

Simulator vjetroelektrane u programskom okruženju Matlab

V. Spudić, M. Jelavić, i M. Baotić

Zavod za automatiku i računalno inženjerstvo

Fakultet elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu

Unska 3, 10000 Zagreb, Hrvatska

Telefon: +385-1 6129 805 Fax: +385-1 6129 809 E-mail: vedrana.spudic@fer.hr, mate.jelavic@fer.hr, mato.baotic@fer.hr

Sažetak – Vjetroelektranu čini skupina vjetroagregata raspoređenih na određenoj lokaciji. Svaki vjetroagregat kinetičku energiju vjetra pretvara prvo u mehaničku energiju vrtnje rotora a potom, posredstvom električnog generatora, u električnu energiju. Za modeliranje rada cjelokupne vjetroelektrane potrebno je simulirati promjene brzina vjetra na pojedinim vjetroagregatima koji predstavljaju vjernu sliku fizikalnih pojava. Vjetar je stoga modeliran kao skup stohastičkih signala – brzina vjetra na pojedinim vjetroturbinama – za koje su poznate: spektralna razdioba snage vremenskog signala u pojedinim točkama prostora i prostorna korelacije između signala u različitim točkama prostora. Dodatno je uzeto u obzir da je zakretni moment rotora vjetroturbine, općenito, uzrokovan (nejednakim) vertikalnim profilom brzina vjetra. Simulator vjetroelektrane je realiziran u Matlab programskom okruženju. Pritom je pretpostavljeno da su vjetroagregati upravljani zakretom lopatica i promjenjivim momentom generatora, kao što je slučaj sa postojećim vjetroagregatom koji je dio Laboratorija za obnovljive izvore energije na Fakultetu elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu.

I. UVOD

Vjetroelektranu čini skupina vjetroagregata raspoređenih na određenoj lokaciji. Vjetroagregat odnosno vjetroturbina je dinamički sustav koji kinetičku energiju vjetra pretvara u mehaničku energiju koja okreće rotor. Mehanička energija vrtnje rotora se na generatoru pretvara u električnu energiju. Vjetroagregati se unutar vjetroelektrane spajaju na srednjenaponsku mrežu koja se potom preko transformatora uklapa u visokonaponski sustav za distribuciju električne energije. Kako bi se odgovarajuće modeliralo ponašanje vjetroelektrane potrebno je generirati ulazni signal koji realno opisuje vjetar koji proizvodi aerodinamički moment koji djeluje na rotor vjetroagregata.

Vjetar je po definiciji strujanje zračnih masa nastalo zbog razlike temperatura, odnosno prostorne razdiobe tlakova [1]. Uzroci su dvojakog karaktera, globalnog i

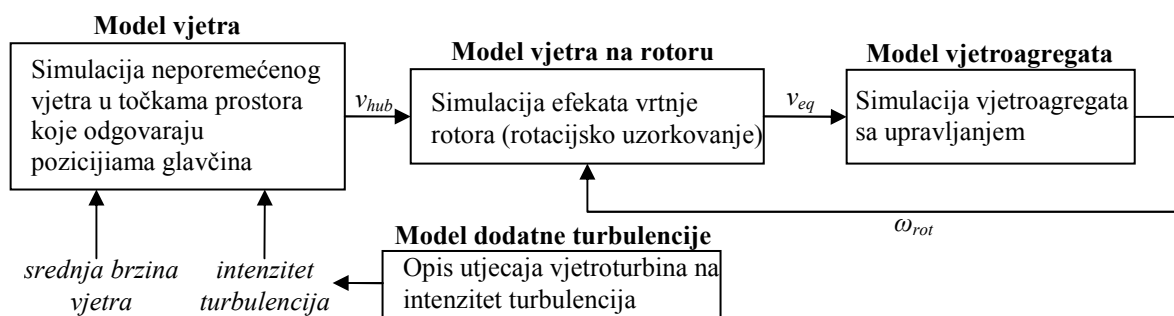
lokalnog. Globalni uzroci se odnose na primarna strujanja zračnih masa zbog globalne raspodjele tlaka (godišnja doba) i putujućih cirkulacijskih sustava (ciklone i anticiklone). Lokalno, na karakteristike vjetra utječu konfiguracija i obilježja terena. Karakteristike mjerenja vjetra u točki pokazuju da se brzina vjetra može dobro opisati kao stohastički proces. U literaturi su poznati izrazi za spektar brzine vjetra, kao i spektralne razdiobe snage vremenskog signala u pojedinim točkama prostora i prostorne korelacije između signala u različitim točkama prostora [1,2,5].

Proizvodnja vjetroelektrane i mehanička opterećenja vjetroturbina posljedica su vjetra i stoga nasljeđuju njegov stohastički karakter [6]. Blizina vjetroagregata u modernoj vjetroelektrani uvjetuje smanjenje statističke neovisnosti pobuda na različitim vjetroagregatima – korelacija oscilacija vjetra na susjednim vjetroagregatima zbog malih udaljenosti nije zanemariva. Zbog toga udari vjetra koji utječu na rad više vjetroagregata uzrokuju velike poremećaje u proizvodnji vjetroelektrane. Kako bi se mogle proučiti ove pojave, te na osnovi njih razvijati algoritmi za upravljanje vjetroelektranom, potrebno je simulirati brzine vjetra na pojedinim vjetroagregatima koje predstavljaju vjernu sliku fizikalnih pojava. Nameće se potreba za promatranjem brzine vjetra kao stohastičkog procesa poznatih prostornih i vremenskih karakteristika. Također, potrebno je uzeti u obzir da vjetroturbinu ne pokreće vjetar u nekoj konkretnoj točki prostora, već da zakretni moment na rotor vjetroturbine uzrokuju općenito različite brzine vjetra kojima su u nekom trenutku vrtnje lopatice istovremeno izložene po cijeloj svojoj dužini [1-10].

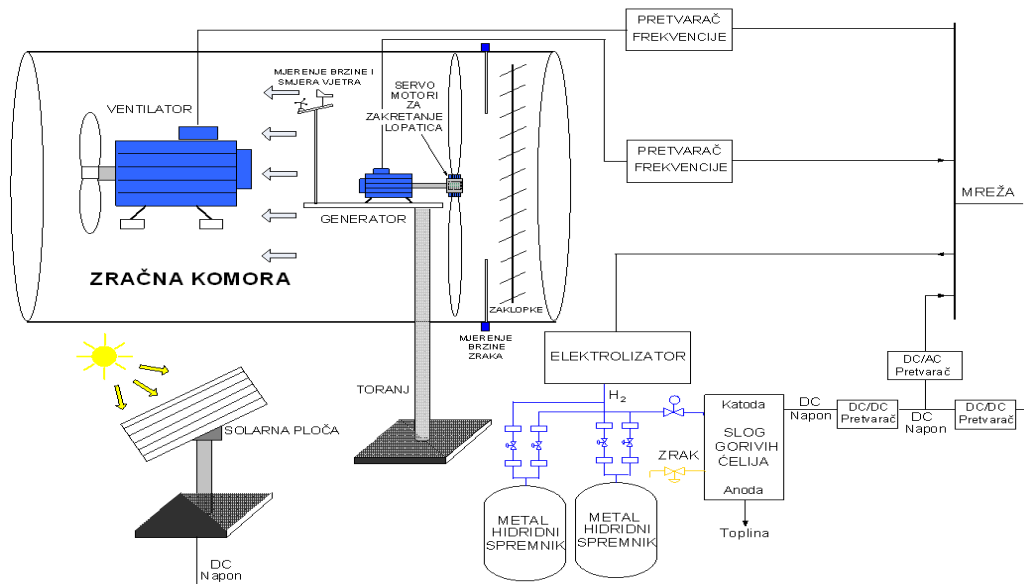
Načelna shema razmatranog simulacijskog modela vjetroelektrane dana je na Sl. 1.

II. MODEL VJETROAGREGATA

Model vjetroagregata se sastoji od aerodinamičkog i mehaničkog dijela. Aerodinamički model rotora opisuje



Sl. 1. Načelna shema modela vjetroelektrane.



Sl. 2. Načelna shema strukture laboratorijskog postrojenja.

pretvorbu brzine vjetra u aerodinamički moment rotora, dok mehanički model opisuje suprotstavljanje aerodinamičkog i elektromehaničkog momenta na generatoru, iz čega proizlazi brzina vrtnje vjetroturbinne i izlazna snaga vjetroagregata. Upravljanje vjetroturbinom je izvedeno upravljanjem momentom generatora u svrhu optimiranja izlazne snage ispod nazivne brzine vrtnje vjetroturbinne, te ograničavanjem brzine vrtnje i snage zakretanjem lopatica iznad nazivne brzine vrtnje. Više o načinu upravljanja i projektiranju regulatora koji ga implementira može se naći u [8].

Model vjetroagregata korišten u ovom radu odgovara vjetroagregatu proizvedenom u Končaru, model KO-VA 57/1. Prikladni ispitni model je laboratorijski vjetroagregat koji je sastavni dio Laboratorija za obnovljive izvore energije na Fakultetu elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu prikazan na Sl. 2. Iz sheme na Sl. 2 je vidljivo da sustav predstavlja mikromrežu u kojoj se energija vjetra i sunca može predavati vanjskoj mreži, ili se može pomoću elektrolizatora pretvarati u vodik koji se sprema u metal hidridne spremnike. Svako od navedenih postrojenja omogućuje razvoj i testiranje upravljačkih algoritama specifičnih za pojedino postrojenje, dok laboratorijska cjelina omogućuje istraživanja vezana uz mikromrežu te mogu postati temelj razvoja virtualne elektrane. Vjetroagregat je smješten u zračni tunel koji je projektiran uvažavajući Betzov zakon strujanja zraka [10]. Laboratorijski vjetroagregat je projektiran kao umanjena verzija vjetroagregata iz megavatne klase, pri čemu su zadržana su sva bitna svojstva megavatnog vjetroagregata, od aerodinamičke karakteristike vjetroagregata, preko napadnih kutevi lopatica do omjera obodne brzine rotora i brzine vjetra. Nadalje, toranj laboratorijskog vjetroagregata izveden je tako da su zadržana oscilatorna gibanja karakteristična za vjetroagregate iz megavatne klase.

A. Aerodinamički model vjetroagregata

Snaga vjetra na rotoru agregata dana je izrazom [1]:

$$P_{vj} = \frac{1}{2} \rho_z v_{vj}^3 R^2 \pi, \quad (1)$$

gdje je:

ρ_v - gustoća zraka [kg/m^3],

v_{vj} - srednja brzina vjetra na rotoru [m/s] i

R - polumjer rotora [m].

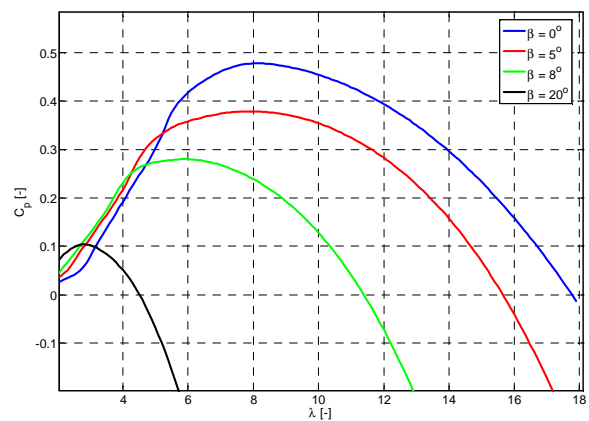
Prema Betzovom zakonu, vjetroagregat ne može iskoristiti svu energiju vjetra. Snaga koju vjetroturbina preuzima iz vjetra je:

$$P_t = \frac{1}{2} \rho_z v_{vj}^3 R^2 \pi \cdot C_p, \quad (2)$$

gdje je $C_p = f(v_{vj}, \omega, \beta)$ koeficijent učinkovitosti, ω brzina vrtnje rotora ω , i β je kut zakreta lopatica. Koeficijent učinkovitosti (karakteristika pojedine vjetroturbinne) najčešće se opisuje kao funkcija kuta zakreta lopatica i omjera brzina (*engl.* tip speed ratio):

$$\lambda = \frac{\omega R}{v_{vj}}. \quad (3)$$

Ovisnost koeficijenta učinkovitosti o omjeru brzina λ , uz kut zakreta lopaticice β kao parametar, može se dobiti eksperimentalno ili simulacijom. Podatke o koeficijentu učinkovitosti obično daje proizvođač lopatica. Primjer je dan na Sl. 3.



Sl. 3. Ovisnost koeficijenta učinkovitosti o omjeru brzina i kutu zakreta lopatica.

U modelu vjetroturbine aerodinamički moment vjetroatregata računa se iz njegove snage:

$$M_a = \frac{P_t}{\omega} = \frac{1}{2} \frac{\rho_z v_{vj}^3 R^2 \pi C_p}{v_{ob}/R} \quad (4)$$

$$= \frac{1}{2} \rho_z v_{vj}^2 R^3 \pi \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda}$$

B. Mehanički model

Mehanički dio modela vjetroturbine opisuje suprotstavljanje aerodinamičkog momenta M_a i elektromagnetskog momenta generatora M_g . Na modeliranom vjetroatregatu rotor i generator su spojeni izravno i spoj se može smatrati krutim [8]. Uz zanemarenja gubitaka i momenta inercije genratora, dobiva se jednadžba prvog reda:

$$\dot{\omega} = \frac{1}{J_r} (M_a - M_g), \quad (5)$$

gdje su:

- J_r - moment inercije rotora [kgm²],
- M_a - aerodinamički moment vjetroturbine [Nm] i
- M_g - aerodinamički moment vjetroturbine [Nm].

C. Dinamika tornja

U razvijenom modelu omogućeno je uključanje efekta njihanja tornja u simulaciju. Dinamički se simulira pomicanje vrha tornja, te se brzina njihanja tornja dodaje brzini vjetra koju osjeća vjetroturbina. Pomaci vrha tornja modeliraju se kao jednomaseni sustavi drugog reda:

$$m_t \cdot \ddot{x}_{t_nod} + D_t \cdot \dot{x}_{t_nod} + C_t \cdot x_{t_nod} = F_t, \quad (6)$$

gdje su:

- x_{t_nod} - pomak vrha tornja [m],
- m_t - modalna masa tornja koja se određuje kao zbroj mase tornja i mase gondole (uključujući rotor), uzimajući u obzir formu vibriranja konstrukcije, [kg],
- D_t - modalno prigušenje tornja, [Ns/m],
- C_t - modalni koeficijent elastičnosti tornja, [N/m] i
- F_t - sila potiska [N].

Sila potiska dobiva se slično aerodinamičkom momentu, uvođenjem koeficijenta učinkovitosti za silu potiska $C_t(\lambda, \beta)$ koji se eksperimentalno određuje za pojedinu vjetroturbinu:

$$F_t = C_t(\lambda, \beta) \cdot \frac{1}{2} \rho_z \pi R^2 v_{vj}^2. \quad (7)$$

Proračun sile potiska uklopljen je u aerodinamički model vjetroturbine. Uključenje efekta njihanja tornja u simulaciju ostvaruje se zamjenom brzine vjetra na ulazu u model vjetroturbine brzinom vjetra relativnom prema tornju.

III. MODEL VJETRA

Ulaze u model čine srednja brzina vjetra i intenzitet turbulencija koji se smatraju poznatima (mjerjenima ili prognoziranima), te podaci o prostornom rasporedu

vjetroturbina i vrsti terena. Izlaz ovog dijela modela čine vremenski nizovi $v_{hub}(t)$ za pojedine vjetroatregate koji predstavljaju brzine vjetra u točkama koje odgovaraju položaju glavčina vjetroturbina. Ovaj dio modela ne uzima u obzir postojanje vjetroatregata, već modelira vjetar u zadanim točkama prostora. Takvi signali vjetra moraju zadovoljavati određene spektralne karakteristike: autospektralne gustoće snage svakog vremenskog niza zasebno i međuspektralne gustoće snage koje odgovaraju kako iznosu koherencije između promatranih točaka prostora, tako i vremenskog pomaka u kretanju turbulencija kroz prostor.

U svrhu razmatranja njegovih karakteristika vjetar se može rastaviti na dvije komponente [1]:

- deterministička komponenta, ili *srednja brzina vjetra* – sporo promjenjiva komponenta, može se smatrati konstatnom u određenom vremenskom razdoblju i
- stohastička komponenta, ili *turbulencije* – promjenjiva komponenta srednje vrijednosti 0, normalne raspodjele i određenih spektralnih karakteristika.

U simulaciji se deterministička komponenta vjetra smatra poznatom (izmjenom) dok se stohastička generira tako da zadovolji opisane spektralne karakteristike. Za prvi red vjetroatregata prema vjetru turbulencije se generiraju tako da se generira jedna realizacija bijelog šuma koja se potom filtrira kako bi spektar odgovarao Kaimalovom spektru, [2]. Potom se tako dobiveni vjetar propagira kroz vjetroelektranu srednjom brzinom vjetra. U točkama koje odgovaraju vjetroturbinama tako dobivenom vjetru se dodaje inovacija u obliku filtriranog bijelog šuma kako bi međuodnos između vjetra na vjetroatregatima imao svojstva kroskorelacija opisanih u [1,2,5].

IV. MODEL VJETRA NA ROTORU

Model vjetra na rotoru bavi se efektima koje uzrokuje kretanje rotora kroz polje općenito različitih brzina vjetra. Izlaz ovog dijela modela je fiktivni vremenski niz koji se naziva ekvivalentnom brzinom vjetra, $v_{eq}(t)$. On se koristi kao ulaz u poznat model vjetroatregata [2.5]. Aerodinamički moment proračunat prema modelu vjetroatregata iz ovog ulaznog signala mora biti jednak stvarnom aerodinamičkom momentu kojeg generiraju različiti vjetrovi u različitim točkama kroz koje prolazi rotor. Zato ekvivalentna brzina vjetra mora opisati posljedice rotacijskog uzorkovanja pri vrtnji rotora, te integraciju brzina vjetra po duljinama lopatica koje efektivno stvaraju zakretni moment rotora.

Izlazna snaga vjetroatregata povećava se sa površinom rotora. Iz tog razloga se u vjetroelektranama upotrebljavaju vjetroturbine velikih rotora, tipično do 80 m u promjeru. Brzina vjetra se na tako velikoj površini ne može smatrati uniformnom iz više razloga [3,4,9]:

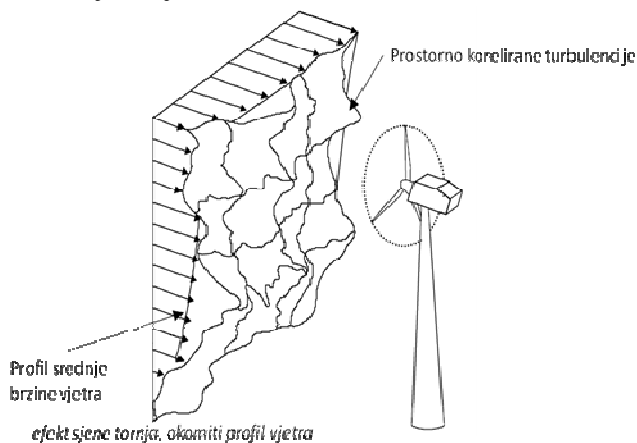
- turbulentna komponenta vjetra, iako prostorno korelirana, je u svakoj točki prostora različita,
- srednja brzina vjetra se mijenja sa visinom iznad zemlje, ovu pojavu opisuje tzv. *okomiti profil brzine vjetra*, te

- toranj vjetroagregata narušava (preusmjerava) glavni tok vjetra, te uzrokuje različitu srednju brzinu vjetra na različitim dijelovima površine rotora, ova pojava se naziva *efekt sjene tornja*.

Zadatak modela vjetra na rotoru je da generira vremenski niz brzina vjetra koji adekvatno opisuje prolazak lopatica rotora kroz površinu rotora. Površinom rotora se smatra skup točaka u kojima se može naći neki dio lopatice za vrijeme vrtnje rotora.

Modeliranje pojava na rotoru – rotacijsko uzorkovanje

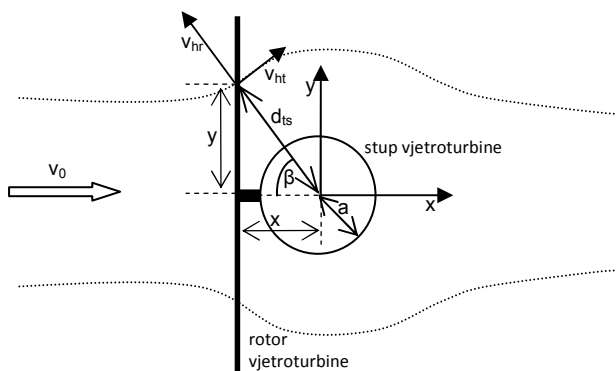
Svojom jednolikom vrtnjom lopatice prolaze kroz površinu rotora i time periodički uzorkuju vjetar u pojedinim točkama frekvencijom koja odgovara brzini vrtnje rotora. Kako promatrana vjetroturbina ima tri lopatice, vremenski niz u pojedinoj točki površine rotora bit će uzorkovan frekvencijom koja odgovara trostrukoj brzini vrtnje rotora. Ta pojava naziva se rotacijsko uzorkovanje (eng. *rotational sampling*) [4,9]. Ona uzrokuje generiranje spektralnog sadržaja aerodinamičkog zakretnog momenta rotora, kao i svih veličina koje iz njega proizlaze, na frekvencijama koje su višekratnici trostruke frekvencije vrtnje rotora.



Sl. 4. Prikaz polja brzina vjetra koje dolazi na vjetroturbinu.

Efekt sjene tornja

Vjetroturbine se danas tipično konstruiraju sa rotorom ispred tornja, gledano iz smjera dolaska vjetra. Toranj predstavlja prepreku koja deformira tok vjetra, kako iza tako i ispred sebe [1,9]. Brzina vjetra u smjeru glavnog toka se smanjuje, dok se povećava horizontalna komponenta brzine (Sl. 5.).



Sl. 5. Vjetroturbina gledana iz zraka.

V. MODEL DODATNE TURBULENCIJE

Za velike vjetroelektrane potrebno je razmotriti kako prisutnost drugih vjetroagregata utječe na glavni tok vjetra. Vjetroagregati predstavljaju fizičke zapreke toku vjetra, te time smanjuju srednju brzinu toka i povećavaju intenzitet turbulencije. Također, iza rotora svake vjetroturbine nastaje vrtlog koji dodatno narušava tok vjetra. Opisano je prosječno stanje toka vjetra u unutrašnjosti skupine vjetroagregata.

Utjecaj vjetroagregata na tok vjetra je moguće analizirati promatrajući ih kao elemente koji povećavaju hrapavost terena. Koristeći kao polazište zakon o geostrofičnoj ravnoteži, u [7] formalno je izveden izraz za srednju brzinu vjetra:

$$v_H = \frac{G}{1 + \ln\left(\frac{G}{f' h_H}\right) \frac{\sqrt{c_t + (\kappa / \ln(h_H / z_0))^2}}{\kappa}}$$

i dodatnu turbulenciju unutar vjetroelektrane:

$$I_{addwf} = \frac{\ln\left(\frac{G}{f' z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_H}{z_0}\right)} \cdot \frac{1}{\ln\left(\frac{G}{f' h_H}\right) + 0.64 \sqrt{s_r s_f / C_T}}$$

gdje je:

$$c_t = \frac{\pi C_T}{8 s_r s_f},$$

v_h - srednja brzina vjetra na visini glavčina vjetroturbina,

G - brzina geostrofičnog vjetra (vjetra uzrokovanog djelovanjem Coriolisove sile),

f' - Coriolisov parametar, $f' = (1.2 \cdot 10^{-4} \cdot e^4)$ na zemljopisnoj širini 55° ,

h_H - visina glavčina vjetroturbina,

z_0 - duljina hrapavosti terena,

κ - von Karmanova konstanta, $\kappa \approx 0.4$,

C_T - koeficijent potiska vjetroturbine,

s_r, s_f - prosječne udaljenosti između redova vjetroagregata i između pojedinih vjetroagregata u redu, normirane obzirom na promjer rotora vjetroturbina.

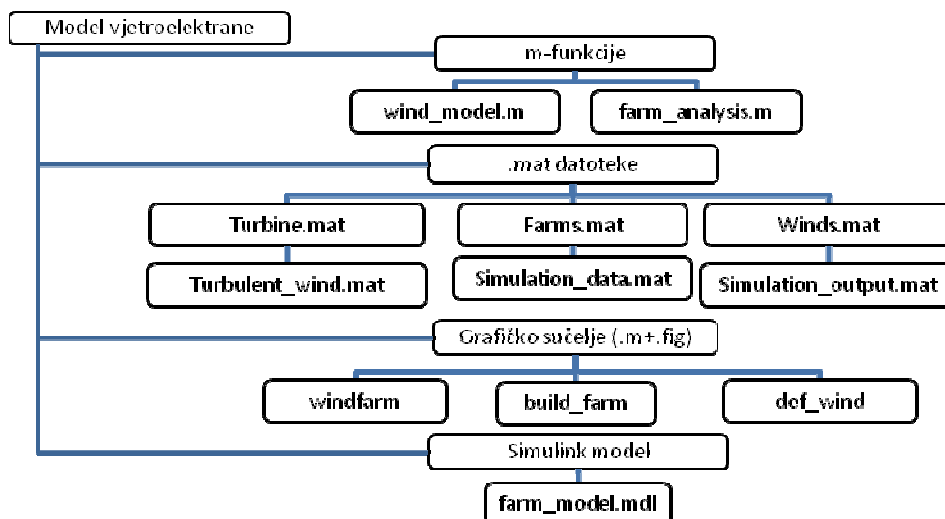
Navedeni izrazi nisu izvedeni za promjenu srednje brzine vjetra i promjene intenziteta turbulencija na visini rotora vjetroturbina, već na određenoj visini iznad vjetroelektrane, gdje poremećaji dostižu ravnotežno stanje.

Za modeliranje dodatne turbulencije se u [7] predlaže izraz:

$$I_{addwf} = \frac{0.36}{1 + 0.2 \sqrt{s_f s_r / C_T}}, \quad (11)$$

$$I_0^* = \frac{1}{2} (\sqrt{I_{addwf}^2 + I_0^2} + I_0), \quad (12)$$

gdje je:



Sl. 8. Grafičko sučelje za simulaciju vjetroelektrane.

I_0^* - intenzitet turbulencija unutar vjetroelektrane,
 I_0 - intenzitet turbulencija izvan vjetroelektrane, i
 I_{advf} - dodatna turbulencija unutar vjetroelektrane.

VI. MATLAB MODEL ZA SIMULACIJU VJETROELEKTRANE

Za razliku od modela vjetra na rotoru koji je preko informacije o brzini vrtnje rotora u sprezi sa modelom vjetroturbine, model vjetra je samostalan (ne koristi izlaze drugih dijelova modela). Također, to je jedini dio modela za koji je potrebna paralelna analiza svih vjetroturbina, odnosno paralelno generiranje podataka o svim vjetroturbinama. Zato je model vjetra implementiran unutar m-funkcije koja generira lokalni vjetar za sve vjetroturbine, dok se drugi dijelovi modela simuliraju za svaki pojedini vjetroagregat zasebno pomoću Simulink

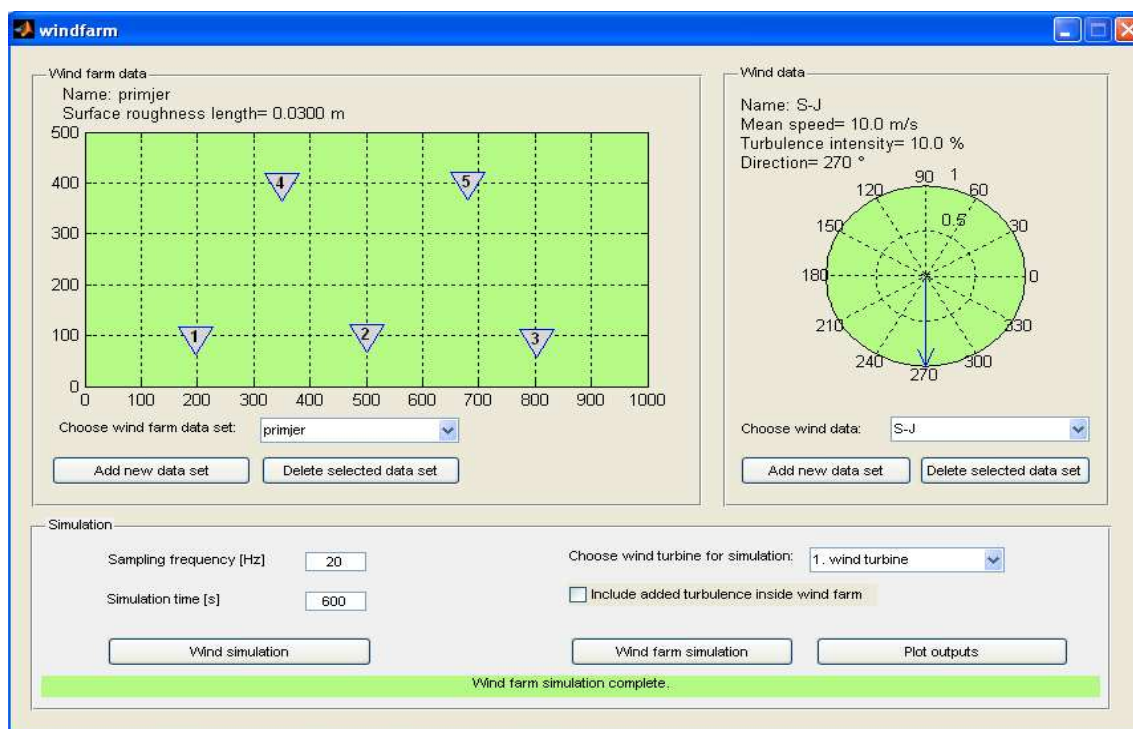
modela.

Shematski prikaz datoteka koje su sastavni dijelovi modela vjetroelektrane u Matlab programskom okruženju dan je na Sl. 8.

Grafičko sučelje - Windfarm

Izgled grafičkog sučelja koji opisuju funkcije *windfarm.m* i *windfarm.fig* prikazan je na Sl. 9. Prozor je podijeljen u panele Wind farm data, Wind data i Simulation.

Prilikom inicijalizacije čitaju se datoteke *Farms.mat* i *Winds.mat* i njihov sadržaj se postavlja u padajuće izbornike na panelima *Wind farm data*, odnosno *Wind data* kojima se odabire struktura 'farm', odnosno 'wind' koje se koriste u simulaciji.

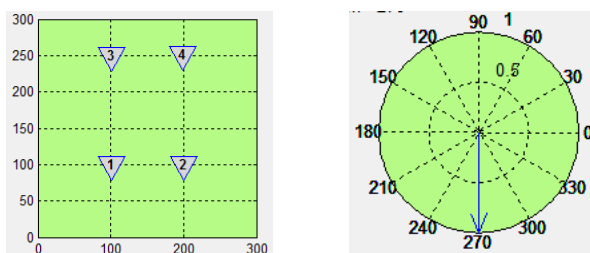


Sl. 9. Grafičko sučelje za simulaciju vjetroelektrane.

LITERATURA

Simulacijski rezultati

Simulacija je izvedena za konfiguraciju vjetroelektrane i smjer vjetra dane na Sl. 10. Zadana je duljina hrapavosti 0.005 m, srednja brzina vjetra 10 m/s, te intenzitet turbulencija 10%.



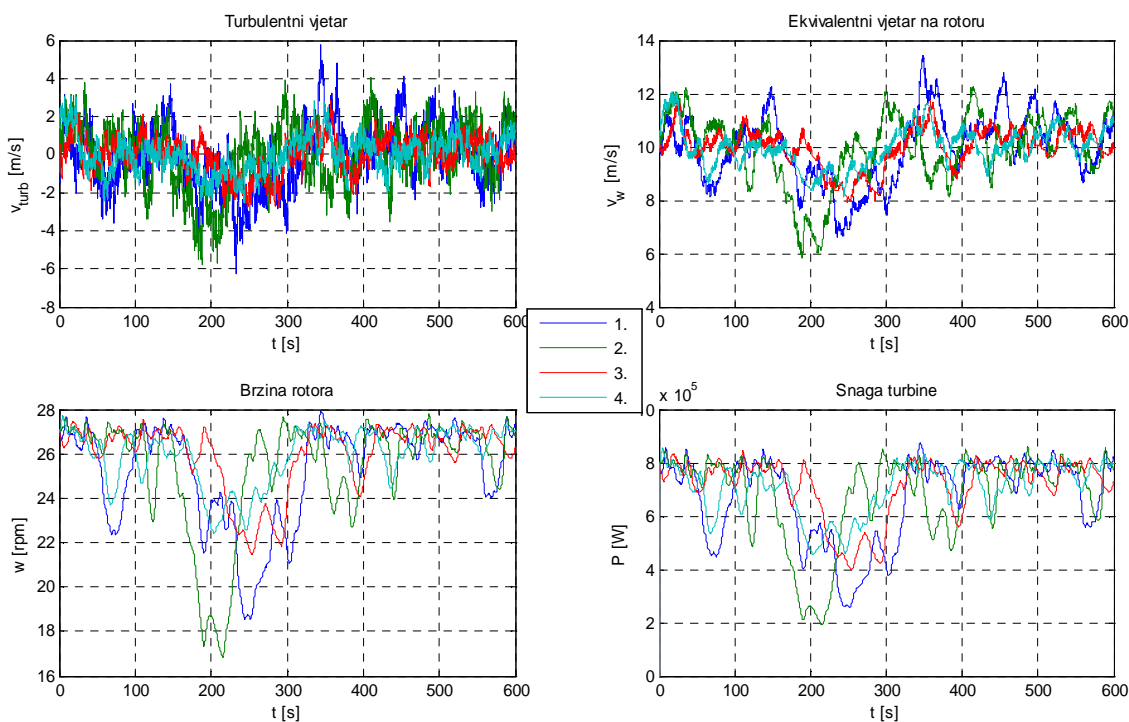
Sl. 10. Raspored vjetroagregata u vjetroelektrani i smjer vjetra.

Rezultati simulacije vjetroelektrane (turbulencije, ekvivalentni vjetar, brzina rotora, izlazna snaga pojedinih vjetroagregata) prikazani su na Sl. 11.

ZAHVALA

Ovaj rad je podržan FP7 projektom AEOLUS (voditelj FER tima: prof. dr. sc. N. Perić), NZZ projektom „Višekriterijsko upravljanje vjetroagregatom“ (voditelj: prof. dr. sc. N. Perić), i projektom 036-0361621-3012 MZOŠ Republike Hrvatske (voditelj: prof. dr. sc. N. Perić).

- [1] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins, E. Bossanyi: *Wind Energy Handbook*, John Wiley & Sons, 2001.
- [2] Poul Sørensen, Anca D. Hansen, Pedro André Carvalho Rosas: Wind models for simulation of power fluctuations from wind farms, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 90 (2002)., str. 1381-1402
- [3] W. Langreder, *Models for Variable Speed Wind Turbines*, M.Sc. Thesis, CREST Loughborough University and Risø National Laboratory, 1996.
- [4] Pedro Rosas, *Dynamic Influences of Wind Power on the Power System*, PhD thesis, Ørsted Institute, Risø National Laboratory & Brazilian Wind Energy Centre, 2003.
- [5] Poul Sørensen, *Frequency domain modelling of wind turbine structures*, Risø National Laboratory, 1994.
- [6] Anca D. Hansen, Poul Sørensen, Frede Blaabjerg, John Becho: Dynamic modelling of wind farm grid interaction, *Wind Engineering*, Volume 26, No. 4 (2002), str. 191-208
- [7] Sten Tronæs Frandsen, *Turbulence and turbulence generated structural loading in wind turbine clusters*, PhD thesis, Risø National Laboratory, 2007.
- [8] Mate Jelavić, Nedjeljko Perić: Wind Turbine Control for High Turbulent Winds, *Automatika*, Vol.50, No. 3-4 (2009), str. 135–151.
- [9] Dale S. L. Dolan, Peter W. Lehn, Simulation Model of Wind Turbine 3p Torque Oscillations due to Wind Shear and Tower Shadow, *IEEE transactions on energy conversion*, Vol. 21, No. 3 (2006), str. 2050-2057.
- [10] E. Hau, *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics*, Springer, Berlin, 2006.



Slika 11. Rezultati simulacije vjetroelektrane.