

PROTOTIPSKO REŠENJE MALE AEROCENTRALE SNAGE 10 KW

PROTOTYPE SOLUTION OF 10 KW WIND TURBINE

Jovičić, N.¹, Gordić, D.², Babić, M.³, Darijević, K.⁴

REZIME

U ovom radu je prikazana metodologija za proračun i projektovanje vitalnih elemenata malih osnohorizontalnih aerocentrala. Korišćenjem razvijenog originalnog softvera za modeliranje geometrije lopatica radnog kola kao i softverskog paketa CATIA, projektovana je i prikazana aerocentrala snage 10 kW. Imajući u vidu stanje na svetskom tržištu kao i mogućnosti naše privrede, u ovom radu je, takođe, izvršena tehnno-ekonomska analiza opravdanosti uvođenja u proizvodnju ovih uređaja.

Ključne reči: energija vetra, aerocentrala, projektovanje i modeliranje

SUMMARY

In this paper, it is showed a methodology for calculation and design of the main components of small horizontal-axis wind turbine. Using developed software for geometrical modelling of wind turbines, as well as CAD package CATIA, the prototype of small wind turbine, rated power 10 kW, was designed and presented here. Also, having in mind world market as well as potential of our industry for manufacturing small wind turbine, in this paper, simplified techno-economic feasibility study is carried out.

Key words: wind energy, wind turbine, design & modelling

UVOD

Obnovljivi izvori energije svakim danom postaju sve aktelniji kako na ekološkom tako i na ekonomskom planu. Pad cene kilovatčasa električne energije dobijene iz energije vetra na 3-5 centi, doveo je do snažnog razvoja industrije koja prati proizvodnju opreme za aerocentrale. U Evropi je u 2003. godini zabeležen rast od 23% u proizvodnji električne energije korišćenjem vetra (instalirano novih 28.440 MW). Kako su potencijali energije vetra u Republici Srbiji značajni [1], otuda su interesantna istraživanja na razvoju malih aerocentrala, snage 5-10 kW, prevashodno zbog mogućnosti domaćeg tržišta. Takođe, iskustva stečena u razvoju i

¹ Dr Nebojša Jovičić, docent, Mašinski fakultet Kragujevac, Sestre Janjić 6, 34000 Kragujevac, njovicic@kg.ac.yu

² Dr Dušan Gordić, docent, Mašinski fakultet Kragujevac, Sestre Janjić 6, 34000 Kragujevac

³ Prof. dr Milun Babić, Mašinski fakultet Kragujevac, Sestre Janjić 6, 34000 Kragujevac

⁴ Kazimir Darijević, Zastava hidroelektrane, d.o.o, Trg Topolivaca 1, 34000 Kragujevac

eksploataciji malih agregata, od neprocenjive su koristi u osvajanju megavatnih postrojenja. Male aerocentrale su energetske sistemi klasifikovani kao mašine sa snagama od nekoliko vati do 20 kW. Osnovna namena ovih agregata je snabdevanje električnom energijom udaljenih domaćinstava i objekata koji su van dometa elektrodistributivne mreže. Takođe, male aerocentrale se mogu koristiti i pri paralelnom radu sa elektrodistributivnom mrežom. Pored proizvodnje električne energije, ovi uređaji se mogu vrlo uspešno koristiti i za direktan pogon radnih organa uređaja za vodosnabdevanje udaljenih objekata kao i navodnjavanje poljoprivrednih dobara. Dakle, oblast primene malih aerocentrala je jako velika, bilo da se koriste samostalno ili u kombinaciji sa nekim drugim izvorom energije. Stepenn iskorišćenja aeroturbine je dosta nizak, i teoretski u idealnim uslovima, ne prelazi vrednost od 0.593, što se u literaturi naziva i Betz-ovim limitom [2]. Da bi se postigla što veća efikasnost aeroturbine, posebna pažnja se mora posvetiti geometriji radnog kola. Ovaj organ u dinamičkoj interakciji sa vazduhom dovodi do transformacije strujne energije vazduha u mehaničku energiju obrtanja radnog kola i u najvećoj meri utiče na stepenn iskorišćenja. U literaturi se mogu naći različiti pristupi i modeli za definisanje optimalne geometrije radnog kola aeroturbine koji se uglavnom zasnivaju na jednodimenzijalnim modelima [3]. Takođe, optimizacija geometrijskih parametara radnog kola se može sprovesti korišćenjem modernih numeričkih metoda [4,5,6] i uz angažovanje snažne proračunske infrastrukture. Cilj ovog rada je bio da se formira jednostavan i efikasan numerički algoritam za geometrijsko modeliranje radnog kola malih aeroturbina. Takođe, težilo se ubrzavanju i automatizaciji procesa projektovanja lopatičnog organa kroz primenu modernih CAD alata.

MATEMATIČKI MODEL

Matematički model za proračun radnog kola aeroturbine uslovno se može podeliti na dva dela. Prvi deo obuhvata sagledavanje globalnih gabarita radnog kola i baziran je na izrazu za snagu vetra koji prođe kroz neki presek A:

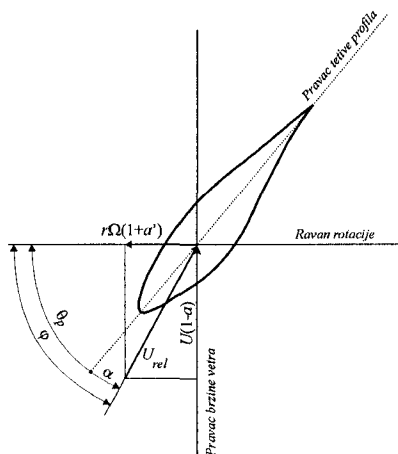
$$P_0 = \frac{1}{2} \rho U_0^3 A, \quad (1)$$

pri čemu je sa ρ - označena gustina vazduha a sa U_0 - brzina vetra. Ako sa P - označimo nominalnu snagu aeroturbine, tada je:

$$P = P_0 \eta \eta_m = C_p P_0. \quad (2)$$

U pethodnom izrazu η je ukupni stepenn korisnosti aeroturbine, η_m - mehanički stepenn korisnosti multiplikatora broja obrtaja, a C_p je koeficijent snage aeroturbine koji se kod malih aeroturbina može kretati maksimalno do 0.45 [7]. Na osnovu definisane nominalne snage aeroturbine, brzine vetra i izabranog koeficijenta snage mogu se preračunati maksimalni prečnik ($D_2 = 2 R_2$) i prečnik glavčine aeroturbine. Usvojena koncepcija (položaj ose i broj lopatica radnog kola) diktira optimalnu brzohodost aeroturbine (λ) kao odnosa između obimske brzine vrhova lopatica radnog kola i brzine vetra. Ova vrednost je za radna kola sa tri lopatice ($B = 3$) u granicama od 3-7 i mora se eksperimentalno verifikovati. Imajući prethodno u vidu, broj obrtaja (n) radnog kola aeroturbine se može definisati preko sledeće relacije:

$$n = \frac{30 \lambda U}{R_2 \pi}, \quad (3)$$



Oznake na slici:

θ_p : Ugao postavljanja profila na radijusu r

α : Napadni ugao

$\varphi = \theta_p + \alpha$: Ugao relativne struje vazduha

$U(1-a)$: Apsolutna brzina vazduha u radnom kolu

U_{rel} : Relativna brzina vazduha u radnom kolu

$r\Omega(1+a')$: Obimska brzina vazduha u radnom kolu

a : aksijalni indukcioni faktor

a' : ugaoni indukcioni faktor

Ω : ugaona brzina obrtanja radnog kola

Sl. 1. Deo profilne rešetke radnog kola osno-horizontalne aeroturbinе

Fig. 1. Part of the profile bars on the working wheel of the axial-horizontal aer turbine

Poznavanjem glavnih dimenzija i broja obrtaja radnog kola kao i nominalne snage aeroturbinе može se ući u drugi deo modela koji se odnosi na definisanje prostorne geometrije lopatice, odnosno uglova postavljanja profila. Prvi korak koji se mora učiniti je izbor adekvatnog aeroprofila za definisanje lopatice. U tom cilju izabran je profil S809 koji je specijalno projektovan za radna kola malih i srednjih aeroturbinа [8]. Da bi se omogućilo optimalno prostorno postavljanje profila, moguće je koristiti metodologiju kombinovanja teorije količine kretanja i tzv., BEM metoda [9]. Shodno usvojenom pristupu, na slici 1., prikazan je deo geometrije proizvoljne profilne rešetke radnog kola aeroturbinе.

U cilju geometriskog modeliranja lopatice idealnog radnog kola (ostvarivanje maksimalnog koeficijenta snage C) zanemareni su uticaji: rotacije zone iza radnog kola, konačnog broja lopatica i aerodinamičkog otpora usvojenog profila. Koristeći gore navedeni pristup može se doći do izraza za preliminarni oblik lopatice radnog kola aeroturbinе [10], iskazan preko relacija za ugao postavljanja profila $\theta_p(r)$ i dužinu tetive profila $c(r)$:

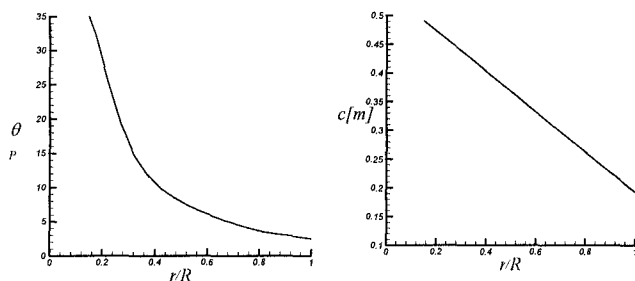
$$\theta_p(r) = \tan^{-1}\left(\frac{2}{3\lambda_r}\right) - \alpha_{\min(Cd/Cl)}, \quad c(r) = \frac{8\pi r \sin \varphi}{3BC_l \lambda_r}. \quad (4)$$

U prethodnim izrazima λ_r je lokalni koeficijent brzohodosti, a $\alpha_{\min(Cd/Cl)}$ je napadni ugao profila koji garantuje minimalan vrednost odnosa koeficijenta otpora i koeficijenta uzgona izabranog profila. Lopatice projektovane za slučaj optimalne transformacije energije vetra imaju značajan porast dužine tetive i ugla postavljanja profila u blizini korena lopatice. Budući da se u procesu modeliranja lopatica malih aeroturbinа naročito vodi računa i o ceni i mogućnosti izrade, često se vrši naknadno modifikovanje gore navedenih parametara. U svakom slučaju, prikazani algoritam modeliranja geometrije lopatica obezbeđuje jasan uvid u oblike lopatica koji bi bili najpoželjniji sa stanovišta efikasnosti aeroturbinе.

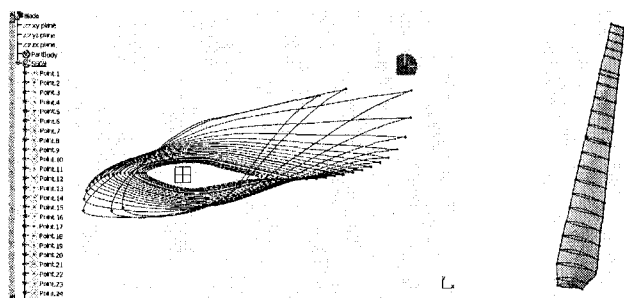
PRIMENA NUMERIČKOG ALGORITMA

Na osnovu prethodno definisanog matematičkog modela, formiran je softver za proračun

prostorne geometrije radnog kola aeroturbine. Ovaj softver je primenjen za proračun aeroturbine snage 10 kw. Kao projektni parametri usvojena je proračunska brzina vetra od 10 m/s, i koncepcija radnog kola sa tri lopatice. Na slici 2 prikazana je dobijena raspodela ugla postavljanja profila kao i raspodela dužine profila u funkciji radijalnog položaja.



Sl. 2. Raspodela a) ugla postavljanja profila; b) dužine tetive profila
Fig. 2. Distribution of a) angle of setting of profile; b) length of profile chord



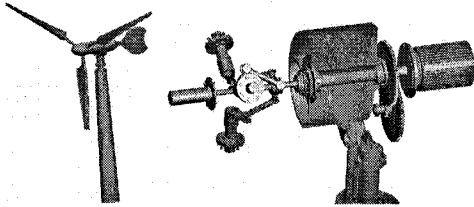
Sl. 3. CATIA 3D model lopatice radnog kola
Fig. 3. CATIA 3D model of the working wheel paddle

Na slici 3 prikazan je prostorni izgled razvijene lopatice formiran u softverskom paketu CATIA. Za formiranje ovog 3D modela na raspolaganju je bilo blizu 2000 tačaka. Kako bi se automatizovao postupak, koordinate tačaka su iz proračunskog modula, učitane u EXCEL a zatim primenom odgovarajućih makroa, iskorišćene za formiranje žičanog modela u modulu CATIA Wireframe&Surface Design [11]. Kao što se na 3D modelu vidi, deo lopatice u blizini glavčine je naknadno modifikovan kako bi se se postigla veća čvrstina lopatice u korenu.

3D MODEL PROTOTIPA AEROCENTRALE

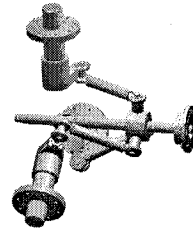
Prototip aerocentrale snage 10kW na nivou virtualnog 3D modela razvijen je u programskom paketu CATIA. Kao što se na slici 4 vidi, usvojena je koncepcija horizontalno osne aeroturbine sa tri lopatice. Prečnik radnog kola je 8 m, a pri broju obrtaja 100 o/min i brzini vetra od 10 m/s postiže se projektovana snaga od 10 kW.

Aerocentrala globalno ima tri stepena slobode. Lopatice radnog kola se pod dejstvom kinetičke energije vazduha obrću oko horizontalne ose, čime se stvaraju uslovi za iskorišćenje strujene energije vetra. U cilju, optimalnog korišćenja energetskog potencijala vetra, aeroturbina se može obrtati i oko vertikalne ose nosećeg stuba. Na ovaj način, uz pomoć repnog usmerivača, radno kolo se uvek postavlja normalno na pravac nadolazeće struje vazduha. Ova dva kretanja, odnosno obrtanja, smatraju se glavnim stepenima slobode svake aeroturbine.



Sl. 4. Virtualni 3D prototip aerocentrale snage 10 kW

Fig.4. Virtual 3D prototype of the aero electric power station of 10 kW



Sl. 5. Mehanizam za zakretanje lopatica

Fig. 5. Mechanism for paddle turning

Treći stepen slobode razvijenog prototipa aeroturbinе odnosi na mogućnost zaokretanja lopatica radnog kola oko odgovarajuće radialne ose. Naime, veliki problem u eksploataciji aerocentrala je zaštita uređaja od negativnog dejstva prevelike brzine vetra. Da bi se eliminisalo preveliko opterećenje na radno kolo aeroturbinе, posredstvom mehanizma prikazanog na slici 5, u uslovima brzine vetra veće od 12 m/s ugao postavljanja lopatica se povećava. Konceptcija ovakvog uređaja je karakteristična za aeroturbinе veće snage i njegova primena može donekle da poveća cenu agregata. Međutim prihvatanje mehanizma za zakretanje lopatica kao zaštite aerocentrala od razletanja lopatica je posledica dobrih karakteristika koje je mehanizam pokazao u eksploataciji malih hidrocentrala projektovanih na Mašinskom fakultetu u Kragujevcu.

Prototip prikazan na slici 4, povezan je preko multiplikatora broja obrtaja sa generatorom električne energije. Pri izboru šeme multiplikator-generator, vodilo se računa o mogućnosti da kompletna aerocentrala bude domaći proizvod, bez potrebe uvoza pojedinih komponenta.

TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA

Male aerocentrale (snage do 10 kW) prvenstveno su namenjene udaljenim domaćinstvima i objektima koji su izvan dometa prenosne elektrodistributivne mreže. Imajući u vidu da se u takvim objektima električna energija najčešće dobija pomoću dizel agregata, energetske efekti su značajni kako zbog cene tako i zbog mogućih poteškoća oko dopreme goriva na udaljene lokacije. Sa druge strane, male aerocentrale se mogu koristiti i u domaćinstvima i objektima, u zonama pokrivenosti prenosne mreže, na povoljnim vetrovitim lokalitetima. U tom slučaju bi aerocentrala radila paralelno sa prenosnom mrežom i sve viškove proizvedene električne energije stavljala na raspolaganje jedinstvenom elektroprivrednom sistemu Srbije.

Na svetskom tržištu cene malih aerocentrala (10÷20 kW) relativno su visoke. Američke firme Bergey Windpower i Bay Winds u svom proizvodnom programu imaju male aerocentrale a cene su u rasponu od 28.000÷40.000\$ [12,13]. Firma Bergey Windpower je najveći svetski proizvođač malih aerocentrala i ima realizovano tržište u 90 zemalja sveta.

Ukoliko se pretpostavi da aerocentrala snage 10 kW radi projektovanim kapacitetom samo 20% vremena (što prevashodno zavisi od lokaliteta), godišnje bi se proizvelo oko 20.000 kWh električne energije. Sa cenom električne energije od 0.05 \$/kWh ostvarivao bi se prihod ili

energetske uštede od oko 1.000 \$/god (ovi energetske efekti su značajniji a uštede veće ako se za proizvodnju električne energije koristi dizel gorivo). Na osnovu analize i uvida u svetske cene malih aerocentrala i stanja na našem tržištu, mišljenja smo da bi proizvođačka cena prototipa aerocentrale snage 10 kW bila 12000 – 13000\$, odnosno 20-30 % manje u uslovima serijske proizvodnje. Imajući u vidu prethodnu analizu, nameće se zaključak da u našim uslovima vreme povraćaja investicije treba očekivati u periodu od oko 10 godina. Traba naglasiti da se uložena sredstva mogu povratiti kroz ostvarenu energetske uštedu ili kroz naplatu proizvedene električne energije.

Tabela 1.

Pretpostavke:		Godišnji tok novca					
Ukupna investicija (\$):	\$10.000		Proizv.			God.	Total Cash
		God.	energija	Odrzav.	Kredit	prihod	Flow
						(\$5.000)	(\$5.000)
Godišnja proizvodnja (kWh):	20.000						
Cena el. energije (\$/kWh):	\$0,0500	0					
Inflacija el. energije (%):	2						
Sopstvena sredstva (%):	50	1	\$1.000	\$0	(\$994)	\$6	(\$4.994)
Iznos sopstv. sredstava \$):	\$5.000	2	\$1.020	\$0	(\$994)	\$26	(\$4.969)
Kredit (\$):	\$5.000	3	\$1.040	\$0	(\$994)	\$46	(\$4.923)
Kamatna stopa (%):	6	4	\$1.061	\$0	(\$994)	\$67	(\$4.856)
Period vraćanja kredita (g.):	6	5	\$1.082	\$0	(\$994)	\$88	(\$4.768)
Održavanje (\$/kWh):	\$0,005	6	\$1.104	(\$116)	(\$994)	(\$6)	(\$4.774)
Inflacija usluga održav. (%):	3	7	\$1.126	(\$119)	\$0	\$1.007	(\$3.767)
		8	\$1.149	(\$123)	\$0	\$1.026	(\$2.742)
		9	\$1.172	(\$127)	\$0	\$1.045	(\$1.697)
		10	\$1.195	(\$130)	\$0	\$1.065	(\$632)
		11	\$1.219	(\$134)	\$0	\$1.085	\$453
		12	\$1.243	(\$138)	\$0	\$1.105	\$1.558

U Tabeli 1, dat je deo jednostavnog i uprošćenog prikaza toka novca (Cash Flow) za slučaj investiranja u aerocentralu snage 10 kW, vrednosti 10.000\$. Razmatrana je varijanta u kojoj se polovina novca (5000 \$) obezbeđuje preko šestogodišnjeg kredita (banka, Agencija za energetske efikasnost, ..) a polovina iz sopstvenih sredstava (5000\$). Na osnovu priložene analize vidi se da je u toku prvih šest godina (kada se izmiruju obaveze prema zajmodavcu) godišnja vrednost proizvedene električne energije veća ili na nivou iznosa kredita. Ova činjenica je značajna jer investitor u tom periodu (prvih šest godina) ima angažovana samo sredstva sopstvenog kapitala. Period povraćaja investicije je na nivou od deset godina, a s obzirom na relativno nisku cenu održavanja aerocentrale, dalja proizvodnja električne energije je izrazito profitabilna.

ZAKLJUČAK

U radu je prikazan razvijeni numerički algoritam za geometrijsko modeliranje lopatica radnog kola horizontalne-osne aeroturbine. Korišćenjem elemenata teorije količine kretanja i tzv. BEM metode, formiran je relativno jednostavan ali i efikasan metod za projektovanje malih aeroturbina. Razvijeni algoritam je iskorišćen za proračun glavnih dimenzija aeroturbine snage 10 kW. Pri projektovanju snažnijih aerocentrala, ulaganja su znatno veća, pa je od posebne važnosti maksimizovanje iskorišćenja. Otuda, kao nastavak ovih istraživanja pokrenut je i razvoj modela za predviđanje radnih karakteristika aeroturbine u različitim režimima eksploatacije, kako bi se u jednom zatvorenom ciklusu izvršilo i projektovanje i optimizacija geometrije radnog kola.

Na osnovu izložene kratke i jednostavne tehno-ekonomske analize može se zaključiti da ima mesta očekivanju da bi aerocentrale malih snaga mogle da budu interesantan proizvod za domaćeg kupca. Takođe, imajući u vidu mogućnosti naše privrede, realno je očekivati da se kompletna konstrukcija aerocentrale može realizovati u domaćim preduzećima. Ova činjenica je značajna kako zbog mogućnosti angažovanja domaćih kapaciteta tako i zbog moguće konkurentnosti ovog proizvoda na stranom tržištu. Serijska proizvodnja i monitoring u procesu eksploatacije aerocentrala malih snaga, omogućili bi sticanje iskustava (proizvođača i istraživača) neophodnih u procesu razvoja i projektovanja većih i profitabilnijih agregata.

Napomena:

Deo sprovedenih istraživanja, prikazanih u ovom radu, finansirani su od strane Ministarstva za nauku i zaštitu životne sredine, Nacionalnog programa za energetska efikasnost, kroz realizaciju projekta "Razvoj i izrada pilot postrojenja mini aerocentrale snage 10 kW", evidencioni broj EE711-1005V.

LITERATURA

- [1] Ocena mogućnosti korišćenja energije vetra na teritoriji Republike Srbije, Savezni hidrometeorološki zavod, Beograd, 1997
- [2] Johnson G., Wind Energy Systems, Electronic Edition, Prentice-Hall, 2001
- [3] Selig M.S., Tangler J.L., Development and Application of a Multipoint Inverse Design Method for Horizontal Axis Wind Turbines, Wind Engineering, Vol 19, No. 2, pp. 91-105, 1995
- [4] Xu G., Computational Studies of Horizontal Axis Wind Turbines, PhD Thesis, Georgia Institute of Technology, 2001
- [5] Corten G.P., Flow Separation on Wind Turbine Blades, PhD Thesis, University of Utrecht, 2001
- [6] Sorensen N.N., Michelsen J.A., Schreck S., Navier-Stokes predictions of NREL phase VI rotor in the NASA Ames 80 ft x 120 ft wind tunnel, Wind Energy, Vol 5, Issue 2-3, 2002
- [7] Giguere P., Selig M.S., Design of a Tapered and Twisted Blade for the NREL Combined Experiment Rotor, NREL/SR 500/26173, National Renewable Energy Laboratory, USA, 1999
- [8] Sommers D.M., Design and Experimental Results for the S809 Airprofil, NREL/SR 440/6918, National Renewable Energy Laboratory, USA, 1997
- [9] Manwell J.F., McGowan J.G., Rogers A.L., Wind Energy Explained – Theory, Design and Application, John Wiley & Sons Ltd, 2002
- [10] Jovičić N., Nekonvencionalne energotehnologije – Energija vetra, Završni izveštaj, WUS Austria - Project No. 7949-00/02 CDP-031/2003, Mašinski fakultet, Univerzitet u Kragujevcu, 2004
- [11] Jovičić N., Ivanović A., Gordić D., Babić M., Computer Aided Design of Wind Turbine Blade, RADMI 2003, 19-23 Sptember, Herceg Novi, Serbia&Montenegro, 2003
- [12] <http://www.bergey.com/>
- [13] <http://www.baywinds.com>

Rad primljen: 25.10.2004.

Rad prihvaćen: 01.11.2004.