

Pregled i analiza analitičkih modela krive snage vjetroturbine sa stanovišta određivanja faktora iskorišćenja proizvodnih kapaciteta

Marko Ikić

Elektrotehnički fakultet
Univerzitet u Istočnom Sarajevu
Istočno Sarajevo, RS-BIH
marko.ikic@etf.unssa.rs.ba

Sadržaj—U ovom radu obrađena je problematika određivanja tj. procjene proizvodnje vjetroelektrane na osnovu različitih analitičkih modela krive snage vjetroturbine. Dat je pregled i prikazana analiza kako postojećih tako i predloženog modela krive snage sa stanovišta određivanja faktora iskorišćenja proizvodnih kapaciteta.

Ključne riječi – kriva snage; model; vjetroturbina; faktor iskorišćenja.

I. UVOD

Za efikasno planiranje i uspješno sprovođenje bilo kojeg projekta iz oblasti vjetroenergetike, od suštinskog značaja je poznavanje i razumijevanje samog procesa konverzije i iskorišćavanja energije vjetra. Kao glavni faktori koji utiču na procjenu proizvodnje energije iz vjetroelektrane su podaci o jačini (intenzitetu) vjetra i njegovoj dostupnosti na posmatanoj lokaciji, aerodinamičkoj efikasnosti upotrebene vjetroturbine te faktor pretvaranja energije u željeni oblik. Pošto je vjetar stohastički fenomen, brzina i pravac vjetra na lokaciji značajno variraju od sezone do sezone, tako da njegova raspodjela odnosno podatak o čestini javljanja brzina vjetra ima značajan uticaj pri analizi. Takođe, odabir vjetroturbine bi trebao da bude u skladu sa karakterističnim brzinama vjetra za datu lokaciju kako bi se obezbijedila maksimalna eksploatacija dostupane energije.

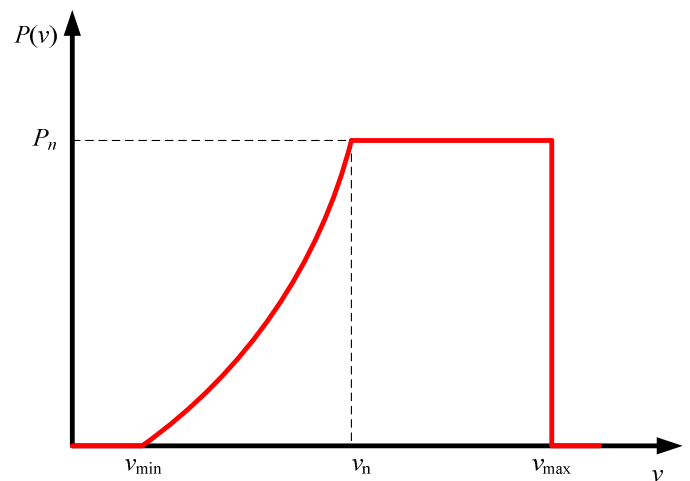
Danas, na tržištu je prisutno više različitih proizvođača vjetroturbina, koji u svojim specifikacijama pored podatka o naznačenoj snazi vjetroturbine nude i, najčešće, grafički prikaz krive snage. Pošto se grafički prikaz ne može jednostavno iskoristiti za procjenu proizvodnje, projektanti se gotovo uvijek služe tabelarnim prikazom krive snage vjetroturbine za različite gustine vazduha. Na osnovu takvih prikaza, moguće je formirati analitičke modele krive snage pomoću kojih se što vjerodostojnije izvršava procjena proizvodnje vjetroelektrane.

U ovom radu biće dat pregled nekoliko postojećih analitičkih modela krive snage [1]-[7], te predložen jedan novi model. Analiza proizvodnje energije odnosno određivanja faktora iskorišćenja proizvodnih kapaciteta putem datih modela će poslužiti kao verifikacija predstavljenih analitičkih modela.

II. PROCJENA PROIZVODNJE I KRIVA SNAGE VJETROTURBINE

Kriva snage predstavlja najvažniju eksploatacionu karakteristiku vjetroturbine koja pokazuje vrijednost izlazne snage pri određenoj brzini vjetra mjerenoj na osovini vjetroturbine. Tipičan primjer krive snage vjetroturbine je prikazan na Sl.1., sa koje se mogu uočiti četiri oblasti rada:

- $0 < v < v_{\min}$, oblast u kojoj je vjetroturbina zakočena zbog nedovoljne brzine vjetra,
- $v_{\min} < v < v_n$, radna oblast vjetroturbine u kojoj se stepen iskorišćenja održava na maksimumu,
- $v_n < v < v_{\max}$, radna oblast vjetroturbine u kojoj je izlazna snaga konstantna,
- $v > v_{\max}$, oblast u kojoj je vjetroturbina zakočena zbog prevelike brzine vjetra.



Slika 1. Tipičan primjer krive snage vjetroturbine

Za procjenu proizvodnje vjetroturbine od interesa je modelovanje radne oblasti u kojoj se stepen iskorišćenja održava na maksimumu pri određenoj brzini vjetra. Analitički

zapis krive snage predstavljene na Sl.1. može biti dat relacijom (1):

$$P(v) = \begin{cases} 0 & 0 < v < v_{\min} \\ p(v) & v_{\min} < v < v_n \\ P_n & v_n < v < v_{\max} \\ 0 & v > v_{\max} \end{cases} \quad (1)$$

gdje je: $p(v)$ – analitički model krive snage u nelinearnoj oblasti, P_n – naznačena snaga vjetroturbine, v_n – naznačena brzina vjetra (brzina vjetra pri kojoj se postiže P_n), v_{\min} – minimalna vrijednost brzine vjetra pri kojoj vjetroturbina predaje snagu, v_{\max} – maksimalna dozvoljena brzina vjetra pri kojoj vjetroturbina ostaje u pogonu.

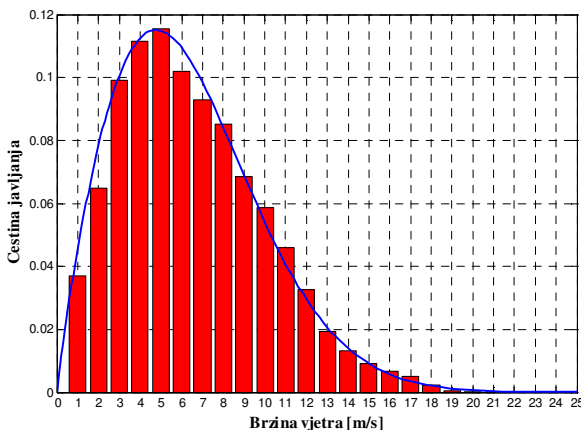
Pošto podatak o brzini vjetra nije dovoljan za procjenu proizvodnje, potrebno je poznavati i učestanost pojavljivanja brzine vjetra odnosno raspodjelu brzine vjetra na lokaciji za koju se planira izgradnja vjetroelektrane. Varijacija brzine vjetra na određenom području se obično opisuje dvoparametarskom Weibull-ovom funkcijom, predstavljenom relacijom (2):

$$f(v) = \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (2)$$

gdje je: k - faktor oblika, c - faktor skaliranja i v - brzina vjetra.

Primjer Weibull-ove raspodjele i čestina javljanja pojedinih brzina vjetra za određenu lokaciju prikazana je na Sl.2.

Na osnovu podatka o izabranom modelu krive snage vjetroturbine te podatka o učestanosti pojavljivanja brzine vjetra, za određenu lokaciju srednja vrijednost proizvodnje vjetroturbine može biti procjenjena relacijom (3), dok je faktor iskorišćenja proizvodnih kapaciteta dat relacijom (4).



Slika 2. Primjer Weibull-ove raspodjele brzine vjetra

$$P_{sr} = \int_0^{\infty} P(v) \cdot f(v) \cdot dv = \int_{v_{\min}}^{v_n} p(v) \cdot f(v) \cdot dv + P_n \cdot \int_{v_n}^{v_{\max}} f(v) \cdot dv \quad (3)$$

$$CPF = \frac{P_{sr}}{P_n} \quad (4)$$

Prosečni faktor iskorišćenja kapaciteta vetrogeneratora je u opsegu 20% do 40%, zavisno od stabilnosti vjetra, sposobnosti mreže da preuzme električnu energiju i od drugih meteoroloških i tehničkih parametara.

III. PREGLED ANALITIČKIH MODELA KRIVE SNAGE

U literaturi je predočeno nekoliko različitih tipova modelovanja nelinearnog dijela krive snage vjetroturbine na bazi analitičkih i empirijskih analiza. Najčešće korišćeni modeli su zasnovani na nekoj od sledećih zavisnosti: linearnoj, eksponencijalnoj, stepenoj itd. U nastavku dat je pregled nekoliko međusobno različitih modela krive snage.

A. Linearni model krive snage

Linearni model krive snage je proizašao iz uopštenog modela krive snage [6], predstavljenog stepenom funkcijom (5).

$$p(v) = a \cdot v^n + b \quad (5)$$

Koeficijenti a i b se određuju iz uslova da je izlazna snaga vjetroelektrane jednaka nuli pri brzini vjetra jednakoj v_{\min} i drugog, da je izlazna snaga jednaka naznačenoj pri brzini vjetra jednakoj naznačenoj. Dobijeni uopšteni model krive snage (6), u praksi se najčešće koristi kao linearni pri $n=1$ (7) i kao model za koji je stepen funkcije n jednak faktoru oblika k Weibull-ove funkcije određenog za datu lokaciju (8).

$$p(v) = P_n \cdot \frac{v^n - v_{\min}^n}{v_n^n - v_{\min}^n} \quad (6)$$

$$p(v) = P_n \cdot \frac{v - v_{\min}}{v_n - v_{\min}} \quad (7)$$

$$p(v) = P_n \cdot \frac{v^k - v_{\min}^k}{v_n^k - v_{\min}^k} \quad (8)$$

B. Aproksimacija krive snage polinomskom funkcijom

Ukoliko se kriva snage vjetroturbine aproksimira polinomskom funkcijom potrebno je voditi računa o odabiru reda polinoma kojim se aproksimira, jer je za određivanje

koeficijenta odabranog polinoma potrebno koristiti onaj broj tačaka koji odgovara $n+1$ redu polinoma (da bi sistem bio jednoznačno rješiv). Koeficijenti polinomske aproksimacije se najčešće određuju metodom najmanjih kvadrata i u praksi se najšire primjenjuje aproksimacija krive snage polinom drugog reda (9) [7].

$$p(v) = a \cdot v^2 + b \cdot v + c$$

$$a = \frac{2}{(v_{\min} - v_n)^2} \left[1 - 2 \cdot \left(\frac{v_{\min} + v_n}{2 \cdot v_n} \right)^3 \right]$$

$$b = \frac{1}{(v_{\min} - v_n)^2} \left[4 \cdot (v_{\min} + v_n) \cdot \left(\frac{v_{\min} + v_n}{2 \cdot v_n} \right)^3 - 3 \cdot v_{\min} - v_n \right]$$

$$c = \frac{1}{(v_{\min} - v_n)^2} \left[v_{\min} \cdot (v_{\min} + v_n) - 4 \cdot v_{\min} \cdot v_n \cdot \left(\frac{v_{\min} + v_n}{2 \cdot v_n} \right)^3 \right]$$
(9)

C. Eksponecijalni model krive snage

Eksponecijalni model krive snage najviše podsjeća na prirodnu karakteristiku promjene snage vjetra sa brzinom. Model je dat relacijom (10) [7]:

$$p(v) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_p \cdot (v^n - v_{\min}^n)$$
(10)

gdje je: ρ – gustina vazduha, A – površina koju zahvataju lopatice prilikom rotacije, C_p i n konstante.

D. Aproksimacija krive snage sinusnom funkcijom

Na osnovu grafičkih prikaza krivih snaga vjetroturbina različitih proizvođača došlo se na ideju da se aproksimacija krive snage izvrši prostom sinusnom funkcijom (11). Koeficijenti a , b i c se određuju iz uslova da je izlazna snaga vjetroelektrane jednaka nuli pri brzini vjetra jednakoj v_{\min} , da je izlazna snaga jednaka naznačenoj pri brzini vjetra jednakoj naznačenoj, te dodatnog (pretpostavljenog) uslova da je izlazna snaga jednaka polovini naznačene pri brzini vjetra koja odgovara polovini intervala nelinearne oblasti. Posljednji uslov je izabran na taj način da se što vjerodostojnije modeluje kriva snage, odnosno da se definiše prevojna tačka funkcije (11) koja bi što više odgovarala prevoju krive snage date od strane proizvođača. Na ovakav način se jednostavnim matematičkim aparatom može doći do relacija za koeficijente funkcije (11).

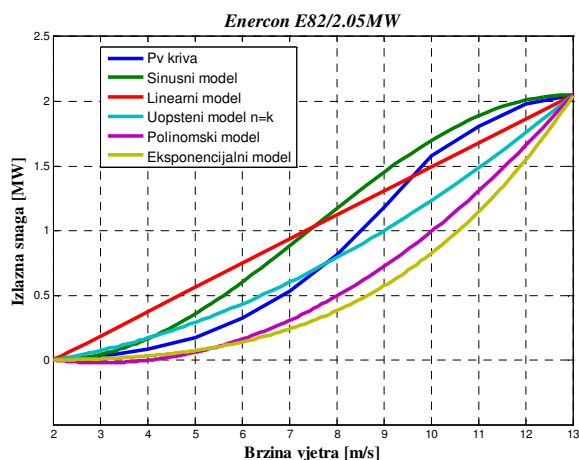
$$p(v) = a \cdot [1 + \sin(b \cdot v + c)]$$

$$a = \frac{P_n}{2}, \quad b = \frac{\pi}{v_n - v_{\min}}, \quad c = -\frac{\pi}{2} \cdot \frac{v_n + v_{\min}}{v_n - v_{\min}}$$
(11)

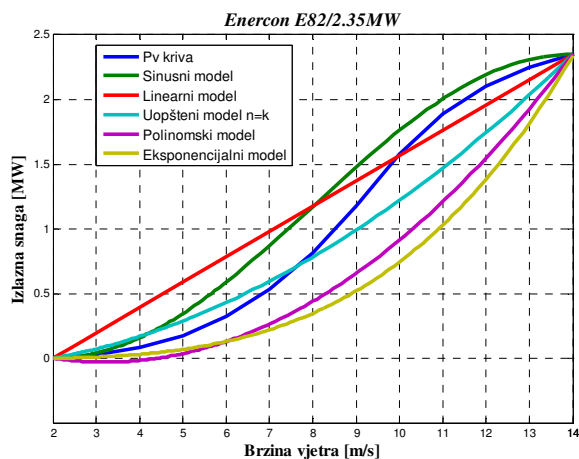
IV. ANALIZA MODELA SA STANOVIŠA ODREĐIVANJA FAKTORA ISKORIŠĆENJA KAPACITETA

U cilju sagledavanja razlika i efikasnosti predstavljenih modela krive snage izvršena je analiza u pogledu procjene proizvodnje energije vjetroelektrane odnosno određivanja faktora iskorišćenja kapaciteta. Sprovedena analiza je obuhvatila četiri različite vjetroturbine u pogledu nazivne snage i naznačenih brzina proizvođača *Enercon* [7] te realne (mjerene) podatke o brzini vjetra na određenoj lokaciji. Za sve vjetroturbine predviđeno je njihovo postavljanje na visini od 98m u pravcu duvanja vjetra. Ekstrapolacija brzina vjetra je urađena sa mjerene visine na visinu osovine vjetroturbine, dok se na Sl.1. može uočiti čestina javljanja i Weibull-ova raspodjela brzine vjetra. Parametri opisane Weibull-ove raspodjele potrebni pri analizi modela su: $k=1,87$ i $c=7,16$ m/s.

Na Sl.3., 4., 5. i 6. grafički su predstavljeni opisani modeli krive snage u nelinearnom dijelu karakteristike za četiri vjetroturbine različitih naznačenih brzina i snaga.



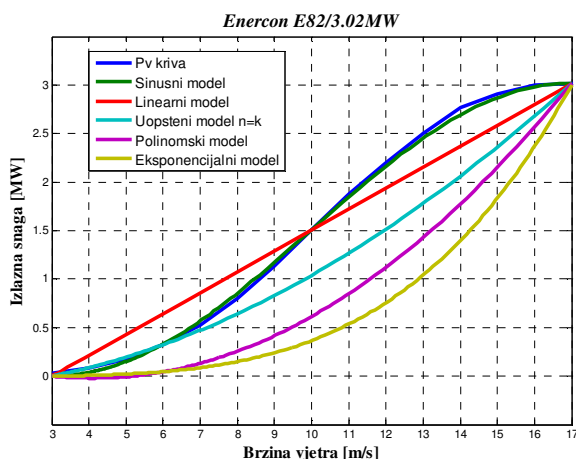
Slika 3. Grafički prikaz različitih modela krive snage za vjetroturbinu *Enercon E82/2.05MW*



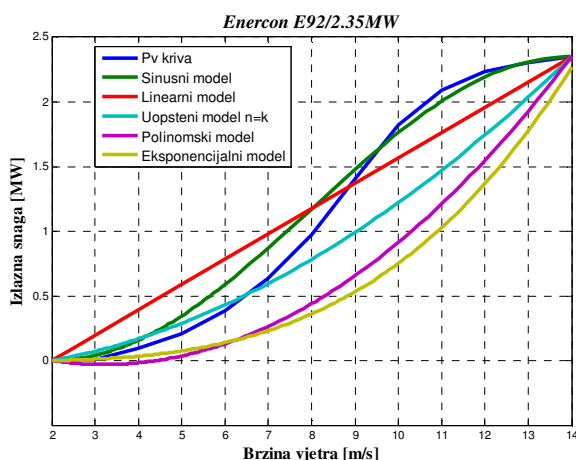
Slika 4. Grafički prikaz različitih modela krive snage za vjetroturbinu *Enercon E82/2.35MW*

Na svim slikama plavom bojom je označena kriva snage vjetroturbine data od strane proizvođača dok su zelenom i svjetlo plavom bojom označeni modeli krivih snaga koji su po svom obliku najpribližnji proizvođačevoj krivoj tj. sinusni i uopšteni model ($n=k=1,87$), respektivno.

Rezultati analize dati su u Tabeli I, gdje su pored procijenjenih faktora iskorišćenja i vremena trajanja iskorišćenja maksimalne snage τ , predstavljeni i rezultati dobijeni preko softverskog alata *WAsP Turbine Editor* [9], koji su poslužili kao referentne vrijednosti pri određivanju greške u procjeni.



Slika 5. Grafički prikaz različitih modela krive snage za vjetroturbinu Enercon E82/3.02MW



Slika 6. Grafički prikaz različitih modela krive snage za vjetroturbinu Enercon E92/2.35MW

Na osnovu dobijenih rezultata procjene faktora iskorišćenja za različite vjetroturbine, određene su relativne greške koje pokazuju koliko odstupanje prave dati modeli u procjeni. Iz Tabele II jasno se vidi da uopšteni model sa $n=k$ i predloženi sinusni model prave najmanja odstupanja u pogledu procjene faktora iskorišćenja od ostalih. Za vjetroturbine sa manjom naznačenom snagom, nižom naznačenom brzinom te manjim

prečnikom kruga kojeg opisuju lopatice pri vrtnji odgovara uopšteni model ($n=k$), dok za vjetroturbine sa većom naznačenom snagom, višom naznačenom brzinom i većim prečnikom kruga kojeg opisuju lopatice pri vrtnji odgovara predloženi sinusni model. Takođe, sa slika na kojima su predstavljeni grafici krive snage vjetroturbine može se primjetiti da je predloženi sinusni model pogodniji za procjenu proizvodnje vjetroelektrana u odnosu na ostale, na lokacijama koje obiluju vjetropotencijalom tj. na vjetrovitijim lokacijama ($v_n = 15 - 18$ m/s).

TABELA I. PREGLED KARAKTERISTIČNIH VELIČINA RAZLIČITIH TIPOVA VJETROTURBINE PROIZVOĐAČA ENERCON I REZULTATI ANALIZE MODELA SA STANOVIŠTA ODREĐIVANJA FAKTORA ISKORIŠĆENJA

		Tip vjetroturbine (proizvođač Enercon [8])			
		E82/2.05	E82/2.35	E82/3.02	E92/2.35
P_n [MW]		2,05	2,35	3,02	2,35
v_{min} [m/s]		2	2	3	2
v_n [m/s]		13	14	17	14
v_{max} [m/s]		25	25	25	25
WAsP	CPF [%]	29,9	27	21,3	30,3
	τ [h]	2618,8	2367,4	1868,5	2654,3
Sinusni model	CPF [%]	37,1	33,6	21,3	33,5
	τ [h]	3246,6	2939,2	1866,4	2939,2
Linearni model	CPF [%]	39,3	36,3	25,3	36,3
	τ [h]	3440,8	3181,6	2212,2	3181,6
Uopšteni model ($n=k$)	CPF [%]	29,2	25,8	16,8	25,8
	τ [h]	2553,3	2257,2	1468,5	2257,2
Polinomski model	CPF [%]	20,3	16,7	9,2	16,7
	τ [h]	1775,5	1459,4	808,3	1459,4
Eksponecijalni model	CPF [%]	18,4	15,3	6,8	15,5
	τ [h]	1609,1	1342,8	597,2	1355,5

TABELA II. RELATIVNA GREŠKA U PROCJENI FAKTORA ISKORIŠĆENJA

	E82/2.05	E82/2.35	E82/3.02	E92/2.35
Sinusni model	-24,1%	-24,4%	0,0%	-10,6%
Linearni model	-31,4%	-34,4%	-18,8%	-19,8%
Uopšteni model ($n=k$)	2,3%	4,4%	21,1%	14,9%
Polinomski model	32,1%	38,1%	56,8%	44,9%
Eksponecijalni model	38,5%	43,3%	68,1%	48,8%

V. ZAKLJUČAK

U ovom radu dat je pregled i analiza nekoliko različitih analitičkih modela krive snage vjetroturbine. Efikasnost u pogledu procjene faktora iskorišćenja kapaciteta putem datih modela je analizirana na primjeru četiri različita tipa vjetroturbine. Na osnovu rezultata analize poređenja procjenjene vrijednosti faktora iskorišćenja i stvarne (dobijene upotrebom *WAsP*-a), došlo se do zaključka da predloženi sinusni model i uopšteni model, za koji je koeficijent n jednak faktoru oblika Weibull-ove raspodjele brzine vjetra za datu lokaciju, ostvaruju najbolje rezultate odnosno greška pri procjeni faktora iskorišćenja je najmanja u odnosu na ostale modele. I pored ovoga, imajući u vidu rezultate proračuna greške u procjenu faktora iskorišćenja, ovakvi modeli ne bi mogli da se koriste za pouzdanu procjenu proizvodnje vjetroelektrane. Budući rad će imati za cilj iznalaženje modela krive snage na bazi sinusnih funkcija koje bi odgovorile prethodnom zahtjevu odnosno određivanju pouzdanije procjene proizvodnje vjetroelektrane.

LITERATURA

- [1] Sathyajith Mathew, Wind Energy, Fundamentals, Resource Analysis and Economics, Springer 2008.
- [2] F. Trivellato, L. Battisti, G. Miori, "The ideal power curve of small wind turbines from field data," Elsevier, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 107–108 (2012) 263–273.
- [3] Seyit Ahmet Akdağlı, Önder Güler, "Comparison of Wind Turbine Power Curve Models," International Renewable Energy Congress IREC-2010, November 5-7, 2010 – Sousse, Tunisia
- [4] M. Lydia, S. Suresh Kumar, A. Immanuel Selvakumar, G. Edwin Prem Kumar, "A comprehensive review on wind turbine power curve modeling techniques," Elsevier, Renewable and Sustainable Energy Reviews 30 (2014) 452–460.
- [5] Abhik Kumar Das, An empirical model of power curve of a wind turbine, © Springer-Verlag Berlin Heidelberg, March 2014.
- [6] Tian-Pau Chang, Feng-Jiao Liu, Hong-Hsi Ko, Shih-Ping Cheng, Li-Chung Sun, Shye-Chorng Kuo, "Comparative analysis on power curve models of wind turbine generator in estimating capacity factor," Elsevier, Energy 73 (2014) 88-95.
- [7] C. Carrillo, A. F. Obando Montano, J. Cidras, E. Diaz-Dorado, "Review of power curve modelling for wind turbines," Elsevier, Renewable and Sustainable Energy Reviews 21 (2013) 572–581.
- [8] <http://www.enercon.de>, januar 2015.
- [9] <http://www.wasp.dk>, januar 2015.

ABSTRACT

The problem of estimating the wind generator production based on different analytical power curve models is given in this paper. A brief review and analysis of both existing and proposed power curve models are done in case of determining capacity factor.

REVIEW AND ANALYSIS OF ANALYTICAL POWER CURVE MODELS IN CASE OF ESTIMATING CAPACITY FACTOR

Marko Ikić