



OPTIMIZACIJA RADA VETROTURBINE UPOTREBOM MAŠINSKOG UČENJA OPTIMIZATION OF WIND TURBINE OPERATION USING MACHINE LEARNING

Nataša Rašeta, Vladimir Katić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO

Kratak sadržaj – Fokus ovog rada jeste na energiji vetra i optimizaciji rada vetroturbine. Konkretno, problematika je usmerena ka sistemu za praćenje smera vetra koji predstavlja jedan od ključnih faktora za proizvodnju energije. Promatrana je kalibracija i optimizacija ugla uređaja za merenje smera vetra koji se nalazi na kućištu vjetroturbine. Za rešenje ovog problema upotrebljeno je mašinsko učenje nakon čega su prikazani i rezultati simulacije sa zaključkom.

Ključne reči: vetroturbina, optimizacija, mašinsko učenje

Abstract – The focus of this paper is on wind energy and optimization of wind turbine operation. In particular, the problem is directed towards a yaw control system, which presents one of the key factors for energy production. The problem of yaw misalignment is especially observed (calibration and optimization of the angle of the wind direction measuring device located on the nacelle). Machine learning was used to solve this problem, followed by the simulation results with a conclusion.

Keywords: windturbine, optimization, machine learning

1. UVOD

Procenjena kratkotrajna potrošnja goriva na bazi uglja i značajano zagađenje atmosfere tokom poslednjih decenija uzrokovali su brzi razvoj obnovljivih izvora energije. Prelazak na održivu proizvodnju energije postao je pitanje od kapitalnog značaja kako bi se osigurala dugoročna stabilnost energetskog sistema. Među svim dostupnim obnovljivim izvorima energije, vetar i fotonaponska energija stoje kao najveći i najbrže rastući resursi.

Kako je tehnologija vetrogeneratorska poznata, u ovom radu neće se ići u detaljno objašnjavanje i principe rada same vetroturbine (detaljan opis dat je u samom master radu). Pažnja je posvećena sistemu za praćenje smera vetra. Iako sistem za praćenje smera vetra (eng. *yaw control system*) nije detaljno proučen u literaturi od velikog je značaja u sistemu upravljanja vetroturbinama. Pravilno usmjeravanje kućišta (glave) turbine omogućava povećano iskorišćenje mehaničke snage izvučene iz vetra pa samim tim i povećanje proizvedene električne energije. Bitno je napomenuti kako je optimalan položaj kućišta vetroturbine onaj za koji se ima ugao od nula stepeni između kućišta vetroturbine i apsolutnog smera vetra. Ako dođe do odstupanja ovog ugla od nule duži vremenski period, dolazi do gubitka proizvedene energije odnosno

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Vladimir Katić, red. prof.

do nepotpunog iskorišćenja energije vetra. U ovom radu posebna pažnja usmerena je ka statičkoj neusklađenosti ose mernog uređaja i ose rotora odnosno nedovoljno dobroj kalibraciji sistema za praćenje vetra, dok se podrazumeva da sistem za praćenje smera vetra radi ispravno i da turbina u svakom trenutku prati smer vetra. U stvarnim aplikacijama, nulta tačka uređaja (senzora) za smer vetra može odstupati od ose rotora iz razloga ugradnje, rada u otežanim uslovima ili uticaja iskrivljenih vazдушnih masa iza ravnih rotora.

U ovoj situaciji rezultat merenja smera vetra uključuje sistematsku grešku koja će dovesti do neusklađivanja između položaja kućišta turbine i smera vetra, što posledično dovodi do smanjenja proizvodnje energije vetra u radu vetroturbine. Za rešavanje ovog problema upotrebljen je poseban oblik mašinskog učenja nakon čije simulacije su prikazani rezultati.

2. SISTEM ZA PRAĆENJE SMERA VETRA

Moderne vetroturbine obično su projektovane kao vetroturbine „uz vetar“ kod kojih je površina lopatica okrenuta ka vetru i zato su pod aktivnom kontrolom sistema za praćenje smera vetra. Glavni razlog za ovakvu konstrukciju jeste interferencija struja vetra sa stubom, što je manje kod konstrukcija „uz vetar“. Sistem za praćenje smera vetra pokušava da poravna rotor prema vetru.

Ovaj sistem je spor u poređenju sa promenama smera vetra (koje su nepredvidive) i brze reakcije turbine mogu prouzrokovati veću potrošnju energije ovog elektromotornog sistema i naprezanje komponenti te se zbog toga prihvata određeni stepen greške [1]. Detaljan opis principa rada sistema za praćenje smera vetra dat je u master radu dok je u ovom radu predstavljen glavni problem kod ovog sistema, a to je sistematska greška nastala iz neusklađenosti nulte ose mernog uređaja i ose rotora koja prouzrokuje nedovoljno dobro poravnanje sistema za praćenje vetra sa smerom vetra.

Da bi se dobio što bolji uvod u problematiku, u narednom delu predstavljeni su ključni uglovi sistema za praćenje smera vetra.

2.1. Definicija ključnih uglova

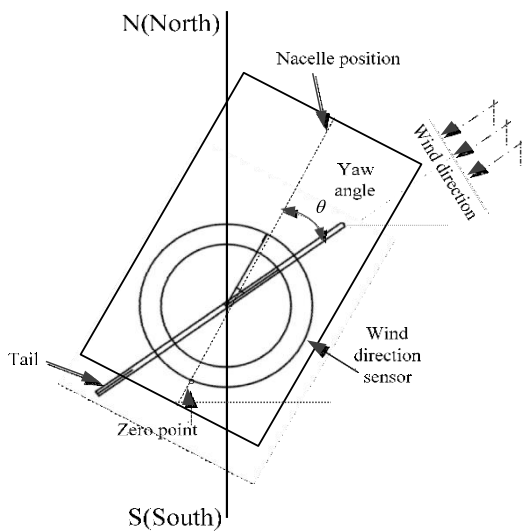
Postizanje dobre usklađenosti turbine sa smerom vetra teško je iz nekoliko razloga. Jedan od njih je taj što kod standardnih turbina, merenja brzine i smera vetra vrše se iza rotora. To dovodi do izobličenja struja vetra uzrokovanih lopaticama rotora i samim kućištem. Kako bi se ovaj problem prevazišao postoje rešenja koja uključuju ugradnju mernih uređaja ispred turbine, ali ona podrazu-

mevaju ugradnju novog hardvera i samim tim povećane investicione troškove [1].

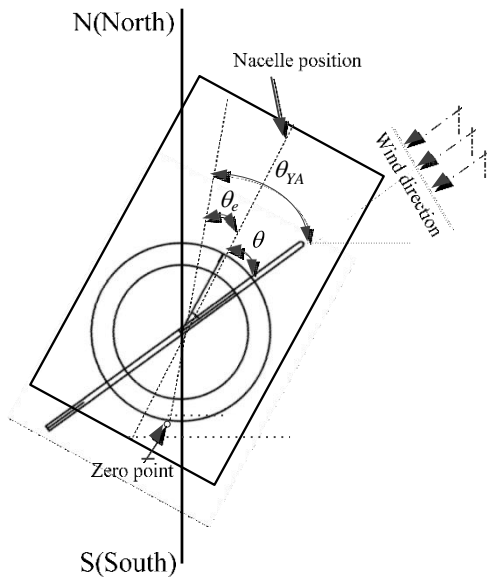
Na Slici 1. prikazan je ugao Θ koji predstavlja ugao između ose rotora i apsolutnog smera vetra. Sistem za praćenje smera vetra aktiviraće se da bi se smanjio ovaj ugao ako je isti veći od predefinisanih praga za koji se ima aktivacija sistema za praćenje.

Turbine su nakon puštanja u rad usklađene sa pravim severom, ali oprema za merenje rotacije kućišta turbine često nije dovoljno tačna i dovodi do pomeranja oznake pravog severa tokom radnog veka [2].

Shodno tome, stare turbine često ne mogu pokazati ispravni smer vetra, jer je smer vetra određen iz zbira položaja kućišta i ugla sistematske greške. Ovaj problem ilustrovan je na Slici 2.



Slika 1. Definicija uglova u sistemu za praćenje smera vetra [1]



Slika 2. Definicija uglova u sistemu za praćenje smera vetra sa sistematskom greškom [1]

na kojoj su prikazani uglovi koji se imaju za već izloženi problem. Sa iste slike može se primetiti kako u ovom slučaju ose mernog uređaja i rotora nisu usklađene i ovaj ugao obeležen je sa θ_e .

U ovom slučaju za rezultat merenja ima se ugao θ_{YA} koji uključuje i sistematsku grešku za merenje ugla između kućišta turbine i smera vetra u SCADA sistemu. Ova sistematska greška, kao što je prethodno napomenuto, dovede do neusklađenosti između pozicije kućišta i smera vetra te tako dovesti do smanjenja proizvodnje energije tokom rada vetroturbine.

2.2. Manuelno otkrivanje ugla sistematske greške

Na izlazu snage vetroturbine utiče nekoliko faktora, kao što su brzina vetra, ugao relativnog smera vetra, *pitch* ugao, stanje vetroturbine i tako dalje. Betzov zakon objašnjava kako brzina vetra i ugao relativnog smera vetra utiču na izlaznu snagu, kao što pokazuje jednačina (1) [1].

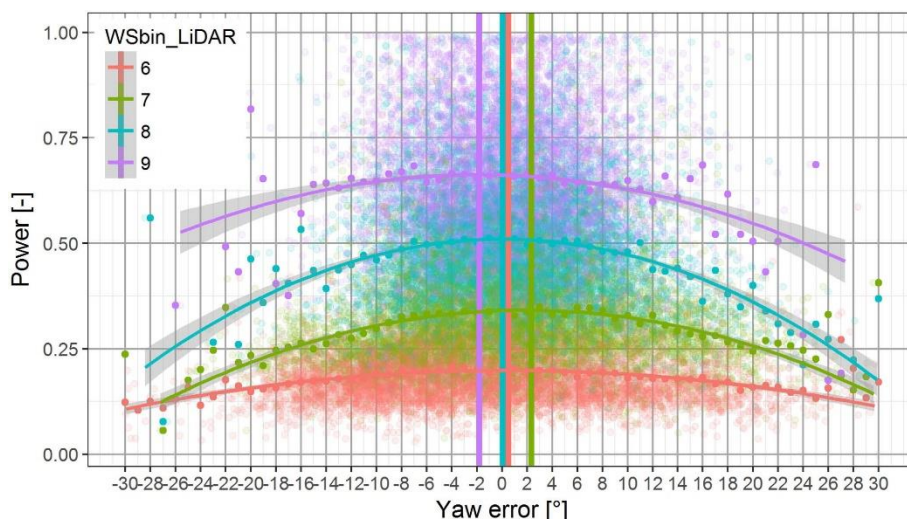
$$P = \frac{1}{2} \rho V^3 C_p \cdot (\cos \beta)^3 \quad (1)$$

Gde je P generisana snaga vetra, ρ je gustina vazduha, V je brzina vetra, C_p je koeficijent snage, dok je β ugao između kućišta turbine relativnog smera vetra. Iz jednačine (1) jasno se zaključuje kako se optimalna proizvodnja snage ima za ugao β jednak nuli. Promatrano s druge tačke gledišta, SCADA podaci s najboljim performansama snage trebaju odgovarati nultom uglu relativnog smera vetra.

Polazna tačka manualnog određivanja ugla sistematske greške je analiza performansi snage pod različitim uglovima relativnog smera vetra na osnovu SCADA podataka. Ugao za koji se ima najveća izlazna snaga smatra se za uglom sistematske greške (eng. *yaw misalignment*) koji je potrebno kompenzovati „pomeranjem“ sistema za praćenje smera vetra za upravo detektovan ugao [2]. To se obavlja tako što se za određeni rang brzine vetra, u kontrolni sistem, unose vrednosti ugla za koji se detektovala optimalna proizvodnja.

Kako bi se ovaj slučaj što lakše vizualizirao, na Slici 3. prikazane su krive snage u zavisnosti od ugla relativnog smera vetra za svaki rang brzine. Intervali brzine vetra definisani su sa korakom od po 0.5 m/s. Sa Slike 3. jasno se može uočiti kako je za brzine u intervalima 6 m/s i 8m/s sistem za praćenje smera vetra dovoljno tačno poravnat doke se u slučajevima brzina od 7 m/s i 9 m/s uočava maksimalna izlazna snaga za uglove otprilike 2 i -2 stepena, respektivno.

Kako je navedeno u jednačini (1), tako i u literaturi, gubitak snage kao posledica ugla sistematske greške proporcionalan je kosinusu tog ugla na kub $((\cos \theta_e)^3$, gde je θ_e ugao sistematske greške sa Slike 2.) pa se za svaki ugao ove greške ima njemu proporcionalan gubitak snage.



Slika 3. Krive izlazne snage vetrotrubine u zavisnosti od relativnog smera vetra za četiri inetrvala brzine i detektovanim uglom sistemske greške [2]

3. PRISTUP REŠAVANJU PROBLEMA UPOTREBOM MAŠINSKOG UČENJA

Glavna ideja za ovaj rad pa tako i sam master rad bila je upotreba mašinskog učenja u oblasti vetroindustrije u svrhu optimizacije rada vetrotrubine. Prethodno izložen problem simuliran je primenom posebne vrste mašinskog učenja odnosno tehnikom koja se zasniva na interakciji s okolinom, *Reinforcement learning*-om. Detaljnije objašnjenje principa rada pomenutog algoritma predstavljen je u samom master radu. U svrhu razvoja modela korišćen je programski jezik *Python*.

3.1. Mašinsko učenje – osnovni principi

Kako bi osnovni koncepti bili što jasnije predstavljeni, mašinsko učenje će biti posmatrano kao alternativa klasičnom inženjerskom pristupu. Konvencionalni inženjerski dizajn počinje sa sticanjem osnovnog znanja o problemu koji rešavamo. Nakon sakupljanja dovoljno teorijskog znanja definišemo matematički model, koji obuhvata fizičku strukturu posmatranog problema. Na osnovu modela formira se optimizovani algoritam koji garantuje očekivane performanse, pod uslovom da model predstavlja tačnu reprezentaciju stvarnosti.

Sa druge strane, mašinsko učenje (tj. njegova najosnovnija forma) umesto sticanja teorijskog znanja ima potencijalno lakši zadatak, a to je prikupljanje dovoljno velike količine primera (podataka) koji će opisati željena ponašanja algoritma od interesa. Ti primeri formiraju trening set.

Trening set se dalje prosleđuje odgo- varajućem algoritmu za trening, zahvaljujući kom dobijamo "istreniranu" mašinu za izvršavanje odgovarajućeg zadatka. Postupak učenja je moguć zahvaljujući dobrom izboru hipoteza, pomoću kojih algoritam vrši selekciju parametara tokom treninga.

Algoritmi mašinskog učenja su generalno bazirani na optimizaciji performansi, pri čemu se kao kriterijum za ocenu performansi uzima poklapanje stvarnih podataka sa onim koji su predviđeni pomoću mašine.

Postoje tri osnovne klase mašinskog učenja [3]:

- Nadgledano učenje (eng. *Supervised learning*)

- Nenadgledano učenje (eng. *Unsupervised learning*)
- Tehnika koja se zasniva na interakciji sa okolinom (eng. *Reinforcement learning* - RL), upotrebljena u ovom radu

3.2. Simulacija i rezultati

Kako rad ne bi poprimio softversku prirodu, u ovom delu ukratko je pojašnjen princip tehnike učenja zasnovane na interakciji s okolinom. Glavna ideja koja se krije iza ovog principa jeste da se na okolinu, koja je modelovana kao vetrotrubina u ovom slučaju, primeni „agent“ odnosno algoritam koji će po principu poduzimanja akcija na trenutno stanje primati nagrade ili kazne i na taj način proizvesti naredno stanje [5]. Princip primanja nagrade (eng. *reward*) uveden je kako bi „agent“ naučio u kojem smeru treba da se kreće kako bi došao do željenog stanja. U ovom slučaju, željeno stanje jeste smanjiti gubitak snage na izlazu iz vetrotrubine. Na Slici 4. dat je prikaz jednog dela ponašanja „agenta“.

```

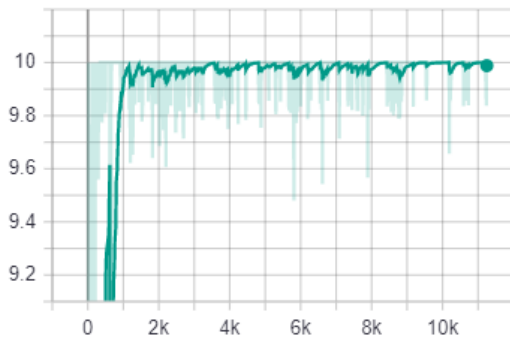
-----
STATE BEFORE AN ACTION
Assembly error is: -8.265610518322255
Action is: 7.948283
  wind_speed  wind_direction
0  4.436451  -0.383333
-----
STATE AFTER AN ACTION
  wind_speed  wind_direction  Power loss [%]
0  4.436451  -0.383333  0.02243
-----
REWARD 10

```

Slika 4. Prikaz kompenzacije ugla sistemske greške od strane „agenta“

Ugao sistemske greške, u ovom slučaju nazvan i kao „ugao postavljanja mernog uređaja“ (eng. *assembly error*) zadan je u modelu nasumično od strane algoritma i u ovom konkretnom slučaju iznosi -8.27° . Glavni cilj jeste da „agent“ nauči da kompenzuje dati ugao i samim tim smanji gubitak snage koji bi se imao da isti ugao nije kompenzovan. Iz date Slike 4. može se primetiti kako je „agent“ uspešno kompenzovao nasumično zadat ugao i na taj način smanjio gubitak izlazne snage.

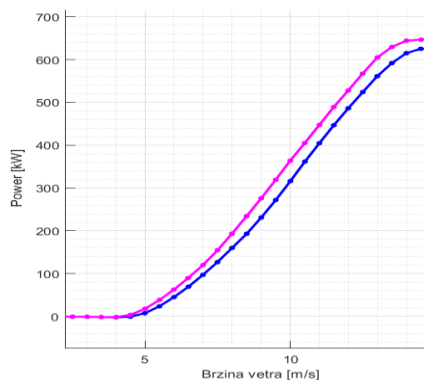
episode_reward



Slika 5. Kriva nagrade u odnosu na korake učenja (dokaz naučenog – konvergencija)

Da bi se dobila bolja predstava uticaja ove pojave na izlaznu snagu data je Slika 6. na kojoj se može primetiti razlika između dve krive snage (pre i posle kompenzacije) i uvideti da je kriva snage nakon kompenzacije ugla sistematske greške optimizovana što je i bio cilj simulacije.

Konkretno za ovaj ilustriran primer prikazan na Slici 6., „agent“ je uspešno naučio da kompenzuje ugao od otprilike 15° i samim tim povećao izlaznu snagu za 10%.



Slika 6. Krive snage pre (plava) i posle (roze) kompenzacije ugla sistematske greške

4. ZAKLJUČAK

Moderne vetroturbinе obično su projektovane kao vetroturbinе „uz vetar“ kod kojih je površina lopatica okrenuta ka vetru i zato su pod aktivnom kontrolom sistema za praćenje smera vetra. Pravilno usmeravanje kućišta (glave) turbine omogućava povećano iskorišćenje mehaničke snage izvučene iz vetra pa samim tim i povećanje proizvedene električne energije.

Optimalan položaj kućišta vetroturbinе jeste onaj za koji se ima ugao od nula stepeni između kućišta vetroturbinе i apsolutnog smera vetra. Ovaj rad daje uvid u problematiku ovog sistema vetroturbinе.

Pored opisa standardnog rada sistema za praćenje smera vetra, predstavljen je problem pojave ugla sistematske greške ili ugla između ose mernog uređaja koji je postavljen na kućištu turbine i ose rotora za koji se ima pojava smanjenja izlazne snage.

U industriji se obično proces detekcije ugla sistematske greške obavlja manuelno te je svrha ovog rada da doprinese jednoj vrsti automatizacije tog posla, odnosno „pametnoj“ automatizaciji upotrebom mašinskog učenja. Polazna tačka manualnog određivanja ugla sistematske greške je analiza performansi snage pod različitim uglovima relativnog smera vetra na osnovu SCADA podataka. Ugao za koji se ima najveća izlazna snaga smatra se za uglom sistematske greške (eng. *yaw misalignment*) koji je potrebno kompenzovati „pomeranjem“ sistema za praćenje smera vetra za upravo detektovan ugao. U drugom delu rada predstavljena je simulacija koja je realizovana pomoću mašinskog učenja.

Mašinsko učenje u ovom domenu predstavlja način rešavanja problema tako što mašina „uči“ iz iskustva i samim tim optimizuje svoj rad tokom vremena. Detaljniji pristup ovoj tehnici mašinskog učenja izložen je u master radu. Rezultati koji se dobijaju simulacijom ukazuju na optimizaciju krive snage čija degradacija od strane ugla sistematske greške unutar sistema za praćenje vetra i predstavlja ključan problem. Predstavljena simulacija za sada je laboratorijski primer problema koji je u ovom radu izložen. Naredni naponi biće usmereni ka primeni samog modela na pravoj turbini u polju i u tu svrhu zahteva dodatnu nadogradnju i optimizaciju.

5. LITERATURA

- [1] Yan Pei, Zheng Qian, Bo Jing, Dahai Kang, Lizhong Zhang, „Data-Driven Method for Wind Turbine Yaw Angle Sensor Zero-Point Shifting Fault Detection”, *Energies* 2018, 11(3), 553, March 2018.
- [2] N. Mittelmeier, M. Kühn, „Determination of optimal wind turbine alignment into the wind and detection of alignment changes with SCADA data”, *Wind Energ. Sci.*, 3, 395–408, 2018
- [3] Y. Bengio, I. Goodfellow and A. Courville, „Deep learning“ In MA: MIT Press, 2016.
- [5] A.S. Aguirre, E. Zulueta, U.F. Gamiz, J. Lozano, J.M. Lopez-Guede, „Artificial Neural Network Based Reinforcement Learning for Wind Turbine Yaw Control”, *Energies* 12(3):436, January 2019

Kratka biografija:



Nataša Rašeta rođena je u Kninu, Republika Hrvatska, 1994. god. Master rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektrotehnike i računarstva – Distribuirani elektroenergetski resursi odbranila je 2019. god.
kontakt: natasa.raseta23@gmail.com



dr. Vladimir Katić red.prof. rođen je u Novom Sadu 1954. godine. Doktorirao je na Univerzitetu u Beogradu 1991. godine. Oblasni interesovanja su mu energetska elektronika, obnovljivi izvori električne energije, kvalitet električne energije i električna vozila.