



HIDROELEKTRANE

OSNOVI

ELEKTROENERGETIKE

Dr Ivana Vlajić-Naumovska

Sadržaj

2

- Hidroelektrane
- Vrste hidroelektrana
- Osnovni delovi hidroelektrana
- Pumpno-akumulacione hidroelektrane
- Osnovne osobine i vrste vodnih turbina
- Izbor broja obrtaja i tipa turbine
- Kavitacija
- Uticaj na prirodnu sredinu
- Hidroelektrane u Srbiji

Hidroelektrane

3

- Hidroelektrane su postrojenja kod kojih se električna energija proizvodi iz potencijalne energije vode.
- **Vrste hidroelektrana**
- Pored navedenih karakteristika koje važe za sve elektrane, za hidroelektrane je značajno navesti još i *instalirani protok* Q_{max} (ili veličina izgradnje) i *prosečnu godišnju proizvodnju* (GWh).
- Prema tome da li postoji akumulacioni bazen i kolika je njegova veličina, postoje:
 - protočne hidroelektrane;
 - hidroelektrane sa dnevnom i nedeljnom akumulacijom;
 - hidroelektrane sa sezonskom akumulacijom.
- S obzirom na način korišćenja akumulacionog bazena hidroelektrane delimo na:
 - akumulacione;
 - pumpno-akumulacione.

Vrste hidroelektrana

4

- *Protočne hidroelektrane* koriste prirodni protok vode. Raspoloživi protok se menja zavisno od količine padavina.
- Kada je protok veći od predviđenog onda se višak vode nekorisno preliva preko brane, a kada je protok manji od predviđenog, onda se smanjuje proizvodnja električne energije.
- Protok vode za koji se elektrana izgradi naziva se *normalni protok*.
- Da bi se odredio normalni protok za neku reku nije dovoljno da se mere dnevni protoci u toku jedne godine, jer postoje sušne i kišne godine.
- Obično se uzimaju podaci za period od 10, 20 ili više godina kao stvarni pokazatelji protoka vode.

Vrste hidroelektrana

5

- *Akumulacione hidroelektrane* se grade ako teren omogućuje ekonomičnu izgradnju akumulacionog bazena ili veštačkog jezera u kome može da se akumulirše suvišna voda u vreme velikih padavina.
- Za vreme suše, ova se voda koristi da za istu reku poveća broj dana normalnog protoka.
- Akumulacione hidroelektrane sa dnevnom i nedeljnom akumulacijom imaju još i veoma značajnu ulogu pokrivanja vrhova opterećenja.

Vrste hidroelektrana

6

- Kod veličine akumulacionog bazena, treba razlikovati ukupnu i korisnu zapreminu akumulacionog bazena.
- *Ukupna zapremina* odgovara količini vode koja može da stane između dna i najvišeg nivoa vode u bazenu.
- *Korisna zapremina* se odnosi na zapreminu vode između najnižeg i najvišeg nivoa vode u bazenu u normalnom pogonu.
- *Energetska vrednost akumulacionog bazena* je količina električne energije koja bi se proizvela u sopstvenoj hidroelektrani i u svim nizvodnim hidroelektranama za slučaj pražnjenja korisne zapremine bazena bez dotoka i bez gubitaka vode.

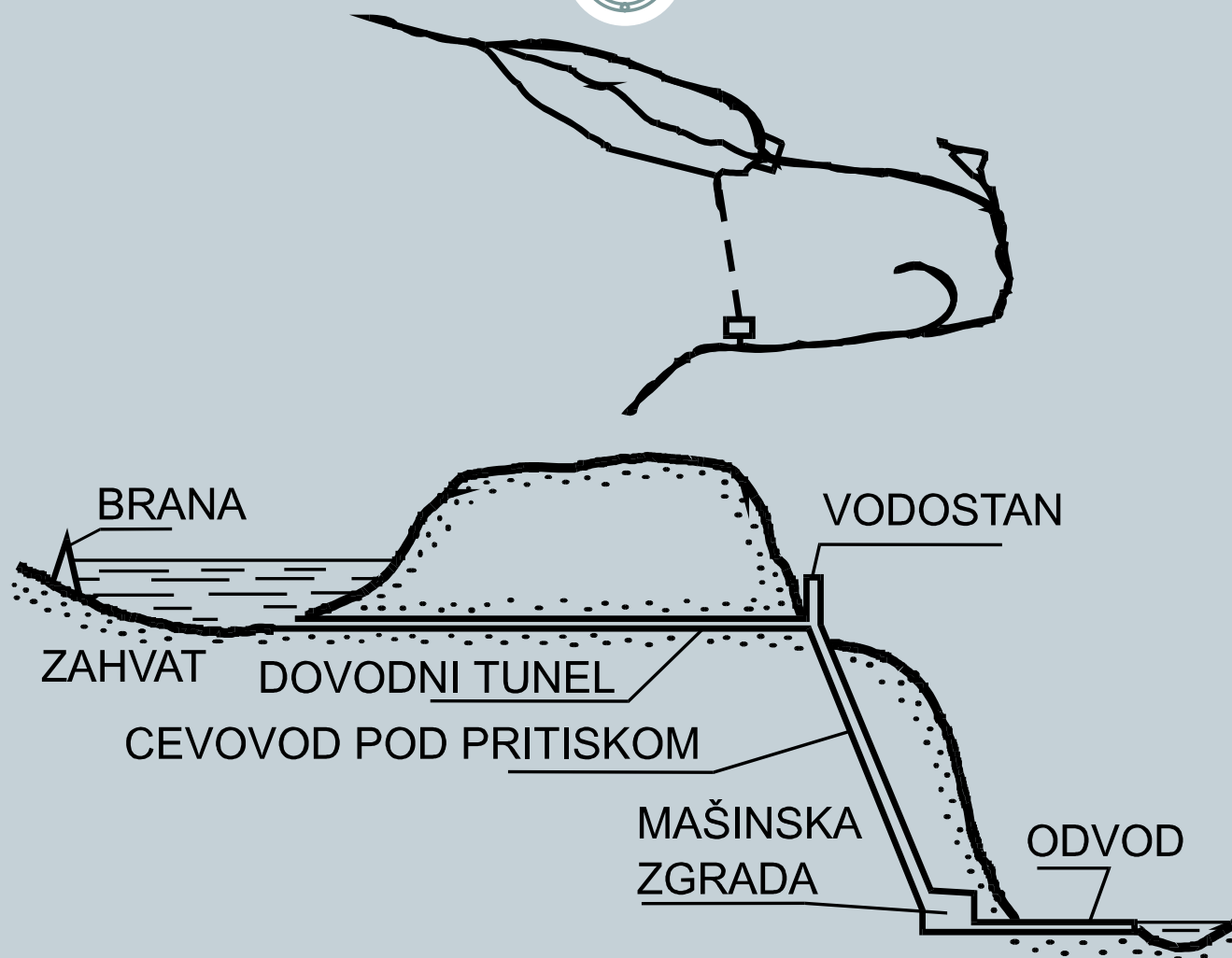
Vrste hidroelektrana

7

- Osnovni delovi hidroelektrana su: *brana, zahvat, dovod, vodostan, cevovod pod pritiskom, mašinska zgrada i odvod*.
- Koje od navedenih delova će neka hidroelektrana imati zavisi od konstrukcije hidroelektrane, topografskih uslova, geoloških uslova, od pogonskih zahteva hidroenergetskog iskorišćavanja celog vodotoka (potrebe navodnjavanja, vodosnabdevanja i zaštite od poplava) i od zaštite životne sredine.

Vrste hidroelektrana

8



Vrste hidroelektrana

9

- Prema konstrukciji, hidroelektrane se mogu podeliti u dve osnovne grupe:
 - *pribranske hidroelektrane,*
 - *derivacione hidroelektrane.*
- *Pribranske hidroelektrane* najčešće imaju mašinsku zgradu smeštenu uz branu, unutar brane ili je zgrada izvedena kao deo brane. Kod pribranskih hidroelektrana, nema potrebe za dovodom, vodostanom i odvodom, a zahvat i cevovod pod pritiskom predstavljaju deo brane, odnosno mašinske zgrade; obično se grade na većim rekama sa manjim padovima.

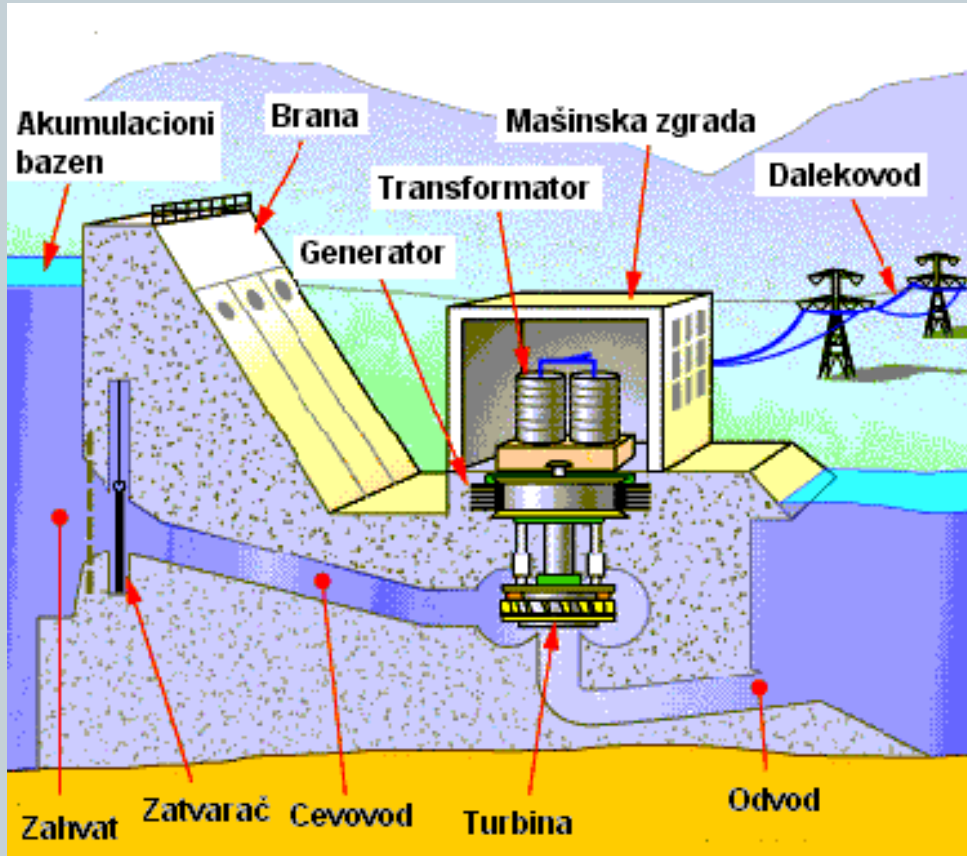
Vrste hidroelektrana

10

- *Derivacione hidroelektrane* imaju uglavnom manje vodotoke i veće padove i po pravilu sadrže sve nabrojane delove hidroelektrana. Dovod (dovodna derivacija) i odvod (odvodna derivacija) mogu biti otvoreni ili pod pritiskom, kod pojedinih tipova hidroelektrana, zavisno od konstrukcije, mogu i da ne postoje. Mašinska zgrada može da bude ukopana ili na otvorenom.
- Pod *male hidroelektranama* se podrazumevaju hidroelektrane snaga do 10 MW. Često se nazivaju i potočare. Prednost ovih elektrana se sastoji u relativno malom ulaganju, snabdevanju energijom teško pristupačnih, planinskih predela, čime imaju i veliku stratešku vrednost. Srbija je veoma bogata vodotocima, naročito u regionu Užica, Niša i Kragujevca, koji su slabo iskorišćeni.

Osnovni delovi hidroelektrana

11



- Osnovni delovi hidroelektrana su:
 - *brana,*
 - *zahvat,*
 - *dovod,*
 - *vodostan,*
 - *cevovod pod pritiskom,*
 - *mašinska zgrada i*
 - *odvod.*

Brana

12

- Brana služi da skrene vodu sa njenog prirodnog toka prema zahvatu hidroelektrane, da povisi nivo i uspori protok vode. Pored toga brane služe i za regulaciju vodotoka, regulaciju plovidbe rekom i slično.
- Brane se mogu podeliti prema sledećim kriterijumima:
 - ✓ *prema materijalu na:*
 - *betonske brane;*
 - *brane od lokalnih materijala, uglavnom od različitih vrsta zemlje i kamena.*
 - *prema konstruktivnim svojstvima na:*
 - *gravitacione brane* koje svojom velikom težinom stvaraju velike sile trenja koje deluju nasuprot hidrostatičkom pritisku vode;
 - *lučne brane*, koje svojim oblikom osiguravaju stabilnost;
 - *kontraforsne (olakšane) brane*, kod kojih pritisak primaju ploče i predaju ih potporama,
 - *stepenasto gravitacione i druge brane* koje predstavljaju kombinaciju prva tri osnovna tipa brana.

Brana

13

- ✓ *zavisno od mogućnosti odvoda: gluve brane (koje nemaju preliv vode) i vodopropusne brane.*
 - Betonske brane se grade kao gluve i kao vodopropusne.
 - Vodopropusne se izvode sa površinskim i unutrašnjim otvorima za preliv vode. Brane protočnih elektrana se obično sastoje od gluvog i od vodopropusnog dela. Visoke brane u uskim kanjonima često se grade kao gluve brane. U ovom slučaju se preliv suvišne vode ostvaruje zaobilazno, površinski ili kroz tunel.

Zahvat i dovod vode

14

- *Zahvat vode* treba vodu koja je akumulirana u jezeru da odvede prema turbinama.
- Primenjuju se dva osnovna tipa zahvata vode:
 - zahvat na površini vode,
 - zahvat ispod površine vode.
- *Zahvat na površini vode* se izvodi kod niskih brana, jer je nivo vode u akumulaciji praktično stalan.
- *Zahvat ispod površine vode* izvodi se uglavnom kod visokih brana, jer u takvim akumulacijama nivo vode nije stalan. Zahvat vode mora da bude na koti ispod koje se neće ni u najkritičnijim sušnim periodima spustiti nivo vode.
- *Dovod vode* spaja zahvat vode sa vodostanom. Izvodi se kao kanal ili kao tunel, što zavisi od terena i pogonskih zahteva hidroelektrane. Dovodni tunel se izvodi kao gravitacioni ili pod pritiskom.

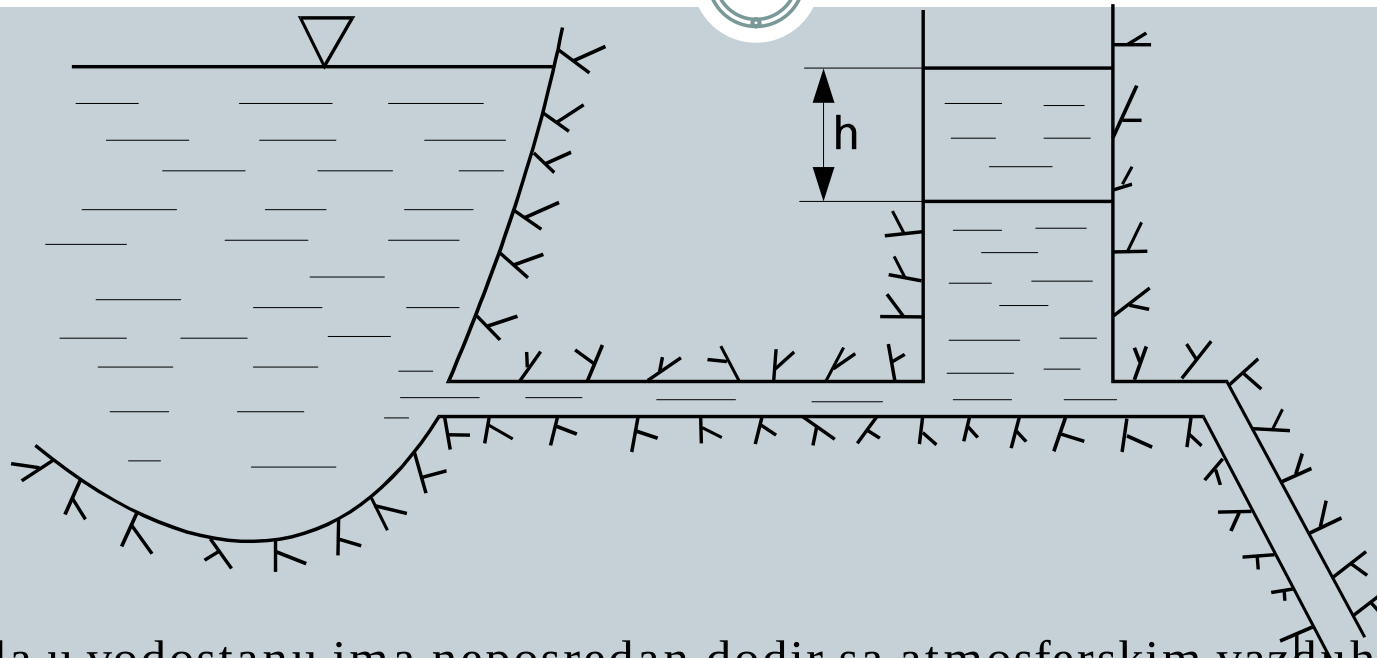
Vodostan

15

- Ako se na dugački dovodni tunel ili kanal, direktno nastavi cevovod pod pritiskom, onda kod naglog zatvaranja turbina dolazi do porasta pritiska u dovodnim organima, koji može da bude veoma opasan.
- Pri naglom zatvaranju turbina, kinetička energija vode u dovodnom tunelu i cevovodu pod pritiskom mora da se pretvori u potencijalnu energiju.
- Usled toga dolazi do elastične deformacije čeličnog cevovoda i betonske obloge dovodnog tunela.
- *Vodostan* ima ulogu da porast pritiska, koji nastaje naglim zatvaranjem turbine, ograniči na relativno nisku vrednost.
- *Vodostan* se gradi na mestu gde tunel prelazi u cevovod pod pritiskom.

Vodostan

16



- Voda u vodostanu ima neposredan dodir sa atmosferskim vazduhom. Zatvaranjem turbina, voda u dovodnom tunelu teče još neko vreme i podiže nivo vode u vodostanu. Na taj način, kinetička energija vode u dovodnom tunelu prelazi u potencijalnu energiju vodenog podignutog stuba u vodostanu.
- Zapremina vodostana treba da bude dovoljno velika da pri normalnoj brzini otvaranja turbine (na primer, porast opterećenja turbine od 50% na 100% za vreme od 3s) ne dođe do potpunog pražnjenja vodostana, jer bi u tom slučaju ušao vazduh u cevovod pod pritiskom i izazvao opasne udare vode prilikom izlaska vazduha i ponovnog punjenja cevovoda vodom.

Cevovod pod pritiskom

17

- Cevovod pod pritiskom najčešće se izrađuje od zavarenih čeličnih limova. Pored toga, kao materijal za ove cevovode koristi se armirani beton, liveno gvožđe i liveni čelik.
- Cevovodi pod pritiskom postavljaju se nepokriveni na površinu zemlje, slobodno u tunelu i ubetonirani ili ukopani. Kod slobodno položenog cevovoda mora da postoji mogućnost slobodnog istezanja usled promena temperature, što se postiže tako što se cevovod podeli u više sekcija, koje se među sobom spajaju dilatacionim komadima.
- Na ulazu u cevovod uvek se postavlja zaporni organ (zatvarač), koji treba da spreči doticanje vode ako iz bilo kog razloga pukne cevovod. Kad cevovod pukne, brzina u njemu se poveća, što se koristi za stvaranje impulsa za zatvaranje zapornog organa.

Mašinska zgrada i odvod

18

- Mašinska zgrada je građevina u kojoj su smešteni agregati hidroelektrane (turbine i generatori) i pomoćna oprema. Mašinska zgrada treba da zadovolji često protivurečne uslove – pogodnosti za eksploataciju i ekonomičnost u izgradnji (na primer, postizanje povoljnih uslova za remontovanje može značajno da poskupi izgradnju).
- Mašinske zgrade hidroelektrana mogu da se klasifikuju na više načina:
 - ✓ *zavisno od toga da li zgrada prima pritisak vode:*
 - *zgrade koje primaju pritisak zajedno sa branom trpe pritisak vode,*
 - *zgrade koje ne primaju pritisak vode (kao kod derivacionih elektrana);*
 - ✓ *prema uređajima za odvod vode sa višeg na niži nivo, zgrade protočnih elektrana mogu da budu:*
 - *razdvojene od preliva, gde se odvod suvišne vode sa gornjeg nivoa ostvaruje preko prelivnih otvora na brani i drugih uređaja koji nisu povezani sa zgradom hidroelektrane,*
 - *zajedno sa prelivima, koji su obično smešteni na masivnom (podvodnom) delu zgrade;*

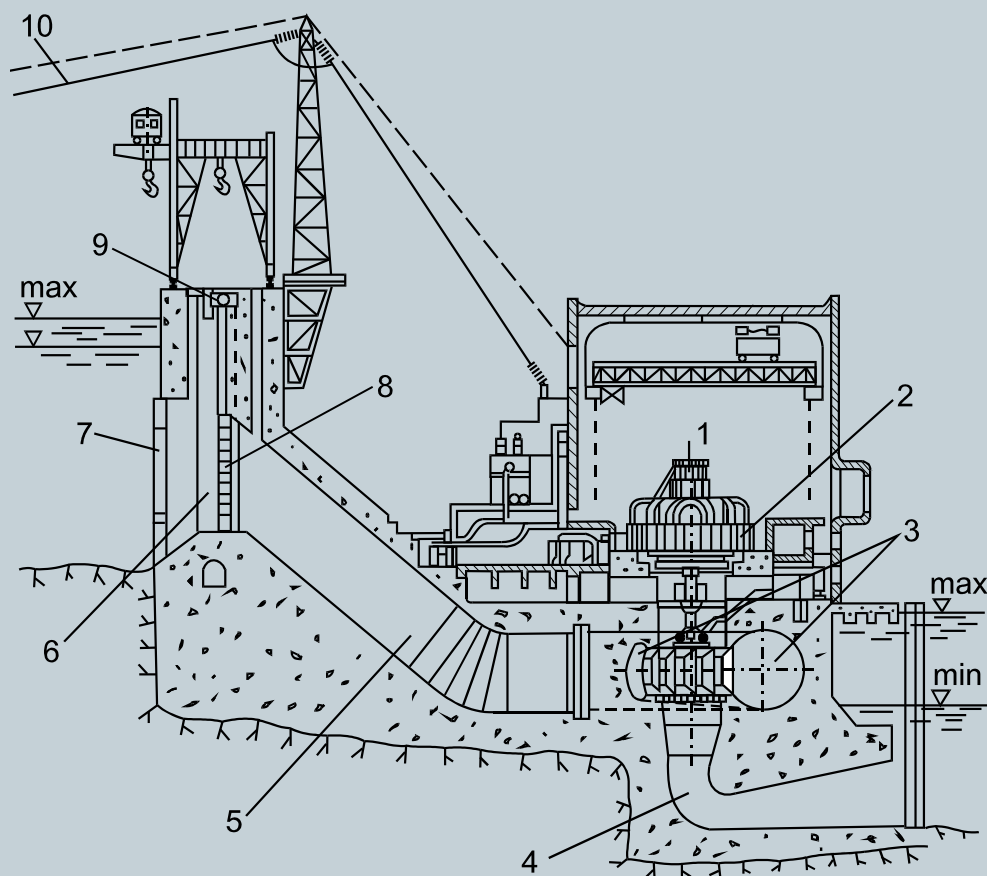
Mašinska zgrada i odvod

19

- ✓ *prema tipu konstrukcije uređaja za dizanje:*
 - *zatvorena, sa unutrašnjim smeštajem uređaja za dizanje – mosne dizalice,*
 - *poluotvorena, gde je osnovni uređaj za dizanje (portalna dizalica) smeštena iznad mašinske sale sa generatorom. Generatorska sala je nisko postavljena sa demontažnim poklopcima iznad generatora,*
 - *otvorena, gde mašinska zgrada ne postoji, a generatori su pokriveni poklopcima.*

Mašinska zgrada i odvod

20



Slika 1 Vertikalni presek zatvorene mašinske zgrade hidroelektrane

1 - mašinska sala, 2 - generator, 3 - spiralna komora, 4 - isisna cev, 5 - turbinski cevovod, 6 - ulaz vode, 7 - rešetka, 8 - zatvarač, 9 - mehanizam za dizanje zatvarača, 10 - dalekovod,

Mašinska zgrada i odvod

21

- ✓ *prema smeštaju u odnosu na površinu zemlje:*
 - *nadzemna mašinska zgrada,*
 - *podzemna mašinska zgrada, koja se nalazi ispod površine zemlje – grade se kod derivacionih hidroelektrana kada se derivacija izvodi u vidu tunela;*
- ✓ *zavisno od položaja osa agregata (turbina i generator):*
 - *zgrade sa vertikalnim agregatima;*
 - *zgrade sa horizontalnim agregatima – primenjuju se kod hidroelektrana sa padom od 10-15m, preglednost i pristupačnost je veća, ali se zahtevaju znatno veće površine za smeštaj nego kod agregata sa vertikalnom osovinom.*

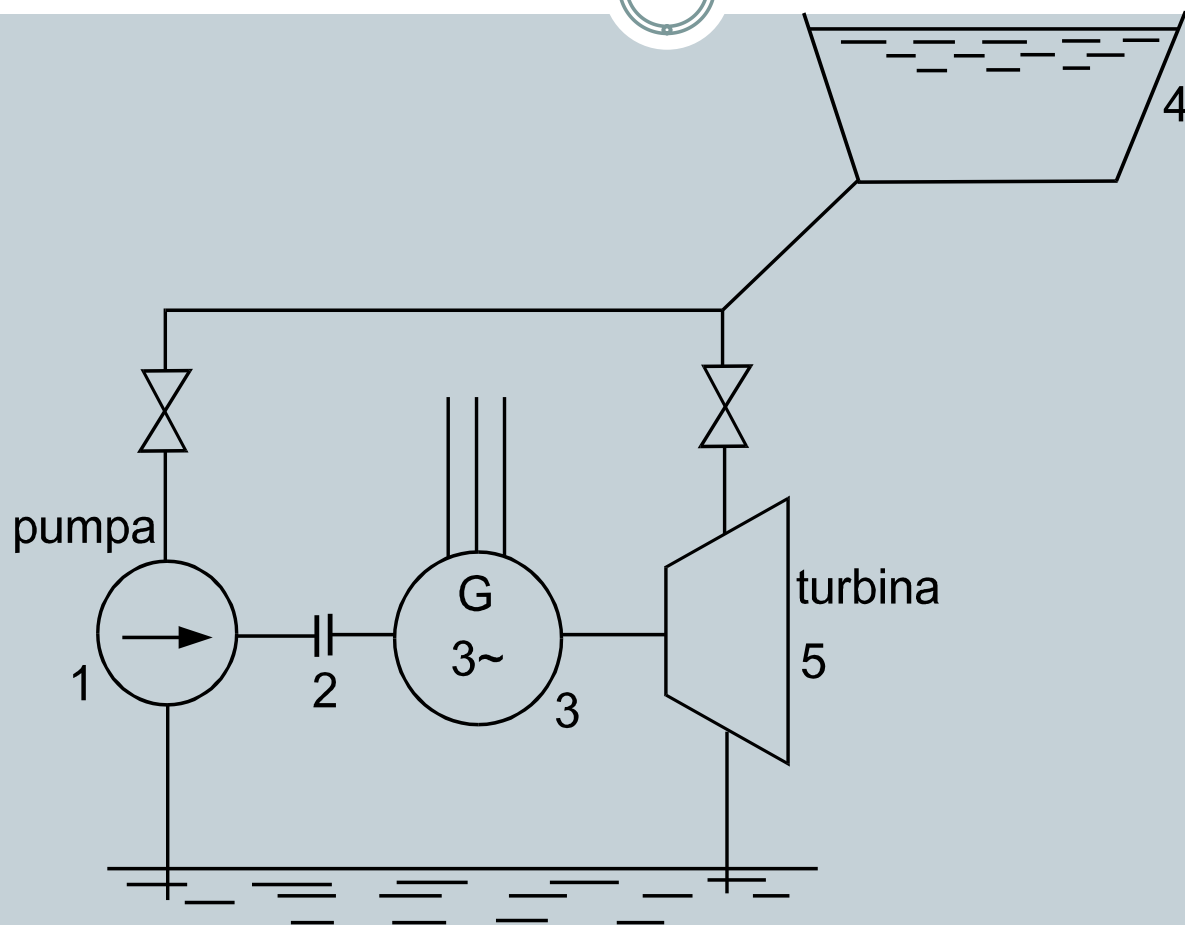
Pumpno-akumulacione hidroelektrane

22

- *Pumpno-akumulacione hidroelektrane* imaju veoma značajnu ulogu u EES jer mogu brzo da promene svoju ulogu – da budu proizvođač ili potrošač električne energije i tako obezbede stabilnost EES.
- **Princip rada**
- Pumpno-akumulaciono postrojenje može da radi kao hidroelektrana (turbinski rad) ili kao potrošač električne energije (pumpni rad).
- Kada radi kao hidroelektrana, voda iz akumulacionog bazena se usmerava kroz turbinu i njena potencijalna energija se pretvara u mehaničku, a potom u generatoru i u električnu energiju.
- Kada pumpno-akumulaciono postrojenje radi u pumpnom režimu, generator se koristi kao motor koji pokreće pumpu, a pumpa crpe vodu iz vodotoka ili jezera i prebacuje je u akumulacioni bazen.
- Postoje i konstrukcije kod kojih su pumpa i turbina jedan uređaj koji može da radi i u režimu pumpe i u režimu turbine – takve hidroelektrane se nazivaju *reverzibilne hidroelektrane*.

Pumpno-akumulacione hidroelektrane

23



Slika 2 Šema pumpno-akumulacionog postrojenja

1 - pumpa, 2 - spojnica, 3 - generator, 4 - akumulacioni bazen, 5 - turbina

Osnovne osobine i vrste vodnih turbina

24

- Pretvaranje potencijalne i kinetičke energije toka vode u električnu energiju se u hidroelektranama ostvaruje pomoću hidrauličnih *turbina* i *generatora* koje zajedno obrazuju *hidroagregate*.
- Hidraulična *turbina* je mašina koja koristi energiju toka vode za okretanje rotora, odnosno radnog kola.
- Postoje tri osnovna tipa turbina:
Fransisova, Peltonova i Kaplanova turbina.

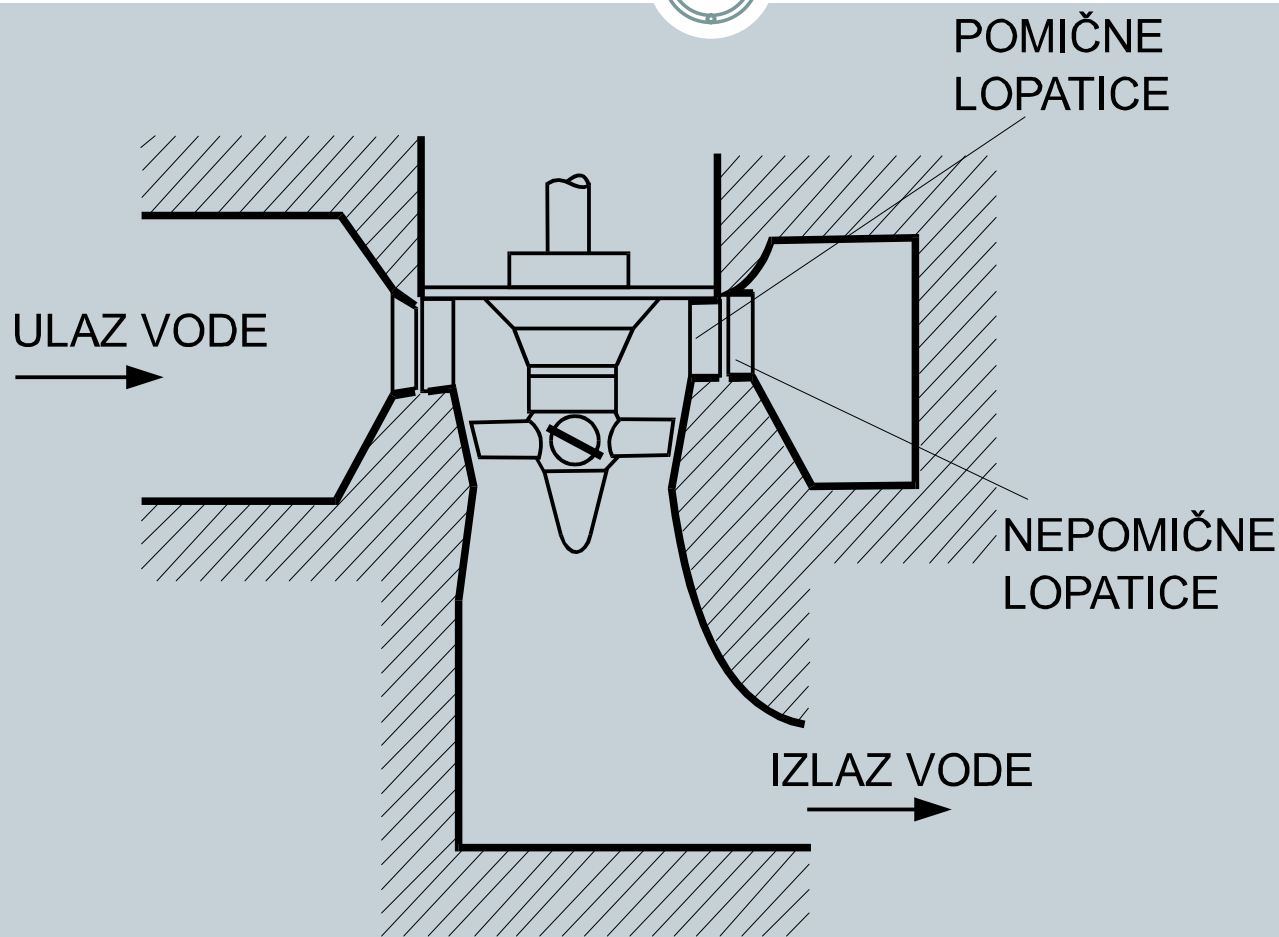
Osnovne osobine i vrste vodnih turbina

25

- Fransisova turbina upotrebljava se za padove do 500m i izvodi se sa vertikalnom i horizontalnom osovinom.
- Peltonova turbina radi na principu slobodnog mlaza, izvodi se sa jednom ili više mlaznica i upotrebljava za padove iznad 500m.
- Kaplanova turbina je namenjena za manje padove i može da bude sa pomičnim (Kaplan) ili sa nepomičnim rotorskim lopaticama (propelerna turbina).

Osnovne osobine i vrste vodnih turbina

26



Slika 3 Presek i princip rada Kaplanove turbine

Izbor broja obrtaja i tipa turbine

27

- Pošto je nemoguć tačan proračun protoka vode i gubitaka koji se pri tome javljaju, najčešće se pribegava konstruisanju modela kako bi se odredile najpovoljnije dimenzije i oblici turbine i pratećih uređaja.
- Modeli su znatno manjih dimenzija od realnih turbina, pri čemu je osnovni cilj da se u turbini modelu ostvare isti uslovi protoka kao kod realne turbine, tj. da se postigne geometrijska, kinematička i mehanička sličnost i istovetan stepen iskorišćenja.

Izbor broja obrtaja i tipa turbine

28

Tip turbine		n_s (ob/min)	Pad (m)
Peltonova	2 mlaznika	2-25	≥ 400
	4 mlaznika	25-70	
Fransisova	sporohodna	70-125	50-400
	normalna	125-200	
	brzohodna	200-300	
	ekspresna	300-450	
Propelerna		300-400	300-1000

Tabela 1 Optimalni specifični broj obrtaja i padovi turbina modela

Izbor broja obrtaja i tipa turbine

29

- *Povoljni broj obrtaja turbine sa neto padom H_N i protokom Q može se odrediti korišćenjem relacije:*

$$n = n_s \frac{\sqrt[4]{H_N^3}}{\sqrt{Q}}$$

- Stepen iskorišćenja pojedinih tipova turbina zavisi i od odnosa protoka i maksimalnog protoka kroz turbinu.
- Maksimalni protok kroz turbinu određuje se kao protok kod konstantnog pada i konstantnog broja obrtaja, pri maksimalnom otvorenom statoru.

Izbor broja obrtaja i tipa turbine

30

- *Povoljni broj obrtaja generatora.* Osovina turbine i osovina generatora obrću se istom brzinom, koja treba da bude povoljna i za turbinu i generator, tj. brzina turbine treba da bude usklađena i sa povoljnom brzinom generatora.
- Dimenzije generatora mogu se proceniti na osnovu relacije:

$$D^2 l = \frac{CS_n}{n}$$

- gde je D označen unutrašnji prečnik statora, l aktivna dužina statora, S_n naznačena snaga, n brzina obrtanja, a C je konstrukciona konstanta koja zavisi od gustine struje i karakteristika magnetnog kola.

Kavitacija

31

- *Kavitacija* je pojava isparavanja vode na pojedinim tačkama protoka kroz turbinu kod velikih brzina obrtanja turbine. Isparavanje nastaje usled pada pritiska i time izazvanog sniženja temperature isparavanja vode, a može da se javi samo kod reakcionih turbina kod kojih postoji razlika ulaznih i izlaznih brzina i pritisaka.
- Kada je izlazni pritisak iz turbine manji od pritiska isparavanja, dolazi do isparavanja vode i stvaranja mehurića pare.
- Stvoreni mehurići prelaze u područje većeg pritiska gde nastaje nagla kondenzacija i para se ponovo pretvara u vodu.
- Pojava kavitacije smanjuje stepen iskorišćenja turbine i može da izazove oštećenje delova postrojenja.

Uticaj na prirodnu sredinu

32

- Uticaj hidroelektrana na prirodnu sredinu se prvenstveno odnosi na uticaj brana.
- Uz sve prednosti, brane imaju i neke nedostatke.
- Naime, brane podižu nivo vode i time, kod izgradnje elektrane, poplavljaaju do određene kote sve objekte: prirodne lepote i turističke vrednosti – kanjone, spomenike kulture, naselja, privredne objekte, plodno zemljište i sl.
- Brane pregrađuju tok reke i time onemogućavaju nekim ribljim vrstama dolazak na prirodna mrestilišta (npr. losos).
- Od brane prete i neposredne opasnosti.
- Nesreće pri pucanju ili popuštanju brana nisu retkost.
- Više od 100 brana popustilo je u SAD od 1930. do danas.

Uticaj na prirodnu sredinu

33

- Izgradnjom velike brane kod Asuana na Nilu spomenici drevne egipatske civilizacije su morali da budu izmešteni na višu kotu, a pojavili su se i uticaji ne samo na mikro, već i makro klimu.
- Naime, zbog stvorene ogromne akumulacije u suvom, tropskom podneblju, procenjuje se da s površine akumulacije isparava oko 1/4 ukupnog protoka reke Nil.
- Jedan deo odlazi u podzemlje i utiče na dizanje nivoa podzemnih voda nizvodno od brane.
- Pretpostavlja se da su i pojave velikih suša (a time i gladi) u Etiopiji povezane sa izgradnjom ove brane.
- Izgradnjom brane kod Bajine Bašte na Drini nestalo je atraktivnog spuštanja niz reku splavovima i kajacima.
- Danas se vode ozbiljne polemike oko moguće izgradnje brane na reci Tari.

Prikaz hidroelektrana na Dunavu

34

✓ Đerdap 1

- Sistem "Đerdap 1" čine:
- *Glavni objekat*: 2 elektrane, 2 brodske prevodnice, prelivna i neprelivna brana i drugi objekti neposredno vezani za eksploataciju elektrana i prevodnica. Preko elektrane izgrađen je i put za automobilski saobraćaj;
- *Spoljne komunikacije*: izmeštanje i rekonstrukcija postojećih železničkih pruga, puteva, pristaništa, dalekovoda i telegrafsko-telefonskih linija;
- *Objekti i uređaji za zaštitu priobalnog područja od dejstva uspora*: rekonstrukcija postojećih i izgradnja novih zaštitnih nasipa i drenažnih sistema;
- *Objekti i uređaji za zaštitu akumulacionog bazena od nanosa i pritoka Dunava*, u prvom redu iz sliva Velike Morave.

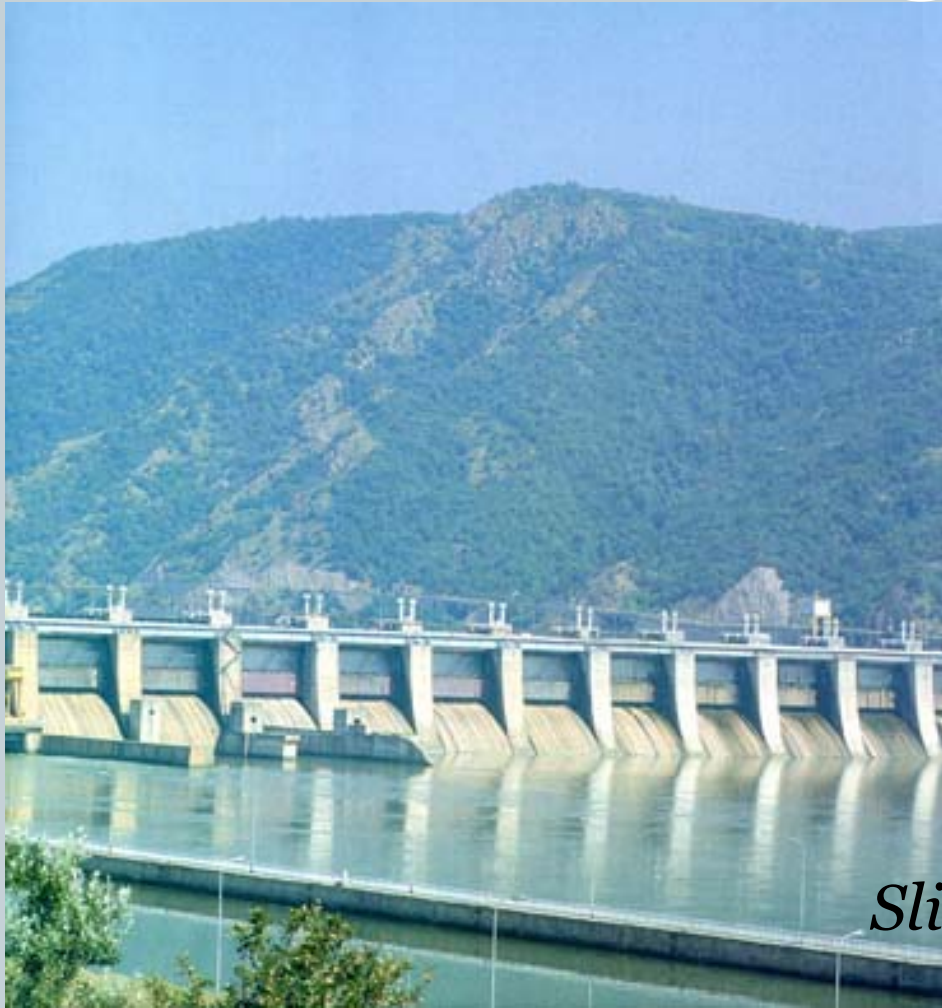
Prikaz hidroelektrana na Dunavu

35

- *Glavni objekat hidroenergetskog i plovidbenog sistema "Đerdap 1"* nalazi se 10 km uzvodno od Kladova.
- Glavni objekat je simetričan, sa prelivnom branom u sredini korita i po jednom elektranom i prevodnicom sa svake strane.
- Između prevodnica i obala su neprelivne brane.
- Ukupna dužina brane je 1278m, od čega prelivni deo brane iznosi 441m.
- *Prelivna brana* obezbeđuje regulisanje nivoa gornje vode, kao i evakuaciju velikih voda i leda.
- Brana je betonska, gravitaciona i ima 14 prelivnih polja širine 25m. Prelivna polja su opremljena dvodelnim kukastim zatvaračima sa hidrauličnim pogonom.
- Preko prelivne brane kroz turbine i druge evakuacione organe može se evakuisati protok Dunava od $22500\text{m}^3/\text{s}$, tj. onaj protok koji se po računu verovatnoće pojavljuje jednom u 1000 godina.
- Prosečni protok Dunava je $5520\text{m}^3/\text{s}$.

Prikaz hidroelektrana na Dunavu

36



Slika 4 Hidroelektrana "Đerdap 1"

Prikaz hidroelektrana na Dunavu

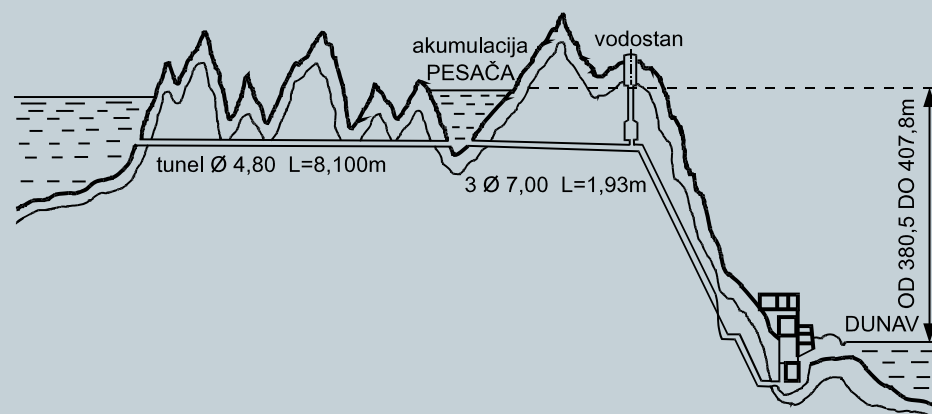
37

✓ Đerdap 2

- Glavni objekat sistema Đerdap 2 izgrađen je 80km uzvodno od HE. Sastoji se od 2 elektrane, 2 brodske prevodnice, 2 prelivne brane, 2 neprelivne brane sa putem preko brane i mogućnošću izgradnje železničke pruge preko brane.
- Nivo gornje vode varira od 41 do 39,5m nadmorske visine.
- U obe elektrane ugrađeno je 20 cevnih (kapsulnih) hidroagregata, ukupne instalisane snage 540MW.
- Brodske prevodnice su jednostepene, a ostale karakteristike su kao na "Đerdapu 1".
- Prosečna godišnja proizvodnja pri protočnom radu iznosi oko 2500GWh.

Prikaz hidroelektrana na Dunavu

38



Slika 6 Pumpno-akumulaciona hidroelektrana "Đerdap 3"

Slika 5 Hidroelektrana "Đerdap 2"

Prikaz hidroelektrana na Dunavu

39

- ✓ **Pumpno-akumulaciona hidroelektrana "Đerdap 3"**
- Hidroelektrana "Đerdap 3" biće izgrađena na desnoj obali Dunava, 160km nizvodno od Beograda. Elektrana će raditi noću, i u drugim prilikama kada ima viška električne energije, u pumpnom režimu i pumpati vodu iz Dunava u gornju akumulaciju. Danju, u vreme najvećih opterećenja, elektrana će raditi u turbinskom režimu i proizvoditi električnu energiju kojom će se pokrivati vrhovi opterećenja.

Literatura

40

- M. Milanković, D. Perić, I. Vlajić-Naumovska, “*Osnovi elektroenergetike*”, Visoka škola elektrotehnike i računarstva strukovnih studija, Beograd, 2016.