

Slavica Stojiljković¹, Vladimir M. Šiljkut¹

Prikaz upravljačkih sistema vetrogeneratora

¹Akcionarsko društvo „Elektroprivreda Srbije”, Beograd, Republika Srbija*



Prikaz

Ključne poruke

- Različiti načini regulacije snage vetroturbine
- Obezbeđenje pouzdanog i efikasnog rada vetrogeneratora pri promenljivoj snazi vetra
- Turbina na vetar je inherentno nelinearna i varijabilna sa vremenom

Kratak sadržaj

U ovom radu dat je prikaz najnovije stručne literature u domenu upravljačkih sistema vetrogeneratora. Detaljnije su prikazane i objašnjene neke tehnike korišćene u upravljanju vetroturbinama sa horizontalnom osovinom na pojedinačnom nivou turbine, kod kojih se upravljanje primenjuje na nagib lopatice turbine i snagu generatora. Turbinski sistem je modelovan kao fleksibilna struktura koja radi u prisustvu turbulentnih smetnji vetra. Dat je pregled različitih faza rada turbine i strategije upravljanja koje se koriste za maksimiziranje pretvaranja energije pri brzinama ispod nominalnih, ali je naglasak na upravljanju ublaživanja aerodinamičkih opterećenja kada turbina radi na maksimalnoj snazi. Nakon pregleda osnovnih ciljeva upravljanja turbinom rad pruža pregled uobičajenih osnovnih pristupa linearnog upravljanja, a zatim se opisuju naprednije arhitekture upravljanja i daje odgovor na pitanje zašto one mogu pružiti više prednosti.

Ključne reči

Brzina vetra, linearizovani model vetroturbine, regulacija snage vetroturbine, stepen iskorišćenja vetroturbine, vetrogenerator

Primljeno: 22. oktobar 2024. Recenzirano: 18. januar 2025.

Izmenjeno: 10. februar 2025. Odobreno: 21. februar 2025.

* Korespondirajući autor, +381-64-83-33-277, slavica.stojiljkovic@eps.rs

1. UVOD

Vetar je besplatan i neiscrpan energetska resurs. Koristi se od davnina. Do industrijske revolucije vetar je uz drvo bio najveći izvor energije. Koristio se za pokretanje brodova, mlinova i pumpi za vodu. Proizvodnja električne energije iz vetra počela se razvijati tridesetih godina prošlog veka. Tada je počela izgradnja prvih vetroagregata za konverziju energije vetra u električnu energiju. Razvojem velikih hidro, termo i nuklearnih elektrana vetroagregati, ekonomski i tehnički nekonkurentni ovim kapacitetima, pali su u zaborav. Međutim, iscrpivost rezervi fosilnih goriva i ekološki problemi izazvani njihovom eksploatacijom doveli su početkom devedesetih godina prošlog veka do velike potražnje za vetroagregatima. Energija vetra je tako postala istaknuti izvor alternativne energije. Ovu energiju koriste vetroturbine, tako što lopatice njihovih rotora prikupljaju kinetičku energiju vetra kako bi proizvele rotacionu energiju turbine i električnu energiju iz generatora. Danas su vetroturbine jedan od najpopularnijih uređaja za proizvodnju čiste i obnovljive električne energije i doprinose održivosti elektroenergetskog sistema. Stoga je optimalno upravljanje radom vetrogeneratora od izuzetne važnosti i predstavlja strategiju koja povećava efikasnost, a samim tim smanjuje svedene troškove energije vetroparkova, [1]. Efektivno upravljanje vetroturbinama je ključno za regulisanje proizvodnje energije, a strategije upravljanja vetroparkovima su usmerene na maksimiziranje proizvodnje energije prema potrebama. Ovaj rad ima za cilj da izloži neke osnovne principe upravljanja vetrogeneratorima i da da prikaz aktuelnih tendencija u ovoj oblasti, kroz kratak pregled najnovije stručne i naučne literature.

Vetroenergetika je mlada grana energetike koja se intenzivno razvija u pogledu tehnološkog razvoja vetroagregata, ali i u pogledu njihove izgrađene instalisane snage. Prema podacima istraživačkog centra „Embera“, vetar i solar su u 2023. godini proizveli preko jedne petine električne energije u Evropskoj uniji (22%). Tako su, prvi put u toku jedne godine, prestigli gas (20%) i ostali iznad uglja (16%), [2]. U [3] može da se pročita o najvećem vetrogeneratoru koji je počeo sa radom u Južnom kineskom moru. Što se tiče aktuelnih dešavanja u vetroenergetici u Srbiji, u [4] može da se vidi izgled vetrogeneratora koji su instalirani u vetroparku Kovačica.

Kada je reč o problematici upravljanja vetrogeneratorima, u [5], u Poglavlju 10 – Vetrogeneratori, opisani su različiti načini regulacije snaga vetrogeneratora, kao i njihove prednosti i mane. Upravljanje vetrogeneratorima se postiže podešavanjem parametara vetroturbine, kao što su ugao okretanja (zakretanja, engl. *yaw*) vetroturbine u odnosu na pravac vetra, uglovi nagiba njenih lopatica ili obrtni moment generatora, kako bi se manipuliralo izbrazdanom vazdušnom strujom (vrtlogom) iza turbine. Naime, zbog uticaja rotacije svojih lopatica, vetroturbina blokira deo vetra koji bi inače prošao kroz

prostor njene izgradnje, pa je u području iza turbine brzina vetra smanjena, a turbulencija povećana. Ovo područje sa smanjenom brzinom vetra može značajno uticati na performanse turbine koje se nalaze nizvodno u vetroparku, jer manje vetra znači manju proizvodnju energije. Kontrola ovih vrtloga ili manipulacija njima može pomoći da se smanji njihov negativan uticaj na druge turbine u vetroparku, čime se optimizuje ukupna proizvodnja energije.

U literaturi su identifikovane dve suštinski različite metode upravljanja vetrogeneratorima: upravljanje izbrazdanom strujom (*wake steering*) i mešanje izbrazdane struje (*wake mixing*). Rad [1] se fokusira na upoređivanje veličina od interesa za turbine, a koje se koriste u ovim metodama, na jednostavnom primeru vetroparka sa dve turbine. Prateći članak [6] fokusira se na veličine brazdanja koje su interesantne za sistem sa jednom turbinom. U [1] i u [6] koristi se isti skup simulacija vetroparka zasnovanog na visokopouzdanim simulacijama velikih vrtloga (*Large-eddy Simulations*, LES) u kombinaciji sa OpenFAST modelima turbina (*Fatigue, Aerodynamics, Structure and Turbulence* / zamor, aerodinamika, struktura i turbulencija). Najpre su izvršene prethodne simulacije kako bi se uskladili uslovi vetra izmereni LiDAR-ima² u of-šor vetroparku uz istočnu obalu SAD. Ova merenja ukazuju na opšte uslove vetra koji pokazuju znatno veći vertikalni gradijent vetra i njegovo skretanje nego bilo koja od LES studija koje su urađene o strategijama upravljanja vetrogeneratorima koje su trenutno dostupne u literaturi. Prethodne simulacije se koriste za procenu efikasnosti metoda upravljanja. U LES simulacijama, skretanje vetra dovodi do vrlo izobličenih brazdanja vazdušnih struja iza turbine, što ima značajan uticaj na strategiju upravljanja povećanjem snage vetrogeneratora. Pored osnovnog kontrolera, implementirane su četiri različite strategije upravljanja, od kojih svaka koristi ili kontrolu nagiba lopatica ili kontrolu ugla zakretanja turbine u odnosu na pravac vetra, na uzvodnoj turbini jednostavnog, dvoturbinskog vetroparka. Pretpostavljajući da je pravac vetra poznat i konstantan tokom vremena, simulacije pokazuju da je upravljanje brazdanjem generalno superiorna strategija upravljanja vetrogeneratorima, uzimajući u obzir kako proizvodnju energije u vetroparku tako i ekvivalentna aerodinamička, mehanička opterećenja turbine, koja uzrokuju oštećenja (*Damage Equivalent Loads*, DEL) kada je prisutno značajno skretanje vetra. Ovaj rezultat je dosledan za različite brzine i pravce vetra. Sa druge strane, za slične uslove vetra sa manjim skretanjem, utvrđeno je da mešanje brazdanja daje najveću proizvodnju energije, iako na račun obično većih mehaničkih opterećenja. Ovo može imati negativne posledice po dugoročni rad vetroturbine. To dalje vodi do zaključka u [1] da efekat skretanja vetra, koji do sada obično nije uziman u obzir, ne može biti zanemaren prilikom određivanja optimalne strategije upravljanja vetroparkom.

² LiDAR (*Light Detection and Ranging*) je tehnologija koja koristi svetlosne zrake (obično laserske) za merenje udaljenosti do objekata i prikupljanje podataka o njihovoj poziciji, obliku i

drugim karakteristikama. U kontekstu vetroparkova, LiDARi se koriste za precizno merenje uslova vetra, poput njegove brzine i pravca, kako bi se optimizovale performanse vetroturbina.

U [7] istražena je strategija upravljanja uglom zakretanja vetroturbine, u vetroelektrani sa dve turbine, snage od po 3,5 MW, sa ciljem optimizacije upravljanja energijom. Vetroelektrana je opremljena višeravanskim sistemom LiDAR, postavljenim na gondoli, za merenje brzine vetra. Koristeći analitički model i integrišući podatke sa sistema LiDAR i SCADA, procenjuju se efekti brazdanja vazdušnih struja i izlazna snaga. Rezultati [7] pokazuju povećanje snage od 2% na nivou jednogodišnjeg posmatranja i procene, postignuto optimalnim upravljanjem uglom zakretanja. Vetar je pretežno bio jugozapadni, upravan na osu turbine. Optimalno zakretanje i dobitak energije zavise od uslova vetra, s tim da veći intenzitet turbulencije i brzina vetra dovode do smanjenih dobitaka. Dobitak energije prati zvonastu krivu u zavisnosti od upadnog ugla vetra, dostižući maksimum od 1,7% pri optimalnom uglu zakretanja od 17 stepeni i pri upadnom uglu vetra od 12 stepeni. U [7] preporučuju se dalja istraživanja kako bi se precizirale procene i poboljšale performanse vetroelektrana kroz optimizovane strategije upravljanja zakretanjem turbina, što na kraju doprinosi unapređenju proizvodnje održive energije.

Vetroturbine sa više rotornih sistema (*Multi-rotor System*, MRS) mogu pružiti konkurentnu alternativu klasičnim velikim vetroturbanama, zbog njihovih značajnih prednosti u smanjenju kapitalnih troškova i troškova transporta i radova, [8]. Glavni izazovi MRS vetroturbina uključuju složenost noseće konstrukcije i matematičko modelovanje aerodinamičke interakcije između rotora i mehanizma upravljanja uglom zakretanja vetroturbin. U [8] korišćen je softver MATLAB 2018b/Simulink® za modelovanje i simulaciju vetroturbin sa dva rotora (*Twin-Rotor Wind Turbine*, TRWT), a za verifikaciju izlaznih podataka modela korišćena je vetroturbina NREL 5 MW. Kao ulaz za svaki rotor korišćeni su različiti nasumični signali brzina i pravca vetra, kako bi se generisala različita potisna opterećenja, izazivajući momente uvijanja na glavnom stubu. Sistem upravljanja uglom zakretanja prilagođen je tako da obezbedi da turbina bude stalno okrenuta prema vetru kako bi se maksimizirala izlazna snaga. Kao pokretač mehanizma korišćen je jednosmerni motor. Cilj je bio postizanje kompromisa između poravnanja rotora sa smerom vetra i smanjenja obrtnog momenta indukovanog na glavnom stubu. U [8] upoređen je odgovor linearnog i nelinearnog regulatora na aktuatorskom sistemu za zakretanje turbine, pri različitim brzinama i pravcima vetra. Izabrano je upravljanje kliznim režimom (*Sliding Mode Control*, SMC), pošto je on bio pogodan za nelinearnost sistema, a njegove performanse su pokazale brži odziv u poređenju sa PID kontrolerom³ (*Proportional-Integral-Derivative Controller*), sa vremenom smirivanja od 0,17 sekundi i veoma malim prekoračenjem u oscilacijama. Ovaj kontroler je koristio funkciju prenosa motora da bi se stvorila klizna površina. Dinamički

odgovori kontrolisanog ugla su prikazani i diskutovani u [8]. Kontroler je pokazao obećavajuće rezultate, sa pogodnim odzivom i niskim signalima šuma.

Upravljanje periodičnim izbrazdanim vazdušnim strujama (vrtlozima) koje nastaju na prednjim (uzvodnim) vetroturbanama ostvaruje se i pomoću strategija podešavanja položaja lopatica, kao što je *Helix* pristup, kako bi se poboljšalo mešanje izbrazdanih strujanja i samim tim povećala proizvodnja energije na vetroturbanama koje se nalaze direktno u njihovom vrtlogu, [9]. Kao rezultat toga, ciklično opterećenje se ne generiše samo na lopaticama turbine na kojoj se vrši podešavanje već i na vetroturbini iz nje, koja je u vrtlogu. Dok je opterećenje na prednjoj turbini rezultat podešavanja položaja lopatica, potrebnog za mešanje izbrazdanih struja, opterećenje na zadnjoj (nizvodnoj) turbini nastaje iz interakcije sa periodičnim vrtlogom i uzrokuje samo oštećenja zbog zamora materijala. Studija [9] predlaže dve nove šeme upravljanja pojedinačnim podešavanjem lopatica kojima se može tretirati jedno ovakvo periodično opterećenje na zadnjoj turbini: smanjenjem ili pojačanjem. Prva metoda poboljšava životni vek zadnje turbine, dok druga dodatno poboljšava mešanje izbrazdanih struja nizvodno, iskorišćavanjem već prisutnog periodičnog sadržaja u vrtlogu. Obe metode su potvrđene u simulacijama visokog nivoa tačnosti na primeru vetroparka sa tri turbine. Rezultati u [9] pokazuju da je smanjenje oštećenja usled zamora materijala od oko 10% zabeleženo u slučaju smanjenja opterećenja, dok je dodatno povećanje snage od 6% postignuto na trećoj turbini primenom strategije pojačanja. Oba cilja se lako mogu promeniti u zavisnosti od zahteva operatora vetroparka i željenog kompromisa između opterećenja i prikupljanja energije vetra.

U radu [10] predložen je regulator za vetroturbine zasnovan na podešavanju nagiba lopatica i procenjen je uticaj primenjenih strategija smanjenja snage na aerodinamičko opterećenje i raspoloživost snage nizvodno, u eksperimentalnom okruženju. Razmatrajući strategiju smanjenja snage zasnovanu na zakonu kontrole obrtnog momenta generatora, istražena su dva pristupa upravljanju vetroparkom: balans potiska i kompenzacija snage. Nalazi iz [10] ukazuju na prednosti balansiranja aerodinamičkih opterećenja u okviru vetrofarmi, sprečavajući zasićenje turbina i poboljšavajući raspoloživost snage za 3%–5% u poređenju s uniformnom isporukom snage. Takođe, uključivanje kompenzacije snage rezultuje višim gornjim ograničenjem u praćenju snage vetroparka, što ukazuje na poboljšanje od 22% u raspoloživosti snage vetroparka. Istraživanje opisano u [10] naglašava potencijalne prednosti inovativnih strategija regulacije turbina u cilju optimizacije performansi vetroparka i unapređenja ukupne energetske fleksibilnosti.

³ Proporcionalno-integralno-diferencijalni kontroler (PID kontroler ili tročlani kontroler) predstavlja mehanizam upravljačke petlje zasnovan na povratnim informacijama koji se najčešće koristi za upravljanje mašinama i procesima koji zahtevaju kontinuirano upravljanje i automatsko prilagođavanje. Obično se koristi u industrijskim upravljačkim sistemima i

raznim drugim aplikacijama gde je neophodno stalno upravljanje bez ljudske intervencije. PID kontroler automatski upoređuje željenu ciljnu vrednost (*setpoint*, SP) sa stvarnom vrednošću sistema (promenljiva procesa – *process variable*, PV). Razlika između ove dve vrednosti naziva se vrednost greške i označava kao $e(t)$.

U [11] koriste se prednosti nelinearnog modela implementiranih u FAST kodu, koji predstavlja sveobuhvatan aeroelastični simulator sposoban da predvidi i ekstremna i zamorna opterećenja vetrogeneratora sa dve i tri lopatice horizontalne ose. U radu [12] proučava se linearizovana dinamika mape nagiba lopatica do otklona vrha tornja u prednjem pravcu vetroturbine sa horizontalnom osom.

Za male vetroturbine postoji nekoliko metoda za upravljanje lopaticama kako bi se postigla željena brzina rotacije i izlazna snaga. Ove metode uključuju pasivni zastoj, aktivni zastoj i kontrolu ugla nagiba lopatica, [13]. Upravljanje nagibom postavlja ugaonu poziciju lopatica tako da budu okrenute ka vetru kako bi se postigao unapred definisan odnos između brzine turbine ili njene snage i brzine vetra. Obično se koriste konvencionalni proporcionalno-integralni (PI) kontroleri za postavljanje ugaone pozicije lopatica rotora ili ugla nagiba. Ipak, kvalitet regulacije brzine ili snage može značajno varirati. Rad [13] uvodi regulator brzine rotora za prototip male vetroturbine sa kontrolom nagiba zasnovan na konceptima fazi-logike (fuzzy). Osnovni principi fazi-sistema potrebni za implementaciju ovog tipa regulatora detaljno su predstavljeni u [13] kako bi se nadoknadio nedostatak takvog materijala u tehničkoj literaturi. Baza znanja fazi-regulatora brzine sastoji se od *Takagi-Sugeno-Kang* (TSK) fazi-pravila zaključivanja koja implementiraju dodeljeni PI regulator za bilo koji željeni interval brzina vetra. Svaki interval brzine vetra definisan je fazi-skupom. Simulacija eksperimenata pokazuje da TSK fazi-PI regulator brzine može da nadmaši konvencionalni PI regulator u brzini i tačnosti odgovora, stabilnosti i robustnosti u celokupnom opsegu rada prototipa vetroturbine.

U radu [14] upoznajemo se sa metodom modeliranja turbine kao sistema krutih tela sa fleksibilnim vezama. U radu [15] analiziran je Kejnov (*Kane*) metod za numeričku simulaciju kinematike modela turbine. U radu [16] data su aerodinamička opterećenja koja su izračunata u programu *AeroDyn*. U radu [17] dat je pregled različitih faza rada turbine i strategija upravljanja koje se koriste za maksimiziranje pretvaranja energije pri brzinama vetra ispod nominalnih, ali naglasak je na upravljanju da bi se ublažila opterećenja kada turbina radi na maksimalnoj snazi. U radu [18] dat je pregled prostornih regiona rada vetrogeneratora, a fokus je na metodama za regulaciju brzine i ublažavanju opterećenja konstrukcije.

Rad [19] predlaže model za upravljanje vetroturbinom koja je povezana sa mrežom pomoću sinhronog generatora sa trajnim magnetima (*Permanent Magnet Synchronous Generator*, PMSG). S obzirom na to da se brzina vetra stalno menja, rotorski sistem mora biti u mogućnosti da se samopodesi u zavisnosti od brzine i pravca vetra kako bi se obezbedio efikasan rad turbine. PMSG je odabran jer je magnetni fluks uvek dostupan zahvaljujući sistemu trajnih magneta koji su pričvršćeni za površinu rotora. Generator proizvodi energiju pri niskoj brzini rotacije, ali sa visokom efikasnošću. Ovo su ključne prednosti korišćenja PMSG za vetroturbinu. Za dizajn regulatora korišćen je MATLAB – Simulink softver, a rezultati istraživanja opisanog u [19] pokazali su da ovaj sistem upravljanja zadovoljava zahteve

kvaliteta energije prilikom povezivanja sa mrežom i optimizuje proces pretvaranja energije turbinskog vetra.

Emulator vetroturbine je vredan alat koji omogućava fizičku simulaciju ponašanja vetroturbine u realnom vremenu koristeći specijalizovanu eksperimentalnu testnu opremu, pružajući kontrolisano okruženje za istraživanje i razvoj, [20]. Jedna od značajnih prednosti korišćenja ovog alata je njegova sposobnost da testira algoritme upravljanja dizajnirane za dobijanje maksimalne snage vetroturbine. Rad [20] zapravo predstavlja nastavak prethodnog rada, [21], na razvoju emulatora male vetroturbine sa promenljivom brzinom, zasnovane na generatoru sa trajnim magnetima za samostalnu primenu. U [20] predstavljena su unapređenja postignuta na ovom emulatoru. Ova poboljšanja omogućavaju procenu strategije upravljanja praćenjem tačke maksimalne snage (*Maximum Power Point Tracking*, MPPT), dizajnirane za optimizaciju snage koja se dobija iz vetroturbine.

Rad [22] predstavlja detaljnu studiju strategija upravljanja vetroturbinama koje kombinuju tehnike MPPT, koristeći upravljanje brzinom obrtanja radi optimizacije proizvodnje energije. Dostizanje maksimalne izlazne snage iz vetroturbina zahteva efikasne metode koje se prilagođavaju promenljivim uslovima vetra. Najpre, [22] daje pregled konvencionalnih MPPT metoda, ističući njihove prednosti, ali i ograničenja u radu sa dinamičnim profilima vetra. Zatim [22] uvodi integrisani pristup, u kom se upravljanje brzinom kombinuje sa MPPT, sa ciljem poboljšanja vremena odziva i efikasnosti prikupljanja energije iz vetra. Rezultati simulacije pokazuju da dodavanje u model upravljanja brzinom značajno poboljšava performanse vetroturbine. To rezultira povećanjem izlazne snage kroz brže vreme odziva, smanjujući ga sa 65 sekundi na samo 2 sekunde. Ovaj integrisani pristup, MPPT – upravljanje brzinom, pokazuje svoj značaj u optimizaciji snage vetroturbina, posebno u promenljivim uslovima vetra.

U [23] dat je pregled ciljeva i dizajna linearnih kontrolera koji koriste determinističke pristupe primenjene na upravljanje nagibom lopatica i obrtnim momentom. Takođe, demonstrirano je kako bilo koja povratna arhitektura može biti unapređena povratnim kompenzatorom smetnji, koristeći merenja vetra koja mogu biti dostupna pomoću novih tehnologija koje se očekuju u budućnosti.

U Poglavlju 2 ovog rada dat je kratak prikaz istorijskog razvoja i različitih vrsta i tipova vetrogeneratora, a u njegovim potpoglavljima i prikaz načina regulacije snage vetroturbina. U Poglavlju 3 nešto detaljnije je dat pregled koncepata upravljanja vetrogeneratorima, sa posebnim osvrtom na upravljanje u pojedinačnim regionima (zonama) rada vetroturbina sa promenljivom brzinom obrtanja. Na kraju rada dati su generalni zaključci.

2. VETROTURBINE

Postoje različite konstrukcije vetrogeneratora. Cilj je da se postigne što veći stepen iskorišćenja i stabilan rad u što širem opsegu brzina vetra. Razvoj vetrogeneratora je još uvek intenzivan.

Postoje vetrogeneratori sa:

- vertikalnom osovinom;
- horizontalnom osovinom.

Kod vetroturbina sa vertikalnom osovinom vetar struji normalno na osu rotacije, pa se one ne moraju usmeravati prema smeru duvanja vetra. Kod njih se generator postavlja u podnožje turbine, te nisu potrebni jaki tornjevi. Vertikalno vratilo ima Darijusova turbina, Slika 1 (a). Ime je dobila po inženjeru Džordžu Darijusu (George Darrius, patent iz 1931. godine). Darijusova turbina se obično gradi sa dva ili tri luka. Vetroturbine sa vertikalnom osovinom generalno imaju nizak stepen iskorišćenja, pa se iz tog razloga danas praktično ne koriste za vetroagregate većih snaga.

Vetroturbine sa horizontalnom osovinom mogu biti postavljene uz i niz vetar. Vetroturbine postavljene niz vetar se same prilagođavaju smeru vetra. Nedostatak im je što lopatice pri rotaciji prolaze kroz zavetrinu stuba, čime se stvaraju mehaničke vibracije i buka. Osim toga stub stvara i turbulencije što smanjuje efikasnost vetroturbine, pa se ovaj koncept ne koristi za veće snage.



(a)



(b)

Slika. 1. (a) Darijusova (Darrius) turbina;
(b) trokraka vetroturbina sa horizontalnom osovinom, [3]

Moderne vetroturbine se grade sa horizontalnom osovinom koja ima sistem za zakretanje osovine u horizontalnoj ravni za traženje promene smeru vetra. Mogu imati različit broj lopatica, ali se za veće snage najčešće koriste tri lopatice jer daju najveći stepen iskorišćenja, Slika 1 (b). Prečnik rotora (radnog kola ili elise) ovih turbina zavisi od snage i kreće se od 30 m za snagu od 300 kW do 180 m za snagu od 7 MW. Kako se ova tehnologija konstantno razvija, danas postoje i vetroturbine većih kapaciteta.

Vetroturbina se postavlja na vertikalni stub koji, u zavisnosti od prečnika rotora turbine, može biti visok i preko 150 m. Stub se najčešće gradi kao čelični konusni, a ređe kao čelično-rešetkasti.

Trenutno najveći vetrogenerator na svetu, MySE 16-260, koju je razvila kompanija Ming Jang, sredinom jula 2023. godine počeo je sa radom u Južnom kineskom moru, [3]. Prema kompanijskom saopštenju, prečnik rotora ovog džinovskog vetrogeneratora iznosi 260 m, dok su lopatice dugačke 123 m. Visok je 152 m, ali pored veličine, impresivna je i snaga vetrogeneratora koja iznosi 16 MW.

Pretvaranje kinetičke energije vetra u obrtno kretanje turbine vrši se zahvaljujući aerodinamičkom profilu lopatica vetroturbine. Kao kod avionskih krila, lopatica turbine ima aerodinamički profil, te vazduh sa zadnje strane lopatice struji brže od vazduha sa prednje strane, gledano u smeru vetra. Usled razlike u brzinama strujanja vazduha javlja se razlika u pritiscima sa zadnje i prednje strane lopatice turbine, što uzrokuje uzgonsku silu, čija projekcija na ravan rotacije generiše obrtni moment. Pored ove sile, deluje i sila direktnog pritiska vetra na lopaticu, ali je njen uticaj na obrtni moment mnogo manji.

Energetski posmatrano, vetroturbina oduzima energiju vetru koja je srazmerna razlici kinetičkih energija vetra pre i nakon prolaska kroz turbinu. Snaga kojom se vrši pretvaranje energije vetra, odnosno mehanička snaga P_{meh} koju razvija vetroturbina na svom vratilu može da se predstavi sledećom jednačinom:

$$P_{meh} = \frac{1}{2} C_p \rho \pi R^2 v^3, \quad (1)$$

gde su:

v – brzina vetra na ulazu u vetroturbinu;

R – poluprečnik vetroturbine;

ρ – gustina vazduha;

C_p – koeficijent iskorišćenja snage vetroturbine, koji se definiše kao odnos mehaničke snage vetroturbine prema odgovarajućoj snazi vetra P_v na ulazu u vetroturbinu, ($C_p = \frac{P_{meh}}{P_v}$).

Maksimalna teorijska snaga koju vetroturbina može razviti definisana je Becovim (Betz) zakonom. Bec je pokazao da se maksimalna snaga idealizovane vetroturbine postiže ako je odnos brzina vetra pre (v) i nakon (v')

prolaska kroz turbine, $\frac{v'}{v} = \frac{1}{3}$. Pri ovom odnosu brzina

vetra stepen iskorišćenja snage ima maksimalnu vrednost, $C_{pmax} = 0,5926$. Teorijski maksimum stepena iskorišćenja energije vetra u vetroturbini je 59%. Za standardnu gustinu

vazduha $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$, izraz (1) daje:

$$P_0 = 0,369 A v^3$$

gde je $A = R^2 \pi$ površina kruga koji pri obrtanju naprave lopatice, a R je poluprečnik tog kruga.

Pri nekoj brzini vetra, promenom brzine obrtanja vetroturbinе ω_{tur} menja se upadni ugao relativne brzine vetra, te se menja sila uzgona i stepen iskorišćenja snage, C_p . Obično se C_p daje u funkciji parametra TSR (*Tip Speed Ratio*) odnosno λ :

$$\lambda = \frac{\omega_{tur} R}{v}, \quad (3)$$

koji predstavlja odnos brzine vrha lopatice i brzine vetra, v . Dakle, $C_p = f(\lambda, \beta)$, gde je β – nagib lopatica vetrogeneratora, u ($^\circ$), u odnosu na upadni ugao pravca duvanja vetra.

Pri promeni brzine vetra potrebno je menjati brzinu obrtanja rotora vetrogeneratora da bi se postigao režim sa najvećim stepenom iskorišćenja. Zato savremeni vetroagregati velikih snaga rade sa promenljivom brzinom obrtanja. Kada vetrogenerator pokreće turbina kojoj se brzina obrtanja ne može menjati, ta brzina se bira tako da stepen iskorišćenja bude najveći pri dominantnoj brzini vetra na mestu instalisanja vetroagregata.

S obzirom na (3), turbine manjeg prečnika imaće veću optimalnu brzinu obrtanja od turbina većeg prečnika pri istoj brzini vetra. Zato vetroturbinе vetroagregata manje snage imaju veću brzinu obrtanja.

Postoje različiti načini regulacije snage vetroturbinе, kako je opisano u nastavku.

2.1 Regulacija konstrukcijom lopatica

Ovo je pasivni sistem regulacije snage vetroturbinе. Postiže se konstrukcijom lopatica vetroturbinе. Lopatice su konstruisane tako da pri brzinama vetra bliskim nominalnoj brzini v_n napadni ugao vetra, α , na određenom delu lopatica postane relativno veliki ($15^\circ \div 20^\circ$). Pri tom napadnom uglu struje vazduha se odvajaju od profila lopatice i započinje turbulencija, te sila uzgona slabi. Ovo se naziva stol-efekat (*stall*). Sa porastom brzine vetra, stol-efekat postaje izraženiji i zahvata sve veći deo lopatice. Turbulencija smanjuje uzgonsku silu i snagu vetroturbinе. Mana ovog načina regulacije snage je ta što on nije u potpunosti kontrolabilan, a karakteriše ga opadanje snage turbine ispod nominalne vrednosti nakon pojave stol-efekta. Stol-efekat se može pojaviti i pri nižim brzinama vetra od nominalne ukoliko su lopatice vetroturbinе zaprljane ili oštećene. Prednosti ovog načina kontrole su jednostavnost i niska cena. Koristi se uglavnom kod vetroturbinа sa konstantnom brzinom obrtanja, [5].

2.2 Regulacija zakretanjem lopatica

Koristi se za vetroagregate veće snage sa promenljivom brzinom obrtanja. Lopatice vetroturbinе zakreću se

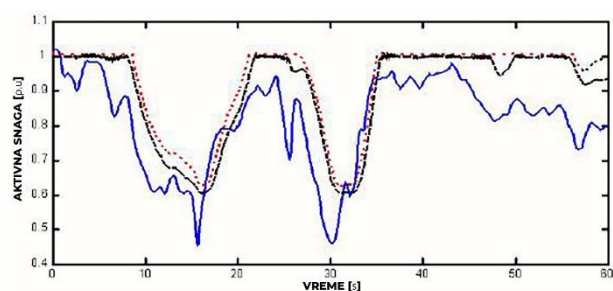
pomoću hidrauličnog servo-motora. Opseg promene ugla lopatice (*pitch angle*, β) je 0° do 35° . Zakretanjem lopatica menja se napadni ugao vetra, te se menja uzgonska sila odnosno snaga vetroturbinе. Zakretanje lopatica vetroturbinе je analogno zakretanju lopatica obrtnog kola kod Kaplanovih hidroturbinа. Zakretanjem lopatica pri pokretanju vetroturbinе podešava se napadni ugao vetra tako da se postigne najveći polazni moment. Prednost ovakve regulacije je kontrolabilnost, a mane su složen mehanizam i visoka cena, [5].

2.3 Regulacija zakretanjem i konstrukcijom lopatica

Ovo je kombinacija prethodna dva načina regulacije, pa se naziva *Combi Stall* regulacija. Kod ovog sistema opseg promene ugla zakretanja je mali. Cilj je da se eliminišu negativni efekti stol-regulacije. Ovaj i prethodni sistem regulacije štite vetroagregat u slučajevima neplaniranog isključenja sa mreže ili kratkog spoja u mreži pri jakom vetru. U takvim slučajevima dolazi do rasterećenja vetrogeneratora i povećanja brzine obrtanja vetroagregata. Usled velikih centrifugalnih sila može doći do havarije. Pri brzinama vetra većim od maksimalne radne brzine vetroagregat se iz sigurnosnih razloga zaustavlja i održava u zakočenom stanju pomoću hidraulične disk kočnice koja je smeštena na visokobrzinskoj (generatorskoj) osovini, [5].

Osnovni problem pri pretvaranju energije vetra u električnu je obezbeđenje pouzdanog i efikasnog rada vetrogeneratora pri promenljivoj snazi vetra. Efikasan rad vetroagregata zahteva prilagođavanje vetroturbinе brzini vetra tako da se ostvari maksimalan stepen iskorišćenja uz zadovoljenje električnih i mehaničkih ograničenja. Pri velikim varijacijama brzine vetra, javlja se problem nestabilnog rada vetroagregata, ali i električnih veličina koje on generiše (naponski flikeri – propadi napona, nivo harmonika i slično). Zato se u vetroagregatima ne mogu koristiti standardni sinhroni generatori i standardni sistemi upravljanja i regulacije kakvi se primenjuju u hidroelektranama i termoelektranama gde je moguće planirati snagu agregata.

Poređenje karakteristika generisanja aktivne snage različitih tipova vetrogeneratora, u uslovima stohastičke promene brzine vetra, ilustrovano je na Slici 2. Na njoj su dati rezultati simulacije rada vetroturbinе koja pogoni različite vetrogeneratore.



Slika 2. Karakteristike generisanja snage vetroagregata sa raznim tipovima vetrogeneratora, [5]

Grafici na Slici 2 odnose se na sledeće slučajeve:

1. vetrogenerator je indukcion generator sa kratkospojenim rotorom direktno priključen na mrežu; turbina je regulisana konstrukcijom lopatica (*stall* regulacija);
2. vetrogenerator je dvostrano napajani indukcion generator sa promenljivom brzinom obrtanja; turbina je regulisana zakretanjem lopatica (*pitch* regulacija);
3. vetrogenerator je sinhroni sporohodni generator sa permanentnim magnetima; turbina je regulisana zakretanjem lopatica.

3. PREGLED KONCEPATA UPRAVLJANJA KOD VETROGENERATORA

U ovom odeljku ćemo razmotriti model strukturalne dinamike turbine i posmatračemo generator kao jednostavni statički (jedinični) pojačavač koji trenutno prevodi komandovani obrtni moment u mehanički obrtni moment. Turbina na vetar je inherentno nelinearna i varijabilna sa vremenom. Aerodinamička torzija i momenti savijanja zavise nelinearno od brzine vetra, ugla nagiba i savijanja tornja i lopatica. Odgovarajući rezultati su postignuti korišćenjem linearnih, vremenski invarijantnih modela turbine. Mnogi od ovih modela su analitički razvijeni linearizujući model turbine u određenoj radnoj tački koristeći teoriju momenta elementa lopatice. Za determinisanje aerodinamičkih opterećenja koristi se metod pretpostavljenih modova savijanja modela turbina, [12]. Drugi metod je modelovanje turbine kao sistema krutih tela sa fleksibilnim vezama, [14] – pristup koji može da koristi teoriju momenta elementa lopatice (*Blade Element Momentum*, BEM) za aerodinamička opterećenja.

U [16] usvojene su prednosti nelinearnih modela implementiranih u FAST kodu, [11], koji koristi Kejnov (Kane) metod, [15], da numerički simulira kinematiku modela turbine zasnovanu na pretpostavljenim modovima i BEM teoriju sa aerodinamičkim opterećenjem izračunatim u programu *AeroDyn*. FAST simulira turbinu u konstantnim (a po mogućstvu – neravnomernim) uslovima vetra u potrazi za rešenjem koje se menja samo kao funkcija pozicije rotora i zatim određuje linearizovani model izračunavanjem koeficijenata koji definišu poremećaje konfiguracije sistema u odnosu na skup određenih ulaznih poremećaja.

Linearizacijom se dobija kinematički model sistema u obliku:

$$M(Q)\ddot{\Delta q} + C(Q)\dot{\Delta q} + K(Q)\Delta q = F(Q)\Delta u + F_d(Q)\Delta v_d \quad (4)$$

gde su koeficijenti M , C , K zavisni od radne tačke i mogu biti parametrizovani pozicijom azimuta rotora, Q . Vektor konfiguracionih promenljivih Δq predstavlja devijaciju turbine od nominalne radne tačke (pri svakoj poziciji rotora). Najsloženiji model turbine koji se ovde koristi uključuje jedinstven stepen slobode generatora (*Degree of Freedom*, DOF), fleksibilni mod pogona i mod lepršanja za

svaku od tri lopatice. FAST podržava do 24 stepena slobode kretanja za trolopatičnu turbinu. Vektor Δu predstavlja devijacije nagiba lopatice i/ili torziju generatora od njihovih nominalnih nivoa, a Δv_d predstavlja devijacije u čvoru brzine vetra (koja se pojavljuje jedinstveno po površini rotora). Sistem se može predstaviti u formi prostora stanja:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A(Q)x + B(Q)u + B_d(Q)v_d \\ \dot{y} &= C(Q)x + D(Q)u + D_d(Q)v_d \end{aligned} \quad (5)$$

gde $x = [\Delta q^T \Delta \dot{q}^T]^T$ predstavlja devijaciju u poziciji ili brzini konfiguracionih promenljivih. Izlazni vektor y može sadržati svaku vrednost koja se može odrediti iz stanja sistema. Beležimo poremećaje brzine visokobrzinskog vratila i lopatice i momenta zakrivljenja svake lopatice. Budući da sve promenljive predstavljaju poremećaje daleko od njihovih nominalnih vrednosti, odbacujemo Δ radi pojednostavljenja. Koeficijenti matrice u (4) – (5), za bilo koju određenu radnu tačku u konstantnim (ali ne i neophodno uniformnim) uslovima vetra, dobijeni su numeričkom linearizacijom koju sprovodi FAST.

U [23] procenjen je model turbine na primeru turbine od 600 kW, sa tri lopatice, uz vetar, promenljive brzine, horizontalno osne CART3 turbine (*Control Advanced Research Turbine* – istraživačka turbina sa naprednim sistemom upravljanja) koja se nalazi u nacionalnoj laboratoriji za obnovljivu energiju (NREAL). Turbina CART3 ima procenjenju brzinu rotora od 41,7 o/min, dok se frekvencija niskobrzinske osovine (povezane sa rotorom) stepenasto uvećava uz pomoć multiplikatora tako da visokobrzinska osovina i generator rade na nominalnoj brzini od 1800 o/min.

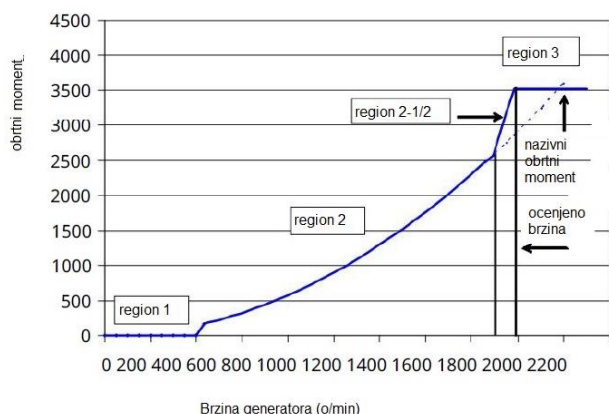
Promene u linearizaciji modela turbine zavise od radne tačke (ukupna brzina vetra, brzina rotora i lopatica, nagiba) s obzirom na to da turbine rade u različitim regionima (delovima pogonskog dijagrama).

Za tipične vetroturbine postoje različiti regioni rada, ilustrovani na Slici 3. U regionu 2, ispod nominalne brzine vetra, cilj je maksimiziranje snage turbine. U regionu 3, iznad nominalne brzine vetra, cilj je da se snaga turbine održi na konstantnom nivou, da se ograniči opterećenje turbine i snaga generatora. Ostali regioni rada uključuju pokretanje (region 1) i gašenje mašine, [17]. Ovi se regioni mogu generalno opisati kako sledi u nastavku, [18].

U regionu 1 brzina vetra je premala da garantuje pokretanje turbine. Lopatice su postavljene tako da imaju pun zahvat (stepen ugla generiše najmanji aerodinamički moment). Kada u jednom trenutku brzina vetra bude dovoljno velika za pokretanje mašine (preko 5 m/s za CART3), lopatice su nagnute pod uglom navedenim za region 2. Pri nominalnom nagibu aerodinamički uzgon je usmeren tako da proizvede obrtni moment i ubrza rotor. Kada generator dostigne brzinu od 430 o/min za CART3, generator obrtnog momenta je uključen i turbina počinje obrtanje generatora, a on proizvodnju električne energije.

U regionu 2 brzina vetra i obrtni moment generatora su ispod nominalnih vrednosti. Nagib lopatica, β , održava se konstantnim na optimalnoj vrednosti, β^* , koja daje maksimalni aerodinamički obrtni moment. Za bilo koju

brzinu vetra postoji odgovarajuća brzina rotora pri kojoj se generiše najveći mogući aerodinamički obrtni moment, τ_a . Pokazuje se da, kada je stepen lopatica održavan optimalnim, postoji konstantna vrednost ili λ (tj. TSR), (3), koji maksimizira aerodinamički obrtni moment τ_a . Obično su funkcija TSR i nagib deo aerodinamičkih sila dobijenih od ukupne snage vetra kada je ona maksimalna, $\lambda = \lambda^*$. Dakle, cilj upravljanja u regionu 2 jeste dostići obrtni moment pri kome brzina vrha lopatice prati brzinu vetra, v , na način da se postigne optimalna vrednost TSR, λ^* .



Slika 3. Radni regioni turbina sa promenljivom brzinom, [17]. Obrtni moment turbine u funkciji brzine generatora

U regionu 2-1/2 brzine vetra se približavaju onima koje obezbeđuju nominalnu snagu. Ovo je prelazni region gde se komandni obrtni moment obično računa kao slična funkcija brzine generatora tako da je nominalni obrtni moment dostignut pre nominalne brzine generatora.

Brzina obrtanja generatora je često jedina mera i za obrtni moment i za upravljanje nagibom lopatica vetrogeneratora. Nadzor nad upravljanjem može imati dodatne mere, uključujući i merenje brzine vetra uz pomoć anemometra. Naprednije turbine mogu takođe uključivati individualna merenja momenta savijanja lopatice, [23].

U regionu 3 brzina vetra je 11,7 m/s ili preko te vrednosti (za CART3), one koja će generisati nominalnu snagu. Obrtni moment generatora se održava konstantnim, na nominalnoj vrednosti, i upravljanje nagibom lopatice se koristi da ograniči aerodinamičku snagu regulisanjem brzine turbine na nominalnoj vrednosti brzine. Napredne kontrole su takođe dizajnirane tako da smanje opterećenje na lopatice i toranj.

Koristeći skup opisa različitih stanja iz FAST, istražujemo kako se linearizovani modeli menjaju u zavisnosti od radne tačke uz procenu frekventnog odziva sistema na različitim tačkama. Prvo, koristimo FAST da

linearizujemo turbinu u svakoj od 36 pozicija rotora, dok turbina radi na prosečnoj brzini od 41,7 o/min i pri konstantnom nagibu lopatice od 12,6°, ali sa različitim profilima vetra. Dva skupa linearizacije su dobijena u vremenski konstantnim uslovima vetra u liniji sa kabinom i imajući prosečnu brzinu od 18 m/s preko ravni rotora. Međutim, za jedan skup linearizacije uslovi vetra su uniformni, a za drugi skup vetar vertikalno struji, tako da se horizontalna brzina vetra na dnu rotora razlikuje od one na vrhu za 40%.

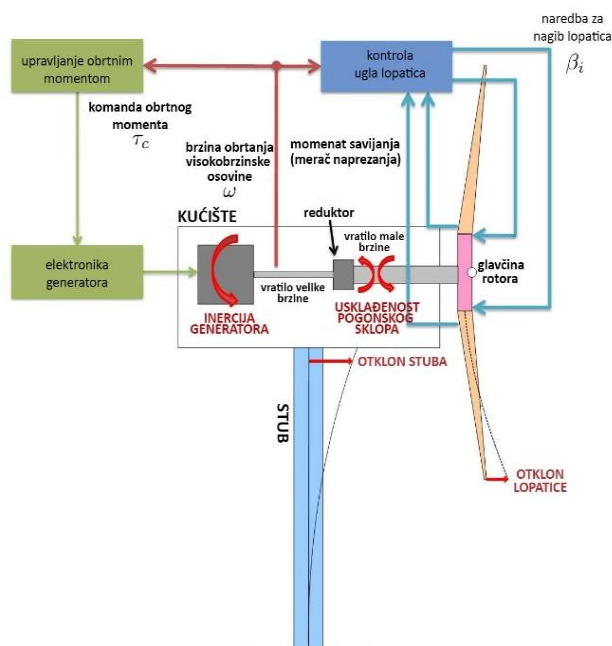
Sve češće moderne turbine imaju individualne aktuatorske sisteme za podešavanje nagiba na svakoj lopatici, čime se povećava broj kontrolnih ulaza dostupnih dizajneru sistema u odnosu na tradicionalno upravljanje obrtnim momentom. Komande za nagib individualnih aktuatora prikazane su šematski na Slici 4. Pored toga, senzori za silu/moment ili akcelometri mogu se instalirati na svakoj lopatici pojedinačno, kao i na gondoli i stubu. Ovi dodatni ulazi i izlazi, u kombinaciji sa činjenicom da strukturalni modovi turbine utiču na pogonski sklop i akciju nagiba putem obrtnog momenta i momenta savijanja (otklona), čine vetroturbinu jednim inherentnim sistemom sa više ulaza i više izlaza (MIMO). Zapravo, kako veličina turbine raste i razmatranja težine/troškova motivu prilagođavanje većoj fleksibilnosti, postaje sve važnije uzeti u obzir međusobno povezivanje različitih strukturalnih modova i koristiti sofisticiranije metode upravljanja kako bi se nosili sa ovim efektima. Dalje, povećana fleksibilnost struktura turbine stavlja akcenat na zadatak smanjenja štetnih opterećenja u korenovima lopatica i na bazi stuba, [23].

Napredne metode upravljanja za rešavanje ovih problema istraživane su već više od decenije, ali očigledno se većina komercijalnih sistema još uvek implementira koristeći više jednostrukih kontrola sa jednim ulazom i jednim izlazom (SISO⁴). Na primer, Slika 4 prikazuje dva različita kontrolera za petlje upravljanja generatorom i upravljanja nagibom; ako su komande za nagib identične i zasnovane samo na brzini visokobrzinske osovine, onda ova konfiguracija sadrži dva SISO kontrolera koji rade nezavisno jedan od drugog, kao što je prikazano na Slici 5(a).

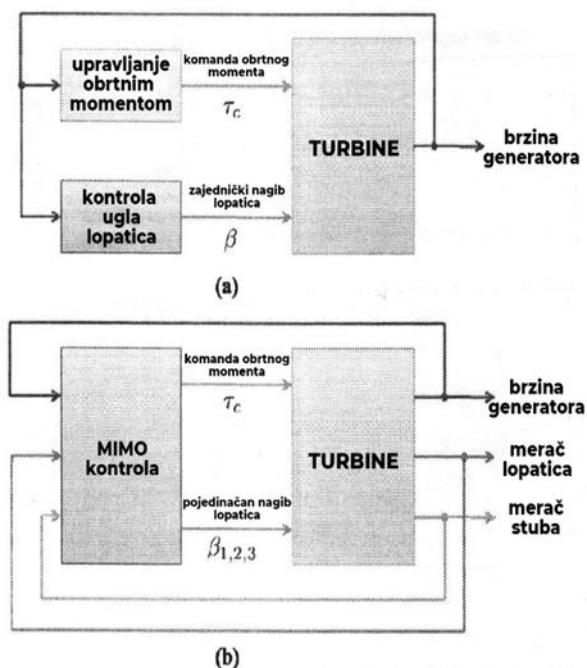
Suprotno tome, napredni pristupi upravljanja odlikuju se time što se nesigurnost sistema eksplicitno uzima u obzir pri njegovom projektovanju, dizajnira se kontroler sa više ulaza i izlaza (MIMO⁵) koji uzima u obzir međusobno povezivanje između petlji, Slika 5(b), ili se koristi robusna MIMO metoda. Takođe, postoje i metode koje koriste adaptivne ili nelinearne tehnike, [23].

⁴ SISO (Single-Input Single-Output) je tradicionalni dizajn sistema upravljanja kod koga svaka upravljačka petlja radi nezavisno. Na primer, može postojati zaseban regulator za nagib lopatica vetroturbine i za generator. Međutim, ovo može biti neefikasno kada petlje međusobno utiču jedna na drugu (promene u jednoj petlji mogu uticati na drugu), što dovodi do suboptimalnog učinka.

⁵ MIMO (Multi-Input Multi-Output) sistemi mogu istovremeno upravljati većim brojem ulaza i izlaza. Ovo je od ključnog značaja za sisteme kao što su vetroturbine, gde su različite promenljive, kao što su nagib lopatica i obrtni moment, međusobno povezane. MIMO regulator je dizajniran da upravlja ovim interakcijama i poboljša ukupni učinak sistema.



Slika 4. Uobičajena upravljačka petlja turbine, [23]



Slika 5. Regulacija vetroturbina, [23]

(a) Tradicionalno upravljanje turbinom, zasnovano na povratnoj informaciji o brzini generatora. Obrtni moment i ugao lopatica (nagib) tretiraju se kao odvojene SISO petlje;

(b) MIMO kontrola je obeležje kontrolera u [23]; kontroler ima pristup pojedinačnim merenjima ugla lopatice i povećanju brzine generatora

Problemi koje rešavaju napredne metode upravljanja su nesigurnost sistema (uslovi vetra su nepredvidivi), povezanost između kontrolnih petlji, robustnost (čini sistem otpornijim na smetnje i promene parametara).

Evolucija sistema upravljanja vetroturbinama opisana je u [23], pokazujući prelaz sa tradicionalnih, nezavisnih SISO petlji na sofisticiranije, integrisane MIMO sisteme. Ovi napredni pristupi – koji uključuju adaptivne, nelinearne i robusne strategije – nude potencijal za mnogo bolju efikasnost i robustnost, posebno u suočavanju sa stvarnim nesigurnostima kao što su varijacije u vetru. Takođe, integracija merenja vetra u upravljački sistem može značajno poboljšati njegovu sposobnost da proaktivno odgovori na smetnje, čineći vetro turbine pouzdanijim i efikasnijim.

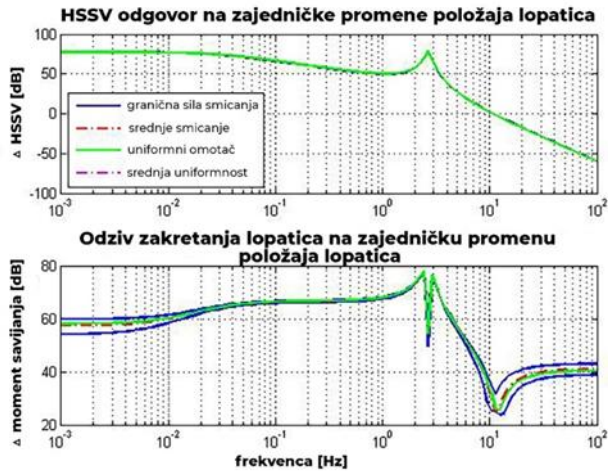
Frekventni odziv na poremećaj brzine visokobrzinske osovine generatora (*High-speed Shaft Velocity*, HSSV) i momenta savijanja u korenu lopatica izračunati su za nagib poremećaja (perturbacije) zajedno za sve lopatice. Ovaj proračun je urađen za linearizovan model na svakoj poziciji azimuta. Slika 6 pokazuje krivu veličine odgovora dobijenih nalaženjem minimalnih i maksimalnih dobitaka na svakoj frekvenciji, za sve odgovore. Gornji dijagram opisuje odgovor HSSV, a donji dijagram prikazuje odgovor momenta savijanja.

Na donjem dijagramu, plava puna linija označava krivu modela dobijenih u prisustvu vertikalnog strujanja, a zelena puna linija označava krivu dobijenu iz modela u ravnomernim uslovima. Srednji model predstavlja turbinu sa svim uglovima azimuta, dobijen numerički, u proseku za svaki koeficijent matrice (5). Na Slici 6 odgovor srednjih modela obeležen je isprekidanom crvenom linijom, a ljubičasta linija predstavlja smicanje i ravnomerne uslove, redom.

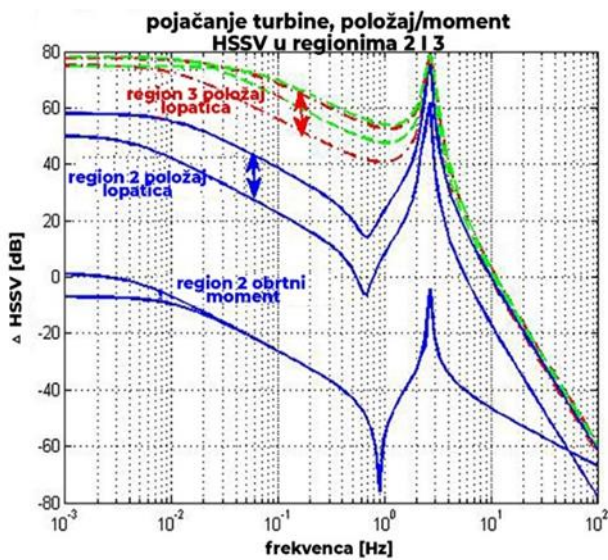
Slika 6 prikazuje da su veoma male vrednosti varijacije u odgovoru momenta savijanja i praktično nema bitnih varijacija u odgovoru HSSV. Minimalne varijacije dobijene u odgovorima ukazuju da srednji model (uprosečen za sve pozicije rotora) može biti dovoljan kao osnova za projektovanje sistema upravljanja.

Dalje, vršena su ispitivanja [23] varijacija u srednjim modelima za širok opseg radnih tačaka u odnosu na HSSV odgovor na poremećaj u nagibu i obrtnom momentu, ali u ravnomernim uslovima vetra. Slika 7 prikazuje krive dobijene iz prosečnih modela za vrednosti brzina generatora ispod nominalnih (region 2) i pri nominalnim uslovima (region 3) za različite nivoe brzine vetra (uniformno, bez smicanja). U regionu 2, gde je brzina regulisana preko obrtnog momenta generatora, postoji pravilan iznos neslaganja u odgovoru turbina. Dve krive na Slici 7 za rad turbine u oblasti regiona 2 pokazuju odgovor u HSSV zbog poremećaja obrtnog momenta generatora i nagiba lopatica, redom.

Pored toga, postoje i dve krive prikazane na Slici 7, za rad turbine u regionu 3. Jedna kriva je za radne tačke pri različitim brzinama vetra, sa nagibom podešenim da održava nominalnu brzinu rotora, a druga je za različite uglove nagiba sa brzinom vetra od 18 m/s koji se mogu pojaviti tokom odgovora na prolazne nagibe. U regionu 3 brzina je regulisana podešavanjem ugla nagiba lopatica, a manje promene se dobijaju u prosečnim linearnim modelima preko očekivanih radnih tačaka. Ovo sugeriše da je dovoljan jedan kontroler kada turbina radi pri nominalnoj snazi.



Slika 6. Analiza linearnog modela turbine u zavisnosti od pozicije azimuta rotora, [23]



Slika 7. Poremećaji u odgovoru HSSV za različite regione rada i brzine vetra, [23]

Oba dijagrama prikazuju minimum i maksimum (krive) reakcije na zajedničke poremećaje nagiba na svim pozicijama rotora. Odgovor visokobrzinske osovine (HSSV) na nagib (gornji dijagram) veoma je nezavisan od pozicije rotora, dok moment savijanja lopatica (donji dijagram) pokazuje izvesnu zavisnost azimuta u prisustvu smicanja, [23].

Donje dve krive na Slici 7 (pune plave linije) pokazuju promene u odgovoru na obrtni moment i poremećaje nagiba preko opsega brzine vetra (5-13 m/s), regiona 2. Gornje dve krive (isprekidane crvena i zelena) pokazuju promene u odgovoru na poremećaje nagiba preko različitih radnih taćaka regiona 3. Postoje velika neslaganja u odgovoru HSSV na nagib turbine kroz region 2 (5-13 m/s). U regionu 3, gde je nagib prilagođen održavanju brzine rotora od 41,7 o/min, odgovor HSSV manje varira, i sa promenom brzine vetra (zelena kriva, 16-24 m/s) i sa nagibom (crvena, 4-18°, brzina vetra od 18 m/s), [23].

3.1 Standardno upravljanje vetroturbinom

3.1.1 Upravljanje u regionu 2

U regionu 2, obrtni moment koji postiže generator dobija se kao funkcija brzine rotora:

$$\tau_c = K\omega^2 \quad (6)$$

gde je pojaćanje:

$$K = \frac{1}{2} \rho \pi R^5 \frac{C_{pmax}}{\lambda_*^3} \quad (7)$$

ρ je gustina vazduha, a C_{pmax} je optimalni koeficijent snage, $C_{pmax} = f(\lambda^*, \beta^*)$. Po konvenciji, pozitivan τ_c je u pravcu koji usporava rotor, tako je (6) način kako jaća obrtni moment i može se pokazati da doprinosi stabilnom sistemu zatvorene petlje, [17]. Kako se menja brzina vetra tako rotor ubrzava zbog aerodinamićke razlike i obrtnog momenta generatora. Podešavanje obrtnog momenta generatora u skladu sa (6) uzrokuje da brzina rotora bude podešena isto tako kao u uslovima konstantnog vetra, tj. λ^* je dostignuto. Ovaj zakon upravljanja (koji je statićki i pre je određen apsolutnom brzinom nego brzinom poremećaja) može biti proširen dodatnim dinamićkim kompenzacijama za smanjenje opterećenja, [16].

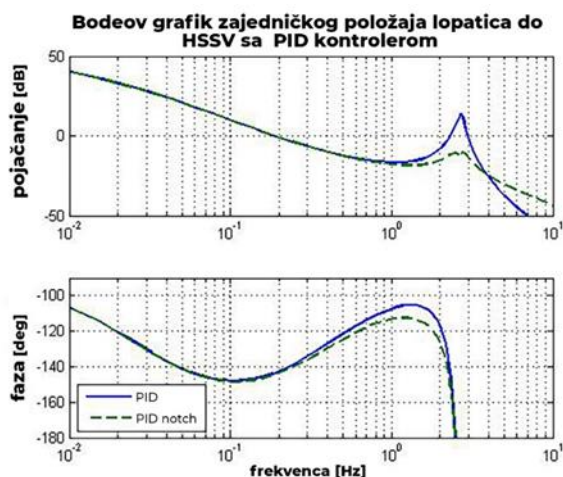
3.1.2 Upravljanje u regionu 3

Pozivajući se na Sliku 4, brzina generatora se meri i odgovara i obrtnom momentu i nagibu. Klasićna tehnika PID kontrolera obićno se koristi za izradu kontrolera nagiba lopatice u regionu 3, [23], za regulisanje brzine turbine, za razlićite uslove vetra. U ovom slućaju, poremećaj ΔQ nominalnog nagiba računa se kao:

$$\Delta Q(s) = \left[K_p + \frac{K_I}{s} + \frac{K_D s}{s\tau + 1} \right] \Delta \omega(s) \quad (8)$$

gde je $\Delta \omega$ greška brzine obrtanja generatora ili greška brzine obrtanja rotora. Koristeći samo grešku brzine rotora kao povratnu informaciju, komanda nagiba ΔQ obavezno je zajednićka (isti je za sve lopatice). Pojaćanja K_p , K_I i K_D biraju se tako da daju željene karakteristike zatvorene petlje. Često su standardni PID kontroleri prošireni (umnožen) funkcijama nivoa prenosa da dodaju prigušenje poznatih rezonanci.

Primer upotrebe PID kontrolera za filtriranje vrhova je da treba da prigušuje prepoznate rezonance pogonskog sklopa koje su prikazane na slikama 6 i 7, sa prigušenjem od 2,8 Hz. Pojaćanje petlje za PID kontrolere zajedno sa regionom 3, linearizovani je model prikazan na Slici 8. Vrh daje prigušenje rezonance tako da se presek petlje može postaviti na 0,2 Hz uz zadržavanje više od 10 dB margine pojaćanja na višim frekvencijama.



Slika 8. Upotreba PID kontrolera za filtriranje vrhova, [23]

4. ZAKLJUČAK

Vetroturbine su složeni, nelinearni, dinamički sistemi izloženi gravitaciji, stohastičkim smetnjama vetra i gravitacionim, centrifugalnim i žiroskopskim opterećenjima. Aerodinamika vetroturbina je nelinearna, nestabilna i složena. Rotori turbina su podvrgnuti komplikovanim 3D turbulentnim poljima dotoka vetra.

Ispravna karakterizacija toka vetra do turbine je važna za unapređenje dizajna turbine. Koncentrisani naleti vetra, promene pravca vetra, prolaz strukture atmosferske energije stvaraju kritična opterećenja na individualne vetroturbine i na lopatice. Ovi ekstremni događaji smanjuju životni vek turbina, uzrokuju kvar komponenti, a ponekad i potpuni kvar cele mašine. Krucijalno je razumeti složenost toka vetra do turbine u nameri da dizajniramo upravljanje njome u cilju smanjenja opterećenja, čime turbine adekvatno reaguju na ove složene atmosferske fenomene, stohastičke prirode.

Modelovanje vetrogeneratora je složeno i izazovno. Precizni modeli moraju da sadrže mnogo stepena slobode da bi prikazali najvažnije dinamičke efekte. Dizajn kontrolnih algoritama za vetroturbine mora uzeti u obzir ove složenosti. Ovi algoritmi moraju da obuhvataju najvažniju dinamiku turbine a da ne budu previše složeni.

Klasične metode projektovanja upravljanja zasnivaju se na jednom ulazu i jednom izlazu. Njihov nedostatak je što se mora koristiti više regulacionih petlji za istovremeno prigušivanje nekoliko fleksibilnih režima turbina. Ako ove kontrole nisu projektovane sa velikom pažnjom, ove kontrolne petlje ometaju jedna drugu i uzrokuju nestabilnost turbine. Napredne metode multivariabilnog projektovanja sistema upravljanja sa više ulaza i izlaza (MIMO) mogu se koristiti za postizanje ovih višestrukih ciljeva upravljanja.

Zbog svih nabrojanih problema koji se javljaju prilikom merenja vetra, rada kontrolera i grešaka usled naglih promena u jačini i pravcu delovanja vetra, ali i uvećanja i poskupljenja izrade uređaja, cilj budućih istraživanja u ovoj oblasti je projektovanje „pametnih” lopatica rotora sa sopstvenim senzorima, kontrolerima i uređajima za upravljanje nagibom lopatice (tj.

regulisanjem opterećenja lopatice) a da pri tome bude minimalno povećanje gabarita i cene uređaja.

Osim toga, velike varijacije generisane snage stvaraju probleme u planiranju proizvodnje, naponskim varijacijama i stabilnosti rada, kako vetrogeneratora tako i celog elektroenergetskog sistema.

U ovom radu smo dali prikaz novije literature iz ove oblasti i pregled i analizu regiona rada vetorturbina i sa njima povezanih ciljeva upravljanja. Akcenat je stavljen na metode za regulaciju brzine i ublažavanje opterećenja konstrukcije.

LITERATURA

- [1] Frederik J.A., Simley E., Brown K.A., Yalla G.R., Cheung L.C., and Fleming P.A., Comparison of Wind-farm Control Strategies Under Realistic Offshore Wind Conditions: Turbine Quantities of Interest, *EAWC, Wind Energy Science – Discussions*, 2 December 2024, <https://doi.org/10.5194/wes-2024-164>
- [2] <https://klima101.rs/evropska-unija-solar-vetar-maj-2023/>
- [3] <https://klima101.rs/najveca-vetrenjaca-na-svetu/>
- [4] <https://www.vpkovacica.rs/>
- [5] Milenko Đurić, Željko Đurišić, Aleksandar Čukarić, Veselin Ilić, *Elektrane, Građevinska knjiga*, 2008.
- [6] Brown, K., Houck, D., Maniaci, D., Westergaard, C., and Kelley, C.: Accelerated Wind-turbine Wake Recovery through Actuation of the Tip-vortex Instability, *AIAA Journal*, 60, 3298–3310, 2022.
- [7] Mahmoodi, E., Khezri, M., Ebrahimi, A., Ritschel U., Kamandi, M., A LiDAR-Based Yaw Control for Wind Turbines, *Preprints.org (www.preprints.org)*, 07-10-2024, doi:10.20944/preprints202410.0366.v1
- [8] Elkodama, A., Abdellatif, A., Shaaban, S., Rushdi, M. A., Yoshida Sh., Ismaiel A., Investigation into the Yaw Control of a Twin-Rotor 10 MW Wind Turbine, *Appl. Sci.* 2024, 14, 9810, <https://doi.org/10.3390/app14219810>
- [9] Van Vondelen A. A. W., Pamososuryo A. K., Navalkar S. T., and van Wingerden J.W., Control of Periodically Waked Wind Turbines, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2024.
- [10] Gonzalez Silva, J., van der Hoek, D., Ferrari, R., and van Wingerden J. W., Wind Tunnel Testing of Wind Turbine and Wind Farm Control Strategies for Active Power Regulation, *J. Renewable Sustainable Energy* 16, 053302 (2024); DOI: 10.1063/5.0215493
- [11] Jonkman, J. M., and Buhl, M. L., FAST User's Guide, NREL Report No. EL-500-38230, National Renewable Energy Laboratory, 2005.
- [12] Suryanarayanan, S., and Dixit, A., On the Dynamics of the Pitch Control Loop in Horizontal Axis Large Wind Turbines, *Proc. Amer. Ctrl. Conf.*, pp. 686–690, June 2005.
- [13] Borunda M., Garduno R., de la Cruz Soto J., Díaz R.A.F., Intelligent Control of an Experimental Small-

- Scale Wind Turbine, *Energies*, Nov. 2024, DOI: 10.3390/en17225656
- [14] Stol, K. A., and Bir, G. S., SymDyn User's Guide, NREL Report No. EL-500-33845, National Renewable Energy Laboratory, 2003.
- [15] Kane, T. R., and Levinson, D. A., Dynamics: Theory and Applications, McGraw-Hill, 1985.
- [16] Hansen, A. C., User's Guide to the Wind Turbine Dynamics Computer Programs YawDyn and AeroDyn for ADAMS, version 11.0, Mech. Eng. Dept., Univ. of Utah, 1998.
- [17] Wright, A.D., and Fingersh, L.J., Advanced Control Design for Wind Turbines, Part I: Control Design, Implementation, and Initial Tests, National Renewable Energy Laboratory, Colorado, USA, Technical Report NREL/TP-500-42437, March 2008.
- [18] Pao, L. Y., and Johnson, K. E., A Tutorial on the Dynamics and Control of Wind Turbines and Wind Farms, Proc. Amer. Ctrl. Conf., June 2009.
- [19] Van Minh P., Control for Wind Turbine System using PMSG when Wind Speed Changes, *International Journal of Electrical and Electronics Research (IJEER)*, 2024, Volume 12, Issue 2, p.p. 520-528, e-ISSN: 2347-470X, www.ijeer.forexjournal.co.in
- [20] Benhacine T.Y., Mouzai A., Azaz A.A., Boudraf M., MPPT Optimal Torque Control Strategy for a PMSG-based Wind Turbine Emulator, *Journal of Renewable Energies*, IREnDAYS'24 Algiers (2024), p.p. 289 – 295, DOI: <https://doi.org/10.54966/jreen.v1i1.1271>
- [21] Benhacine, T. Z. E., Dali, A., Tata, M., Kherbachi, A., Boudraf, M., & Kaabeche, A., Design of a Test Bench for a Small Wind Turbine Emulator, *Journal of Renewable Energies*, 27(1), 2024.
- [22] Chahb A., Yessef M., Amharech A., A Comprehensive Approach to Wind Turbine Optimization Integrating MPPT and Speed Control, 2024, DOI: 10.1109/ISAECT64333.2024.10799765
- [23] Laks, J. H., Pao, L. Y., and Wright, A. D., Control of Wind Turbines: Past, Present, and Future, Conference Paper in Proceedings of the American Control Conference, July 2009, DOI: 10.1109/ACC.2009.5160590

BIOGRAFIJA



Slavica Stojiljković je rođena 1969. godine u Prokuplju, gde je završila osnovnu školu i gimnaziju. Diplomirala je 1994. godine na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Nišu, na obrazovnom profilu Automatsko upravljanje, na

kom je 2014. odbranila magistarsku tezu „Primena neurofazi-genetskog upravljanja na automatizaciji sistema grejanja i klimatizacije u inteligentnim zgradama” i stekla akademsko zvanje magistra mašinskih nauka – oblast automatsko upravljanje.

Od 1996. do 2015. godine radila je u Direkciji za izgradnju i urbanizam opštine Prokuplje kao projektant termotehničkih sistema.

Godine 2015. prelazi u Elektrodistribuciju Beograd. Od 2021. godine radi u Upravi JP EPS-a (sada: EPS AD), u Službi za energetske efikasnost Sektora za energetske efikasnost i zaštitu životne sredine u proizvodnji energije i uglja, Tehničkih poslova proizvodnje uglja i energije, kao glavni inženjer za energetske efikasnost.

Godine 1999. u SMEITS-u je položila stručni ispit propisan za diplomiranog mašinskog inženjera.

Septembra 2005. postaje član Inženjerske komore Srbije (IKS) sa licencom za diplomiranog mašinskog inženjera – odgovorni projektant termotehnike, termoenergetike, procesne i gasne tehnike.

Godine 2009. stiče sertifikat energetskog menadžera, 2010. polaže stručni ispit iz protivpožarne zaštite, a 2012. dobija i licencu IKS-a za energetske efikasnost u zgradarstvu.

Godine 2021. završava obuku za energetskog menadžera u industriji, na Mašinskom fakultetu u Beogradu, i dobija licencu za obavljanje poslova energetskog menadžera za oblast industrijske energetike.

UDC: 621.311.245

Slavica Stojiljković¹, Vladimir M. Šiljkut¹

An Overview of Wind Turbines Control Systems

¹ Joint Stock Company Elektroprivreda Srbije, Belgrade*

Report

Highlights

- Different methods for regulation of wind turbine power
- Ensuring reliable and efficient operation of wind turbines under variable wind speeds
- Wind turbines are inherently nonlinear and time-varying

Abstract

This paper provides an overview of the latest expert literature on wind turbine control systems. Some techniques used in the control of horizontal-axis wind turbines at the individual turbine level are presented and explained in more detail. These controls apply to the blade pitch and generator power. The turbine system is modeled as a flexible structure operating under the presence of turbulent wind disturbances. A review of various turbine operating phases and control strategies aimed at maximizing energy conversion at sub-nominal wind speeds is provided, with a focus on managing aerodynamic loads when the turbine operates at maximum power. After reviewing the basic objectives of turbine control, the paper gives an overview of common linear control approaches and then describes advanced control architectures, addressing why they may provide greater benefits.

Keywords

Linearized wind turbine model, wind generator, wind speed, wind turbine efficiency, wind turbine power regulation

Received: October 22nd, 2024Reviewed: January 18th, 2025Modified: February 10th, 2025Accepted: February 21st, 2025

*Corresponding author: Slavica Stojiljković, +381-64-83-33-277

E - mail: slavica.stojiljkovic@eps.rs