

## HIDROELEKTRANE

**Hidroelektrane** su energetska postrojenja koja energiju vodotokova pretvaraju u električnu energiju preko vodnih turbogeneratora.

### Iskoristiva energija vodotokova:

- ⊕ energija tlaka,
- ⊕ potencijalna energija,
- ⊕ kinetička energija.

### Podjela hidroelektrana:

- ⊕ prema načinu korištenja vode
  - protočne,
  - akumulacijske.
- ⊕ prema visini pada vode
  - niskotlačne (do 50 m pada),
  - visokotlačne (preko 50 m pada).
- ⊕ crpno-akumulacijske

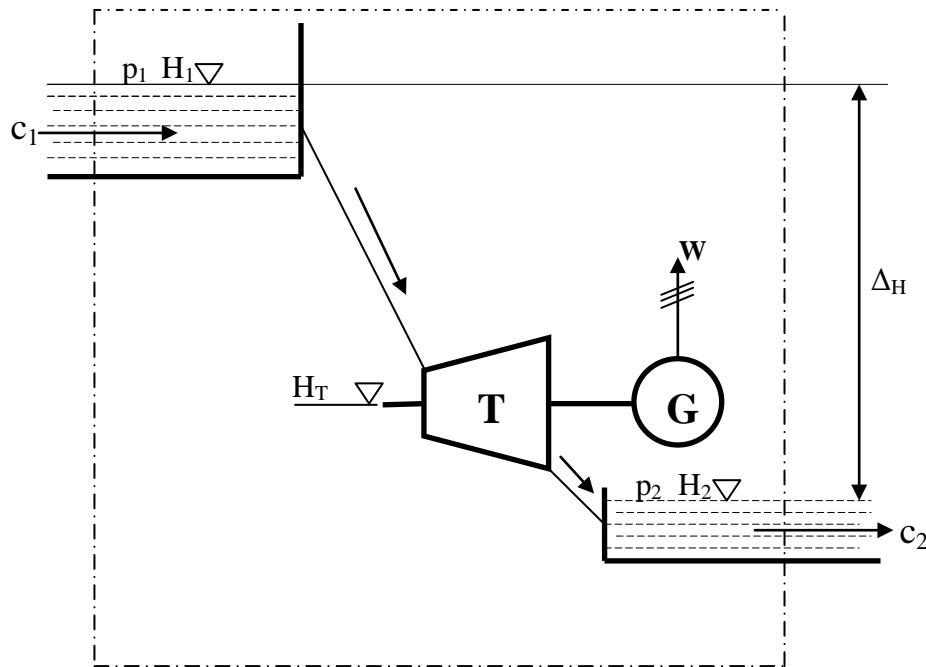
### ❖ Hidrauličke karakteristike hidroelektrana

Prema načinu i mjestu gdje se zbiva pretvorba potencijalne energije vode u kinetičku, vodne turbine mogu biti:

- ⊕ akcijske (impulsne, istotlačne)
- ⊕ reakcijske (pretlačne).

Kod **akcijskih turbina** se potencijala energija vode pretvara u kinetičku samo unutar provodnih (statorskih) lopatica gdje se tlak vode smanjuje, a povećava se brzina. Tlak vode kroz rotorske lopatice, kod akcijskih (impulsnih, istotlačnih) vodnih turbina, ostaje nepromijenjen, dok se brzina smanjuje zbog pretvorbe kinetičke energije u mehaničku.

Kod **reakcijskih (pretlačnih)** vodnih turbina, tlak vode smanjuje se i kroz rotorske lopatice zbog pretvorbe u kinetičku, a zatim u mehaničku energiju.

**Opća shema vodne elektrane**

**Opća jednadžba ravnoteže energije**, posebno za ulaznu i izlaznu stranu hidroelektrane, može se pisati kao:

- $u_1 = u_2$
- $p_1 = p_2$
- $\rho = \text{konst.}$
- $\sum \left( \frac{\Delta p}{\rho} \right)_{ul}$  – gubitak energije zbog trenja na ulaznoj strani
- $\sum \left( \frac{\Delta p}{\rho} \right)_{izl}$  – gubitak energije zbog trenja na izlaznoj strani

$$\frac{c_1^2}{2} + gH_1 - \sum \left( \frac{\Delta p}{\rho} \right)_{ul} = \frac{c_2^2}{2} + gH_2 - \sum \left( \frac{\Delta p}{\rho} \right)_{izl} + \frac{W}{m}$$

Za **akcijsku vodnu turbinu**, kod koje se pretvorba potencijalne energije u kinetičku zbiva samo u statorskim mlaznicama jer voda, nakon udara mlaza u lopatice, slobodno otječe budući da rotor nije potopljen u vodu, može se pisati da mehanička energija iznosi:

$$W_{akc} = mg(H_1 - H_T) + \frac{mc_1^2}{2} - m \sum \left( \frac{\Delta p}{\rho} \right)_{ul}$$

Kod **reakcijske vodne turbine**, kod koje se pretvorba potencijalne energije u kinetičku zbiva u statorskom i rotorskome dijelu, izlazna mehanička energija iznosi:

$$W_{reakc} = mg(H_1 - H_2) + \frac{m(c_1^2 - c_2^2)}{2} - m \sum \left( \frac{\Delta p}{\rho} \right)_{ul} - m \sum \left( \frac{\Delta p}{\rho} \right)_{izl}$$

Iz prethodnih jednadžbi je vidljivo da **reakcijske vodne turbine bolje iskorištavaju raspoloživu hidrauličku visinu od akcijskih**, a razlika iznosi:

$$\Delta_W = mg(H_T - H_2) - \frac{mc_2^2}{2} - m \sum \left( \frac{\Delta p}{\rho} \right)_{izl}$$

**Akcijska vodna turbina mora iza rotora imati slobodan tok vode** ( izlaz) te zbog toga ne može iskoristiti cjelokupni raspoloživi hidraulički pad.

Kod velikih razlika visina ( $H_1 - H_2$ ) razlika  $\Delta_W$  postaje zanemariva, ali zato kod malih razlika visina ( $H_1 - H_2$ ), akcijske vodne turbine nisu prikladne.

Ako se uzme u obzir da je  $c_1 \sim c_2$ , te da je geodetska razlika  $\Delta_H = H_1 - H_2$ , tada se iz vodnog toka teoretski može dobiti ukupna energija:

$$W = mg\Delta_H = V\rho g\Delta_H \quad [J]$$

Odnosno, teoretski ukupna snaga iznosi:

$$P = m_s g \Delta_H = V_s \rho g \Delta_H \quad [W]$$

gdje je:

- m – raspoloživa masa vode, [kg]
- g – gravitacija,  $9,81[m/s^2]$
- $\Delta_H$  - geodetska razlika visina, [m]
- V - raspoloživi volumen vode, [ $m^3$ ]
- $\rho$  – gustoća vode, [ $kg/m^3$ ]
- $m_s$  – maseni protok vode, [ $kg/s$ ]
- $V_s$  – volumni protok vode, [ $m^3/s$ ]

Stvarna energija, odnosno snaga koja se može dobiti iz vodnoga toka, manja je zbog gubitaka koji realno nastaju, a izražavaju se s ukupnom iskoristivošću elektrane  $\eta_e$ , iz čega proizlazi:

$$W_e = mg\Delta_H\eta_e = V\rho g\Delta_H\eta_e \quad [J]$$

odnosno:

$$P_e = m_s g \Delta_H \eta_e = V_s \rho g \Delta_H \eta_e \quad [W]$$

Uzimajući u obzir da je  $\rho=1000 \text{ kg/m}^3$  i  $g=9,81 \text{ m/s}^2$ , slijedi:

$$W_e = 9,81V\Delta_H\eta_e \quad [kJ]$$

$$P_e = 9,81V_s\Delta_H\eta_e \quad [kW]$$

Ukupna efektivna iskoristivost elektrane  $\eta_e$  jednaka je umnošku iskoristivosti pojedinih dijelova postrojenja, odnosno:

$$\eta_e = \eta_T \eta_c \eta_m \eta_{eg}$$

gdje je:

- $\eta_T$  – iskoristivost turbine (gubici trenja, vrtloženja, prostrujavanja vode mimo rotora),
- $\eta_c$  – iskoristivost cjevovoda (gubici trenja kroz cjevovod),
- $\eta_m$  – mehanička iskoristivost (gubici trenja u ležajima),
- $\eta_{eg}$  – iskoristivost generatora el. energije (gubici u generatoru el. energije)

## ❖ Vrste vodnih turbina

Prema hidrauličkim karakteristikama, načinu pretvorbe energije i konstrukcijskim izvedbama, razlikuju se sljedeća tri glavna tipa vodnih turbina:

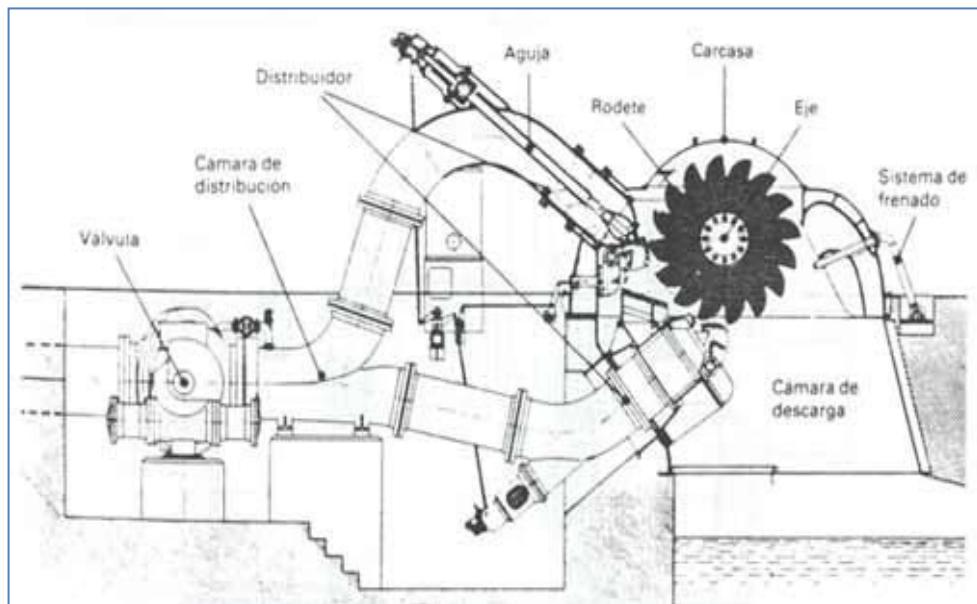
- ❖ Peltonove turbine
- ❖ Francisove turbine
- ❖ Kaplanove turbine

**❖ Peltonove turbine** spadaju u akcijske (istotlačne, impulsne) turbine koje koriste isključivo kinetičku energiju koja dolazi iz mlaza vode koji izlazi iz statorske sapnice i tangencijalno udara na rotorske lopatice.

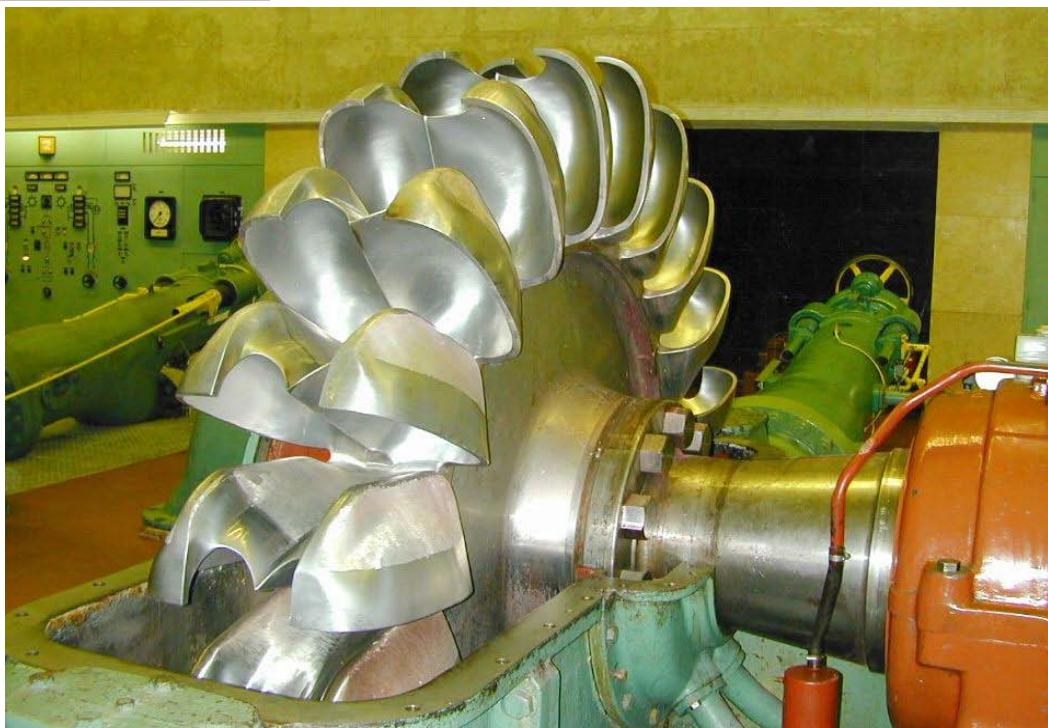
Izvode se s horizontalnom i vertikalnom izvedbom rotorske osovine.

- Raspon hidrauličkoga pada: 15 m... 2000 m.
- Raspon snage: 10 kW ... 200 MW.
- Iskoristivost: do 95 %.

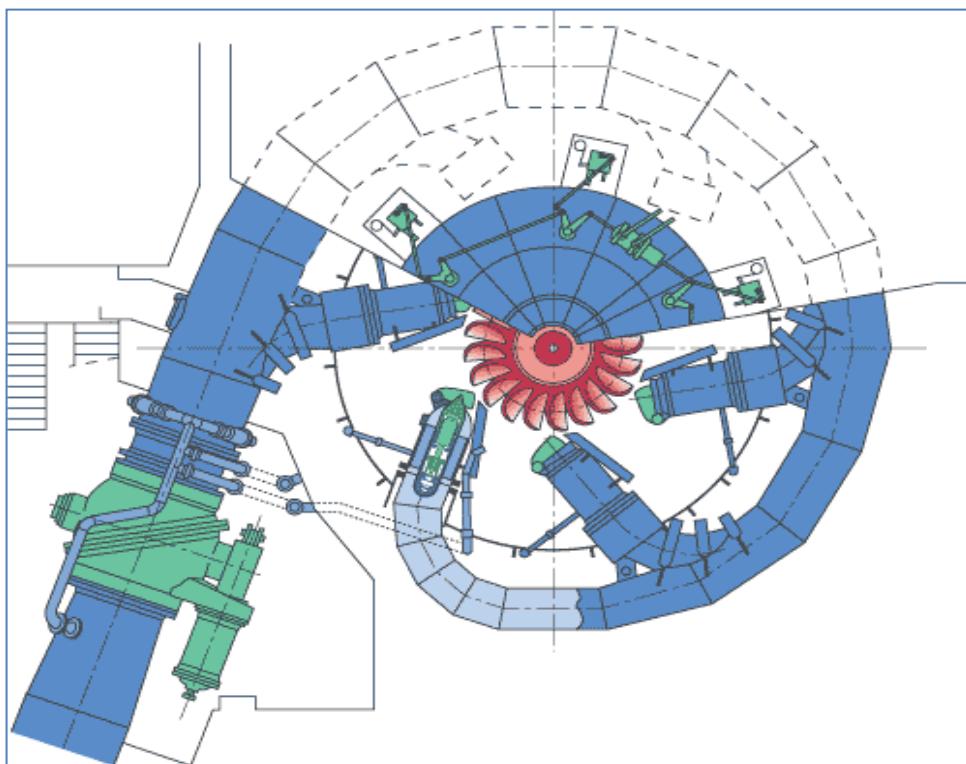
### **Peltonova turbina s horizontalnom osovinom**



**Rotor Peltonove turbine**



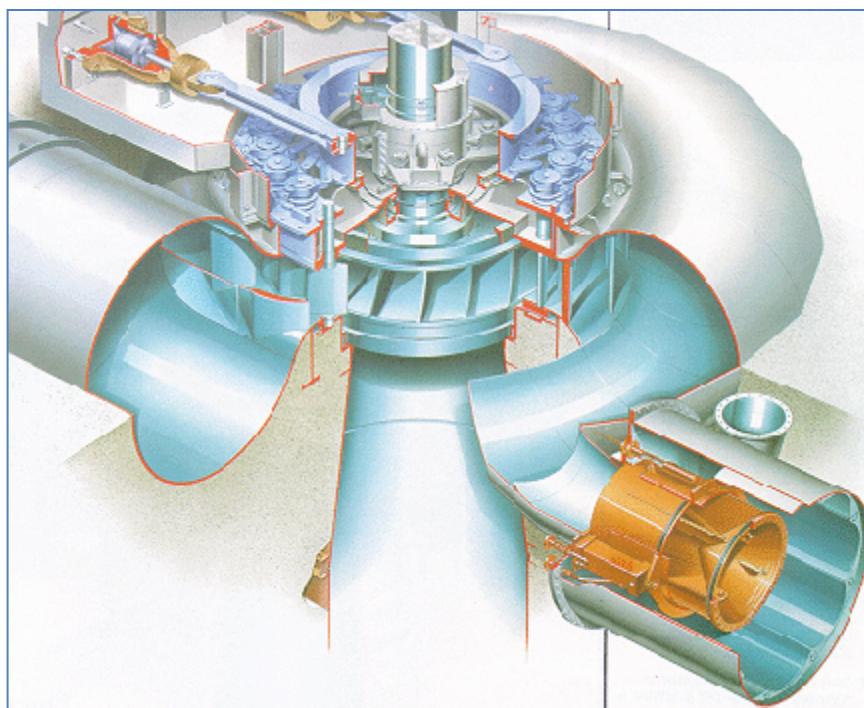
**Peltonova turbina s vertikalnom osovinom**



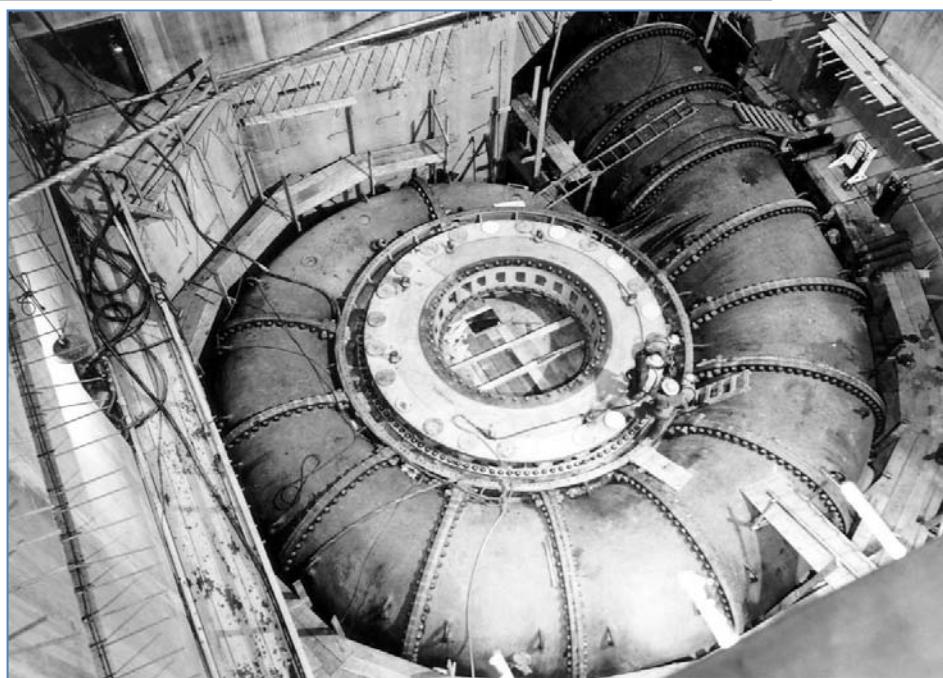
Francisove turbine spadaju u reakcijske (pretlačne) turbine s radijalno-aksijalnim protokom vode koja na rotor dotječe po cijelom opsegu kroz statorske lopatice. U većini slučajeva se izvode s vertikalnom izvedbom rotorske osovine

- Raspon hidrauličkoga pada: 25 m... 500 m.
- Raspon snage: 1MW ... 600 MW.
- Iskoristivost: do 95 %.

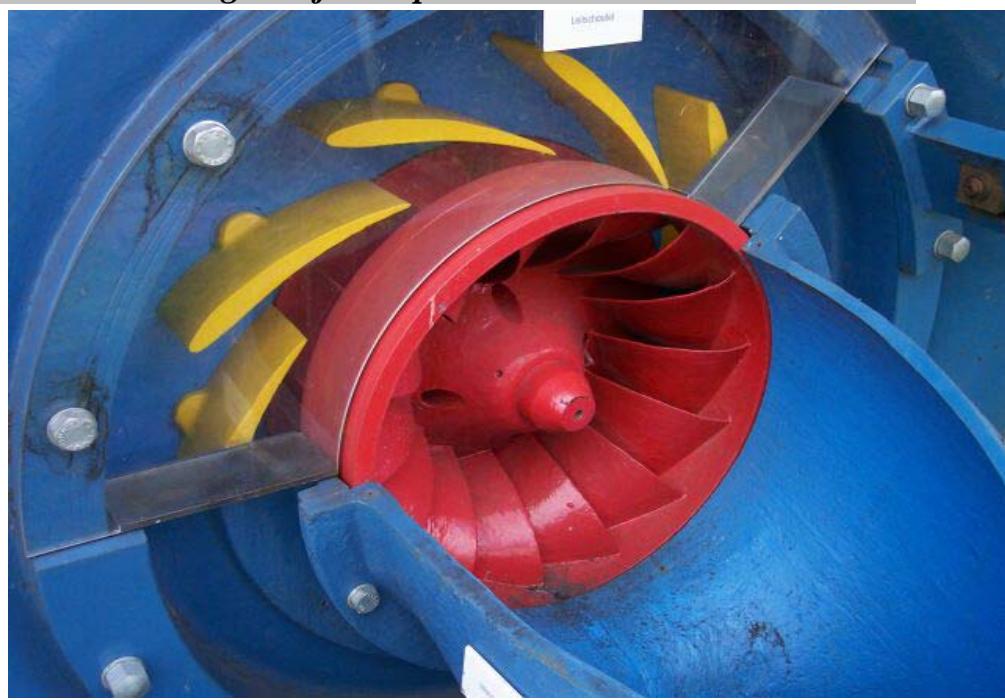
#### ***Francisova turbina s obodnim dovodom vode***

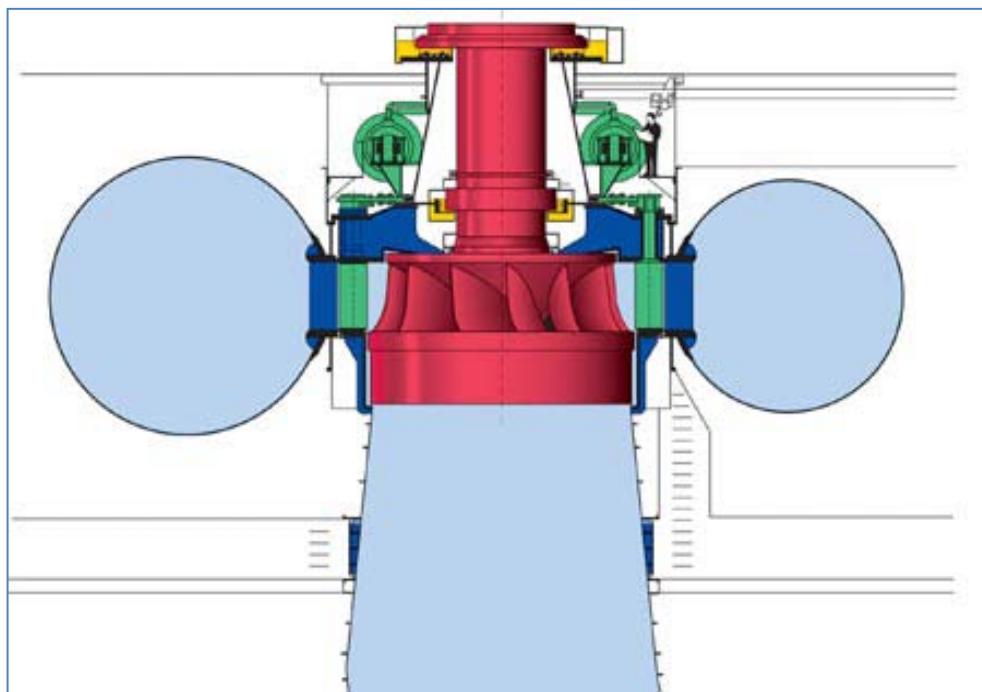


**Pogled na privod vode Francisove turbine (u tijeku montaže)**



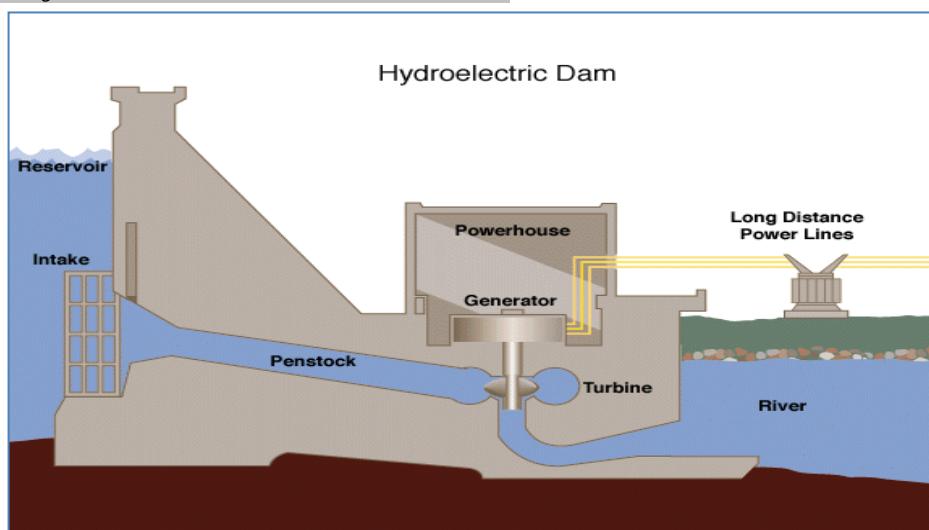
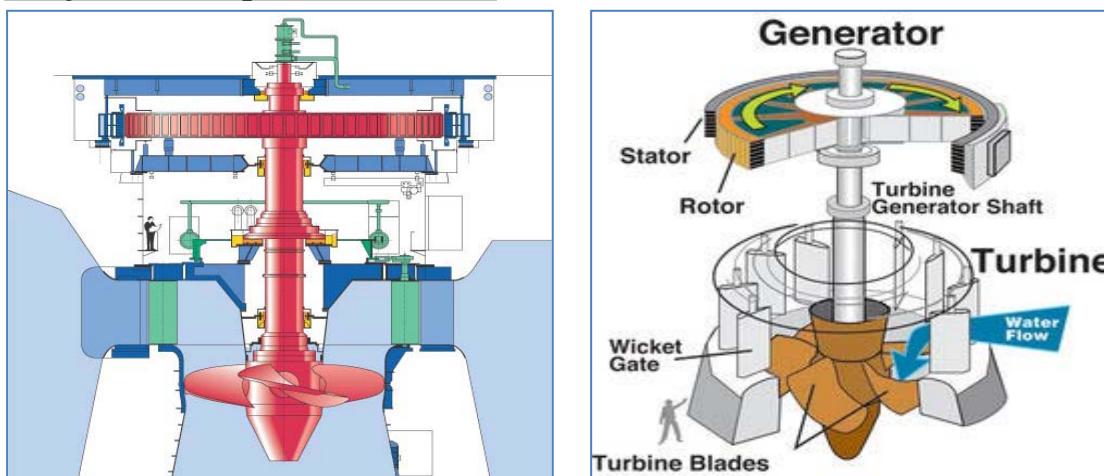
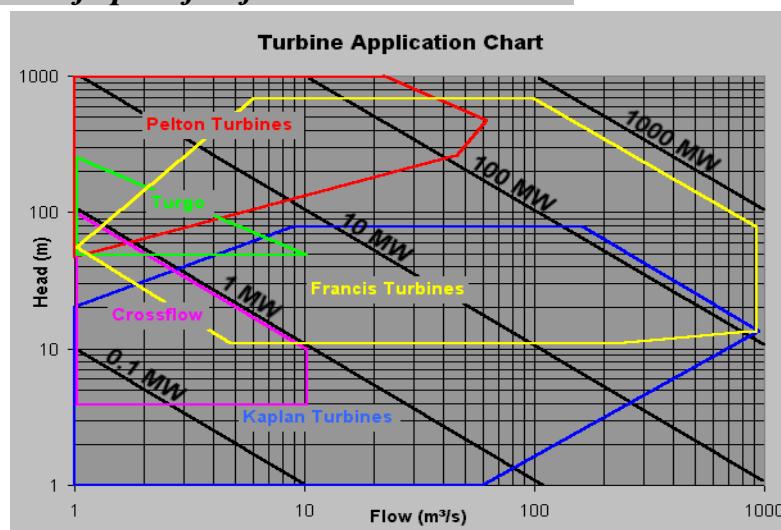
**Pogled na statorske regulacijske lopatice i rotor Francisove turbine**



**Presjek kroz Francisovu turbinu**

 **Kaplanove turbine** spadaju u reakcijske (pretlačne) turbine s aksijalnim protokom vode koja iz spiralnoga kućišta prolazi kroz statorske, a zatim kroz rotorske lopatice koje su podešive da bi se mogle optimalno podešavati obzirom na raspoloživi protok i visinu.

- Raspon hidrauličkoga pada: do 50 m.
- Raspon snage: 10 kW ... 100 MW.
- Iskoristivost: do 95 %.

***Uzdužni presjek kroz sustav hidroelektrane******Presjek kroz Kaplanovu turbinu******Hidrauličko područje primjenljivosti vodnih turbina***

## ❖ Pumpno-akumulacijske (reverzibilne) hidroelektrane

Pumpno-akumulacijske (reverzibilne) hidroelektrane su elektrane koje u principu rade kao i ostale hidroelektrane, s time što imaju mogućnost vraćanja iskorištene vode iz donjega ponovno u gornji bazen (akumulacijsko jezero) iz kojega se u nekom drugom periodu, kada je to potrebno odnosno u razdoblju vršne potrošnja električne energije, može ponovno koristiti za njenu proizvodnju.

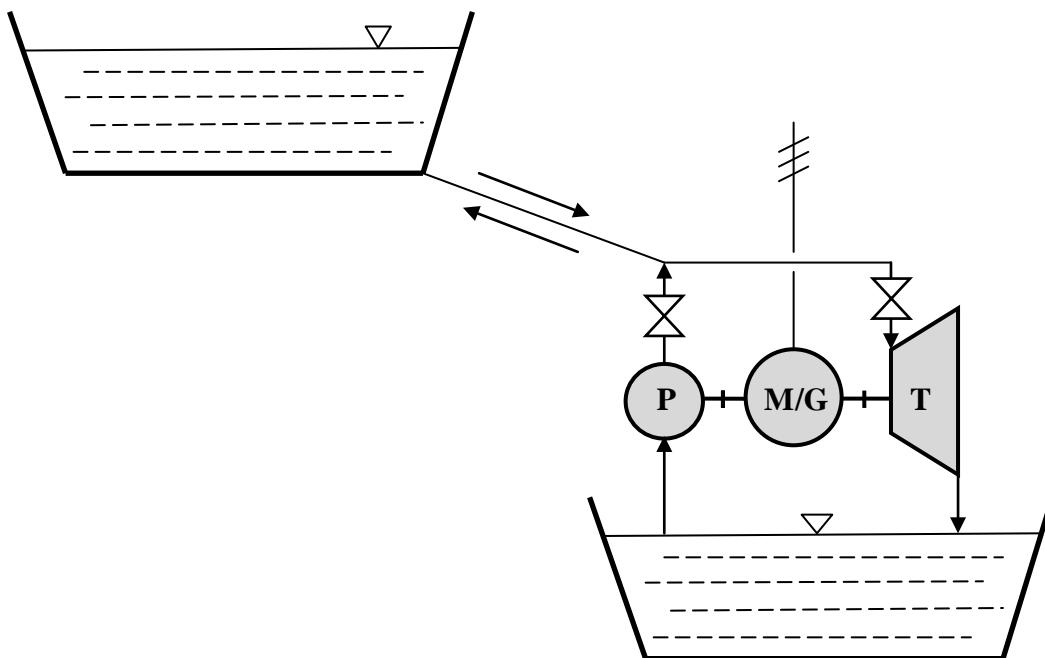
Na taj način, reverzibilne hidroelektrane imaju dva režima pogona:

- turbinski,
- pumpni.

Zbog gubitaka energije u pumpnome režimu rada, takve su elektrane u biti veći neto-potrošači električne energije nego proizvođači. Njihova tehno-ekonomска opravdanost proizlazi iz sljedećih razloga:

- ravnanje (peglanje) dnevne / sezonske potrošnje električne energije,
- trošenje električne energije za pumpanje u vrijeme niže tarife, te proizvodnja u vrijeme vršne potrošnje, odnosno više tarife.

### Shema pumpno-akumulacijske hidroelektrane



➤ Kod rada u pumpnemu režimu potroši se električna energija:

$$W_{e,p} = \frac{\rho g V_{s,p} \Delta_H t_p}{\eta_{e,p}} \quad [\text{J}]$$

gdje je:

- $\rho$  – gustoća vode,  $[\text{kg/m}^3]$
- $g$  – gravitacija,  $9,81[\text{m/s}^2]$
- $\Delta_H$  - geodetska razlika visina, [m]
- $V_{s,p}$  – protok vode u pumpnemu režimu,  $[\text{m}^3/\text{s}]$
- $t_p$  – vrijeme trajanja pumpanja, [s]
- $\eta_{e,p}$  – ukupna iskoristivost pumpnoga pogona

➤ Kod rada u turbinskemu režimu proizvede se električna energija:

$$W_{e,t} = \rho g V_{s,t} \Delta_H t_t \eta_{e,t} \quad [\text{J}]$$

gdje je:

- $V_{s,t}$  – protok vode u turbinskemu režimu,  $[\text{m}^3/\text{s}]$
- $t_t$  – vrijeme trajanja turbinskoga režima, [s]
- $\eta_{e,t}$  – ukupna iskoristivost turbinskoga pogona

Za jednaku količinu vode u pumpnemu i turbinskemu režimu rada, te uz jednaku geodetsku razliku visine, proizlazi:

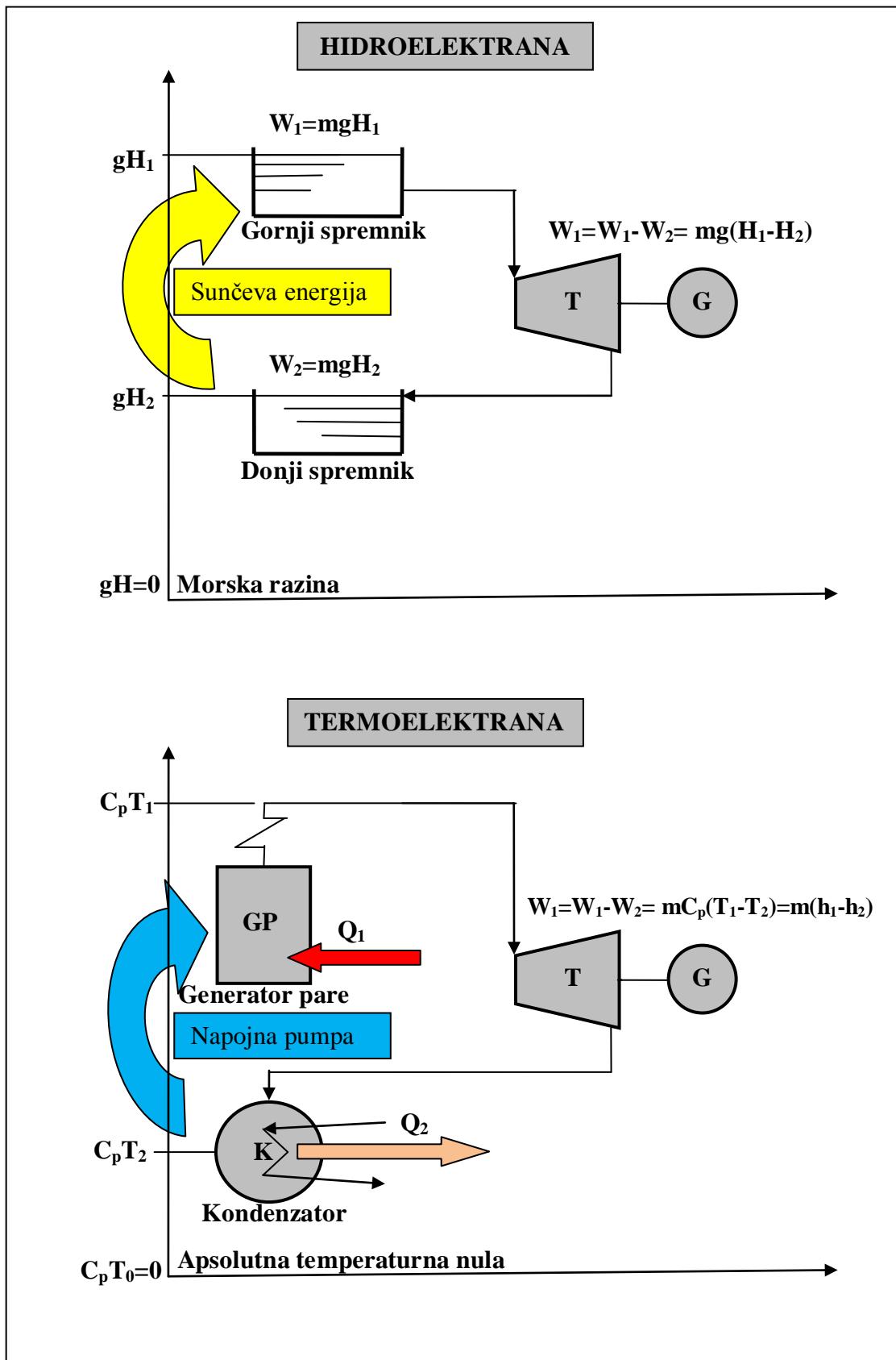
$$V_{s,p} t_p = V_{s,t} t_t$$

odnosno:

$$\frac{W_{e,p} \eta_{e,p}}{\rho g \Delta_H} = \frac{W_{e,t}}{\rho g \Delta_H \eta_{e,t}}$$

$$W_{e,t} = W_{e,p} \eta_{e,p} \eta_{e,t}$$

Dakle, ukupna energija dobivena u turbinskemu pogonu uvijek je manja za iznos gubitaka energije u pumpnemu i turbinskemu pogonu.


**Osnovna usporedba termoelektrane i hidroelektrane**


## ❖ HIDROENERGETSKI SUSTAV HE VINODOL

**Hidroenergetski sustav HE Vinodol** temelji se na hidroenergetskom potencijalu kotline rijeke Ličanke i Lokvarke s njihovim pritocima, koje se nalaze na preko 700 m n.v. u odnosu na Vonodolsku dolinu gdje je smještena strojarnica HE Vinodol na visino oko 60 m n.v.

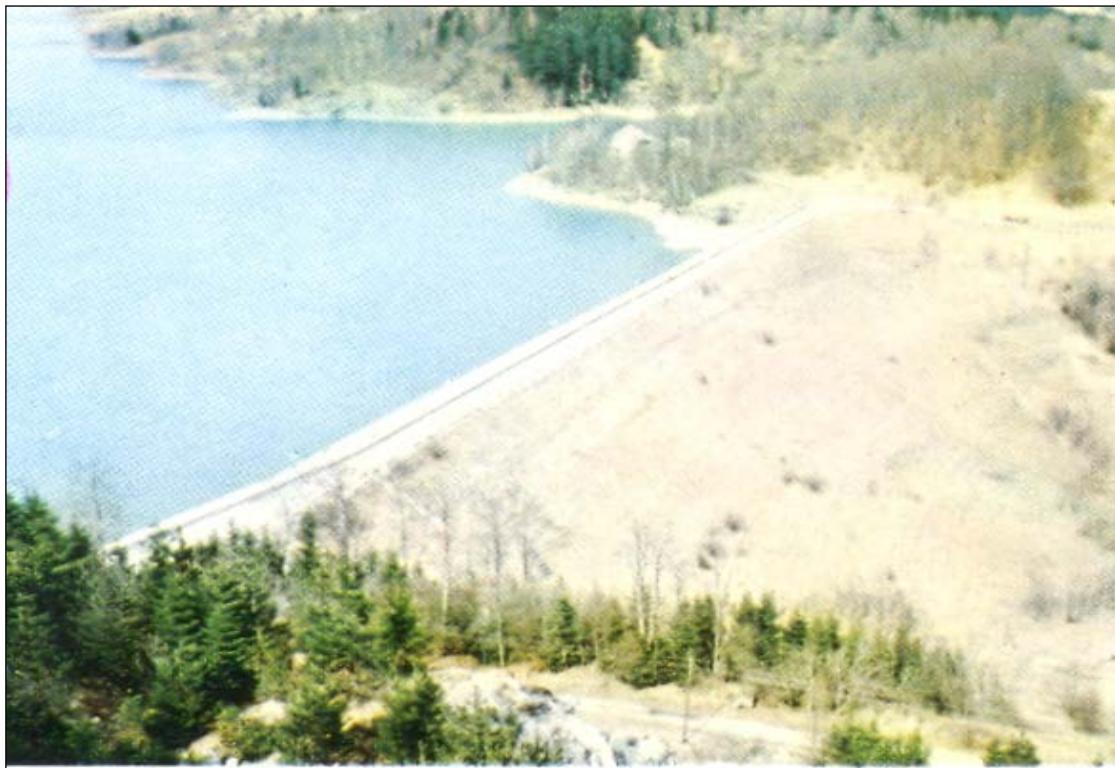
Hidroenergetski sustav HE Vinodol čine sljedeći glavni dijelovi:

- ❖ Akumulacija Omladinskoga jezera
- ❖ Akumulacija Bajer jezera
- ❖ Tlačni tunel Lokvarka-Ličanka
- ❖ CHE „Fužine“
- ❖ RHE „Lepenica“
- ❖ Crpna stanica „Križ“
- ❖ Crpna stanica „Lič“
- ❖ Kanal „Benkovac“
- ❖ Bazen „Potkoš“
- ❖ Tlačni vod Bajer – strojarnica HE Vinodol
- ❖ Strojarnica HE Vinodol (Tribalj)

## ✚ Akumulacija Omladinskog jezera

Na rijeci Lokvarci izgrađena je nasuta brana „Lokvarka“ obujma oko  $670.000 \text{ m}^3$ , visine 48 m. Izgradnjom te brane nastalo je Omladinsko jezero, maksimalne površine  $2.100.000 \text{ m}^2$ , najveće dubine 40 m i ukupne akumulacije  $32.000.000 \text{ m}^3$  pri gornjoj razini vode na 770 m n.v. Naknadno izvedenim (1976.godine) nadvišenjem brane „Lokvarke“, obujam akumulacije Omladinskoga jezera povećan je za oko  $5.500.000 \text{ m}^3$ , tako da sada iznosi ukupno oko  $37.500.000 \text{ m}^3$ .

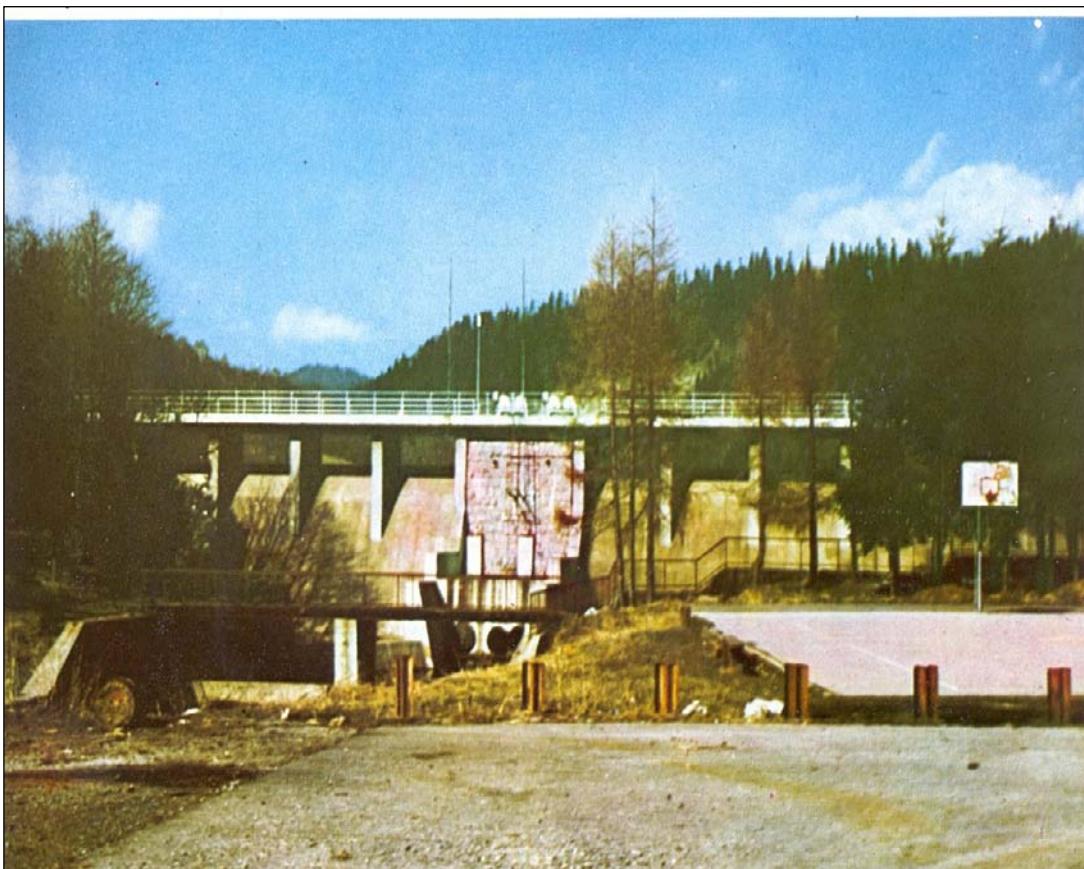
**Zemljana brana akumulacije Omladinskoga jezera**



## ✚ Akumulacija Bajer jezera

Akumulacija jezera Bajer ostvaruje se betonskom gravitacijskom pregradom koja je visoka 10,6 m iznad terena, a izgrađena je na nazužem mjestu doline Ličanke kod mjesta Fužine. Dužina betonske pregrade je 105,5 m, a njen obujam s temeljima iznosi ukupno  $7.000 \text{ m}^3$  betona. Korisna akumulacija jezera Bajer iznosi  $1.230.000 \text{ m}^3$  kod gornje razine vode  $717 \text{ m n.v.}$

### **Betonska brana na jezera Bajer**



## ✚ Tlačni tunel Lokvarka - Ličanka

Omladinsko i Bajer jezero povezani su tlačnim tunelom Lokvarka – Ličanka ukupne dužine 3.456 m, promjera 2,4 m, s kojim se odvodi voda iz Omladinskoga jezera u jezero Bajer. Maksimalan protok kroz tlačni tunel je  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ . Ovaj tunel služi također za prepumpavanje vode u slučajevima velikih valova Ličanke u veće Omladinsko jezero. Tlačni tunel, neposredno prije zasunske komore, završava se čeličnim tlačnim cjevovodom s kojim se dovodi voda u crpnu hidroelektranu „Fužine“.

## CHE „Fužine“

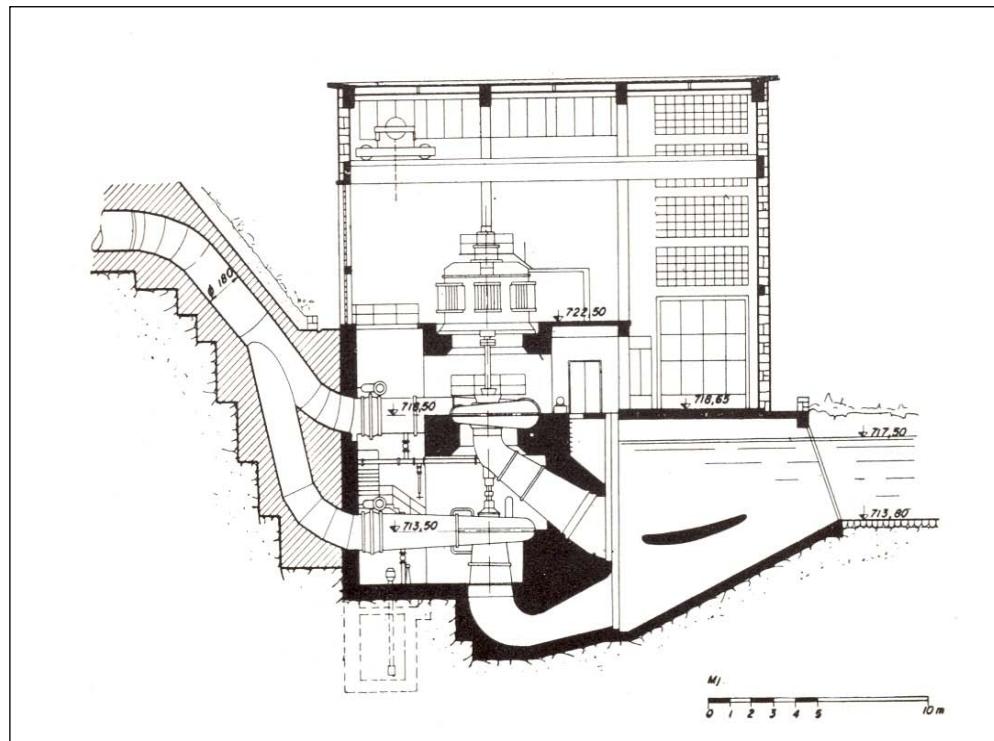
Crpna hidroelektrana „Fužine“ koristi vodeni pad između akumulacije Omladinskoga jezera i jezera Bajer (24,5 do 54,5 m), a ujedno služi za prebacivanje vode iz donjeg jezera Bajer u gornje Omladinsko jezero. U tu svrhu, u strojarnici PHE „Fužine“ ugrađen je jedan trojni agregat, na zajedničkoj vertikalnoj osovini, na kojoj se na vrhu nalazi motor – generator, u sredini je turbina tipa „Francis“, dok je na donjem kraju centrifugalna pumpa. Veza elektrane sa mrežom je preko 30 kV voda , dugog oko 14 km, koji preko TS „Vrata“ vodi do sabirnica 35 kV u HE Vinodol.

Godina početka pogona CHE „Fužine“ bila je 1957.

Glavni podaci CHE „Fužine“:

- Instalirani protok:  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  u turbinskom radu,  $9,0 \text{ m}^3/\text{s}$  u crpnom radu;
- Srednji neto pad vode:  $H = 37 \text{ m s.v.};$
- Instalirana snaga: 4,6, MW ( turbinski rad);
- Snaga motora za pogon crpke: 4,8 MVA.

### **Presjek kroz strojarnicu CHE „Fužine“**



 **RHE „Lepenica“**

U dolini potoka Lepenice, pritoka jezera Bajer, izgrađena je brana s kojom se dobila akumulacija „Lepenica“ s čijim se padom do jezera Bajer koristi RHE „Lepenica“ u turbinskome radu, dok se u crpnome pogonu voda iz akumulacije Bajer prebacuje u tu akumulaciju.

Početak rada RHE „Lepenica“ bila je 1985.

Glavni energetski podaci:

- Instalirani protok:  $6,2 \text{ m}^3/\text{s}$  u turbinskome radu,  $5,3 \text{ m}^3/\text{s}$  u crpnome radu;
- Nazivni pad vode: 17,9 m s.v. (turbina);
- Nazivni napor dizanja vode: 15,0 m s.v. (crpka);
- Instalirana snaga u turbinskome radu: 1,14 MW;
- Instalirana snaga crpke: 1,25 MW

 **Crpna stanica „Križ“**

Crpna stanica „Križ“ ima namjenu da se u akumulaciju Omladinskoga jezera ubacuje voda potoka Križa koji se u rijeku Lokvarku ulijeva nizvodno od brane akumulacije. U tu svrhu je izgrađen bazen kapaciteta oko  $6000 \text{ m}^3$  pored strojarnice u kojoj su smještene 4 vertikalne crpke kapaciteta dobave 400 l/s, visine dobave 24 m, s pogonskim elektromotorom snage 140 kW, te jedna crpka kapaciteta 700 l/s, dobavne visine 24 m s pogonskim elektromotorom 200 kW. Na taj se način za pohranjivanje  $1 \text{ m}^3$  vode troši 0,08 kWh, a ta voda zatim generira energiju od 1,6 kWh padom do strojarnice HE Vinodol.

 **Crpna stanica „Lič“**

Crpna stanica „Lič“ ima namjenu da se pomoći nje omogući energetsko iskorištavanje vode Ličkoga polja i potoka Potkoša. U tu namjenu je u koritu Ličanke izgrađen crpni bazen obujma  $1300 \text{ m}^3$  s crpnom stanicom u kojoj su smještene 2 vertikalne crpke kapaciteta dobave 400 l/s i dobavne visine 24 m te jedna crpka kapaciteta dobave 50 l/s. Voda se iz bazena, preko crpne stanice, ubacuje direktno u glavni dovodni cjevovod za HE Vinodol. Na taj se način potrošnjom energije od 0,1 kWh ostvaruje u strojarnici HE Vinodol proizvodnja električne energije od 1,5 kWh.

### **Kanal „Benkovac“**

Kanal „Benkovac“ služi da se voda potoka Benkovac s padina Ličkoga polja uvodi betonskim kanalom, ukupne dužine oko 2,5 km, u glavni dovodni vod za strojarnicu HE Vinodol. Na taj se način povećava godišnja proizvodnja električne energije HE Vinodol za prosječno 5.500.000 kWh.

### **Bazen „Potkoš“**

Bazen „Potkoš“ čini akumulaciju od 350.000 m<sup>3</sup> ostvarenom nasutom branom na potoku Potkoš. Voda iz te akumulacije teče kroz zatvoreni betonski kanal dužine oko 1500 m do crpne stanice „Lič“ gdje se ubacuje u tlačni cjevovod „Lič“. Na taj se način omogućuje energetsko iskorištavanje ovoga bazena koje odgovara prosječnoj godišnjoj proizvodnji električne energije od 6.000.000 kWh.

### **Tlačni vod Bajer – strojarnica HE Vinodol**

Prvi dio dovoda u tlačni vod je u obliku tunela dužine 200 m i promjera 2,8 m. Tunel prelazi u armirano-betonski cjevovod u Ličkom polju dužine 4915 m, koji se nastavlja u tlačni tunel Kobiljak – Razomir dužine 4162 m.. Tunel se završava zasunskom komorom od koje se dovod vode nastavlja kosim tlačnim čeličnim cjevovodom pod kutom od 32°. Kosi čelični cjevovod je smješten u kosom rovu potkovastoga oblika dužine 1189 m. Na izlazu iz kosoga rova nalazi se horizontalna razdjelna komora od koje se odvajaju šest ograna, odnosno po dva dovoda vode za svaku turbinu na kojima se nalazi zaporna i regulacijska armatura. Protočni kapacitet dovoda vode je 15 m<sup>3</sup>/s.

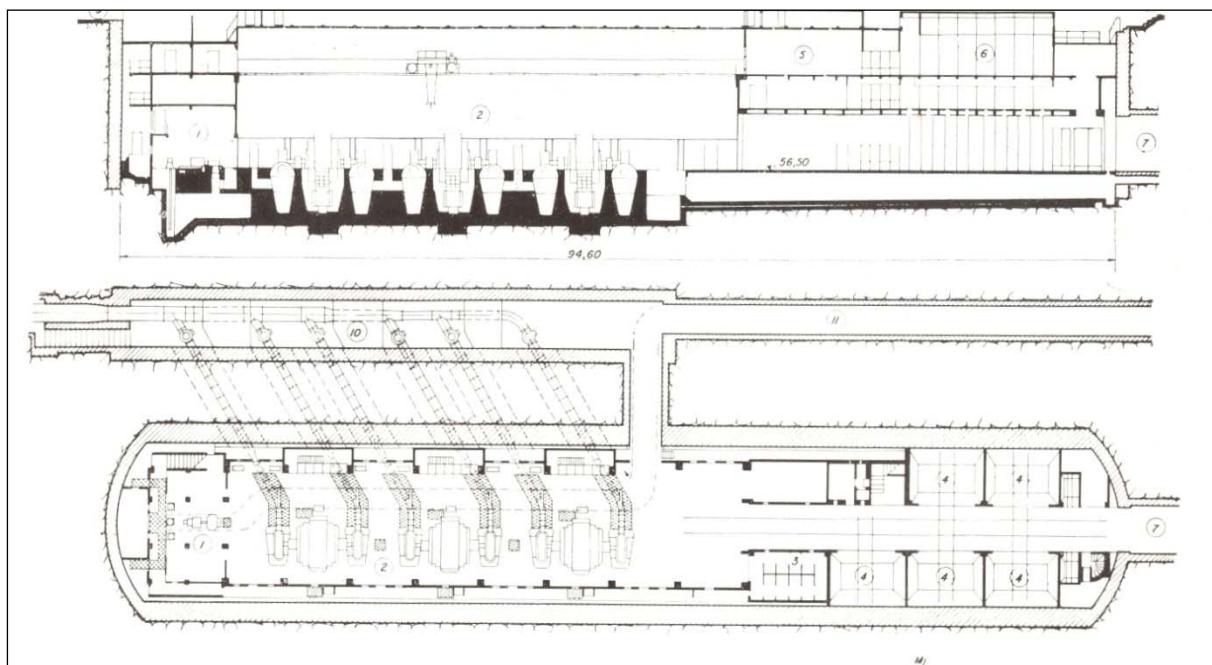
### **Strojarnica HE Vinodol (Tribalj)**

Strojarnica hidroelektrane smještena je u podzemnoj kaverni uz kraj kosoga tlačnog cjevovoda. U njoj su ugrađena tri hidro-agregata koje sačinjavaju:

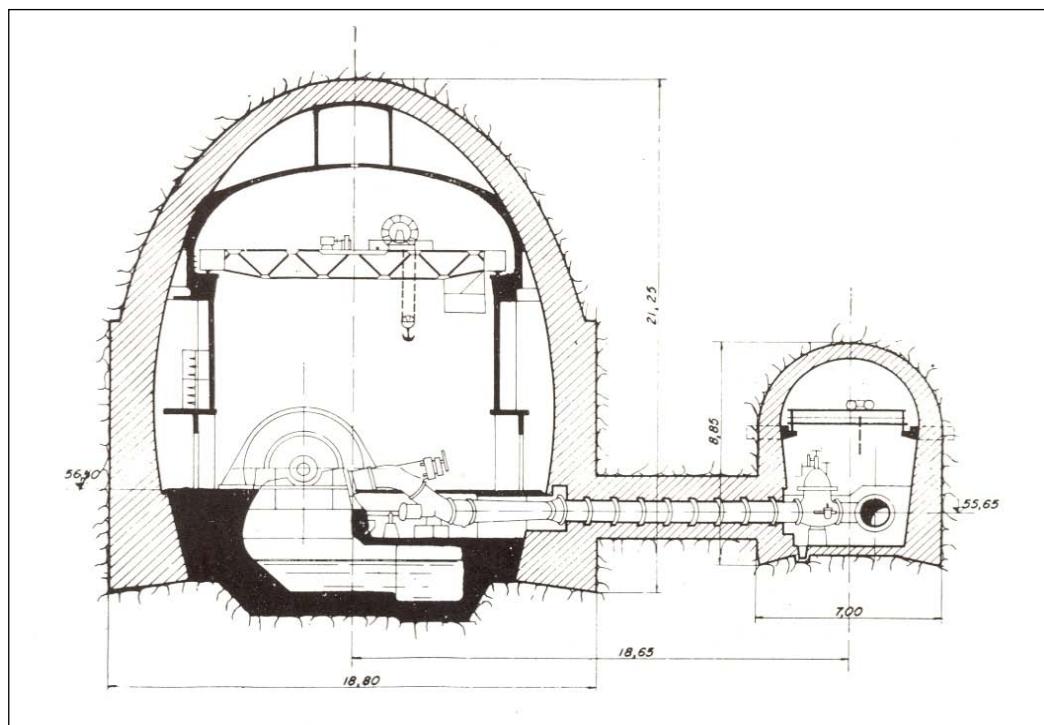
- po dvije vodne turbine tipa „Pelton“ koje, uz protok od 5 m<sup>3</sup>/s i neto pad od 645 m, razvijaju snagu od 27.500 kW ;
- sinkroni generator snage instalirane snage 35.000 kVA, 10,5kV.

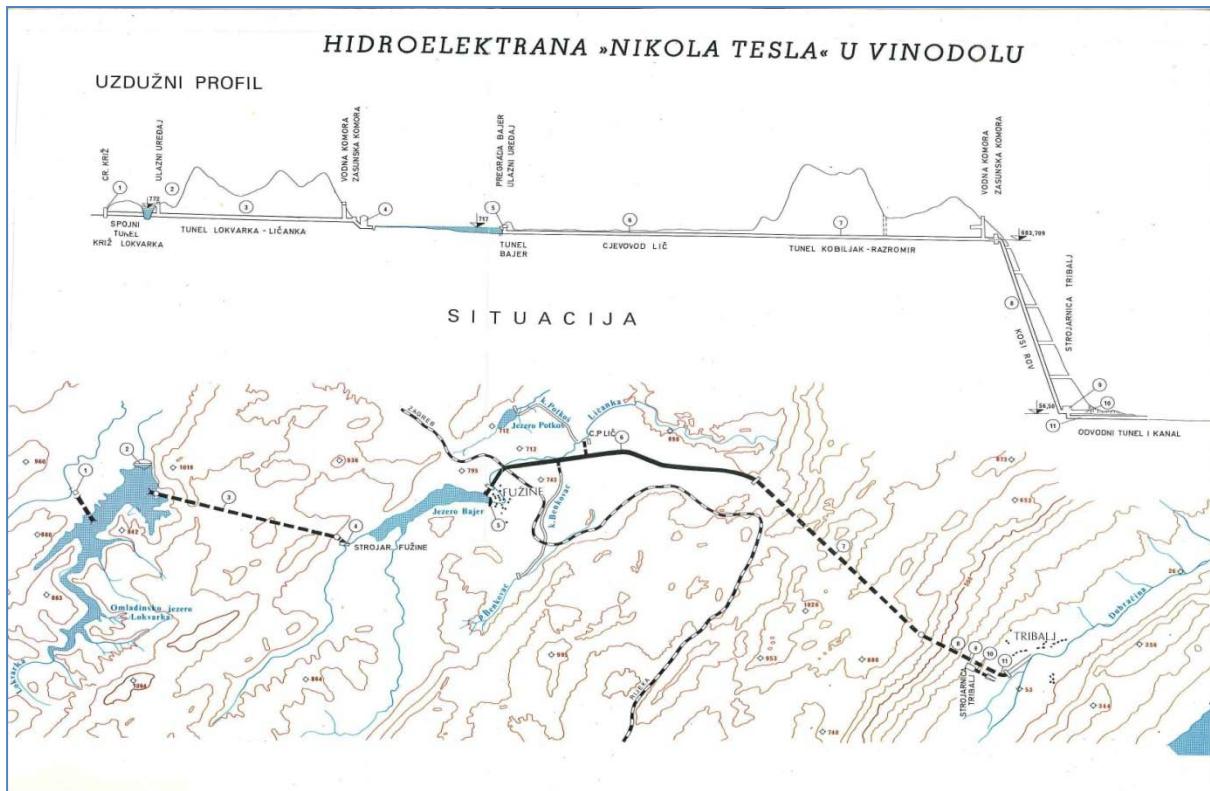
Proizvedena električna energija predaje se u mrežu 110 kV preko tri blok-transformatora smještenih u podzemnoj kaverni i preko rasklopnoga postrojenja 110 kV.

**Nacrt i tlocrt strojarnice HE Vinodol**



**Presjek strojarnice HE Vinodol**



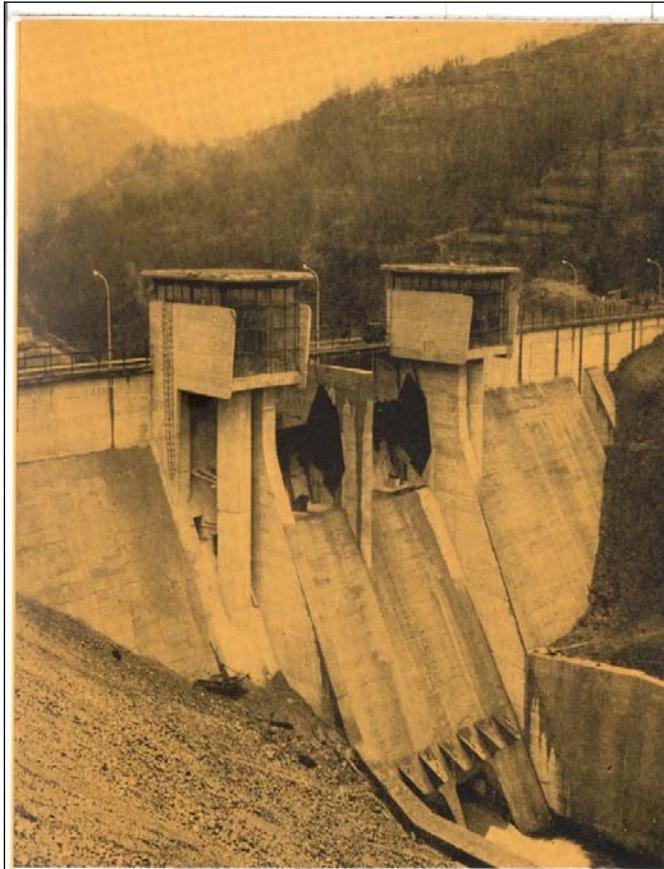
***Situacioni plan sustava HE-Vinodol***

## ❖ HIDROELEKTRANA RIJEKA

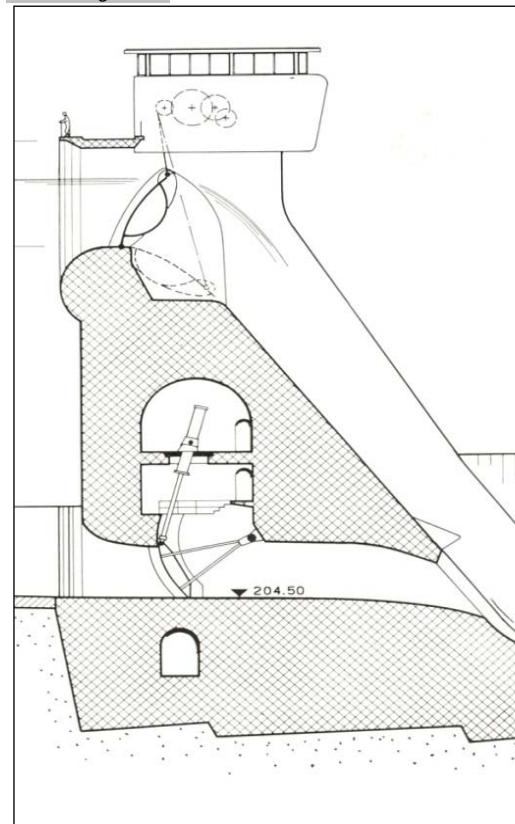
**Hidroelektrana Rijeka** je protočna hidroelektrana koja koristi vodni pad od 228,3 m uz instalirani protok od  $21 \text{ m}^3/\text{s}$ . HE Rijeka koristi hidroenergetski potencijal rijeke Rečine koja izvire na nadmorskoj visini od 326 m te nakon 18 km utječe u more u gradu Rijeka.

Radi toga je kod sela Grohovo izgrađena betonska gravitacijska pregrada s kojom se stvara bazen korisnoga sadržaja  $600.000 \text{ m}^3$  za dnevnu regulaciju protoka vode. Najveći uspor u bazenu je na koti 232,5 m n.v., pri čemu je najveća dubina u bazenu 28 m

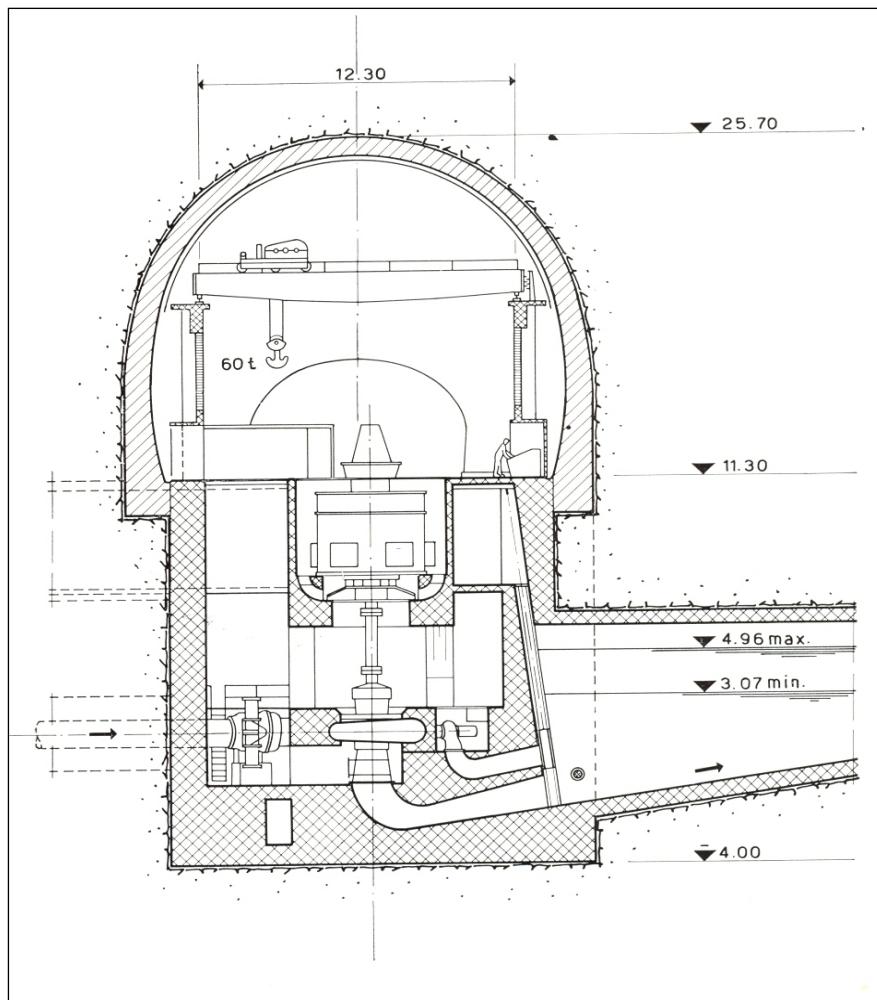
**Betonska brana HE Rijeka**



**Presjek kroz betonsku branu  
HE Rijeka**



Pogonska voda dovodi se do podzemne strojarnice, smještene u podnožju brda Katarina, tlačnim tunelom promjera 3,2 m, dužine 3117 m, a zatim tlačnim rovom promjera 2,8 m, dužine 173 m, te kosim tlačnim cjevovodom promjera 2,3 m i 2,2 m, dužine 803 m. Izlazna voda iz turbina ispušta se ponovno u korito Rečine.

**Poprečni presjek kroz strojarnicu HE Rijeka**

U podzemnoj strojarnici Hidroelektrane Rijeka ugrađena su dva agregata s vertikalnim Francisovim turbinama snage  $2 \times 18,4$  MW, trofaznim generatorima snage  $2 \times 23.000$  kVA,  $10,5$  kV,  $600 \text{ min}^{-1}$ .