Uloga reverzibilne hidroelektrane u elektroenergetskom sustavu

Srša, Neven

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:122:149451

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-04**

Repository / Repozitorij:

University North Digital Repository

zir.nsk.hr

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Sveučilište
Sjever

Završni rad br. 480/EL/2021

Uloga reverzibilne hidroelektrane u elektroenergetskom sustavu

Neven Srša, 2768/336

Varaždin, rujan 2021. godine

Sveučilište Sjever

Odjel za Elektrotehniku

Završni rad br. 480/EL/2021

Uloga reverzibilne hidroelektrane u elektroenergetskom sustavu

Student

Neven Srša, 2768/336

Mentor

izv. prof. dr. sc. Srđan Skok

Varaždin, rujan 2021. godine

Sveučilište Sjever
Sveučilišni centar Varaždin
104. brigade 3, HR–42000 Varaždin

UNIVERSITY NORTH

Prijava završnog rada

Definiranje teme završnog rada i povjerenstva

ODJEL Odjel za elektrotehniku

STUDIJ preddiplomski stručni studij Elektrotehnika

PRISTUPNIK Neven Srša | MATIČNI BROJ 2768/336

DATUM 14.06.2021 | KOLEGIJ Razvod električne energije

NASLOV RADA Uloga reverzibilne hidroelektrane u elektroenergetskom sustavu

NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU Role of Reversible Hydro Power Plant in Power System

MENTOR Srđan Skok | ZVANJE Izvanredni profesor

ČLANOVI POVJERENSTVA

1. Izv.prof.dr.sc. Srđan Skok
2. Doc.dr.sc. Ladislav Havaš
3. Doc.dr.sc. Dunja Srpak
4. mr.sc. Ivan Šumiga, viši predavač
5.

Zadatak završnog rada

BROJ 480/EL/2021

OPIS

U završnom radu potrebno je obraditi temu hidroelektrana obzirom na njihove osnovne dijelove, te vrste turbina koje se koriste u ovisnosti o hidrološkim i geografskim karakteristikama. Nadalje potrebno je opisati načine priključka hidroelektrana na prijenosni elektroenergetski sustav. Posebno je potrebno obraditi reverzibilne hidroelektrane kao primjer pohrane energije, a u svjetlu novih prilika u elektroenergetskom sustavu sa visokim udjelom intermitentnih izvora energije (obnovljivi izvori energije). Potrebno je provesti simulaciju rada reverzibilne hidroelektrane na prijenosnom sustavu u proizvodnom i pumpnom režimu. Kao primjer je potrebno uzeti RHE Velebit.

ZADATAK URUČEN 14.06.2021

REPUBLIKA HRVATSKA
SVEUČILIŠTE SJEVER
KOPRIVNICA
SVEUČILIŠTE SJEVER

POTPIS MENTORA

Predgovor

Ovim putem se zahvaljujem profesoru Srđanu Skoku, na podršci i svom uloženom trudu i vremenu prilikom izrade završnog rada. Isto tako se zahvaljujem svima koji su bili uz mene tokom cijelog perioda studiranja.

Sažetak

Završni rad obrađuje temu uloge reverzibilnih hidroelektrana u elektroenergetskom sustavu. Definirana je podjela elektrana, dijelovi reverzibilne hidroelektrane, prednosti i nedostatci reverzibilnih hidroelektrana, uloga dnevnog dijagrama opterećenja i nabrojane su neke od poznatijih reverzibilnih hidroelektrana u svijetu i Hrvatskoj. U programu NEPLAN 360 Student provedena je simulacija rada reverzibilne hidroelektrane.

Ključne riječi: reverzibilna hidroelektrana, elektroenergetski sustav, simulacija rada reverzibilne hidroelektrane

This graduation thesis describes the role of reversible hydropower plants in electrical power system. Types of power plants, parts of reversible hydropower plant, advantages and disadvantages of reversible hydropower plants, the role of the daily load diagram and some of the most famous reversible hydropower plants in the world are defined in this graduation thesis. Also, the simulation of reversible hydropower plant operation has been performed in NEPLAN 360 Student program.

Keywords: reversible hydropower plant, electrical power system, simulation of reversible hydropower plant operation

Popis korištenih kratica

EES	Elektro energetski sustav
RHE	Reverzibilna hidroelektrana
LF	Load flow – protok opterećenja

Sadržaj

1. Uvod 5
2. Elektrane 7
   2.1. Podjela elektrana 7
      2.1.1. Termoelektrane 8
      2.1.2. Nuklearne elektrane 8
      2.1.3. Solarne elektrane 9
      2.1.4. Vjetroelektrane 9
      2.1.5. Hidroelektrane 9
   2.2. Obnovljivi izvori energije 11
      2.2.1. Sunčeva energija 11
      2.2.2. Energija vjetra 12
      2.2.3. Energija vode 13
      2.2.4. Geotermalna energija 14
      2.2.5. Energija biomase 15
3. Reverzibilne hidroelektrane 17
      3.1.1. Pretvorba energije vode u električnu energiju 17
      3.1.2. Gornja i donja akumulacija 19
      3.1.3. Brana ili pregrada 20
      3.1.4. Zahvat 22
      3.1.5. Dovod vode 23
      3.1.6. Vodna komora 23
      3.1.7. Tlačni cjevovod 24
      3.1.8. Strojarnica 24
      3.1.9. Vodna turbina 24
      3.1.10. Tipovi vodnih turbina 26
   3.2. Princip rada sinkronog motor-generatora 29
   3.3. Prednosti i nedostatci reverzibilnih hidroelektrana 34
   3.4. Dnevni dijagram opterećenja - uloga RHE 35
   3.5. Reverzibilne hidroelektrane u svijetu 37
4. Simulacija rada reverzibilne hidroelektrane u EES-u 43
   4.1. Generatorski režim rada 45
   4.2. Motorski režim rada 46
5. Zaključak 47
6. Literatura 48

1. Uvod

Dovođenje vode na veću visinsku razliku radi skladištenja energije u hidroelektranama je ideja koja je stara koliko i brda na kojima su izgrađena takva "pumpna skladišta". S porastom upotrebe sunca i snage vjetra za proizvodnju energije, ova tehnologija bi uskoro mogla doživjeti ponovni procvat.

U borbi protiv klimatskih promjena leži velika potreba za ubrzanjem upotrebe čistih obnovljivih izvora kao što su sunčeva energija, voda i vjetar. Solarni paneli i vjetroelektrane pokazali su se kao vrlo korisni u tom smislu.

Međutim, sunce i vjetar nisu uvijek dostupni u potrebnoj mjeri. Vjetar i solarna energija mogu pružiti konstantnu snagu samo u slučaju kada su podržani skladišnim sustavom energije. Da bi Zemlja dostigla uporabu 100% obnovljivih izvora, moramo skladištiti energiju kada je to potrebno. Za tu ideju su reverzibilne hidroelektrane idealno rješenje zbog svog principa rada.

Upravo je ono što je prvobitno motiviralo ideju o projektiranju reverzibilnih hidroelektrana bila nefleksibilnost nuklearne energije. Naime, velike turbine nuklearnih elektrana najbolje rade punom snagom. Reverzibilna hidroelektrana može skladištiti višak električne energije generirane preko noći (kada je potrošnja mala), kako bi ta ista energija pomogla sljedećih dana da se zadovolji potražnja. Kada potražnja za električnom energijom dostigne vrhunac, voda pada iz gornjeg rezervoara u donji rezervoar, prolazi kroz turbinu koja generira energiju. Hidroenergija je najiskorišteniji obnovljivi izvor na svijetu - čini preko polovine kapaciteta zelene energije.

Uzimajući u obzir gubitke uslijed isparavanja akumuliranih voda i gubitke uslijed pretvaranja, približno 75% do 85% električne energije koja se koristi za pumpanje vode u gornji akumulacijski bazen može biti vraćeno. Ova tehnologija je najisplativija u smislu čuvanja velike količine električne energije. 1000 kilograma vode (1 kubni metar) na vrhu 100 metara visokog tornja ima potencijalnu energiju od oko 0,272 kWh.

Zašto su nam potrebne reverzibilne hidroelektrane?

Reverzibilne hidroelektrane nisu samo značajan ekološki izvor koji može nadoknaditi potrebu i potražiti električnu energiju u distributivnim mrežama. One pomažu da sustav i tržište budu učinkovitiji i pouzdaniji.

Pružaju mogućnost da se zamijeni do 50% nuklearnih i termoelektrana na ugljen.

Lako se reguliraju i pogodne su za lako upravljanje, stupanj korisnosti ciklusa je 75-85%. Također se mogu primijeniti kao zamjene za rad hidroelektrane u režimima parcijalnog opterećenja i neefikasne „stand-by" režime. Režimi rada su im prilagodljivi zahtjevima opskrbe, stabilnosti i drugih karakterističnih mreža.

Iskustvo nas uči da značajni broj klasičnih hidroelektrana ima probleme u radu. Sistematska i potpuna posvećenost organiziranog prijenosa znanja i iskustva mogu učiniti temelj za daljnji napredak prema potrebi za zadovoljenjem potreba za energijom.

2. Elektrane

Elektrane su postrojenja koja služe za proizvodnju električne energije pretvorbom iz primarnih oblika energije u električnu energiju. Zadatak elektrana je da zadovolje potrošnju električne energije i da slijede iznenadne promijene opterećenja. Prema ulozi u elektroenergetskome sustavu općenito se razlikuju bazne i vršne elektrane. Bazna elektrana je ona elektrana koja je po pogonskim svojstvima prilagođena stalnome opterećenju, a vršna elektrana ona koja može preuzeti dio vršnog opterećenja ovisno o veličini i pogonskim svojstvima. Osim što trebaju imati potrebnu rezervu u slučaju ispada agregata, elektrane se trebaju projektirati tako da se mogu napraviti remonti agregata, a da potrošači i dalje dobivaju potrebnu količinu energije.

2.1. Podjela elektrana

Vrste elektrana:

Bazne

- Termoelektrane
- Nuklearne elektrane
- Hidroelektrane

Vršne

- Hidroelektrane

Obnovljivi izvori energije

- Solarne elektrane
- Vjetroelektrane
- Elektrane na biomasu
- Geotermalne elektrane

2.1.1. Termoelektrane

Termoelektrane su postrojenja za proizvodnju električne energije u kojima se upotrebljava toplina za proizvodnju energije. Glavna svrha svih termoenergetskih postrojenja je proizvodnja pare koja će pokretati turbinu, a potom generator električne energije. Takva postrojenja mogu spaljivati fosilna goriva ili se koristiti nuklearnom energijom za proizvodnju toplinske energije. Najvažniji dijelovi termoelektrane su: kotao, generator pare, turbina, električni generator, kondenzator, rashladni toranj, rezervoar za fosilno gorivo, dimnjak te trafostanica za transport energije do dalekovoda.

Prema vrsti termoelektrane dijelimo na:

- Plinske termoelektrane
- Parne termoelektrane
- Kombinirane termoelektrane (koriste plinsku i parnu turbinu)
- Dizelske termoelektrane

Princip rada termoelektrana
Ciklus izrade termoelektrične energije započinje u kotlu, gdje se gorivo sagorijeva i aktivira generator pare. Tada pregrijana para pod pritiskom pokreće turbine, koje su osovinom povezane s električnim generatorom. Električna energija se transportira kroz trafostanicu do dalekovoda

2.1.2. Nuklearne elektrane

Nuklearne elektrane su postrojenja u kojima se energija oslobađa nuklearnom reakcijom ili radioaktivnim raspadanjem. Toplina dobivena fisijama nuklearnog goriva se koristi za proizvodnju pare koja pokreće parnu turbinu. Nuklearne elektrane kao gorivo koriste izotop uranija U-235 koje je vrlo pogodan za fisiju. Fisijom se iz radioaktivnog uranija oslobađa energija. Nju izazivaju slobodni neutroni, pa o njihovu broju ovisi i snaga nuklearnog reaktora. Neutrone upijaju upravljačke šipke utaknute između šipki s uranijem. Njihovim se dizanjem i spuštanjem povećava i smanjuje broj slobodnih neutrona, pa time i ubrzava i usporava oslobođena energija. Osnovni dijelovi nuklearne elektrane su: nuklearni reaktor, generator pare, parna turbina i električni generator.

2.1.3. Solarne elektrane

Solarne elektrane su obnovljivi izvori energije u kojima se energija fotona pretvara u električnu energiju. Solarna ćelija obasjana svjetlošću proizvodi parove elektron-šupljina te uzrokuje stvaranje elektromotorne sile na krajevima solarnih ćelija i elektron-šupljine se počinju gibati prema suprotnim stranama. Solarne ćelije proizvode napon od $0.5 - 0.7$ V i struju do $20\ \mathrm{mA/cm^2}$. Spajanjem solarnih ćelija serijski ili paralelno dobivamo solarne module.

2.1.4. Vjetroelektrane

Vjetroelektrane su postrojenja u kojima se kinetička energija vjetra prvo pretvara u mehaničku, a zatim preko električnih generatora u električnu energiju. Vjetroelektrane su obnovljivi izvor energije. Postoje vjetroelektrane s okomitom i vodoravnom osi, ali se češće grade s vodoravnom osi. Najvažniji čimbenik za izbor položaja vjetroelektrane je vjetropotencijal. To su karakteristike vjetra na pojedinoj lokaciji, a najvažnija je srednja godišnja brzina vjetra. Osnovni dijelovi su: toranj, temelji, kućište i lopatice rotora. Princip rada vjetroelektrane je da vjetar okreće lopatice i rotor koji okreću prijenos,a prijenos okreče generator. Generator se pokreće kada brzina vjetra poraste iznad otprilike 3 m/s.

2.1.5. Hidroelektrane

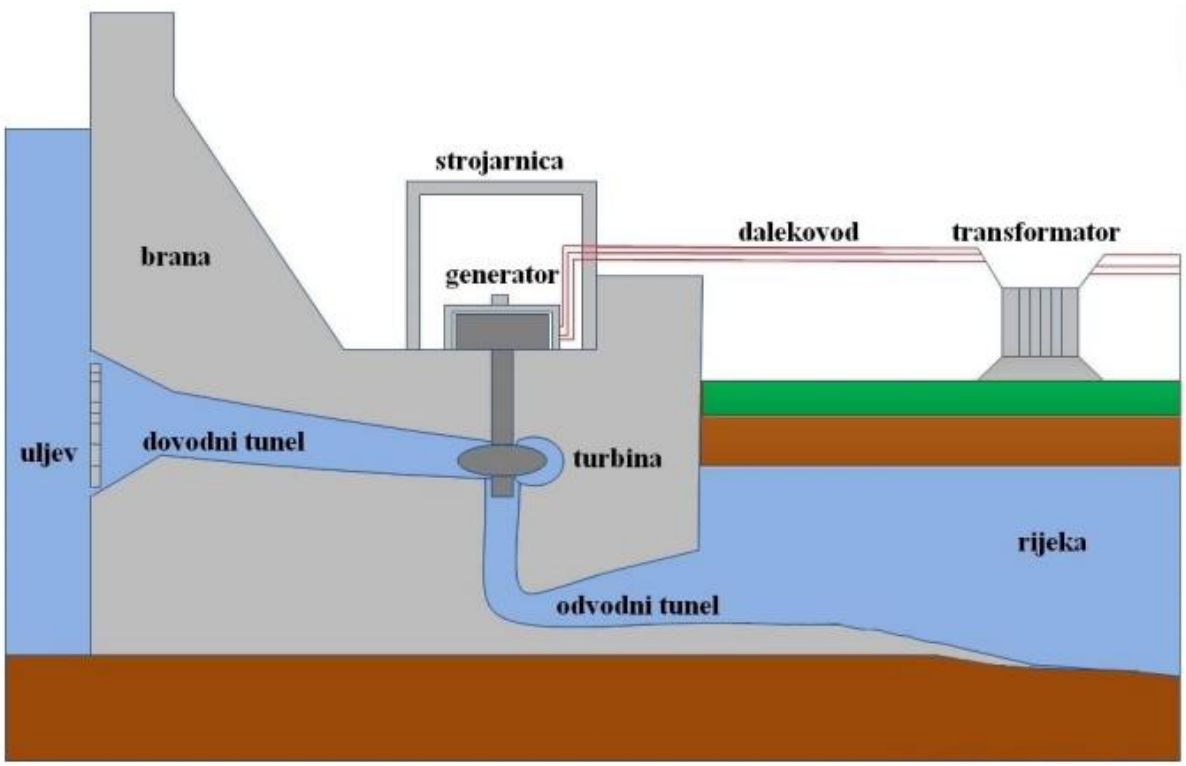
Hidroelektrane su proizvodna postrojenja, odnosno građevine za proizvodnju električne energije koje u svom sastavu imaju barem jednu proizvodnu jedinicu pretvorbe energije hidropotencijala u električnu energiju te prateća postrojenja.Transformacija energije vode kod hidroelektrana se odvija korištenjem potencijalne i/ili kinetičke energije vode koja se u vodnim turbinama (Pelton, Francis ili Kaplan) pretvara u mehaničku rotacijsku energiju, a koja se vratilom prenosi do generatora gdje se pretvara u elektromagnetskom polju u električnu energiju.

Prema tipovima hidroelektrane mogu biti:

- Protočne (bez ili s malom satnom/dnevnom akumulacijom)
- Akumulacijske (s akumulacijom, branom, vodenom komorom, zahvatom, gravitacijskim dovodom, zasunskom komorom, tlačnim cjevovodom, strojarnicom i sustavom odvodnje vode)

Prema načinu proizvodnje se razlikuju:

- Pribranske**,** kod kojih je strojarnica uz ili u brani
- Derivacijske**,** kod kojih je strojarnica izmještena dalje od brane
- Reverzibilne**,** koje su akumulacijske HE s dvije akumulacije (gornja i donja). Proizvode energiju klasično padom vode iz gornje akumulacije, ali mogu raditi i kao crpke koje crpe vodu iz donje akumulacije u gornju akumulaciju kako bi se ta voda mogla ponovno energetski iskorištavati. Za crpljenje se koristi električna energija iz elektroenergetskog sustava u vrijeme kada ima viška energije (npr. noću)
- Crpne**,** hidroenergetska postrojenja kojima je osnovni zadatak crpljenje (sakupljanje) vode u višim akumulacijama za potrebe neke klasične HE (u čijem su tehnološkom sastavu), a kada se voda iz akumulacije koristi u osnovnoj HE, rade kao klasična HE te i one koriste energiju iste vode povećavajući ukupni stupanj iskoristivosti



Slika 2.1 Hidroelektrana i njezini dijelovi

2.2. Obnovljivi izvori energije

Obnovljivi izvori energije su izvori energije koji se dobivaju iz prirode te se mogu obnavljati(ponovno koristiti). Danas se sve više koriste jer ne štete okolišu. Postoji više vrsta obnovljivih izvora energije kao što su voda,vjetar,geotermalna energija,energija sunca,bioenergija i mnogi drugi. Najčešće se koriste voda,vjetar i sunce jer su najpristupačniji i jer ih ima mnogo. Većina tehnologije obnovljivih izvora energije se na direktan ili indirektan način napaja iz Sunca.

Sustav Zemljine atmosfere je uravnotežen tako da je toplinsko zračenje u svemir jednako pristiglom sunčevom zračenju što rezultira određenim energetskim stupnjem unutar Zemljinog atmosferskog sustava što možemo opisati kao Zemljina klima. Najviše zračenja se apsorbira pri maloj geografskoj širini u području oko ekvatora, ali se ta energija raspršuje u obliku vjetrova i morskih struja po cijelom planetu.

Gibanje valova moglo bi imati važnu ulogu u procesu pretvorbe mehaničke energije između atmosfere i oceana kroz opterećenje uzrokovano vjetrom. Sunčeva energija je također odgovorna za distribuciju padalina.

Svaki od ovih izvora ima jedinstvene karakteristike koje utječu na to kako i gdje su korišteni.

2.2.1. Sunčeva energija

Načini korištenja sunčeve energije se mogu podijeliti na pasivne, aktivne i one za proizvodnju električne energije. Sunčeva energija se aktivno prikuplja uz pomoć sunčevih (solarnih) kolektora, u našim krajevima prvenstveno u svrhu zagrijavanja potrošnih toplih voda i u manjoj mjeri grijanja prostora. Sunčevi kolektori se ugrađuju u sklopu solarnog sustava čiji su uz kolektor, osnovni dijelovi: akumulacijski spremnik tople vode, dodatni zagrijač (kotao, električni grijač), regulacijski sklop.

Fotonaponske ćelije pretvaraju energiju sunčevog zračenja u električnu. Napravljene su od poluvodičkog materijala (najčešći silicija (Si)) u obliku tankih pločica povezanih u module. Zbog male efikasnosti i još uvijek visoke cijene fotonaponske ćelije se ugrađuju samo tamo gdje su potrebne male snage ili već ne postoji priključak na električnu mrežu.

Slika 2.2 Solarna elektrana

2.2.2. Energija vjetra

Za proizvodnju električne energije danas se najviše koriste vjetroturbine s horizontalnom osi s jednom, dvije ili tri lopatice, dok su one s vertikalnom osi još uglavnom u fazi razvoja. Prije instaliranja svake vjetroturbine, potrebno je provesti mjerenja brzine vjetra tijekom jedne ili više godina na raznim visinama, s obzirom na to da se brzina vjetra povećava s udaljenošću od tla. Zbog velike varijacije u snazi tijekom rada, potrošači koji su spojeni na vjetroturbine moraju imati dodatni izvor električne energije, a same vjetroturbine (vjetroelektrane) mogućnost predaje viškova energije u električnu mrežu.

Slika 2.3 Vjetroelektrana

2.2.3. Energija vode

Energija vode je najznačajniji i ekonomski najkonkurentniji obnovljivi izvor energije. Ne može se koristiti posvuda jer pretpostavlja raspolaganje velikim količinama brze tekuće vode kroz cijelu godinu. Radi osiguravanja rada hidroelektrana kroz cijelu godinu na rijekama se grade brane i akumulacijska jezera, što znatno povećava cijenu postrojenja. Također, remeti se i režim podzemnih voda u okolici akumulacije, što ima veliki utjecaj na biljni i životinjski svijet. Procjenjuje se da je iskorišteno oko 25 % svjetskog hidroenergetskog potencijala. Većina neiskorištenog potencijala nalazi se u nerazvijenim zemljama, što je povoljno jer se u njima očekuje znatan porast potrošnje energije.

Slika 2.4 Hidroelektrana

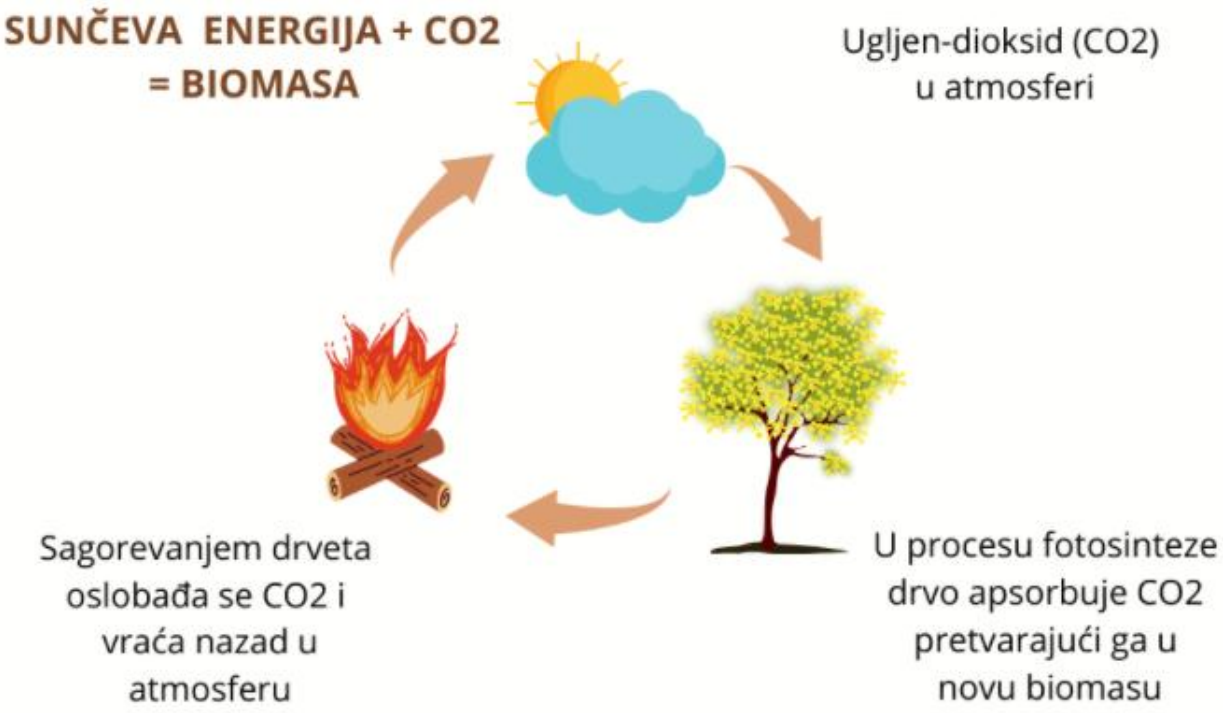
2.2.4. Geotermalna energija

Geotermalna energija je toplinska energija zemlje. Osnovni medij koji prenosi toplinu iz unutrašnjosti na površinu zemlje je voda ili para. Geotermalna energija se obnavlja tako da se voda od kiša probija duboko po raspuklinama i tamo se onda zagrijava i cirkulira natrag prema površini, gdje se pojavljuje u obliku gejzira i vrućih izvora. Geotermalni resursi nalaze se u širokom spektru dubina, od plitkih površinskih do više kilometara dubokih rezervoara vruće vode i pare koja se može dovesti na površinu i iskoristiti. U prirodi se geotermalna energija najčešće pojavljuje u formi vulkana, izvora vruće vode i gejzira.

Slika 2.5 Geotermalna energija vulkana

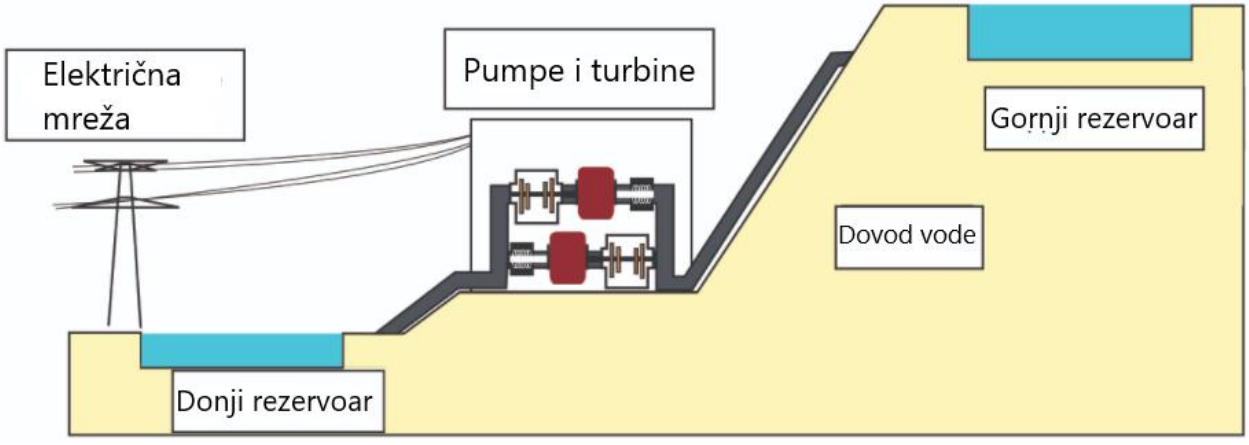
2.2.5. Energija biomase

Između različitih vrsta biomase drvna ima najširu primjenu. Dobro osmišljeni šumski kompleksi predstavljaju održivi izvor energije jer se mogu obnavljati, CO2 su neutralni i dobra su zamjena za postojeća fosilna goriva. Danas praktički nema tehničkih prepreka koje bi sputavale rast uporabe drveta, posebice kad se znaju prednosti koje ona nosi. Stvaranje pozitivnog okruženja za uporabu drvne biomase nosi sa sobom održivo rješenje za buduće energetske potrebe. Drugim riječima količina drvne mase koja se troši kao gorivo, mora biti kontinuirano nadomještana istom količinom rastuće biomase. Samo u tom slučaju će se sav izgaranjem nastao ugljični dioksid utrošiti na rast nove biomase.



Slika 2.6 Kruženje drva kao obnovljivog izvora energije u prirodi

3. Reverzibilne hidroelektrane



Slika 3.1 Shema RHE

Reverzibilne hidroelektrane su slične kao i sve hidroelektrane uz razliku što reverzibilne mogu pumpati iskorištenu vodu natrag u gornje akumulacijsko jezero. Takve hidroelektrane imaju 2 akumulacijska jezera, gornje i donje jezero. Isto tako moguće je i da nemaju donje jezero nego se gornje puni iz rijeke.

3.1.1. Pretvorba energije vode u električnu energiju

Voda neprestano kruži u tekućem, plinovitom i krutom stanju kroz prirodu. Zbog zagrijavanje Zemlje voda isparava iz oceana, rijeke, potoka i tako dolazi do kruženja vode u prirodi. Kada se voda odnosno vodena para podigne na određenu visinu, gdje se zatim kondenzira zbog niskih temperatura pa se vodena para pretvara natrag u vodu odnosno tekuće stanje pa pada na zemlju kao kiša ili snijeg.

Zbog posljedice položaja vode u prirodu dobivamo potencijalnu i kinetičku energiju vode.

Formula 3.1 Potencijalna energija

$$E_p = m * g * h$$

$E_p - potencijalna\ energija\ (J), \quad g - gravitacijska\ konstanta\ (m/s^2),$

$h - visina\ pada\ vode\ (m)$

Potencijalna energija vode omogućava iskorištavanje vode zbog visinske razlike u prirodi. Iz potencijalne energije se dobiva kinetička energija i onda se ta kinetička energija iskoristi pomoću

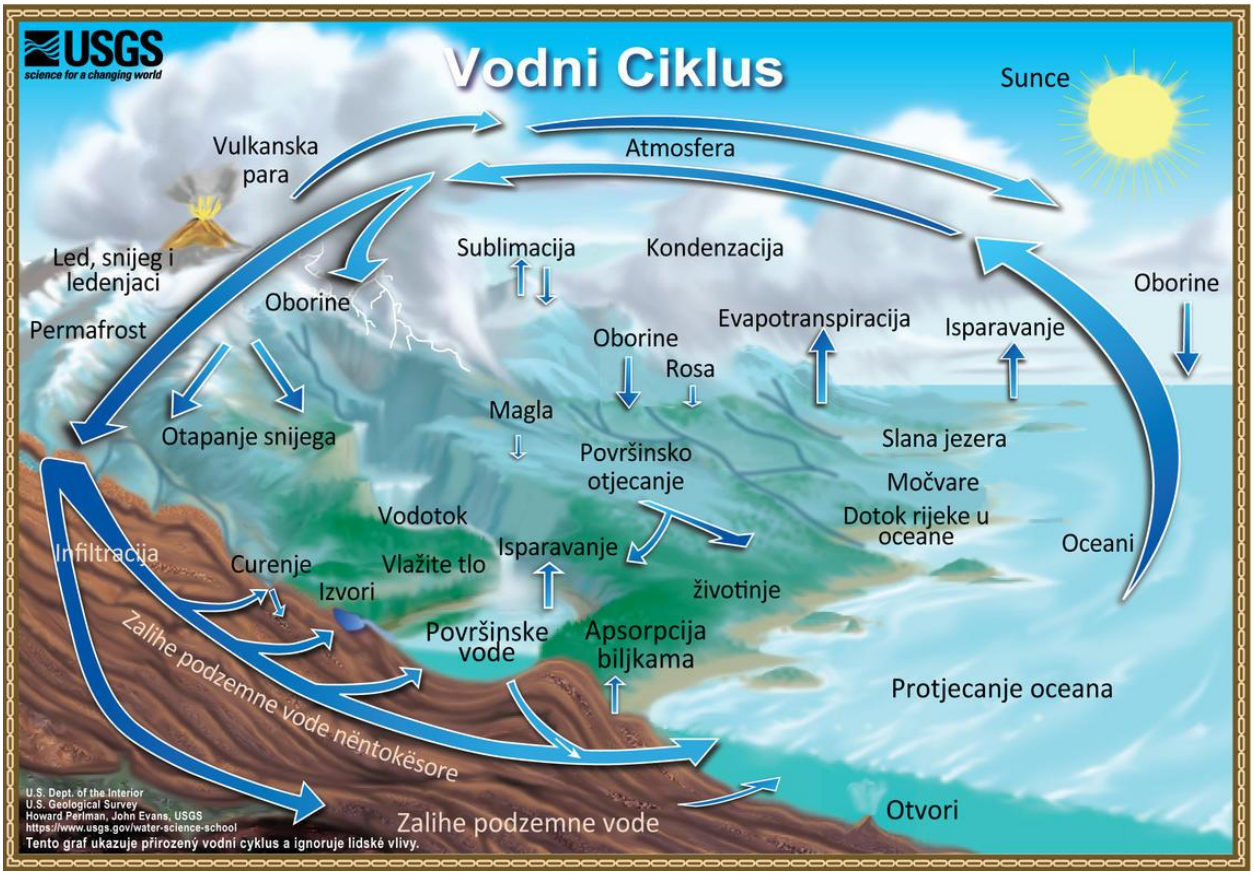
vodenih turbina i pretvara u mehaničku energiju. Potencijalna energija se iskorištava u akumulacijskim i reverzibilnim hidroelektranama.

Formula 3.2 Kinetička energija

$$E_k = \frac{m * V^2}{2}$$

$E_k -$ *kinetička energija* (J), $\quad m -$ *masa* (kg),
$v -$ *brzina* (m/s)

Kinetička energija kretanja vode u rijekama, nastalih valova u morima, plime i oseke omogućuje izravnu pretvorbu kinetičke energije vode pomoću vodenih turbina u mehaničku energiju u protočnim i posebnim hidroelektranama kao što su one na valove te plimu i oseku.
Na osnovu dobivene mehaničke energije dobije se električna energija pomoću električnih generatora koja se zatim preko elektroenergetskog sustava šalje potrošačima.



Slika 3.2 Dijagram kruženja vode u prirodi

3.1.2. Gornja i donja akumulacija

U konvencionalnoj hidroelektrani, voda iz rezervoara teče kroz elektranu, izlazi i odvodi se nizvodno. Reverzibilne hidroelektrane su posebne vrste hidroelektrana koje imaju dva skladišta (akumulacije) vode.

Gornja akumulacija – Kao i kod konvencionalnih hidroelektrana, brana stvara rezervoar. Voda protječe kroz postrojenje i rezultira proizvodnjom električne energije.

Donja akumulacija – Voda koja izlazi iz RHE teče u donji rezervoar, a ne ulazi u rijeku i teče nizvodno kao kod hidroelektrana.

Pomoću reverzibilne turbine postrojenje može pumpati vodu natrag u gornji rezervoar. To se radi kada je potrošnja za električnom energijom mala. Donji spremnik puni gornji spremnik vode. Crpljenjem vode natrag u gornji rezervoar, postrojenje ima više vode za proizvodnju električne energije u razdobljima najveće potrošnje.

Slika 3.3 Gornji i donji rezervoar RHE Weldeck II

3.1.3. Brana ili pregrada

Brane su građevine koje imaju namjenu da skrenu vodu s njenog prirodnog toka, povise razinu vode radi većeg pada i da akumuliraju vodu. Branom se stvara umjetno (akumulacijsko) jezero ili privremeno zadržavanje vode, kojemu je namjena upravljanje (regulacija) vodnog toka radi učinkovitije obrane od poplava i korištenja vode za vodoopskrbu, natapanje, proizvodnju električne energije, plovidbu i rekreaciju.

Dijelovi brane su:

- tijelo brane (preuzima tlak vode i druge sile koje djeluju na branu i prenosi ih na dno i bokove riječne doline ili korita),
- preljev (najviša razina umjetnog jezera, služi za odvod poplavnih voda iz jezera u riječno korito),
- slapišta (sprječavaju razaranje riječnog korita i potkopavanje temelja brane i služe za rasipanje vode koja prelazi preko preljeva),
- ispusti brane (njihova namjena je pražnjenje umjetnog jezera, a zapornice služe za kontrolu ispuštanja).

Prema veličini i složenosti gradnje, brane se dijele na velike i ostale. Velike brane jesu one koje su više od 15 metara (mjereno od najniže točke temeljne površine do krune) i brane visine između 10 i 15 metara, koje zadovoljavaju barem jedan od sljedećih uvjeta: kruna dulja od 500 metara, obujam akumulacije dobivene gradnjom brane veći od 1 miljunm^3, najveća poplavna voda koja se propušta preko preljeva brane veća od 2000 m^3/s.
Prema načinu gradnje i materijalu brane se dijele na nasute (načinjena od prirodnog i iskopanog materijala), betonske (načinjena od običnog ili armiranog betona) i brane zidane kamenom. Postoje tri osnovna tipa velikih betonskih brana: gravitacijske, lučne i raščlanjene. Gravitacijska brana suprotstavlja se vlastitom težinom tlaku vode (tijelo brane ima velik obujam i širok temelj). Lučna brana je mnogo tanja i građena je kao zakrivljena vitka ploča učvršćena za okolni teren (veći dio opterećenja usporenom vodom prenosi na bokove doline gdje je brana vezana na čvrste stijene). Raščlanjena brana se gradi u širokim dolinama i takav tip brane se sastoji od teških stupova (kontrafora) temeljenih u koritu doline koji se na uzvodnoj strani proširuju u glave stupova.

Slika 3.4 Gravitacijska brana Grand Coulee

Slika 3.5 Lučna brana Glen Canyon

Slika 3.6 Raščlanjena brana Daniel-Johnson

3.1.4. Zahvat

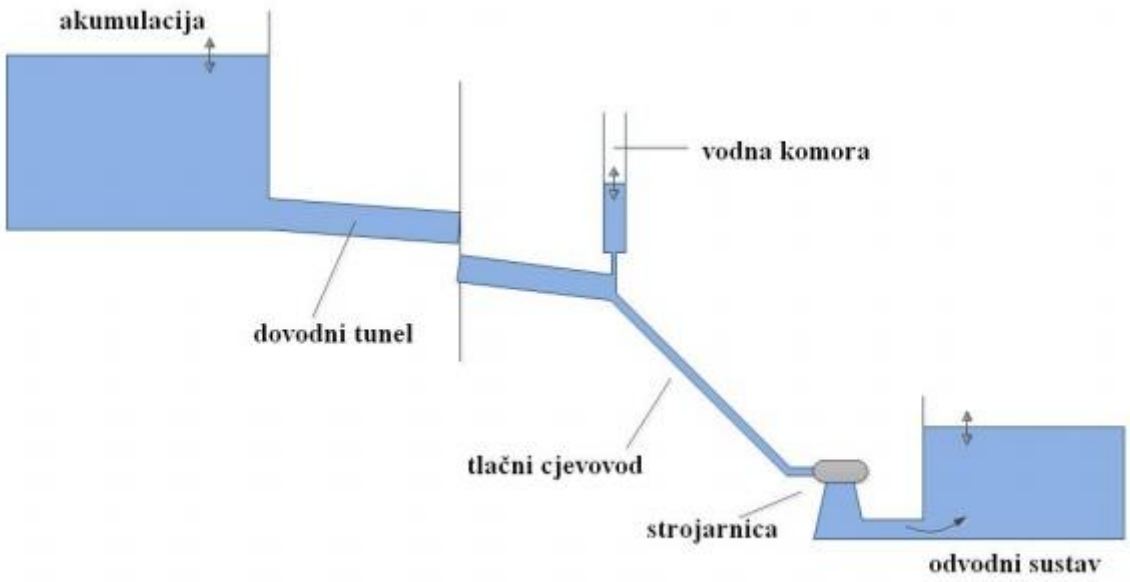
Zahvat usmjerava vodu zaustavljenu branom prema dovodu, odnosno prema turbini. Druga zadaća zahvata vode je smanjenje količine ostataka i taloga koji su nošeni dolazećom vodom. Zahvat je općenito izrađen od armiranog betona, okna za sprječavanje otpada, a vrata (ventil) na ulazu kanala od čelika ili drveta. Današnji zahvati imaju sustave za odvraćanje riba od zahvata i prolaze za ribe. Postoje dva tipa zahvata: zahvat na površini vode (izvodi se kada je pregrada niska pa je razina vode iza nje praktički konstantna) i zahvat ispod površine vode (izvodi se kada se razina vode tijekom godine mijenja)

3.1.5. Dovod vode

Dovod vode služi za spajanje zahvata s vodnom komorom i gradi se kao tunel ili kanal. Tunel se može izvesti kao gravitacijski i kao tlačni. Dovodni tunel obično je kružnog presjeka jer je to hidraulički i statički najpovoljniji oblik. Prosječna brzina vode u dovodnom tunelu je 3 do 4 m/s.

3.1.6. Vodna komora

Vodna komora se gradi u slučaju da je dovodni tunel dugačak, te pri pokretanju hidroelektrane se vodna masa ne može u kratkom roku (10-20 sekundi) pokrenuti i dobiti brzinu da bi se na vodnim turbinama stvorila dovoljna snaga za proizvodnju električne energije. Osnovna zadaća vodne komore je da se pri ulasku turbine u pogon osigura dio vode prije nego što se on poteče u dovoljnoj količini kroz dovodni tunel, te da prihvati dio vode koja se kreće dovodnim tunelom pri zaustavljanju turbina. Tako se izbjegava nagla promjena brzine u dovodnom tunelu i pojava vodnog udara.



Slika 3.7 Elementi hidroenergetskog postrojenja

3.1.7. Tlačni cjevovod

Tlačni cjevovod služi za dovod vode do turbine iz vodne komore ili sa zahvata vode. Kod velikih padova koriste se zavareni čelik i kovano željezo, a kod manjih padova beton. Može biti položen po površini ili u tunelu. Na ulazu u tlačni cjevovod se nalazi zaporni uređaj koji ima sigurnosnu ulogu. On automatski sprječava daljnji dotok vode u cjevovod u slučaju puknuća cijevi. Postavljanje zapornih uređaja na dno tlačnog cjevovoda ovisi o broju turbina koje su spojene na jedan cjevovod. Postoji i pomoćni zaporni uređaj kojim su omogućeni pregled i popravci glavnog zapornog uređaja bez pražnjenja dovodnog tunela ili kanala.

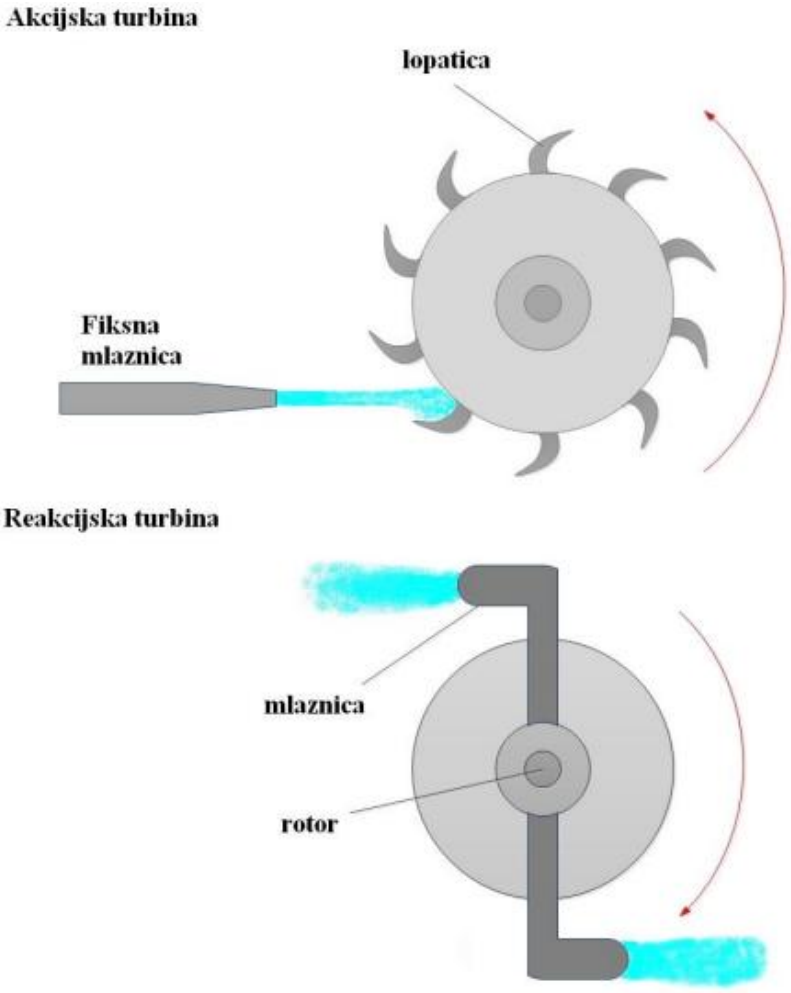
3.1.8. Strojarnica

Strojarnica hidroelektrane je postrojenje koje 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 generatoru. Elementi strojarnice su vodna turbina, generator, transformator, rasklopno postrojenje, uređaji upravljanja i zaštite te pomoćni uređaji. Vodna turbina i generator definiraju dimenzije strojarnice, a ostali elementi se prilagođavaju njima. Strojarnica može biti smještena uz branu, unutar brane ili je izvedena kao dio brane, te može biti podzemna ili nadzemna.

3.1.9. Vodna turbina

Vodna turbina je energetski stroj u kojem se potencijalna energija vode najprije pretvara u kinetičku energiju, a zatim se kinetička energija pretvara u mehanički rad za pogon električnog generatora. Konstrukcijski se ne razlikuje od ostalih turbina, i u osnovi se sastoji od kućišta sa statorskim lopaticama, te rotora. Vodne turbine dijele se na reakcijske (pretlačne) i akcijske (turbine slobodnog mlaza).
Reakcijske turbine imaju tlak na ulazu u rotor veći nego na njegovom izlazu. Kada pritisak djeluje na krilo turbine, lopatice moraju biti potopljene u vodi. Koriste se za male i srednje padove, pri velikom protoku i malom tlaku. Osnovni tipovi ovih turbina su Francisova i Kaplanova turbina.

Akcijske turbine imaju tlak na ulazu u rotor jednak tlaku na izlazu iz rotora. Sva energija tlaka se transformira u kinetičku energiju u statoru kod ovih turbina. Osnovni tip ovih turbina je Peltonova turbina.



Slika 3.8 Princip vrtnje akcijske i reakcijske turbine

3.1.10. Tipovi vodnih trubina

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

Kaplanova turbina

- propelerna turbina, sa zakretnim lopaticama na rotoru i koristi se samo za male padove (približno do 40 metara),
- ako je potrebno lopatice radnog kola zakreću se u pogonu da bi se osiguralo strujanje vode s najmanje hidrauličkih gubitaka,
- ima nisku cijenu, lako održavanje te manji utjecaj na okoliš,
- radi slično kao Francisova turbina, s tim da je broj lopatica daleko manji.

Slika 3.9 Kaplanova turbina

Francisova turbina

- reakcijska turbina radijalnog protoka s fiksnim lopaticama rotora koja se koristi za srednje padove (do 700 metara),
- veliki stupanj iskoristivosti kapaciteta s preko 90%,
- izlazna snaga od nekoliko kilovata do 750 megavata,
- može biti okomita i vertikalna (vertikalna ima veću korisnost, ali je skuplja)
- teža je za održavanje od Peltonove,
- pogon nije stabilan kod malih protoka,
- najučestaliji tip turbine koji se instalira u hidroelektrane.

Slika 3.10 Francisova trubina

Peltonova turbina

- akcijska turbina s jednom ili više mlaznica, svaka mlaznica osigurava kontrolu protoka kroz prskalicu s iglom,
- koristi se za srednje i velike padove i manje protoke vode,
- rotor turbine se sastoji od 12 do 40 lopatica, a svaka je lopatica oštrim bridom podijeljena u dva jednaka ovalna dijela (lopatica „reže“ mlaz vode u dva dijela od kojih svaki napušta lopaticu pod kutom od gotovo 180°),
- ima vrlo lagano održavanje.

Slika 3.11 Peltonova turbina

3.2. Princip rada sinkronog motor-generatora

Kod RHE mora se osigurati reverzibilan rad motor-generator, a taj reverzibilan rad osigurava sinkroni stroj. U RHE rade kao generatori kad je potrebno proizvoditi električnu energiju, a u vrijeme kad postoji višak električne energije rade kao motori i pumpaju vodu u akumulacijsko jezero. Sinkroni stroj omogućuje pretvorbu mehaničke energije u električnu, ali i obrnuto.

Osnovni dijelovi sinkronog stroja su: stator, rotor, osovina, uzbudni namot i armaturni namot.

Vrste sinkronih strojeva
Prema vrsti pogonskog stroja razlikuju se:

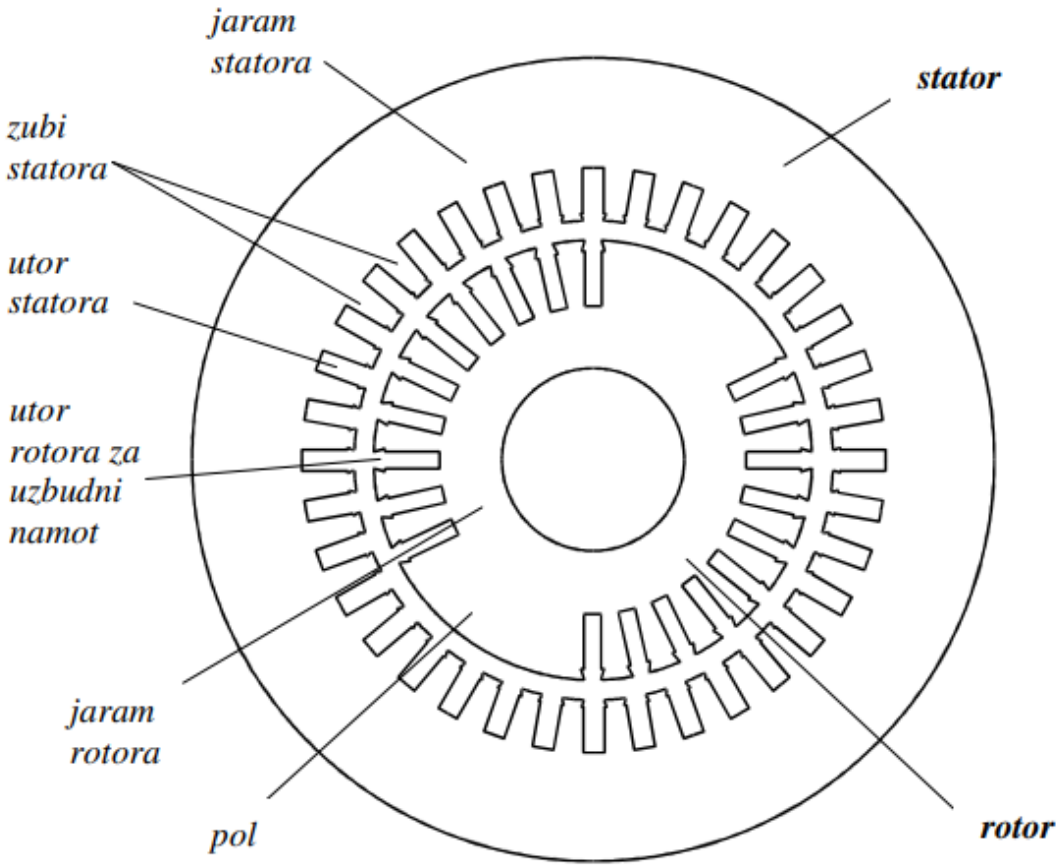
- turbogeneratori,
- hidrogeneratori,
- dizelski generatori,
- kompenzatori i
- motori.

Prema konstrukciji rotora sinkronog stroja se razlikuju se strojevi s:

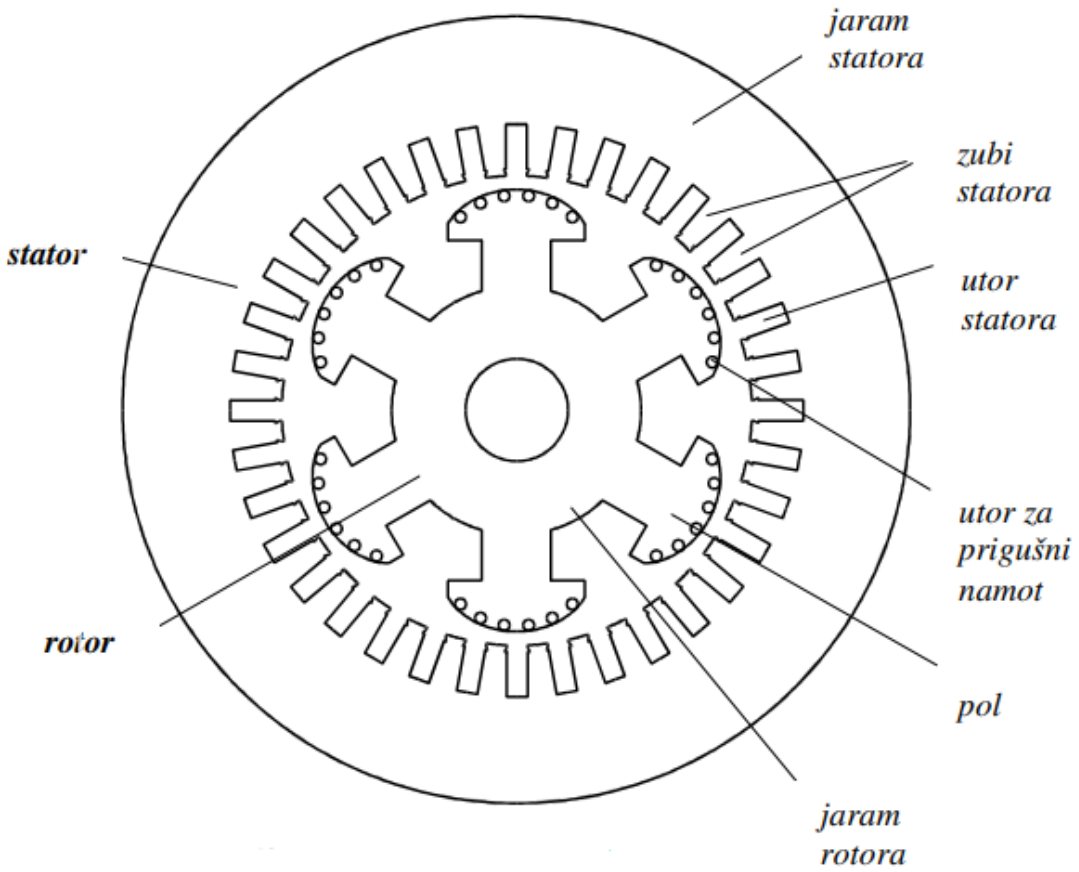
- cilindričnim rotorom
- istaknutim polovima

Prema brzini vrtnje dijele se na:

- brzohodne,
- strojeve srednje brzine i
- sporohodne.



Slika 3.12 Prikaz željezne jezgre 2-polnog sinkronog stroja s cilindričnim rotorom



Slika 3.13 Prikaz željezne jezgre 6-polnog sinkronog stroja s istaknutim polovima

Turbogeneratori su brzohodni strojevi, izvedeni s cilindričnim rotorom. Pogone se parnim ili plinskim turbinama koje imaju veliku brzinu vrtnje. Izvode se isključivo s horizontalnom osovinom. Velika brzina vrtnje, koju nameće turbina, uvjetuje malen broj polova i izvedbu s neistaknutim polovima (cilindrični rotor). Budući da generator mora imati barem dva pola, to za mrežu frekvencije 50 Hz iznosi maksimalna brzina 3000 okr/min. Za parne turbine u Europi je najčešća brzina vrtnje upravo 3000 okr/min. Za najveće turbogeneratore (1,5 – 2 GVA) koristi se i brzina od 1500 okr/min. Stoga se turbogeneratori redovito grade kao dvopolni ili četveropolni. Najveći promjer rotora turbogeneratora iznosi nešto više od 1 metra. Da bi se iz takvog stroja dobila velika snaga, radi malog promjera mora biti velika duljina rotora, pa ona može iznositi i nekoliko metara.

Hidrogeneratori su najčešće sporohodni strojevi, izvedeni s istaknutim polovima. Pogoni ih vodna turbina, po čemu su i dobili naziv. Brzina vrtnje turbine jako ovisi o količini vode i pritisku (pad vode) i obično se kreće 50 –1000 o/min. Generator treba biti prilagođen turbini, pa i on mora imati istu brzinu vrtnje. Mala brzina vrtnje rotora n zahtijeva veliki broj pari polova p hidrogeneratora. Rotor hidrogeneratora se izvodi uvijek s izraženim polovima na kojima je smješten koncentrirani uzbudni namot. Takav rotor može za veliki broj polova imati jako veliki

promjer (gotovo 20 m), pa su obodne brzine znatne (~100 m/s). Hidrogeneratori se izvode najčešće s vertikalnom osovinom. Postoje i izvedbe s horizontalnom osovinom, posebno kod cijevnih generatora koji su uronjeni u tok vode, a turbina je napravljena poput propelera.

Princip rada sinkronog stroja

U generatorskom načinu rada na uzbudni namot se dovede istosmjerna struja i ta struja stvori magnetski tok u jezgri koji se neće vremenski mijenjati (zbog istosmjerne struje dobije se vremenski konstantni magnetski tok, a zbog konstantnog magnetskog toka inducirani napon je nula). Rotacijom rotora dobiva se okretno magnetsko polje koje će uzrokovati presijecanje namota armature i u vodičima statorskog namota inducira se elektromotorna sila (na otvorenim stezaljkama armaturnog namota pojavit će se napon.), i kad je stroj opterećen poteku struje. Struje u statorskom namotu stvore okretno protjecanje koje se vrti jednakom brzinom kao i rotor, dakle sinkrono s rotorom.

Inducirani napon tada je dan formulom:

Formula 3.3 Inducirani napon jedne faze

$$E = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} * \Phi * w_f * f * f_n$$

E - inducirani napon jedne faze [V],

Φ - magnetski tok u rasporu [T],

w_f - broj zavoja po fazi,

f – frekvencija armaturnog namota [Hz],

f_n – faktor namota($f_n = f_z * f_t$), ukupni inducirani napon jedne faze je manji za faktor namota, a faktor namota je umnožak zonskog faktora namota i tetivnog faktora namota

Kada se generator optereti, proteći će struja armaturnim namotom i javit će se reakcija armature. Reakcija armature stvorit će protumoment na smjer rotacije rotora sinkronog stroja. Regulacijom uzbudne struje i momenta na osovini rotora održavat će se željeni napon, frekvencija i izlazna snaga.Frekvencija induciranog napona ovisi o brzini vrtnje rotora i o broju pari polova.

Bitna je karakteristika sinkronih strojeva da im je brzina vrtnje rotora *n* jednaka brzini vrtnje okretnog magnetskog polja što ga stvaraju statorske struje. Ta se brzina naziva sinkronom brzinom stroja n_si određena je prema relaciji:

Formula 3.4 Sinkrona brzina stroja

$$n_s = \frac{60 * f}{p}$$

n_s- sinkrona brzinastroja (okr/min)

f – frekvencija napona napajanja (Hz)

p – broj pari polova stroja

U motorskom načinu rada kroz armaturni namot se pušta izmjenična struja koja stvara okretno magnetsko polje, a u rotorskom uzbudnom namotu se pušta istosmjerna uzbudna struja, koja stvara istosmjerno magnetsko polje. Zbog okretnog magnetskog polja, javlja se moment, statičko polje rotora počinje rotirati za njim, a time i rotor. Motor se tada vrti sinkronom brzinom.

3.3. Prednosti i nedostatci reverzibilnih hidroelektrana

Prednosti reverzibilnih hidroelektrana

- Fleksibilnost i pouzdanost - potrošnja energije rapidno raste. Istodobno je sve teže održavati ravnotežu proizvodnje i potrošnje energije u svakom trenutku. RHE imaju veliki potencijal za odgovor na ovaj izazov, jer se njihova tehnologija temelji na jedinom dugoročnom, tehnički provjerenom i isplativom obliku skladištenja energije u velikim razmjerima.

  RHE mogu reagirati na fluktuacije mreže u najkraćem mogućem vremenu stvaranjem potrebne električne energije ili apsorbiranjem viška.
- Služe kao rezervna snaga pri slabom vjetru ili nedostatku sunca.
- Proizvodnjom električne energije ne stvaraju otpad i imaju smanjenu emisiju stakleničkih plinova, niski su troškovi proizvodnje jer nema troškova goriva, a jednom izgrađena brana traje više godina. Među svim izvorima energije, hidroelektrane su najmanji proizvođači stakleničkih plinova.
- Visoka ekonomska vrijednost - rade na razini učinkovitosti do 82%.
- Vodospremnici akumulacijskih hidroelektrana osiguravaju vodu za navodnjavanje i za kućnu upotrebu.

Nedostatci reverzibilnih hidroelektrana

- Uništavanje ekosustava i gubitak zemlje - urušavanje brane može dovesti do velikih katastrofa za cijeli ekosustav nizvodno od brane. Sama kvaliteta gradnje, konstrukcije i održavanje brane nije dovoljna garancija da je brana osigurana od oštećivanja. Također jedan primjer je hidroelektrana Tri klanca u Kini. Naime, hidroelektrana se nalazi na rijeci Jangce. To je najveće kineska rijeka i shodno tomu je i rijeka najbogatija vodom, što opravdava izgradnju hidroelektrane na njoj. Međutim, vodeni bazen, tj. hidro akumulacijsko jezero te brane, je toliko veliko da svojom težinom opterećuje zemljinu koru. Ako se uzme u obzir da je to područje geološki nestabilno, tj. da se nalazi na spoju litosfernih ploča, jasno je da postoji opravdani rizik od potresa.
- Izgradnja same brane je vrlo skupa te mora biti građena tako da zadovoljava visoke standarde.
- Veće posljedice postoje od taloženja mulja i pijeska na dnu akumulacijskih jezera, zbog čega hidroelektrane kroz duže vrijeme postaju neekonomične. Kao posljedica taloženja,

dubine akumulacijskih jezera postaju kroz vrijeme sve manje i tako sve neekonomičnije. Ovaj problem se može riješiti gradnjom kanala koji imaju ulogu premosnica, da bi se tako odveo taj sediment.

- Stvaranje stakleničkih plinova - prilikom truljenja, raspadanja, biljnih ostataka zarobljenih pod vodom, u anaerobnim uvjetima, dolazi do stvaranja stakleničkih plinova. U prvom redu nastaju ugljikov dioksid i metan.
- Nužnost uništavanja gospodarskih, kulturoloških i prirodnih dobara. Prilikom punjenja hidro akumulacijskog jezera dolazi do nužnog potapanja svega onoga što se našlo ispod površine samoga jezera.
- Nesreće s branama mogu biti jedne od najvećih katastrofa uopće. Tako je nesreća na brani Banqiao u Kini odnijela 26 000 ljudi. Nesreća na brani Vajont u Italiji je odnijela oko 2 000 ljudskih života.

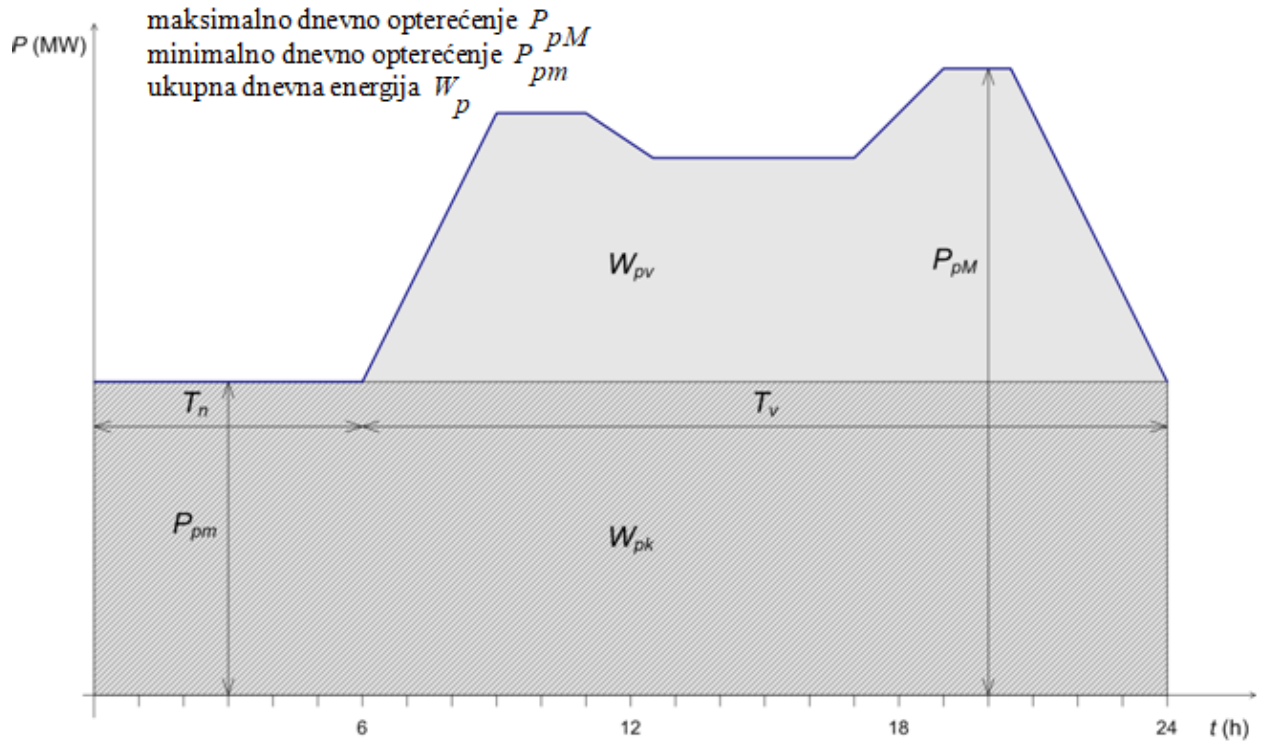
3.4. Dnevni dijagram opterećenja - uloga RHE

U EES postoji velik broj potrošača različitih karakteristika, zbog kojih se i potražnja tijekom dana mijenja. Tim promjenama mora biti prilagođen EES s elektranama koje su u njega uključene. Osnovu za upoznavanje zahtjeva potrošača, a prema tome i polaznu točku za projektiranje, izgradnju i pogon elektrana, predstavlja dnevni dijagram potražnje odnosno opterećenja. Dnevni dijagram opterećenja pokazuje kako se opterećenje mijenja tijekom dana. U elektroenergetskom sustavu razlikuju se dnevni dijagram opterećenja što ga čine potrošači i dnevni dijagrama opterećenja na pragu elektrana. Zanimljiviji je dnevni dijagram opterećenja na pragu elektrana jer su u njemu uključeni gubitci transformacije, prijenosa i distribucije. Dnevni dijagram opterećenja pokazuje: maksimalno dnevno opterećenje, minimalno dnevno opterećenje, ukupnu dnevnu energiju i faktor opterećenja što je prikazano *slikom 3.14*.

Faktor opterećenja izračunava se kao omjer ostvarene potrošnje energije i energije koja se mogla ostvariti da je elektroenergetski sustav bio opterećen u cijelom vremenskom intervalu maksimalnim opterećenjem.

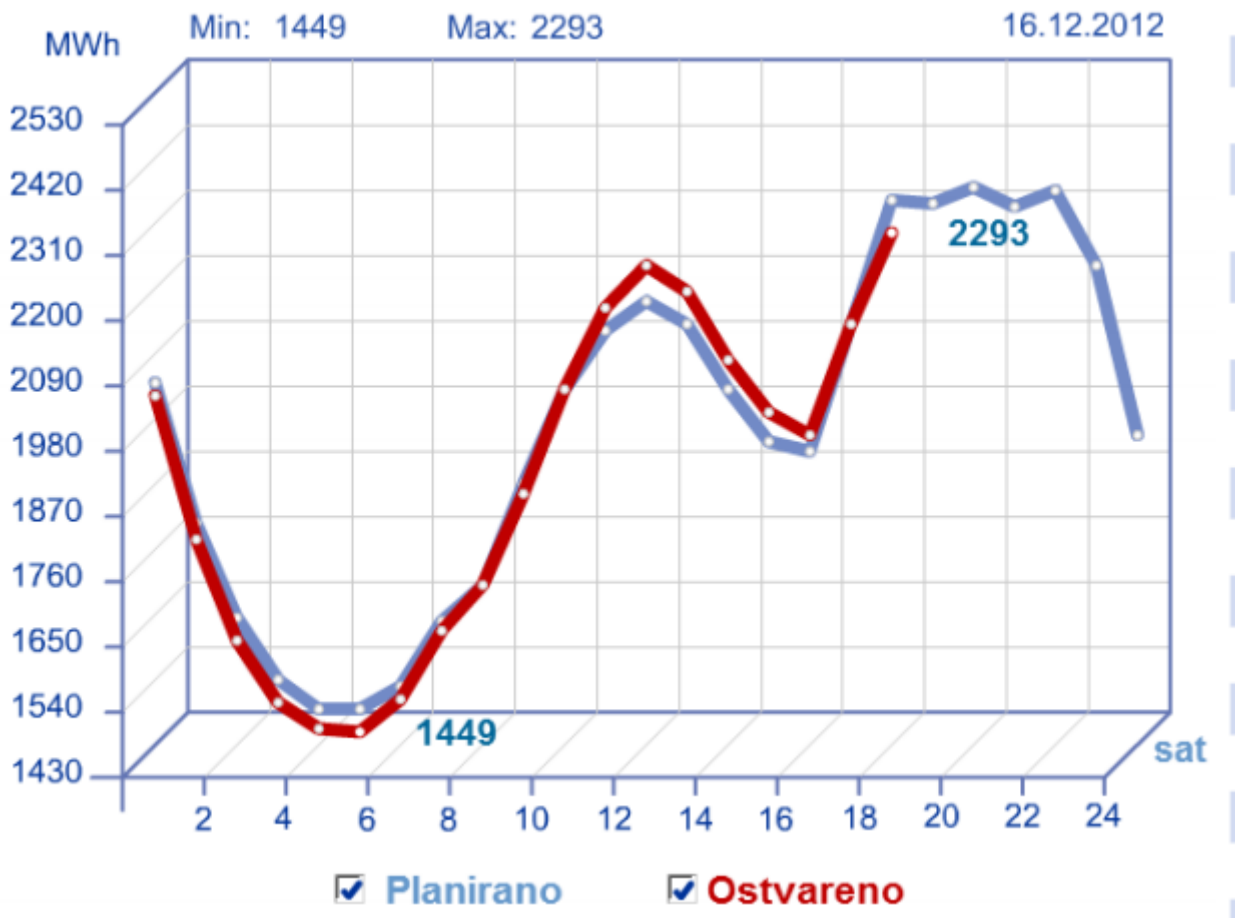
Formula 3.5 Faktor opterećenja

$$m = \frac{W_d}{24 * P_{max}}$$



Slika 3.14 Opterećenja u dnevnom dijagramu

U dnevnom dijagramu opterećenja termoelektrane i nuklearne elektrane pokrivaju bazu, a hidroelektrane vrhove dijagrama potrošnje, odnosno u vršnom opterećenju vrhove pokrivaju RHE. Dnevni dijagrami u svakom EES imaju svoj karakterističan oblik koji ovisi o danima u tjednu, o godišnjem dobu, o vrsti potrošača, o razvijenosti zemlje itd.



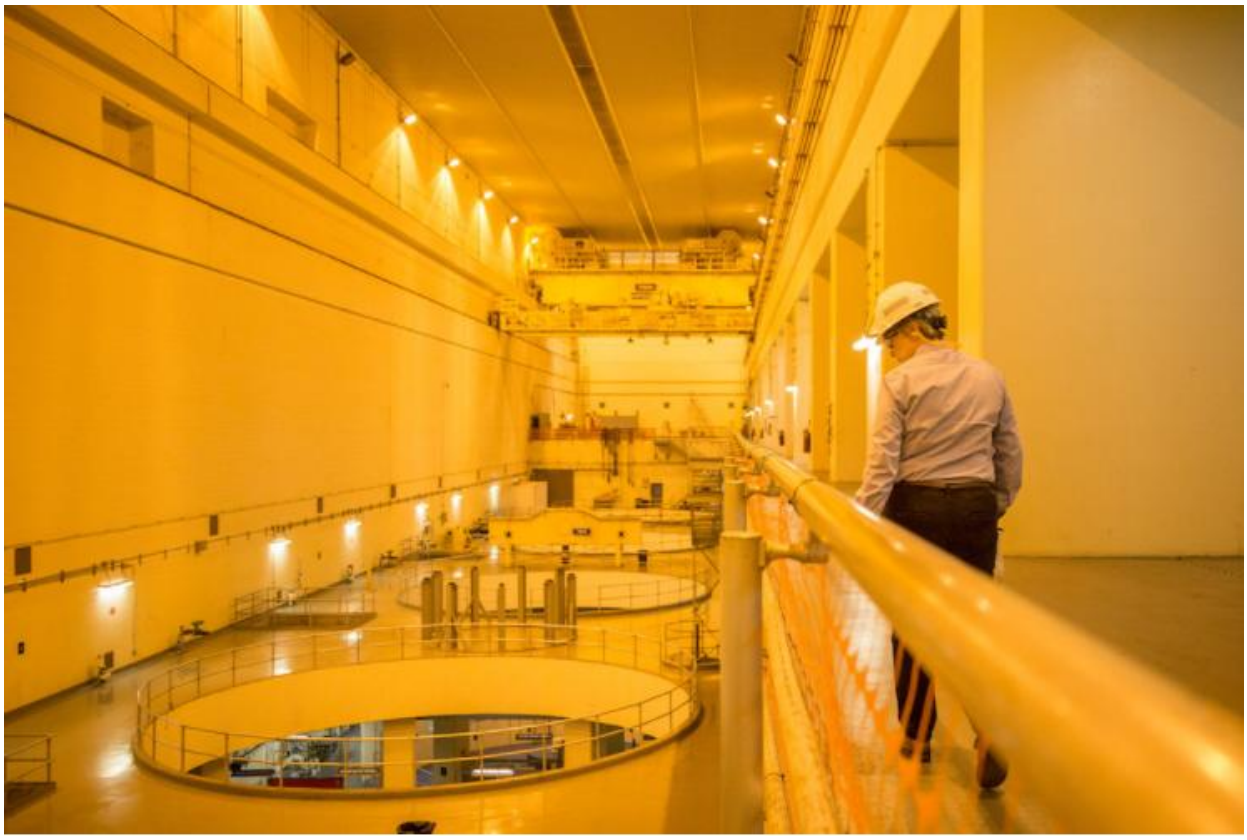
Slika 3.15 Dnevni dijagram opterećenja Hrvatske 16.12.2012. u 19:00 sati

3.5. Reverzibilne hidroelektrane u svijetu

Bath County

Najveće postrojenje reverzibilnog tipa s nazivnom snagom od 3003 MW zbog čega se često naziva "najvećom baterijom" na svijetu. Stanica se nalazi u sjevernom uglu okruga Bath, Virginia, a sastoji se od dva rezervoara odvojena oko 380 metara u nadmorskoj visini. Izgradnja elektrane, izvornog kapaciteta 2.100 MW (2.800.000 KS), započela je u ožujku 1977., a dovršena je u prosincu 1985. po cijeni od 1,6 milijardi dolara. Voith – Siemens je nadogradio šest turbina između 2004. i 2009. godine, povećavajući proizvodnju energije na 500.5 MW za svaku turbinu. Gornja akumulacija može zaprimiti oko 44000000 m^3 vode, dok je donja akumulacija manja i može zaprimiti oko 35000000 m^3 vode. Cjevovodi koji spajaju spremnike su dugački oko 380 m, a ukupna iskoristivost ovog postrojenja je oko 79%. Hidroelektrana se odlikuje sposobnošću jako brzog prelaska iz režima pumpanja vode u režim proizvodnje električne energije, u svega nekoliko minuta.

Slika 3.16 Izgled donje akumulacije i hidrocentrale RHE Bath County



Slika 3.17 Postrojenje RHE Bath County

Guangdong

Najveće reverzibilno postrojenje u Kini sastoji se od 8 turbini nazivne snage 300 MW(ukupno 2400 MW), a proizvedena električna energija koristi se za pokrivanje opterećenja u Hong Kongu. Donji rezervoar projekta izgrađen je gravitacijskom branom visokom 43,5 m i dugom 153,12 m. Gornji rezervoar je izgrađen od 68 m visoke i 318,52 m duge betonske nasipe i ima kapacitet od 23 400 000 m^3.

Slika 3.18 RHE Guangdong

Ludington

Drugo po veličini crpno-akumulacijsko postrojenje u SAD-u izgrađeno je u saveznoj državi Michigan krajem 1973. godine. Sadrži 6 reverzibilnih turbina koje su povezane s gornjim spremnikom putem 6 cjevovoda duljine 340 m. Snaga svake turbine je 312 MW. Umjetna gornja akumulacija ima zapremninu 102206120 m^3, dok kao donja akumulacija služi jezero Michigan. Postrojenje može u 2 minute promijeniti režim rada te u narednih pola sata dostići nazivno opterećenje.Nasip koji okružuje rezervoar dugačak je 9,6 km s prosječnom visinom od 31,4 m.U svojoj godini otvaranja tvornica je nagrađena Izvanrednim inženjerskim dostignućima od strane Američkog društva građevinskih inženjera (ASCE), a 1987. godine, nakon 150. obljetnice Michigana, proglašena je jednim od 10 najboljih inženjerskih dostignuća države.

Slika 3.19 RHE Ludington

Velebit

RHE Velebit je reverzibilno derivacijsko proizvodno postrojenje snage 276 MW u generatorskom i 240 MW motornom režimu. Smještena je u donjem toku rijeke Zrmanje, oko 10 km uzvodno od grada Obrovca, Zadarska županija, gdje je formiran donji bazen Razovac, dok se gornji bazen Štikada nalazi s druge strane planine Velebit, na gračačkoj zaravni, na visini od 550 do 700 m.

Glavni hidrograđevinski dijelovi elektrane su gornja akumulacijska jezera s branama (Štikada i Opsenica), tunel i tlačni cjevovod, strojarnica s pratećim objektima te donje akumulacijsko jezero Razovac na rijeci Zrmanji. Izgradnjom brane Opsenica ostvarena je akumulacija zapremnine 2,7hm^3 pri maksimalnoj koti uspora 575,0 m, kojom se voda kanalom duljine 1460 m, usmjerava prema Ričici te prema akumulaciji Štikada zapremnine 13,65 hm^3.

Voda se iz Štikade dovodi prema turbinama tlačnim tunelom duljine 8191 m, promjera 4,60 m te čeličnim tlačnim cjevovodom duljine 2108 m, promjera 3,9 – 3,0 m. Na prijelazu iz dovodnog tunela u tlačni cjevovod nalazi se zasunska komora s leptirastim zatvaračem promjera 3,9 m.

U strojarnici, smještenoj uz rijeku Zrmanju u 60 m dubokom armirano-betonskom bunaru unutarnjeg promjera 27 m, na koti 11 m, nalaze se dvije crpke – turbine, tipa Francis, s vertikalnim vratilom, instaliranog protoka 2 x 20 m^3/s (crpni rad) i 2 x 30 m^3/s (turbinski rad).

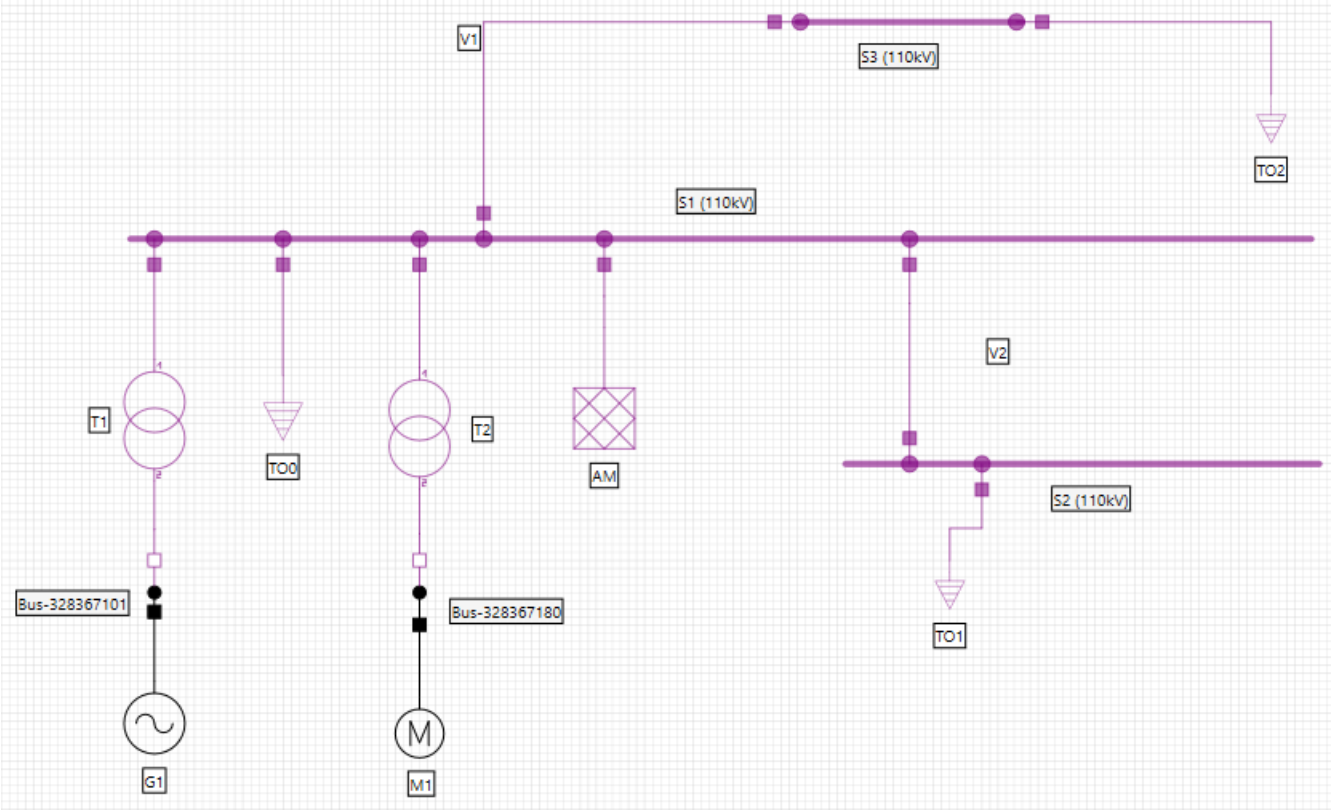
Dva agregata, svaki po 138 / 120 MW, izvedena su za sljedeće režime rada: turbinski pogon, kompenzatorski-turbinski pogon, kompenzatorski-crpni pogon i crpni pogon. Pokretanje agregata u crpni pogon vrši se frekventnim pokretačem.
Odvodno – dovodni tuneli, promjera 3,5 m, duljine 60 m, povezuju crpke - turbine s donjom akumulacijom Razovac, zapremnine 1,81hm^3, maksimalne kote uspora od 9 m. Akumulacija Razovac ostvarena je nasutom branom, duljine 400 m. Oko zgrade strojarnice smještene su: zgrada komande, zgrada s Diesel električnim agregatom, rasklopno postrojenje 35 kV i 400/110/36,75 kV te zgrade pomoćnih pogona.

Slika 3.20 RHE Velebit

Slika 3.21 RHE Velebit

4. Simulacija rada reverzibilne hidroelektrane u EES-u

Ovom simulacijom prikazan je proračun RHE u generatorskom i motorskom režimu radu. Simulacija je provedena u besplatnoj studentskoj verziji programa NEPLAN 360 Student(Verzija 10.9.0.1). Za izračun simulacije koristi se Extended Newton-Raphson metoda.



Slika 4.1 Izgled mreže u programu NEPLAN

Tablica 4.1 Podaci o zračnim vodovima (dalekovodima)

Ime voda	duljina [km]	R [ohm/km]	X [ohm/km]	B [µS/km]	R0 [ohm/km]	X0 [ohm/km]	B0 [µS/km]	I [A]	Materijal
V1	3120	0.03	0.11	84.8	0.22	0.8	84.8	740	Cu
V2	3020	0.03	0.11	2.82	0.22	0.8	1.79	740	Cu

Tablica 4.2 Podaci o trošilima

Trošilo	S [MVA]	cosfi
TO0	50	0.95
TO1	30	0.95
TO2	40	0.95

Tablica 4.3 Podaci o generatoru

Generator	S[MVA]	U [kV]	cosφ	Xd sat [%]	Xd'' sat [%]	H [s]	Xd [%]	Xd' [%]	Xd'' [%]	Xq [%]	Xq' [%]	Xq'' [%]
G1	50	10	0.9	65.47	15.9	5.016	125	23.2	15.9	122	71.5	15.9

Tablica 4.4 Podaci o motoru

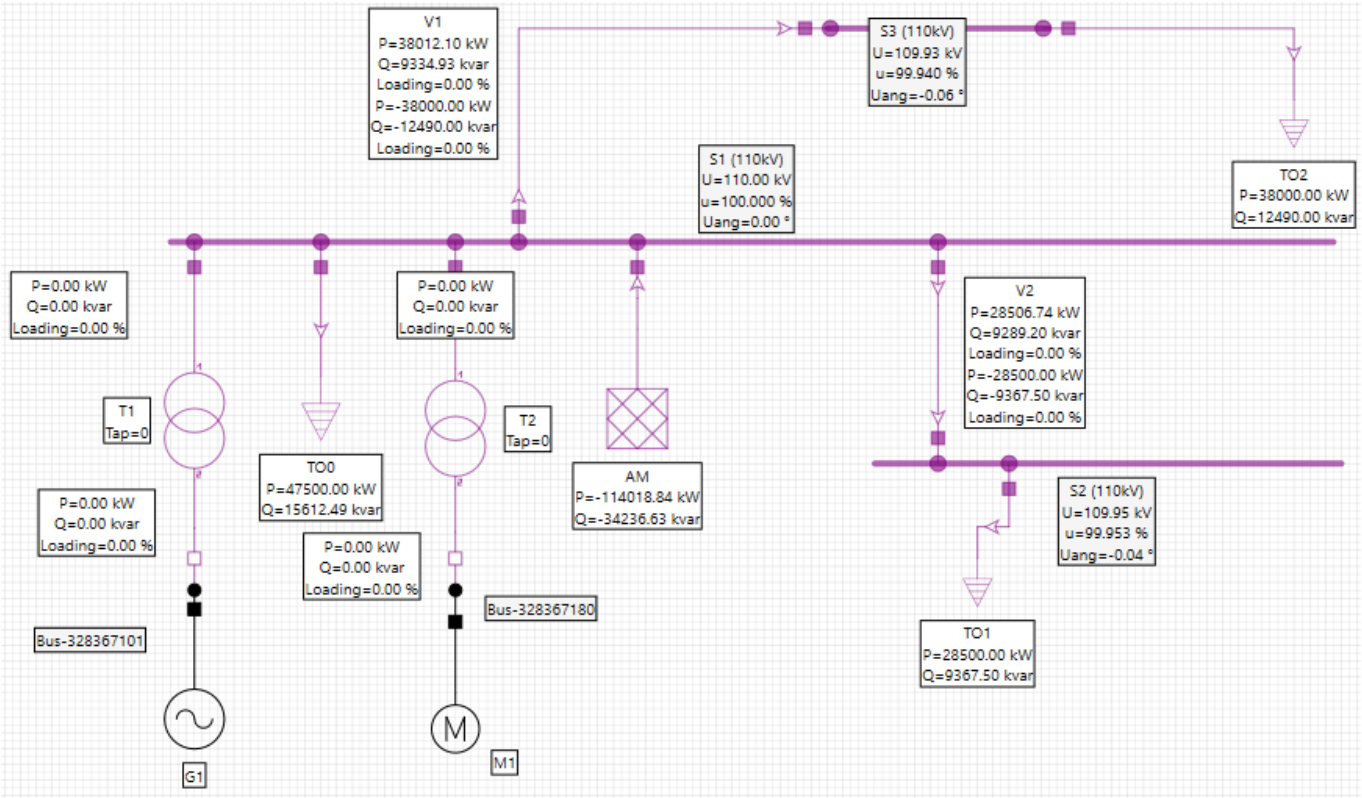
Motor	U (kV)	P (MW)	p	$cos\varphi_n$	η_n	Ip/In	R(Ω)
M1	10	20	1	0.95	0.95	5.2	0

Tablica 4.5 Podaci o aktivnoj mreži

Aktivna mreža	Sk min [MVA]	Sk max [MVA]	Ik min [kA]	Ik max [kA]
AM	4597.764	5158.861	24.132	27.077

Tablica 4.6 Podaci o dvonamotnim transformatorima

Transformator	Spoj	S [MVA]	U1 [kV]	U2 [kV]	uk [%]=uk0 [%]
T1	Dy5	30	110	10	11.9
T2	Dy5	30	110	10	11.9



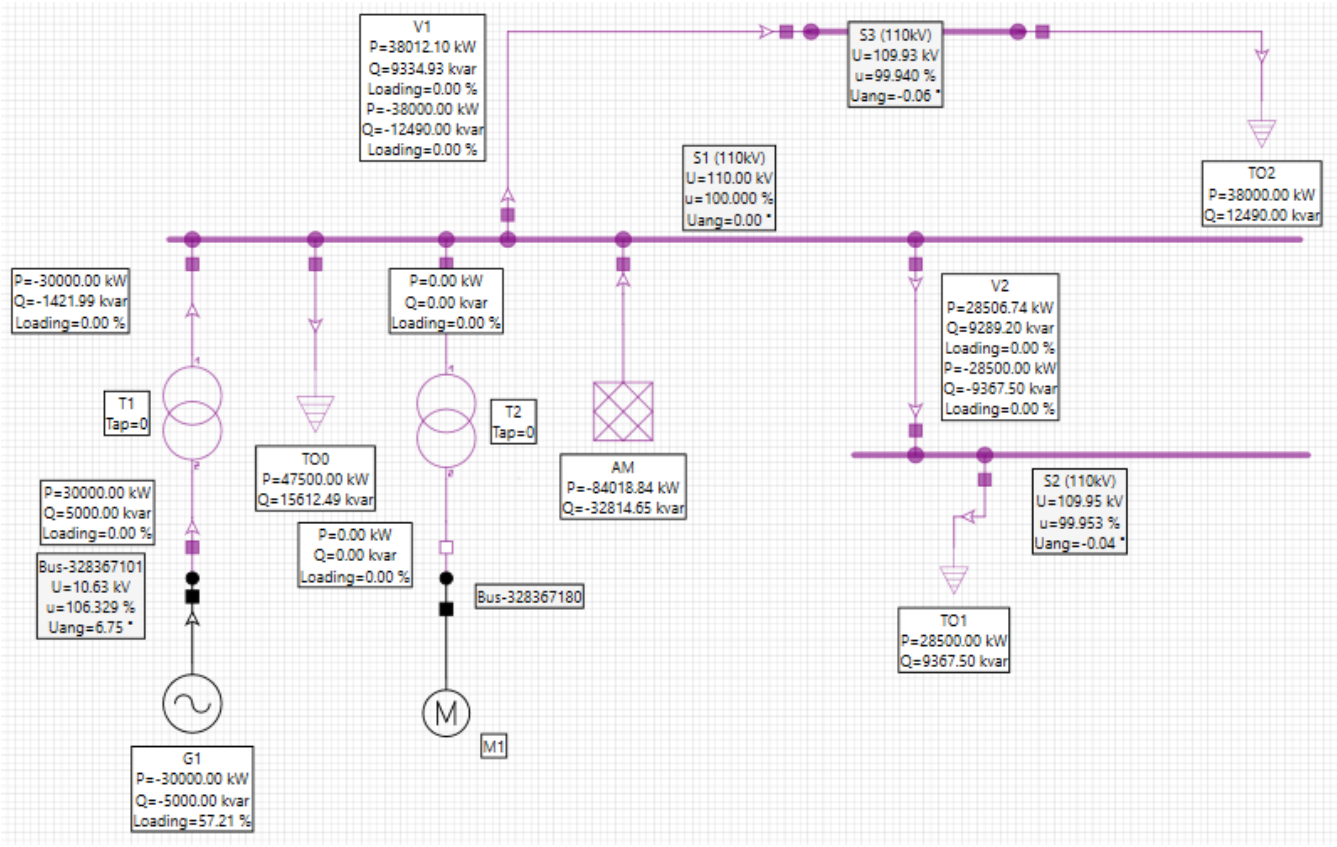
Slika 4.2 LF analiza bez generatora G1 i motora M1

Bitan parametar kod protoka opterećenja bez generatora G1 i motora M1 je snaga koju aktivna mreža AM daje u mrežu, a ona iznosi 114.01884 MW. Prilikom uključenja motora ili generatora u simulaciju taj parametar će se promijeniti ovisno o proizvodnji generatora odnosno potrošnji motora.

4.1. Generatorski režim rada

U generatorskom režimu rada uključen je generator G1, a motor M1 je isključen jer RHE proizvodi odnosno daje električnu energiju u mrežu. To se vidi na *slici 4.3* jer su proizvedene djelatna i jalova snaga generatora G1 negativne (ispred brojeva nalazi se minus).

Željena djelatna i jalova snaga koju generator proizvodi postavljene su u postavkama generatora: LF Analysis, P operating: 30 MW i Q operating: 5 MVAr.

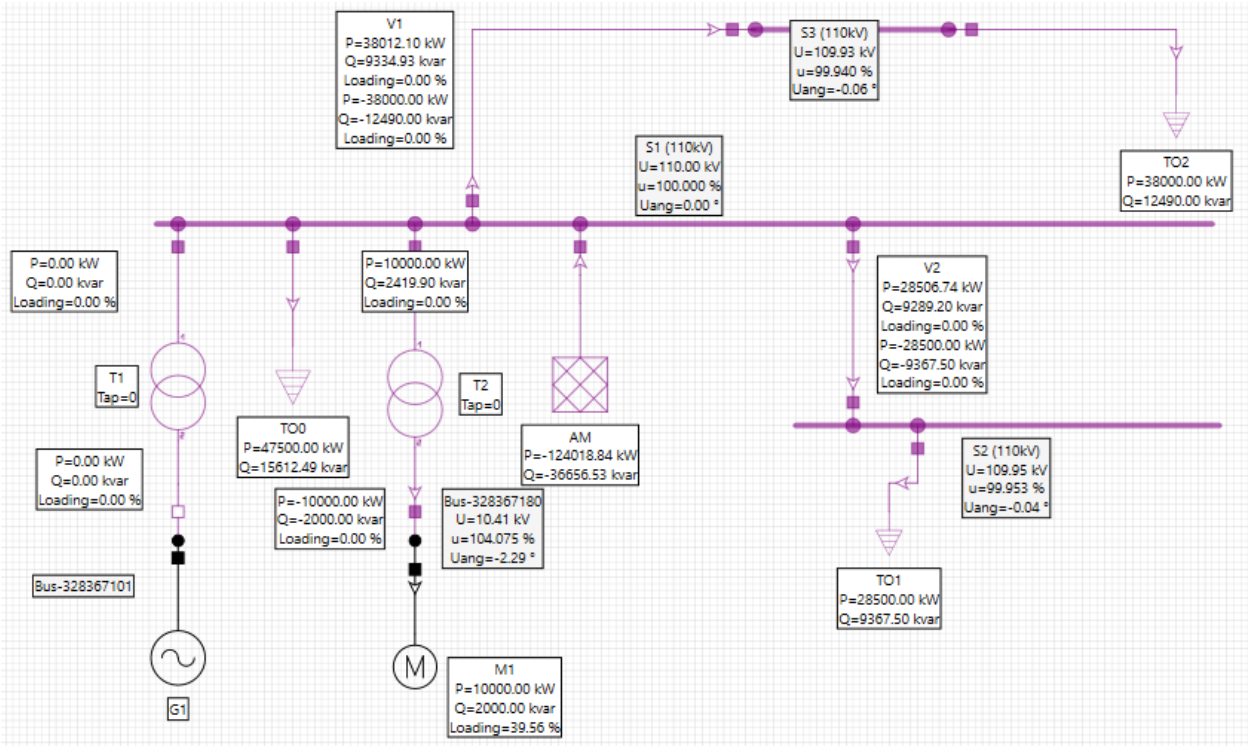


Slika 4.3 LF analiza sa uključenim generatorom G1

Na *slici 4.3* vidi se da aktivna mreža AM proizvodi manje snage nego u slučaju kada nije bilo uključenog motora i generatora. Razlog toga je proizvodnja energije generatora G1 koji je opterećen sa 57.21%. RHE proizvodi energiju pa je potrebna energija iz aktivne mreže AM manja.

4.2. Motorski režim rada

U motorskom režimu rada uključen je motor M1, a generator G1 je isključen jer RHE uzima električnu energiju iz mrežu. To se vidi na *slici 4.4* jer su djelatna i jalova snaga motora M1 pozitivne (ispred brojeva nalazi se plus).



Slika 4.4 LF analiza sa uključenim motorom M1

Na *slici 4.4* vidi se da aktivna mreža AM proizvodi više snage nego u slučaju kada nije bilo uključenog motora i generatora. Razlog toga je dodatna potrošnja energije motora M1 koji je opterećen sa 39.56%. RHE troši energiju pa je potrebna energija iz aktivne mreže AM veća.

5. Zaključak

Ključni pokretač u skladištenju reverzibilnih hidroelektrana je brz porast promjenjive intermitentne snage solarne energije i energije vjetra. Nakon što mnoge zemlje postignu korištenje energije sunca i vjetra od 50% ili više, bit će potrebne velike količine skladišta energije.

Potrošnja električne energije u zemljama vjerojatno će brzo rasti u nadolazećim desetljećima kako se gospodarski razvoj bude odvijao. Budući da su troškovi novoizgrađene solarne energije i energije vjetra ispod cijene novih fosilnih, nuklearnih ili obnovljivih izvora energije, većinu nove generacije osigurat će solarna energija i vjetar. To znači da će biti potrebno veliko povećanje količine skladišta za uravnoteživanje promjenjivog sunca i vjetra. Reverzibilne hidroelektrane komplementarne su tehnologije skladištenja i najprikladnije su za dulja i kraća razdoblja skladištenja. Sveukupni trošak potpuno uravnoteženih 100% solarnih i vjetroelektranskih sustava manji je od cijene ekvivalentnog sustava fosilnih goriva za veći dio svijeta.

U ovom radu je teorijski obrađena uloga RHE u EES-u i provedena simulacija rada reverzibilne hidroelektrane u EES-u kojom se vidi utjecaj RHE na neku mrežu ovisno u kojem načinu rada se nalazi RHE.

6. Literatura

[1] Visoka elektrotehnička škola Varaždin, Električni strojevi – skripta

[2] Ivan Mandić, Veselko Tomljenović, Milica Pužar: SINKRONI I ASINKRONI ELEKTRIČNI STROJEVI, ZAGREB, 2012.

[3] https://www.ecoportal.me/reverzibilne-hidroelektrane/ pristup 02.07.2021

[4] https://enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=17558 pristup 02.07.2021

[5] https://www.hep.hr/proizvodnja/hidroelektrane-1528/1528 pristup 02.07.2021

[6] https://www.hep.hr/proizvodnja/termoelektrane-1560/1560 pristup 05.07.2021

[7] https://bs.warbletoncouncil.org/central-termoelectrica-15320#menu-1 pristup 05.07.2021

[8] https://www.planete-energies.com/en/medias/close/how-they-work-pumped-storage-power-plants pristup 08.07.2021

[9] https://voith.com/uk-en/industry-solutions/hydropower/pumped-storage-plants.html pristup 10.07.2021

[10] https://voith.com/corp-en/industry-solutions/hydropower/pumped-storage-plants.html pristup 18.07.2021

[11] https://enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=9238 pristup 18.07.2021

[12] https://termorad.hr/obnovljivi-izvori-energije-2/ pristup 22.07.2021

[13] https://www.nsenergybusiness.com/features/largest-pumped-storage-plants/ pristup 02.08.2021

[14] https://www.hep.hr/proizvodnja/hidroelektrane-1528/pp-he-jug/rhe-velebit/1546 pristup 02.08.2021

[15] https://www.ferit.unios.hr/preuzmi/8708/PREDDIPLOMSKI%20ELEKTROTEHNIKA_izborni%20blok%20ELEKTROENERGETIKA.pdf pristup 15.08.2021

[16] https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2516-1083/abeb5b#prgeabeb5bs10 pristup 25.08.2021

[17] Medenjak, M. (2017). *Reverzibilna hidroelektrana upravljana PLC-om* (Završni rad). Preuzeto s https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:122:634246

[18] Mišljenović, N. (2016). *Pogon pumpno akumulacijskih elektrana (pogon reverzibilnih hidroelektrana)* (Završni rad). Preuzeto s https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:964066

Popis slika

Slika 2.1 Hidroelektrana i njezini dijelovi 10
Slika 2.2 Solarna elektrana 12
Slika 2.3 Vjetroelektrana 13
Slika 2.4 Hidroelektrana 14
Slika 2.5 Geotermalna energija vulkana 15
Slika 2.6 Kruženje drva kao obnovljivog izvora energije u prirodi 16
Slika 3.1 Shema RHE 17
Slika 3.2 Dijagram kruženja vode u prirodi 18
Slika 3.3 Gornji i donji rezervoar RHE Weldeck II 19
Slika 3.4 Gravitacijska brana Grand Coulee 21
Slika 3.5 Lučna brana Glen Canyon 21
Slika 3.6 Raščlanjena brana Daniel-Johnson 22
Slika 3.7 Elementi hidroenergetskog postrojenja 23
Slika 3.8 Princip vrtnje akcijske i reakcijske turbine 25
Slika 3.9 Kaplanova turbina 26
Slika 3.10 Francisova trubina 27
Slika 3.11 Peltonova turbina 28
Slika 3.12 Prikaz željezne jezgre 2-polnog sinkronog stroja s cilindričnim rotorom 30
Slika 3.13 Prikaz željezne jezgre 6-polnog sinkronog stroja s istaknutim polovima 31
Slika 3.14 Opterećenja u dnevnom dijagramu 36
Slika 3.15 Dnevni dijagram opterećenja Hrvatske 16.12.2012. u 19:00 sati 37
Slika 3.16 Izgled donje akumulacije i hidrocentrale RHE Bath County 38
Slika 3.17 Postrojenje RHE Bath County 38
Slika 3.18 RHE Guangdong 39
Slika 3.19 RHE Ludington 40
Slika 3.20 RHE Velebit 41
Slika 3.21 RHE Velebit 42
Slika 4.1 Izgled mreže u programu NEPLAN 43
Slika 4.2 LF analiza bez generatora G1 i motora M1 44
Slika 4.3 LF analiza sa uključenim generatorom G1 45
Slika 4.4 LF analiza sa uključenim motorom M1 46

Popis tablica

Tablica 4.1 Podaci o zračnim vodovima (dalekovodima) 43
Tablica 4.2 Podaci o trošilima 43
Tablica 4.3 Podaci o generatoru 44
Tablica 4.4 Podaci o motoru 44
Tablica 4.5 Podaci o aktivnoj mreži 44
Tablica 4.6 Podaci o dvonamotnim transformatorima 44

Popis formula

Formula 3.1 Potencijalna energija 17
Formula 3.2 Kinetička energija 18
Formula 3.3 Inducirani napon jedne faze 32
Formula 3.4 Sinkrona brzina stroja 33
Formula 3.5 Faktor opterećenja 35

Sveučilište
Sjever

SVEUČILIŠTE
SJEVER

IZJAVA O AUTORSTVU
I
SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, NEVEN SRŠA *(ime i prezime)* pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog (*obrisati nepotrebno*) rada pod naslovom ULOGA REVERZIBILNE HIDROELEKTRANE U ELEKTROENERGETSKOM SUSTAVU *(upisati naslov)* te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:
(upisati ime i prezime)

Neven Yrša
(vlastoručni potpis)

Sukladno Zakonu o znanstvenoj djelatnost i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Ja, NEVEN SRŠA *(ime i prezime)* neopozivo izjavljujem da sam suglasan/na s javnom objavom završnog/diplomskog (*obrisati nepotrebno*) rada pod naslovom ULOGA REVERZIBILNE HIDROELEKTRANE U ELEKTROENERGETSKOM SUSTAVU *(upisatinaslov)* čiji sam autor/ica.

Student/ica:
(upisati ime i prezime)

Neven Yrša
(vlastoručni potpis)