

MALE HIDROELEKTRANE SA KINETIČKIM TURBINAMA - PREGLED I UPOREDNA TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA

SMALL HYDROPOWER PLANTS WITH KINETIC TURBINES - AN OVERVIEW AND COMPARATIVE COST-BENEFIT ANALYSIS

Vladica MIJAILOVIĆ, Fakultet tehničkih nauka, Čačak
Vladimir OSTRACANIN, Elektrodistribucija Srbije d.o.o. Beograd, Ogranak Kraljevo

KRATAK SADRŽAJ

U radu je dat detaljan pregled karakteristika hidrokinetičkih turbina, čijom primenom se izbegava izgradnja brana u malim hidroelektranama, a time i negativni efekti na okolinu. Navedeni su ključni eksploatacioni principi i dati su osnovni ekonomski proračuni za realne ulazne podatke.

Ključne reči: Kinetičke turbine, klasifikacija, eksploatacioni aspekti, troškovi nabavke.

ABSTRACT

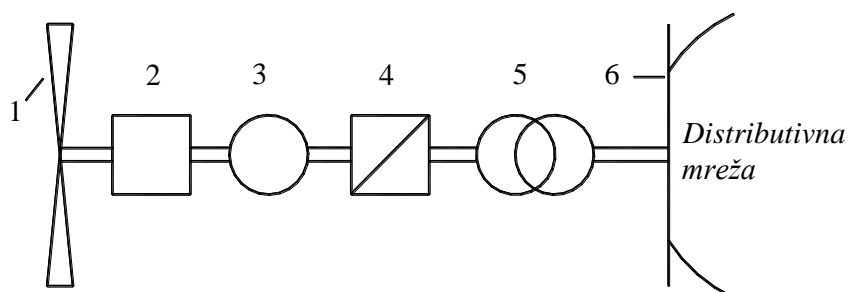
The paper gives a detailed overview of the characteristic of hydrokinetic turbines, whose application avoids the construction of a dam in small hydroelectric power plants, as well as negative effects on the environment. The key principles of exploitation are outlined and basic economic costs for real input data are given.

Key words: Kinetic turbines, classification, exploitation aspects, purchase cost.

vladica.mijailovic@ftn.kg.ac.rs, vladimir.ostracanin@ods.rs

1. OPŠTE

Hidrokinetička energija (energija koja je sadržana u vodenoj masi koja se kreće) je veoma značajan obnovljiv izvor, kome se od početka 21. veka posvećuje značajna pažnja. Kao rezultat opsežnih istraživanja, izgrađene su brojne elektrane (bez brana) na manjim rekama i potocima, kao i elektrane na morima i okeanima u kojima se energija talasa i plime i oseke koristi za proizvodnju električne energije. Principijelna šema sistema koji se koristi za konverziju kinetičke energije vode u električnu energiju prikazana je na sl.1. Uobičajeni naziv ovog sistema u literaturi i praksi je "kinetička turbina".



Sl.1 Principijelna šema kinetičke turbine
1- rotor, 2- uređaj za prilagođavanje brzine, 3- generator, 4- konvertorski sistem,
5- energetska transformator, 6- tačka priključenja na mrežu.

Ovde treba naglasiti sledeće činjenice:

- kinetičke turbine se postavljaju (potapaju) direktno u vodu;

- princip rada kinetičkih turbina je veoma sličan principu rada vetroturbina, dakle, snaga kinetičke turbine je proporcionalna trećem stepenu brzine vode;
- kinetičke turbine se mogu postavljati u nizove. Broj turbina u nizu zavisi od naznačene snage svake turbine pojedinačno i konkretnih uslova na mestu postavljanja (širina raspoloživog prostora i dubina vode);
- brzina kretanja vode i talasa je, obično, relativno mala;
- gustina vode je oko 820 puta veća od gustine vazduha.

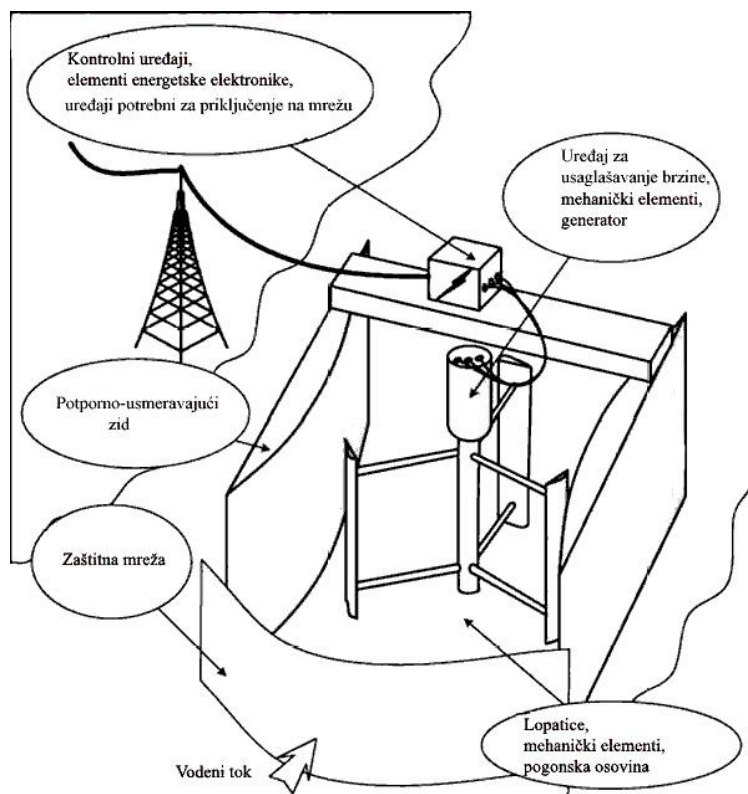
Iskustvo pokazuje da je izgradnja postrojenja sa kinetičkim turbinama ekonomski opravdana na tokovima na kojima je brzina vodenog toka veća od $1 \frac{m}{s}$, uz preduslov da je dubina vode na mestu ugradnje minimalno

1,5m. Generisana snaga je izrazito promenljiva, kao i kod vetroelektrana, ali je na rekama ta promenljivost veoma predvidljiva. Ilustracija postavljanja kinetičke turbine na vodenom toku je data na sl.2.

Za utvrđivanje parametara lokacije koriste se instrumenti koji se baziraju na primeni Doplerovog efekta. Pomoću njih se meri brzina vode na mestu polaganja kinetičke turbine, intenzitet turbulencije toka i gustina snage.

2. KLASIFIKACIJA KINETIČKIH TURBINA

Osnovna podela kinetičkih turbina, po ugledu na vetroturbine, je na one sa horizontalnom i sa vertikalnom osovinom. Kod turbina sa horizontalnom osovinom lopatice rotora se okreću u ravni koja je normalna na smer toka vode (glavna osovina koja "drži" lopatice je horizontalna- paralelna je sa tokom vode), dok se kod turbina sa vertikalnom osovinom lopatice rotora okreću u ravni u kojoj teče voda (glavna osovina je normalna na smer toka vode). Turbine sa vertikalnom osovinom su jednostavnije za postavljanje i eksploataciju, ali imaju niži stepen iskorišćenja u odnosu na turbine sa horizontalnom osovinom. Međutim, pošto imaju mogućnost zakretanja lopatica i osovine u odnosu na tok, turbine sa horizontalnom osovinom su znatno složenije po konstrukciji i po načinu postavljanja. Detaljna klasifikacija kinetičkih turbina, koja uključuje i načine pričvršćivanja istih, data je na sl.3.



Sl.2 Ilustracija rada kinetičke turbine

Generalno, svaka kinetička turbina ima pet ključnih komponenti: obrtno kolo turbine, uređaj za prilagođavanje brzine, generator, kućište i prateće merno-kontrolne uređaje i elemente energetske elektronike.

Raspoloživa snaga P_{kt} kinetičke turbine zavisi od brzine vodenog toka i površine koju opisuju lopatice:

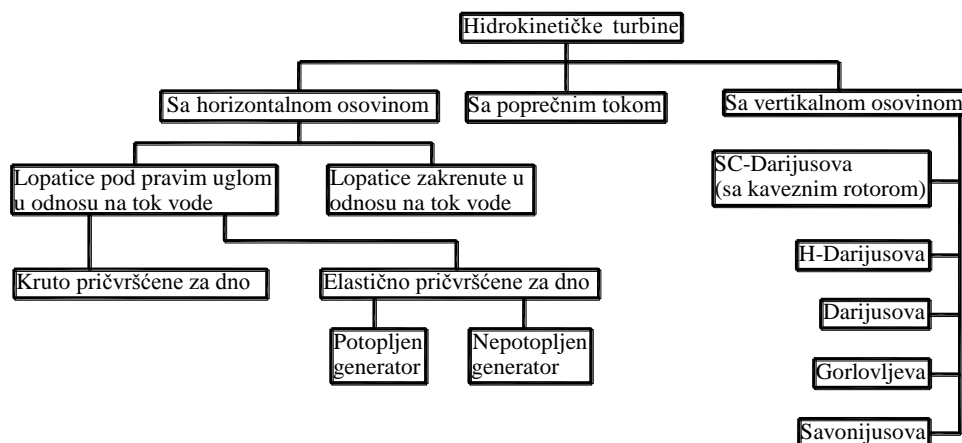
$$P_{kt} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{vode} \cdot A \cdot v^3 \cdot C_p(\lambda, \theta) \quad (1)$$

gde su:

ρ_{vode} - gustina vode ($\rho_{vode} \approx 1000 \text{ kg/m}^3$); A - površina kruga koji opisuju lopatice rotora; v - brzina vodenog

toka;

$C_p(\lambda, \theta)$ - koeficijent iskorišćenja snage kinetičke turbine u funkciji parametra λ i ugla zakretanja θ lopatica rotora.



Sl.3 Klasifikacija kinetičkih turbina

Parametar λ predstavlja količnik obimne brzine v_t lopatice rotora i brzine v vode (*tip-speed ratio*):

$$\lambda = \frac{v_t}{v} = \frac{r \cdot \omega}{v} \quad (2)$$

gde su:

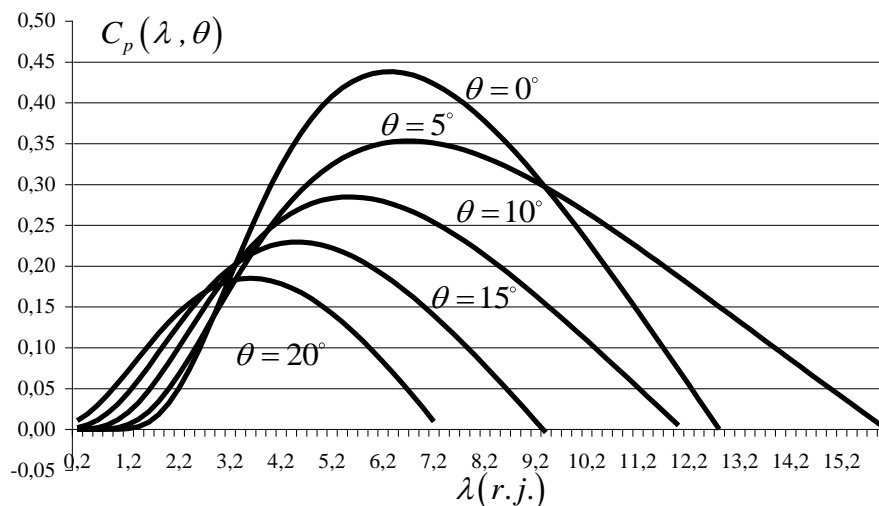
r - poluprečnik lopatice rotora, ω - ugaona brzina.

Empirijskim istraživanjima ustanovljen je obrazac za proračun vrednosti parametra $C_p(\lambda, \theta)$:

$$C_p(\lambda, \theta) = 0,22 \cdot \left(\frac{116}{\lambda_t} - 0,4 \cdot \theta - 5 \right) \cdot \exp\left(-\frac{12,5}{\lambda_t} \right) \quad (3)$$

$$\frac{1}{\lambda_t} = \frac{1}{\lambda + 0,08 \cdot \theta} - \frac{0,035}{\theta^3 + 1} \quad (4)$$

U gornjim izrazima vrednost za ugao θ se izražava u stepenima. Vrednosti faktora $C_p(\lambda, \theta)$ za pojedine vrednosti ugla θ i parametra λ date su na sl.4. Prema Betz-ovom zakonu, teorijska maksimalna vrednost ovog faktora je $C_{p,max} = 0,59$.



Sl.4 Vrednosti faktora $C_p(\lambda, \theta)$ za pojedine vrednosti ugla θ i parametra λ

3. EKSPLOATACIONI ASPEKTI

Kinetičke turbine se realizuju korišćenjem generatora jednosmerne struje ili indukcionih generatora ili, najčešće, korišćenjem sinhronih generatora sa stalnim magnetima.

Upotreba generatora jednosmerne struje zahteva primenu invertora, radi napajanja potrošača naizmenične struje. Ako se sistemi sa generatorima naizmenične struje koriste kao nezavisni izvori napajanja (ostrvski rad) uobičajena je primena trofaznih ispravljača, da bi se obezbedilo punjenje uređaja za akumuliranje električne energije. Radi napajanja potrošača naizmenične energije između sabirnica jednosmernog i naizmeničnog napona postavlja se DC/AC -konvertor (invertor). Za ovu namenu najbolje eksploatacione karakteristike je ispoljio invertor sa impulsno-širinskom modulacijom.

Turbine čije lopatice opisuju veću površinu A imaju veći stepen iskorišćenja η od onih čija je površina zahvatanja vode manja, $\eta \propto A$.

Očekivani životni vek kinetičkih turbina je oko 20 godina. Za datu naznačenu snagu, cena turbine je viša za manju naznačenu brzinu vode. Matematički model za proračun jedinične cene C' je oblika:

$$C' = a \cdot P_n^b \cdot v_n^c \quad \left(\frac{US\$}{kW} \right) \quad (5)$$

gde su: P_n (kW) - naznačena snaga turbine, v_n ($\frac{m}{s}$) - naznačena brzina vode, a, b, c - koeficijenti čija vrednost zavisi od tipa turbine.

Turbine se mogu postavljati tako da budu fiksirane za dno (betonska podloga), da budu pričvršćene labavim vezama (usidrene užadima) ili da plutaju na površini vode. Ovaj treći način se najčešće koristi na plovnim rekama i omogućava da se turbina izvadi iz vode da bi se propustilo plovilo.

Nabavna cena kinetičke turbine je oko $2800 \frac{EUR}{kW}$. Ako se napaja izolovano potrošačko područje, da bi se uvek imala na raspolaganju snaga od $5 kW$, potrebno je imati sledeće sisteme i komponente:

- Kinetička turbina naznačene snage $3,5 kW$, čija je cena $9800 EUR$;
- Sistem za akumuliranje električne energije, $20 kWh$, $48 V$, čija je cena $10000 EUR$;
- FN-panel instalisane snage $1 kW$, čija je cena $1400 \frac{EUR}{kW}$ (uključena montaža);
- Invertor $6 kW$, čija je cena $18000 EUR$ (uključena montaža).

Primeru radi, za stopu aktualizacije od $i = 5\%/god$, godišnji broj radnih sati od $T = 7000h$ i očekivani period eksploatacije od $n = 20 god$, možemo da izračunamo proizvodnu cenu C_{EE} električne energije:

- Ako se energija injektira u distributivnu mrežu, što je najpovoljniji slučaj:

$$9800 = \frac{(1+i)^n - 1}{i \cdot (1+i)^n} \cdot 3,5kW \cdot 7000h \cdot C_{EE}, \quad \frac{(1+i)^n - 1}{i \cdot (1+i)^n} = \frac{1,05^{20} - 1}{0,05 \cdot 1,05^{20}} = 12,46 \Rightarrow$$

$$C_{EE} = \frac{9800}{12,46 \cdot 3,5 \cdot 7000} = 0,032 \text{ EUR}/\text{kWh}$$

- Ako se napaja izolovano potrošačko područje, ukupna cena investicije je 39200 EUR . FN-sistem instalisane snage $1kW$ godišnje proizvede $1200kWh$, tako da je ukupna godišnja proizvodnja:

$3,5kW \cdot 7000h + 1200kWh = 25700kWh$. Proizvodna cena električne energije u ovom slučaju je:

$$C_{EE} = \frac{39200}{12,46 \cdot 25700} = 0,122 \text{ EUR}/\text{kWh}$$

Sa druge strane, cena izgradnje malih HE sa branom je u opsegu $(1200 \div 7000) \text{ EUR}/\text{kW}$, što je posledica zavisnosti od udaljenosti HE od mesta priključenja na mrežu, dužine derivacionih elemenata, pristupačnosti same lokacije gde se brana gradi, gabarita brane i dr. Prema podacima koje su objavili u Velikoj Britaniji jedinične cene izgradnje HE datih naznačenih snaga su:

Naznačena snaga male HE, kW	25	50	100	250	500
Jedinična cena izgradnje, EUR/kW	8200	7200	6400	4600	3800

4. NEKI ZANIMLJIVI PODACI

Hidroenergetski potencijal u Srbiji je analiziran u Vodoprivrednoj osnovi Republike Srbije iz 1996. godine koju je izradio institut „Jaroslav Černi“. Bruto potencijal od voda koje otiču vodotokovima u Srbiji iznosi

$$27,2 \text{ TWh} = 27,2 \cdot 10^{12} \text{ Wh} = 27,2 \cdot 10^9 \cdot 10^3 \text{ Wh} = 27200 \text{ miliona kWh}$$

Neto potencijal je niži za oko 33%: $27200 \text{ miliona kWh} \cdot 0,67 = 18224 \text{ miliona kWh}$. Ova energija bi mogla da se proizvede u malim HE sa branom.

U HE sa kinetičkim turbinama moglo bi da se iskoristi $(10 \div 15)\%$ od navedene vrednosti.

ZAKLJUČAK

Kinetičke turbine su, iz statusa „zanimljive inženjerske ideje“, „prešle“ u domen održivog i isplativog načina proizvodnje električne energije. Dosadašnja iskustva pokazuju da je moguće, bez izgradnje brane (ustave) i pratećih građevinskih objekata, ostvariti značajnu proizvodnju, bez ikakvog negativnog uticaja na okolinu i živi svet posmatranog vodotoka. Takođe, njihova primena je moguća i na manjim rečnim tokovima. Imajući u vidu niže investicione troškove u odnosu na elektrane sa branom, cena po jedinici instalisane snage je prihvatljiva u očekivanom periodu eksploatacije.

LITERATURA

- [1] J. Woods, "Hydrokinetic Turbine Systems for Remote River Applications in Cold Climates", PhD Thesis, Department of Mechanical and Manufacturing Engineering, The University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba, 2017.
- [2] D. Kumar, S. Sarkar, "A review on the technology, performance, design optimization, reliability, techno-economics and environmental impacts of hydrokinetic energy conversion systems", Renewable and Sustainable Energy Reviews 58(2016), 796–813

- [3] E. Muljadi et al., "Turbine Control of a Tidal and River Power Generator ", NREL/CP-5D00-66867, August 2016.
- [4] Riglin, Jacob Daniel, "Design, Modeling, and Prototyping of a Hydrokinetic Turbine Unit for River Application" (2016), *Theses and Dissertations*, 2783., <http://preserve.lehigh.edu/etd/2783>
- [5] Oblas, Nick, "Design, Manufacture and Prototyping of a Hydro-kinetic Turbine Unit for River Application" (2016), *Theses and Dissertations*, 2747, <http://preserve.lehigh.edu/etd/2747>
- [6] E. Muljadi et al., "Power Generation for River and Tidal Generators", NREL/TP-5D00-66097, June 2016.
- [7] M. A. Raouf Shafei et al., "Novel approach for hydrokinetic turbine applications", *Energy for Sustainable Development*, 27 (2015) 120-126
- [8] E. Chica et al., "Design of a hydrokinetic turbine", *WIT Transactions on Ecology and The Environment*, Vol 195, 2015.
- [9] E. Lalander, "Modelling Hydrokinetic Energy Resource for In-stream Energy Converters", PhD Thesis, Uppsala, January 2010.
- [10] H.Goyal et al., "A novel technique proposed for automatic control of small hydro power plants", *Int. J. Global Energy Issues*, Vol. 24, Nos. 1/2, 2005.
- [11] Nicholas D. Laws, Brenden P. Epps, "Hydrokinetic energy conversion: Technology, research, and outlook ", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57(2016), 1245–1259
- [12] V.Mijailović, "Distribuirani izvori i sistemi za distribuciju električne energije", *Akadska misao*, Beograd, 2019.