Rad HE s tri jednaka agregata

Babić, Matija

Master's thesis / Diplomski rad

2017

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:664505

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek

zir.nsk.hr

Image not found or type unknown

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Sveučilišni studij

RAD HIDROELEKTRANE S TRI JEDNAKA AGREGATA

Diplomski rad

Matija Babić

Osijek, 2017.

FERIT
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada

Osijek, 18.07.2017.

Odboru za završne i diplomske ispite

Imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada

Ime i prezime studenta:	Matija Babić
Studij, smjer:	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika, smjer Elektroenergetika
Mat. br. studenta, godina upisa:	D-792, 09.10.2014.
OIB studenta:	64058005169
Mentor:	Prof.dr.sc. Marinko Stojkov
Sumentor:	
Sumentor iz tvrtke:	
Predsjednik Povjerenstva:	Prof.dr.sc. Damir Šljivac
Član Povjerenstva:	Doc.dr.sc. Danijel Topić
Naslov diplomskog rada:	Rad HE s tri jednaka agregata
Znanstvena grana rada:	**Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)**
Zadatak diplomskog rada:	Opis HE i komponenti; Karakteristične radne točke ovisno o promjeni protoka vode; Uvjeti paralelnog rada generatora; Prilagođenje opterećenja sinkronog generatora, Energetske karakteristike i najpovoljnija raspodjela opterećenja (rad 1, 2 i 3 turbine istovremeno).
Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada):	Izvrstan (5)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 3 bod/boda Razina samostalnosti: 2 razina
Datum prijedloga ocjene mentora:	13.07.2017.

Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija:	Potpis:
	Datum:

FERIT
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK**

IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA

Osijek, 18.07.2017.

Ime i prezime studenta:	Matija Babić
Studij:	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika, smjer Elektroenergetika
Mat. br. studenta, godina upisa:	D-792, 09.10.2014.
Ephorus podudaranje [%]:	1%

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom**: Rad HE s tri jednaka agregata**

izrađen pod vodstvom mentora Prof.dr.sc. Marinko Stojkov

i sumentora

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.
Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

SADRŽAJ

1. UVOD 1
1.1. Zadatak diplomskog rada 1
2. OPIS HIDROELEKTRANA 2
2.1. Podjela hidroelektrana 3
2.2. Osnovne komponente hidroelektrana 10
3. SINKRONI GENERATOR 23
3.1. Pogonska stanja sinkronog generatora 27
3.1.1. Prazni hod 28
3.1.2. Opterećenje generatora 30
3.1.3. Kratki spoj 33
3.2. Sinkroni generator u pogonu 35
3.2.1. Otočni rad sinkronog generatora 35
3.2.2. Paralelni rad sinkronog generatora 37
3.2.3. Regulacija napona sinkronog generatora 41
3.2.4. Regulacija frekvencije i snage agregata 43
4. ENERGETSKE KARAKTERISTIKE HIDROELEKTRANA 45
4.1. Hidroelektrane s odvojenim i zajedničkim dovodima i odvodima vode 54
4.2. Raspodjela opterećenja među paralelno spojenim agregatima 58
5. OPIS HIDROELEKTRANE SENJ 62
5.1. Mjerenje energetskih karakteristika Hidroelektrane Senj 69
5.2. Primjer proračuna odabira turbine 79
6. ZAKLJUČAK 84
Literatura 85
Sažetak 87

Abstract 88

Životopis 89

1. UVOD

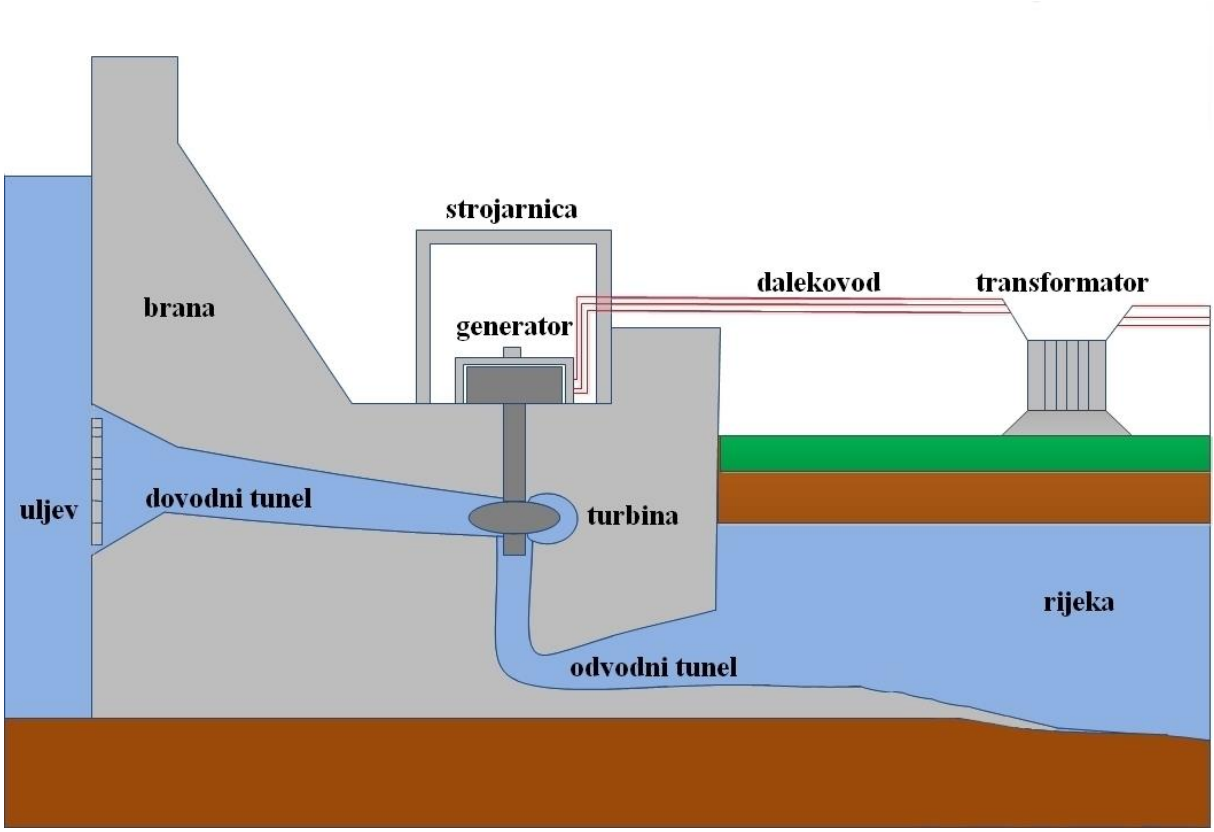
U ovom diplomskom radu opisane su hidroelektrane kao postrojenje u kojem se potencijalna energija vode pretvara u kinetičku energiju njenog strujanja, potom u mehaničku energiju vrtnje vratila turbine te konačno u električnu energiju u sinkronom generatoru. U drugom poglavlju opisana su svojstva hidroelektrana kao i sve komponente hidroelektrane. Hidroelektranu čine sva postrojenja i građevine od dovoda i odvoda vode, postrojenja za proizvodnju električne energije te transformaciju na razinu prikladnu za krajnjeg potrošača.
U trećem poglavlju opisan je sinkroni generator, princip rada sinkronog generatora, podjela sinkronih generatora te sva pogonska stanja u kojima može raditi sinkroni generator. Jedan od najvažnijih dijelova hidroelektrane je sinkroni generator koji mehaničku energiju vodne turbine pretvara u električnu energiju, a njegova pogonska stanja su: prazni hod, opterećenje i kratki spoj. Sinkroni generator u pogonu radi na vlastitu mrežu (otočni rad), te na krutu mrežu (paralelni rad).
U četvrtom poglavlju opisane su energetske karakteristike hidroelektrana te raspodjela opterećenja među agregatima. Neke od energetskih karakteristika hidroelektrana su: instalirana snaga, maksimalna snaga, raspoloživa snaga, veličina izgradnje, moguća godišnja proizvodnja te veličina akumulacijskog bazena. Kada je riječ o praćenju potrošnje, odnosno opterećenja proizvodnje električne energije, dnevni dijagram opterećenja služi za praćenje i planiranje dnevnog opterećenja te se na odgovarajući način prilagođava sama proizvodnja električne energije. Svrha razmatranja karakteristika hidroelektrana je da se odredi optimalna raspodjela opterećenja između agregata te se odrede osnovna i diferencijalna karakteristika hidroelektrane, koje će poslužiti za određivanje raspodjele opterećenja između elektrana u elektroenergetskom sustavu.

1.1. Zadatak diplomskog rada

Opis HE i komponenti; Karakteristične radne točke ovisno o promjeni protoka vode; Uvjeti paralelnog rada generatora; Prilagođenje opterećenja sinkronog generatora, Energetske karakteristike i najpovoljnija raspodjela opterećenja (rad 1, 2 i 3 turbine istovremeno).

2. OPIS HIDROELEKTRANA

Hidroenergija je oblik obnovljivog izvora energije koji koristi vodu pohranjenu u akumulacijskim jezerima ili vodu izravno iz vodotoka za proizvodnju električne energije. Kada kiša padne na zemlju, posjeduje potencijalnu energiju u odnosu na more ili ocean prema kojem teče. Ako na određenoj točki voda pada kroz značajnu vertikalnu visinu, njena kinetička energija se na lopaticama turbine pretvara u mehaničku energiju te se vrtnjom vratila turbine pretvara u električnu energiju u električnom generatoru. Prema tome, hidroelektrana je postrojenje u kojem se kinetička energija vode pretvara u električnu energiju. Hidroelektranu čine sva postrojenja koja služe za prikupljanje vode, dovođenje i odvođenje vode, pretvorbu energije te njenu transformaciju i prijenos prema potrošačima.



Slika 2.1. *Opća shema hidroelektrane* [1]

2.1. Podjela hidroelektrana

Hidroelektrane se mogu podijeliti: prema padu, načinu korištenja vode, volumenu akumulacijskog bazena, prema smještaju strojarnice i prema instaliranoj snazi.
Prema visini pada razlikuju se:

1. Niskotlačne hidroelektrane (pad do 25 metara),

Niskotlačne hidroelektrane grade se kao riječna i kanalna postrojenja za specifične padove do 1 m/km. Cjelokupni pad niskotlačnih hidroelektrana stoji na raspolaganju neposredno kod elektrane, te zbog toga nema potrebe za dovodnim tlačnim cjevovodima i kanalima. Niskotlačne hidroelektrane nemaju mogućnost akumuliranja vode i upotrebljavaju se kao protočne hidroelektrane za pokrivanje osnovnog opterećenja.

2. Srednjetlačne hidroelektrane (pad od 25 m do 200 m),

Srednjetlačne hidroelektrane se od niskotlačnih razlikuju samo u tome što im gornja voda zbog većih padova (od 1 m/km do 5 m/km) nije neposredno uz elektranu. Ovdje se voda od zahvata dovodi kraćim tlačnim cjevovodom. Tlačni cjevovod i elektrana u ovom slučaju čine jednu cjelinu. Ovakve elektrane najčešće se grade na mjestima gdje rijeka stvara petlju koja se tada presiječe.

3. Visokotlačne hidroelektrane (pad iznad 200 m).

Visokotlačne hidroelektrane najčešće su derivacijske. Kod ovih elektrana su zahvat i strojarnica prostorno odvojeni jer se voda iz akumulacijskog bazena dovodi do turbina cjevovodom dugačkim i više kilometara. Grade se u brdovitim krajevima za padove veće od 5 m/km.

Obzirom na način korištenja vode:

1. Protočne hidroelektrane

Voda iz akumulacijskog jezera u protočnim hidroelektranama protječe kroz postrojenje i nastavlja dalje svojim prirodnim tokom. Uzvodna akumulacija kod protočnih hidroelektrana ne

postoji ili je vrlo mala pa se može jako brzo isprazniti prilikom rada pri nazivnoj snazi hidroelektrane. U ovom slučaju kinetička energija vode se direktno koristi za pokretanje turbina, ali su zbog te izvedbe ovakve hidroelektrane vrlo ovisne o trenutnom protoku vode. Prednost protočne hidroelektrane je u tome što ima vrlo mali utjecaj na okoliš, jer se koristi prirodni tok rijeke, te u tome što nema dizanja razine podzemnih voda.



Slika 2.2. *Protočna hidroelektrana* [29]

2. Akumulacijske hidroelektrane

Najčešći oblik dobivanja električne energije iz energije vode su akumulacijske hidroelektrane. Kada u ljetnim mjesecima prirodni dotok postane premalen, javlja se problem funkcioniranja hidroelektrane, te se u tom slučaju brana mora zatvoriti i potrebno je održavati biološki minimum razine vode. Problem akumulacijskim hidroelektrana predstavlja i dizanje razine podzemnih voda. Kod akumulacijskih hidroelektrana potrošnja električne energije ovisi o godišnjem dobu, danu u tjednu i dobu dana. Velika potrošnja energije je ponedjeljkom te ostalim radnim danima, a vikendom potrošnja pada i zbog toga se grade reverzibilne hidroelektrane koje popunjavaju dnevne vrhove potrošnje naročito tokom radnih dana u tjednu.

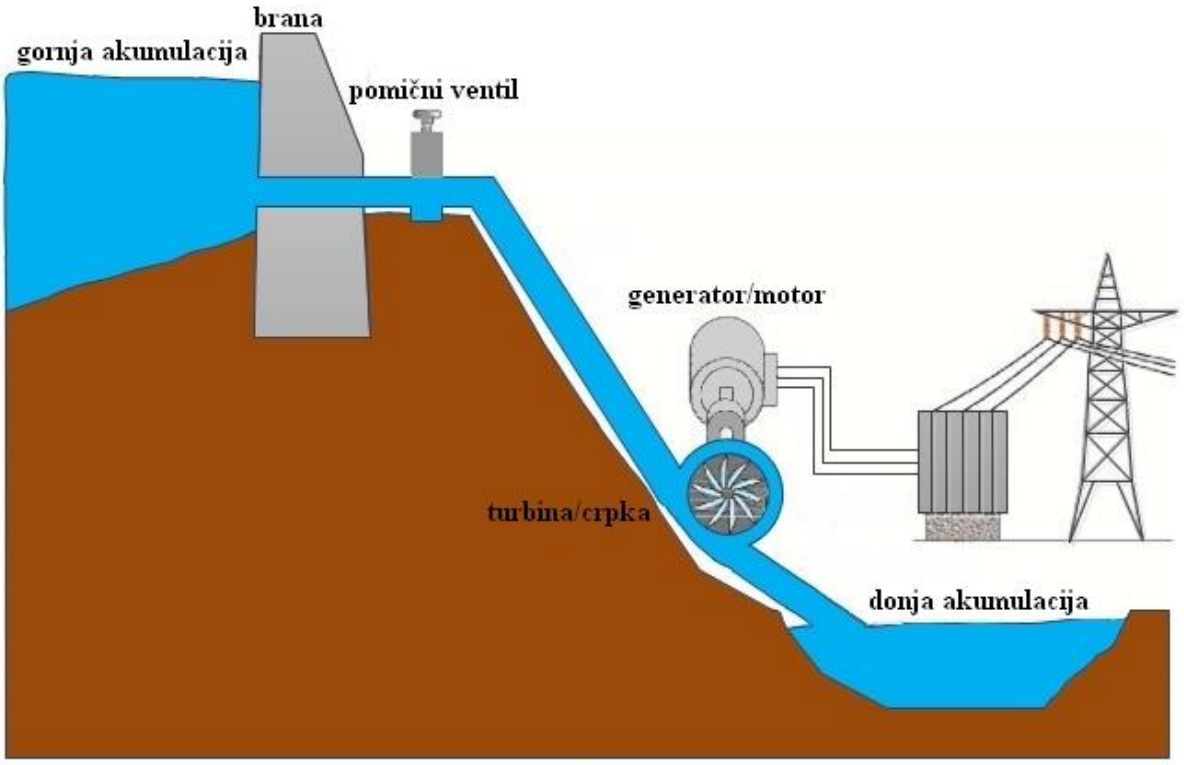


Slika 2.3. *Akumulacijska hidroelektrana* [2]

3. Crpno-akumulacijske (reverzibilne) hidroelektrane

Postrojenja koja za proizvodnju električne energije upotrebljavaju vodu pumpanjem u neki akumulacijski bazen. Dva skladišta vodene mase postoje u reverzibilnim hidroelektranama, a to su:

- gornja akumulacija – akumulacija vode koja protječe kroz postrojenje i proizvodi električnu energiju osigurava se gradnjom brane,
- donja akumulacija – umjesto da se voda vraća u osnovni tok rijeke, postoji donje akumulacijsko jezero u koje se voda vraća kada izađe iz hidroelektrane. Voda se pumpa iz donjeg spremnika vode u gornji, odnosno iz donje akumulacije u gornju akumulaciju, kada je potrošnja električne energije mala tokom noći i kada su na tržištu manje cijene električne energije. Reverzibilna turbina, odnosno generator, može raditi i kao turbina i kao pumpa. Danju kada je potrošnja električna energije veća, voda se propušta kroz turbinu iz gornje akumulacije i proizvodi se električna energija te se voda vraća u donju akumulaciju.



Slika 2.4. *Reverzibilna hidroelektrana* [22]

Izgradnja crpno-akumulacijskih hidroelektrana može biti naročito povoljna ako je visina pumpanja (crpljenja) manja od pada na kojem se koristi akumulirana voda. Stupanj djelovanja crpno-akumulacijske hidroelektrane, ako se pumpanje i korištenje vode vrši između istih nivoa, iznosi samo 50% - 60%, ovisno o padu.

Prema veličini akumulacijskog bazena:

- hidroelektrane s godišnjom akumulacijom vode – akumulacija se puni u kišnim godinama, a prazni u sušnim,
- hidroelektrane sa sezonskom akumulacijom vode – akumulacija se puni tokom kišne sezone, a prazni tokom sušne sezone,
- hidroelektrane s dnevnom akumulacijom vode – akumulacija se puni noću, a prazni danju.

Hidroelektrane se prema smještaju strojarnice dijele na:

1. Pribranske hidroelektrane

Pribranske hidroelektrane imaju strojarnicu smještenu uz branu, unutar same brane ili je strojarnica izvedena kao dio brane. U svim tim slučajevima dovod, vodna komora i odvod postaju nepotrebni, a zahvat i tlačni cjevovod predstavljaju dio brane, odnosno strojarnice. Tu se mogu razlikovati dva krajnja slučaja:

- kada strojarnica zamjenjuje dio brane (tu se obično ubrajaju elektrane na velikim rijekama sa širokim koritom kod kojih se radi o malom padu, pa brana ima razmjerno malu visinu),
- kada se strojarnica nalazi u samoj brani ili neposredno uz podnožje brane (u slučaju hidroelektrane na vodotocima s uskim koritom).

Jedno od mogućih rješenja je da se kad je pad malen svaki od agregata postavi u jedan stup brane, pa se na taj način dolazi do onoliko odvojenih strojarnica koliko ima agregata.

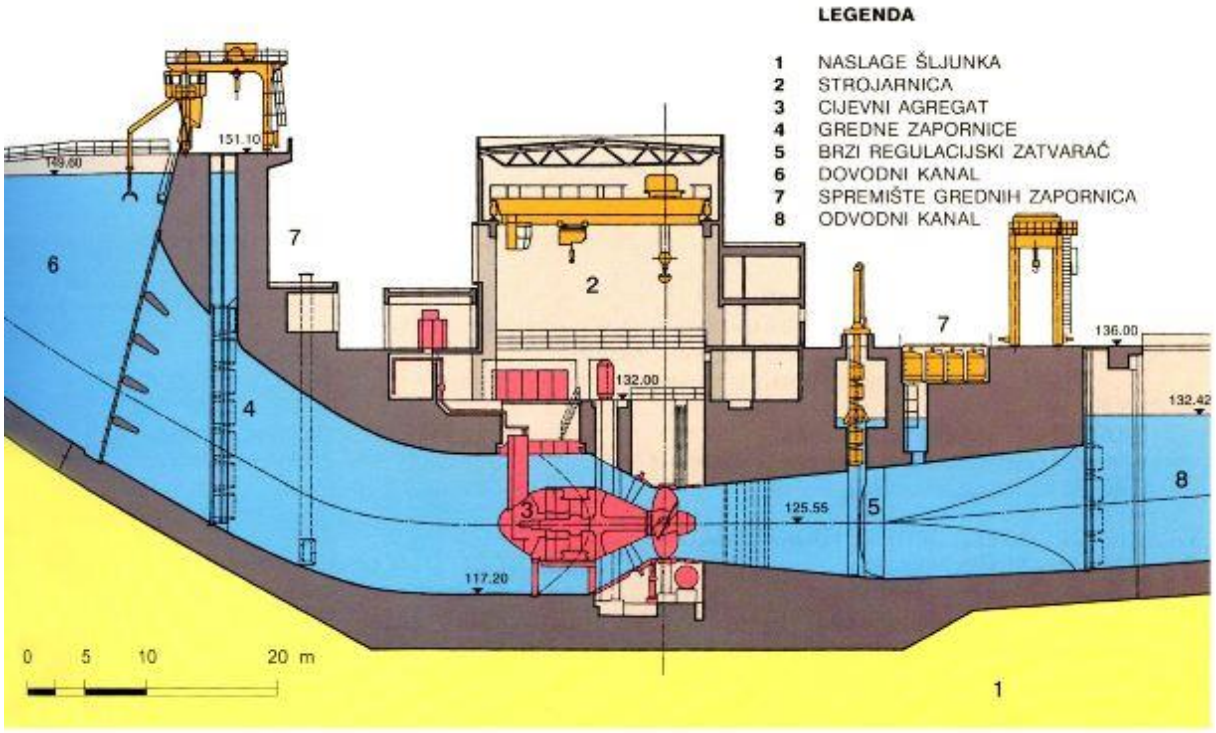


Slika 2.5. *Hidroelektrana Vuzenica (agregati su u stupovima brane)* [3]

2. Derivacijske hidroelektrane

Kod derivacijskih hidroelektrana, strojarnica u kojoj se odvija proizvodnja električne energije, odvojena je od hidroelektrane nizvodno od brane, te se do nje voda iz akumulacijskog jezera posebnim cijevima dovodi sa zahvata vode.

Obzirom na dovod dijelimo ih na: hidroelektrane s tlačnim dovodom i hidroelektrane s gravitacijskim dovodom. Dalje se mogu razlikovati: hidroelektrane sa strojarnicom na otvorenom i hidroelektrane s ukopanom strojarnicom.



Slika 2.6. *Derivacijska HE Dubrava* [4]

Prema instaliranoj snazi hidroelektrane se dijele na:

1. Velike hidroelektrane

Velike hidroelektrane imaju snagu od nekoliko stotina MW do više od 20 GW. Najveće hidroelektrane u svijetu koje su u pogonu su: Hidroelektrana Tri klanca koja se nalazi u Kini (snaga 22,5 GW), Hidroelektrana Itaipu koja se nalazi u Brazilu i Paragvaju (snaga 14 GW), i Hidroelektrana Guri koja se nalazi u Venezueli (snaga 10,2 GW). Veliki nedostatak ovakvih velikih hidroelektrana je jako velik negativan utjecaj na okoliš. Prilikom gradnje Hidroelektrane Tri klanca u Kini je poplavljeno 29 milijuna m^4 zemlje, potopljena su dva velika i 116 manjih gradova te je raseljeno više od milijun stanovnika. Sva prljavština potopljenih gradova, tvornica i rudarskih tvrtki je završila u akumulacijskom jezeru.



Slika 2.7. *Hidroelektrana Tri klanca, Kina, instalirana snaga 22,5 GW,* [5]

2. Male hidroelektrane

Male hidroelektrane nemaju nikakav štetan utjecaj na okoliš za razliku od velikih koje mijenjaju čitave ekosustave te imaju ogroman utjecaj na živi svijet rijeke i tlo te postoje štetne emisije prilikom izgradnje elektrane (transport i proizvodnja materijala) u čitavom ciklusu hidroelektrane. Hidroenergija se smatra najpoznatijim i najrazvijenijim obnovljivim izvorom energije i 22% svjetske proizvodnje električne energije dolazi iz malih i velikih hidroelektrana. Granična snaga koja dijeli hidroelektrane na male i velike hidroelektrane razlikuje se od zemlje do zemlje. U većini europskih zemalja se sve više prihvaća kapacitet od 10 MW instalirane snage kao gornja granica za male hidroelektrane dok je u Kini 25 MW, Francuskoj 8 MW te u Italiji 3 MW. U hrvatskoj je mala hidroelektrana postrojenje s izlaznom električnom snagom od 10 kW do 10 MW.

3. Mikro hidroelektrane

Mikro hidroelektrane imaju snagu do 100 KW i povezane su na dalekovode kao izvor jeftine obnovljive energije i grade se za male odvojene zajednice. Mikro hidroelektrane se nadopunjuju

sa solarnim fotonaponskim elektranama koje se najviše mogu iskoristiti tokom ljeta kada ima najviše Sunčeve energije, a istovremeno proizvodnja mikro hidroelektrana stane jer male rijeke, na kojima se nalaze mikro hidroelektrane, presuše.



Slika 2.8. *Mikro hidroelektrana Mataković, Mrežnica, instalirana snaga 15 kW* [6]

2.2. Osnovne komponente hidroelektrana

Karakteristični dijelovi hidroelektrane su:

- brana ili pregrada
- zahvat
- dovod vode
- vodna komora ili vodostan
- tlačni cjevovod
- strojarnica
- rasklopno postrojenje
- odvodni sustav

1. Brana

Brane ili pregrade su građevine koje imaju namjenu da skrenu vodu s njenog prirodnog toka, povise razinu vode radi većeg pada i da akumuliraju vodu.

Osnovni dijelovi brane su:

- tijelo brane (preuzima tlak vode i druge sile i prenosi ih na dno i bokove riječnog korita),
- preljev (najviša razina umjetnog jezera, služi za odvod poplavnih voda iz jezera u riječno korito),
- ispusti brane (služe za pražnjenje umjetnog jezera i njegovo iskorištavanje, za kontrolu ispuštanja služe zapornice),
- slapišta (služe za rasipanje energije vodenog mlaza koji prelazi preko preljeva ili kroz ispust, time se sprječava razaranje riječnog korita i potkopavanje temelja brane).

Uz brane se ponekad grane i korita za propuštanje drva i drugih nanosa u rijekama, te riblje staze, brodske prevodnice i ostale građevine koje omogućuju djelatnosti koje koriste rijeku a koje je brana onemogućila.

Dva su tipa brana: visoke (visina od temelja do krune veća od 15 m, ili visina veća od 10 m, ali s krunom dužom od 500 m), i niske (sve ostale). Ovisno o materijalu od kojega se grade, mogu biti masivne i nasute. Masivne se grade od kamena ili armiranog betona. Dijele se na: gravitacijske (odupiru se opterećenju vode i drugih sila vlastitom težinom), lučne (u obliku zakrivljenih ploča preko kojih se opterećenje dijeli na temelje, dno i bokove) i raščlanjene (sastoje se od više elemenata odnosno stupova ili potpora na koje se naslanjaju betonske ploče ili svodovi). Nasute brane se najčešće grade od homogenog i nehomogenog materijala.



Slika 2.9. *Hoover brana, rijeka Colorado, SAD* [7]

2. Zahvat

Zahvat ima zadatak da vodu zaustavljenu od pregrade primi i uputi prema centrali. Razlikuju se osnovna dva tipa zahvata: zahvat na površini vode (izvodi se kada je pregrada niska pa je razina vode iza pregrade praktički konstantna, prolaz vode se regulira zapornicama), te zahvat ispod površine vode (izvodi se kada se razina vode tijekom godine mijenja). U ovom slučaju zahvat treba postaviti na najnižu točku do koje će se spuštati razina vode.

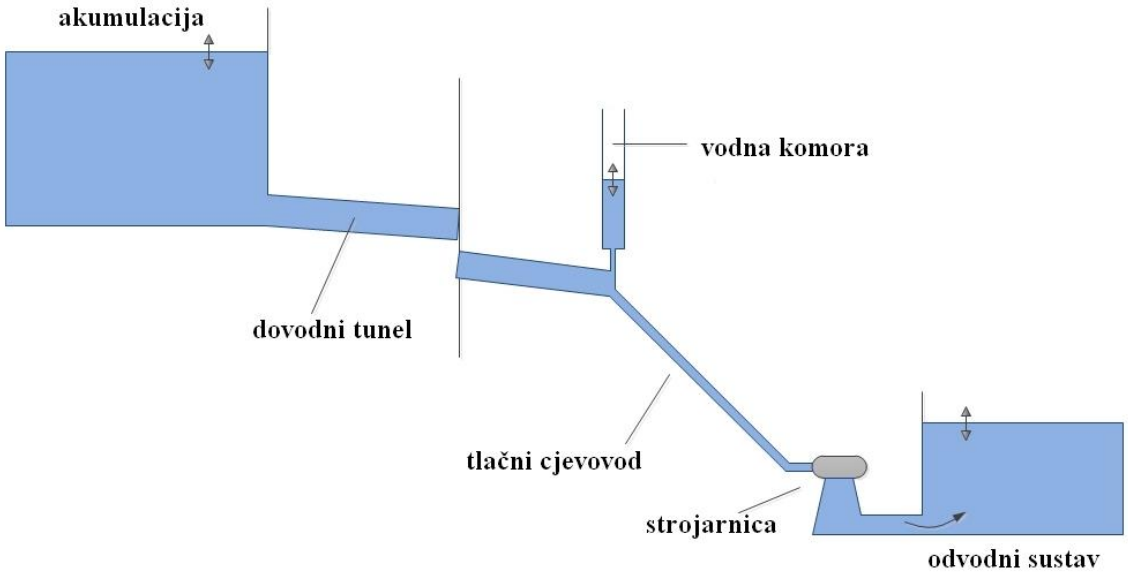
3. Dovod vode

Dovod vode služi za spajanje zahvata s vodnom komorom i gradi se kao tunel ili kao kanal što ovisi o topografiji terena kojim se dovod vodi i o pogonskim zahtjevima koji se postavljaju hidroelektrani. Tunel se može izvesti kao: gravitacijski (nije potpuno ispunjen vodom i potrebno je regulirati otvor na zahvatu za dotok vode) i kao tlačni (ispunjen je vodom potpuno i za promjenu dotoka vode nije potrebno nikakvo djelovanje na zahvatu. Za pogon hidroelektrane je

bolje da ima tlačni dovod nego gravitacijski jer se tako mogu lakše slijediti promjene opterećenja.

4. Vodna komora ili vodostan

Vodna komora služi za regulaciju prilikom promjene opterećenja, a nalazi se na kraju odvoda. Vodena komora mora imati odgovarajući volumen, kada je dovod izveden kao gravitacijski tunel, kako bi se u njoj mogle pohraniti veće količine vode. Kada postoji tlačni tunel vodna komora mora biti takvih dimenzija da uslijed promjena opterećenja tlak u dovodu ne poraste iznad dozvoljenih granica, odnosno da se razina vode ne spusti ispod najviše točke ulaza u tlačni cjevovod.



Slika 2.10. *Prostorna raspodjela elemenata hidroenergetskog postrojenja* [28]

5. Tlačni cjevovod

Tlačni cjevovod služi za dovod vode do turbina iz vodne komore ili direktno sa zahvata vode, a karakteriziran je materijalom, promjerom, debljinom stijenki i tipom spajanja pojedinih dijelova. Promjer se odabire tako da se gubitci zbog trenja smanje na prihvatljivu mjeru dok se debljina stijenki odabire tako da je cjevovod otporan na hidrauličke tlakove. Danas postoji širok izbor materijala za izradu cjevovoda, ovisno o padu. Za velike padove koristi se čelik i kovano željezo,

dok su za male i srednje padove čelik i željezo manje poželjni jer se unutrašnji i vanjski sloj zaštite ne smanjuje sa smanjenjem debljine stijenki uslijed manjeg tlaka. Zato se na manjim i srednjim padovima koriste još i polietilenski, PVC, betonski i azbestno-betonski cjevovodi. Na ulazu u tlačni cjevovod nalazi se zaporni uređaj kojim se može spriječiti daljnje protjecanje vode u slučaju pucanja cijevi. Ispred glavnog zapornog uređaja redovito se postavlja i pomoćni, koji omogućava bilo kakve radove na glavnom bez potrebe za pražnjenjem sustava.

6. Strojarnica

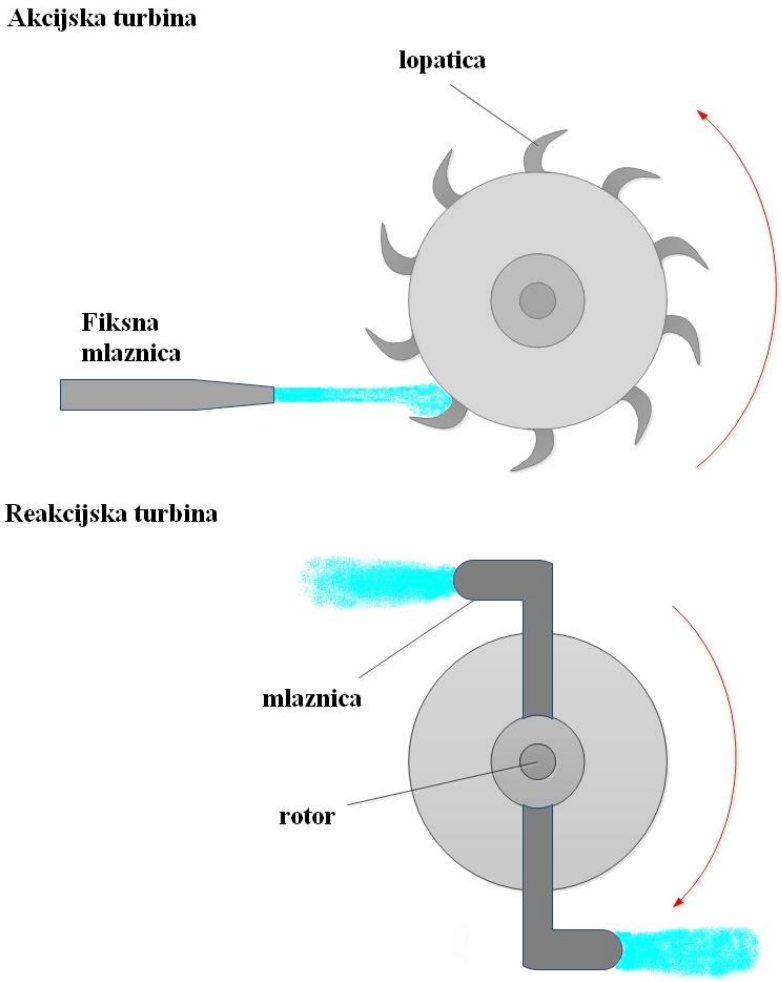
Strojarnica hidroelektrane je građevina ili postrojenje koji služi za pretvorbu potencijalne energije vode u kinetičku energiju njezinog toka, a potom u mehaničku energiju vrtnje vratila vodne turbine te zatim u električnu energiju u električnom generatoru. Strojarnica može biti smještena uz branu, unutar same brane, ili je izvedena kao dio brane, te može biti podzemna ili nadzemna. Glavni elementi strojarnice su vodna turbina koja definira osnovne dimenzije strojarnice kao i njen visinski položaj, te generator, a ostali elementi se prilagođavaju rješenju turbine. Ostali elementi strojarnice su: transformator, rasklopno postrojenje, uređaji upravljanja i zaštite te pomoćni uređaji.

Vodne turbine

Vodna turbina je uređaj koji kinetičku energiju vode pretvara u mehaničku energiju turbine, odnosno generatora. Osnovna podjela vodnih turbina je na: reakcijske (pretlačne) i akcijske turbine (turbine slobodnog mlaza).

Reakcijske turbine su vodne turbine u kojima je tlak na ulazu u rotor veći od tlaka na izlazu iz rotora. Dio energije tlaka u reakcijskim ili pretlačnim turbinama se transformira u kinetičku energiju u statoru, a dio u rotoru. Reakcijske turbine se koriste kod velikih padova (većih od 10 metara) i velikih tlakova.

U akcijskim turbinama, koje se još nazivaju turbinama slobodnog mlaza, tlak na ulazu u rotor je jednak tlaku na izlazu iz rotora. Sva energija tlaka u akcijskim turbinama se transformira u kinetičku energiju vode u statoru. Akcijske turbine se koriste za male padove, pri velikom protoku vode i malom tlaku.



Slika 2.11. *Prikaz principa vrtnje akcijske i reakcijske turbine* [24]

Tipovi vodnih turbina

Izbor tipa, oblika i dimenzija turbine prvenstveno ovisi o neto padu, instaliranom protoku, brzini vrtnje koja određuje tip i osnovni oblik rotora turbine i ostalih dijelova, brzini pobjega (najveća brzina koja se može postići bez priključenog električnog opterećenja) i troškovima izgradnje hidroelektrane.

Pretlačne ili reakcijske turbine su:

- Kaplanova turbina
- Francisova turbina
- Propelerna turbina (Kaplanova s nepomičnim rotorskim lopaticama)

Turbine slobodnog mlaza ili akcijske turbine su:

- Peltonova

- Turgo (varijacija Peltonove, ima veću specifičnu brzinu)
- Banki Michell (Peltonova izvedba, ali s horizontalnom osovinom)

Tri osnovna tipa vodnih turbina:

- Kaplanova turbina:
  - propelerna, hidraulička turbina, sa zakretnim lopaticama na rotoru, radi na niskom padovima vode koji su manje od 25 metara i gdje je velik protok,
  - lopatice radnog kola mogu se zakretati u pogonu da bi se osiguralo strujanje vode s najmanje hidrauličkih gubitaka,
  - složenija izvedba nego kod običnih propelernih turbina, sa stupanjem iskorištenja preko 90%.



Slika 2.12. *Kaplanova turbina* [8]

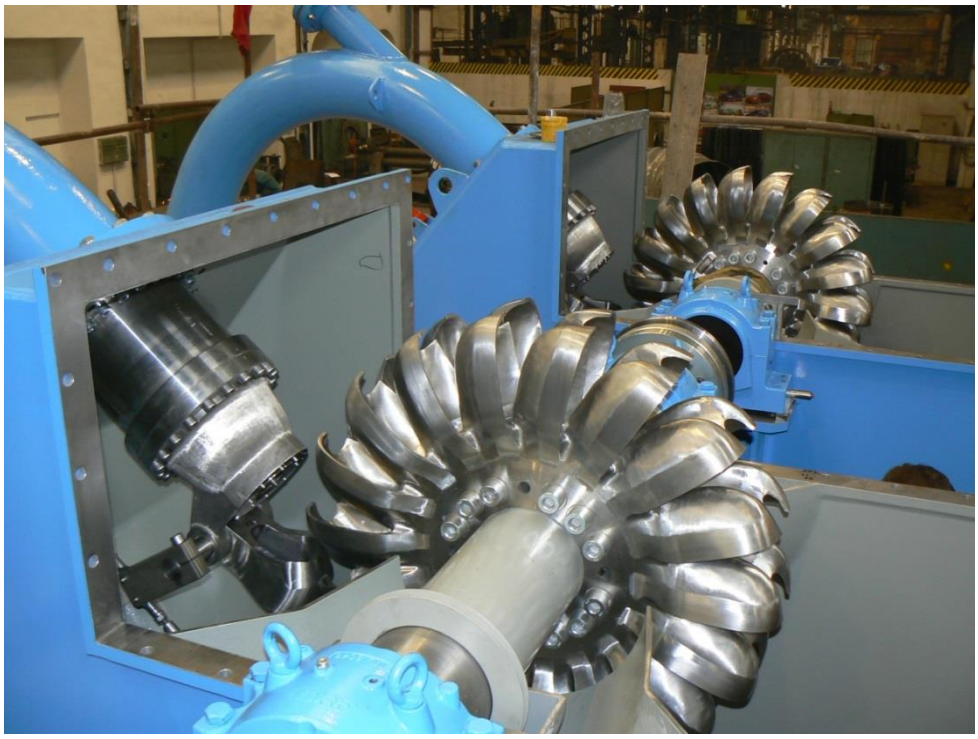
- Francis turbina:
  - reakcijska turbina radijalnog protoka s fiksnim lopaticama rotora i podesivim vodilicama lopatica koja se koristi za srednje padove,

- veliki stupanj iskoristivosti kapaciteta s preko 90%, te veliki raspon djelovanja u odnosu na visinu pada pri protoku kroz turbinu,
- optimalan rad pri padu od 25 metara do čak 400 metara,
- izlazna snaga od nekoliko kilovata do 750 MW,
- promjer rotora od 1 m do 10 m, a broj okretaja rotora od 40 okretaja u minuti do 500 okretaja u minuti,
- najučestaliji tip turbine koji se instalira u hidroelektrane.



Slika 2.13. *Francisova turbina* [9]

- Peltonova turbina:
  - akcijska turbina sa jednom ili više mlaznica, svaka mlaznica osigurava kontrolu protoka kroz prskalicu s iglom,
  - koristi se za srednje i velike padove i manje protoke vode,
  - među turbinama s najvećim stupnjem iskorištenja,
  - geometrija lopatica postavljena tako da se okreću s pola brzine mlaza vode, koriste skoro svu količinu gibanja mlaza vode, turbina nije potopljena u vodi i lopatice se okreću u zraku,
  - maksimalna snaga može biti do 200 MW.



Slika 2.14. *Peltonova turbina* [10]

Generatori

Generator je električni stroj koji mehaničku energiju turbine pretvara u električnu energiju. Generatori u hidroelektranama pretežno rade u vertikalnoj izvedbi zbog ekonomičnije izvedbe hidrauličkog dijela elektrane. Dvije osnovne vrste generatora su sinkroni i asinkroni generator. U hidroelektranama se većinom koriste sinkroni generatori, dok se asinkroni generatori vrlo rijetko koriste. Osnovni dijelovi generatora su rotor i stator. Rotor se sastoji od: osovine, jarma, magneta, uzbudnog i prigušnog namota. Dijelovi statora su: jaram, zubi i utori statora, te armaturnog namota.

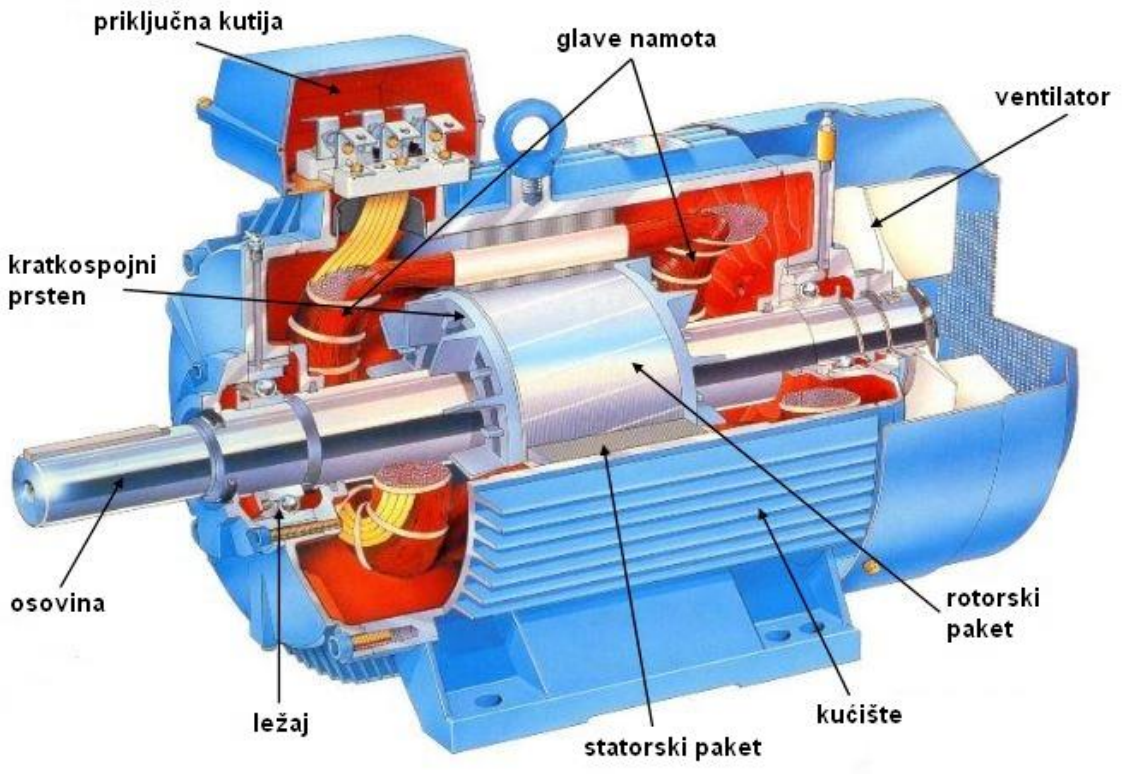
Sinkroni generatori obzirom na vrstu pogona:

- turbogeneratori (pogonski stroj parna ili plinska turbina),
- hidrogeneratori (pogonski stroj vodna turbina),
- dizelski generatori (pogonski stroj dizelski motor).

Turbogeneratori imaju veliku brzinu vrtnje (3000 1/min), konstrukcija im je takva da su malih dimenzija, ali čvrste izrade da bi izdržali velike centrifugalne sile pri velikim brzinama vrtnje. Hidrogeneratori imaju znatno manje brzine vrtnje od turbogeneratora (50-1000 1/min) i puno veći broj pari polova (nekoliko desetaka), te su zbog toga jako velikih dimenzija. Dizelski

generator je kombinacija dizel motora s električnim generatorom (često alternatorom) za generiranje električne energije. Ovo je specifičan slučaj generatora motora. Dizel generator često je dizajniran za rad na loživo ulje, no neke su vrste prilagođene za druga tekuća goriva ili prirodni plin.

Da li će motor raditi kao sinkroni ili asinkroni ovisi o tome kako mu je izveden rotor. Kod asinkronog stroja rotor, s obzirom na konstrukciju, može biti: kolutni (kad se u tijelu rotora nalaze utori u koje se smješta namot, najčešće trofazni), i kavezni (kad se u utorima rotora nalaze bakreni ili aluminijski štapovi koji su s obje strane povezani kratkospojnim prstenovima). Stator asinkronog stroja je po konstrukciji sličan statoru sinkronog stroja. U njemu struje trebaju stvoriti okretno magnetsko polje. Okretno magnetsko polje inducira u vodičima rotora napone koji kroz namot rotora protjeraju struje. Međusobnom interakcijom okretnog magnetskog polja i struja rotora stvara se sila na vodiče rotora koja zakreće rotor u smjeru vrtnje okretnog polja. Ako je moment svih sila na vodiče rotora veći od momenta otpora vrtnji, rotor će se vrtjeti brzinom koja je uvijek različita od brzine vrtnje okretnog polja, te se zbog toga motor zove asinkroni. Ako rotor zavrtimo izvana nekim pogonom (turbina) dobit ćemo slabo okretno polje koje stvara kavez rotora preko svoje remanencije (ostatak magnetizma). To polje će u statorskom namotu inducirati napone koji će pak potjerati struje ako je statorski namot spojen na neki teret. Kada potekne struja statora (armature), javlja se reakcija armature koja ima povratno djelovanje na rotor i tako će se u par okretaja uspostaviti elektromagnetska pretvorba. Snaga koju će dati u mrežu, generator će uzeti sa vratila pogonskog stroja, dakle asinkroni stroj je postao asinkroni generator.



Slika 2.17. *Asinkroni stroj* [11]

7. Rasklopno postrojenje

Zadaća rasklopnog postrojenja je prijenos energije iz pogona elektrane u električnu mrežu. Smješta se izvan strojarnice i podzemnih prostorija. Rasklopno postrojenje sadrži komponente koje omogućuju uklapanje i isklapanje pojedinih dijelova sustava, kao što su rastavljači (vidljivo odvajanje dijelova mreže) te prekidači snage (uklapanje i isklapanje u normalnim pogonskim uvjetima, kod kratkog spoja itd.). Elementi rasklopnog postrojenja su: sabirnice, rastavljači, prekidači, transformatori, prigušnice te ostala oprema (upravljački, zaštitni i signalni uređaji, izolatori).

Transformatori

Transformator je statički elektromagnetski uređaj koji transformira izmjenični napon jedne vrijednosti u izmjenični napon druge vrijednosti iste frekvencije. Mogu se upotrebljavati za povišenje ili sniženje napona. Obično imaju dva odvojena namota, primarni i sekundarni, od kojih primarni prima električnu energiju iz generatora ili električne mreže, induktivno ju prenosi

na sekundarni namot i predaje trošilu ili mreži. Transformatori se u hidroelektranama smještaju što bliže generatoru.

Transformator se sastoji od:

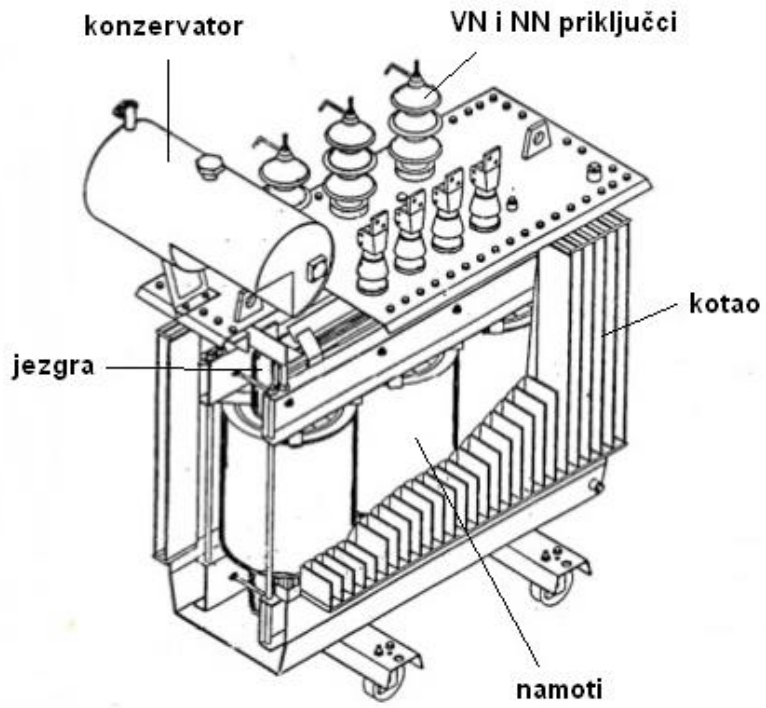
- kotla (kućište transformatora u koje se ulaže jezgra s namotima i svi ostali dijelovi)
- magnetske jezgre (sastavljena od tankih uzastopno složenih limova)
- namota (unutrašnji namot je visokonaponski, sljedeći je niskonaponski te tercijarni ili regulacijski namot, namoti su od bakrene žice izolirane papirnatom izolacijom)
- konzervatora (posuda u kojem se nalazi ulje koje se koristi za hlađenje transformatora i izolaciju)
- visokonaponski i niskonaponski priključci
- hladnjaka

Podjela transformatora:

- energetski transformatori (blok transformatori – transformacija energije proizvedene u generatoru s kojim je direktno spojem, mrežni transformator – vrši transformaciju u mreži)
- mjerni transformatori (mjerenje struje i napona)
- specijalni transformatori (za posebne namjene, autotransformatori, transformatori za indukcijske peći)

Princip rada transformatora

Narinutim naponom na primaru poteče struja koja stvori takav magnetski tok da njegova promjena inducira napon na primaru koji drži ravnotežu narinutom naponu. Istovremeno se zbog promjene magnetskog toka inducira napon u sekundarnom namotu. Ako je sekundarni krug otvoren, u sekundarnom namotu ne teče struja. Ako na sekundarni krug priključimo trošilo, sekundarni napon transformatora potjera struju kroz sekundarni namot (trošilo i namot). Struja kroz sekundar naruši ravnotežu u magnetskom krugu, stvorenu u praznom hodu pa se smanji protjecanje, magnetski tok i inducirani napon. Transformator povuče dodatnu struju tereta iz izvora napajanja da se uspostavi prijašnji magnetski tok i ravnoteža napona u primarnom krugu.



Slika 2.18. *Transformator* [12]

8. Odvodni sustav

Odvodni sustav hidroelektrane služi za odvod vode iz strojarnice, odnosno od turbine. Izveden je kao odvodni kanal ili tunel. Ako je strojarnica udaljena od obale, iz turbine voda otječe neposredno u korito rijeke ili kanalom. Voda se iz podzemnih hidroelektrana odvodi tunelom koji završava u odvodnom kanalu ili u koritu rijeke. U nekim slučajevima je potrebno da postoji donja vodna komora kada voda otječe pod tlakom zbog velike dužine dovodnog tunela te kada je protok velik ili se razina vode u koritu znatno mijenja. Brzine vode u odvodnom tlačnom tunelu iznose 2 m/s do 3 m/s te su zbog toga obloženi radi smanjenja hrapavosti i boljeg protoka vode. Da bi se kanal mogao pregledati i popraviti, potrebno je na kraju tunela predvidjeti vodilice za postavljanje pomoćnih zatvarača i uređaji za njihovo podizanje.

3. SINKRONI GENERATOR

Princip rada sinkronog generatora – mehaničkim okretanjem rotora određenom sinkronom brzinom i dovođenjem istosmjerne struje kroz uzbudni namot stvara se konstantno magnetsko polje koje svojim silnicama presijeca armaturni namot statora u kojem se inducira izmjenična elektromotorna sila. Frekvencija induciranog napona ovisi o brzini vrtnje rotora i o broju pari polova. Visina proizvedenog napona ovisi o konstrukciji stroja, o veličini magnetskog toka i o brzini vrtnje rotora. Ako je brzina rotora konstantna, onda proizvedeni napon ovisi samo o broju pari polova i veličini magnetskog toka, odnosno veličini uzbude koja stvara magnetski tok.

Osnovni podatci o stroju se mogu saznati s natpisne pločice. Svaki stroj mora imati natpisnu pločicu, osim ako se isporučuje ugrađen u neki drugi uređaj. Natpisna pločica sadrži sljedeće podatke:

- godinu proizvodnje,
- podatke o proizvođaču,
- standarde po kojima je stroj izrađen,
- nazivne podatke stroja.

Nazivni podatci stroja su:

- nazivna snaga S_n,
- nazivni napon U_n (efektivna vrijednost linijskog napona),
- nazivna struja I_n (efektivna vrijednost linijske struje),
- nazivna frekvencija f_n,
- nazivna brzina vrtnje n_n,
- nazivni faktor snage $\cos\varphi_n$,
- nazivna uzbudna struja I_{fn},
- nazivni uzbudni napon U_{fn}

Za nazivnu snagu generatora se uzima prividna snaga, određena radnim i jalovim opterećenjem jer opterećenje generatora ne mora biti radnog karaktera. Stroju se u pogonu neće dogoditi ništa ukoliko se poštivaju podatci s natpisne pločice. Ako se stroj optereti većom snagom ili se narine viši napon, može doći do ozbiljnog kvara – na primjer izgaranje izolacije zbog pregrijavanja.

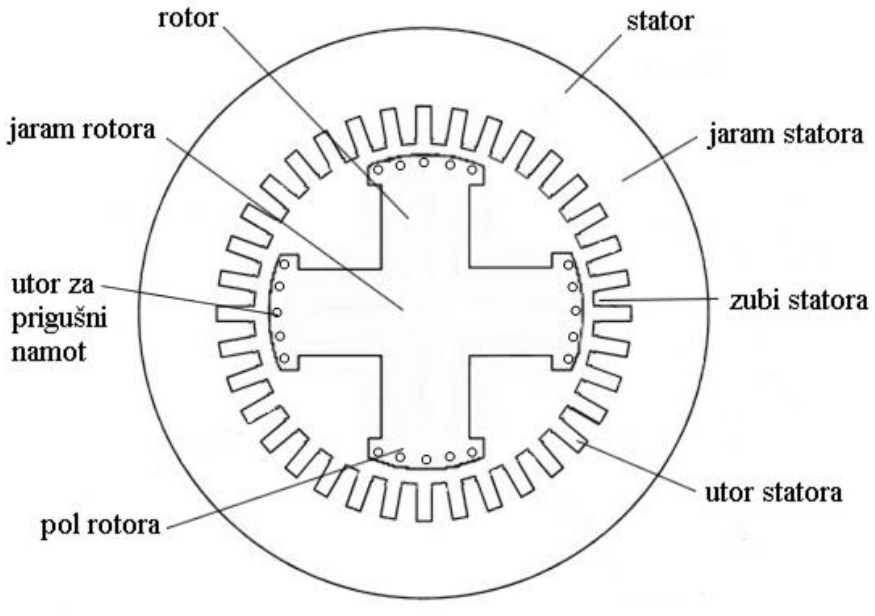
Podjela sinkronih generatora:

- obzirom na vrstu pogona,
- brzinu vrtnje
- izvedbu rotora.

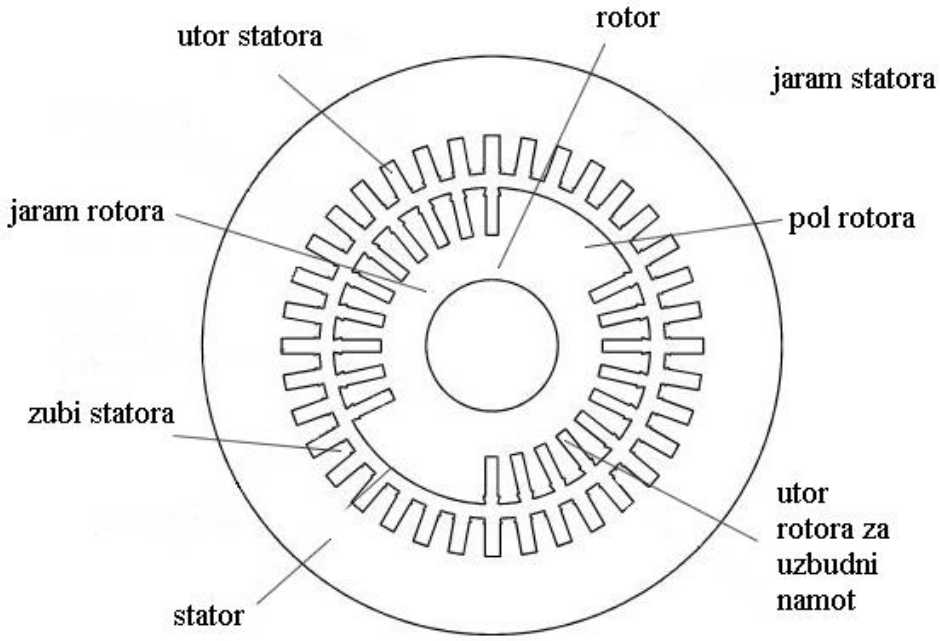
Sinkroni generatori obzirom na izvedbu rotora:

- cilindrični rotor,
- rotor s istaknutim polovima.

Cilindrični rotor ima oblik cilindra, izrađen je od masivnog čelika sa utorima koji se protežu obodom cilindra u kojima se nalaze učvršćeni namoti od bakrenih vodiča. Ova konstrukcija se uglavnom primjenjuje kod velikih dvopolnih i četveropolnih turbogeneratora, iz mehaničkih razloga. Rotor s istaknutim polovima je veliki magnet čiji polovi mogu biti stalni magnet ili elektromagnet napajan istosmjernom strujom. Ovakva konstrukcija rotora se upotrebljava kod generatora s velikim brojem polova (hidrogenerator).



Slika 3.1. *Rotor s istaknutim polovima* [13]



Slika 3.2. *Cilindrični rotor* [13]

Namoti generatora su:

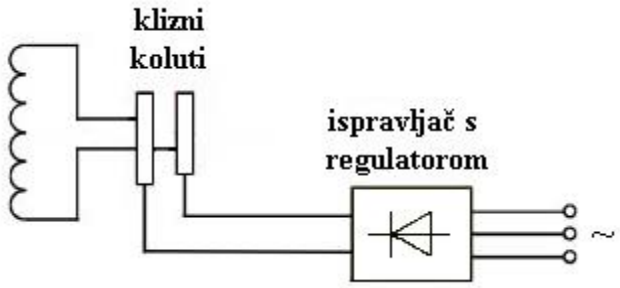
- uzbudni,
- armaturni,
- prigušni.

Uzbudni namot se ugrađuje u rotor i kroz njega se pušta istosmjerna struja, tako da svojim protjecanjem stvara magnetsko polje u generatoru. Napajanje uzbude se radi preko kolutova koji se ugrađuju na rotor i četkica na statoru koje kližu po rotorskim kolutima. Uzbudni namot kod generatora s istaknutim polovima je izveden od koncentričnih svitaka na polovima magneta, a kod generatora s cilindričnim rotorom se smješta u utore rotora. Veći generatori se izvode isključivo s uzbudom pomoću istosmjerne struje koja teče uzbudnim namotom i naziva se uzbudna struja.

Izvori uzbudne struje su:

- uzbuda s istosmjernim uzbudnikom,
- statička uzbuda,
- beskontaktna uzbuda.

Uzbuda s istosmjernim uzbudnikom je starije rješenje koje se uglavnom više ne primjenjuje na novim strojevima. Na osovinu je spojen istosmjerni generator čije su izlazne stezaljke spojene s uzbudnim namotom generatora. Regulacija uzbudne struje se postiže regulacijom uzbude uzbudnika pomoću automatskog regulatora. Kod statičke uzbude je istosmjerni generator zamijenjen statičkim ispravljačem na koji djeluje regulator uzbudne struje.



Slika 3.3. *Statička uzbuda* [13]

Kod beskontaktne uzbude uzbudnik je mali sinkroni generator koji ima uzbudu na statoru, a armaturni namot na rotoru. Taj uzbudnik je montiran na osovinu generatora zajedno s ispravljačkim uređajem, a armatura uzbudnika je spojena s uzbudnim namotom sinkronog generatora preko ispravljačkog uređaja. Regulacija uzbudne struje se postiže regulacijom uzbude pomoćnog generatora.

Armaturni namot sinkronog generatora je namot u kojem se inducira napon te kroz njega teku struje opterećenja. Konstruiran je tako da može trajno podnositi nazivne vrijednosti struja i napona. Iznos induciranog napona na namotima statora je funkcija jakosti magnetskog polja, broja namota na statoru i brzine vrtnje rotora. Vodiči se smještaju u utore po cijelom obodu statora.

Prigušni namot se ugrađuje u sinkrone generatore zbog prigušenja njihanja generatora zbog poremećaja u mreži, prigušenja inverznog okretnog magnetskog polja kod nesimetričnog opterećenja po fazama te zbog omogućavanja asinkronog zaleta sinkronog motora i kompenzatora.

U provrtu statora je smješten rotor koji je uzbuđen istosmjernom strujom. Rotor se vrti konstantnom brzinom *n*, te se elektromotorne sile, koje inducira magnetsko polje u namotima pojedinih faza, vremenski mijenjaju frekvencijom:

$$f = f_s = \frac{n \cdot p}{60} \tag{3-1}$$

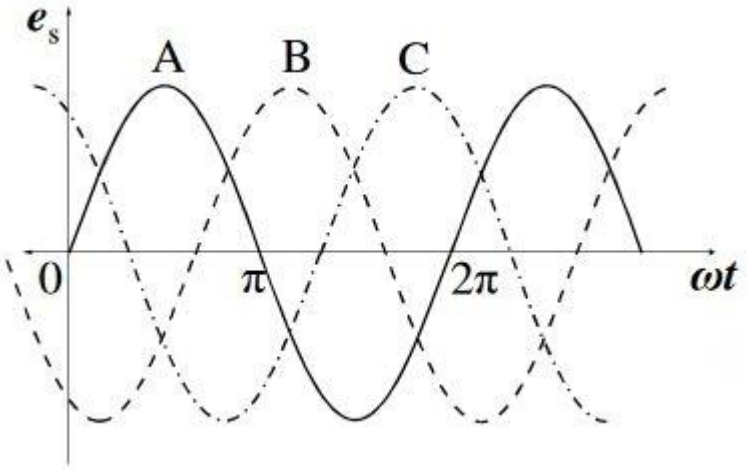
gdje je:

- n – brzina vrtnje
- p – broj pari polova

Tome odgovara kružna frekvencija:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \tag{3-2}$$

Inducirane elektromotorne sile su vremenski pomaknute za 120° zbog prostornog rasporeda namota. Raspodjela magnetskog polja u zračnom rasporu nije čisto sinusna, ali će inducirane sile u pojedinim fazama imati sinusni oblik.



Slika 3.4. *Inducirane elektromotorne sile u pojedinim fazama trofaznog sinkronog stroja* [13]

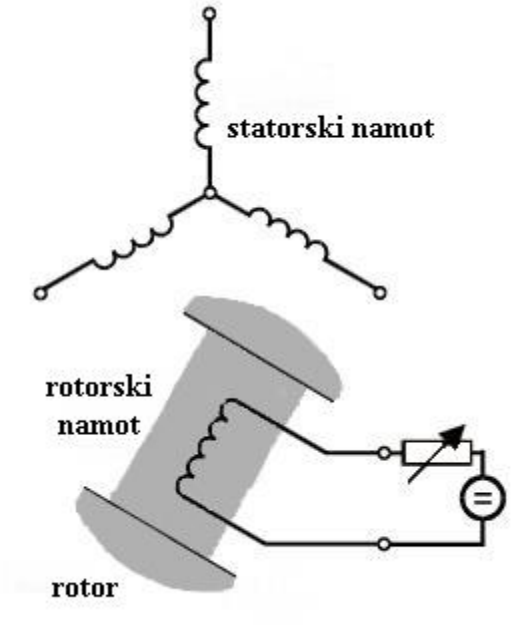
3.1. Pogonska stanja sinkronog generatora

Pogonska stanja sinkronog generatora su:

- Prazni hod – stroj je uzbuđen i bez opterećenja
- Normalno opterećenje – stroj je uzbuđen i opterećen nazivnom armaturnom strujom
- Kratki spoj – stroj je uzbuđen, a namoti armature kratko spojeni

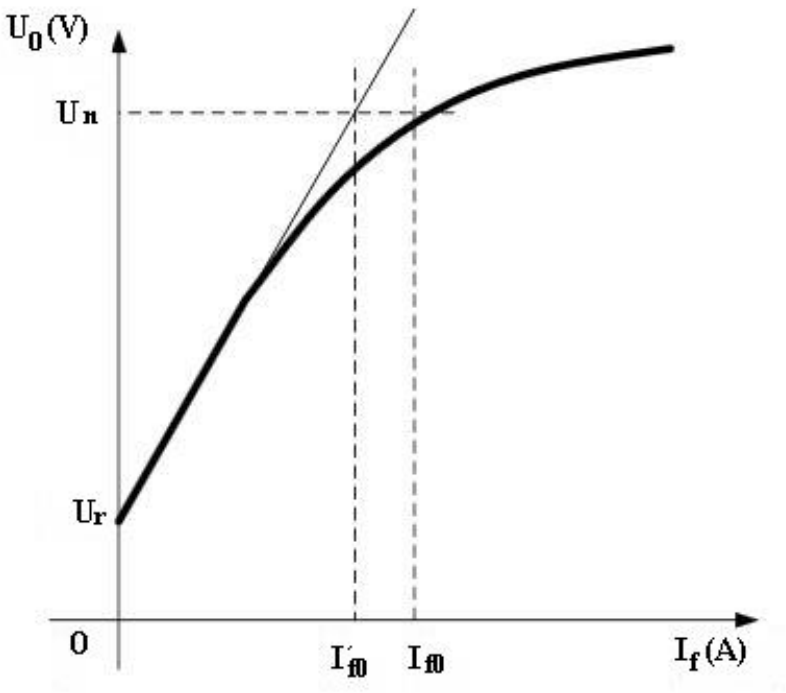
3.1.1. Prazni hod

Prazni hod je pogonsko stanje u kojem je stroj uzbuđen i pritom se vrti, pa se u armaturnom namotu induciraju elektromotorne sile, ali nije opterećen. U slučaju sinkronog generatora to znači da u armaturnom namotu ne teku struje. To je sigurno zadovoljeno ako su stezaljke generatora otvorene.



Slika 3.5. *Sinkroni generator u praznom hodu* [13]

Ispitivanja u praznom hodu daju podatke o magnetskim prilikama u stroju: o funkcionalnoj ovisnosti magnetskog toka o uzbudnoj struju, te o obliku krivulje induciranog napona, koji ovisi o rasporedu magnetskih silnica u zračnom rasporu stroja te o konstrukciji namota. Također daju podatke o gubicima koji nastaju pri rotaciji uslijed trenja u ležajevima i ventilatoru stroja. Karakteristika praznog hoda prikazuje napon neopterećenog stroja u ovisnosti o uzbudnoj struji $U = f(I_f)$, odnosno predstavlja karakteristiku magnetskog kruga stroja pri konstantnoj brzini vrtnje, I_f *(A)*.



Slika 3.6. *Karakteristika praznog hoda generatora* [16]

U_0 (V) - napon praznog hoda

U_n – nazivni napon

U_r – remanentni napon

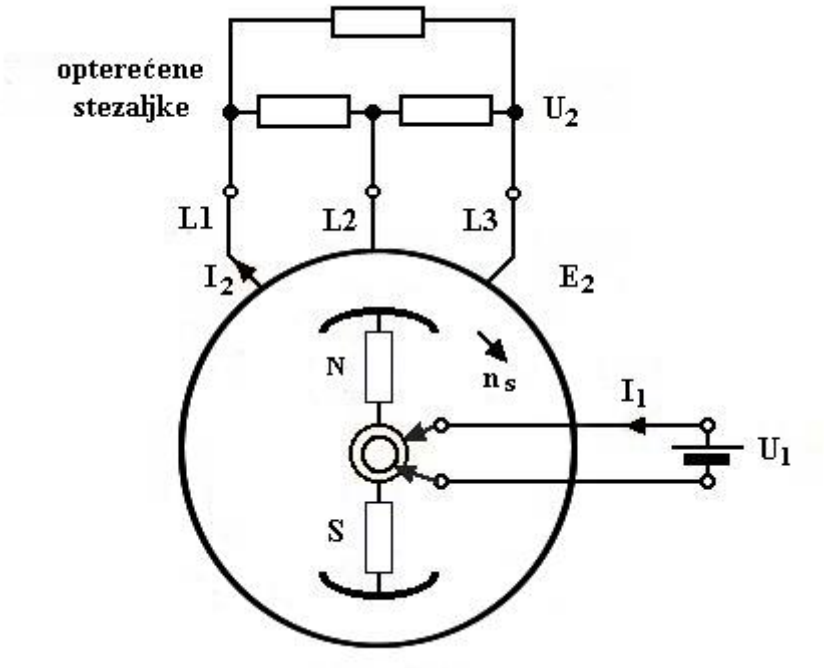
$I´_{f0}$ – nezasićena uzbudna struja praznog hoda

I_{f0} – zasićena uzbudna struja praznog hoda

Ispitivanje praznog hoda se izvodi tako da se sinkroni generator zaleti na sinkronu brzinu, uz nultu struju uzbude, zatim se uzbuda postupno podiže i snima se svaka točka promjene uzbude. Pri tome se mora paziti da se struja uzbude ne spušta prilikom prelaska iz točke u točku. Uzbuda se podiže sve dok se ne dobije napon na stezaljkama statora koji iznosi otprilike $1,2 \times U_n$. Potom se struja uzbude opet postepeno smanjuje dok se ne dođe do nule te se pripazi da se struja samo spušta. Pri sniženju uzbudne struje na nulu i dalje postoji mali napon na stezaljkama statorskog namota, taj napon se naziva remanentni napon koji je posljedica histereze magnetskog materijala od kojeg je napravljen rotor. Remanentni napon obično iznosi nekoliko postotaka nazivnog napona, ali u apsolutnoj vrijednosti može biti jako visok (nekoliko stotina volta).

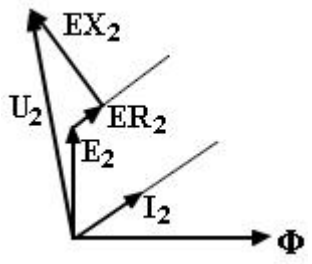
3.1.2. Opterećenje generatora

Opterećenje sinkronog generatora je pogonsko stanje u kojemu kroz armaturni namot teče struja opterećenja (sekundarna struja I_2) i generator proizvodi električnu energiju. Potrebnu mehaničku energiju rotoru generatora privodi pogonski stroj tj. turbina.



Slika 3.7. *Opterećeni generator* [14]

Struja opterećenja I_2 (najčešće je djelatno-induktivnog karaktera) simetrično opterećenog trofaznog sinkronog generatora u svakom faznom namotu armature izaziva pad napona zbog omskog otpora R_2 i pad napona zbog induktivnog rasipnog otpora X_2, pa se zbog toga napon stezaljki generatora U_2 razlikuje od induciranog napona E_2. Pad napona na omskom otporu ER_2 je u fazi sa strujom I_2, a rasipni pad napona na induktivnom rasipnom otporu EX_2 prethodi struji za 90°.



Slika 3.8. *Fazorski dijagram opterećenog generatora* [14]

Dok je generator u praznom hodu, napon stezaljki je jednak induciranom naponu, no kod opterećenja ovi naponi su različiti. Da bi napon stezaljki i kod opterećenog generatora ostao nazivnog iznosa, promjenom uzbudne struje se treba mijenjati inducirani napon *E*.

Osim padova napona, na iznos napona stezaljki opterećenog generatora utječe i djelovanje sekundarnog protjecanja. Struja opterećenja I protječe armaturnim namotom i stvara armaturni magnetski tok koji ovisno o karakteru i iznosu opterećenja, zajedno s uzbudnim magnetskim tokom polova inducira napon *E*. Djelovanje armaturnog toka naziva se reakcija armature.

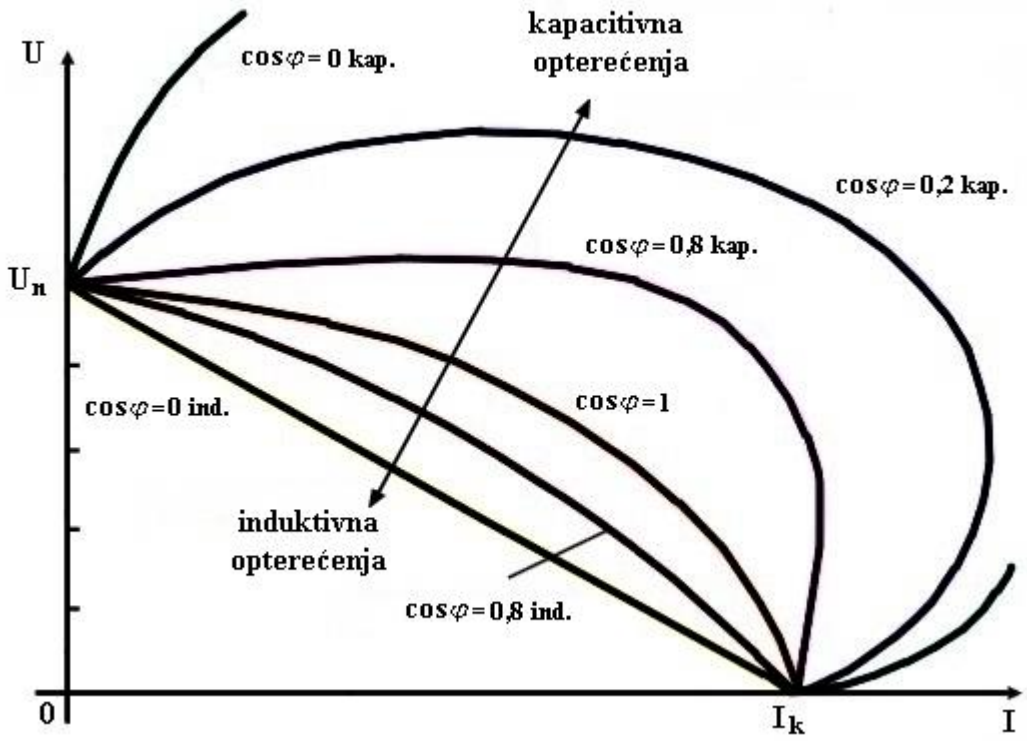
Djelovanje reakcije armature pri opterećenju ovisi o vrsti opterećenja tako da:

- pri omskom opterećenju napon stezaljki se neznatno mijenja s promjenom opterećenja,
- pri induktivnom opterećenju taj se napon smanjuje,
- pri kapacitivnom opterećenju napon raste

Prolazom simetrične trofazne izmjenične struje kroz tri fazna namota nastaju tri izmjenična magnetska toka koji su pomaknuti jedan prema drugome za 120°. Ova tri statična vremenski nepromjenjiva magnetska toka stvaraju jedan rotacijski magnetski tok koji rotira prema statoru sinkronom brzinom, odnosno istom brzinom kojom rotira i magnetska uzbuda stroja zbog mehaničke vrtnje rotora. Okretno polje statora i polje rotora miruju jedno prema drugome, a pomaknuti su za kut opterećenja. Ako se promjeni smjer rotacije pogonskog stroja, odnosno turbine hidroagregata, mijenja se i smjer rotacije okretnog magnetskog toka.

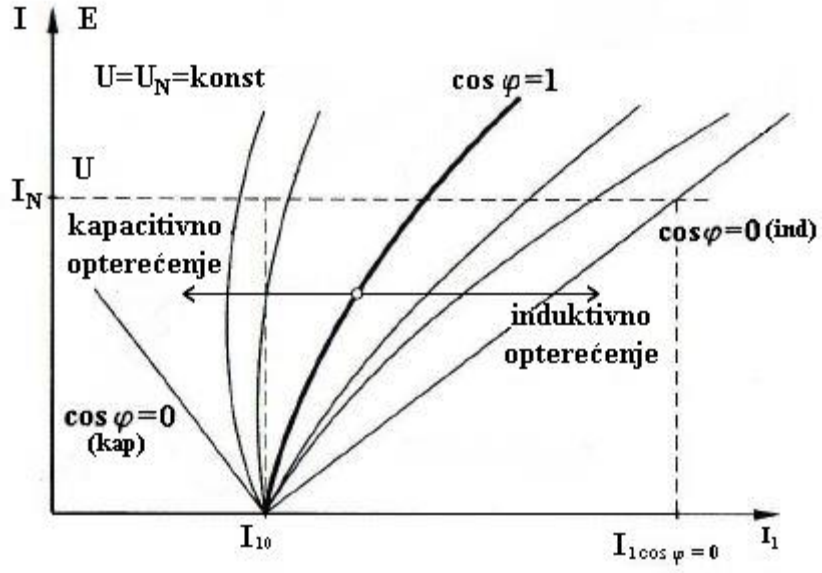
Kako bi napon stezaljki i pri opterećenju ostao nepromijenjen, mora se promijeniti i uzbudna struja radi poništenja djelovanja reakcije armature. Iznos promjene uzbudne struje određuje se prema formuli: $I'_1 = gI$ gdje je g faktor preračunavanja sekundarne struje I na primarnu uzbudnu struju I_1.

Kad se uzbudna struja promjenom opterećenja ne bi mijenjala, napon na stezaljkama pri djelatno-induktivnom opterećenju bi se smanjio zbog djelovanja reakcije armature. Pri kapacitivnom opterećenju napon na stezaljkama bi se povisio jer reakcija armature pospješuje djelovanje uzbude. Ovisnost napona stezaljki o struji opterećenja pri konstantnoj uzbudi i konstantnoj brzini vrtnje za razne faktore snage pokazuju vanjske karakteristike sinkronog generatora.



Slika 3.9. *Vanjska karakteristika sinkronog generatora* [17]

Napon stezaljki u otočnom radu generatora pri induktivnom opterećenju je manji, a pri kapacitivnom veći od nazivnog i u području opterećenja. U području do nazivne struje, napon na stezaljkama značajno ovisi o opterećenju, da bi u kratkom spoju pri struji I_k za bilo koji faktor snage bio jednak nuli. Zadatak generatora je održavanje stalnog napona svih opterećenja, stoga je potrebno promjenom uzbudne struje mijenjati magnetski tok tako da se inducira napon *E* koji će davati konstantni napon stezaljki *U*. Moguće su brze promjene opterećenja, pa uzbudni sustav mora brzo mijenjati uzbudnu struju što se izvodi regulatorima napona koji automatski reagiraju na promjene napona stezaljki u veoma kratkom vremenu. Primarna (uzbudna) struja I_1 za razne iznose opterećenja i razne faktore snage $cos\varphi$ uz konstantni napon stezaljki može se odrediti računski, grafički ili mjerenjem, te kombinacijom ovih postupaka. Ovisnosti tih parametara pokazuju regulacijske krivulje koje pokazuju oprečna djelovanja induktivnog i kapacitivnog opterećenja. Kod izrazito kapacitivnih opterećenja potrebno je smanjivati uzbudnu struju, a pri induktivnom opterećenju potrebna je najveća uzbudna struja $I_1 \cdot cos\varphi = 0$

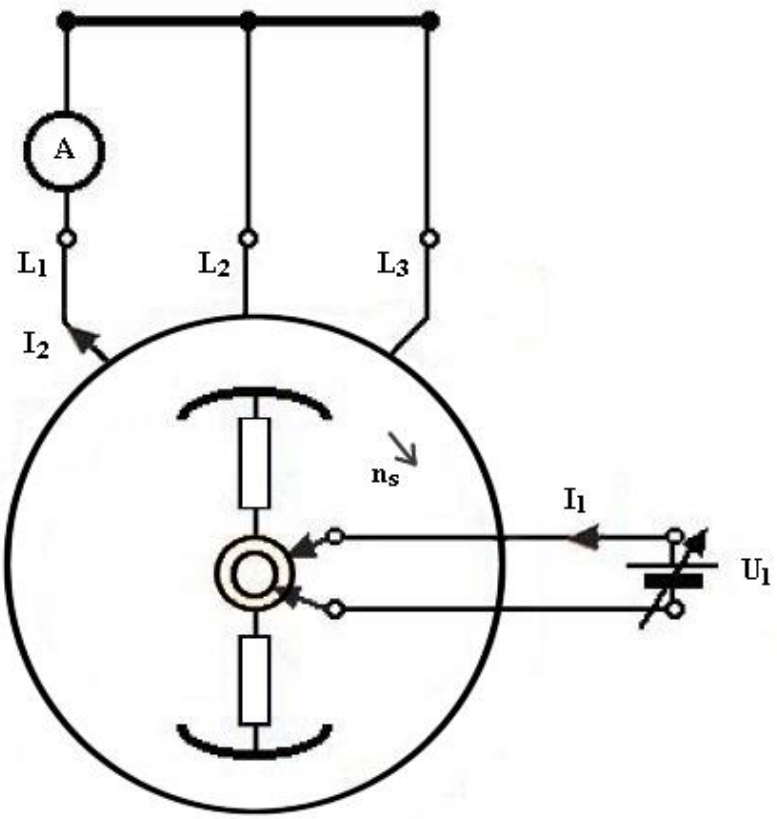


Slika 3.10. *Regulacijska krivulja sinkronog generatora* [18]

Promjena napona stezaljki moguća je samo u otočnom radu generatora, a kod priključka generatora na krutu mrežu (paralelni rad), napon stezaljki određen je naponom mreže. Opterećenje koje izaziva pad napona u armaturnom krugu i reakcije armature, kao i promjena primarne (uzbudne) struje, imaju druge posljedice kao što je npr. kratki spoj.

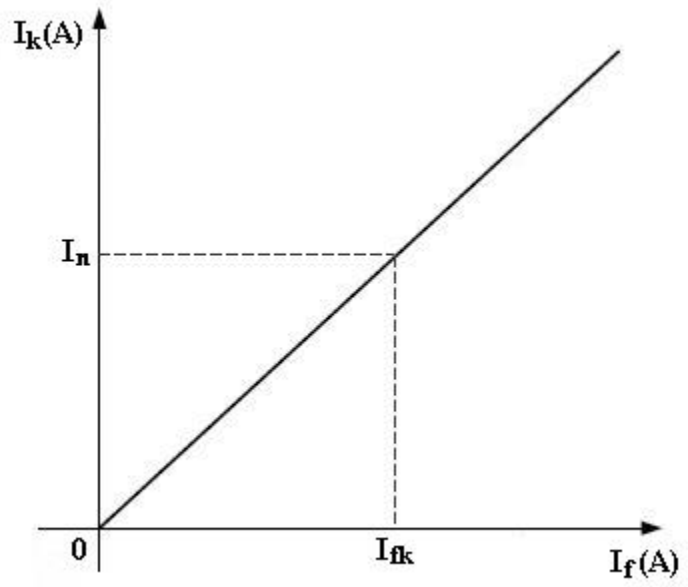
3.1.3. Kratki spoj

U pogonskom stanju kratkog spoja, s energetskog stajališta, nema pretvorbe energije (mehaničke u električnu i obrnuto) kao ni kod praznog hoda. Iz pokusa kratkog spoja dobiva se ovisnost struje armature o struji uzbude, te gubici u namotu stroja i dodatni gubici zbog skin efekta i vrtložnih struja.



Slika 3.11. *Shema pokusa kratkog spoja* [14]

Kod kratkog spoja sinkronog generatora stezaljke statorskog namota su kratko spojene a pogonski stroj se zaleti na brzinu vrtnje koja se održava konstantnom. Ako se uzbuda poveća i rotor zavrti, uspostavlja se takvo magnetsko stanje da je inducirana elektromotorna sila jednaka nuli te se povećava armaturna struja. Smanjivanjem uzbudne struje sinkronog generatora, uz nazivnu brzinu vrtnje, se očitava veličina armaturne struje i podešene uzbudne struje sinkronog generatora. Ukupni magnetski tok jednak je nuli, nema pojave zasićenja pa je ovisnost armaturne struje I_k o uzbudnoj struji I_f linearna, (gdje je I_n – nazivna struja, a I_{fk} – nazivna uzbudna struja). Ta linearna ovisnost predstavlja karakteristiku kratkog spoja sinkronog generatora.



Slika 3.12. *Karakteristika kratkog spoja sinkronog generatora* [16]

Karakteristika kratkog spoja je linearna za bilo koji iznos uzbudne struje što je i ispunjeno pri ispitivanju kratkog spoja jer se ne smije dopustiti da struja armature bude znatno veća od nazivne. Ako bi struja armature bila puno veća od nazivne, došlo bi do zasićenja rasipnih magnetskih tokova, pa krivulja kratkog spoja više ne bi bila linearna. Iznosi struje uzbude i struje armature su ograničeni zagrijavanjem stroja.

3.2. Sinkroni generator u pogonu

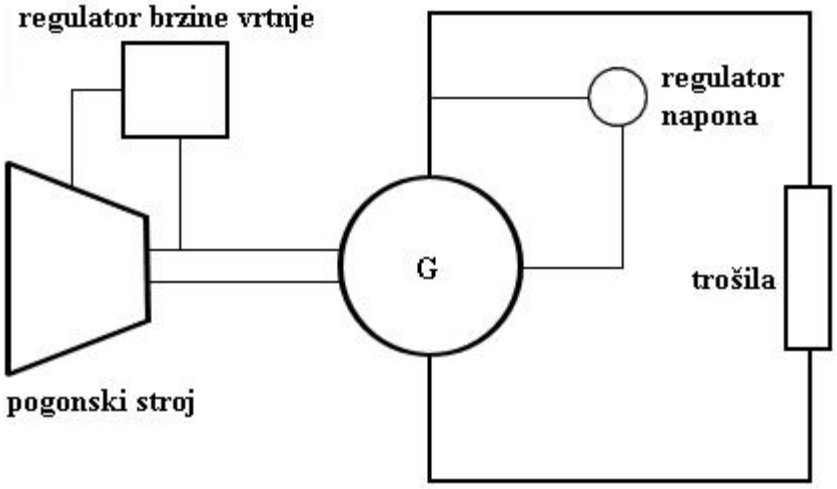
Sinkroni generator može raditi u različitim pogonskim stanjima od kojih su krajnja stanja :

- rad na vlastitu mrežu (otočni rad),
- rad na krutu mrežu (paralelni rad).

3.2.1. Otočni rad sinkronog generatora

Otočni rad u kojem sinkroni stroj napaja samo vlastita trošila, odnosno radi na vlastitoj mreži, primjenjuje se za opskrbu električnom energijom malog broja trošila (kada je to isplativije rješenje ili kad ne postoji mogućnost priključka na elektroenergetsku mrežu) i kada treba

povećati sigurnost opskrbe u slučaju ispada glavnog energetskog sustava. Pri radu na vlastitu mrežu obično je riječ o relativno malom sinkronom generatoru (npr. brod, tvornica, rezervni generator bolnice, trgovačkog centra itd.) koji napaja malu mrežu koja nema mogućnost priključka na veću mrežu.



Slika 3.13. *Shema otočnog rada sinkronog generatora* [14]

Promjena opterećenja generatora u otočnom radu uzrokuje promjenu napona stezaljki i frekvencije generatora. Da bi napon i frekvencija ostali konstantni potrebno je:

- regulirati uzbudnu struju
- regulirati brzinu vrtnje pogonskog stroja

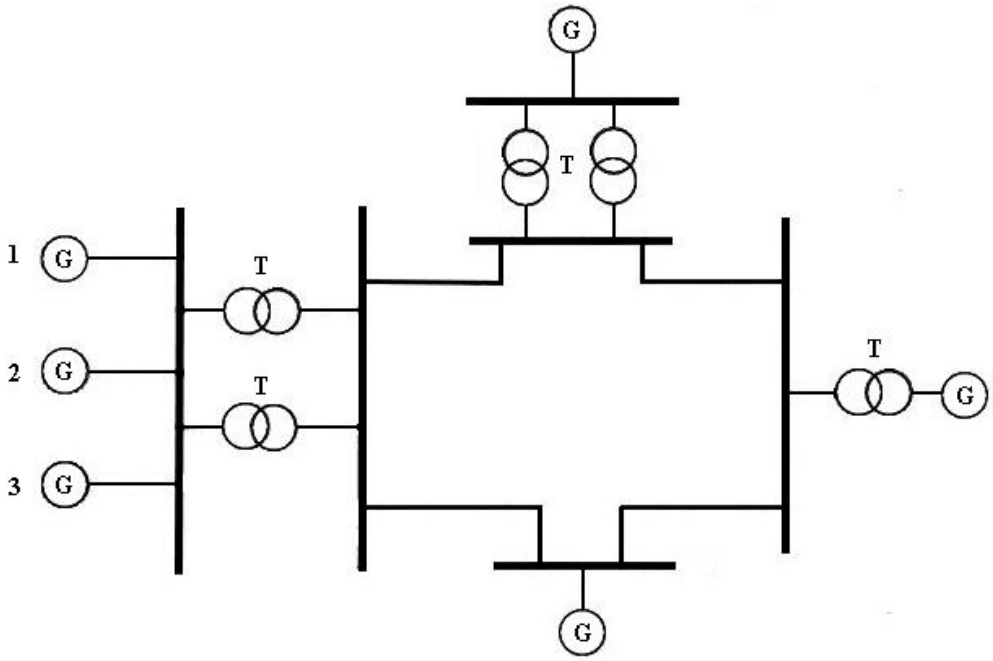
Napon generatora mora se održavati konstantnim bez obzira na vrstu i veličinu opterećenja, a to se postiže regulacijom uzbudne struje. Regulacija frekvencije postiže se regulacijom brzine vrtnje pogonskog stroja. Pomoću regulacijske karakteristike na slici 3.3. može se vidjeti u kojim granicama treba mijenjati struju uzbude da bismo pri zadanom opterećenju održavali stalni nazivni napon U_n.

Promjenjivo opterećenje generatora uzrokuje promjenu napona stezaljki uslijed promjenjivih padova napona u armaturnom namotu i promjenjive reakcije armature, stoga je potreban automatski regulator napona. Radno opterećenje generatora izaziva elektromagnetski moment suprotan smjeru vrtnje. Kako bi brzina vrtnje, a time i frekvencija, pri promjeni opterećenja ostala konstantna, potrebno je pogonskim strojem mijenjati pogonski moment rotora generatora tj. mehaničku energiju rotora. U suprotnome rotor se ne bi okretao nazivnom brzinom, odnosno promjenom opterećenja promijenila bi se frekvencija induciranog napona. Konstantnu brzinu vrtnje održava automatski regulator brzine vrtnje pogonskog stroja.

Sinkroni generator smije se trajno opteretiti prividnom snagom manjom od nazivne snage uz određen faktor snage. Kod većeg opterećenja, odnosno veće armaturne struje, došlo bi do prevelikog zagrijavanja armaturnog namota, a kod faktora snage manjeg od nazivnog zahtjeva se veća uzbudna struja te bi se uz nazivnu armaturnu struju pregrijavao uzbudni namot.

3.2.2. Paralelni rad sinkronog generatora

Čest slučaj pogonskog stanja sinkronog generatora je paralelni rad ili rad sinkronog generatora na krutu mrežu. Kruta mreža predstavlja veliku mrežu s puno priključenih generatora koja ima konstantan napon i frekvenciju. Paralelnim radom generatora u pojedinim elektranama i paralelnim povezivanjem pojedinih elektrana i elektroenergetskih sustava, dobiju se mreže većih snaga na koje pojedini generatori ili elektrane nemaju velik utjecaj. Što je snaga mreže veća, odnosno što je veći broj generatora uključen u mrežu, njen napon se može smatrati stalnijim u pogledu visine napona, faznog pomaka te frekvencije te je njen rad povoljniji. Opterećenje generatora u mreži se može raspodijeliti tako da strojevi rade optimalnom snagom ili da se proizvodnja u elektranama optimalno raspodjeli ovisno o godišnjem dobu, raspoloživoj količini vode, mogućnosti uvoza i izvoza električne energije itd. Paralelni rad generatora osigurava opskrbu mreže električnom energijom i u uvjetima kad neki od generatora ispadnu iz pogona.

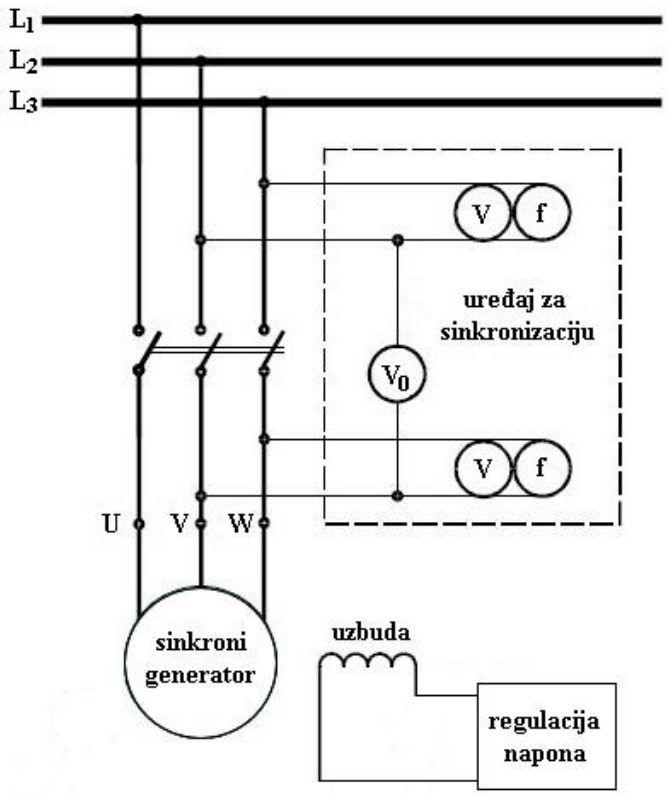


Slika 3.14. *Sinkroni generatori u paralelnom radu s mrežom* [15]

Za paralelno priključivanje sinkronog stroja na mrežu potrebno je provesti postupak sinkronizacije. Uvjeti sinkronizacije su sljedeći:

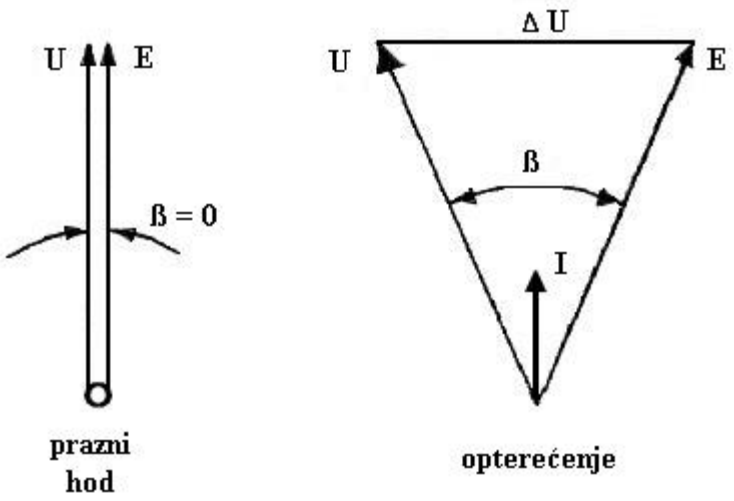
- redoslijed faza generatora i mreže mora biti jednak
- iznosi napona generatora i mreže moraju biti jednaki
- frekvencije napona generatora i mreže moraju biti jednake
- fazni kutovi napona generatora i mreže moraju biti jednaki.

Kada se generator sinkronizira s mrežom, potrebno je njegov rotor zavrtjeti do sinkrone brzine vrtnje pri čemu se troši samo mehanička energija za pokrivanje gubitaka praznog hoda. Nakon toga se polako povećava uzbudna struja čime se na stezaljkama generatora povećava napon tako da bude približno jednak naponu mreže. Redoslijed faza generatora i mreže provjerava se promatranjem smjera vrtnje asinkronog motora priključenog na stezaljke generatora, a zatim mreže. Kada su postignuta prva tri uvjeta podešavanjem brzine vrtnje i uzbude, generator se uklapa na mrežu kada je postignuta istofaznost jer tada teoretski nema razlike između napona generatora i mreže ili je tada najmanja.
Sinkronizacija se provodi pomoću različitih sinkronizacijskih uređaja kao npr. sinkronizacijske žarulje ili pomoću automatske regulacije. Sama sinkronizacija može biti ručna i automatska, a često i kombinirana.



Slika 3.15. *Shema uređaja za sinkronizaciju* [13]

Ako se pogonski stroj puni sa sve više i više mehaničke energije, on će povećavati svoju brzinu pa time i brzinu generatora. S obzirom na to da rotor generatora ne može poprimiti veću brzinu od sinkrone, pomaknut će se za neki kut β prema unaprijed u smjeru vrtnje i dalje rotirati sinkronom brzinom. Primljenu mehaničku energiju rotor će prenijeti na stator elektromagnetskim putem, a iz statora ta mehanička energija izlazi kao električna energija u mrežu. Kao rezultat povećanog davanja mehaničke energije pogonskom stroju, stator će slati u mrežu radnu električnu energiju. Kut β predstavlja fazni pomak induciranog napona generatora E i napona mreže U. Jedan od uvjeta sinkronizacije je bio da su inducirani napon i napon mreže u fazi, odnosno da je kut β jednak nuli, no kad je rotoru dovedena mehanička energija, zakrenuo se za kut β u smjeru vrtnje.



Slika 3.16. *Vektorski dijagram preuzimanja opterećenja* [15]

Između induciranog napona i napona mreže pojavila se razlika potencijala ΔU, a to je upravo taj napon koji „gura“ napon iz generatora u mrežu. Kut β može biti maksimalno 90°, a ako se pogonskom stroju poveća pogonski moment, kut će porasti iznad 90° te generator ispada iz sinkronizma. Tada generator poprima brzine veće od sinkrone i prijeti opasnost od oštećenja zbog centrifugalnih sila. Tijekom ovog postupka uzbudna struja je konstantna od trenutka podešenja sinkronizacije.

Ako se uzbudna struja poveća iznad nazivne (generator se naduzbudi), povećat će se i inducirani napon pa će se između napona generatora i napona mreže pojaviti nova razlika potencijala. Ta razlika napona potjera u mrežu jalovu struju koja ovisi samo o induktivnom otporu generatora. Jalova struja ne može izvršiti nikakav rad i nepoželjna je u mreži. Smjer struje određuje uglavnom reaktancija sinkronog generatora i struja je s obzirom na napon čisto induktivna (zaostaje za naponom 90°), a za mrežu kapacitivna. Naduzbuđeni sinkroni generator u mreži se ponaša kao kondenzator i popravlja induktivni faktor snage mreže. Kada se uzbuda smanji ispod normalne, nastala razlika potencijala daje takvu jalovu struju da protjecanje armature nadoknadi uzbudu na rotoru. Tada je generator poduzbuđen te uzima iz mreže jalovu energiju i daje mreži kapacitivnu, te djeluje kao induktivno trošilo (prigušnica).

3.2.3. Regulacija napona sinkronog generatora

Napon na stezaljkama generatora nije konstantan nego se mijenja s promjenom opterećenja. Pri radnom opterećenju napon opada porastom struje opterećenja, pri induktivnom opterećenju napon dalje opada, dok pri kapacitivnom opterećenju napon raste porastom opterećenja. Da bi se održao konstantan napon na stezaljkama generatora, mora se provoditi regulacija napona. Regulaciju napona osiguravaju sustavi uzbude sinkronih generatora koji se sastoje od uzbudnika, automatskog regulatora i ručnog regulatora napona. Sustavi uzbude dijele se prema vrsti uzbudnika a to su:

- sustavi samouzbude,
- sustavi nezavisne uzbude,
- sustavi strane uzbude.

Sustavi samouzbude su sustavi kod kojih se uzbudna struja dobiva s odcjepa generatora preko uzbudnog transformatora i tiristorskog ispravljača. Sustavi nezavisne uzbude imaju poseban izvor uzbudne struje koji pogoni pogonski stroj sinkronog generatora. Varijante ovih sustava su:

- pomoćni sinkroni generator i statički tiristorski ispravljač,
- osovinski generator i rotirajući tiristorski ispravljač,
- generator istosmjerne struje,
- osovinski generator i uzbudni agregat.

Sustavi strane uzbude napajaju se iz posebne mreže koje se mogu izvesti na dva načina:

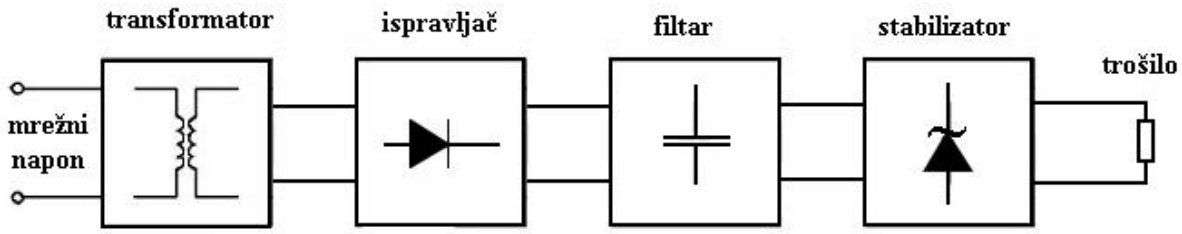
- transformatorom koji je priključen na posebnu mrežu i tiristorskim ispravljačem,
- uzbudnim agregatom koji se sastoji od asinkronog motora priključenog na stranu mrežu i generatora istosmjerne struje.

Izvedba ovisi o parametrima sinkronog generatora, tehničkim zahtjevima za ispunjavanje posebnih funkcija, zahtjevima za pogonsku pouzdanost i tehnološkom rješenju postrojenja. Sustavi uzbude imaju dodatnu opremu koja ima sljedeće funkcije:

- početno uzbuđivanje,
- razmagnetiziranje generatora,
- zaštita uzbudnog kruga od prenapona,
- napajanje za vlastitu potrošnju uzbudnog sustava,
- zaštita sinkronog generatora od kvarova u uzbudnom sustavu,

- upravljanje uzbudnim sustavom,
- signalizacija, mjerenje itd.

Suvremeni sustavi uzbude imaju potpunu autonomnost pogona i mogućnost rada u visoko automatiziranim i daljinski upravljanim objektima.
Automatski regulatori napona imaju zadaću zadržati napone unutar dozvoljenih granica neovisno o promjeni ulaznog napona, promjeni izlazne struje, brzini promjene izlazne struje ili promjeni temperature. Cilj regulatora je ostvariti regulaciju napona uz što manju potrošnju energije regulatora. Važno je da regulator ne generira smetnje koje bi mogle utjecati na ispravan rad sustava te ne bi smio biti osjetljiv na smetnje koje dolaze iz mreže.



Slika 3.17. *Blok shema automatskog regulatora napona* [25]

Suvremena izvedba automatskih regulatora napona je podijeljena u funkcionalne cjeline i svaka funkcionalna cjelina osigurava posebno regulacijsko djelovanje. Struktura automatskog regulatora napona određuje se izborom funkcionalnih jedinica, a na osnovi veličine generatora te njegove uloge u elektroenergetskom sustavu. Automatski regulator napona za generator srednje snage sastoji se od:

- osnovne jedinice,
- transformatorske jedinice,
- podešavanja napona,
- sklopova za ograničenje nadređenih regulatora,
- dodatnih sklopova.

Osnovna jedinica ima primarnu funkciju regulacije napona te formira signal koji je proporcionalan odstupanju napona generatora od nazivne vrijednosti. Strujno mjerenje osigurava jednoliku raspodjelu jalove snage među paralelnim generatorima. Osnovna jedinica ima sljedeće funkcije:

- aktivno održavanje stabilnosti u mreži,
- održavanje napona konstantnim,
- raspodjela jalove snage među generatorima u paralelnom radu.

Transformatorska jedinica sastoji se od naponskih i strujnih mjernih transformatora i služi za prilagodbu napona i struje za ulaz u regulator. Za podešavanje napona služi potenciometar koji omogućuje podešavanje napona u praznom hodu od 90% do 110% nazivne vrijednosti napona generatora. Sklopovi za ograničenje minimalne struje uzbude i ograničenje struje armature sprječavaju ispad ili prekid generatora uzrokovan propadom zaštite zbog jalovog preopterećenja ili gubitka sinkronizma. Kada sklopovi za ograničenje prorade, prestaje djelovanje regulatora napona. Nadređeni regulatori se koriste kada je potrebno održavati neku drugu veličinu, a ne napon generatora. To su regulator faktora snage, regulator jalove snage i grupni regulator (omogućuje zajedničko podešavanje napona više generatora koji rade u jednoj elektrani ili više njih u jednoj točki na sabirnici).
Ručni regulator napona je realiziran kao dodatna jedinica automatskom regulatoru, služi za regulaciju uzbudne struje te kao rezerva u slučaju kvara automatskog regulatora napona.

3.2.4. Regulacija frekvencije i snage agregata

Konstantna vrijednost napona i frekvencije potrebne su i zbog potrošača i zbog same mreže. U svakom agregatu elektrane, koji se sastoji od turbine i generatora, postoji ravnoteža sve dok je proizvedena snaga turbine jednaka snazi generatora. Obzirom na to da opterećenje nije konstantno, u istom ritmu se mora mijenjati i dovod vode te će time brzina vrtnje i frekvencija ostati nepromijenjena. Da bi se izbjeglo mijenjanje frekvencije uslijed promjene opterećenja, turbine su opremljene brzim turbinskim regulatorima, koji pri promjeni opterećenja djeluju na dovodne sustave. Pri povećanju opterećenja, turbinski regulatori omogućuju veći dotok vode turbini, a pri smanjenju opterećenja smanjuju dotok vode. Vodne turbine imaju uglavnom dvojnu regulaciju. Kod Peltonovih turbina postoji regulacija jedne regulacijske igle ili više njih te regulacija skretača mlaza, kod Francisovih turbina regulira se dovod vode i lopatice statora, a kod Kaplanovih turbina reguliraju se rotorske lopatice.
Za sve vrste vodnih turbina koristi se elektronski regulator koji omogućuje regulaciju frekvencije i regulaciju snage. Regulator ima dvije primarne ulazne veličine, te jednu primarnu izlaznu veličinu. Regulator omogućuje sljedeće radnje:

- automatski start i stop agregata,

- automatski preklop na regulaciju po snazi,
- automatski preklop na ručno upravljanje pri kvaru regulatora,
- opterećivanje i rasterećivanje agregata,
- zaštita od pobjega turbine,
- ograničavanje otvora privodnog kola,
- uključivanje i isključivanje uzbude brzinskim relejima.

Regulator se sastoji od elektroničkog i mehaničko-hidrauličkog dijela. U elektroničkom dijelu su izvedeni regulacijski krugovi po frekvenciji i po snazi, ograničavanje otvora privodnog kola i poseban izlazni stupanj velike snage. Mehaničko-hidraulički dio sastoji se od elektromotornih pretvarača, ventila i povratnog mehanizma. Frekvencija se mjeri frekvencijsko-naponskim pretvaračem. Pri nazivnoj frekvenciji od 50 Hz napon na izlazu pretvarača je nula. Mjerno područje je od 40 Hz do 60 Hz, a izlazni napon od -10 V za 40 Hz do +10 V za 60 Hz.
Snaga koji agregat daje u mrežu mjeri se pretvaračem snage koji se napaja iz mjernih transformatora. Podešavanje snage zapravo je postavljanje regulatora u položaj da utječe na privodno kolo tako da je radna snaga agregata jednaka nazivnoj snazi. Odstupanje radne snage od željene je samo tada kada se promijeni frekvencija. Mehaničko-hidraulični dio regulatora ima zadatak da prati promjene koje dolaze iz elektronskog dijela regulatora i da pomoću odgovarajuće opreme prati promjene frekvencije i snage. Ručno upravljanje u regulatoru predviđeno je kao poseban režim rada, koji je aktivan pri startu i zaustavljanju agregata, kod greške regulatora i namjernog uključenja ručnog režima rada. Pri tome nisu aktivni regulacijski krugovi po frekvenciji i snazi. Ručnim upravljanjem moguće je pokrenuti agregat, sinkronizirati ga na mrežu, opteretiti i zaustaviti.

4. ENERGETSKE KARAKTERISTIKE HIDROELEKTRANA

Osnovna karakteristika hidroelektrane je instalirana snaga koja je definirana kao aritmetički zbroj nazivnih snaga generatora, odnosno aritmetički zbroj snaga pogonskih strojeva (vodnih turbina) umanjenih za gubitke mjerene na stezaljkama generatora. Podaci za određivanje instalirane snage hidroelektrane ne mogu se pročitati na natpisnim pločicama strojeva, jer se na natpisnoj pločici pogonskog stroja nalazi podatak o njegovoj snazi na osovini, pa bi trebalo poznavati sve gubitke u generatoru da se odredi snaga koja se može dobiti na stezaljkama generatora, a podataka o gubicima u generatoru nema na natpisnoj pločici generatora. Djelatna snaga na stezaljkama generatora, uzimajući u obzir karakteristike generatora, dobiva se iz produkta nazivne prividne snage generatora i nazivnog faktora snage. Ako su međusobno usklađene konstrukcije vodne turbine i generatora, taj je produkt ujedno i nazivna djelatna snaga agregata. Ako konstrukcije vodne turbine i generatora nisu usklađene, nazivna djelatna snaga agregata ne može biti veća od snage vodne turbine umanjene za gubitke u generatoru, a niti od snage generatora. Prema tome nazivna djelatna snaga agregata u hidroelektrani se određuje kao produkt nazivne prividne snage generatora i nazivnog faktora snage, pa je instalirana snaga hidroelektrane zbroj nazivnih djelatnih snaga agregata.

Za energetske analize hidroelektrana potrebno je poznavati i maksimalnu snagu hidroelektrane. Maksimalna snaga je najveća snaga koju hidroelektrana kao cjelina može proizvesti uz pretpostavku da su svi dijelovi elektrane sposobni za pogon. Pri određivanju instalirane snage, promatra se svaki agregat posebno, a ne uzima se u obzir utjecaj ostalih agregata i drugih dijelova postrojenja. Ako postoji razlika između instalirane i maksimalne snage, maksimalna snaga je manja od instalirane snage. To se može dogoditi u hidroelektrani u kojoj postoje tri jednaka agregata kada svaki od agregata kada radi sam može proizvesti nazivnu djelatnu snagu, ali je maksimalna snaga elektrane manja od trostruke nazivne djelatne snage agregata, jer gubici u tlačnom cjevovodu rastu s kvadratom protoka, pa su gubici kad rade tri agregata šest puta veći nego kad je u pogonu samo jedan od agregata.

Pri određivanju maksimalne snage računa se da su uvjeti za rad optimalni, što znači da su u hidroelektrani protok i pad optimalni. Pri određivanju maksimalne snage hidroelektrane ne postavlja se zahtjev da se postigne maksimalna optimalna korisnost, ali se uzimaju u obzir utjecaji svih dijelova postrojenja: dimenzije dovoda vode, tlačnog cjevovoda, odvoda i slično.

Za pogon agregata, pa i hidroelektrane u cjelini, potrebni su pomoćni pogoni (npr. pumpe) koji se opskrbljuju najčešće električnom energijom proizvedenom u samoj elektrani, što je vlastiti potrošak elektrane. Zbog toga je snaga koja se može staviti na raspolaganje mreži manja od

snage na stezaljkama generatora, pa se razlikuje maksimalna snaga na stezaljkama generatora od maksimalne snage na pragu elektrane koja je za vlastiti potrošak manja od snage na stezaljkama generatora.

Osim već definirane maksimalne snage koja se može ostvariti uz optimalne uvjete, treba poznavati raspoloživu snagu hidroelektrane. To je najveća snaga koju hidroelektrana može proizvesti u promatranom trenutku uzimajući u obzir stvarno stanje u elektrani (pregledi, kvarovi, popravci), a uz pretpostavku da nema ograničenja zbog proizvodnje jalove snage. Pri određivanju raspoložive snage hidroelektrane, osim stanja postrojenja, treba u hidroelektrani uzeti u obzir raspoloživi dotok i pad. Potrebno je razlikovati raspoloživu snagu na stezaljkama generatora i raspoloživu snagu na pragu elektrane.

Snaga koju hidroelektrana daje na priključcima generatora računa se prema sljedećoj jednadžbi:

$$P = g \cdot Q \cdot H_n \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot \rho \qquad (4\text{-}1)$$

gdje je:

- Q – protok kroz turbinu
- g – gravitacijsko ubrzanje (9,81 m/s^2)
- H_n – neto pad koji djeluje na ulazu u turbinu
- η_t i η_g – stupnjevi djelovanja turbine i generatora
- ρ - gustoća vode (1000 kg/m^3)

Stupnjevi djelovanja turbine i generatora ovise o opterećenju i broju agregata u pogonu te o faktoru snage s kojim radi generator. Budući da je stupanj djelovanja generatora vrlo visok, a utjecaj faktora snage nije velik, mogu se razmatranja provesti uz pretpostavku da generator radi s konstantnim faktorom snage koji je jednak nazivnom faktoru snage. Slika 4.1. predstavlja promjenu stupnja djelovanja u ovisnosti o protoku. Stupanj djelovanja pri optimalnom opterećenju u modernim hidroelektranama iznosi i do 90% (η = 0,9). Prosječni stupanj djelovanja korištenja potencijalne energije vode je niži i za veća postrojenja iznosi približno 80%, a za manja postrojenja približno 75%.

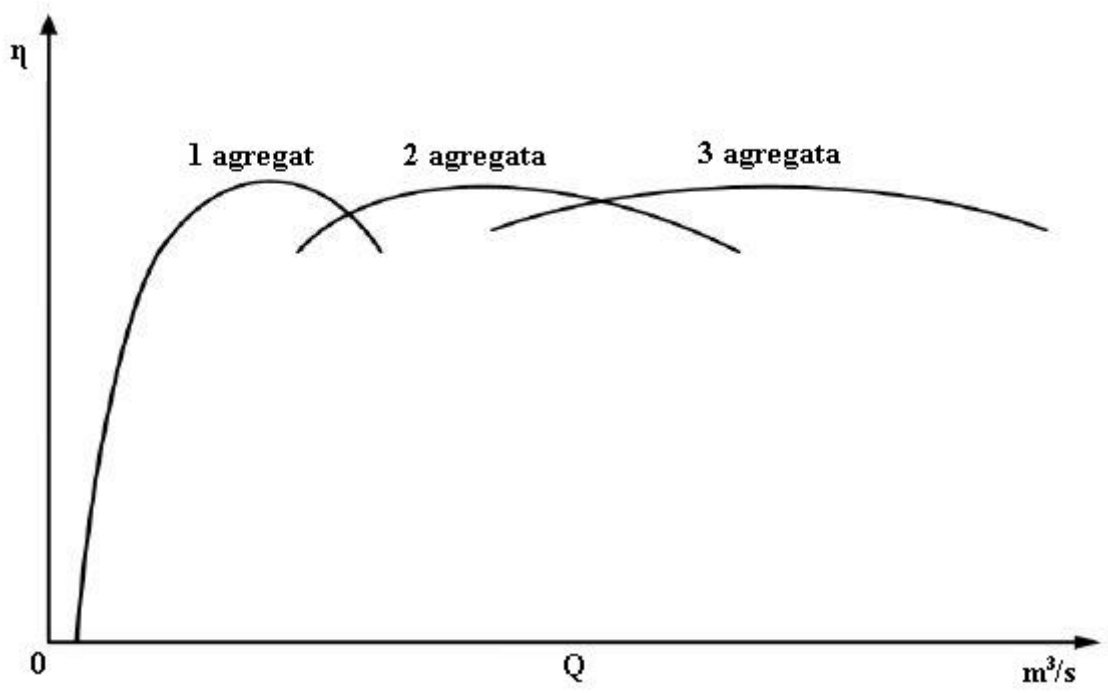
Kada nisu poznati stupnjevi djelovanja snaga hidroelektrane se može odrediti prema sljedećoj jednadžbi:

$$P = k \cdot Q \cdot H_n \tag{4-2}$$

gdje je:

- Q – protok
- H_n – neto pad

Vrijednost *k* člana jednadžbe ovisi o snazi agregata i o jedinicama u kojima su izražene snaga, protok i neto pad. Za hidroelektrane sa snagom agregata većom od 10 MW (megavat) *k* je jednak 8, a za hidroelektrane s agregatima manje snage je *k* manji od 8. Veličina *k* se određuje linearnom interpolacijom uz pretpostavku da je *k* = 7,5 za agregate snage 1 MW.



Slika 4.1. *Stupanj djelovanja hidroelektrane* [19]

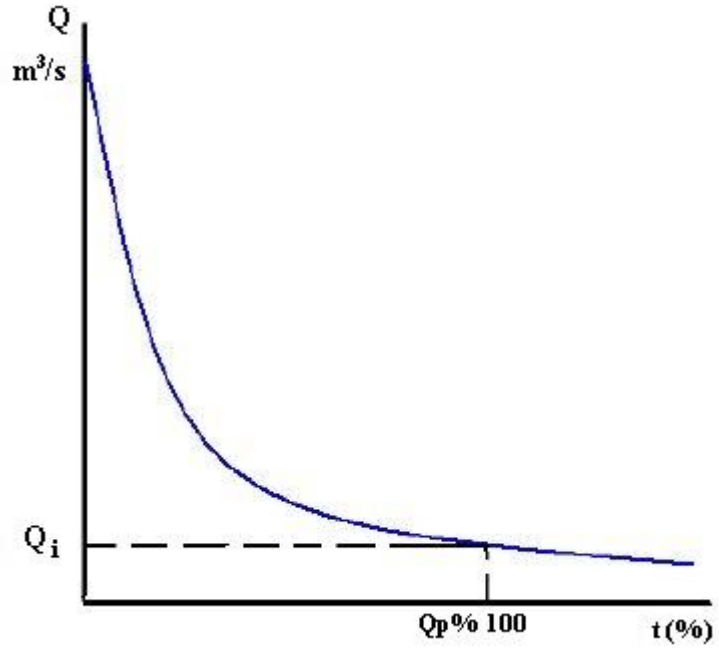
Hidroelektrana ima još jednu karakterističnu veličinu koja odgovara instaliranoj snazi, a to je veličina izgradnje (protok kroz turbine za instaliranu snagu). To je maksimalni protok koji hidroelektrana može iskoristiti uzevši u obzir sve dijelove postrojenja. Određenoj veličini izgradnje Q_i odgovara iskoristivi volumen vode V_i :

$$V_i = \int_0^{Qi} t \cdot dQ \tag{4-3}$$

Kod utvrđivanja principa određivanja veličine izgradnje za male hidroelektrane, moraju se razlikovati tipovi postrojenja gdje se razlikuju:

- male hidroelektrane za samostalan rad.
- male hidroelektrane vezane na distributivnu mrežu.

Treba težiti tome da mala hidroelektrana bude vezana na distributivnu mrežu uz mogućnost samostalnog rada ako dođe do raspada sustava. Kod malih hidroelektrana gdje je protočno postrojenje, veličina izgradnje se određuje na temelju krivulje trajanja protoka gdje sigurnost u opskrbi energijom ovisi samo o prirodnim protocima pa je ona presudna za određivanje kriterija veličine izgradnje.



Slika 4.2. *Krivulja trajanja protoka* [20]

Gdje je:

- Q_i – instalirani protok
- Qp% - protok koji stoji na raspolaganju p% vremena
- t (%) – postotak trajanja protoka

Vremena manja od 100% su protoci manji od instaliranog i tada se na vodnoj turbini odnosno generatoru dobiva manja snaga od nazivne.

Kod postrojenja s akumulacijom za promjenjivo dnevno reguliranje dotoka, ukoliko na odabranoj akumulaciji postoje povoljni hidrološki uvjeti za formiranje akumulacije za potpuno

ili djelomično dnevno izravnanje, princip određivanja veličine izgradnje se radi uz pomoć akumulacije kada je moguće koncentrirati proizvodnju na kritična dnevna razdoblja. Promjene potrošnje energije tokom 24 sata ovise o vrsti potrošnje i prikazuju se pomoću dnevnog dijagrama opterećenja. Dnevni dijagram opterećenja daje kronološku ovisnost snage potrošača o vremenu. Kada je riječ o vremenskim periodima, postoje dnevni, mjesečni i godišnji dijagrami opterećenja. Najprecizniji dijagram opterećenja je dnevni dijagram opterećenja koji ovisi o više faktora:

- priroda potrošačkog područja,
- udio pojedinih potrošača u određenom potrošačkom području,
- sezona (ljeto, zima),
- ostali faktori

Dnevni dijagram opterećenja karakteriziraju tri osnovna pokazatelja:

- maksimalno dnevno opterećenje,
- minimalno dnevno opterećenje,
- ukupna dnevna potrošnja.

Pomoću minimalnog i maksimalnog opterećenja te proizvedene energije mogu se odrediti veličine koje opisuju dnevni dijagram opterećenja. Dnevni faktor opterećenja m definiran je kao omjer proizvedene energije W_d i energije koja bi se proizvela maksimalnim opterećenjem P_{max} u 24 sata:

$$m = \frac{W_d}{24 \cdot P_{max}} \tag{4-4}$$

Omjer minimalnog i maksimalnog opterećenja m_0 dobije se izrazom:

$$m_0 = \frac{P_{min}}{P_{max}} \tag{4-5}$$



Slika 4.3. *Dnevni dijagram opterećenja za Osijek, 11.07.2017* [21]

Površina ispod krivulje pokazuje proizvedenu energiju tokom dana a krivulja pokazuje planiranu proizvedenu energiju.

Kad se radi o malim hidroelektranama vezanim na distributivnu mrežu, izborom paralelnog rada kao osnovnog režima rada, omogućeno je da mala hidroelektrana u svakom trenutku stavlja na raspolaganje maksimalno moguću snagu s obzirom na raspoloživi protok. U slučaju smanjene lokalne potrošnje višak energije se isporučuje distributivnoj mreži, a u slučaju da potrošnja prelazi raspoloživu snagu elektrane, razlika energije se namiruje iz mreže. Time je riješen problem viška energije elektrane i problem dopunske energije za potrošače u periodu malih voda. U ovom slučaju otpada utjecaj karakteristike lokalne potrošnje i krivulje dnevne potrošnje te se za analizu veličine izgradnje koristi tipična krivulja trajanja srednjih dnevnih protoka koja je dovoljna za razmatrano područje.

Maksimalno i minimalno godišnje opterećenje hidroelektrane se određuje iz pogonskih podataka elektrane ili iz godišnje krivulje trajanja opterećenja. U većini praktičnih slučajeva za elektrane koje rade u većim elektroenergetskim sustavima, maksimalno godišnje opterećenje je jednako maksimalnoj snazi, dok je minimalno opterećenje jednako nuli. Odnos između minimalnog i maksimalnog opterećenja za elektrane nema značenja, ali je zanimljivo poznavati godišnji faktor opterećenja elektrane *m* i godišnji faktor iskorištenja elektrane *n.* Godišnji faktor opterećenja elektrane *m* definiran je kao omjer električne energije proizvedene u promatranoj godini i

električne energije koja bi se proizvela da je elektrana kroz cijelu godinu bila pod maksimalnim opterećenjem. Godišnji faktor opterećenja elektrane se računa prema formuli:

$$m = \frac{W_g}{8760 \cdot P_{g,max}} \tag{4-6}$$

gdje je:

- W_g – godišnja proizvodnja elektrane u megavat satima (MWh)
- $P_{g,max}$ – maksimalno opterećenje tijekom promatrane godine (MWh)
- *8760* – broj sati u godini

Faktor iskorištenja *n* dobiva se tako što se umjesto maksimalnog opterećenja u formulu uvrsti maksimalna snaga elektrane po formuli:

$$m = \frac{W_g}{8760 \cdot P_{e,max}} \tag{4-7}$$

gdje je:

- W_g – godišnja proizvodnja elektrane (MWh)
- $P_{e,max}$ – maksimalna snaga elektrane

Iskorištavanje elektrane često se karakterizira trajanjem korištenja maksimalnog godišnjeg opterećenja $t_{g,max}$ i trajanjem korištenja maksimalne snage $t_{e,max}$. Te dvije veličine se mogu definirati kao vrijeme potrebno da se snagom $P_{g,max}$, odnosno $P_{e,max}$ proizvede energija W_g. Trajanje korištenja maksimalnog opterećenja i trajanje korištenja maksimalne snage mogu se izračunati prema sljedećim formulama:

$$t_{g,max} = \frac{W_g}{P_{g,max}} \tag{4-8}$$

$$t_{e,max} = \frac{W_g}{P_{e,max}} \tag{4-9}$$

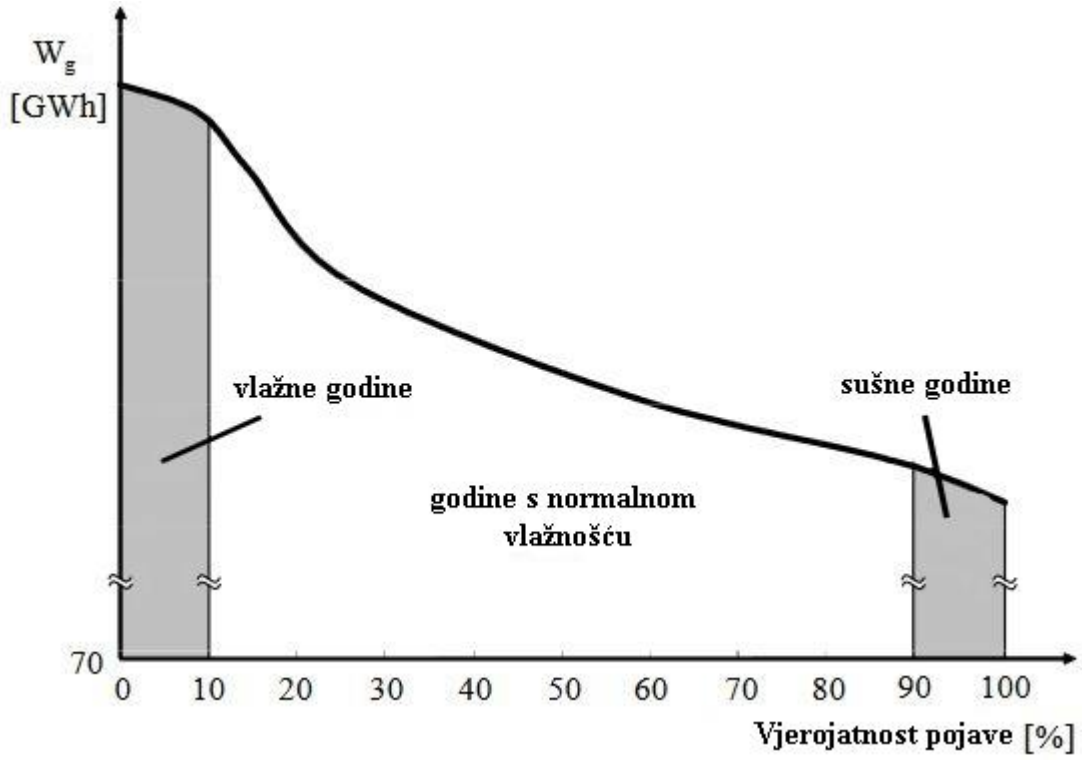
gdje je:

- $t_{g,max}$ – trajanje korištenja maksimalnog godišnjeg opterećenja

- W_g – godišnja proizvodnja elektrane
- $P_{g,max}$ – maksimalno opterećenje tijekom promatrane godine
- $t_{e,max}$ – trajanje korištenja maksimalne snage
- $P_{e,max}$ – maksimalna snaga elektrane

Trajanje korištenja maksimalnog godišnjeg opterećenja i trajanje korištenja maksimalne snage ne predstavljaju stvarno trajanje pogona elektrane, već vrijeme koje bi bilo potrebno da se uz maksimalno opterećenje, odnosno snagu, proizvede količina energije W_g. Trajanje korištenja akumulacijskih hidroelektrana je 2000 - 3000 sati godišnje, a protočnih hidroelektrana do 6000 sati godišnje. Faktori korištenja mogu se odrediti prema snazi ili opterećenju na priključnicama generatora ili na pragu elektrane kada treba uvrstiti u formule godišnju proizvodnju na priključnicama generatora, odnosno godišnju proizvodnju na pragu elektrane.

Karakteristična veličina hidroelektrane je i moguća prosječna godišnja proizvodnja, koja je aritmetička srednja vrijednost mogućih godišnjih proizvodnja u promatranom nizu godina. Moguća godišnja proizvodnja u promatranoj godini maksimalna je proizvodnja koja bi se mogla ostvariti kad bi se iskoristile sve količine vode, uzevši u obzir ograničenje veličinom izgradnje, uz najpovoljnije uvjete, ali uzimajući u obzir dotok ostvaren u promatranoj godini. Pri određivanju moguće proizvodnje treba računati s utjecajem bilo vlastite akumulacije bilo akumulacija u uzvodnim hidroelektranama. Pri tome treba uzeti u obzir eventualne potrebe vode za plovidbu i poljoprivredu, za osiguranje minimalnog protoka koji se mora ispuštati u korito rijeke (biološki minimum) i sl. Pri određivanju moguće proizvodnje hidroelektrane pretpostavlja se da su svi dijelovi postrojenja sposobni za pogon, da ne postoje ograničenja zbog preuzimanja električne energije niti zbog utjecaja mreže (rotirajuća rezerva, regulacija frekvencije, proizvodnja jalove snage). Stvarna proizvodnja hidroelektrane je u pravilu niža od moguće zbog toga što je mogućnost proizvodnje veća od potražnje potrošača.



Slika 4.4. *Krivulja moguće proizvodnje hidroelektrane* [22]

Karakteristika hidroelektrane je i veličina akumulacijskog bazena gdje treba razlikovati ukupni i korisni volumen bazena. Ukupni volumen bazena je količina vode koja se može smjestiti između dna i najvišeg nivoa vode u normalnom pogonu. Korisni volumen odgovara iskoristivoj količini te vode između najnižeg i najvišeg radnog nivoa akumulacije, dok je „mrtvi“ prostor neiskoristivi dio ukupnog volumena akumulacije. Relativna vrijednost korisnog volumena akumulacijskog bazena je odnos korisnog volumena i ukupne količine vode koja tokom godine, tjedna ili dana dotekne u bazen. Korisni volumen akumulacije se još karakterizira i energetskom vrijednosti akumulacijskog bazena. Energetska vrijednost akumulacijskog bazena je ona količina električne energije koja bi se sa raspoloživom vodom mogla proizvesti u vlastitoj elektrani i svim nizvodnim hidroelektranama u slučaju potpunog pražnjena korisnog volumena akumulacije kada u tom procesu ne bi bilo dotoka vode u bazen niti gubitaka vode. Da se odredi mogući raspored iskorištenja voda koji ovise o protocima, ali i o raspoloživom korisnom volumenu akumulacijskog bazena, potrebno je odrediti ovisnost potrebnog volumena o protoku. Volumen koji s konstantnim dotokom dotječe u akumulacijski bazen ili koji se može iskoristiti iz sezonskog, godišnjeg ili višegodišnjeg akumulacijskog bazena, proporcionalan je umnošku konstantnog dotoka i trajanja vremenskog perioda. Raspored iskorištenja vode mora biti takav da

se iskoristi sva voda koja dotječe tijekom promatranog vremenskog perioda. Iz rasporeda protoka dobiva se i ritam punjenja i pražnjena akumulacijskog bazena. Budući da je u razdoblju od ponedjeljka do subote, odnosno od ponedjeljka do petka intenzivnije pražnjenje akumulacijskog bazena nego od subote do ponedjeljka, kad je intenzivnije punjenje bazena, opravdano je pretpostaviti da je bazen prazan na kraju rada s maksimalnim protokom posljednjeg radnog dana u tjednu. Bazen je pun u ponedjeljak prije pogona s maksimalnim protokom bez obzira na broj neradnih dana u tjednu. Zbroj volumena vode kojima se puni i prazni akumulacijski bazen mora biti jednak nuli, jer je raspored vode određen tako da se iskoristi sva voda koja dotječe odnosno koja je predviđena da se iskoristi u promatranom tjednu. Kad je akumulacijski bazen manji od potrebnog za raspored iskorištenja voda, potrebno je rasporediti protok kroz turbine da se dobije što više varijabilne energije uz potpuno iskorištenje mogućnosti akumuliranja vode. To se postiže skraćenjem trajanja pogona s maksimalnim protokom uz istodobno povećanje konstantnog protoka. Prema tome, uz volumen akumulacijskog bazena manjeg od potrebnog ostvaruje se manja proizvodnja varijabilne energije od one koja bi se mogla ostvariti uz jednaki dotok kad bi akumulacijski bazen imao dovoljan volumen.

4.1. Hidroelektrane s odvojenim i zajedničkim dovodima i odvodima vode

Hidroelektrana s odvojenim dovodima i odvodima vode ima za svaku vodnu turbinu posebne međusobno odvojene dovode i odvode. Takav sustav dovoda i odvoda primjenjuje se uvijek u pribranskim hidroelektranama u kojima nije potreban uređaj za odvod vode, jer voda otječe neposredno u korito vodotoka, te u hidroelektranama s malim padom kad dovod nije dug. Pogodno je pretpostaviti da su dotoci pojedinim turbinama proporcionalni nazivnim protocima svake od turbina. Tada je ukupni dotok svim turbinama u pogonu određen sljedećom formulom:

$$Q_u = \frac{\sum Q_i(n)}{Q_i(n)} \cdot Q_B(n) \tag{4-10}$$

gdje je:

- Q_u – ukupni protok
- $Q_i(n)$ – nazivni protoci svake od turbina
- $Q_B(n)$ – dotok pojedinoj turbini

pa je protok kroz svaku turbinu:

$$Q_B(n) = \frac{Q_i(n)}{\sum Q_i(n)} \cdot \sum Q_u \tag{4-11}$$

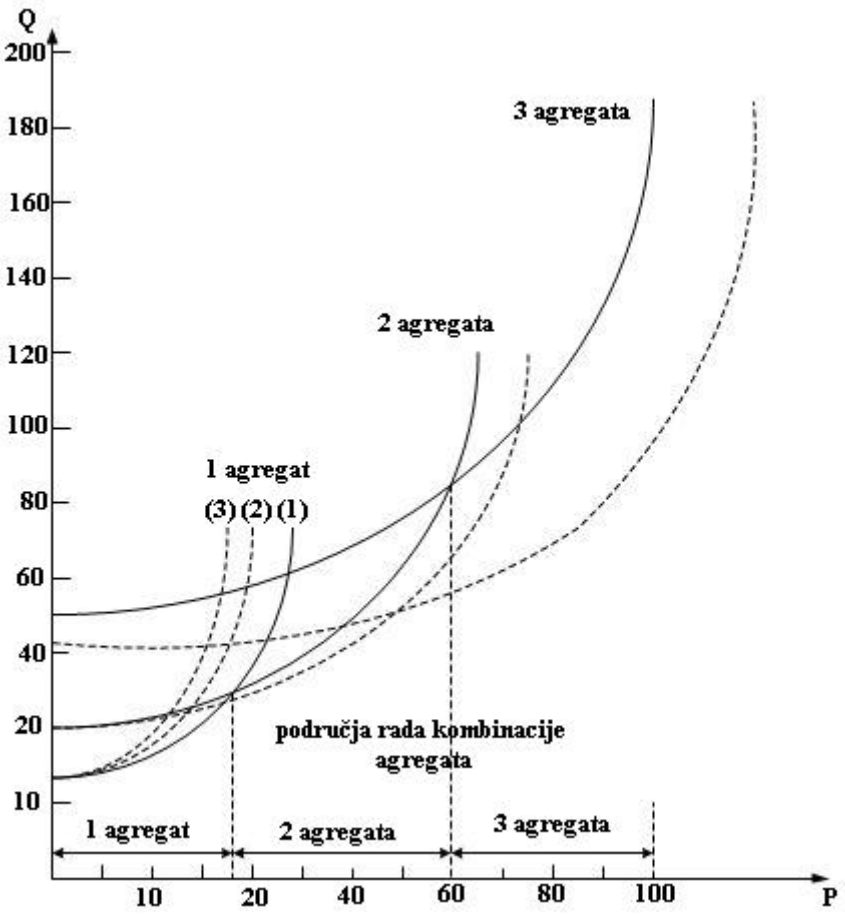
Tako određena raspodjela dotoka smatra se aproksimacijom budući da se osniva na pretpostavljenom rasporedu dotoka. Ako se određeni dotoci ne razlikuju suviše od pretpostavljenih, može se smatrati da je izračunata raspodjela dotoka dovoljno točna te je time postupak završen. Ako su te razlike velike, postupak se treba ponavljati sve dok se ne postigne dovoljno mala razlika dotoka za sve agregate. Tako se dobivaju osnovne i diferencijalne karakteristike za određenu kombinaciju agregata u pogonu. O kombinaciji agregata ovisi veza između ukupnog dotoka i dotoka pojedinim agregatima koji pripadaju promatranoj kombinaciji.
Ako u hidroelektrani postoji određen broj jednakih agregata, kako se najčešće i grade hidroelektrane, ne treba prilikom razmatranja posebno razmatrati raspodjelu opterećenja među agregatima. Opterećenje među agregatima treba raspodijeliti tako da svaki od agregata koji su u pogonu preuzme određeni dio ukupnog opterećenja. Diferencijalne karakteristike hidroelektrane tada se mogu jednostavno odrediti, ali te karakteristike ovise o broju agregata u pogonu, jer razina donje vode ovisi o ukupnoj količini vode koja protječe kroz turbine. Neto pad se može prikazati sljedećom relacijom:

$$H_n(k) = H_B - H_D(k \cdot Q) - D_O(Q) - D_D(Q) \tag{4-12}$$

gdje je:

- $H_n(k)$ – neto pad u ovisnosti o broju agregata u pogonu
- H_B – bruto pad
- $H_D(k \cdot Q)$ – razina donje vode u ovisnosti o protoku kroz agregat
- $D_D(Q)$ – gubici u dovodu
- $D_o(Q)$ – gubici u odvodu

Neto pad ovisi o broju agregata u pogonu, donja razina vode ovisi o višekratniku protoka kroz agregat, a gubici u dovodu i odvodu ovise o protoku kroz agregat. Pomoću tog izraza dobivaju se karakteristike za hidroelektranu s tri jednaka agregata kada se uzima u obzir utjecaj promjene razine donje vode.



Slika 4.5. *Osnovne karakteristike hidroelektrane sa tri jednaka agregata s utjecajem razine donje vode* [23]

Karakteristike za jedan agregat prikazane su za tri kombinacije agregata:

- kad je u pogonu samo jedan agregat (krivulja 1),
- kad su u pogonu dva agregata (krivulja 2),
- kad su u pogonu tri agregata (krivulja 3).

Krivulja 1 ujedno predstavlja karakteristiku hidroelektrane kad je u pogonu jedan od agregata. Na slici su crtkano prikazane karakteristike za pogon s dva ili tri agregata kad se ne bi uzimao u obzir utjecaj promjene razine vode. Osnovnom energetskom karakteristikom se uspoređuje korisna i dovedena snaga po relaciji:

$$Q = f(P) \tag{4-13}$$

Da se dobije osnovna karakteristika hidroelektrane s dva agregata u pogonu, potrebno je udvostručiti ordinate i apscise krivulje 2, koja vrijedi za jedan agregat kad su dva agregata u pogonu. Analogno se dobiva osnovna karakteristika hidroelektrane sa tri jednaka agregata u pogonu. Osim osnovne karakteristike korisno je uvesti i diferencijalne karakteristike koje se dobiju tako da se derivira osnovna energetska karakteristika po korisnoj snazi:

$$Q_{df} = \frac{dQ}{dP} \tag{4-14}$$

Veličina Q_{df} prikazuje porast dovedene snage za diferencijalni porast korisne snage, a funkcija je korisne snage. Ta karakteristika može se nazvati karakteristika diferencijalnog potroška. Diferencijalna karakteristika hidroelektrane dobiva se zbrajanjem snaga za jednake diferencijalne potroške, ali pri tome treba razlikovati diferencijalne karakteristike za različite teorijske bruto padove i za različite kombinacije agregata.
U protočnim hidroelektranama protok je zadan prirodnim dotokom vode, pa se stoga određuje broj agregata koje treba staviti u pogon. Ako su u hidroelektrani različiti agregati, treba odrediti najpovoljniju kombinaciju agregata za zadani protok, uz najpovoljniju raspodjelu opterećenja među agregatima.

Kod hidroelektrana sa zajedničkim dovodom i odvodom voda se dovodi turbinama dugim zajedničkim dovodom (tlačnim cjevovodom ili kanalom), a odvodi se duljim zajedničkim odvodom ili kratkim i pojedinačnim odvodima. Mnogo je veći utjecaj ukupnog dotoka turbinama u hidroelektranama sa zajedničkim dovodom i odvodom, jer gubici u zajedničkom dovodu i odvodu ovise o ukupnom dotoku. Takve hidroelektrane imaju obično velik pad pa utjecaj razine donje vode nije velik te promjena razine donje vode ne utječe mnogo na bruto pad. Za hidroelektrane s jednakim agregatima, ako imaju zajednički dovod i odvod, može se postupiti kao za hidroelektranu u kojoj postoje pojedinačni dovodi samo onda ako su gubici u pojedinačnim dovodima i odvodima međusobno jednaki, odnosno ako vrijede sljedeće jednakosti:

$$D_D(1) = D_D(2) = D_D(3) = \cdots D_D(n) \tag{4-15}$$

$$D_O(1) = D_O(2) = D_O(3) = \cdots D_O(n) \tag{4-16}$$

gdje je:

- $D_D(1)$, $D_D(2)$, $D_D(3)$ – gubici dovoda prvog, drugog i trećeg agregata
- $D_O(1)$, $D_O(2)$, $D_O(3)$ – gubici odvoda prvog, drugog i trećeg agregata
- $D_D(n)$, $D_O(n)$ – gubici dovoda i odvoda n-tog agregata

Ako ovi uvjeti nisu ispunjeni, treba postupiti kao da agregati nisu međusobno jednaki, jer su gubici u pojedinačnim dovodima i odvodima različiti što utječe na karakteristike agregata.

4.2. Raspodjela opterećenja među paralelno spojenim agregatima

Raspodjela opterećenja među elektranama provodi se samo za one agregate za koje se pretpostavlja da su u pogonu. Najčešće se ne uzima u obzir obustavljanje agregata u termoelektranama tokom dana zbog dodatnih troškova i pogonskih poteškoća, pa se može računati da će tokom cijelog dana biti u pogonu svi agregati koji su potrebni za zadovoljenje potrošnje u trenutku maksimalnog opterećenja termoelektrana. Može se dogoditi da je radi eliminacije preljeva u hidroelektranama potrebno predvidjeti obustavu nekog od agregata u termoelektranama. To se može ustanoviti već pri određivanju početnih vrijednosti, pa je potrebno tako i odrediti granične uvjete za određene vremenske intervale.

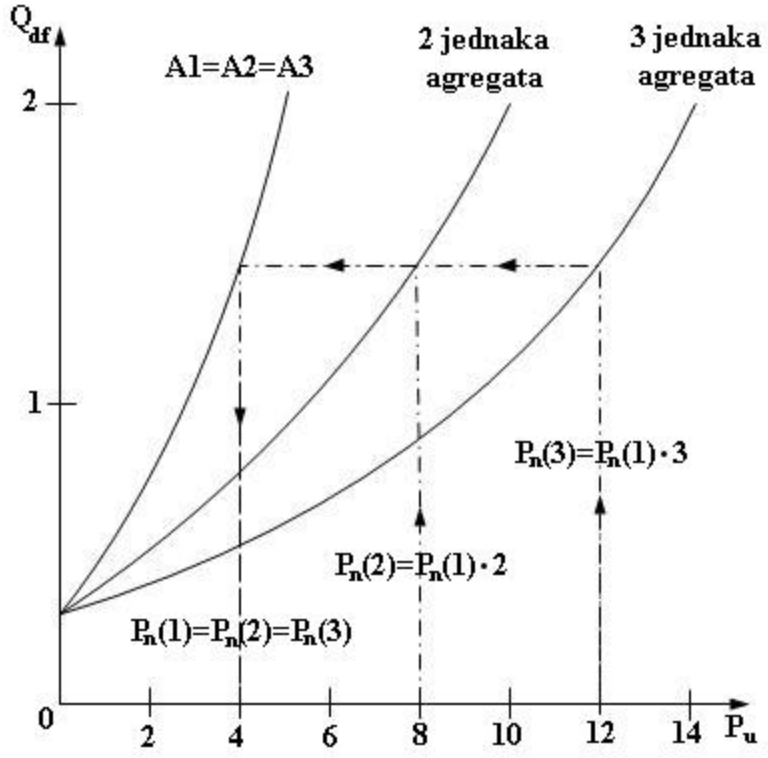
Obustavljanje agregata u hidroelektranama ne stvara poteškoće, a dodatni potrošak vode nije tako velik da bi trebalo izbjegavati obustavljanje i ponovno stavljanje u pogon tokom dana. Zbog toga je potrebno već u početku za svaku hidroelektranu i za sve vremenske intervale odrediti broj agregata u pogonu, ako u elektrani postoje jednaki agregati, odnosno kombinaciju agregata u pogonu, ako su u elektrani agregati različitih karakteristika. Broj agregata, odnosno kombinacija agregata u pogonu ovisi o početnoj vrijednosti opterećenja hidroelektrane. Svakom opterećenju najbolje odgovara određena kombinacija agregata pa je moguće za svaku kombinaciju odrediti raspon opterećenja unutar kojih je najpovoljnije raditi s određenom kombinacijom agregata. Budući da su poznate početne vrijednosti opterećenja hidroelektrane, moguće je odrediti za svaki vremenski interval i optimalni broj agregata, odnosno optimalnu kombinaciju agregata, pa za takvo pogonsko stanje zadati i karakteristiku hidroelektrane.

U samom početku proračuna, za one intervale u kojima je prema početnim vrijednostima opterećenja predviđeno opterećenje nula, ne bi trebalo postaviti da ni jedan agregat nije u pogonu. Tada nije moguće očekivati nikakvo drugo rješenje iako bi se moglo očekivati da je optimalno opterećenje veće od nule. Zbog toga u tim intervalima treba pretpostaviti da je u

pogonu jedan od agregata i to onaj koji ima najmanji potrošak vode kad u hidroelektrani postoje različiti agregati. Za druge vremenske intervale treba pretpostaviti da je onoliko agregata u pogonu da se uz najmanji mogući potrošak vode može proizvesti potrebna snaga.
Takav raspored agregata u pogonu ne mora biti optimalan, što se može ustanoviti nakon nekoliko iteracija kad je rješenje već na vidiku. Ako je u tom koraku proračuna opterećenje hidroelektrane u nekim vremenskim intervalima jednako nuli, potrebno je za daljnji proračun postaviti da u tim intervalima nije u pogonu ni jedan agregat. Tako treba postupiti i s intervalima u kojima su opterećenja na donjoj ili gornjoj granici područja opterećenja unutar kojeg je optimalan pogon s predviđenom kombinacijom agregata. Ako je opterećenje na donjoj granici područja, daljnji proračun treba provesti sa sljedećim manjim brojem agregata, odnosno s kombinacijom agregata koja je optimalna za područje manjih opterećenja. Kad je opterećenje na gornjoj granici, prelazi se na sljedeće područje optimalnih opterećenja povećanjem broja agregata, odnosno prijelazom na kombinaciju agregata koja je optimalna za sljedeće veće područje opterećenja. Takva kontrola angažiranja broja agregata, odnosno kombinacije agregata, provodi se u svakom daljnjem koraku. Istodobno treba ako je potrebno, smanjiti ili povećati broj agregata, odnosno prijeći s jedne na drugu kombinaciju agregata.

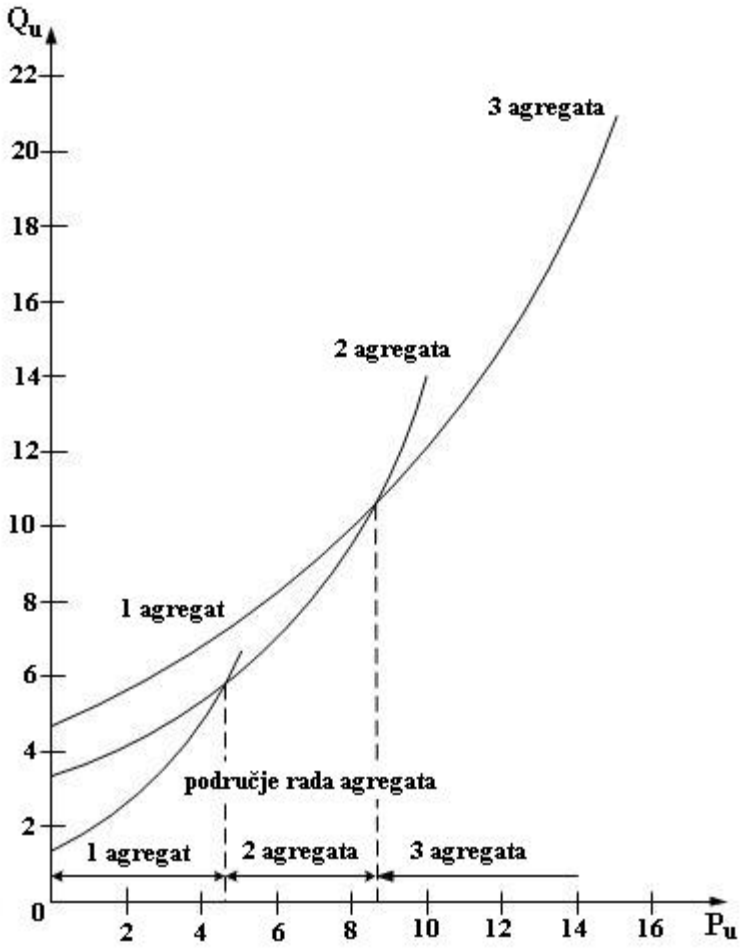
Agregati se mogu paralelno spajati ako proizvode istovrsni oblik korisne energije jednakih karakteristika. Paralelno spojeni agregati moraju proizvoditi onoliko korisne energije koliko je potrebno za zadovoljenje potrošnje, ali tehnički promatrano raspodjela opterećenja može biti bilo kakva, uz jedini uvjet da ukupno opterećenje bude jednako potražnji. Ukupno opterećenje koje je veće od nule a manje od zbroja maksimalnih korisnih snaga agregata, može se ostvariti različitim opterećenjima agregata pa se ukupna dovedena snaga za istu ukupnu korisnu snagu može znatno razlikovati ovisno o raspodjeli opterećenja među agregatima. Svakako je uvijek potrebno ostvariti takvu raspodjelu opterećenja među paralelno spojenim agregatima da se postigne potrebna ukupna korisna snaga uz minimalno dovedenu snagu.
Pomoću diferencijalnih karakteristika određuje se raspodjela opterećenja među agregatima koji su u pogonu, ali se ne može samo pomoću njih odrediti kombinacija agregata koju treba staviti u pogon. Diferencijalnim karakteristikama se uzima u obzir samo prirast dovedene snage za prirast korisne snage, dok potrošak praznog hoda nema utjecaj na raspodjelu opterećenja među agregatima, jer je stavljanjem u pogon već angažirana dovedena snaga za prazni hod. Zbog toga se za određivanje agregata koje treba staviti u pogon treba usporediti osnovne karakteristike agregata i mogućih kombinacija agregata.

Diferencijalne energetske karakteristike paralelno spojenih jednakih agregata određuju se jednostavnim udvostručenjem, utrostručenjem, ako su u pogonu dva, tri ili više jednakih agregata, korisne snage jednog agregata uz nepromijenjenu vrijednost diferencijalnog potroška.



Slika 4.6. *Diferencijalne energetske karakteristike jednakih agregata* [23]

Raspodjela opterećenja među agregatima određuje se na već opisani način. Budući da diferencijalne karakteristike svih jednakih agregata padaju zajedno, jer jednaki agregati imaju i jednake karakteristike, optimalna raspodjela opterećenja postiže se kad je svaki od agregata jednako opterećen. Prema tome, ukupno opterećenje treba raspodijeliti na toliko jednakih dijelova koliko je agregata u pogonu. Uz takvu optimalnu raspodjelu opterećenja među jednakim agregatima jednostavno se određuje i osnovna energetska karakteristika za paralelno spojene agregate (gdje je: Q_u - ukupna dovedena snaga, P_u – ukupno opterećenje), pomoću koje se određuje područje rada kombinacije agregata. Obje koordinate osnovne energetske karakteristike agregata treba toliko puta povećati koliko ima elemenata u pogonu.



Slika 4.7. *Osnovne energetske karakteristike 3 paralelno spojena jednaka agregata* [23]

5. OPIS HIDROELEKTRANE SENJ

Hidroelektrana Senj koristi vode dviju rijeka (Lika i Gacka). Vode Like provode se u Gacku spojnim tunelom Lika-Gacka. Kanalom se vode obiju rijeka provode kroz Švičko polje, a zatim gravitacijskim tunelom do Marasa. Voda se dalje provodi kanalom do kompenzacijskog bazena u Gusić Polju, a konačno tlačnim tunelom se dovodi do vodne komore na Hrmotinama i tlačnim cjevovodom do podzemne strojarnice u uvali Male Grabove kod Senja.



Slika 5.1. *Hidroelektrana Senj* [26]

Rijeka Lika ima vodotok duljine oko 76 kilometara na nadmorskoj visini iznad 480 m. Velike količine padalina uz pretežno površinsko otjecanje utječu na to da je ovaj vodotok karakteriziran bujicama s približnim odnosom minimalnog, srednjeg i maksimalnog protoka 1:130:3800. Zbog ovako velikih i brzih kolebanja u protoku, vodotok nije naročito pogodan za energetsko iskorištenje usprkos znatnih srednjih protoka i velikog raspoloživog pada na relativno maloj udaljenosti od Jadranskog mora.

Rijeka Gacka ima vodotok duljine oko 28 kilometara, na nadmorskoj visini iznad 430 m. Pretežni dio vode Gacka dobiva iz nekoliko krških izvora na istočnom rubu polja Gacka. Ovim

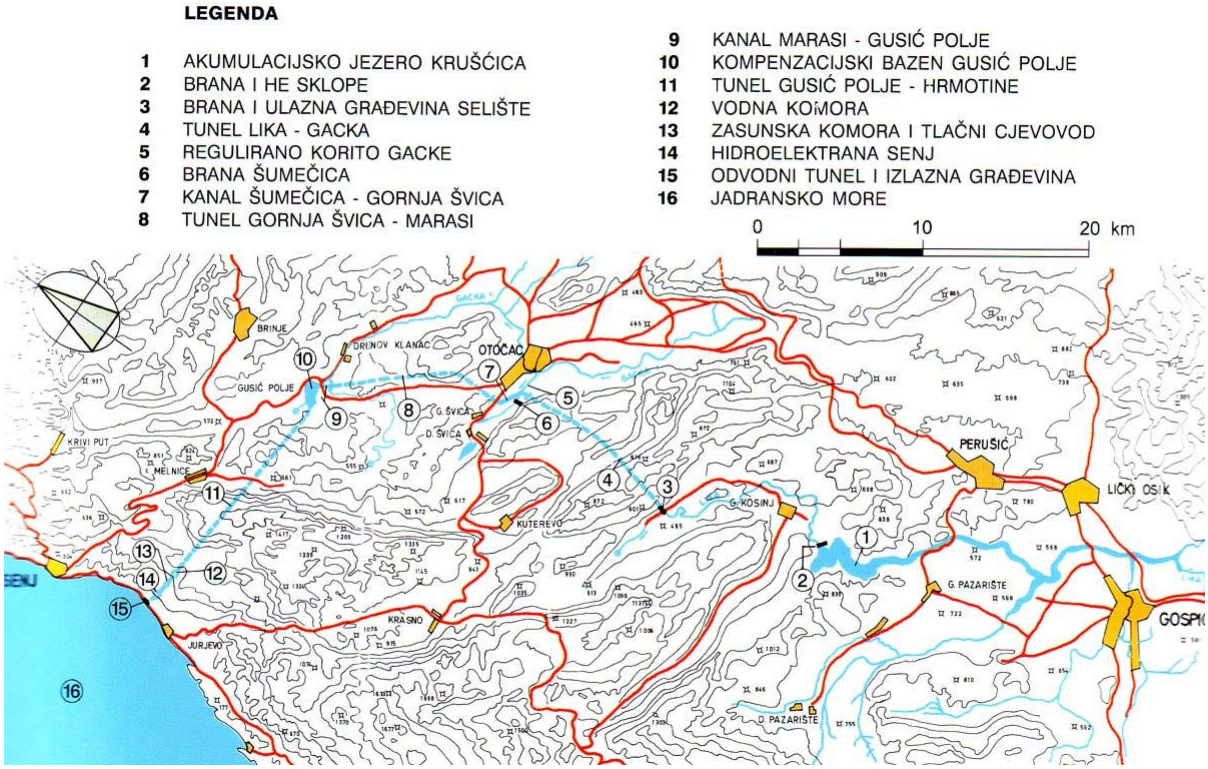
stalnim i izdašnim izvorima se drenira prostrano krško zaleđe s velikim podzemnim retencijama i akumulacijama te je zahvaljujući tome Gacka obilan vodotok s približnim omjerom protoka 1:4:27.

Osnovna koncepcija energetskog rješenja vodotoka Like i Gacke:

- u srednjem toku Like je izgrađena visoka pregrada sa što većim akumulacijskim jezerom radi što povoljnijeg izravnanja bujičnih voda Like uz eventualno energetsko iskorištavanje raspoloživog pada pribranskom hidroelektranom,
- izravnate vode Like prebačene tunelom u Gacku s nižom nadmorskom visinom uz eventualno iskorištenje raspoloživog pada,
- objedinjene vode Like i Gacke odvedene kanalima i tunelima prema jadranskoj obali u blizini Senja uz energetsko iskorištenje tih voda do površine mora na padu od preko 400 m.

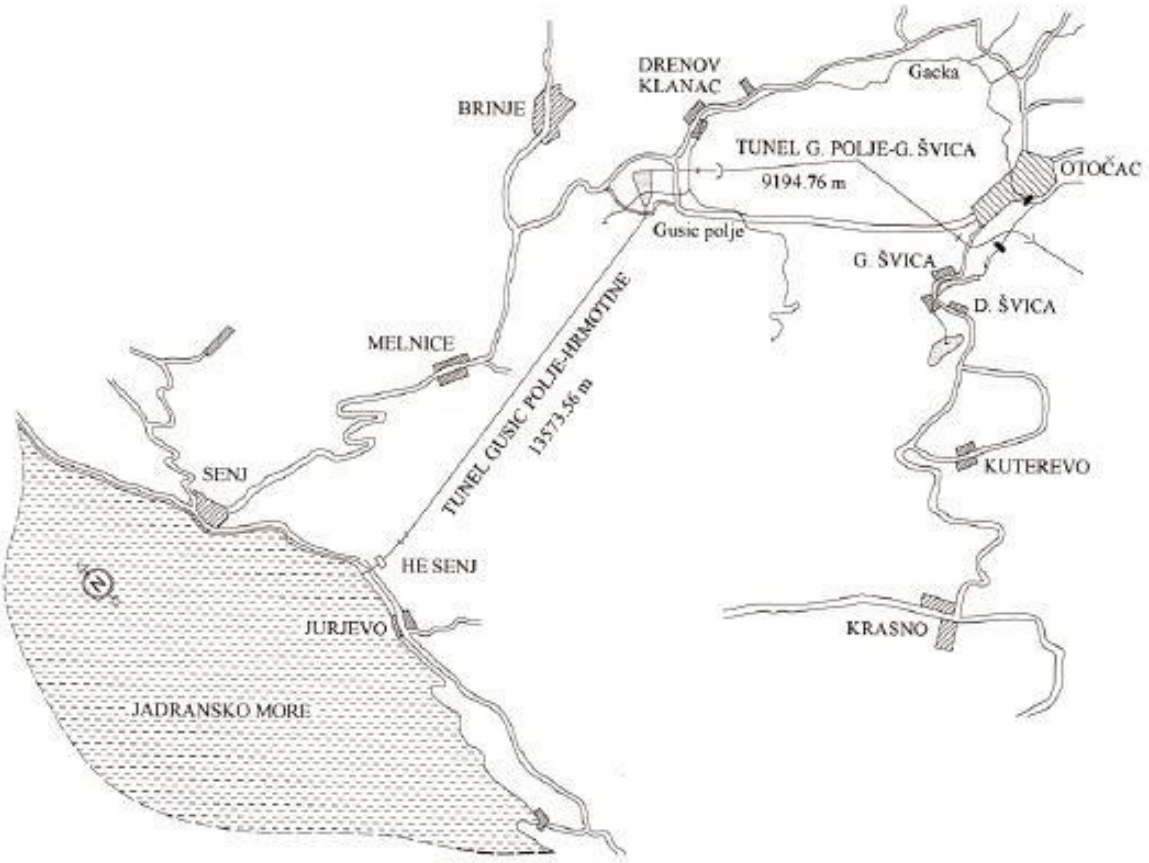
Energetski sustav Like i Gacke sastoji se od sljedećih objekata:

- nasute pregrade Sklope na Lici, visine oko 75 m, s pripadajućim akumulacijskim jezerom Krušćica ukupnog obujma 142 hm^3 (kubni hektometar)
- pribranske hidroelektrane Sklope s instaliranim protokom od 45 m^3/s, snagom 22 MW i proizvodnjom od 84 MWh/god,
- dovodnog tunela Lika-Gacka, duljine oko 10,5 km, sa zahvatom Like kod Donjeg Kosina i kanalom do Gacke,
- čvora Šumečica na Gackoj s pripadajućom regulacijom korita, branama Vivoze i Šumečica, te dovodnog kanala prema Donjoj Švici,
- dovodnog tunela Gornja Švica-Marasi, duljine preko 9 km sa ulaznim uređajem,
- dovodnog kanala Marasi-Gusić polje sa pripadajućim kompenzacijskim bazenom obujma 1,5 hm^3,
- glavnog dovodnog tunela Gusić polje – Hrmotine, duljine preko 13,5 km s ulaznim uređajem i vodostanom,
- čvora tlačnog voda i strojarnice Hidroelektrane Senj koji se sastoji od: zasunske komore, tlačnog cjevovoda, podzemne strojarnice i transformatorskog postrojenja, dovodnog i odvodnog tunela s izlaznom građevinom u more, kabelskog rova s vanjskim rasklopnim postrojenjem te vanjske komandne zgrade i radionice.



Slika 5.2. *Hidroenergetski sustav HE Senj* [26]

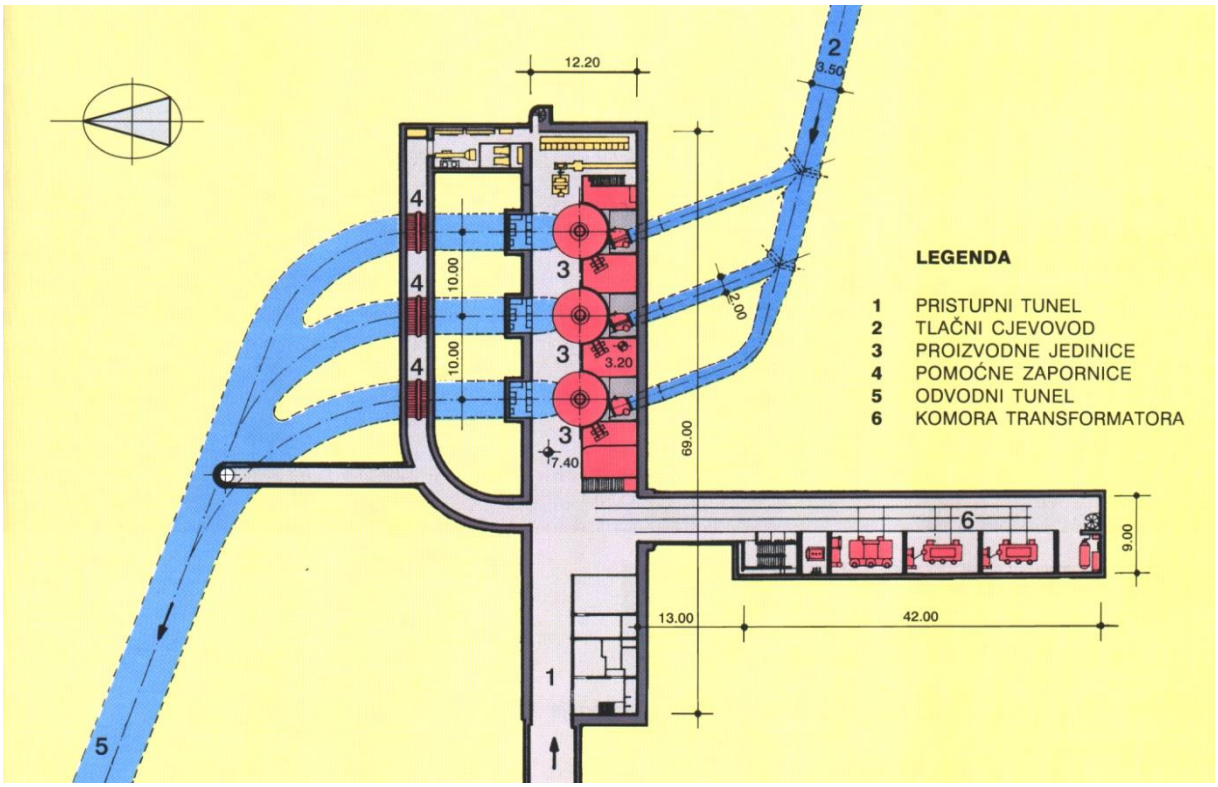
Svi navedeni objekti, osim HE Sklope, su izgrađeni kao sastavni dio objekta Hidroelektrane Senj, instaliranog protoka 60 m^3/s, snage 216 MW i proizvodnje 1080 GWh.



Slika 5.3. *Raspored objekata HE Senj* [26]

Od zasunske komore, pa do podzemne strojarnice izgrađen je jednostruki podzemni kosi čelični tlačni vod, s razdjelnim cjevovodom za tri turbine ispred strojarnice. Cjevovod je po čitavoj svojoj dužini betoniran. Tlačni cjevovod je bez razdjelnog dijela dug oko 614 m, izveden pod kutom od 43°, sa stupnjevanim promjerima: 4 m, 3,85 m, 3,7 m i 3,35 m, te donjeg koljena promjera 3,55 m.

Razdjelni cjevovod se sastoji od sabirnog dijela sa stupnjevanim promjerima: 3,55 m, 2,9 m i 2 m, tri račve promjera 2 m koje završavaju konusima 2 m/1,4 m za priključak kuglastih predturbinskih zatvarača.



Slika 5.4. *Tlocrt Hidroelektrane Senj* [26]

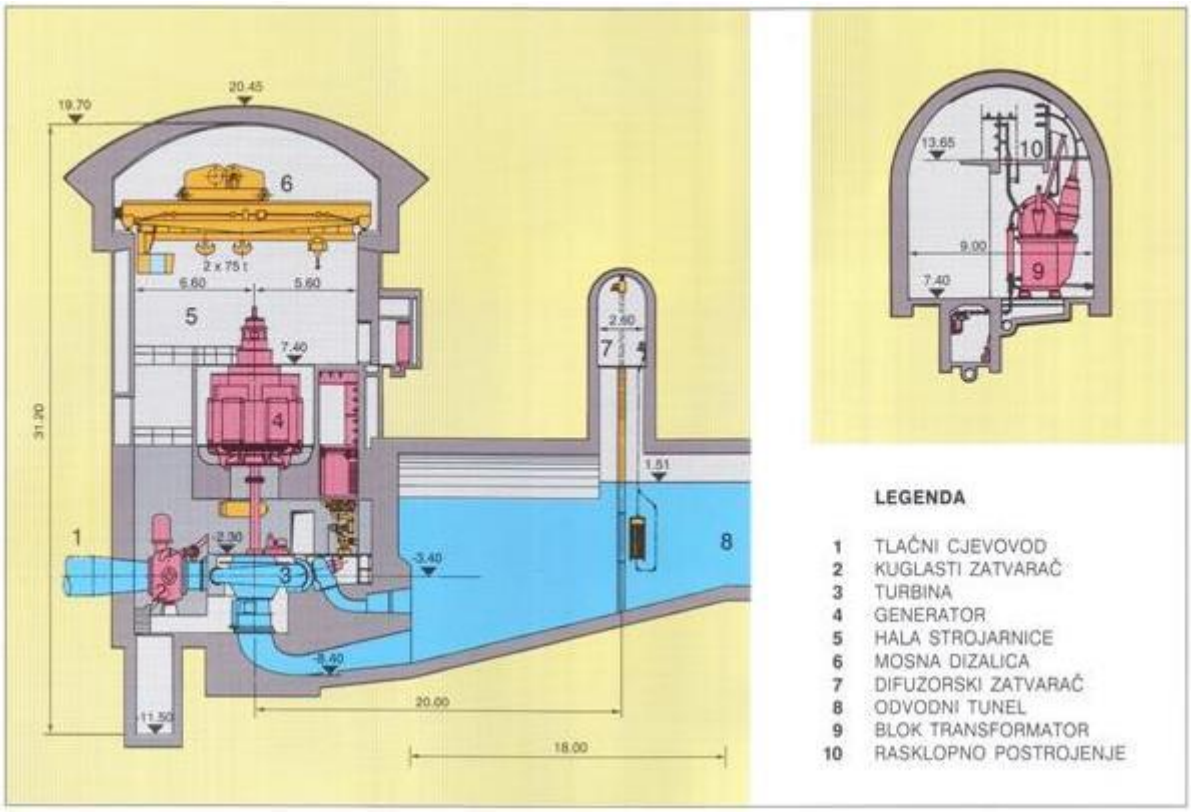
Ugrađene su tri vertikalne spiralne Francis turbine s kuglastim zatvaračima i sporednim ispustima. Turbine su proizvedene prema dokumentaciji „Ateliers des Charmilles Geneve“, u tvornici „Litostroj“, u Ljubljani.

Kod konstruktivnog pada od 410 m i nazivnog protoka od 20 m^3/s, svaka turbina razvija snagu od 72426 kW pri brzini vrtnje od 600 okretaja u minuti. Kod najvišeg neto pada od 434,2 m, turbina daje snagu od 75846 kW kod ograničene potrošnje od 19,6 m^3/s.
Radi razmjerno velike vrijednost produkta dužine cjevovoda i brzine vode u njemu, turbine su opremljene porednim ispustima (regulatorima pritiska), pa je porast pritiska mogao biti ograničen na 15% statičkog uz vrijeme zatvaranja turbine od svega 2,5 sekunde.
Prijelazno povećanje broja okretaja kod punog rasterećenja je 30% nazivnih. Ulazna brzina vode u spiralu iznosi 13 m/s. Usprkos velikoj snazi, turbine su malih dimenzija, tako da su razmaci agregata 10 m, a širina strojarnice 12,2 m.
Za pogonsku kontrolu protoka i potrošnje vode ugrađeni su mjerni uređaji s priključcima na spirali za mjerenje po relativnoj metodi Winter-Kennedy. Winter-Kennedy metoda je metoda testiranja indeksa koja pruža relativne vrijednosti hidraulične učinkovitosti mjerenjem

diferencijalnih tlakova u jednom ili dva para tlačnih ventila u radijalnim ravninama spiralnog kućišta.

Nazivni podaci turbina ugrađenih u HE Senj:

- vrsta turbine – Francis
- proizvođač – „Charmilles/Litostroj“
- promjer rotora na ulazu – 2170 mm
- promjer rotora na izlazu – 1460 mm
- promjer središta lopatica privodnog aparata – 2580 mm
- visina privodnog aparata – 180 mm
- broj lopatica rotora – 13
- broj lopatica privodnog aparata – 20
- nazivna brzina vrtnje – 600 okr/min
- komada – 3
- instalirani protok – $3 \cdot 20$ m^3/s
- instalirana snaga – $3 \cdot 72{,}5$ MW
- brzina vrtnje – 600 okr/min
- najveći koeficijent korisnosti – 89,8% - 90,9%
- neto pad H_n – 410 m
- maksimalni pad H_{max} – 434,2 m
- snaga turbine kod H_{max} i Q = 19,6 m^3/s – 75846 kW
- snaga turbine kod H_k i Q_n – 72426 kW
- brzina vrtnje pobjega – 1050 okr/min
- specifična brzina vrtnje – 88 okr/min



Slika 5.5. *Poprečni presjek strojarnice HE Senj* [26]

Simetralna ravnina spirale postavljena je na visinu -3,4 m, da bi se dobio potrebni protutlak i kod najnižeg vodostaja u odvodom kanalu na koji bitno utječu plima i oseka jer je odvod povezan s morem.

Snaga generatora određena je tako da je kao mjerodavna snaga uzeta ona koju razvijaju potpuno otvorene turbine kod neto pada koji nastaje prilikom normalnih srednjih vodostaja i zajedničkog rada svih turbina. Kod tih prilika uz odabrani faktor snage od 0,9 dobiva se za snagu generatora 80000 kVA. Uzevši u obzir konstruktivne zahtjeve koji diktiraju ekonomičnu konstrukciju te zahtjeve mreže u koju se uključuje elektrana, generatori su odabrani i izvedeni kao trofazni sinkroni s vertikalnim vratilom i sljedećim karakteristikama:

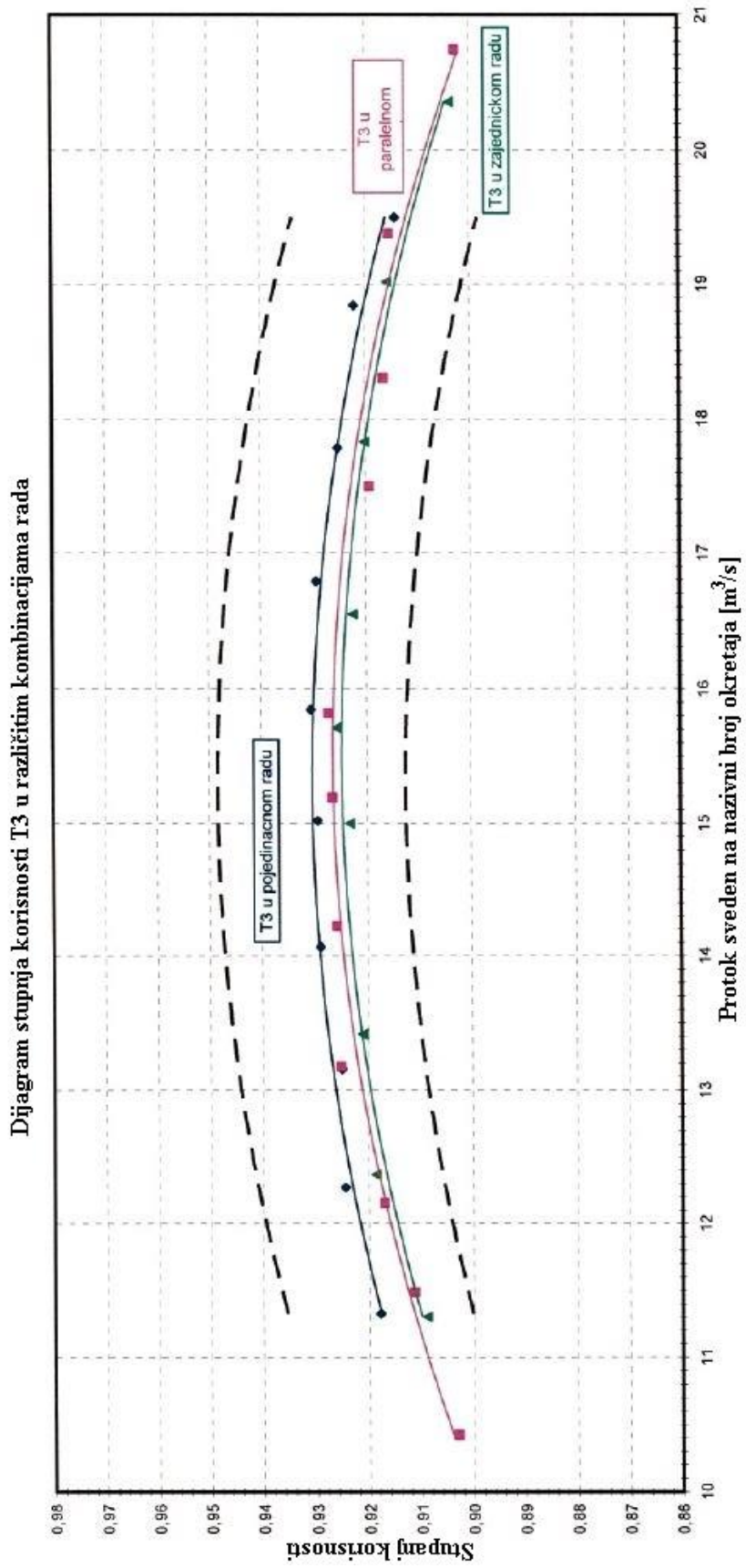
- nazivni napon – 10500 V
- dopuštena regulacija napona kod nazivne snage i faktora snage 0,9 - ±5%
- nazivna struja – 4400 A
- nazivni broj okretaja – 600 okr/min
- nazivna frekvencija – 50 Hz
- brzina vrtnje pobjega – 1050 okr/min

- zamašni moment – 400 tm^2
- stupnjevi djelovanja kod:
    - 100% tereta – 98,58 %
    - 75% tereta – 98,40 %
    - 50% tereta – 97,92 %
- izolacija – klasa B
- kratkospojni omjer – 1:1

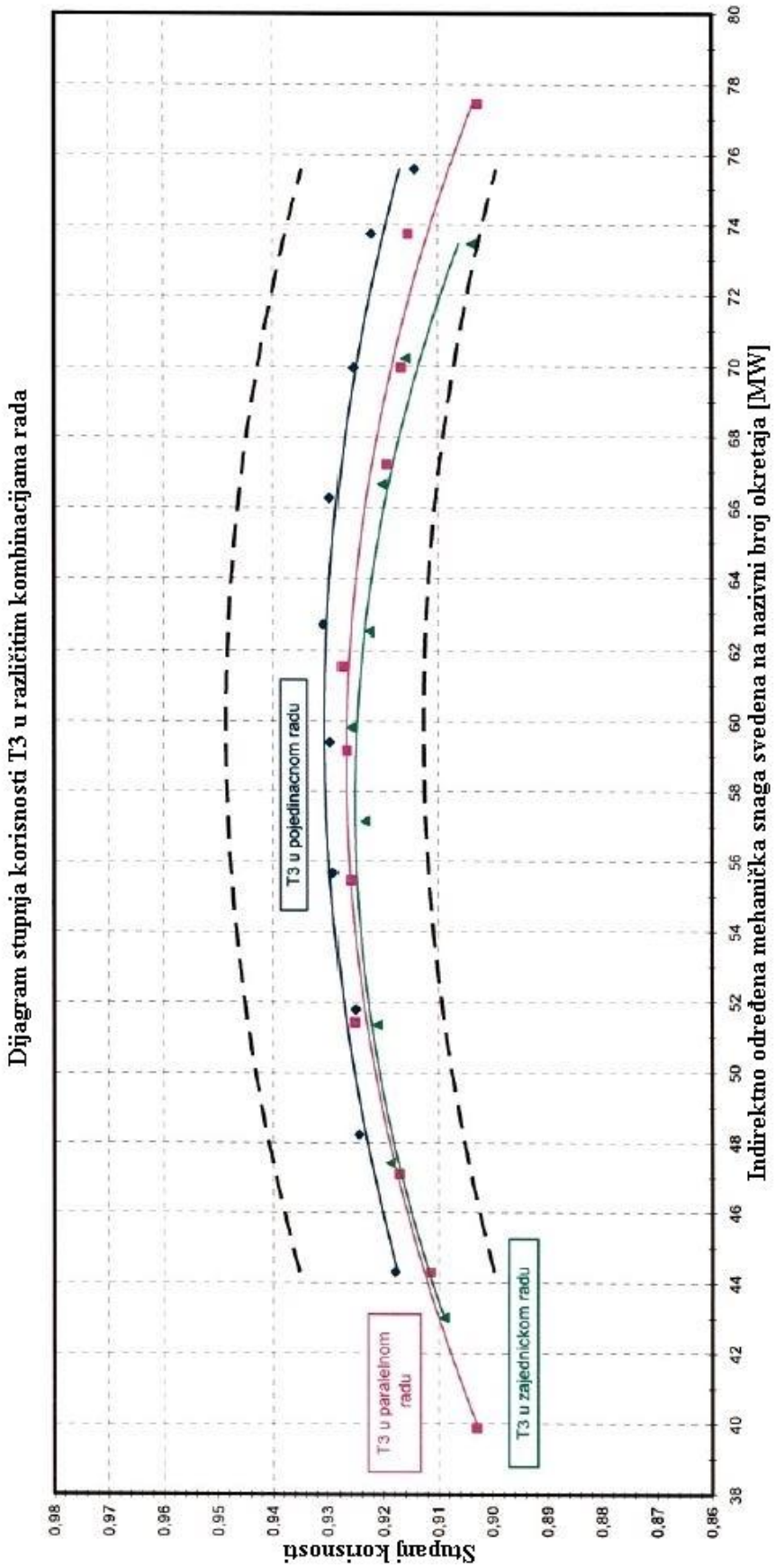
Generator je opremljen potrebnom opremom za hlađenje, mjerenje i kontrolu. U gornjoj zvijezdi je ugrađen kombinirani vodeći i noseći ležaj. Potrošnja rashladne vode iznosi 17 m^3/s, a sustav hlađenja izveden je zatvorenog tipa. Generatori su ugrađeni u podzemnoj strojarnici tako da im je gornji križni nosač ispod glavne kote poda strojarnice, iznad koje se nalaze samo glavna budilica i regulatorski generator. Promjer jame u koju je smješten generator iznosi 6400 mm, a visina je 4100 mm, dok je visina generatora iznad poda strojarnice 2970 mm.

5.1. Mjerenje energetskih karakteristika Hidroelektrane Senj

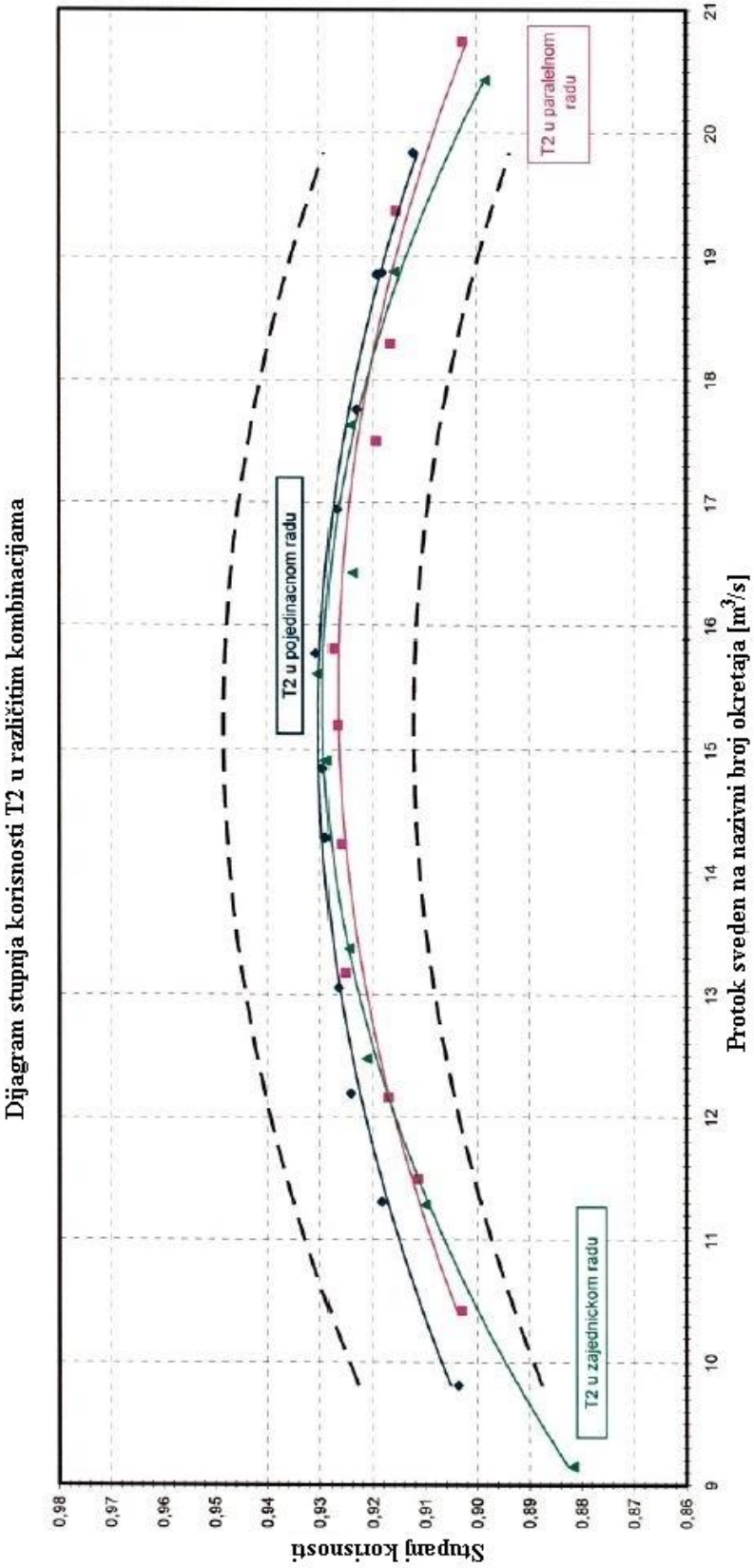
Stupanj korisnosti turbina određen je na osnovu indirektno određene snage što je u skladu s preporukama IEC-a 60041. Dobiveni rezultati ispitivanja i proračuna stupnja korisnosti agregata A3 i A2 u raznim kombinacijama rada u velikoj se mjeri podudaraju, kako u dobivenim iznosima tako i po karakteru krivulja stupnja korisnosti.



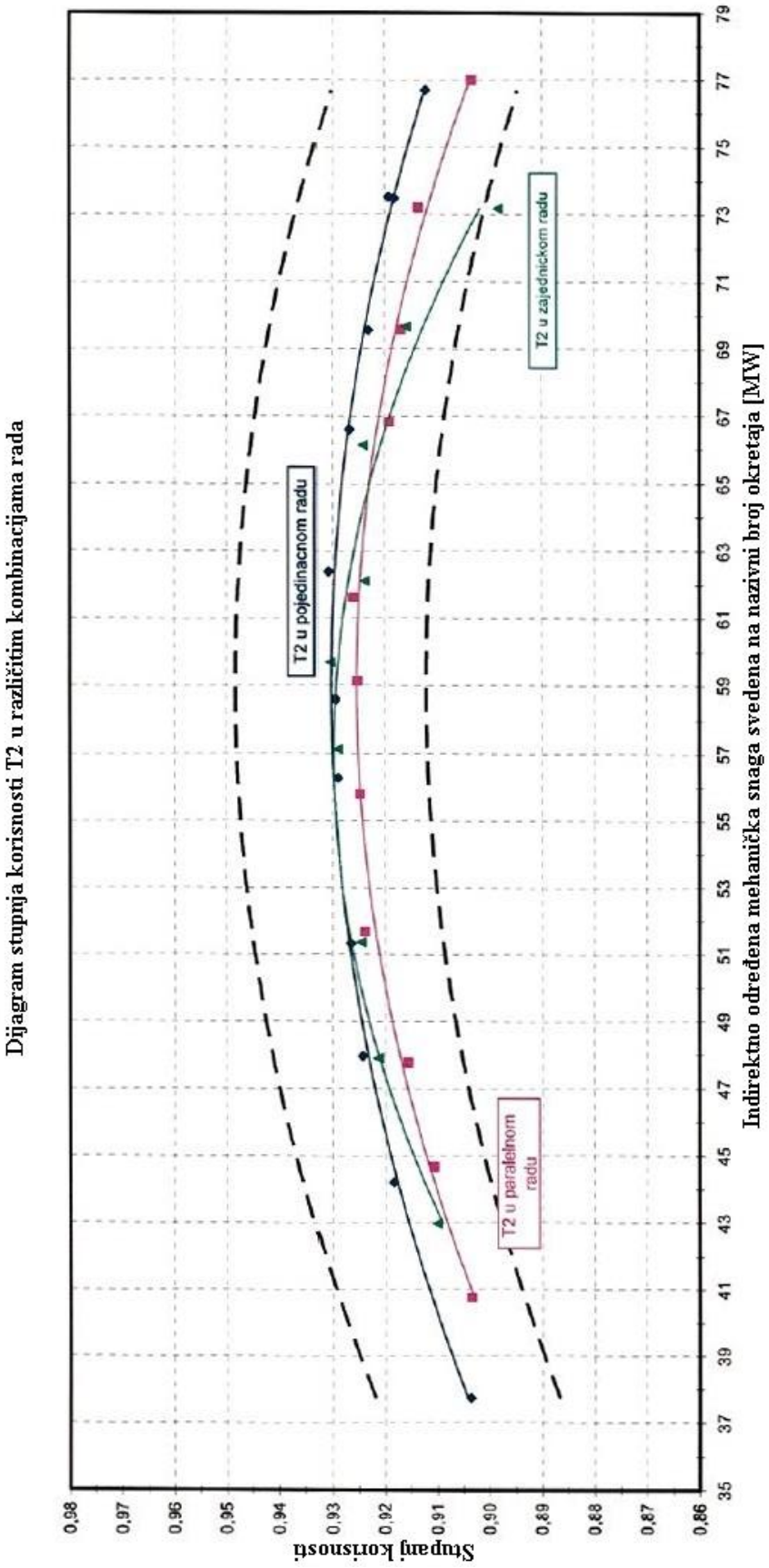
Slika 5.6. *Dijagram ovisnosti stupnja korisnosti o brzini protoka za turbinu T3 pri različitim kombinacijama rada s pojasom pouzdanosti za pojedinačni rad agregata* [26]



Slika 5.7. *Dijagram ovisnosti stupnja korisnosti o mehaničkoj snazi za turbinu T3 pri različitim kombinacijama rada s pojasom pouzdanosti za pojedinačni rad agregata* [26]



Slika 5.8. *Dijagram ovisnosti stupnja korisnosti o brzini protoka za turbinu T2 pri različitim kombinacijama rada s pojasom pouzdanosti za pojedinačni rad agregata* [26]



Slika 5.9. *Dijagram ovisnosti stupnja korisnosti o mehaničkoj snazi za turbinu T2 pri različitim kombinacijama rada s pojasom pouzdanosti za pojedinačni rad agregata* [26]

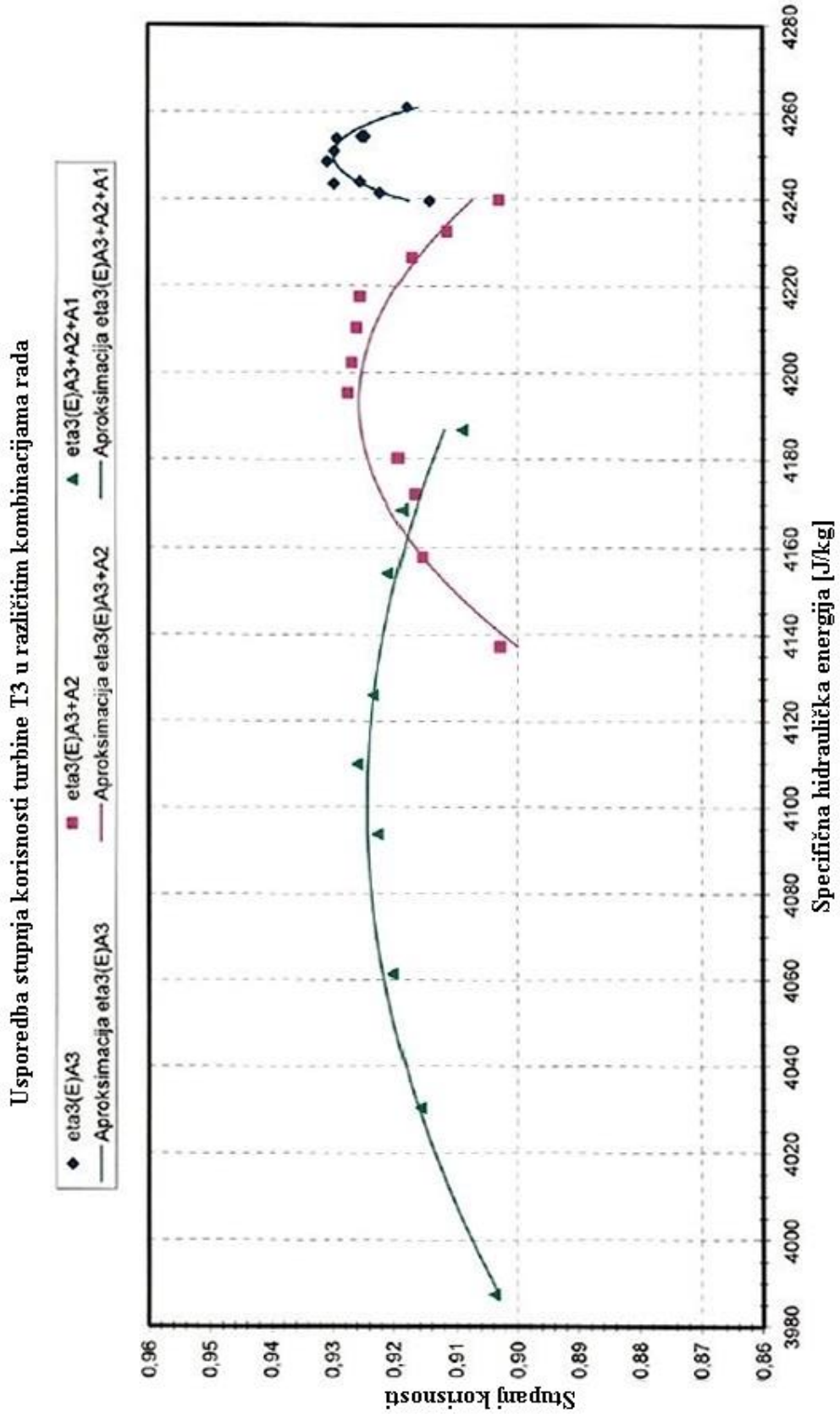
Usporedba izmjerenog stupnja korisnosti agregata A3 pokazuje da je njegov iznos najveći prilikom pojedinačnog rada i lagano pada u paralelnom i zajedničkom radu. Razlika je vrlo mala i nalazi se unutar pojasa greške mjerenja. Maksimalni je stupanj korisnosti u pojedinačnom radu izmjeren pri nešto manjem protoku nego u paralelnom i zajedničkom radu (slika 5.6.). Ista se situacija ponavlja prilikom usporedbe u odnosu na izmjerenu snagu generatora (slika 5.7.) .

Usporedba izmjerenog stupnja korisnosti agregata A2 pokazuje da je njegov iznos najveći prilikom pojedinačnog rada, nešto je niži u paralelnom, da bi u zajedničkom radu bio gotovo identičan onome u pojedinačnom radu za protoke veće od 15 m^3/s. Maksimalni stupanj korisnosti u pojedinačnom radu izmjeren je pri nešto manjem protoku nego u paralelnom i zajedničkom radu (slika 5.8.). Ista se situacija ponavlja prilikom usporedbe u odnosu na izmjerenu snagu generatora (slika 5.9.).

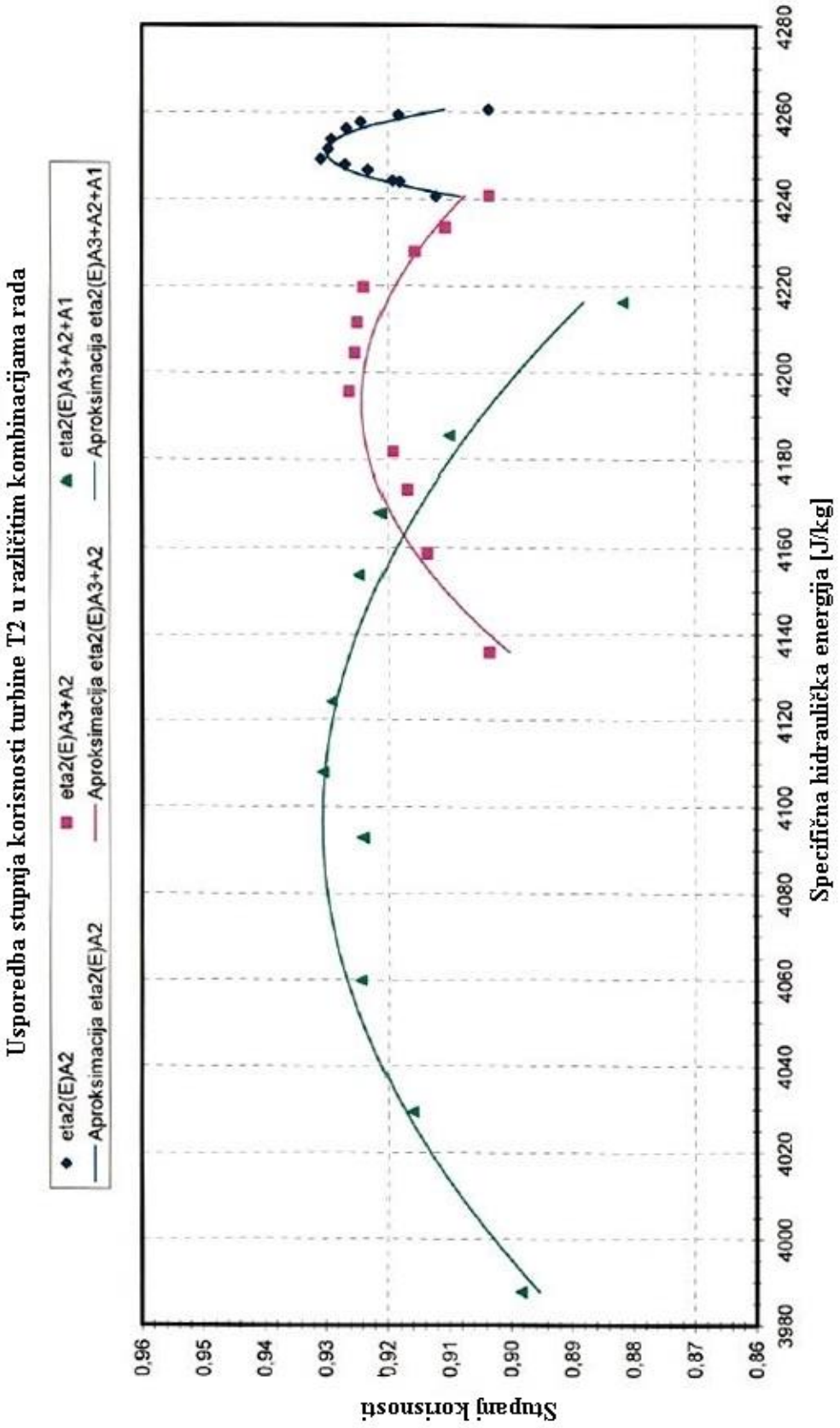
Usporedba sa prije izmjerenim vrijednostima pokazuje da su turbinska kola u vrlo dobrom stanju. Analiza rezultata mjerenja na agregatu A1 u njegovom pojedinačnom radu nije provedena pošto ispitivanjem nisu dobiveni pouzdani podaci.

Krivulje snage turbina kod rada agregata u pojedinačnom radu male su zakrivljenosti, praktički ravne tako da i kod najvećih izmjerenih protoka ne pokazuju znakove zasićenosti. Situacija je slična i kod rada agregata u paralelnom i zajedničkom radu s tom razlikom što su krivulje nešto položenije. Obzirom na izmjerene vrijednosti protoka nije bilo realno očekivati da će krivulje pokazati vidljivije znakove zasićenosti.

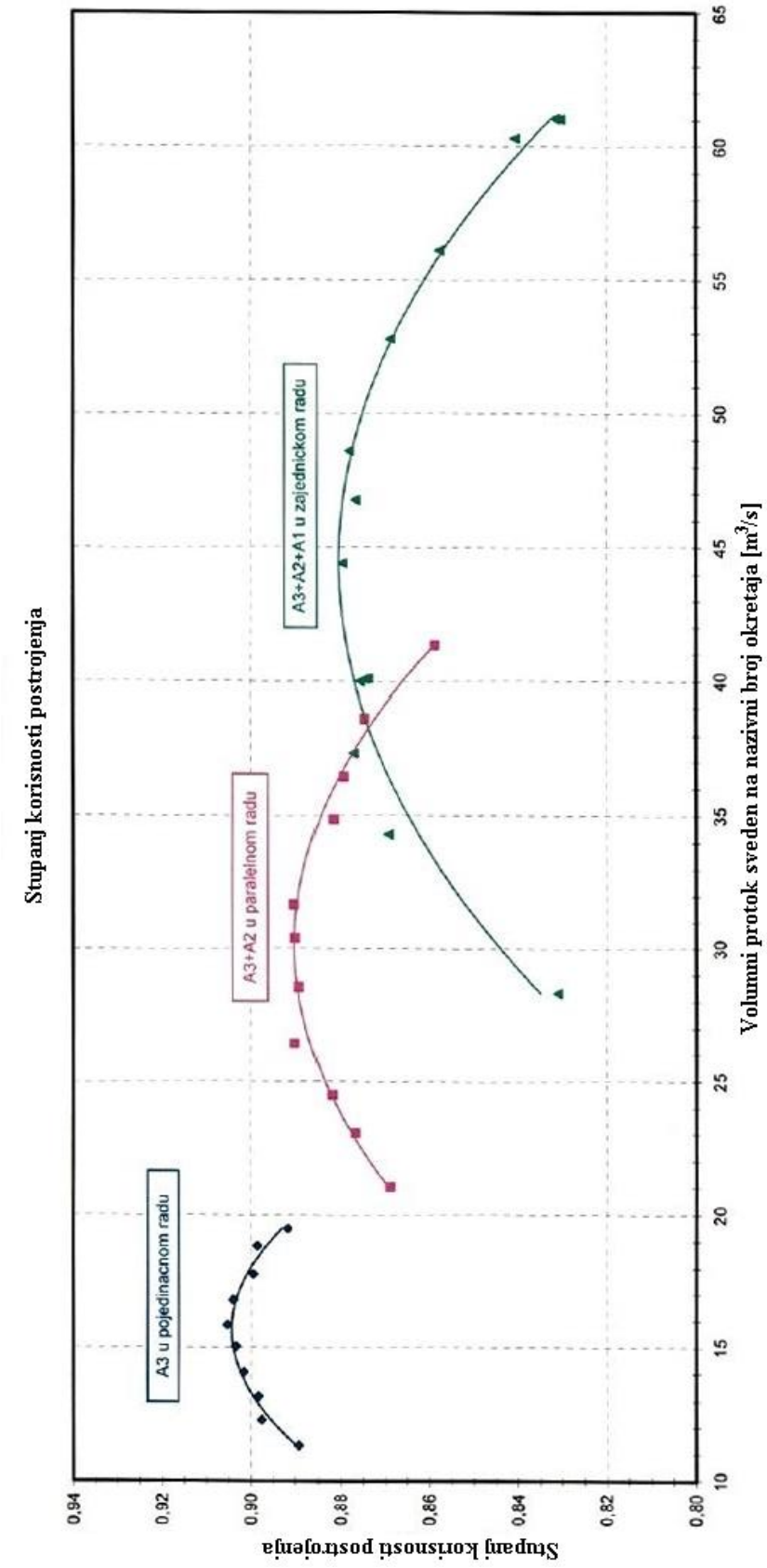
Dobiveni rezultati stupnja korisnosti postrojenja u raznim kombinacijama rada predstavljaju osnovu za prosudbu cjelokupnog energetskog sustava. Kao što je iz dobivenih rezultata vidljivo najveći stupanj korisnosti postrojenje postiže pri istim vrijednostima protoka i električne snage kod kojih i agregati postižu svoj maksimum, samo što je iznos manji za 2% u pojedinačnom, 3,9% u paralelnom, odnosno 5,3% u zajedničkom radu agregata. Stupanj se korisnosti postrojenja pri postavljenim snagama na generatoru iznad 60 MW pri pojedinačnom, odnosno 55 MW po agregatu u paralelnom i zajedničkom radu smanjuje, pri čemu je manji za 2% u pojedinačnom, 3% u paralelnom i 4% u zajedničkom radu kod najveće izmjerene snage u odnosu na svoj optimum.



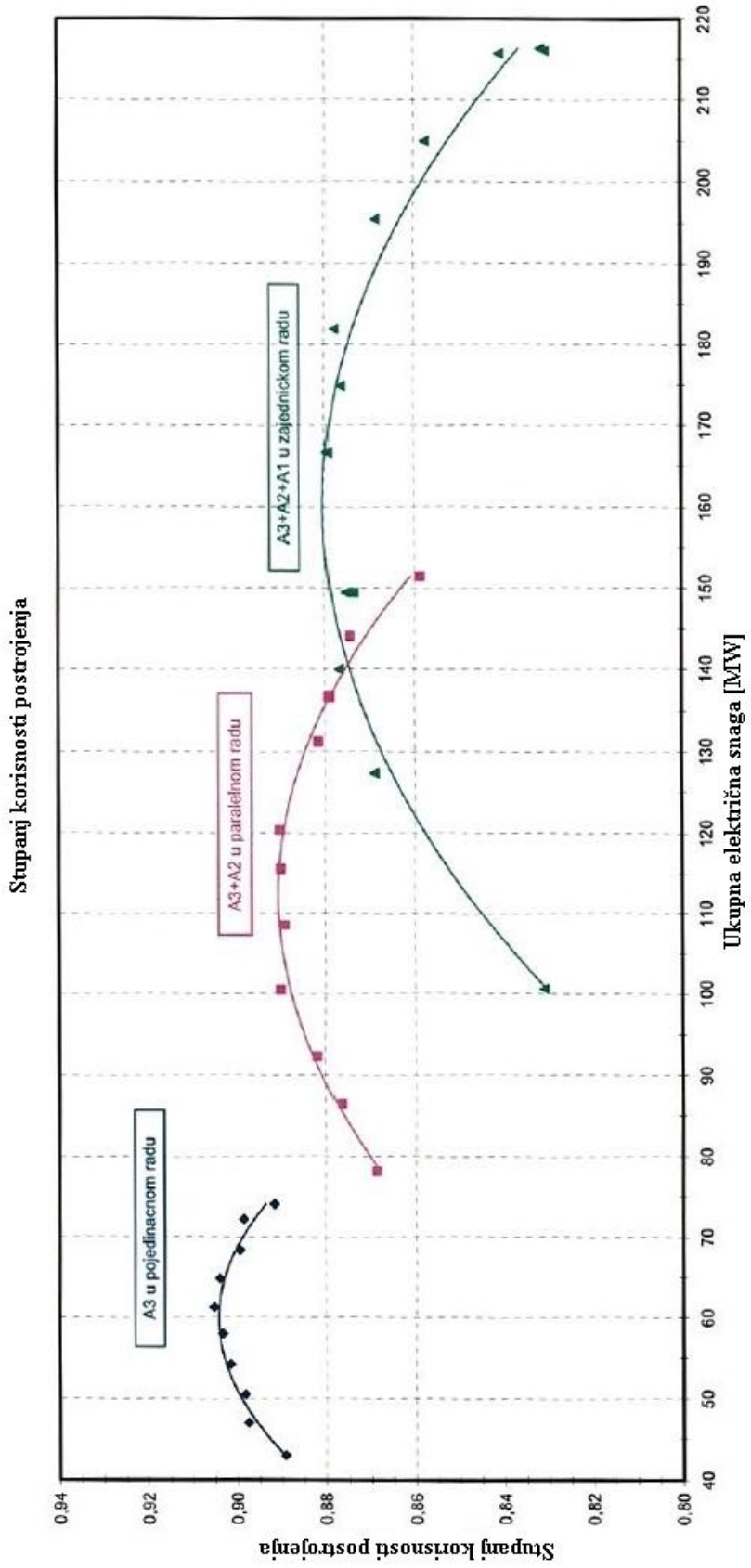
Slika 5.10. *Dijagram ovisnosti stupnja korisnosti T3 o specifičnoj hidrauličkoj energiji agregata A3 u različitim kombinacijama rada* [26]



Slika 5.11. *Dijagram ovisnosti stupnja korisnosti T2 o specifičnoj hidrauličkoj energiji agregata A2 u različitim kombinacijama rada* [26]



Slika 5.12. *Usporedni dijagram ovisnosti stupnja korisnosti postrojenja o protoku svedenom na nazivni broj okretaja za različite kombinacije rada* [26]



Slika 5.13. *Usporedni dijagram ovisnosti stupnja korisnosti postrojenja o električnoj snazi za različite kombinacije rada* [26]

Kada se radi o pojedinačnom radu agregata, najveći stupanj korisnosti turbine postižu pri protocima koji se nalaze u području od 15,2 m^3/s do 15,5 m^3/s (slika 5.12.), odnosno pri snagama na generatoru od 59 MW do 60 MW (slika 5.13.).

Praktički ne postoje razlike u rezultatima mjerenja stupnja korisnosti turbina T3 i T2, koji u području optimalnog rada agregata iznosi 93% (slike 5.10. i 5.11.).

Pri paralelnom radu agregata (A3 + A2), oba agregata postižu približno iste stupnjeve korisnosti pri čemu treba imati na umu da je protok kroz T2 određen relativnom metodom Winter-Kennedy. Stupanj korisnosti u paralelnom radu pri maksimalnom protoku od 30 m^3/s, iznosi 89% (slika 5.12.), a isti stupanj korisnosti je pri ukupnoj električnoj snazi od 112 MW (slika 5.13.). Maksimalni stupnjevi korisnosti u paralelnom radu agregata postignuti su pri specifičnoj hidrauličkoj energiji 4195 J/kg, a iznose 92,7% za A3 (slika 5.10.), odnosno 92,6% za agregat A2 (slika 5.11.).

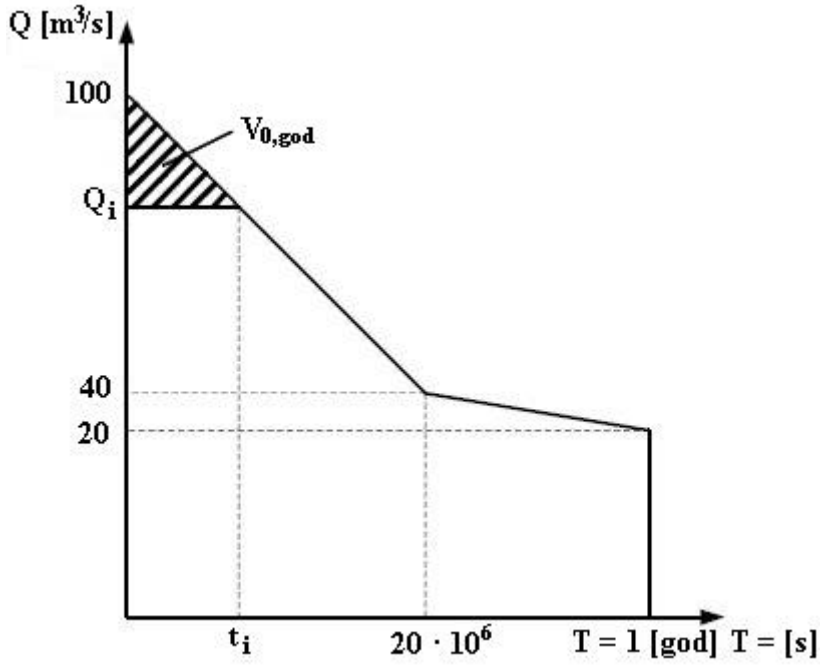
Specifična hidraulička energija hidroelektrane je količina potencijalne i kinetičke energije koju 1 kilogram vode isporučuje pri prolasku kroz postrojenje od gornjeg do donjeg spremnika.

Pri zajedničkom radu sva tri agregata (A3 + A2 + A1), stupanj korisnosti pri maksimalnom protoku od 45 m^3/s, iznosi 88% (slika 5.12.), a isti stupanj korisnosti je pri ukupnoj električnoj snazi od 160 MW (slika 5.13.).

Maksimalni stupanj korisnosti agregata A3 pri zajedničkom radu iznosi 92,6% (slika 5.10.), i najmanji je izmjereni u usporedbi sa ostalim načinima rada, dok je maksimalni stupanj korisnosti agregata A2 u zajedničkom radu 92,9% (slika 5.11.), i identičan je onome određenom prilikom pojedinačnog rada agregata.

5.2. Primjer proračuna odabira turbine

Godišnja krivulja trajanja dotoka vode hidroelektrane prikazana je slikom. Zbog ograničenja veličine izgradnje, za proizvodnju se ne može iskoristiti $V_{0god} = 1{,}667 \cdot 10^8$ *[*m^3*]. Ako hidroelektrana ima približno konstantni neto pad od* $H_n = 410$ *m i korisnosti* $\eta = 88\%$*, odrediti: instaliranu snagu, srednji protok, srednju snagu, broj turbina, snagu i tip turbina, te broj okretaja.*



Slika 5.14. *Aproksimirana krivulja trajanja protoka* [27]

Parametri zadatka:

- instalirani protok $Q_i = 60\ m^3/s$
- minimalni protok $Q_{min} = 20\ m^3/s$
- neto pad $H_n = 410$ m
- stupanj korisnosti $\eta = 88\%$
- vrijeme $t_1 = 20 \cdot 10^6$ s
- $T_{god} = 31.54 \cdot 10^6$ s

S obzirom da je poznat instalirani protok hidroelektrane može se izračunati instalirana snaga:

$$P_i = 9{,}81 \cdot Q_i \cdot H_n \cdot \eta \tag{5-1}$$

$$P_i = 9{,}81 \cdot 60 \cdot 410 \cdot 0{,}88 = 212{,}36\ MW$$

Srednji protok Q_{sr} se računa pomoću zadane krivulje trajanja protoka (slika 5.14), tako da se računaju površine, odnosno protok u ovisnosti o vremenu. Prvo je potrebno izračunati vrijeme t_i.

$$V_{0,god} = \frac{(100 \cdot Q_i) \cdot t_i}{2} \tag{5-2}$$

$$\frac{100-60}{t_i} = \frac{100-40}{20 \cdot 10^6}$$

$$t_i = \frac{40}{3 \cdot 10^{-6}} = 13{,}33 \cdot 10^6 s$$

$$V_1 = (60-40) \cdot 13{,}33 \cdot 10^6 + \frac{(20 \cdot 10^6 - 13{,}33 \cdot 10^6) \cdot (60-40)}{2} = 333{,}3 \cdot 10^6\ m^3$$

$$V_2 = (40-20) \cdot 20 \cdot 10^6 + \frac{(31{,}54 \cdot 10^6 - 20 \cdot 10^6) \cdot (40-20)}{2} = 515{,}36 \cdot 10^6\ m^3$$

$$V_3 = 31{,}54 \cdot 10^6 \cdot 20 = 630{,}72 \cdot 10^6$$

$$Q_{sr} = \frac{V_1+V_2+V_3}{31{,}54 \cdot 10^6} \quad (5\text{-}3)$$

$$Q_{sr} = \frac{333{,}33 \cdot 10^6 + 515{,}36 \cdot 10^6 + 630{,}72 \cdot 10^6}{31{,}54 \cdot 10^6} = 46{,}91\ m^3/s$$

Nakon što je izračunat srednji protok, može se izračunati srednja snaga:

$$P_{SR} = 9{,}81 \cdot Q_{sr} \cdot H_n \cdot \eta \quad (5\text{-}4)$$

$$P_{SR} = 9{,}81 \cdot 46{,}91 \cdot 410 \cdot 0{,}88 = 166 \text{ MW}$$

Broj turbina se izračuna tako da se podijeli instalirani protok s minimalnim protokom:

$$n_T = \frac{Q_i}{Q_{min}} \quad (5\text{-}5)$$

$$n_T = \frac{60}{30} = 3$$

Kada je poznat broj turbina, može se izračunati snaga pojedine turbine:

$$P_T = \frac{P_{max}}{n_T} \tag{5-6}$$

$$P_T = \frac{212,36}{3} = 70,78\ MW \quad \rightarrow \quad P_T = 70\ MW$$

Slijedi odabir turbine prema neto padu – Peltonova turbina s dvije mlaznice

Vrste turbina	n_s min min^{-1}	$n_{s\,max}$ min^{-1}	$H_{n\,max}$ (m)	$H_{n\,min}$ (m)
Peltonova turbina s 1 mlaznicom	4	30	1800	300
Peltonova turbina s 2 mlaznice	25	50	800	100
Peltonova turbina s 4 mlaznice	50	72	400	100
Francisova vrlo sporohodna	55	70	400	200
Francisova sporohodna	70	120	200	100
Francisova normalna	120	200	100	50
Francisova brzohodna	200	300	50	25
Francisova ekspresna	300	500	25	15
Propelerna turbina	400	700	25	10
Kaplanova sporohodna	320	500	80	20
Kaplanova normalna	500	700	20	14
Kaplanova brzohodna	700	850	14	10
Kaplanova ekspresna	850	1000	10	5

Tablica 5.1. *Specifični broj okretaja hidrauličnih turbina i neto padovi*

Parametri odabira turbine:

- specifične brzine vrtnje - $n_{s1} = 25$ okr/min, $n_{s2} = 50$ okr/min
- neto pad – $H_{n1} = 800$ m, $H_{n2} = 100$ m

Specifična brzina vrtnje iznosi:

$$n_s = n_{s1} + \frac{n_{s2} - n_{s1}}{H_{n2} - H_{n1}} \cdot (H_n - H_{n1}) \tag{5-7}$$

$$n_s = 25 + \frac{50 - 25}{100 - 800} \cdot (410 - 800) = 38,92\ okr/min$$

Brzina vrtnje iznosi:

$$n = n_s \cdot \frac{H_n \cdot \sqrt[4]{H_n}}{\sqrt{P_T} \cdot 1{,}16} \tag{5-8}$$

$$n = 38{,}92 \cdot \frac{410 \cdot \sqrt[4]{410}}{\sqrt{70780} \cdot 1{,}16} = 232{,}16 \text{ okr/min}$$

Nakon što je izračunata brzina vrtnje, prema tablici standardnih vrijednosti brzina hidrogeneratora, odabire se generator s najbližim brojem okretaja od 250 okr/min, te se računa nova specifična brzina vrtnje.

Broj pari polova	12	14	16	18	20	24	30	34
Broj okretaja	250	214,3	187,5	166,7	150	125	100	88,2

Tablica 5.2. *Standardne vrijednosti brzina hidrogeneratora*

$$n_s = n \cdot \frac{1{,}16 \cdot \sqrt{P_T}}{H_n \cdot \sqrt[4]{H_n}} \tag{5-9}$$

$$n_s = 250 \cdot \frac{1{,}16 \cdot \sqrt{70780}}{410 \cdot \sqrt[4]{410}} = 41{,}91 \text{ okr/min}$$

$$25 < 41{,}91 < 50 \text{ okr/min}$$

Broj okretaja se nalazi unutar granica za Peltonovu turbinu.

6. ZAKLJUČAK

Hidroelektrane su postrojenja u kojem se proizvodi električna energija na način da se potencijalna energija vode pretvara u kinetičku energiju njenog strujanja, zatim u mehaničku energiju vrtnje turbine te na kraju u električnu energiju u generatoru. Iskorištavanje potencijalne energije vode otežavaju brojna tehnička i prirodna ograničenja kao što su raspolaganje količinama vode u vodotocima te iskorištavanjem tih voda. Hidroelektrane se mogu podijeliti prema različitim kriterijima: prema instaliranoj snazi, prema smještaju strojarnice, prema volumenu akumulacijskog bazena te prema padu. Komponente hidroelektrane su: brana, zahvat, dovod vode, vodna komora, tlačni cjevovod, strojarnica, rasklopno postrojenje te odvodni sustav. Jedna od najvažnijih komponenata hidroelektrane je sinkroni generator u kojem se mehanička energija turbine pretvara u električnu energiju. Sinkroni generator se može podijeliti prema vrsti pogona, brzini vrtnje te prema izvedbi rotora. Sinkroni generator može raditi u različitim pogonskim stanjima od kojih su krajnja stanja: otočni rad (sinkroni stroj napaja samo vlastita trošila, odnosno radi na vlastitoj mreži, primjenjuje se za opskrbu električnom energijom malog broja trošila i kada treba povećati sigurnost opskrbe u slučaju ispada glavnog energetskog sustava), te paralelni rad (velika mreža s puno priključenih generatora koja ima konstantan napon i frekvenciju, mreže većih snaga na koje pojedini generatori ili elektrane nemaju velik utjecaj).
Osnovna energetska karakteristika hidroelektrane je instalirana snaga koja je zapravo nazivna snaga elektrane i definirana je kao aritmetički zbroj nazivnih snaga generatora, odnosno pogonskih strojeva (vodnih turbina). Za energetske analize potrebno je poznavati i druge karakteristike kao što su: maksimalna i raspoloživa snaga, stupanj djelovanja turbine i generatora (pri optimalnom opterećenju i do 90%), veličina izgradnje, moguća godišnja proizvodnja itd.
Energetske karakteristike hidroelektrana se razmatraju da bi se odredila optimalna raspodjela opterećenja između agregata. Određivanje energetskih karakteristika hidroelektrana nije jednostavno jer korisnost vodnih turbina ovisi o padu vode koji je promjenjiv te zbog gubitaka u dovodu i odvodu vode, no odabirom agregata jednakih karakteristika u praksi su prilike jednostavnije jer je raspodjela opterećenja među njima unaprijed poznata.

Literatura

[1] https://www.slideshare.net/hussanara/working-of-hydroelectric-power-plant, 17.03.2017.

[2] http://www.eps.rs/Lat/Gallery.aspx?Album=18 17.03.2017.

[3] http://www.hse.si/si/druzbe-hse/druzbe-v-sloveniji/dem/album-fotografij-dem 17.03.2017.

[4]https://www.grad.unizg.hr/_download/repository/3_KVS_koristenjevodnih_snaga[1].pdf 20.03.2017.

[5] http://www.constructionglobal.com/major-projects/building-three-gorges-dam-0 20.03.2017.

[6]https://hr.wikipedia.org/wiki/Mikro_hidroelektrana_Matakovi%C4%87#/media/File:MHE_Matakovi%C4%87_1.jpg

[7] http://www.nevworldwonders.com/2013/09/preview-hoover-dam.html 25.03.2017.

[8] http://diyocio.weebly.com/ingenieria/category/recopilatorio-hidro 25.03.2017.

[9]http://hydro-hit.si/en/projects/new_construction_projects/2/shpp_voljevac_bosnia_and_herzegovina/ 27.03.2017.

[10]http://www.hydrolink.cz/en/pelton-turbines/hhp-h-type-horizontal-compact-pelton-turbine-4.html 27.03.2017.

[11] https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/EEPE_2010_2011_AM.pdf 04.04.2017.

[12] http://www.slideshare.net/IrmaKajd/meuinduktivitet-i-zrani-transformatori-slike 04.04.2017

[13] I. Mandić, V. Tomljenović, M. Pužar, Sinkroni i asinkroni električni strojevi, udžbenik, Tehničko veleučilište u Zagrebu, Zagreb, 2012.g.

[14] V. Skočilić, Električni strojevi, priručnik, vlastita naklada, Novi Vinodolski, 2012.g.

[15] L. Ujević, Z. Buntić, Elektrane, Školska knjiga, Zagreb, 1993.g.

[16] R. Wolf, Ispitivanje električnih strojeva 2. Dio, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 1970.g.

[17] http://www.aes.hr/_download/repository/EEPE_10_SG2.pdf 15.05.2017.

[18] http://documents.tips/documents/sinkroni-strojgenerator-fer.html 20.05.2017.

[19] L. Jozsa, Energetski procesi i elektrane, skripta, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Elektrotehnički fakultet, Osijek, 2008.g.

[20]https://www.scribd.com/document/64149799/Elektrane-i-Elektroenergetski-Sistemi 20.05.2017.

[21] https://www.hops.hr/wps/portal/hr/web/hees/dijagram/dnevni 11.07.2017.

[22] https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/Elektrane_02%5B1%5D.pdf 10.06.2017.

[23] H. Požar, Snaga i energija u elektroenergetskim sistemima, Prvi svezak, Informator, Zagreb, 1983.g.

[24] http://slidegur.com/doc/201617/hidroelektrane 12.06.2017.

[25] D. Pintarić, Linearni regulatori, Sveučilište u Zagrebu, FER, Zagreb, 2013.

[26] Pogonska dokumentacija Hidroelektrane Senj, HEP d.o.o, Zagreb

[27] Elektrane i EES, Auditorne vježbe, Stručni studij 2009./2010., Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, Osijek

[28] http://www.electricaleasy.com/2015/09/hydroelectric-power-plant-layout.html 20.06.2017.

[29] http://www.cbr.washington.edu/hydro/chiefjoseph 05.07.2017.

Sažetak

Hidroelektrana je postrojenje u kojem se potencijalna energija vode pretvara u kinetičku energiju njenog strujanja, potom u mehaničku energiju vrtnje vratila turbine te konačno u električnu energiju u sinkronom generatoru. Sinkroni generator pretvara mehaničku energiju turbine u električnu energiju. Pogonska stanja sinkronog generatora su prazni hod, opterećenje, kratki spoj, te krajnja stanja otočni rad (rad na vlastitoj mreži, napajanje samo vlastitih trošila), i paralelni rad (više paralelno spojenih generatora koji imaju konstantan napon i frekvenciju). Da bi napon i frekvencija bili konstanti potrebno je regulirati uzbudnu struju i brzinu vrtnje turbine. Za paralelno priključivanje sinkronog generatora na mrežu potrebno je provesti postupak sinkronizacije za koji je potrebno zadovoljiti sljedeće uvjete: redoslijed faza generatora i mreže mora biti jednak, iznosi napona, frekvencije i fazni kutovi napona generatora i mreže moraju biti jednaki. Energetske karakteristike hidroelektrane su: instalirana snaga, maksimalna snaga, raspoloživa snaga, stupanj djelovanja turbine i generatora, moguća godišnja proizvodnja itd. Te karakteristike se razmatraju da bi se odredila optimalna raspodjela opterećenja među agregatima.

Ključne riječi: hidroelektrana, sinkroni generator, paralelni i otočni rad, sinkronizacija, energetske karakteristike, raspodjela opterećenja

Abstract

The hydroelectric power plant is a plant in which the potential water energy converts into the kinetic energy of its current, then into the mechanical energy of the turbine shaft rotation and ultimately into the electric energy in the synchronous generator. A synchronous generator converts the mechanical energy of the turbine into the electric energy. The synchronous generator operating state is an idle state, load, short circuit, and final operating states are island mode (operation on its own network, stand-alone generators), and parallel mode (parallel generators with constant voltage and frequency). To keep the voltage and frequency constant, it is necessary to regulate the excitation current and turbine speed. For parallel connection of the synchronous generator on a network, it is necessary to perform the synchronization process for which the following conditions have to be met: the order of the generator and network phase must be equal, the voltage levels, the frequency and phase angles of the generator voltage and the network must be equal. The hydroelectric power features are: installed power, maximum power, available power, turbine and generator efficiency, possible annual production, etc. These characteristics are considered to determine optimal load distribution among aggregates.

Keywords: hydropower plant, synchronous generator, parallel and island mode, synchronization, energy characteristics, load distribution

Životopis

Matija Babić rođen je 02.05.1990. godine u Požegi. Osnovnu školu je završio u Brestovcu i Ekonomsku školu u Požegi, maturirao s odličnim uspjehom te stječe zvanje ekonomist. Upisao je Elektrotehnički fakultet u Osijeku 2009. godine, smjer elektroenergetika te stječe zvanje prvostupnik inženjer elektrotehnike. Sveučilišni diplomski studij, smjer elektroenergetika, upisuje 2014. godine.

_____

potpis