi oblikovanju ulazne struje [25].

3.1.2 Boost konvertor

Impulsni DC–DC pretvarači (poznati i kao impulsni regulatori jednosmjernog napona ili čoperi) danas se široko primjenjuju u ispravljačkim uređajima i sistemima napajanja. Postoji više različitih topologija *boost* konvertora, kao što su kaskadni, *interleaved*, sa spregnutim kalemovima, ali je u ovom radu primijenjena klasična topologija *boost* pretvarača zbog svoje jednostavne strukture i pouzdanog rada [26]. Regulacija izlaznog napona u impulsnim pretvaračima najčešće se ostvaruje primjenom širinsko–impulsne modulacije (engl. *Pulse Width Modulation* - PWM). Odnos vremena uključenosti (t_{on}) i isključenosti (t_{off}) poluprovodničkog prekidača u toku jedne periode ($T = t_{on} + t_{off}$) definiše faktor popunjenosti:

$$D = \frac{t_{on}}{T}, \quad (22)$$

koji direktno utiče na odnos između ulaznog i izlaznog napona. Na slici 3.1.4 prikazana je praktična šema *boost* pretvarača, koji koristi MOSFET tranzistor kao aktivni prekidač.



Slika 3.1.4: Boost pretvarač sa MOSFET-om kao prekidačkim elementom [25].

Princip rada *boost* pretvarača zasniva se na periodičnom skladištenju energije u kalemu. Kada je prekidač uključen, slika 3.1.5a, dioda je inverzno polarisana i ne provodi, a kalem skladišti energiju iz izvora. Kada je prekidački element uključen u intervalu t_{on} , napon na kalemu jednak je ulaznom naponu:

$$v_o = V_{in}. \quad (23)$$

U tom periodu struja kalema linearno raste, jer on akumulira energiju, a ovaj režim prikazan je na slici 3.1.5c. Kada je prekidački element isključen, slika 3.1.5b, u intervalu t_{off} kalem se prazni, pri čemu obezbjeđuje energiju za napajanje izlaznog kola. Tada je napon na kalemu jednak razlici ulaznog i izlaznog napona:

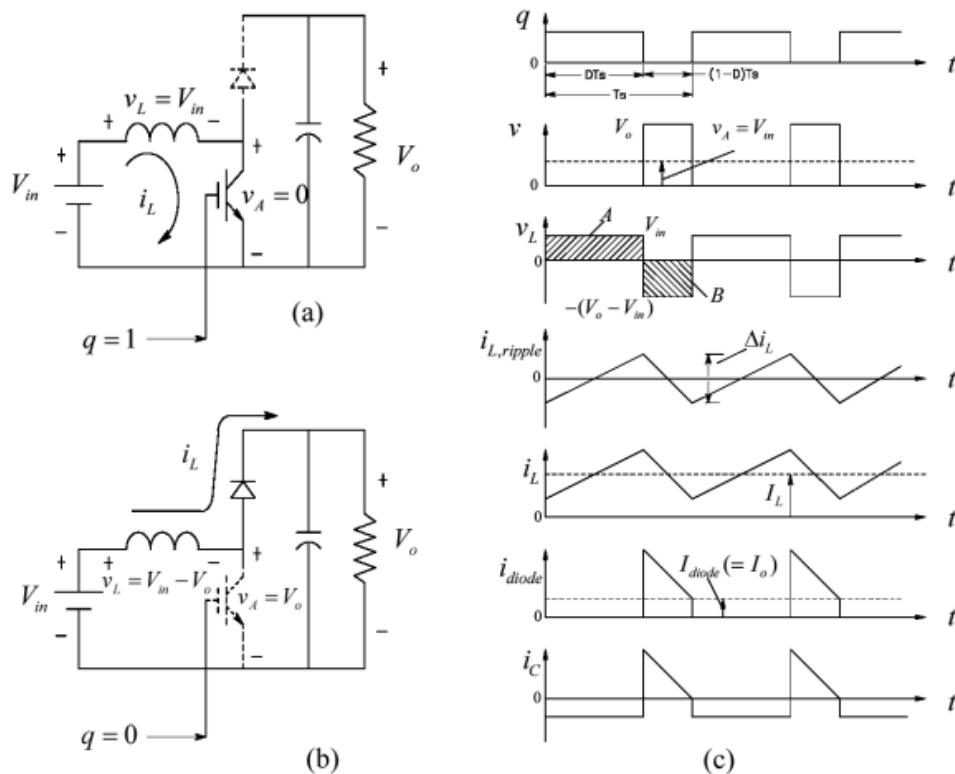
$$v_L = V_{in} - V_o. \quad (24)$$

Kako je izlazni napon veći od ulaznog ($V_o > V_{in}$), vrijednost napona v_L u ovom intervalu je negativna, pa struja kalema linearno opada. Ukoliko struja ostaje veća od nule, to ukazuje da čoper radi u kontinualnom režimu, kao što je prikazano na slici 3.1.5c. U kontinualnom režimu srednja vrijednost napona na kalemu tokom jednog perioda jednaka je nuli, što se može izraziti sljedećom relacijom:

$$V_{in} \cdot t_{on} + (V_{in} - V_o) \cdot t_{off} = 0. \quad (25)$$

Na osnovu ove relacije izvodi se osnovna jednačina boost konvertora:

$$V_o = \frac{V_{in}}{1 - D}. \quad (26)$$



Slika 3.1.5: Boost pretvarač: provodno i neprovodno stanje poluprovodnog elementa sa izlaznim talasnim oblicima napona i struja u oba režima [25].

Da bi se obezbijedio stabilan izlazni napon, pretpostavlja se da je izlazni kondenzator dovoljno velik da efikasno filtrira talasanja, pa se izlazni napon može smatrati približno konstantnim. Na taj način postiže se povećanje izlaznog napona $V_o(t)$ u odnosu na ulazni napon $V_{in}(t)$.

Kao što je prikazano u jednačini ((26)), odnos između ulaznog i izlaznog napona *boost* pretvarača zavisi od radnog odnosa D . Analogno, odnos između izlazne struje I_o i struje kroz kalem I_{in} dat je jednačinom ((27)), pri čemu povećanje izlaznog napona dovodi do proporcionalnog smanjenja izlazne struje [27].

$$\frac{I_o}{I_{in}} = (1 - D). \quad (27)$$

Još jedan od parametara je i struja ripple (Δi_L) predstavlja promjenu (talasanje) struje kroz kalem tokom jednog perioda u *boost* pretvaraču. Ona se određuje izrazom:

$$\Delta i_L = \frac{V_{in}}{L}DT_s = \frac{V_o - V_{in}}{L}(1 - D)T_s. \quad (28)$$

Za stabilan rad *boost* pretvarača neophodno je obezbijediti kontinualni režim, u kojem struja kalema tokom cijelog perioda ne pada na nulu. Za boost konvertor, uslov za prelaz

između kontinualnog i diskontinualnog režima rada definisan je kritičnom vrijednošću izlazne struje. Kritična struja određuje granicu pri kojoj konvertor mijenja režim rada: ukoliko je stvarna izlazna struja veća od kritične, pretvarač radi u kontinualnom režimu, dok pri manjim vrijednostima prelazi u diskontinualni režim.

Kritična vrijednost izlazne struje za *boost* konvertor izražava se kao:

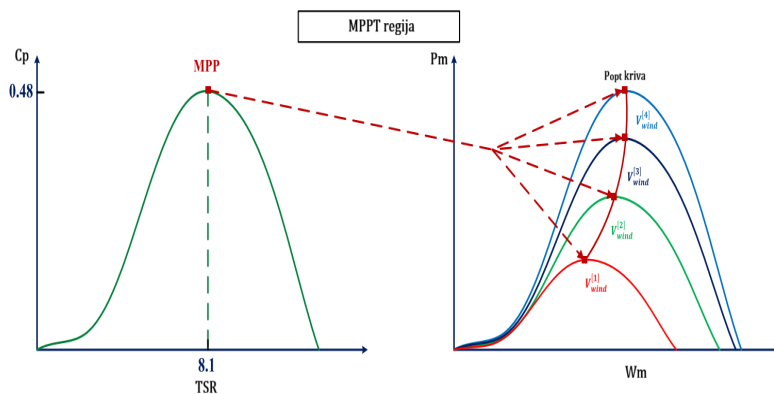
$$I_{o,krit} = \frac{(1 - D)U_{in}}{D \cdot R_e(D)}$$

gdje je $R_e(D)$ ekvivalentni otpor zavisian od topologije konvertora.

3.2 MPPT strategije

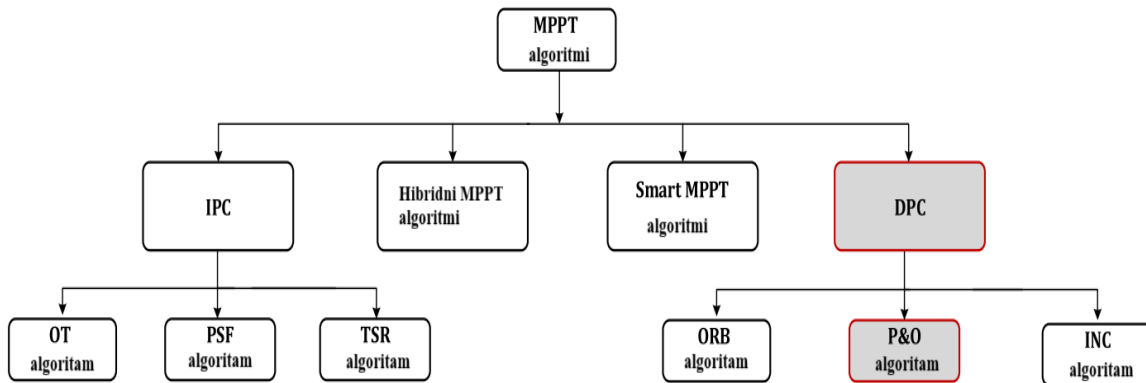
MPPT algoritam u vjetroenergetskim sistemima predstavlja strategiju upravljanja kojom se obezbjeđuje rad generatora u MPP-u pri datim uslovima vjetra. Njegova osnovna svrha je da kontinuirano prilagođava radne parametre sistema kako bi se izvukla najveća moguća snaga iz vjetroturbine, bez obzira na promjene brzine vjetra. Na taj način, MPPT algoritam omogućava efikasniju konverziju energije i stabilniji rad kompletnog sistema.

Na Slici 3.2.1 prikazan je osnovni koncept MPPT algoritma u vjetroenergetskom sistemu. Za optimalne vrijednosti koeficijenta snage i TSR-a, ostvaruje se MPP za jednu karakterističnu krivu, što je prikazano na slici 3.2.1 lijevo. Međutim, pri različitim brzinama vjetra mijenjaju se i karakteristike snage, pa algoritam mora kontinuirano izračunavati odgovarajuće parametre kako bi radna tačka pratila optimalnu krivu snage, što je prikazano na slici 3.2.1 desno.



Slika 3.2.1: Karakteristike snage za λ_{opt} pri različitim promjenama vjetra [7].

Na Slici 3.2.2 data je podjela MPPT algoritama prema načinu upravljanja i vrsti povratne sprege, čime se obuhvataju sve osnovne grupe primijenjene u vjetroenergetskim sistemima.



Slika 3.2.2: Podjela i vrste MPPT algoritama [1].

Algoritmi indirektnog upravljanja snagom zasnivaju se na korišćenju unaprijed poznatih karakteristika vjetroturbine i parametara sistema, na osnovu kojih se određuje optimalna radna tačka. U ovu grupu spadaju metode poput optimalnog momenta (engl. *Optimal Torque* – OT), snaga povratne sprege (engl. *Power Signal Feedback* – PSF) i TSR. Njihov osnovni princip je da se, za dati nivo brzine vjetra, izračuna ili procijeni odgovarajuća brzina rotora koja obezbjeđuje maksimalno iskorišćenje energije. Primjena IPC algoritama podrazumijeva upotrebu mehaničkih senzora ili metoda za procjenu brzine vjetra i brzine rotora, zbog čega su posebno primjenjivi u sistemima u kojima su dostupni pouzdani i precizni podaci o ovim veličinama [28] [29] [30].

Algoritmi direktnog upravljanja snagom funkcionišu na osnovu povratne informacije o električnim veličinama, prije svega naponu i struji, iz kojih se određuje trenutna snaga i vrši prilagođavanje radne tačke. U ovu grupu ubrajaju se metode poput (P&O), metode inkrementalne provodnosti (engl. *Incremental Conductance* – INC) i metode zasnovane na optimalnom odnosu (engl. *Optimal Relation Based* – ORB). Za razliku od IPC pristupa, DPC algoritmi ne zahtijevaju detaljno poznavanje karakteristika vjetroturbine, već omogućavaju dinamičko podešavanje i brži odziv na promjene uslova vjetra, čime se postiže fleksibilnije i jednostavnije upravljanje sistemom [31] [29] [32].

Hibridni algoritmi nastali su kao kombinacija IPC i DPC pristupa s ciljem objedinjavanja njihovih prednosti i minimizovanja nedostataka. Ovi algoritmi obično kombinuju robusnost i stabilnost karakterističnu za IPC metode sa brzim odzivom i adaptivnošću DPC metoda. Na taj način, hibridna rješenja obezbjeđuju kompromis između efikasnog praćenja tačke maksimalne snage i smanjenja oscilacija u dinamičkim uslovima rada, što ih čini pogodnim za primjenu u sistemima gdje je potrebna uravnoteženost između stabilnosti i performansi.

Inteligentni algoritmi predstavljaju najnapredniju grupu MPPT strategija, a zasnivaju se na tehnikama vještačke inteligencije, kao što su *fuzzy logika*, neuralne mreže i razne adaptivne

metode. Njihova ključna prednost je sposobnost učenja i prilagođavanja, što im omogućava da efikasno funkcionišu u nelinearnim i promjenjivim uslovima vjetroenergetskih sistema. Zahvaljujući tome, inteligentni algoritmi pokazuju visoku fleksibilnost i robusnost, te se sve više ističu kao perspektivna rješenja za buduće generacije kontrolera u vjetroenergetici [1] [33] [34].

Posebnu grupu čine teorijski zasnovani pristupi, koji koriste linearne i nelinearne metode stanja za precizno modelovanje vjetroenergetskog sistema. Oni omogućavaju visok stepen robusnosti i dobro ponašanje u poremećenim režimima, ali istovremeno zahtijevaju složenu implementaciju i osjetljivi su na promjene parametara [35].

Unutar grupe DPC algoritama posebno mjesto zauzima P&O, koji se u literaturi najčešće koristi zbog svoje jednostavnosti i male zavisnosti od parametara sistema. Detaljnije razmatranje principa rada, prednosti i ograničenja ovog algoritma biće prikazano u narednom poglavlju [2].

3.2.1 Širinsko impulsna regulacija

Kontrola izlaznog napona kod impulsnih pretvarača zasniva se na primjeni PWM regulacije. Kontrola prividne amplitude ili frekvencije signala ima ključnu ulogu u upravljanju prenosom energije i optimizaciji rada elektronskih sistema. Ona omogućava precizno podešavanje izlazne snage i povećava efikasnost pretvarača, što je od suštinskog značaja za stabilan i ekonomičan rad savremenih uređaja [36]. Tri najčešće korišćene metode za ovu svrhu su PWM, modulacija amplitude (engl. *Amplitude Modulation* - AM) i modulacija frekvencije (engl. *Frequency Modulation* - FM), pri čemu je u ovom radu poseban akcenat stavljen na *PWM* tehniku.

PWM funkcioniše na principu upravljanja tranzistorom koji se naizmjenično dovodi u stanje provodnosti i neprovodnosti, preko signala koji se periodično uključuje i isključuje. Na ovaj način ostvaruje se precizna kontrola prenosa energije između izvora i potrošača, jer se promjenom trajanja uključenog stanja reguliše prosječna vrijednost napona na izlazu.

Rad PWM signala određuju dva osnovna parametra: radni ciklus — koji definiše odnos trajanja provodnog stanja prema ukupnom periodu signala — i frekvencija preklapanja (engl. *Switching Frequency*), koja označava koliko puta u sekundi signal prolazi kroz puni ciklus uključivanja i isključivanja.

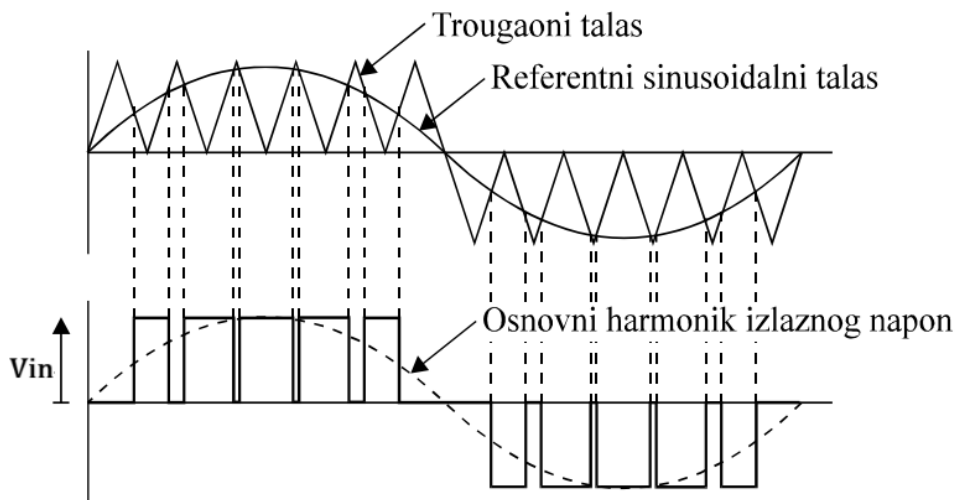
U jednačini (22) data je osnovna relacija za radni ciklus, međutim, u slučaju *boost* konvertora, na osnovu izraza za izlazni napon datog u jednačini (26), dobija se odgovarajući izraz za radni ciklus:

$$D = \frac{V_{in}}{V_o + V_{in}}. \quad (29)$$

Frekvencija prekidanja predstavlja broj puta u sekundi kada se prekidač uključuje i isklju-

čuje — odnosno brzinu preklapanja u okviru PWM signala. Da bi se upravljalo opterećenjem, frekvencija mora biti pažljivo odabrana na osnovu tipa opterećenja ili konkretne primjene. Previsoka frekvencija može dovesti do otkaza mehaničkih upravljačkih komponenti, dok preniska frekvencija može izazvati oscilacije u opterećenju ili pojavu akustičnog šuma [37]. U osnovi, PWM signal se generiše poređenjem referentnog naponskog signala sa trougaonim talasom. Kada je trenutna vrijednost referentnog signala veća od vrijednosti trougaonog signala, izlaz PWM komparatora postaje visok (prekidački element provodi), dok u suprotnom ostaje nizak (prekidački element ne provodi). Na ovaj način se formira pravougaoni signal čija širina impulsa zavisi od trenutne amplitude referentnog signala.

U kontekstu ovog rada, referentni signal potiče od MPPT kontrolera, konkretno iz P&O algoritma, koji određuje radni ciklus PWM-a na osnovu izlazne snage sistema. Poređenjem ovog signala sa trougaonim signalom dobija se PWM impuls koji upravlja *boost* konvertorom i time reguliše prenos energije prema opterećenju. Na slici 3.2.3 princip formiranja PWM signala poređenjem referentnog napona i trougaonog talasa. U radu se poredi signal iz P&O algoritma sa trougaonim talasom u cilju formiranja PWM impulsa.



Slika 3.2.3: Princip formiranja PWM signala [25].

4. Predlog modifikovane P&O metode

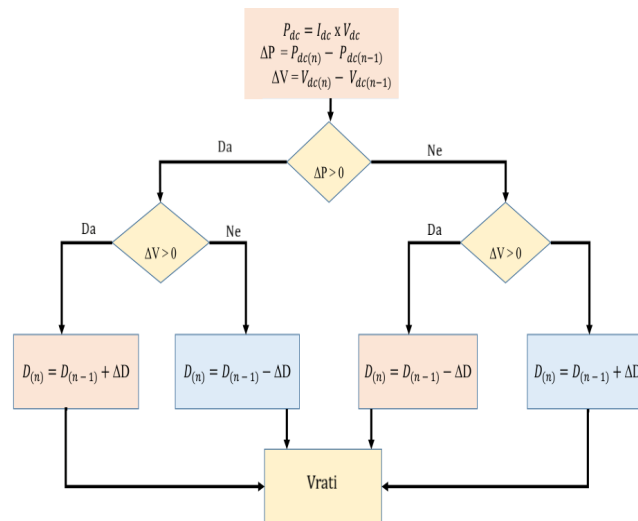
Algoritam perturbacije i posmatranja, koji pripada grupi DPC metoda, predstavlja jednu od najčešće korišćenih tehnika zbog svoje jednostavnosti i fleksibilnosti. Ova metoda, poznata i kao metoda penjanja uzbrdo (engl. *Hill Climb Searching* – HCS), zasniva se na matematičkoj optimizaciji kojom se pronalazi lokalni maksimum određene funkcije, pri čemu pokazuje visoku efikasnost i pouzdanost u praćenju MPP-a u različitim radnim uslovima.

4.1 Princip rada i matematička osnova P&O metode

Pokazujući visoku efikasnost u praćenju MPP-a pri promjenljivim uslovima vjetra, P&O metoda se svrstava među najefikasnije MPPT tehnike primijenjene u vjetroenergetskim sistemima [38]. Ovaj algoritam može biti implementiran tako da djeluje na različite veličine sistema, poput napona, struje, radnog ciklusa pretvarača ili brzine rotora. U jednom od pristupa, P&O algoritam mijenja referentnu brzinu rotora za određenu inkrementalnu vrijednost duž snaga-brzina ($P-\omega$) krive, čime se obezbjeđuje praćenje tačke maksimalne snage [4]. Pored toga, P&O algoritam se može implementirati i tako da djeluje na radni ciklus pretvarača. U ovoj metodi se uvodi mala perturbacija kako bi se izazvao blagi poremećaj izlazne snage vjetroenergetskog sistema. U svakoj iteraciji mjeri se jednosmjerna izlazna snaga ispravljača i poredi sa prethodnom vrijednošću. Na osnovu te razlike, kao i promjene jednosmjernog napona određene na isti način, koriguje se *duty cycle*. Algoritam potom u kontinuitetu prati parametre i podešava radnu tačku ka MPP-u [38].

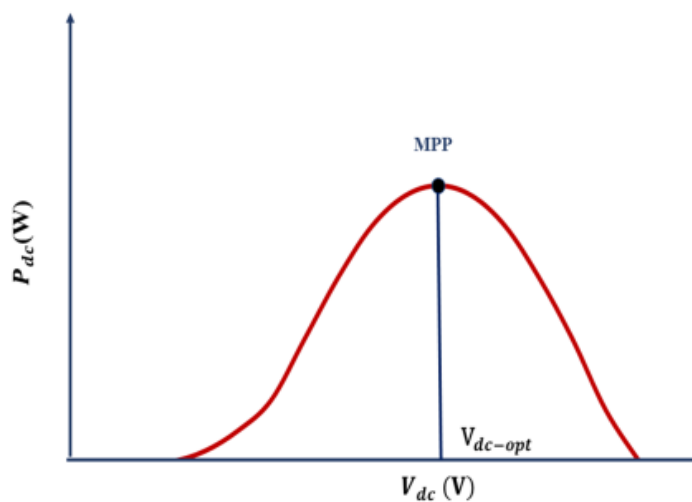
Na slici 4.1.1 prikazan je P&O algoritam za praćenje tačke maksimalne snage u sistemu. Kao što se sa slike može vidjeti, na početku se mjere vrijednosti napona i struje nakon diodnog ispravljača, a dobijene veličine se koriste za izračunavanje jednosmjerne snage (P_{dc}). Promjena snage (ΔP_{dc}) računa se oduzimanjem prethodne i trenutne vrijednosti snage P_{dc} , dok se promjena napona (ΔV_{dc}) određuje oduzimanjem prethodne i trenutne vrijednosti napona V_{dc} . Ukoliko je promjena snage $\Delta P_{dc} > 0$, algoritam donosi odluku o daljoj korekciji u zavisnosti od promjene napona ΔV_{dc} . Ako je i $\Delta V_{dc} > 0$, tada se faktor rada povećava za zadatu vrijednost ΔD , čime se radna tačka pomjera. Suprotno tome, ako je $\Delta V_{dc} < 0$, tada se faktor rada smanjuje, što radnu tačku vraća u suprotnom smjeru, održavajući sistem u blizini tačke maksimalne snage. U slučaju da je $\Delta P_{dc} < 0$, logika odlučivanja je obrnuta: pozitivan ΔV_{dc} znači da se faktor rada mora smanjiti, dok negativan ΔV_{dc} zahtijeva povećanje faktora rada. Na ovaj način, kroz kontinuirane male perturbacije, algoritam adaptivno usmjerava

radnu tačku ka MPP-u, čime se obezbjeđuje optimalno iskorišćenje dostupne snage.



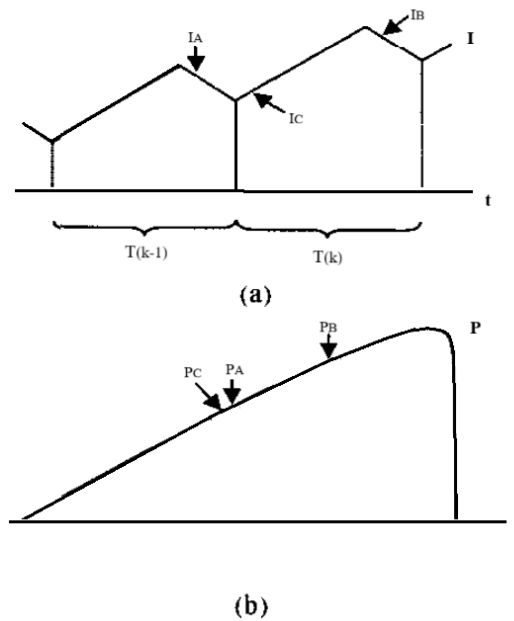
Slika 4.1.1: P&O algoritam za praćenje tačke maksimalne snage [7].

Na slici 4.1.2 prikazana je zavisnost izlazne snage P_{dc} od napona V_{dc} , pri čemu kriva ima karakterističan paraboličan oblik sa jasno definisanom MPP-om. Vidljivo je da za optimalnu vrijednost napona V_{dc} sistem ostvaruje maksimalnu snagu P_{dc} . Lijeva strana krive predstavlja oblast u kojoj sistem radi ispod optimalne tačke — povećanjem napona dolazi do porasta snage, dok desna strana označava preopterećeni režim u kojem dalji porast napona dovodi do smanjenja izlazne snage. Ovakva karakteristika omogućava P&O metodi da prepozna smjer promjene radne tačke na osnovu mjerene snage i napona, te da upravlja radnim ciklusom u cilju približavanja MPP-u.



Slika 4.1.2: Zavisnost P_{dc} od napona V_{dc} [7].

Na slici 4.1.3 (a) prikazana je analiza ponašanja struje u neposrednoj blizini tačke maksimalne snage.



Slika 4.1.3: Snaga i struja sistema u određenim vremenskim intervalima [19].

Posmatra se trenutak u tački A, koji predstavlja momenat $T(k - 1)$, te naredni trenutak u tački B, koji odgovara ciklusu $T(k)$. Struja u tački A manja je od one u tački B ($I_A < I_B$), pa je i snaga u tački A (P_A) takođe je manja od snage u tački B (P_B) što je prikazano na slici 4.1.3 (b). Pošto pozitivna promjena trenutne struje dovodi do porasta trenutne snage, djeluje se na D tako da se referentna struja se povećava, čime se radna tačka sistema pomjera ka MPP-u. Na osnovu toga se zaključuje da se sistem u tom trenutku nalazi na lijevoj strani MPP-a.

Ukoliko bismo, međutim, posmatrali momenat uzorkovanja u ciklusu $T(k)$ koji se nalazi u tački C, tada bi trenutna vrijednost struje u tački C bila manja od one u A ($I_C < I_A$), dok bi odgovarajuća trenutna snaga P_C bila manja od P_A . U ovoj situaciji je vidljivo da je došlo do negativne promjene struje, što je rezultat smjera perturbacije koji je algoritam sproveo u prethodnom koraku. Međutim, u blizini tačke maksimalne snage MPP-a može doći do pojave privremene zabune u procjeni smjera promjene snage. Naime, male fluktuacije izlazne snage mogu stvoriti utisak da se radna tačka kreće ka optimalnoj vrijednosti, iako je za stvarno dostizanje MPP-a neophodno izvršiti perturbaciju u suprotnom smjeru [39].

4.2 Unapređenje P&O metode primjenom pravila numeričkih aproksimacija

P&O algoritam se u praksi suočava sa kompromisom između veličine perturbacionog koraka i odnosa brzina–efikasnost, ali i sa mogućim pogrešnim određivanjem smjera perturbacije usljed naglih promjena vjetra [3]. Kao rješenje, u ovom radu razmatra se pristup zasnovan na numeričkoj procjeni krive snaga–napon (P – V) primjenom pravougaonog, trapezoidnog i Simpsonovog pravila integracije. Na osnovu ovih numeričkih metoda određuje se površina između trenutne i prethodne vrijednosti snage P_{dc} na krivoj P – V , čime se izračunavaju referentne vrijednosti snage P_{ref} i napona V_{ref} , koje predstavljaju ulazne parametre za P&O algoritam. Ovaj dodatak omogućava precizniju procjenu promjena izlazne snage i poboljšava ukupne performanse algoritma.

4.2.1 Pravougaono integraciono pravilo numeričke integracije

U cilju određivanja približne vrijednosti određenog integrala, koriste se različite metode numeričke integracije. Jedna od osnovnih i najjednostavnijih među njima jeste pravougaono pravilo. Neka je interval integracije $[a, b]$ podijeljen na n jednakih podintervala širine.

$$h = \frac{b - a}{n}. \quad (30)$$

Tačke podjele su $x_0 = a$, $x_1 = a + h$, \dots , $x_n = b$. Parametar n označava broj podintervala i direktno utiče na preciznost aproksimacije. Sa povećanjem broja podintervala funkcija će biti preciznije aproksimirana, a pravougaonici sve bolje prate oblik krive, dok se greška između stvarne i aproksimirane površine smanjuje [40].

Za funkciju $f(x)$ ukupna površina ispod krive se aproksimira zbirom površina pravougaonika, a u zavisnosti od tačke na kojoj se uzima vrijednost f u svakom podintervalu, dobijaju se tri standardne varijante:

Lijeva ivica:

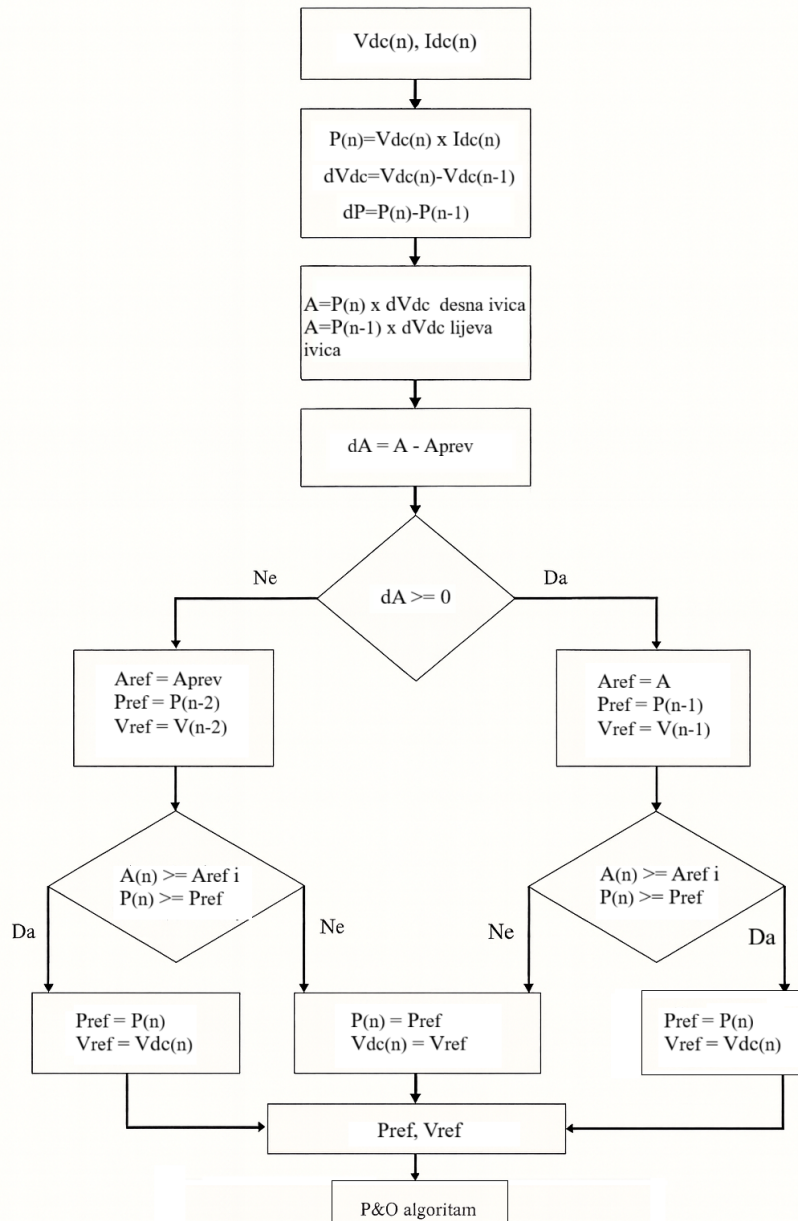
$$I_L = h \sum_{i=1}^n f(x_{i-1}). \quad (31)$$

Desna ivica;

$$I_R = h \sum_{i=1}^n f(x_i). \quad (32)$$

U okviru predloženog MPPT algoritma, promjena snage između uzastopnih tačaka na

P - V karakteristici aproksimira se korišćenjem koraka integracije $h = \Delta V_{dc}$, pri čemu se visina svakog pravougaonika određuje vrijednošću snage P u odgovarajućoj tački intervala (lijevoj ili desnoj). Na slici 4.2.1 prikazan je način na koji je klasični P&O algoritam nadograđen primjenom pravougaonog pravila integracije, čime se omogućava preciznija procjena promjene snage između uzastopnih tačaka P - V karakteristike.



Slika 4.2.1: Modifikacija P&O algoritma sa pravougaonim integracionim pravilom.

4.2.2 Trapezoidno pravilo numeričke integracije

Trapezoidno pravilo predstavlja jednu od najčešće korišćenih numeričkih metoda za aproksimaciju određenog integrala. Osnovna ideja ove metode zasniva se na zamjeni stvarne funkcije između dvije tačke x_i i x_{i+1} pravom linijom, čime se površina ispod krive aproksimira kao površina trapeza. U poređenju sa jednostavnijim pravougaonim metodama, trapezoidno pravilo pruža bolju aproksimaciju, jer uzima u obzir promjenu vrijednosti funkcije između dvije susjedne tačke, čime se smanjuje ukupna greška integracije. Tačnost metode dodatno raste sa povećanjem broja podintervala n , čime se površina ispod krive sve preciznije aproksimira, kao i u primjeru za pravougaono pravilo [41].

Ako se interval $[a, b]$ podijeli na n jednakih podintervala širine:

$$h = \frac{b - a}{n}, \quad (33)$$

vrijednost određenog integrala može se približno izračunati pomoću izraza:

$$\int_a^b f(x) dx \approx \frac{h}{2} \left[f(x_0) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} f(x_i) + f(x_n) \right], \quad (34)$$

gdje su $x_0 = a$, $x_n = b$, a $x_i = a + h$. U okviru predložene MPPT metode posmatra se površina između prethodne i trenutne tačke na P - V karakteristici, a ta površina se koristi za određivanje daljeg toka algoritma. Površina između dvije tačke modeluje se kao trapez, čime se omogućava preciznija procjena promjene snage. Na osnovu ovoga i prethodno izloženog, formula za trapezno pravilo koja se koristi u algoritmu dobija sljedeći oblik:

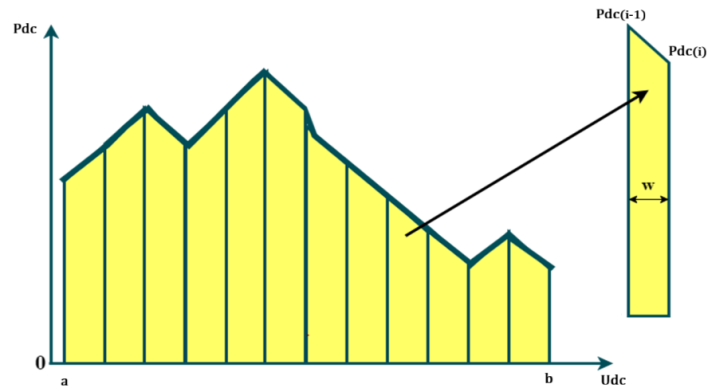
$$A = \frac{(P_{dc}(n) + P_{dc}(n-1))}{2} dV_{dc}, \quad (35)$$

gdje je:

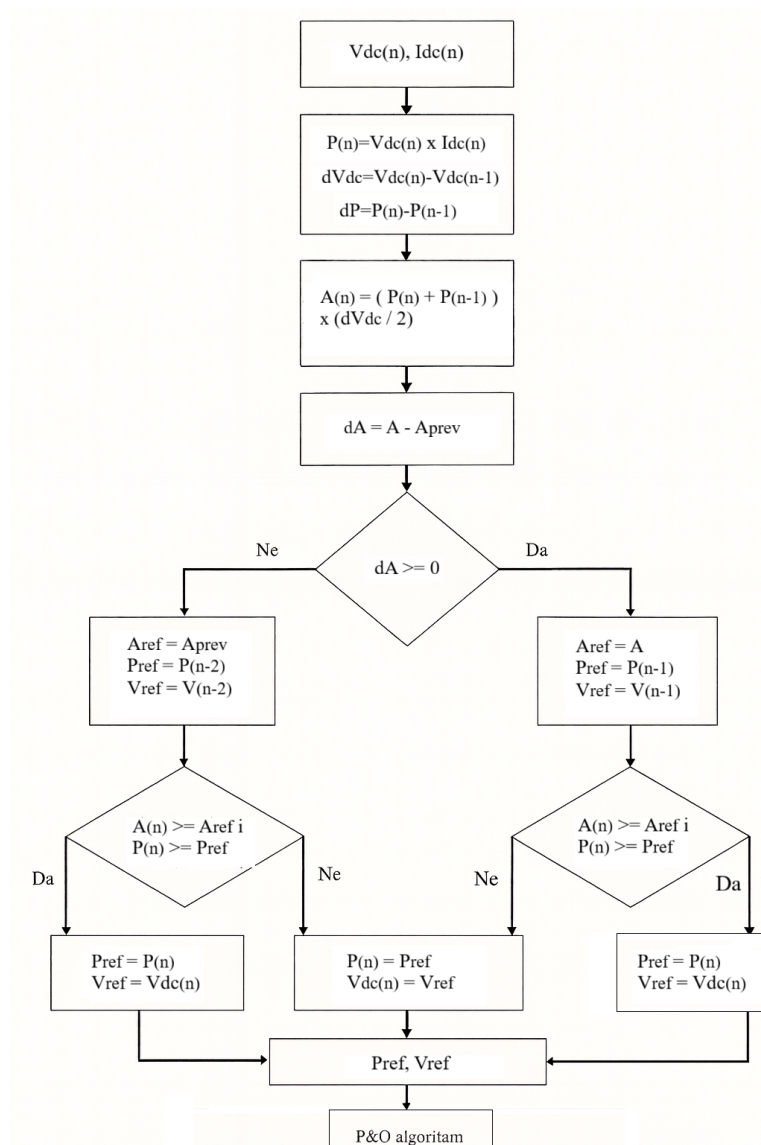
$$dV_{dc} = V_{dc}(n) - V_{dc}(n-1).$$

Na slici 4.2.2 prikazan je koncept trapezoidnog pravila koji je primijenjen u ovom radu. Ovim pristupom približno se određuje površina ispod krive funkcije $P_{dc} = f(V_{dc})$ korišćenjem niza trapeza.

Cjelokupan algoritam prikazan je na slici 4.2.3, gdje je prikazan tok izvršavanja procedura koje omogućavaju praćenje tačke maksimalne snage pomoću P&O metode zasnovane na trapezoidnom pravilu integracije.



Slika 4.2.2: Koncept trapezoidnog pravila [7].



Slika 4.2.3: Modifikacija P&O algoritma sa trapezoidnim integracionim pravilom.

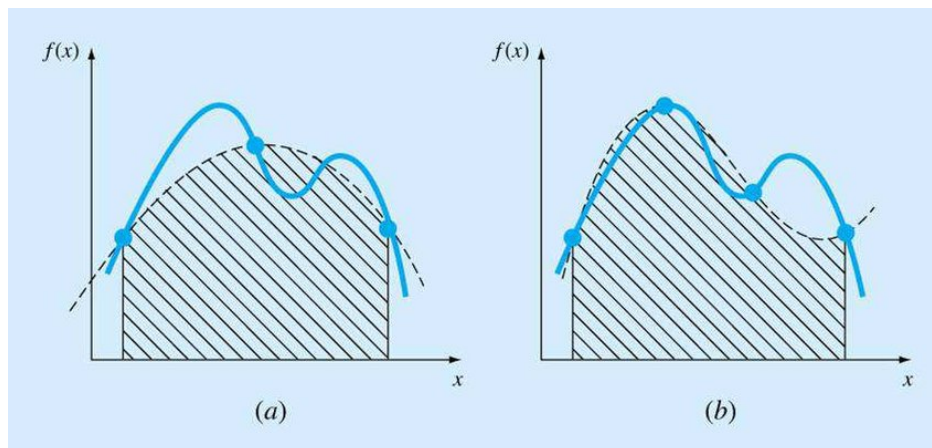
4.2.3 Simpsonova pravila numeričke integracije

Numeričke metode integracije razlikuju se prema načinu na koji aproksimiraju oblik posmatrane funkcije između dvije tačke. Kod pravougaonog pravila funkcija se aproksimira konstantom unutar svakog podintervala podjele, dok trapezno pravilo koristi linearnu aproksimaciju između graničnih tačaka. Nasuprot njima, Simpsonovo pravilo predstavlja napredniji pristup koji vrši interpolaciju posmatrane funkcije polinomom određenog stepena, čime se postiže veća tačnost pri izračunavanju površine ispod krive.

Postoje dvije osnovne varijante Simpsonovih pravila:

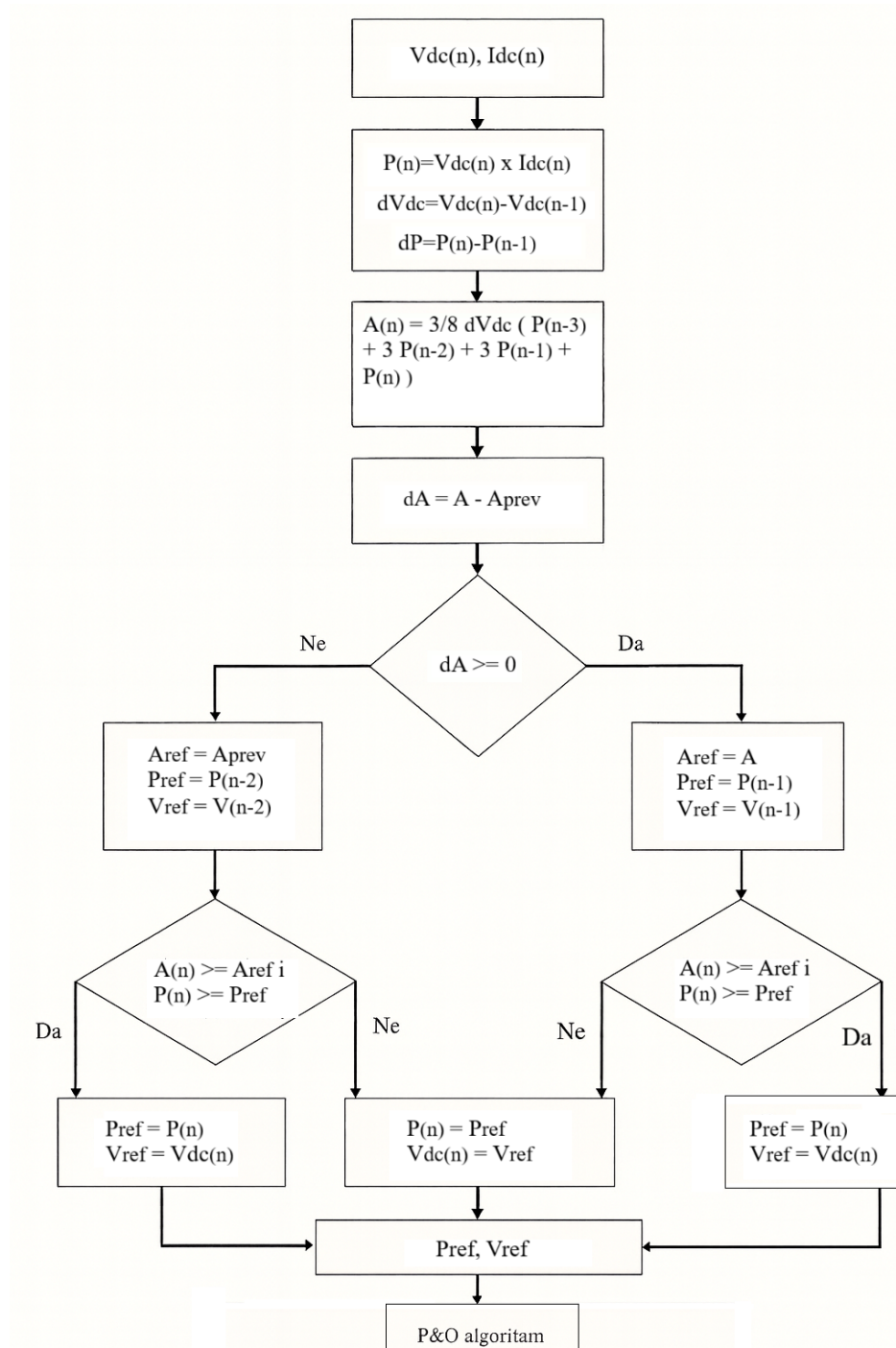
- **Pravilo 1/3** aproksimira funkciju kvadratnim polinomom i zahtijeva paran broj podintervala.
- **Pravilo 3/8** koristi kubni polinom i zahtijeva da interval bude podijeljen na broj podintervala koji je djeljiv sa 3 [42].

Na slici 4.2.4 prikazano je grafičko poređenje između Simpsonovog 1/3 (a) i 3/8 pravila (b).



Slika 4.2.4: Poređenje Simpsonovog 1/3 i 3/8 pravila [43].

U okviru ovog rada izvedene su simulacije zasnovane na Simpsonovom 3/8 pravilu, dok je na slici 4.2.5 prikazan blok dijagram algoritma koji implementira pomenuto pravilo u procesu MPPT-a.



Slika 4.2.5: Modifikacija P&O algoritma sa Simpsonovim 3/8 pravilom integracije.

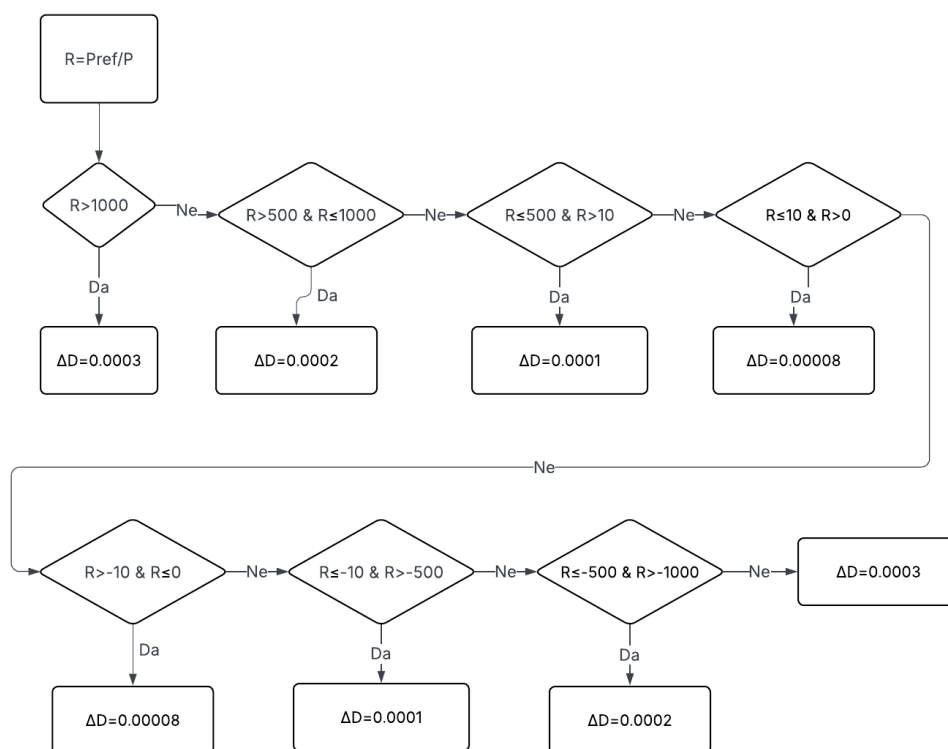
4.3 Adaptivni korak perturbacije

U klasičnom *P&O* algoritmu, veličina perturbacionog koraka (ΔD) je fiksna tokom čitavog procesa MPPT-a. Ukoliko se vrijednost ovog fiksnog koraka poveća, naročito u uslovima promjenljive brzine vjetra, dolazi do nestabilnosti algoritma, izraženih oscilacija i značajnog odstupanja od MPP-a. Kako bi se izbjegli ovi efekti i unaprijedile performanse sistema, uve-

den je adaptivni korak koji u svakoj iteraciji dinamički prilagođava vrijednost ΔD .

Izlaz iz algoritama prikazanih na slikama 4.2.1, 4.2.3 i 4.2.5 predstavlja referentnu snagu P_{ref} . Ovaj podatak iskorišćen je za implementaciju adaptivnog perturbacionog koraka, pri čemu se vrijednost koraka određuje na osnovu odnosa između referentne vrijednosti P_{ref} i trenutne izlazne snage P , pri čemu ovaj odnos predstavlja parametar R . Kada je vrijednost P značajno manja od P_{ref} , sistem se nalazi dalje od MPP-a, pa je potrebno primijeniti veći korak perturbacije ΔD kako bi se radna tačka brže približila optimalnoj vrijednosti. Suprotno tome, kada su vrijednosti P i P_{ref} gotovo jednake, sistem se nalazi u blizini MPP-a, te se korak ΔD smanjuje radi ograničavanja oscilacija i smanjenja mogućnosti da algoritam preskoči MPP tačku.

Na osnovu velikog broja sprovedenih testiranja utvrđeno je da usvajanje prikazanih grančnih vrijednosti parametra R omogućava optimalno ponašanje adaptivnog algoritma. Rezultati ispitivanja pokazali su da ovako definisane granice predstavljaju najbolji kompromis između preciznosti i stabilnosti, uz istovremeno najmanji broj segmenata u strukturi algoritma. Adaptivni pristup omogućava dinamičko prilagođavanje vrijednosti ΔD u zavisnosti od udaljenosti radne tačke od MPP-a, čime se postiže brži odziv pri većim odstupanjima i smanjene oscilacije u blizini optimalne tačke. Na slici 4.3.1 prikazan je algoritam za određivanje koraka ΔD .



Slika 4.3.1: Flowchart adaptivnog algoritma za određivanje koraka ΔD

5. Simulacioni rezultati

U ovom poglavlju prikazani su simulacioni rezultati razvijenog MPPT algoritma zasnovanog na numerički optimizovanoj *P&O* strategiji, koja integriše pravougaono (lijeva/desna ivica), trapezoidno i Simpsonovo 3/8 pravilo integracije, uz promjenjivi korak perturbacije.

Simulacije su realizovane u okruženju *MATLAB/Simulink*, na modelu vjetroenergetskog sistema koji obuhvata vjetroturbinu, PMSG, diodni ispravljač, DC–DC *boost* konvertor sa implementiranim MPPT algoritmom i potrošača.

Analiza je sprovedena pod sljedećim pretpostavkama:

- elementi sistema su idealni, bez gubitaka i vremenskih kašnjenja,
- mjerenja napona i struje su idealna, bez šuma i kašnjenja, osim u slučajevima kada se šum namjerno dodaje radi analize robusnosti algoritma,
- zavisnost između snage i napona na izlazu ispravljača u malim intervalima smatra se kvazi-linearnom, što omogućava primjenu numeričkih metoda integracije,

U okviru ovih pretpostavki, analizirani su sljedeći aspekti rada sistema, s ciljem poređenja klasičnog *P&O* algoritma sa numerički unaprijeđenim verzijama. Poređenje je vršeno na osnovu sljedećih pokazatelja performansi:

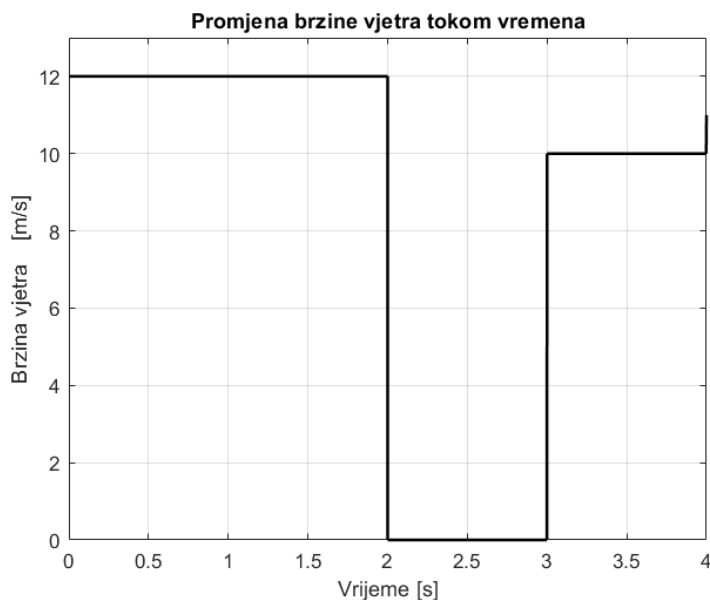
- **Srednja vrijednost (Mean)** – predstavlja aritmetičku sredinu posmatrane veličine tokom simulacionog intervala.
- **Vrijeme porasta (Rise Time [s])** – označava vremenski interval potreban da izlazna veličina poraste od 10% do 90% svoje stacionarne vrijednosti.
- **Energija (E [J])** – predstavlja ukupnu energiju ostvarenu na izlazu sistema tokom simulacije, određenu integralom snage u vremenu:

$$E = \int P_{dc}(t) dt. \quad (36)$$

Kroz dobijene simulacione rezultate biće prikazano kako predloženi pristup omogućava brže dostizanje optimalne radne tačke i povećanje ukupne efikasnosti sistema u poređenju sa standardnim *P&O* algoritmom. Simulacioni rezultati korišćeni za proračun srednje vrijednosti snage P_{dc} , energije i vremena porasta dobijeni su za vremenski interval od 3 s, pri konstantnoj brzini vjetra od 12 m/s, za svaki od razmatranih algoritama.

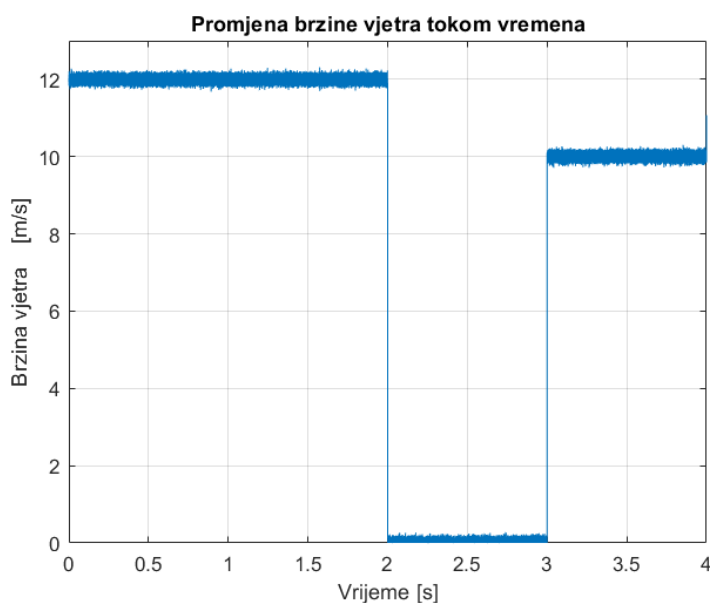
Nakon analize pri konstantnim uslovima, tokom simulacije je razmatran i prelaz sistema iz nominalnog režima rada u uslove potpunog zastoja vjetra (ispod V_{cut-in}), kao i ponovno uspostavljanje proizvodnje, čime je ispitano dinamičko ponašanje i otpornost MPPT algoritama

na nagle promjene ulaznih parametara. Prema tome, za svaku varijantu MPPT algoritma biće analizirano ponašanje pri promjenama brzine vjetra prikazanim na slici 5.0.1, gdje se može uočiti da je u intervalu 0–2 s prisutna nominalna brzina vjetra, nakon čega u periodu 2–3 s nastupa potpuni zastoј, dok se u intervalu 3–4 s ponovo uspostavlja vrijednost od 10 m/s.



Slika 5.0.1: Promjena brzine vjetra.

Kao još jedan vid procjene robusnosti i stabilnosti MPPT algoritama, biće ispitivano i ponašanje sistema u uslovima kada na ulazu dolazi brzina vjetra u prisustvu bijelog šuma jačine 1×10^{-5} , čiji je oblik prikazan na slici 5.0.2.



Slika 5.0.2: Promjena brzine vjetra sa dodatim šumom.

Nakon toga, biće dat prikaz ponašanja algoritama pri smanjenju otpora R sa 35Ω na 30Ω u prvoj sekundi simulacije. Simulacija je sprovedena pri brzini vjetra od 12 m/s i ukupnom trajanju od 3 s .

U cilju analize odziva sistema na promjene radnih uslova, sprovedene su dodatne simulacije u kojima će biti analiziran uticaj promjene tipa opterećenja, pri čemu je umjesto čisto omskog opterećenja primijenjeno omsko-induktivno opterećenje sa $R = 35 \Omega$ i $L = 5 \times 10^{-3} \text{ H}$, a navedeni režim opterećenja ostaje konstantan tokom kompletnog simulacionog intervala. I u ovom slučaju simulacija je sprovedena pri brzini vjetra od 12 m/s i ukupnom trajanju od 3 s . Cilj ovog ispitivanja je analiza uticaja induktivne komponente na stabilnost i odziv snage korišćenjem predloženih MPPT algoritama, s obzirom na to da prisustvo induktivnosti može izazvati fazno kašnjenje između napona i struje, što može dovesti do nestabilnosti izlazne snage ili usporiti odziv.

Za algoritme sa fiksnim korakom perturbacije korišćena je vrijednost $D = 0.0008$, koja obezbjeđuje ravnotežu između brzine konvergencije i stabilnosti sistema.

5.1 Elementi modela u radu

U ovom poglavlju prikazana je realizacija svakog elementa modela vjetroenergetskog među kojima su: vjetroturbina, PMSG, elementi energetske elektronike, MPPT kontroler i opterećenje.

5.1.1 Vjetroturbina

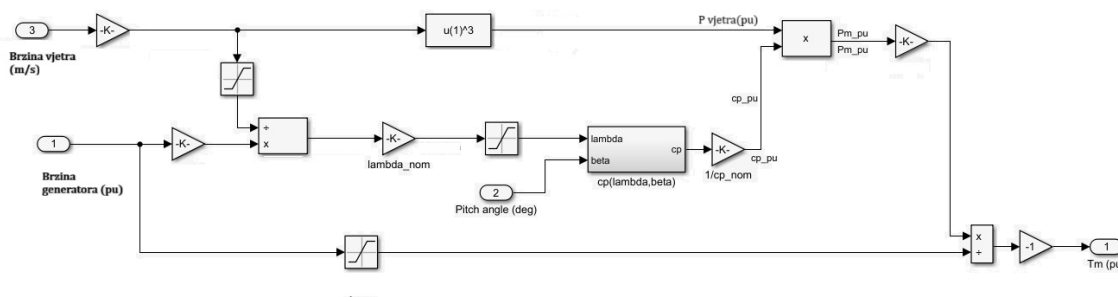
Za potrebe simulacije vjetroturbine korišćen je blok *Wind Turbine* iz okruženja *Simulink*. Model obuhvata nelinearne aerodinamičke karakteristike turbine i omogućava analizu njenog ponašanja u različitim radnim režimima. Parametri korišćenog modela prikazani su u Tabeli 5.1.

Tabela 5.1: Parametri korišćenog modela vjetroturbine

Parametar	Vrijednost
Nominalna mehanička izlazna snaga (W)	3×10^3
Nominalna prividna snaga generatora (VA)	$\frac{3 \times 10^3}{0.9}$
Nominalna brzina vjetra (m/s)	12
Maksimalna snaga pri nominalnoj brzini vjetra (p.u.)	0.73
Nominalna brzina rotacije (p.u.)	1.2
Ugao zakretanja lopatica β (deg)	0

Na slici 5.1.1 je prikazan Simulink model vjetroturbine koji obuhvata proračun mehaničke snage i momenta turbine u jediničnom sistemu (engl. *per unit* – p.u.). Ulazne veličine

modela su brzina vjetra izražena u metrima u sekundi (m/s), brzina generatora u p.u. i ugao zakretanja lopatica u stepenima. Na osnovu ulaznih vrijednosti izračunava se TSR, nakon čega se određuje koeficijent snage turbine. Dobijeni koeficijent snage koristi se za proračun mehaničke snage turbine P_m , koja se dalje pretvara u p.u. vrijednosti. Na kraju, izračunava se mehanički moment T_m , koji predstavlja ključnu ulaznu veličinu za model generatora.



Slika 5.1.1: Model vjetroturbine u Simulinku.

5.1.2 Sinhroni generator sa stalnim magnetima

Za modelovanje PMSG-a je korišćena mašina sa stalnim magnetima (engl. *Permanent Magnet Synchronous Machine – PMSM*). Ovaj blok omogućava implementaciju trofazne ili petofazne mašine, pri čemu trofazna verzija može imati sinusoidalni ili trapezoidni oblik EMF. PMSM blok može raditi i u režimu motora i u režimu generatora, pri čemu način rada zavisi od znaka primijenjenog mehaničkog momenta. Pozitivan moment označava režim rada motora, dok negativan označava režim generatora. U ovom radu korišćena je trofazna sinusoidna varijanta modela sa istaknutim polovima, kod kog se pretpostavlja da fluks stalnih magneta u statoru ima sinusoidalni raspored, pa su i indukovane elektromotorne sile sinusoidnog oblika. Parametri generatora korišćenog u ovoj simulaciji dati su u Tabeli 5.2.

Tabela 5.2: Parametri modela trofazne PMSG mašine korišćene u simulaciji

Parametar	Vrijednost
Otpor statora (R_s)	0.0485 Ω
Induktivnosti po osama [L_d, L_q]	$L_d = 0.0003752$ H, $L_q = 0.0004148$ H
Fluks magneta	0.1194 V·s
Moment inercije (J)	0.0027 kg·m ²
Koeficijent viskoznog trenja (F)	0.0004924 N·m·s
Broj polova (p)	4
Početni uslovi [$\omega_m, \theta, i_a, i_b$]	0.0 rad/s, 0.0 deg, 0.0 A, 0.0 A
Položaj rotorskog fluksa ($\theta = 0$)	90°
Broj faza	3

Izlazna mehanička snaga vjetroturbine u modelu je izražena u p.u. koja je zatim konvertovana u realne vrijednosti radi proračuna mehaničkog momenta koji se prenosi na osovinu

PMSG-a.

Na Slici 5.1.2 prikazan je dio simulacionog modela u kojem se vrši konverzija mehaničkog momenta iz p.u. sistema u realne vrijednosti i obuhvata PMSG. Izlazni mehanički moment turbine, označen kao T_m , množi se sa baznim mehaničkim momentom T_b kako bi se dobila stvarna vrijednost momenta u njutn-metrima (Nm). Bazni moment definisan je izrazom:

$$T_b = \frac{P_n}{\omega_b}, \quad (37)$$

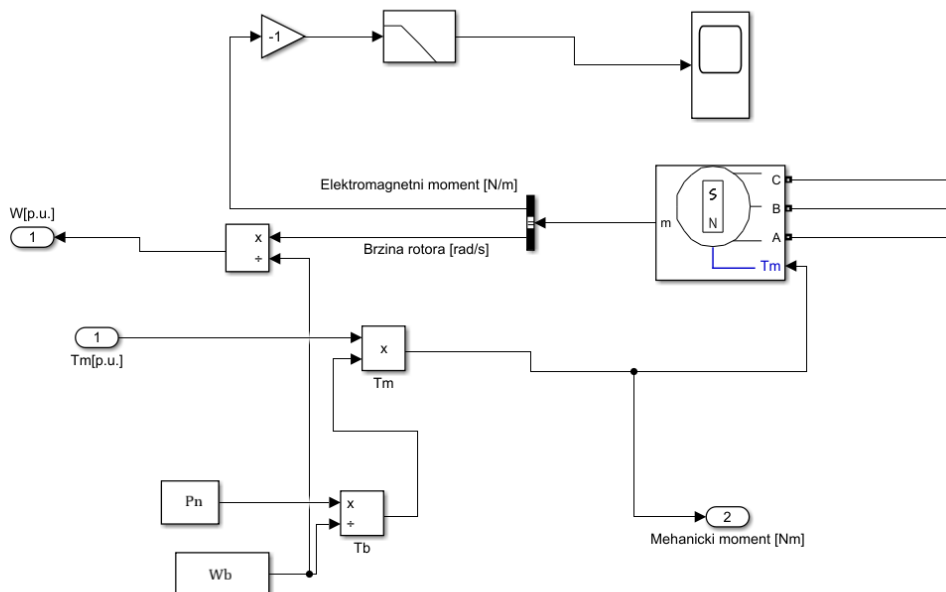
gdje je P_n nominalna snaga turbine, a ω_b bazna ugaona brzina rotora izražena u radijanima po sekundi.

U modelu je bazna brzina predstavljena unaprijed definisanim izrazom:

$$\omega_b = \frac{\lambda \cdot V}{R}, \quad (38)$$

gdje je λ TSR, V brzina vjetra, a R dužina lopatice vjetroturbine.

Izlaz iz PMSG bloka predstavlja brzinu rotora, koja se dijeli sa baznom brzinom ω_b kako bi se dobila brzina rotora u *per unit* sistemu.



Slika 5.1.2: PMSG u Simulinku.

5.1.3 Elementi energetske elektronike

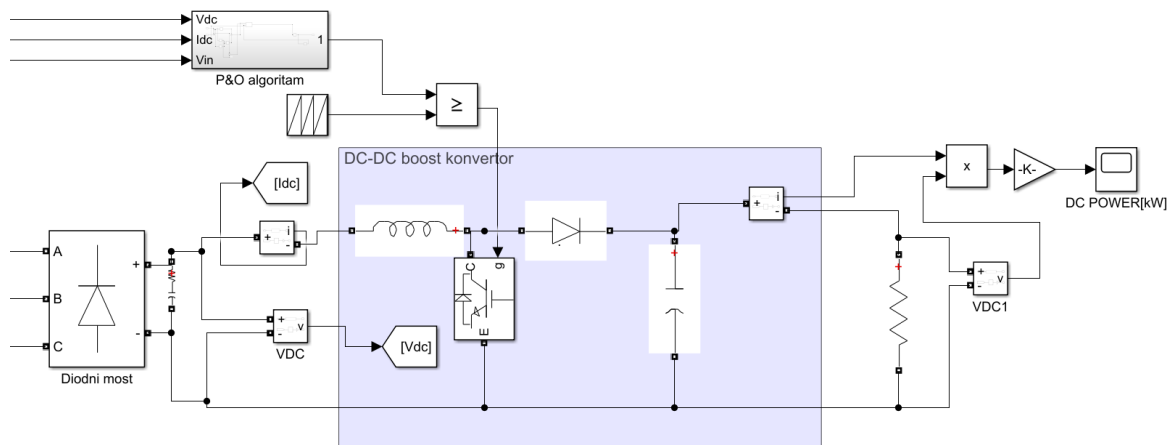
U MATLAB/Simulink okruženju razvijen je model koji obuhvata trofazni diodni mostni ispravljač i *boost čoper*. Diodni Grečov ispravljač modelovan je blokom Universal Bridge,

a u Tabeli 5.3 su parametri iskorišćeni u radu. Na izlazu diodnog mosta se nalazi RC filter radi smanjenja talasanja napona i poboljšanja kvaliteta izlaznog signala.

Tabela 5.3: Parametri korišćeni u modelu.

Parametar	Vrijednost
Broj grana mosta	3
Otpornost prigušnice R_s	$1 \times 10^5 \Omega$
Kapacitivnost prigušnice C_s	∞
Poluprovodnički element	Diode

Boost čoper nije modelovan blokom, već je svaki element pojedinačno prikazan. Kao prekidački element *boost* čopera koristi se IGBT (engl. *Insulated Gate Bipolar Transistor*) tranzistor, kojim se upravlja putem PWM signala generisanog P&O algoritmom. Na slici 5.1.3 prikazan je simulacioni model pretvaračkog sistema u MATLAB/Simulink okruženju i PWM modulator.



Slika 5.1.3: Model boost pretvarača u MATLAB/Simulinku.

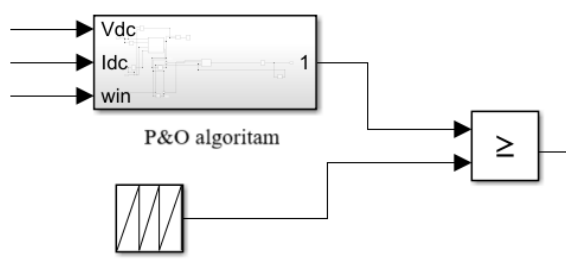
U Tabeli 5.4 prikazani su svi osnovni parametri *boost* konvertora koji je korišćen u modelu.

Tabela 5.4: Parametri korišćeni u modelu boost pretvarača

Parametar	Oznaka	Vrijednost
Induktivnost	L	$8.8 \times 10^{-5} \text{ H}$
Kapacitivnost	C	$3 \times 10^{-4} \text{ F}$
Otpornost	R	35Ω
Naponsko talasanje	ΔV	$0.005V$

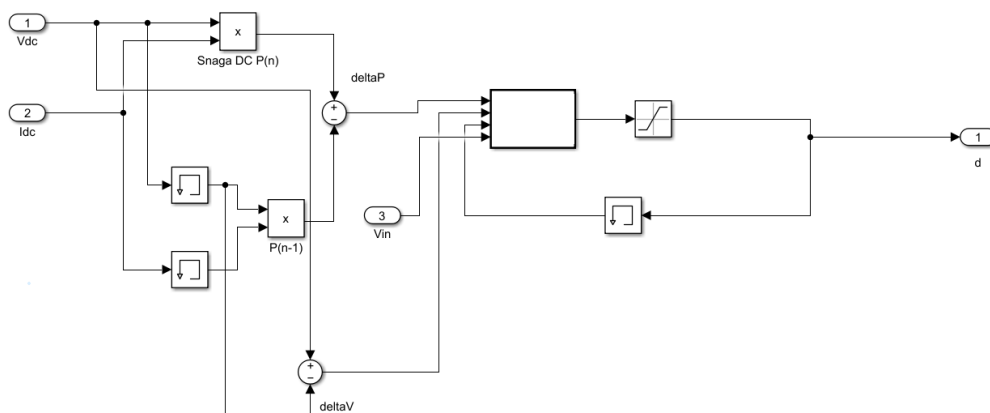
5.1.4 Upravljačka struktura MPPT algoritma

Na slici 5.1.4 prikazan je segment modela koji ilustruje implementaciju PWM modulatora u *Simulinku*, koji ima ključnu ulogu u formiranju upravljačkog signala pretvarača. Blok poređenja generiše logički izlaz u zavisnosti od odnosa referentnog signala i trougaonog signala. Izlaz PWM modulatora može biti 1 ili 0, pri čemu vrijednost 1 označava da tranzistor provodi, dok vrijednost 0 predstavlja stanje u kojem tranzistor ne provodi.



Slika 5.1.4: Implementacija PWM modulatora u Simulinku.

Da bi PWM modulator mogao biti realizovan, neophodno je prethodno implementirati P&O algoritam koji generiše referentni signal za upravljanje pretvaračem. Na slici 5.1.5 prikazana je njegova implementacija korišćena u ovom radu. Prikazani blok dijagram ilustruje osnovnu strukturu predloženog rješenja, gdje su ulazni parametri jednosmjerni napon V_{dc} i struja I_{dc} , dok signal V_{in} označava brzinu vjetra. Pomoću bloka *Memory* obezbjeđuju se vrijednosti napona i struje iz prethodne iteracije, koje se koriste za izračunavanje promjena ΔP i ΔV . U *MATLAB Function* bloku implementiran je P&O algoritam, čiji je izlazni signal *duty cycle* koji se koristi za upravljanje pretvaračem.

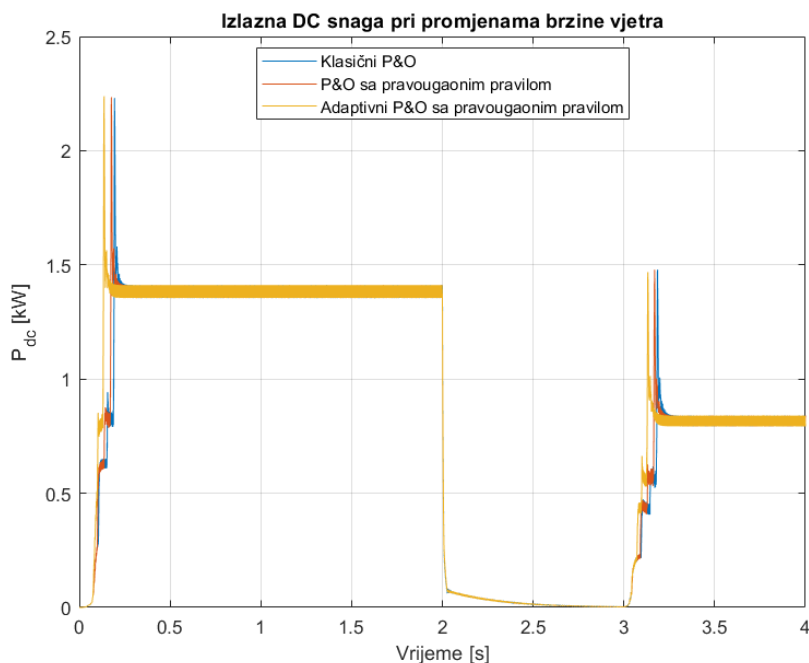


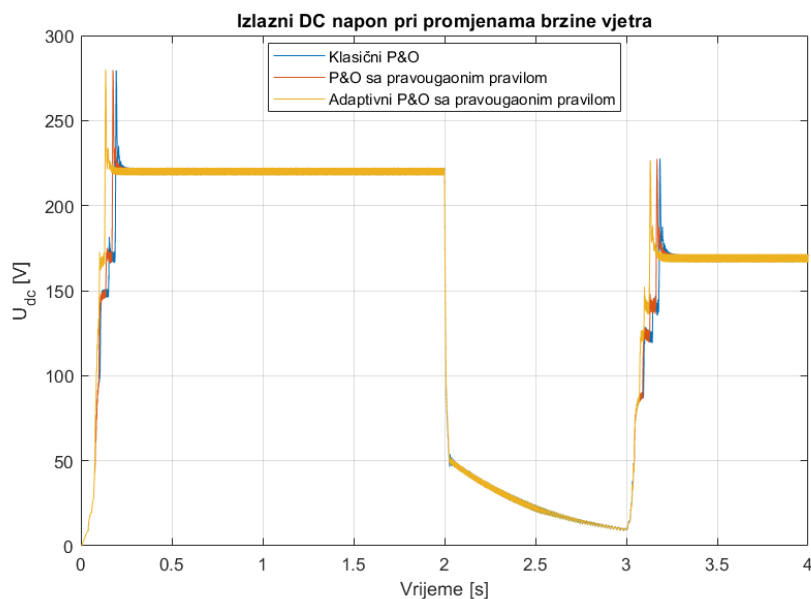
Slika 5.1.5: Realizacija P&O algoritma u Simulinku.

Tabela 5.5: Usporedni pregled osnovnih parametara odziva za klasični, prošireni i adaptivni P&O algoritam

Parametar	Oznaka	Klasični P&O	P&O sa lijevom pravougaonom ivicom	P&O sa pravougaonim pravilom(lijeva ivica) i adaptivnim korakom
Srednja vrijednost P_{dc}	Mean [kW]	1.322	1.327	1.338
Vrijeme porasta	Rise Time [s]	0.106	0.098	0.053
Energija	E [J]	3966	3980	4014

Na slici 5.2.1 prikazana je promjena izlazne snage P_{dc} za tri posmatrana slučaja: klasični P&O algoritam, unaprijeđeni P&O algoritam sa pravougaonom površinskom aproksimacijom i adaptivni algoritam sa pravougaonom površinskom aproksimacijom. Prikazan je ispravljeni jednosmjerni napon U_{dc} za iste varijante algoritama na slici 5.2.2.

Slika 5.2.1: Promjena P_{dc} za tri posmatrane MPPT metode.

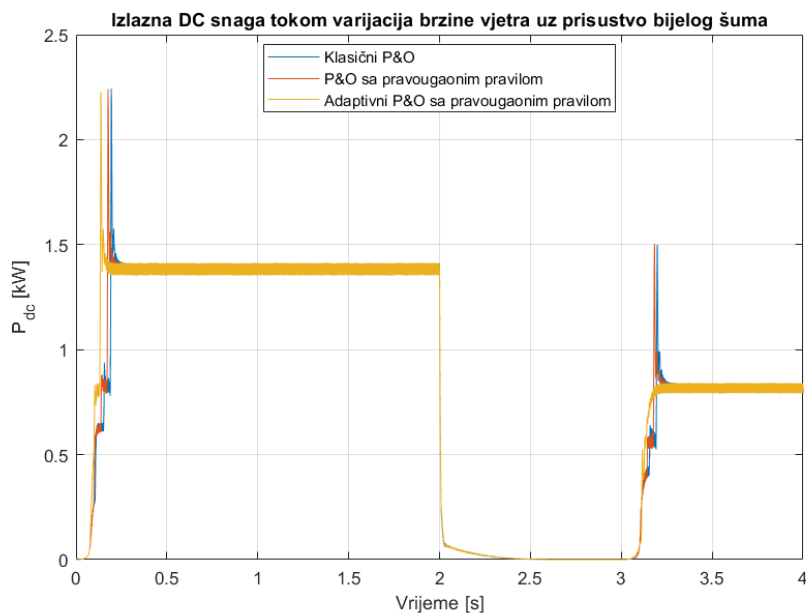


Slika 5.2.2: Promjena U_{dc} za tri posmatrane MPPT metode.

Na osnovu slika 5.2.1 i 5.2.2 može se zaključiti da sve metode uspješno prate promjene brzine vjetra i ostvaruju stabilan rad nakon prelaznih procesa. Klasični *P&O* algoritam pokazuje sporije dostizanje MPP-a. Primjenom pravougaonog pravila postiže se brži odziv u inicijalnoj fazi praćenja MPP-a, ali i nešto sporiji odziv u odnosu na adaptivnu varijantu.

Bijeli šum

Na slici 5.2.3 prikazana je promjena izlazne snage P_{dc} u prisustvu bijelog šuma, pri čemu svi posmatrani MPPT algoritmi zadržavaju stabilan odziv i osnovne dinamičke karakteristike, što potvrđuje njihovu robusnost u realnim uslovima rada. Uočeni trend ponašanja u poređenju sa prethodnim slučajem bez šuma ostaje zadržan - *P&O* algoritam proširen pravougaonim integracionim pravilom pokazuje blago poboljšanje u odnosu na klasični *P&O* algoritam, dok adaptivni pristup potvrđuje najbolje performanse.

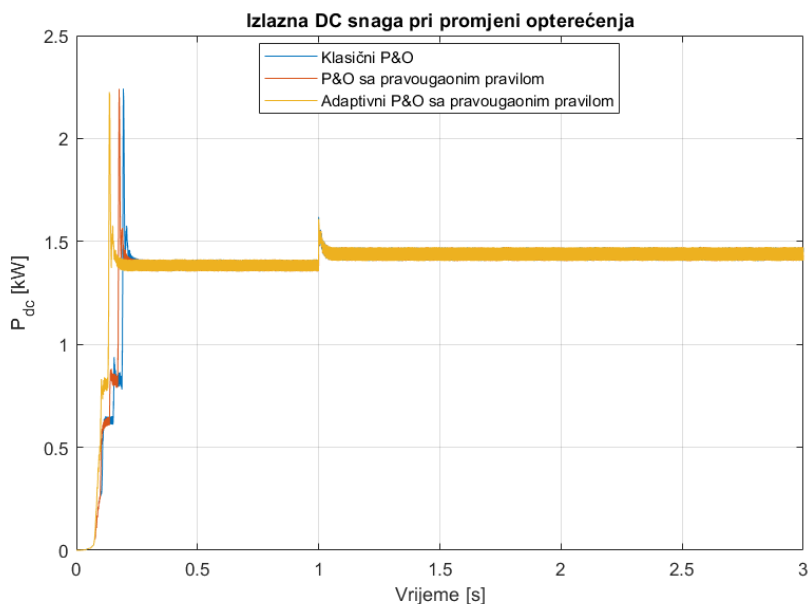


Slika 5.2.3: Izlazna DC snaga tokom varijacija brzine vjetra uz prisustvo bijelog šuma.

Uočljivo je da adaptivni *P&O* algoritam pri brzini vjetra od 10 m/s ne pokazuje izražen početni pik, odnosno njegova pojava u potpunosti izostaje, što potvrđuje da ovaj algoritam ostvaruje najstabilniji i najefikasniji odziv među posmatranim metodama.

Promjena opterećenja

Na slici 5.2.4 prikazani su talasni oblici izlazne snage P_{dc} za slučaj promjene omskog opterećenja sa 35Ω na 30Ω nakon prve sekunde.

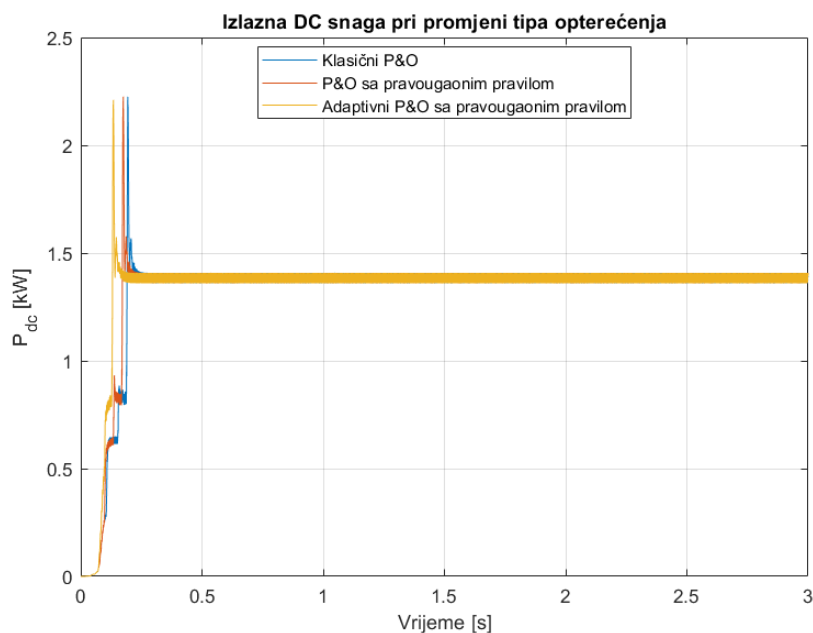


Slika 5.2.4: Odziv P_{dc} na promjenu opterećenja sa $R = 35 \Omega$ na $R = 30 \Omega$.

Promjenom opterećenja dolazi do povećanja izlazne snage nakon prve sekunde, pri čemu izlazna snaga ostaje stabilna, što potvrđuje da sistem pravilno reaguje na smanjenje opterećenja i brzo uspostavlja novu stabilnu radnu tačku. Tokom prelaznog procesa svi posmatrani MPPT algoritmi zadržavaju stabilnost i konvergenciju prema MPP-u, pri čemu adaptivni MPPT pokazuje najbrži odziv. Time se potvrđuje sposobnost sistema da pouzdano funkcioniše i pri promjenama opterećenja.

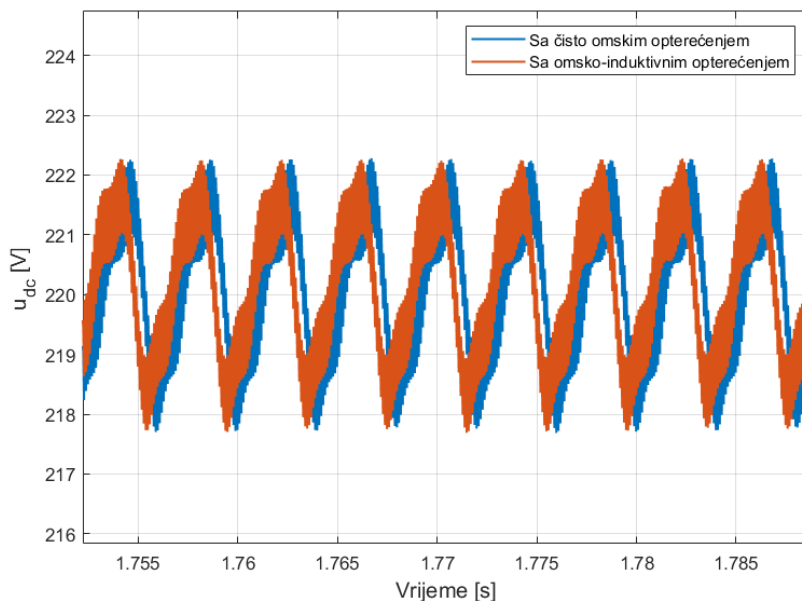
Promjena tipa opterećenja

Na slici 5.2.5 prikazan je odziv klasične $P&O$ metode, $P&O$ sa pravougaonom metodom (lijeva ivica) i adaptivne $P&O$ varijante sa pravougaonom metodom za kombinovano omsko-induktivno opterećenje $R = 35 \Omega$, $L = 5 \text{ mH}$.



Slika 5.2.5: Odziv P_{dc} pri opterećenju $R = 35 \Omega$ i $L = 0.005 \text{ H}$.

Promjenom tipa opterećenja sa čistog omskog na omsko-induktivno opterećenje mijenja se dinamičko ponašanje sistema, što se ogleda u blagom faznom pomjeraju napona, što je jasno vidljivo na slici 5.2.6. Ipak, sistem zadržava stabilnost i održava približno isti srednji nivo napona, što potvrđuje sposobnost MPPT kontrolera da efikasno kompenzuje promjene tipa opterećenja. Adaptivni algoritam i u ovom slučaju pokazuje najstabilniji odziv.



Slika 5.2.6: Uporedni prikaz napona U_{dc} za čisto omsko i kombinovano RL opterećenje.

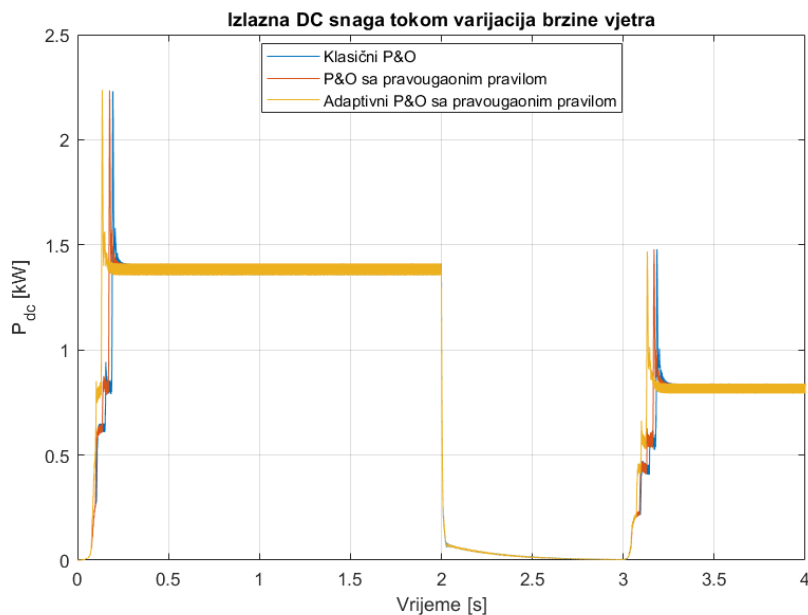
5.2.2 Implementacija pravougaonog pravila sa desnom ivicom

Na osnovu prikazanih vrijednosti u Tabeli 5.6 može se uočiti da aproksimacija sa desnom ivicom pravougaonika pokazuju gotovo identične vrijednosti kao i aproksimacija sa lijevom pravougaonom ivicom. I kod ove metode uočen je značajan pad vremena porasta, što ukazuje na brži dinamički odziv sistema. Istovremeno, srednja vrijednost izlazne snage bilježi blago povećanje, što ukazuje na efikasnije iskorišćavanje raspoložive snage vjetra. Najbolje performanse ponovo su ostvarene kod adaptivne varijante algoritma, koja objedinjuje prednosti numeričkog unapređenja i promjenjivog koraka perturbacije.

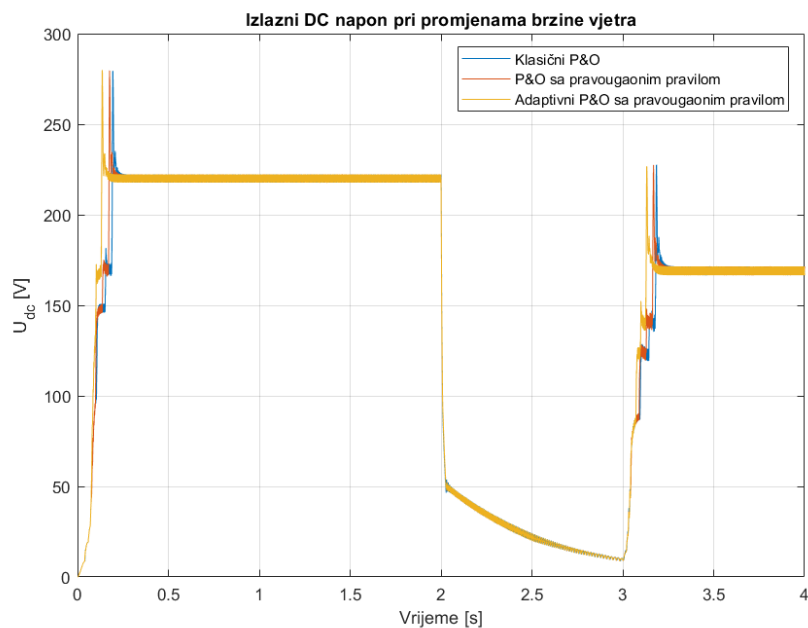
Tabela 5.6: Uporedni pregled osnovnih parametara odziva za klasični, prošireni i adaptivni P&O algoritam

Parametar	Oznaka	Klasični P&O	P&O sa pravougaonim pravilom (desna ivica)	Adaptivni P&O sa pravougaonim pravilom
Srednja vrijednost P_{dc}	Mean [kW]	1.322	1.327	1.340
Vrijeme porasta	Rise Time [s]	0.106	0.098	0.053
Energija	E [J]	3966	3981	4017

Na slici 5.2.7 prikazane su odgovarajuće promjene izlazne snage P_{dc} za tri posmatrana algoritma: klasični P&O, unaprijeđeni P&O sa pravougaonom aproksimacijom i adaptivni pristup. Jednosmjerni napon U_{dc} za iste varijante brzine vjetra prikazan je na slici 5.2.8.



Slika 5.2.7: Promjena P_{dc} za tri posmatrane MPPT metode.

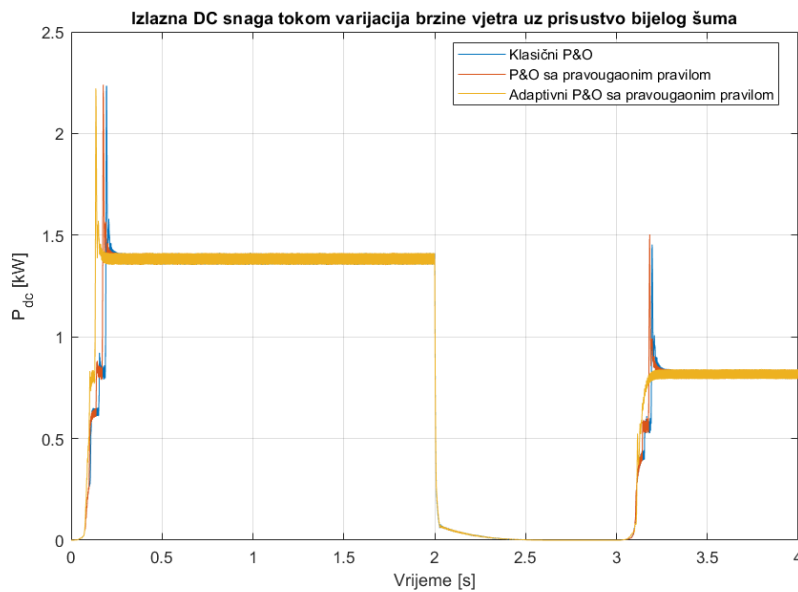


Slika 5.2.8: Promjena U_{dc} za tri posmatrane MPPT metode.

Kao što je i očekivano na osnovu podataka iz Tabele 5.6, ali i slika 5.2.7 i 5.2.8, najbrži odziv sistema postiže adaptivni algoritam u kombinaciji sa pravougaonom integracionom metodom sa desnom ivicom. Varijanta P&O sa pravougaonom metodom sa desnom ivicom ostvaruje bolje performanse od klasične, ali i dalje zaostaje u odnosu na adaptivnu pravougaonu varijantu.

Bijeli šum

Na slici 5.2.9 prikazana je promjena izlazne snage P_{dc} u prisustvu šuma. Adaptivni algoritam ponovo pokazuje najbrži odziv i najveću stabilnost, zadržavajući visoku efikasnost i u uslovima prisustva šuma, što potvrđuje njegovu robusnost i otpornost na spoljašnje poremećaje.

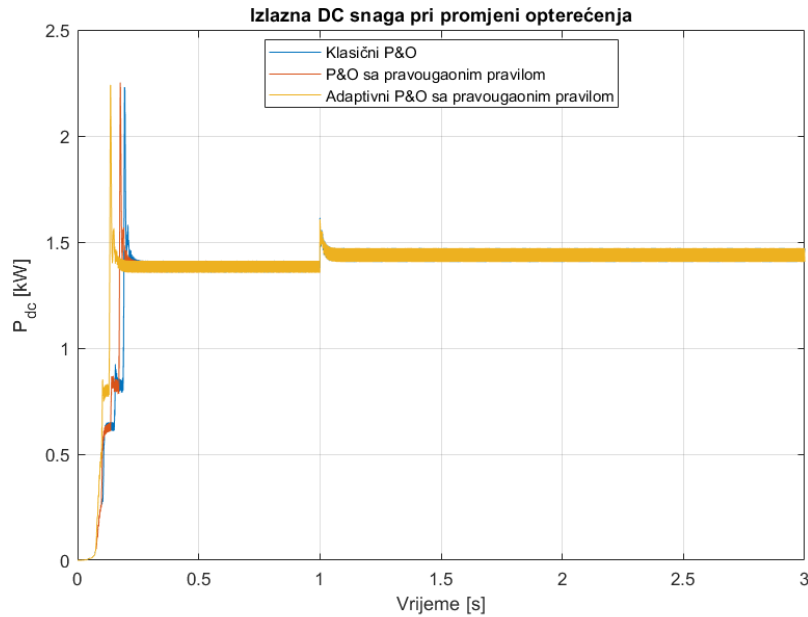


Slika 5.2.9: Izlazna DC snaga tokom varijacija brzine vjetra uz prisustvo bijelog šuma.

Na slici 5.2.9 uočava se da pri početnom porastu brzine vjetra dolazi do izraženog pika sve tri metode i kratkotrajnih oscilacija u izlaznoj snazi, nakon čega sistem brzo dostiže stacionarno stanje. Kod druge promjene, pri brzini vjetra od 10 m/s, oscilacije su znatno smanjene, a kod adaptivne metode potpuno izostaje pojava početnog pika, što potvrđuje njen najstabilniji i najefikasniji odziv među posmatranim algoritmima.

Promjena opterećenja

U ovoj simulaciji opterećenje je promijenjeno sa $R = 35 \Omega$ na $R = 30 \Omega$ nakon prve sekunde, čime se analizira odziv i stabilnost MPPT algoritama pri promjeni radnih uslova.

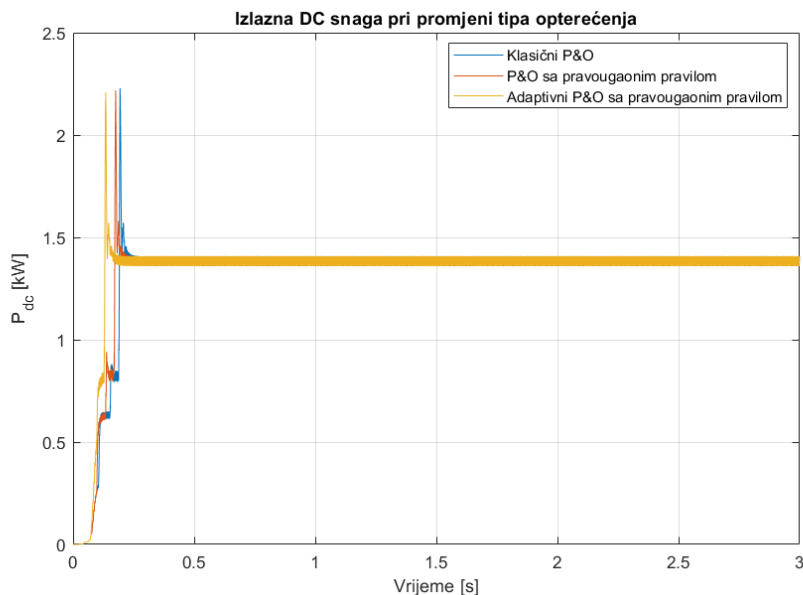


Slika 5.2.10: Odziv P_{dc} na promjenu opterećenja sa $R = 35 \Omega$ na $R = 30 \Omega$.

Sa slike 5.2.10 može se uočiti da su sva tri algoritma zadržala stabilnost pri promjeni opterećenja. Adaptivni pristup pokazuje najbrži odziv, dok metoda sa pravougaonom aproksimacijom reaguje brže od klasičnog P&O algoritma, što je posebno uočljivo u inicijalnim momentima simulacije.

Promjena tipa opterećenja

U ovoj simulaciji, umjesto čistog omskog opterećenja, primijenjeno je kombinovano RL opterećenje sa parametrima $R = 35 \Omega$ i $L = 5 \text{ mH}$. Na slici 5.2.11 prikazan je odziv izlazne snage P_{dc} . Kao i u prethodnim slučajevima, adaptivni pristup ostvaruje najbrži i najstabilniji odziv, brzo dostižući novu radnu tačku uz minimalne oscilacije. Nešto sporiju reakciju pokazuje metoda sa pravougaonom aproksimacijom, dok klasični P&O algoritam ispoljava najsporiju dinamiku u prelaznom režimu.

Slika 5.2.11: Odziv P_{dc} pri opterećenju $R = 35 \Omega$ i $L = 0.005 \text{ H}$.

5.3 Implementacija trapezoidnog pravila

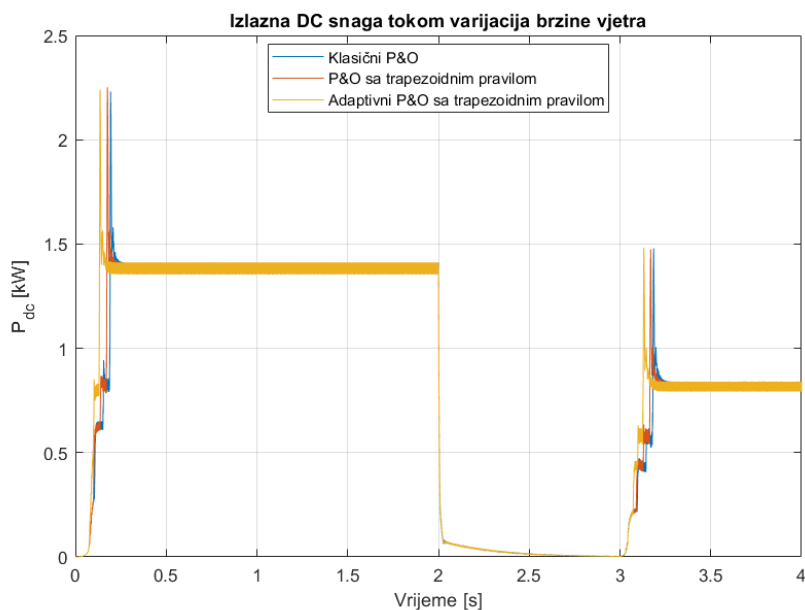
U Tabeli 5.7 prikazan je uporedni pregled osnovnih parametara odziva za klasični $P\&O$ algoritam, unaprijeđenu varijantu sa trapezoidnim pravilom integracije i adaptivni $P\&O$ algoritam zasnovan na istom principu.

Tabela 5.7: Uporedni pregled osnovnih parametara odziva za klasični, prošireni i adaptivni $P\&O$ algoritam

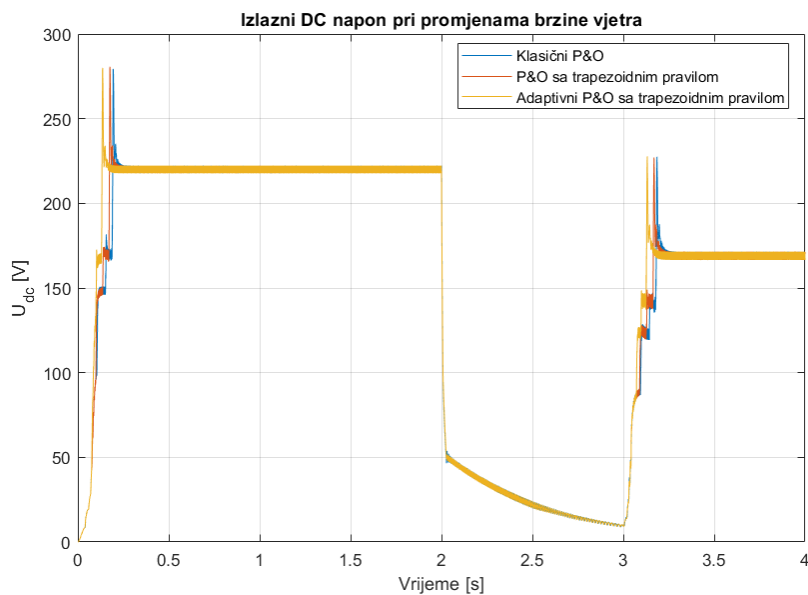
Parametar	Oznaka	Klasični P&O	P&O sa trapezoidnim pravilom	P&O sa trapezoidnim pravilom i adaptivnim korakom
Srednja vrijednost P_{dc}	Mean [kW]	1.322	1.340	1.360
Vrijeme porasta	Rise Time [s]	0.106	0.090	0.050
Energija	E [J]	3966	3990	4030

Na osnovu Tabele 5.7 može se zaključiti da unaprijeđene metode $P\&O$ algoritma, posebno varijanta sa adaptivnim korakom, pokazuju bolje performanse u poređenju sa klasičnim pristupom. Uočava se povećanje srednje vrijednosti izlazne snage, kraće vrijeme porasta, te veća ukupna energija. Ovi rezultati potvrđuju da integracija trapezoidnog pravila, uz adaptivno podešavanje koraka perturbacije, doprinosi bržem odzivu i efikasnijem praćenju tačke maksimalne snage.

Reakcija sistema na promjenu brzine vjetra prikazanu na slici 5.0.1 ogleda se u odgovarajućoj promjeni izlazne snage P_{dc} , prikazanoj na slici 5.3.1, dok slika 5.3.2 prikazuje varijacije napona izazvane istim promjenama brzine vjetra.



Slika 5.3.1: P_{dc} za za tri posmatrane MPPT metode.

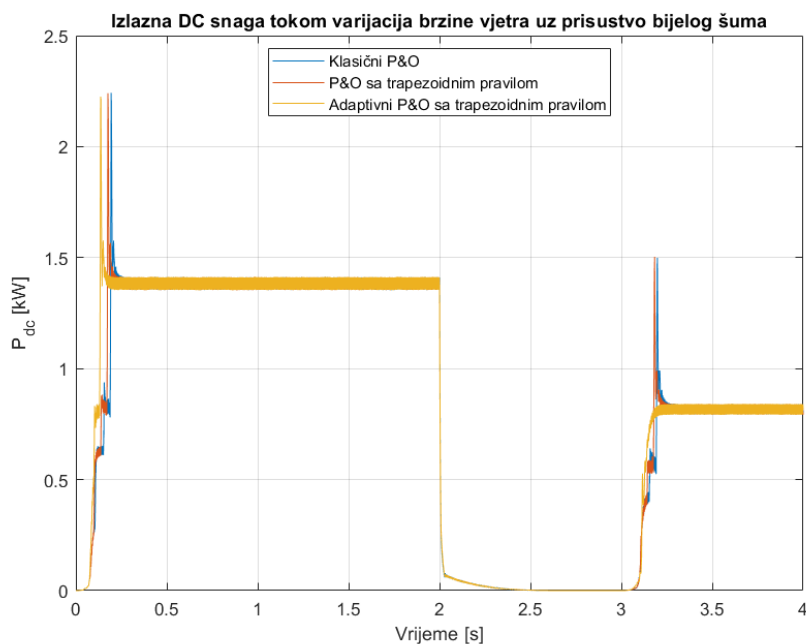


Slika 5.3.2: U_{dc} za tri posmatrane MPPT metode.

Uočava se ponovo da aptivna metoda najbrže dostiže stacionarno stanje uz najmanje oscilacije oko MPP-a, što potvrđuje njenu superiornost u pogledu brzine konvergencije i stabilnosti odziva. Metoda sa trapezoidnim pravilom pokazuje poboljšanje u odnosu na klasični P&O algoritam.

Bijeli šum

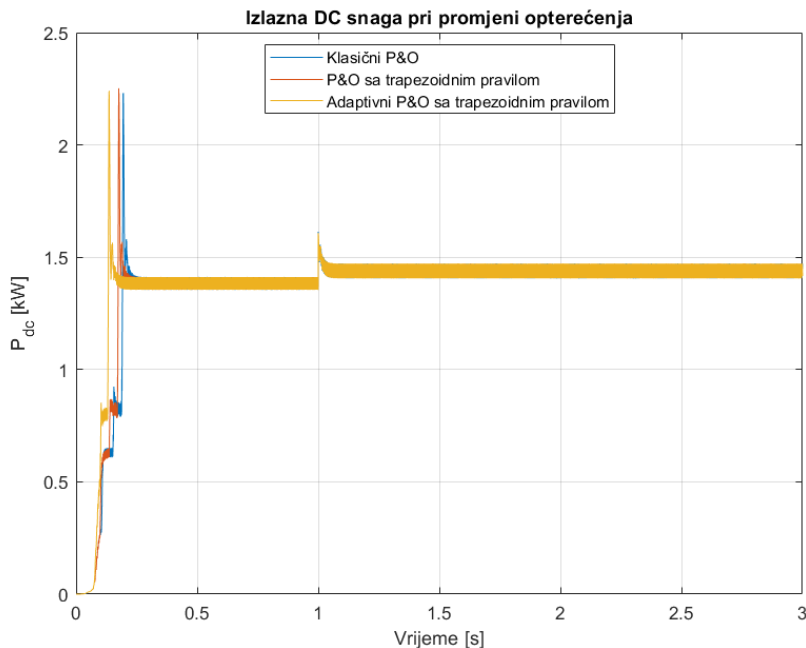
Sa slike 5.3.3 može se uočiti da sva tri algoritma zadržavaju stabilan odziv i pri prisustvu šuma, uz minimalne oscilacije izlaznih veličina. Najbolje performanse ponovo pokazuje adaptivni P&O algoritam, koji dostiže stacionarno stanje najbrže i sa najmanjim odstupanjima. Na slici se vidi da pri skoku brzine vjetra sa 0 na 10 m/s, uočen je prigušen odziv bez prebačaja, što potvrđuje da adaptivni korak smanjuje oscilacije i osjetljivost na šum, uz očuvanu konvergenciju ka MPP-u.



Slika 5.3.3: P_{dc} i U_{dc} u prisustvu šuma za tri MPPT algoritma.

Promjena opterećenja

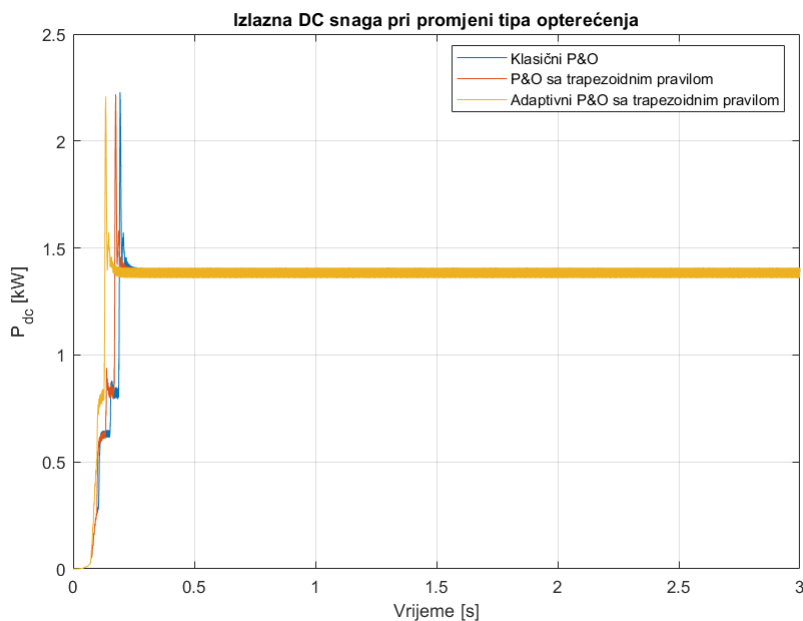
Na slici 5.3.4 prikazano je ponašanje snage prilikom smanjenja opterećenja sa $R = 35 \Omega$ na $R = 30 \Omega$, nakon prve sekunde simulacije. Sva tri posmatrana algoritma pokazuju stabilan odziv i uspješno zadržavaju rad u blizini MPP-a.



Slika 5.3.4: Odziv P_{dc} na promjenu opterećenja sa $R = 35 \Omega$ na $R = 30 \Omega$.

Promjena tipa opterećenja

Na slici 5.3.5 prikazana je jednosmjerna snaga sistema. Vidljivo je da i u uslovima promjene tipa opterećenja sva tri algoritma zadržavaju stabilan odziv, što potvrđuje njihovu robusnost i sposobnost održavanja stabilnog rada u promjenljivim uslovima. Adaptivni algoritam pokazuje najbrži odziv i smanjene oscilacije u odnosu na druga dva algoritma.



Slika 5.3.5: Odziv P_{dc} pri opterećenju $R = 35 \Omega$ i $L = 0.005$ H.

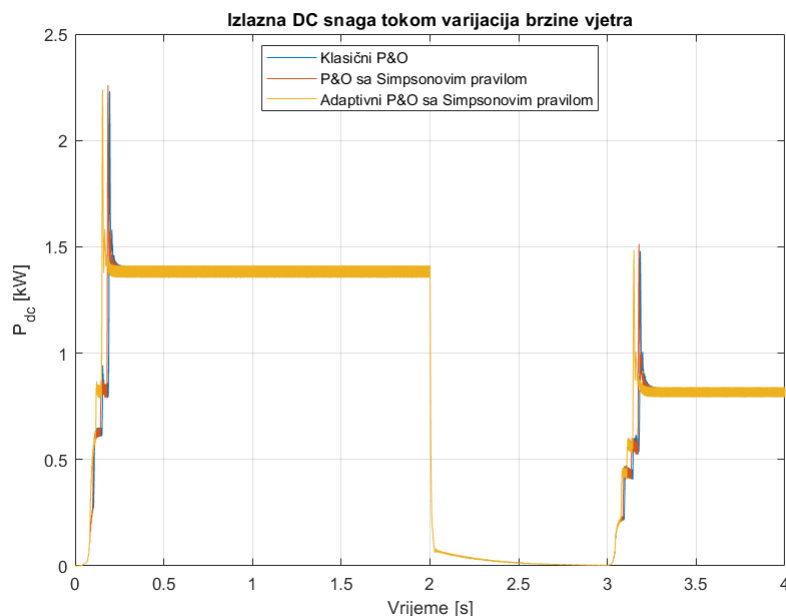
5.4 Implementacija Simpsonovog pravila

U Tabeli 5.8 prikazana je komparativna analiza osnovnih parametara odziva za klasični *P&O* algoritam, *P&O* algoritam integrisan sa Simpsonovim 3/8 pravilom, kao i za adaptivni *P&O* algoritam koji koristi isto integraciono pravilo. Iz rezultata je vidljivo da adaptivni algoritam ostvaruje najveću izlaznu snagu, najkraće vrijeme porasta, te najveću srednju vrijednost snage.

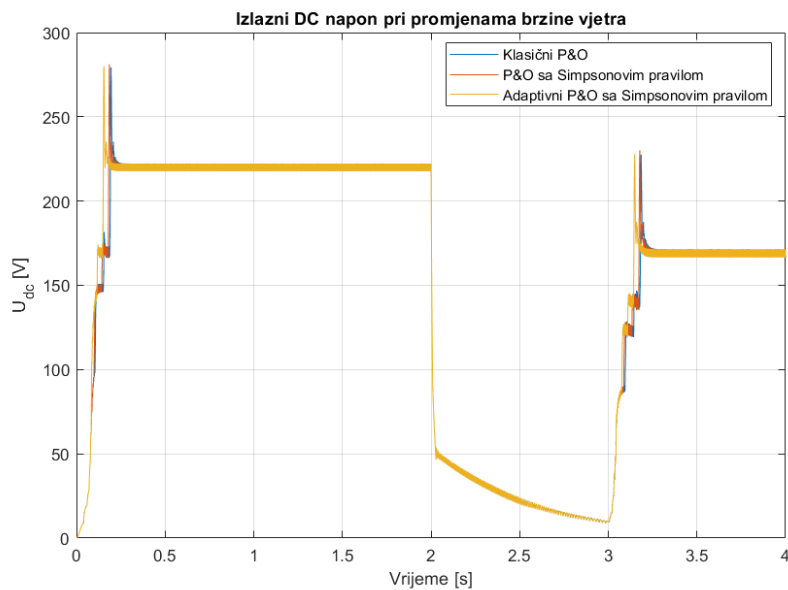
Tabela 5.8: Uporedni parametri: klasični P&O, Simpson 3/8 i adaptivni P&O

Parametar	Ozn.	Klasični	Simpson 3/8	Adaptivni korak
Srednja vrijednost P_{dc}	Mean [kW]	1.322	1.330	1.340
Vrijeme porasta	Rise time [s]	0.088	0.065	0.050
Energija	E [J]	3966	4000	4015

Promjene brzine vjetra u vremenu date su na slici 5.0.1. Kao reakcija na ove promjene, na slikama 5.4.1 i 5.4.2 prikazane su promjene izlazne snage P_{dc} i napona U_{dc} . Uočeno je da klasični *P&O* algoritam reaguje najsporije, Simpsonovo 3/8 pravilo brže dostiže stacionarno stanje, dok adaptivna varijanta dodatno skraćuje vrijeme stabilizacije i pokazuje se najefikasnijom.



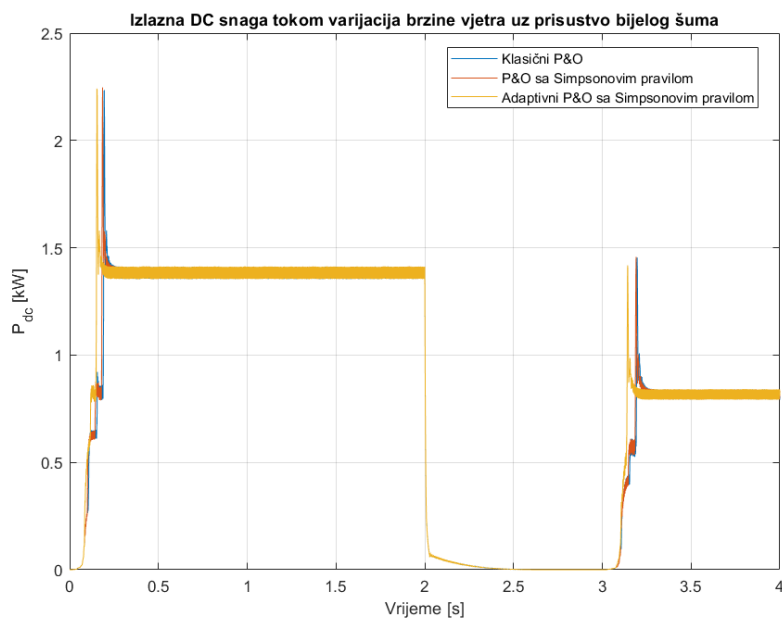
Slika 5.4.1: P_{dc} za za tri posmatrane MPPT metode.



Slika 5.4.2: U_{dc} za za tri posmatrane MPPT metode.

Bijeli šum

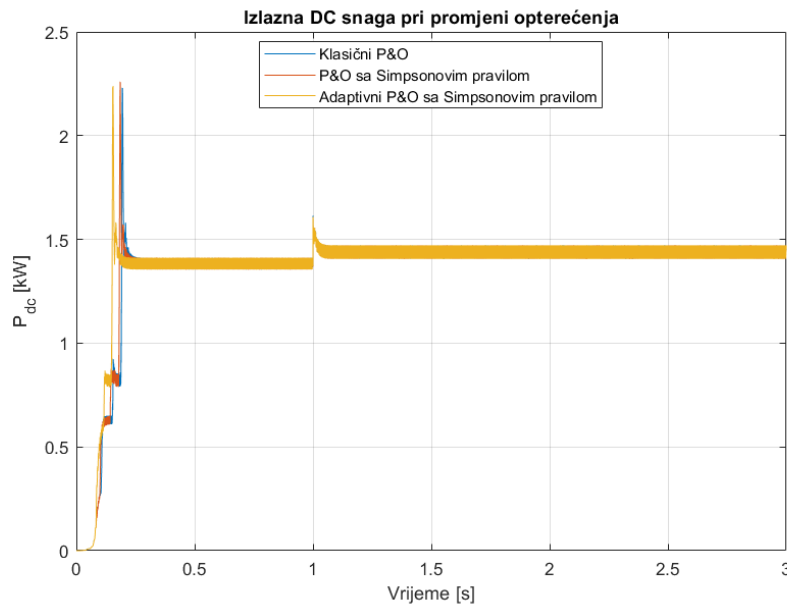
Odzivi sistema na promjene brzine vjetra sa šumom za navedene algoritme prikazani su na slici 5.4.3. Na slici je prikazano da algoritam koji koristi Simpsonovo 3/8 pravilo, kao i adaptivni pristup u kombinaciji sa istim, ostvaruju stabilan odziv sistema, kao i da brže dostižu stacionarno stanje. Time je potvrđeno da predloženo rješenje pokazuje visoku otpornost na šumove koji nastaju usljed promjena brzine vjetra i mjerne nesigurnosti.



Slika 5.4.3: P_{dc} u prisustvu šuma za tri MPPT algoritma.

Promjena opterećenja

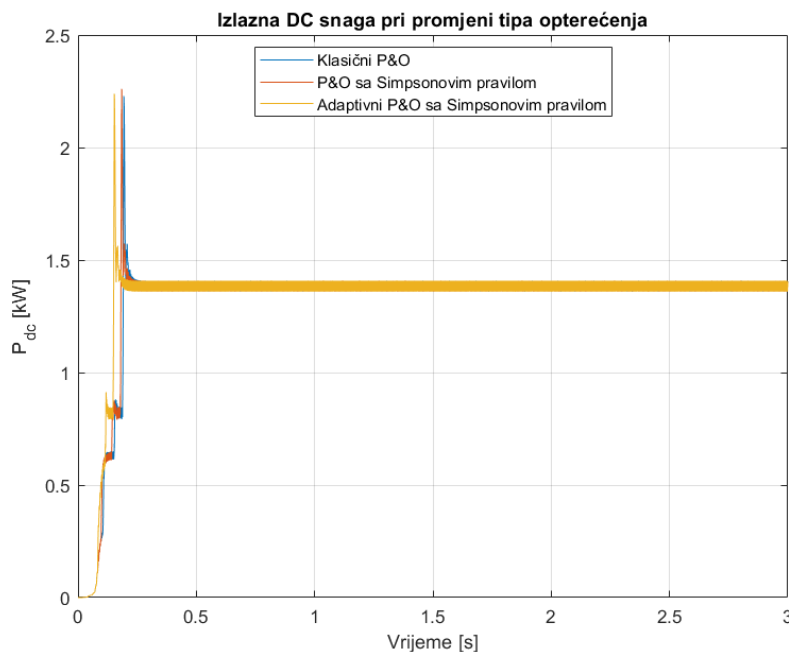
U prethodnim analizama sistem je bio opterećen čisto omskim opterećenjem od $R = 35 \Omega$, dok se u ovom segmentu razmatra prelazak na nižu vrijednost opterećenja, $R = 30 \Omega$, koji se ostvaruje nakon prve sekunde simulacije. Na slici 5.4.4 prikazan je odziv snage P_{dc} pri smanjenju opterećenja, gdje je uočen stabilan odziv i dobro dinamičko ponašanje svih algoritama, ali i povećanje izlazne snage.



Slika 5.4.4: Odziv P_{dc} na promjenu opterećenja sa $R = 35 \Omega$ na $R = 30 \Omega$.

Promjena tipa opterećenja

Nakon što je analiziran sistem sa čisto omskim opterećenjem, sprovedena je simulacija sa kombinovanim omsko-induktivnim opterećenjem, gdje su komponente definisane kao $R = 35 \Omega$ i $L = 0.005 \text{ H}$. Na slici 5.4.5 prikazan je uticaj induktivne komponente opterećenja na odziv jednosmjerne snage P_{dc} . Uočava se da algoritam zadržava stabilnost i pri promjeni tipa opterećenja.



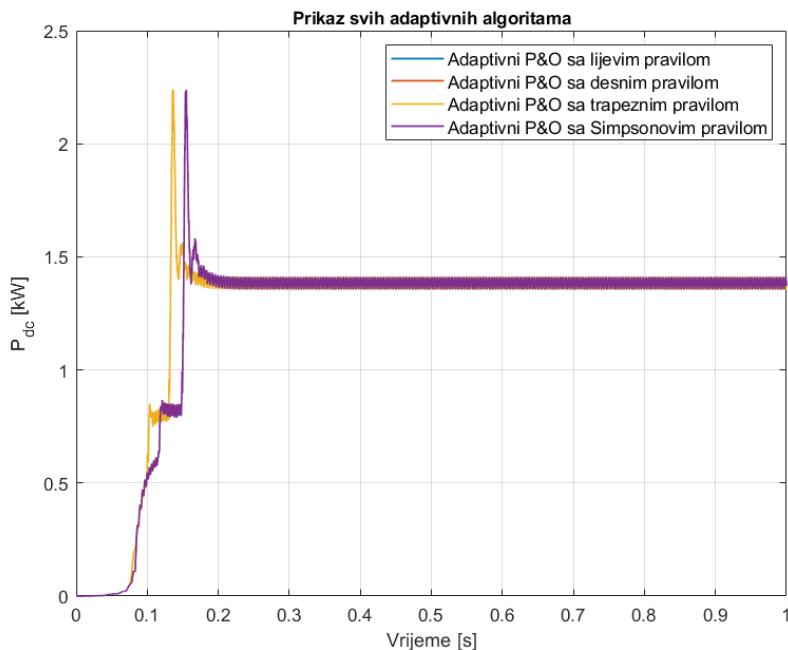
Slika 5.4.5: Odziv P_{dc} pri opterećenju $R = 35 \Omega$ i $L = 0.005 \text{ H}$.

5.5 Komparativna analiza adaptivnih MPPT algoritama

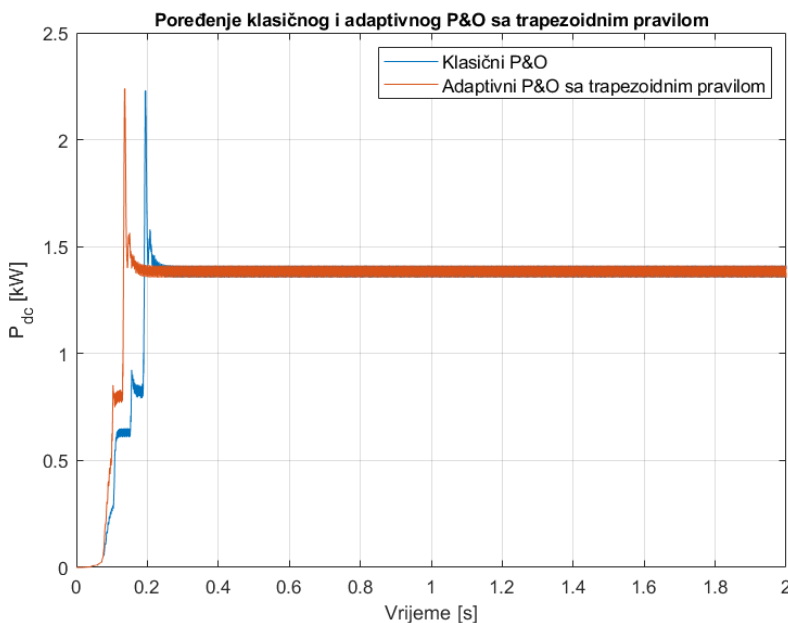
Na slici 5.5.1 prikazan je uporedni odziv izlazne snage P_{dc} dobijen primjenom adaptivnih MPPT algoritama koji koriste različite integracione metode, za slučaj kada brzina vjetera iznosi 12 m/s.

Na osnovu prikazanih rezultata može se uočiti da adaptivni algoritmi zasnovani na lijevom, desnom i Simpsonovom pravilu pokazuju gotovo identične performanse, što je u skladu s rezultatima prethodnih analiza i poređenja prikazanih u tabelama, gdje su algoritmi pokazali gotovo identične performanse. Na slici 5.5.1 adaptivni algoritmi zasnovani na lijevom i desnom pravilu nijesu jasno uočljivi, jer praktično u potpunosti prate krivu dobijenu Simpsonovom metodom, pa se njihove putanje vizuelno preklapaju. Najbolji rezultat ostvaruje adaptivni algoritam koji koristi trapezoidnu integracionu metodu, budući da obezbjeđuje najbrži odziv.

Na slici 5.5.2 prikazana je izlazna snaga P_{dc} dobijena primjenom klasičnog i adaptivnog P&O algoritma sa trapezoidnim pravilom integracije. Uočavaju se značajno bolje performanse predloženog adaptivnog algoritma u odnosu na klasični P&O, jer se na slici jasno vidi brže i stabilnije dostizanje stacionarnog stanja uz manju amplitudu oscilacija. Ovim se potvrđuje da je istraživanje sprovedeno u okviru ovog master rada uspješno ostvarilo svoj cilj, predlažući metodu koja pokazuje poboljšane performanse i veću efikasnost u odnosu na klasični pristup.



Slika 5.5.1: Prikaz svih adaptivnih algoritama.



Slika 5.5.2: Uporedni odziv klasičnog i adaptivnog P&O algoritma

Na osnovu svih sprovedenih simulacija i primijenjenih MPPT pristupa, mogu se izdvojiti sljedeći zaključci:

- **Metode numeričke integracije** korišćene u simulacijama — pravougaono, trapezoidno i Simpson 3/8 pravilo — pokazuju znatno beže dostizanje stacionarnog stanja, ali i smanjene oscilacije u odnosu na klasičnu implementaciju P&O algoritma.

- **Adaptivni P&O algoritam**, kombinovan sa bilo kojom od ovih integracionih metoda, ostvaruje dodatno poboljšanje u odnosu na prethodno navedene varijante, a samim tim i u odnosu na klasični P&O pristup.
- Sve posmatrane metode održavaju stabilan rad u uslovima promjenljive brzine vjetra, promjene opterećenja i tipa opterećenja, ali i u prisustvu bijelog šuma.
- Pri naglom padu brzine vjetra ispod $V_{\text{cut-in}}$ nema trenutnog pada napona na nulu: energija akumulirana u kondenzatoru se postepeno prazni kroz opterećenje, pa U_{dc} opada eksponencijalno.

Zaključak

U cilju razvoja savremenih vjetroenergetskih sistema, potrebno je razvijanje metoda upravljanja koje omogućavaju maksimalno iskorišćenje raspoložive snage vjetra uz stabilan i efikasan rad sistema. Upravo u cilju postizanja navedenog, tema ovog master rada usmjerena je na proučavanje i unapređenje MPPT algoritma sa ciljem poboljšanja efikasnosti konverzije snage i dinamičkog odziva sistema. Osnovni problem koji se razmatra odnosi se na ograničenja P&O algoritma, koji iako jednostavan za implementaciju, pokazuje nedostatke u pogledu tačnosti praćenja i stabilnosti pri brzim promjenama vjetra.

U okviru ovog rada razvijena je i analizirana adaptivna i numerički optimizovana P&O metoda za MPPT u vjetroenergetskom sistemu, modelovana i simulirana u *MATLAB-u* i *Simulinku*. Predloženi pristup kombinuje pravougaono, trapezoidno ili Simpsonovo numeričko pravilo za precizniju procjenu promjene snage sa adaptivnim korakom, čime se postiže bolja procjena promjene snage u poređenju sa klasičnim P&O algoritmom.

Na osnovu svih sprovedenih simulacija dobijeni su sljedeći zaključci:

- **Integracione metode** (pravougaono, trapezno, Simpson 3/8) daju bolje performanse u odnosu na klasični pristup.
- **Adaptivna varijanta P&O algoritma** u kombinaciji sa bilo kojom integracionom metodom postiže dodatno poboljšanje u odnosu na klasični P&O sa različitim integracionim metodama, a samim tim i u odnosu na klasični P&O algoritam (najkraće prelazno vrijeme, najmanja oscilatornost).
- Sve ispitivane metode zadržavaju stabilnost u scenarijima promjene brzine vjetra, tipa i nivoa opterećenja, kao i u prisustvu šuma.

Najbolje rezultate postiže kombinacija trapezoidnog integracionog pravila i adaptivnog koraka perturbacije, koja obezbjeđuje najbrži odziv, najveće vrijednosti srednje snage i ukupne energije, kao i najkraće prelazno vrijeme, što ukazuje na brže dostizanje stacionarnog radnog stanja sistema.

Iako predloženi metod pokazuje odlične performanse i visoku stabilnost u različitim radnim uslovima, istraživanje se može dalje unaprijediti u više pravaca. Jedan od njih odnosi se na analizu ponašanja algoritma u okviru složenijih topologija pretvarača, gdje bi se ispitala njegova efikasnost na različitim *boost* konfiguracijama. Dodatno, perspektivno je u predloženi pristup integrisati *observe*, modele zasnovane na mašinskom učenju, *fuzzy* kontrolere, kao i kontrolere na bazi neuralnih mreža, čime bi se postiglo još preciznije i robusnije praćenje tačke maksimalne snage u dinamičkim uslovima rada. Predloženi pravci predstavljaju

osnovu za buduća istraživanja koja bi mogla doprinijeti daljem razvoju efikasnih, inteligentnih i adaptivnih MPPT strategija u vjetroenergetskim sistemima nove generacije.

Literatura

- [1] H. H. Mousa, A.-R. Youssef, and E. E. Mohamed, “State of the art perturb and observe mppt algorithms based wind energy conversion systems: A technology review,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 126, p. 106598, 2021.
- [2] M. A. Abdullah, A. Yatim, C. W. Tan, and R. Saidur, “A review of maximum power point tracking algorithms for wind energy systems,” *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 16, no. 5, pp. 3220–3227, 2012.
- [3] K. S. M. Raza, H. Goto, H.-J. Guo, and O. Ichinokura, “A novel algorithm for fast and efficient maximum power point tracking of wind energy conversion systems,” in *2008 18th international conference on electrical machines*, pp. 1–6, IEEE, 2008.
- [4] A.-R. Youssef, A. I. Ali, M. S. Saeed, and E. E. Mohamed, “Advanced multi-sector p&o maximum power point tracking technique for wind energy conversion system,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 107, pp. 89–97, 2019.
- [5] B. Mendi, M. Pattnaik, and G. Srungavarapu, “A speed sensorless modified perturb and observe mppt scheme for stand-alone pmsg based wind turbine system,” in *2022 IEEE IAS Global Conference on Emerging Technologies (GlobConET)*, pp. 338–342, IEEE, 2022.
- [6] H. H. Mousa, A.-R. Youssef, and E. E. Mohamed, “Modified p&o mppt algorithm for optimal power extraction of five-phase pmsg based wind generation system,” *SN Applied Sciences*, vol. 1, no. 8, p. 838, 2019.
- [7] J. Pande and P. Nasikkar, “A maximum power point tracking technique for a wind power system based on the trapezoidal rule,” *Energies*, vol. 16, no. 6, p. 2799, 2023.
- [8] S. Heier, *Grid integration of wind energy: onshore and offshore conversion systems*. John Wiley & Sons, 2014.
- [9] W. Tong, *Fundamentals of wind energy*, vol. 44. WIT press Southampton, UK, 2010.
- [10] P. S. U. Earth 111 Course Materials, “Global wind explained.” <https://courses.ems.psu.edu/earth111/book/export/html/1013>, 2014. Accessed: 2025-11-18.
- [11] P. Gipe and E. Möllerström, “An overview of the history of wind turbine development: Part i—the early wind turbines until the 1960s,” *Wind Engineering*, vol. 46, no. 6, pp. 1973–2004, 2022.

- [12] Windustry, “What components comprise a wind power system?.” <https://www.windustry.com/what-components-comprise-a-wind-power-system.htm>, 2025. Accessed: 2025-11-18.
- [13] U.S. Energy Information Administration, “Types of wind turbines.” <https://www.eia.gov/energyexplained/wind/types-of-wind-turbines.php>, 2023. Accessed: 2025-10-23.
- [14] Elektrotehnički fakultet Podgorica, *Distribuirani izvori električne energije*. Vladan Durković, 2013. Predavanja iz predmeta *Distribuirani izvori električne energije*.
- [15] Turbit, “The different types of generators in a wind turbine.” <https://www.turbit.com/post/the-different-types-of-generators-in-a-wind-turbine>, 2023. Accessed: 2025-10-06.
- [16] H. O. ERKOL, “Optimized field oriented control design by multi objective optimization,” *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 10, no. 2, 2019.
- [17] S. Magnets, “Typical structure and working principle of a permanent magnet generator.” <https://www.stanfordmagnets.com/typical-structure-and-working-principle-of-permanent-magnet-alternator.html>, 2024. Accessed: 2025-10-06.
- [18] D. Grenier, L.-A. Dessaint, O. Akhrif, Y. Bonnassieux, and B. Le Pioufle, “Experimental nonlinear torque control of a permanent-magnet synchronous motor using saliency,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 44, no. 5, pp. 680–687, 2002.
- [19] F. Blaabjerg, M. Liserre, and K. Ma, “Power electronics converters for wind turbine systems,” *IEEE Transactions on industry applications*, vol. 48, no. 2, pp. 708–719, 2011.
- [20] F. Blaabjerg and K. Ma, “Future on power electronics for wind turbine systems,” *IEEE Journal of emerging and selected topics in power electronics*, vol. 1, no. 3, pp. 139–152, 2013.
- [21] M. F. Iacchetti, G. M. Foglia, A. Di Gerlando, and A. J. Forsyth, “Analytical evaluation of surface-mounted pmsg performances connected to a diode rectifier,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 30, no. 4, pp. 1367–1375, 2015.
- [22] Pedro and community contributors, “How do i calculate deformant and real power of this circuit?.” <https://electronics.stackexchange.com/questions/465984/>

- [how-do-i-calculate-deformant-and-real-power-of-this-circuit](#), 2019. Accessed: 2025-10-17.
- [23] Željko Despotović, “Trofazni mosni ispravljači: karakteristični talasni oblici.” *Prezentacija*, 2017. Master studije, predmet: Projektovanje elektroenergetskih pretvarača.
- [24] R. Radetić, *Tiristorski pretvarači*. Nauka, 2004.
- [25] V. Vujičić, *Projektovanje energetske poluprovodničkih pretvarača*. Podgorica: Elektrotehnički fakultet, Univerzitet Crne Gore, 2007. Doc. dr Vladan Vujičić.
- [26] D. S. Reddy and T. S., “Review on power electronic boost converters,” *Australian Journal of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 18, no. 3, pp. 127–137, 2021.
- [27] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, *Power electronics: converters, applications, and design*. John Wiley & Sons, 2003.
- [28] S. Ganjefar, A. A. Ghassemi, and M. M. Ahmadi, “Improving efficiency of two-type maximum power point tracking methods of tip-speed ratio and optimum torque in wind turbine system using a quantum neural network,” *Energy*, vol. 67, pp. 444–453, 2014.
- [29] D. Kumar and K. Chatterjee, “A review of conventional and advanced mppt algorithms for wind energy systems,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 55, pp. 957–970, 2016.
- [30] J. S. Thongam and M. Ouhrouche, “Mppt control methods in wind energy conversion systems,” 2011.
- [31] W. Ibrahim, M. Mohamed, and R. Ismail, “Direct power control method of maximum power point tracking (mppt) algorithm for pico-hydrokinetic river energy conversion system,” in *InECCE2019: Proceedings of the 5th International Conference on Electrical, Control & Computer Engineering, Kuantan, Pahang, Malaysia, 29th July 2019*, pp. 691–703, Springer, 2020.
- [32] B. Bendib, H. Belmili, and F. Krim, “A survey of the most used mppt methods: Conventional and advanced algorithms applied for photovoltaic systems,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 45, pp. 637–648, 2015.
- [33] L. Gidwani and R. Kumar, “A fuzzy logic based power electronic system for wind energy conversion scheme,” in *International Conference on Computational Intelligence and Multimedia Applications (ICCIMA 2007)*, vol. 1, pp. 395–399, IEEE, 2007.
- [34] H. Aissaoui, A. Ougli, and B. Tidhaf, “Neural networks and fuzzy logic based maximum power point tracking control for wind energy conversion system,” *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, vol. 6, no. 2, pp. 586–592, 2021.

- [35] S. M. R. Kazmi, H. Goto, H.-J. Guo, and O. Ichinokura, “Review and critical analysis of the research papers published till date on maximum power point tracking in wind energy conversion system,” in *2010 IEEE energy conversion congress and exposition*, pp. 4075–4082, IEEE, 2010.
- [36] C. D. Systems, “Pulse width modulation characteristics and the effects of frequency and duty cycle.” <https://resources.pcb.cadence.com/blog/2020-pulse-width-modulation-characteristics-and-the-effects-of-frequency-and-duty-cycle/>, 2020. Accessed: 2025-10-23.
- [37] Same Sky Devices, “Pulse width modulation (pwm): How it works and why it’s essential in electronics.” <https://www.sameskydevices.com/blog/pulse-width-modulation-pwm-how-it-works-and-why-its-essential-in-electronics?srsltid=AfmBOooejK1UEsVzxORRngFYa0eCGdcK9Xocyg9hnB3uYYjACmEMu3e0>, 2025. Accessed: 2025-10-23.
- [38] A. Sriram, S. Nagaraja Rao, *et al.*, “Wind energy conversion system using perturb & observe-based maximum power point approach interfaced with t-type three-level inverter connected to grid,” *Clean Energy*, pp. 534–549, 2022.
- [39] X. Liu and L. A. Lopes, “An improved perturbation and observation maximum power point tracking algorithm for pv arrays,” in *2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No. 04CH37551)*, vol. 3, pp. 2005–2010, IEEE, 2004.
- [40] U. of Alberta Engineering Courses, “Numerical integration: Rectangle method.” <https://engcourses-uofa.ca/books/numericalanalysis/numerical-integration/rectangle-method/>, 2025. Accessed: 2025-10-17.
- [41] GeeksforGeeks, “Trapezoidal rule.” <https://www.geeksforgeeks.org/maths/trapezoidal-rule/>, 2025. Accessed: 2025-10-17.
- [42] GeeksforGeeks, “Difference between simpson’s 1/3 rule and 3/8 rule.” <https://www.geeksforgeeks.org/maths/difference-between-simpson-s-1-3-rule-and-3-8-rule/>, 2025. Accessed: 2025-10-17.
- [43] S. Širca and M. Horvat, “Numerical integration and differentiation,” in *Computational Methods in Physics: Compendium for Students*, pp. 113–172, Springer, 2025.

Izjava o istovjetnosti štampane i elektronske verzije master rada

Ime i prezime autora Ivana Krstajić
Broj indeksa/upisa 8/23
Studijski program Automatika i
industrijska elektrotehnika
Naslov rada „Predlog numerički
unaprijeđene metode poremećaja i
posmatranja za maksimizaciju snage u
vjetroenergetskim sistemima “
Mentor Prof. dr Martin Čalasan

Potpisani/a Ivana Krstajić

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, 21.11.2025. godine

Potpis magistranda

Krstajić Ivana

IZJAVA O KORIŠĆENJU

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

Predlog numerički unaprijeđene metode poremećaja i posmatranja za maksimizaciju snage u vjetroenergetskim sistemima

koji je moje autorsko djelo.

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

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

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

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

U Podgorici, 21.11.2025.godine

Potpis magistranda

Kostajic Ivana

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

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