

# Priključak hidroelektrane na prijenosnu elektroenergetsku mrežu

---

**Andrijević, Ivan**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2022**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:782407>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-08-26**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET**

Preddiplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Završni rad

**PRIKLJUČAK HIDROELEKTRANE NA PRIJENOSNU  
ELEKTROENERGETSKU MREŽU**

Rijeka, srpanj 2022.

Ivan Andrijević

0069081224

SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET**

Preddiplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Završni rad

**PRIKLJUČAK HIDROELEKTRANE NA PRIJENOSNU  
ELEKTROENERGETSKU MREŽU**

Mentor: izv.prof.dr.sc. Dubravko Franković

Rijeka, srpanj 2022.

Ivan Andrijević

0069081224

Rijeka, 11. ožujka 2021.

Zavod: **Zavod za elektroenergetiku**  
Predmet: **Električna postrojenja**  
Grana: **2.03.01 elektroenergetika**

## ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Ivan Andrijević (0069081224)**  
Studij: **Preddiplomski sveučilišni studij elektrotehnike**

Zadatak: **Priključak hidroelektrane na prienosnu elektroenergetsku mrežu /  
Hydroelectric power plant grid connection**

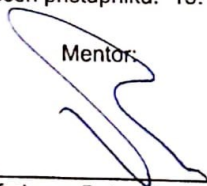
### Opis zadatka:

Priključak hidro-energetskog postrojenja na prienosnu, elektroenergetsku mrežu važan je koncepcijski aspekt koji može utjecati na mogućnost evakuacije snage u svim normalnim i izvanrednim pogonskim uvjetima. U radu je potrebno obraditi uobičajena rješenja priključka većih hidroelektrana na elektroenergetski sustav Republike Hrvatske. Na primjeru jednog konkretnog hidro-energetskog postrojenja prikazati metodologiju izbora i dimenzioniranja opreme u priključnom, visokonaponskom postrojenju.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

*Ivan Andrijević*

Zadatak uručen pristupniku: 15. ožujka 2021.

Mentor:  


Izv. prof. dr. sc. Dubravko Franković

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:



Prof. dr. sc. Viktor Sučić

IZJAVA:

*Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno služeći se stečenim znanjem na fakultetu i  
navedenom literaturom.*

Rijeka, srpanj 2022.

*Ivan Andrijević*

Ivan Andrijević

# SADRŽAJ

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| <b>1</b>  | <b>Uvod.....</b>  | <b>1</b>  |
| <b>2</b>  | <b>Hidroelektrane.....</b>  | <b>2</b>  |
| 2.1       | Hydroenergija.....  | 2         |
| 2.2       | Prijenosna mreža i hidroelektrane u RH.....                       | 3         |
| <b>3</b>  | <b>Glavni dijelovi hidroelektrane .....</b>                       | <b>6</b>  |
| 3.1       | Brana.....  | 7         |
| 3.2       | Dovodni tunel .....   | 7         |
| 3.3       | Tlačni cjevovod .....   | 8         |
| 3.4       | Vodna komora .....  | 9         |
| 3.5       | Strojarnica.....  | 9         |
| 3.6       | Generatori .....  | 10        |
| 3.7       | Vodne turbine .....   | 13        |
| 3.8       | Rasklopno postrojenje .....                                       | 15        |
| <b>4</b>  | <b>Glavni dijelovi rasklopnih postrojenja.....</b>                | <b>19</b> |
| 4.1       | Sabirnice .....   | 19        |
| 4.2       | Rastavljači .....   | 28        |
| 4.3       | Prekidači .....   | 29        |
| <b>5</b>  | <b>Jednopolna shema i vlastita potrošnja hidroelektrane .....</b> | <b>31</b> |
| 5.1       | Blok-spoj generator-transformator .....                           | 33        |
| <b>6</b>  | <b>Hidroelektrana Rijeka .....</b>                                | <b>35</b> |
| 6.1       | Priključak HE Rijeka na elektroenergetski sustav RH .....         | 36        |
| <b>7</b>  | <b>ZAKLJUČAK.....</b>   | <b>40</b> |
| <b>8</b>  | <b>LITERATURA .....</b>   | <b>41</b> |
| <b>9</b>  | <b>SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI.....</b>                              | <b>42</b> |
| <b>10</b> | <b>SUMMARY AND KEY WORDS .....</b>                                | <b>43</b> |

# 1 Uvod

Već od davnih dana ljudi koriste vodu, kao obnovljivi izvor energije, za stvaranje mehaničke energije. Najraniji način korištenja vode kao izvora energije bio je u obliku vodenica koje koriste hidroenergiju za navodnjavanje i pogon mehaničkih uređaja kao što su mlinovi za žito, lučke dizalice, dizala, strojevi u tekstilnoj industriji, mehanički čekići i slično. Danas se snaga vode većinom koristi za stvaranje obnovljive hidro-električne energije. Svake godine raste potražnja za korištenjem energije dobivene pomoću hidroelektrana te se svake godine povećava postotak energije dobivene iz obnovljivih izvora. Električna energija nastala u hidroelektranama je privlačan alternativan način dobivanja energije za razliku od fosilnih goriva jer ne proizvodi direktno ugljikov dioksid i druge zagađivače atmosfere. Nedostatak ovakve konstantne proizvodnje električne energije je potreba za velikim akumulacijskim jezerima, koja dovode do uništavanja lokalnih ekosustava, preseljenja ljudi koji žive u okolici te moguće katastrofe uzrokovane popuštanjem i uništavanjem brane zbog loše gradnje ili prirodne katastrofe.

Zadatak ovog završnog rada je objasniti uobičajene načine priključka većih hidroelektrana na elektroenergetski sustav Republike Hrvatske i na konkretnom primjeru prikazati metodologiju izbora i dimenzioniranje opreme u priključnom visokonaponskom postrojenju. Tijekom ovog rada opisat će se dijelovi i način rada hidroelektrana te pokazati na koje se sve načine mogu priključiti hidro-energetska postrojenja na prijenosnu mrežu i potrebnu metodologiju za izbor opreme potrebne za priključak.

## 2 Hidroelektrane

Hidroelektrane su vrsta postrojenja koja pretvara potencijalnu energiju vode prvo u kinetičku, zatim u mehaničku te u konačnici u električnu energiju. Pod naziv hidroelektrana spadaju i postrojenja koja služe za akumulaciju, dovođenje i odvođenje vode, pretvaranje energije, transformaciju i prijenos energije te postrojenja za upravljanje cijelim sustavom.

Prve prave hidroelektrane počinju se pojavljivati krajem 19. stoljeća, točnije 1881. godine prva moderna hidrocentrala otvorena je na Nijagarinim slapovima te počela proizvoditi električnu energiju. 1895. godine počinje s radom druga u svijetu, ali prva u Europi i Republici Hrvatskoj hidroelektrana Jaruga na rijeci Krki. Hidroelektrane su do danas razvile visok stupanj pouzdanosti i isplativosti, najviše jer služe kao jedan od glavnih izvora obnovljive energije te zbog mogućnosti konstantne pretvorbe energije za razliku od vjetroelektrana koje ovise o vremenskim uvjetima tj. vjetru.

### 2.1 Hidroenergija

Hidroenergija, poznatija pod nazivima energija vode ili hidraulička energija je energija koja se dobiva iz energije tekuće vodene mase. Potencijalna ili kinetička energiju vode koristi se kao konstantan i održiv izvor mehaničke i električne energije. Pretvorba u električnu energiju je najčešća suvremena primjena hidroenergije, a predstavlja oko 15.8% svjetske proizvodnje električne energije s prosječnim godišnjim rastom od 2.1%. Proračun raspoložive snage na vratilu turbine određuje se uz pomoć protoka, visine sa koje voda pada i ubrzanja sile teže prema formuli:

$$P = g \Delta h Q \rho \eta \quad [W] \quad (2.1)$$

gdje je:

|            |  |
|------------|--|
| $P$        | <i>raspoloživa snaga</i>                                 |
| $\eta$     | <i>učinkovitost turbine</i>                              |
| $\rho$     | <i>gustoća vode u kg/m<sup>3</sup></i>                   |
| $Q$        | <i>protok vode u m<sup>3</sup>/s</i>                     |
| $g$        | <i>akceleracija gravitacijske sile u m/s<sup>2</sup></i> |
| $\Delta h$ | <i>visinska razlika u metrima</i>                        |



## 2.2 Prijenosna mreža i hidroelektrane u RH

U 2020. Godini HEP je raspolagao sa 17.809 TWh proizvedene i kupljenje električne energije. Od tih 17.809 TWh 5.338 TWh je proizvedeno u hidroelektranama Republike Hrvatske što čini gotovo 30% ukupne električne energije. Hidroelektrane čine više od polovice svih elektrana u hrvatskom elektroenergetskom sustavu. U pogonu su 17 velikih hidroelektrana (više od 10 MW), oko 20 malih hidroelektrana (od 0.5 do 10 MW) te nekolicina mini i mikro hidroelektrana. Najveća hidroelektrana u RH je HE Zakućac koja proizvodi gotovo trećinu ukupne energije proizvedene u hrvatskim hidroelektranama.

Tablica 2.1 Popis velikih hidroelektrana Republike Hrvatske i njihova raspoloživa snaga 2021. godine

| Hidroelektrana      | Raspoloživa snaga(MW) |
|---------------------|-----------------------|
| <b>HE Zakućac</b>   | 539,15                |
| <b>HE Senj</b>      | 216                   |
| <b>He Dubrovnik</b> | 126 u RH + 126 u BiH  |
| <b>HE Varaždin</b>  | 94,635                |
| <b>HE Orlovac</b>   | 237                   |
| <b>RHE Velebit</b>  | 276                   |
| <b>HE Čakovec</b>   | 77,44                 |
| <b>HE Dubrava</b>   | 79,78                 |
| <b>HE Gojak</b>     | 56                    |
| <b>HE Vinodol</b>   | 90                    |
| <b>HE Đale</b>      | 40,8                  |
| <b>HE Miljacka</b>  | 24                    |
| <b>HE Peruća</b>    | 61,2                  |
| <b>HE Rijeka</b>    | 36,8                  |
| <b>HE Sklope</b>    | 22,5                  |
| <b>HE Kraljevac</b> | 46,4                  |
| <b>HE Lešće</b>     | 42,29                 |

Prijenosna mreža je jedan od glavnih dijelova svakog elektroenergetskog sustava. Povezuju međusobno velike elektrane s velikim potrošačkim centrima prenoseći velike količine energije na velike udaljenosti. Prijenosna mreža u Republici Hrvatskoj je u vlasništvu HOPS-a (Hrvatski operator prijenosnog sustava). Mrežu čine transformatorske stanice, rasklopna postrojenja i zračni vodovi te kabeli. Naponske razine prijenosne mreže su 400, 220 i 110 kV

Tablica 2.2 Podaci prijenosne mreže HOPS-a 2020.g.

| Naponska razina   | 400 kV    | 220 kV    | 110 kV    |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|
| Duljine vodova    | 1246,4 km | 1331,1 km | 5180,7 km |
| Broj Trafostanica | 6         | 15        | 162       |

Elektroenergetski sustav se temelji na sigurnom radu svih svojih dijelova. Čine ga:

- Zračni i kabelski vodovi koji prenose električnu energiju između rasklopnih postrojenja na velike udaljenosti
- Mrežni transformatori koji povezuju mreže različitih naponskih razina:
  - prijenosne i distribucijske,
  - dvije razine prijenosne mreže

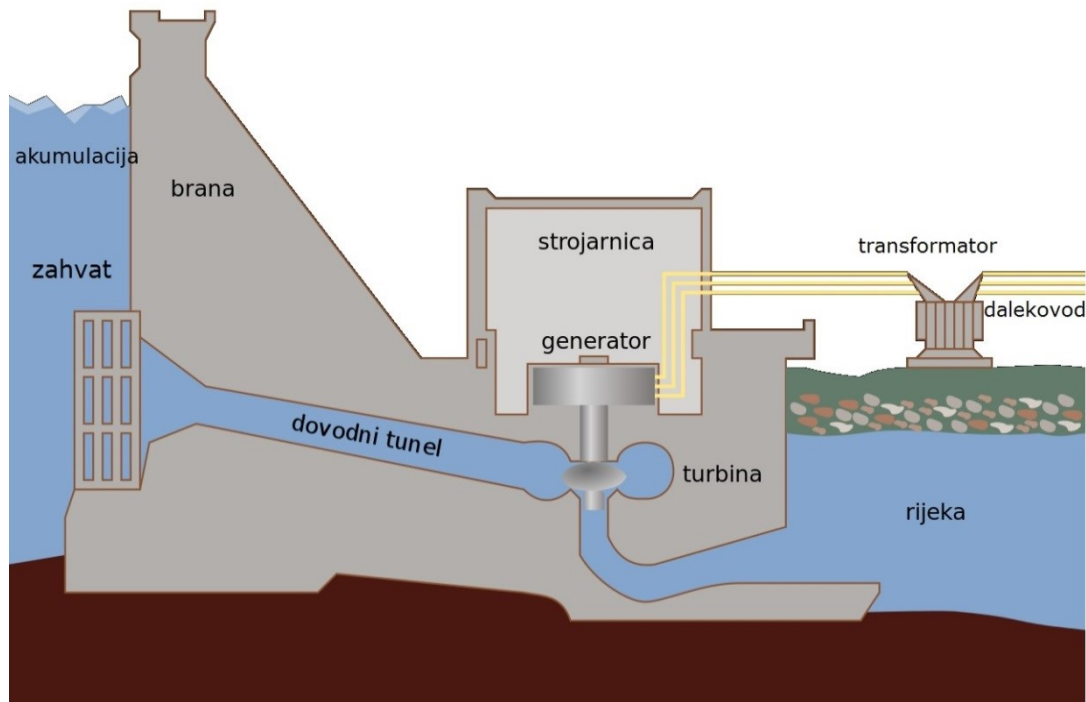
Kod priključenja korisnika na mrežu operator mora osigurati nazivnu frekvenciju od 50 Hz, nazivni napon, valni oblik napona i dopuštenu jačinu treperenja napona.



Slika 2.1. Shema elektroenergetskog sustava Republike Hrvatske

### 3 Glavni dijelovi hidroelektrane

Princip rada hidroelektrane je ustvari vrlo jednostavan. Voda pod pritiskom dovodi se na lopatice hidrauličke turbine koje pretvaraju kinetičku energiju vode i energiju tlaka u mehaničku energiju, koja se vratilom prenosi na generator, gdje se posredstvom magnetskog polja pretvara u električnu energiju. Uz pomoć transformatora podiže se napon i smanjuje struja te se energija putem energetske mreže isporučuje potrošačima.

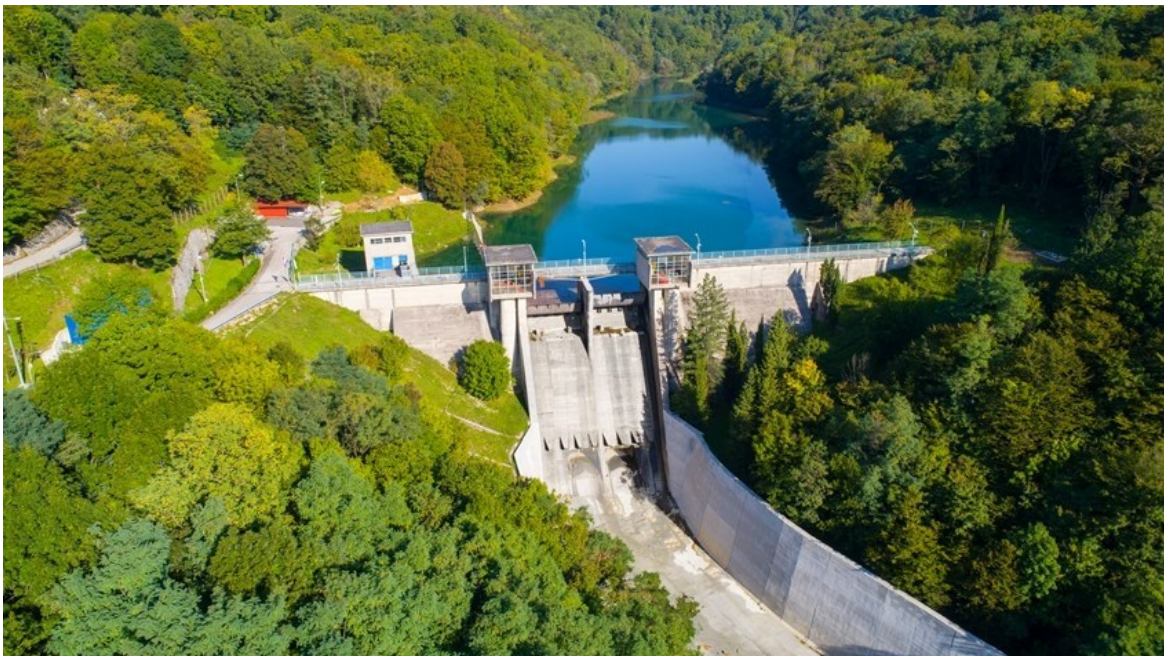


Slika 3.1. Glavni dijelovi hidroelektrane

Hidroelektrane sadrže veliki broj dijelova i komponenata. U nastavku ćemo opisati osnovne dijelove potrebne za rad elektrane.

### 3.1 Brana

Brana je građevina sagrađena preko riječne doline radi stvaranja akumulacijskog jezera. Prvobitna namjena brana je upravljanje i regulacija vodenog toka. Upravljanjem vodenog toka voda se preusmjerava prema zahvatu hidroelektrane. Još jedna zadaća brana je povećanje razine vode i bolje iskorištavanje energije vode zbog veće razlike u visini. Podjela brana je na visoke i ostale gdje se visoke brane smatraju ako zadovoljavaju jedan od sljedećih uvjeta: visina veća od 15 metara, visina veća od 10 metara i dužina dulja od 500 metara, akumulacijska jezera veća od 1 000 000 m<sup>3</sup> ili protok vode veći od 2000 m<sup>3</sup>/s. Sve ostale brane spadaju pod klasifikaciju ostalih brana.

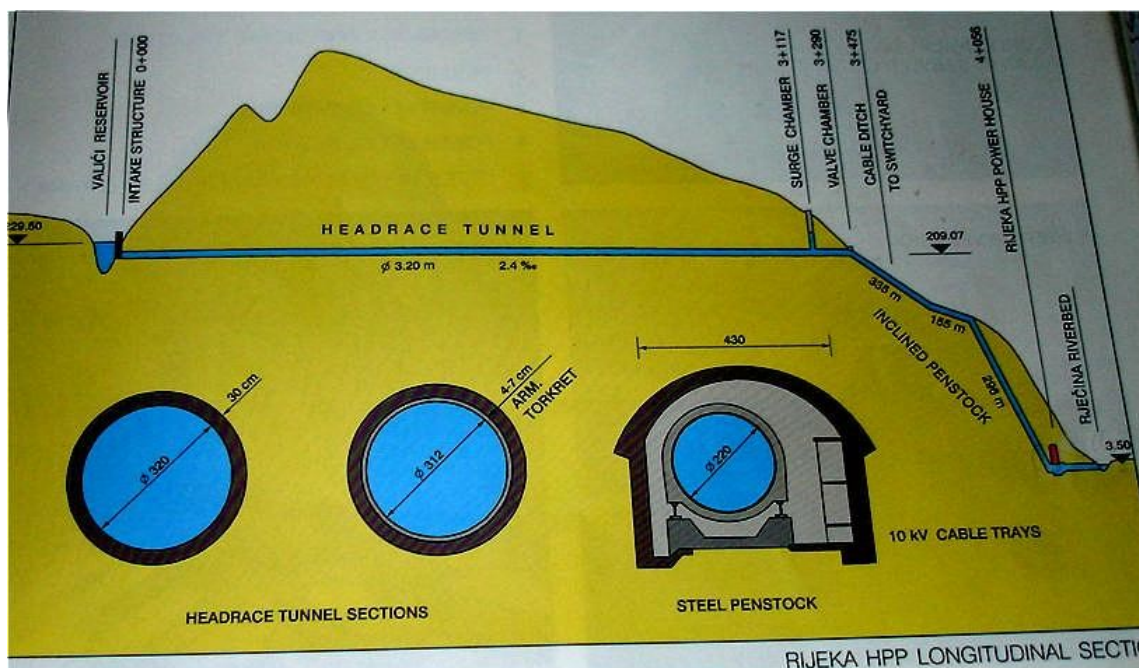


Slika 3.2. Betonska brana HE Rijeka

### 3.2 Dovodni tunel

Dovodni tunel je tunel koji služi za dovod vode. U hidroelektranama najčešće je kružnog presjeka i njegov ulaz je ljevičastog oblika. Voda u tunelu se kreće brzinom oko 3 do 4 m/s, ali pri ulasku u tunel brzina ne smije biti veća od 1.2 m/s. U Republici Hrvatskoj dovodni tuneli se grade do 8m u promjeru.





Slika 3.3. Prikaz dovodnog tunela i vodne komore HE Rijeka

### 3.3 Tlačni cjevovod

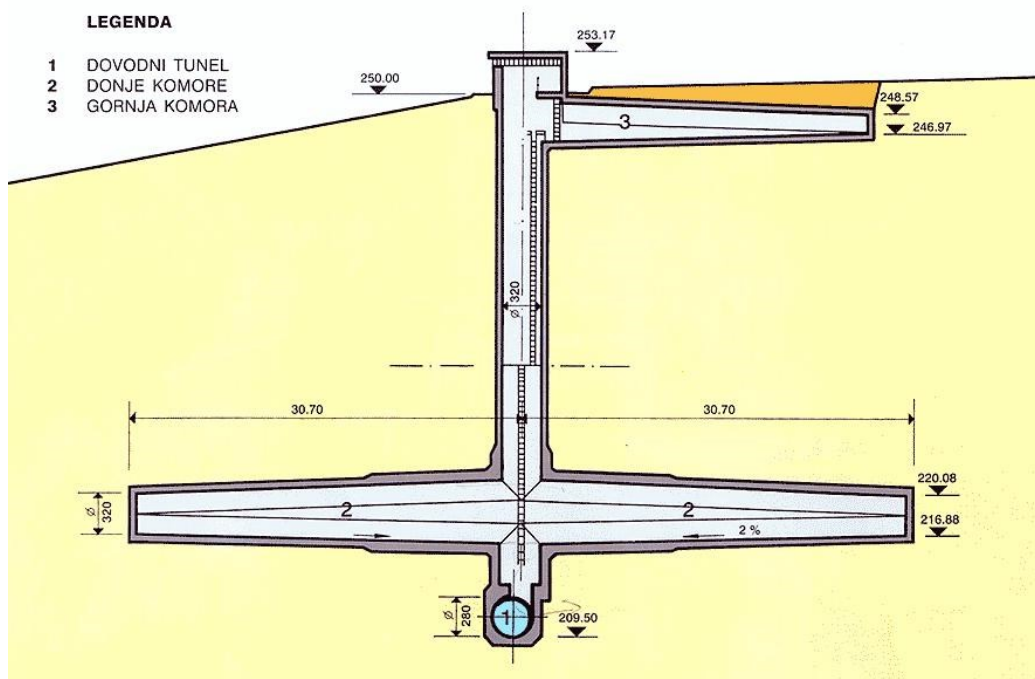
Tlačni cjevovod je cjevovod sa namjenom dovođenja vode iz dovodnog tunela do vodnih turbina. Može biti betonski ili čelični, nad zemljom ili ispod nje. Na ulazu se nalazi zaporni organ sa ulogom sprječavanja protoka vode u slučaju puknuća cijevi. Brzina protoka vode na donjem kraju cjevovoda ne smije biti veća od 6 m/s zbog moguće nagle promjene tlaka tj. vodnog udara.



Slika 3.4. Tlačni cjevovod HE Rijeka

### 3.4 Vodna komora

Vodna komora je krajnji dio dovoda koji služi za ublažavanje posljedica promjena opterećenja. Gradi se ako je dovodni kanal dugačak (10-20 km) i pri pokretanju hidroelektrane vodna masa se ne može dovoljno brzo pokrenuti (10-20 s) da bi na vodnim turbinama stvorila dovoljnu snagu za proizvodnju električne energije. Glavni zadatak vodne komore je da pri ulasku turbine u pogon osigura dio vode prije nego što dovoljno velika količina protekne kroz dovodni tunel i da prihvati dio vode koja prolazi kroz dovodni tunel pri zaustavljanju turbine.



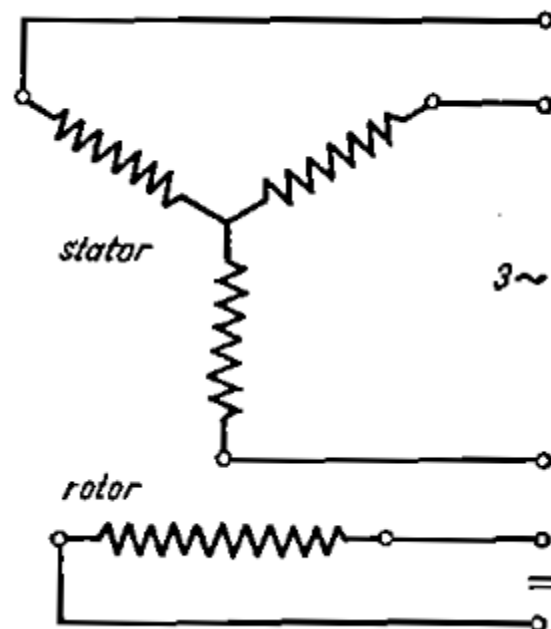
Slika 3.5. Vodna komora u HE Rijeka

### 3.5 Strojarnica

Strojarnica je postrojenje u kojem se potencijalna energija vode pretvara u kinetičku energiju strujanja zatim u mehaničku energiju vrtnje vratila turbine te na kraju u električnu energiju u električnom generatoru. Strojarnice mogu biti nadzemne i podzemne te se u njima još nalazi i upravljački dio i pomoćne komponente za popravke.

### 3.6 Generatori

Za elektromehaničku pretvorbu energije gotovo isključivo se koriste trofazni sinkroni generatori frekvencije 50 Hz. Namot na rotoru napaja se istosmjernom strujom, čije protjecanje stvara magnetski tok uzbude te se u svakom namotu statora induciraju naponi koji su međusobno pomaknuti za  $120^\circ$ . Ako na stezaljke generatora nije priključen teret statorski namot je otvoren i generator je u praznom hodu. U statorskom namotu onda nema padova napona jer ne teku struje, pa je napon na stezaljkama jednak induciranom naponu. Magnetski tok u zračnom rasporu ovisi samo o uzbuđnoj struji jer nema struja u namotima statora.



Slika 3.6. Shema spoja trofaznog sinkronog generatora

#### 3.6.1 Granice opterećenja sinkronog generatora

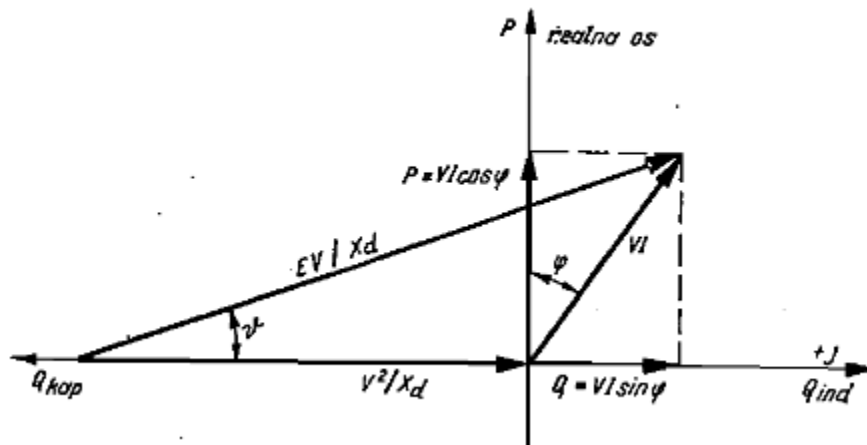
##### 1) Dijagrami snaga

Odnosi u generatoru se prikazuju vektorskim dijagramima. Struja opterećenja u namotu statora zaostaje za faznim naponom  $V$  na stezaljkama generatora za fazni kut  $\rho$ . Ako zanemarimo djelatni otpor namota statora, pad napona je jednak produktu struje  $I$  i sinkrone reaktancije  $X_d$ . Zbroj napona  $V$  na stezaljkama generatora i pada napona  $I X_d$  daje napon uzbude  $E$ . To je napon koji se pojavljuje na stezaljkama kada je struja  $I$  jednaka nuli. Struja  $I$  se rastavlja na uzdužnu komponentu  $I_d$  i poprečnu komponentu  $I_q$ , a pad napona se rastavlja





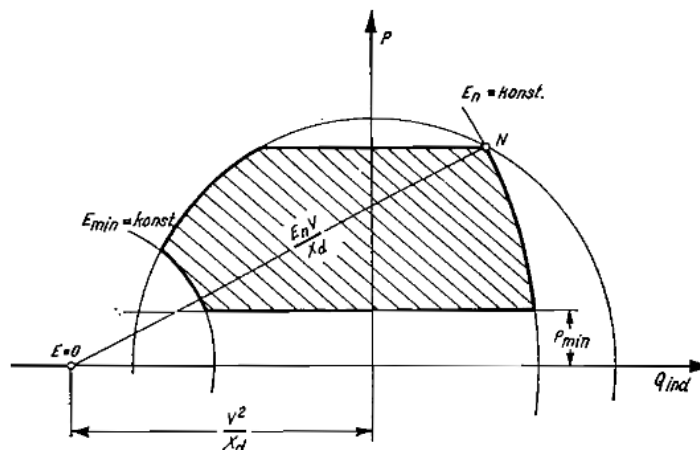
Ako pomnožimo konjugirano kompleksni izraz za struju s naponom  $V$ , dobit ćemo snagu na priključnicama generatora. Ako pretpostavimo da je napon  $V$  na stezaljkama generatora konstantan vektorski dijagram snaga će imati jednak oblik kao i strujni vektorski dijagram. Vektor  $VI$  u vektorskom dijagramu snaga prikazuje prividnu snagu koju daje jedna faza generatora, a projekcije na koordinatne osi prikazuju djelatnu i jalovu snagu.



Slika 3.9. Vektorski dijagram snaga generatora

## 2) Pogonska karta generatora

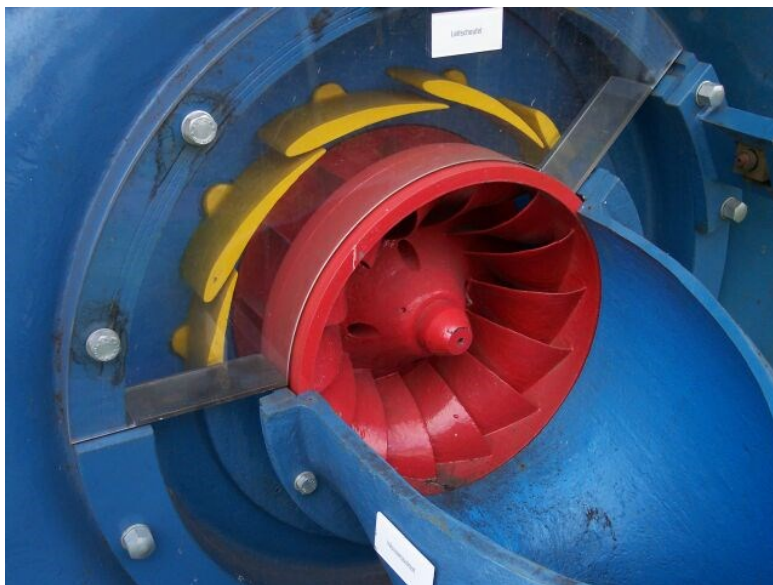
Pogonska karta generatora prikazuje prilike u generatoru dok je on u stacionarnom pogonu uz pretpostavku da je napon na stezaljkama konstantan. Pogonska karta ucrtana je u koordinatni sustav snaga i pokazuje granice opterećenja generatora te njegovu djelatnu i jalovu komponentu.



Slika 3.10. Pogonska karta generatora za  $X_d=0.9$

### 3.7 Vodne turbine

Turbine su energetske strojevi u kojima se mehanička energija vode pretvara u mehaničku energiju vrtnje stroja. Dije se na dva tipa turbina, a to su pretlačne (reakcijske) turbine i turbine slobodnog mlaza (akcijske). Pretlačnim turbinama nazivaju se vodne turbine u kojima je tlak na ulazu u rotor veći od tlaka na izlazu iz rotora. Dio energije tlaka se transformira u kinetičku energiju na rotoru, a dio u statoru. Kod turbina slobodnog mlaza tlak na ulazu u rotor je jednak tlaku na izlazu sa rotora jer se sva energija tlaka transformira u kinetičku energiju vode u statoru. Izvode se dva tipa pretlačnih turbina, a to su Francisova i Kaplanova turbina. Francisova turbina se izvodi s vodoravnim i okomitim vratilom dok se Kaplanova turbina izvodi samo s okomitim vratilom. Danas se izvode tri tipa turbina slobodnog mlaza: Turgonova, Banki-Michellova i Peltonova turbina koja se izvodi s jednom ili više mlaznica. Vodne turbine u hidroelektranama služe kao strojevi za pogon električnog generatora.



Slika 3.11. Francis turbina

Svaki od tipova vodnih turbina pogodan je za određeno područje specifičnog broja okretaja jer o specifičnom broju okretaja ovisi optimalan stupanj djelovanja. Stupanj djelovanja opada sa smanjenjem opterećenja turbine što je veći specifičan broj okretaja turbine. Poželjno je da broj okretaja turbine, a prema tome i generatora koji je neposredno spojen s turbinom, bude što veći jer se tako smanjuju dimenzije turbine i generatora uz konstantnu snagu. Broj okretaja turbine proporcionalan je specifičnom broju okretaja.

$$n_0 = n_s \frac{H_n^4 \sqrt{H_n}}{\sqrt{P}} \quad (3.1)$$

- $n_0$  broj okretaja  
 $n_s$  specifični broj okretaja  
 $H_n$  pad u metrima  
 $P$  snaga u vatima

Za zadanu snagu  $P$  i zadani pad  $H_n$  broj okretaja izvedene turbine  $n_0$  ovisi samo o specifičnom broju okretaja  $n_s$ . Maksimalni dopušteni specifični broj okretaja ovisi o padu, stoga poznavajući pad možemo odrediti maksimalni specifični broj okretaja. Turbina se upotrebljava za pogon sinkronih generatora te stoga njen broj okretaja mora biti jednak sinkronoj brzini vrtnje generatora.

$$n_s = \frac{60 f}{p} \quad (3.2)$$

- $n_s$  broj okretaja sinkronog generatora  
 $f$  frekvencija  
 $p$  broj pari polova

U slučajevima da se broj okretaja turbine  $n_0$  razlikuje od broja okretaja sinkronog generatora odabire se sljedeći niži sinkroni broj okretaja kako bi se ostalo u granicama maksimalnog specifičnog broja okretaja. Na broj okretaja vodne turbine može se utjecati smanjujući maksimalni protok, odnosno smanjujući snagu turbine.



Slika 3.12. Peltonova turbina

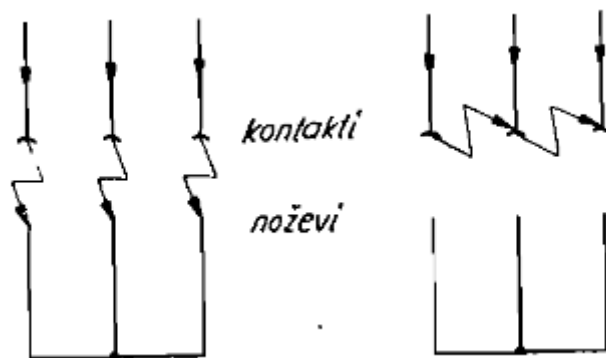
### 3.8 Rasklopno postrojenje

Rasklopna postrojenja su postrojenja koja služe za razgranjivanje i transformaciju struje i napona. Izbor rasklopnog postrojenja ovisi o nizu faktora, među koje možemo navesti nazivni napon, tip sklopke, raspoloživ prostor za izgradnju, preglednost i dr. S obzirom na izvedbu postoji znatna razlika između rasklopnih postrojenja srednjeg napona (od 6 do 35 kV) i visokog napona (od 60 do 400 kV). Razlikujemo otvorena i oklopljena postrojenja. U otvorena ubrajamo i ona postrojenja sa vatrostalnim pregradama. Rasklopna postrojenja za srednje napone izvode se i kao otvorena i kao oklopljena postrojenja, a rasklopna postrojenja za visoke napone se pretežno izvode kao otvorena postrojenja bez pregrada zbog opasnosti od stvaranja električnog luka, međutim primjenjuju se i metalom oklopljena, plinom izolirana postrojenja visokog napona. S obzirom na smještaj, rasklopna postrojenja mogu biti u zgradama i na slobodnom. Otvorena rasklopna postrojenja za srednje napone se izvode u zgradama dok se otvorena postrojenja za visoke napone izvode na slobodnom. Oklopljena rasklopna postrojenja se mogu smjestiti i na slobodnom i u zgradi.

#### 3.8.1 Otvorene izvedbe rasklopnih postrojenja srednjeg napona

##### 1) Luk u rasklopnom postrojenju

Pojava luka u rasklopnom postrojenju je posljedica proboja izolacije među fazama ili između faze i zemlje, do čega dolazi zbog povišenja napona ili smanjena izolacije. Imamo dva djelovanja luka ovisna o struji kratkog spoja, a to su isijavanje topline i povišenje tlaka zbog porasta temperature. Snaga luka je jednaka umnošku pada napona i struje luka i jednaka je za luk između kontakata i noževa rastavljača i međusobnog kontakta rastavljača.



Slika 3.13. Prikaz luka između rastavljača i noževa i prikaz luka između rastavljača

## 2) Izvedbe s kabelskim odvodom

Veza između rasklopnog postrojenja i vodova se izvodi kabelom iako to smanjuje sigurnost pogona. Kod postrojenja male snage nije potrebna zaštitna pregrada između rastavljača i sabirnica, a za veće struje kratkog spoja potrebno je staviti zaštitnu pregradu da bi se zaštitile sabirnice od djelovanja luka.

## 3) Izvedbe s neizoliranim odvodom

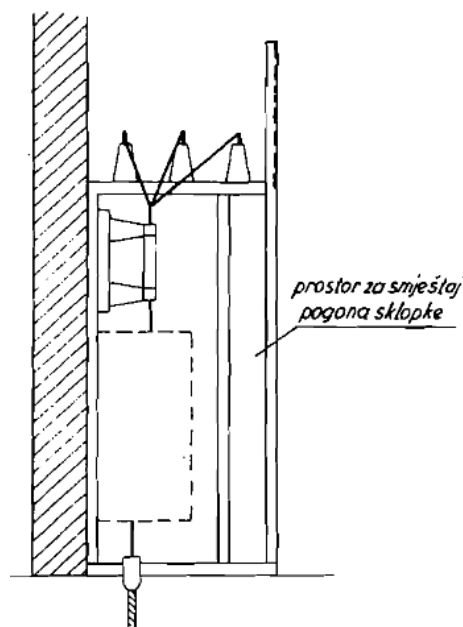
Iako se najčešće koriste kabelski odvodi u izvedbi postrojenja, u nekim slučajevima se želi izbjeći izvedba s kabelom i postrojenja se izvode s neizoliranim odvodima.

### 3.8.2 Oklopljene izvedbe rasklopnih postrojenja srednjeg napona

Rasklopna postrojenja oklopljena limom imaju, u odnosu na otvorena postrojenja, niz prednosti kao što su potreba za manjom površinom, dobra zaštita od dodira i prašine, lagano proširenje i premještanje postrojenja, brza i jednostavna montaža i dr. Razlikujemo unutarnja i vanjska oklopljena postrojenja. Prema mjestu postavljanja i prema izvedbi razlikujemo postrojenja s nepomično montiranim aparatima i postrojenja s izvlačivim aparatima.

#### 1) Izvedba s nepomično montiranim aparatima

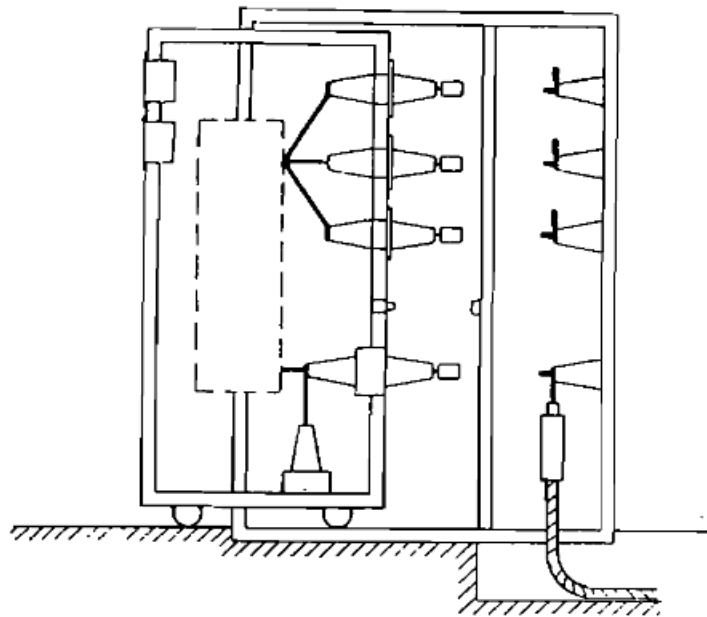
Izvedbe s nepomično montiranim aparatima se ne razlikuju u principu od otvorenih rasklopnih postrojenja. Osnovna razlika je ta što su svi aparati montirani u tvornici te se na mjestu ugradnje izvode samo priključci.



Slika 3.14. Skica presjeka unutarnjeg oklopljenog postrojenja s nepomično montiranim aparatima

## 2) Izvedba s pomičnim aparatima

Izvedba s pomičnim aparatima omogućuje konstrukciju bez rastavljača i time se smanjuju dimenzije ćelija. U svim slučajevima prekidanje strujnog kruga se vrši sklopkom koja preuzima ulogu rastavljača. U principu razlikujemo dva tipa izvedbe s pomičnim aparatima, a to su izvedba sa sklopkama normalne konstrukcije i izvedba sa sklopkama čija je konstrukcija prilagođena izvedbi s pomičnim aparatima. Još se razlikuju i prema izvedbi sabirnica, a to su izvedba s golim neizoliranim sabirnicama i izvedba s međusobno izoliranim sabirnicama.



Slika 3.15. Skica presjeka ćelije oklopljenog postrojenja s pomičnim aparatima i normalnom izvedbom sklopke

### 3.8.3 Izvedbe rasklopnih postrojenja visokog i vrlo visokog napona

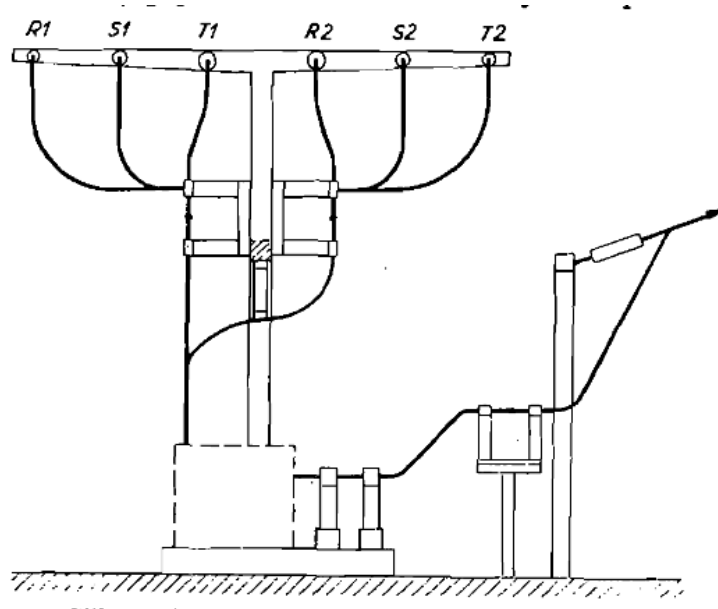
#### 1) Rasklopna postrojenja u zgradi

Rasklopna postrojenja visokog napona se većinom izvode na otvorenom, ali se mogu iznimno smjestiti u zgradama u slučajevima smještanja unutar naseljenog područja ili industrijskog postrojenja. Danas se koriste GIS (Gas insulated substation) postrojenja jer zauzimaju mali prostor. GIS postrojenja su plinom izolirana elektroenergetska postrojenja koja koriste SF<sub>6</sub> plin kao izolator. SF<sub>6</sub> (sumporov heksafluorid) je umjetni plin koji se dobiva sintezom fluora i sumpora. Nema okusa, mirisa i boje te nije otrovan i nije zapaljiv. GIS postrojenja imaju metalna kućišta koja omogućuju zaštitu od direktnog dodira napona te

zaštićuju unutrašnjost postrojenja od vanjskih utjecaja okoliša. Prednost korištenja SF<sub>6</sub> plina u odnosu na zrak je u većoj efikasnosti gašenja električnog luka. Oklopljena postrojenja se izvide u jednopolnoj i trolnoj izvedbi gdje je u jednopolnoj izvedbi svaki pol elemenata smješten u zasebnom kućištu, dok su u trolnoj izvedbi sva tri pola elemenata smještena u jedno kućište.

## 2) Rasklopna postrojenja na otvorenom

Rasklopna postrojenja visokog napona se većinom izvide na otvorenom te su elementi konstruirani i izvedeni da izdrže sve vanjske utjecaje. Razvijeno je mnogo izvedbi rasklopnih postrojenja s težnjom da se smanje potrebne investicije, poboljšaju pogonska svojstva i da se omogući njihova upotreba za posebne zahtjeve (trostruke sabirnice, U-sabirnice, spojno polje i dr.).



Slika 3.16. Visoka izvedba rasklopnog postrojenja najviših napona



## 4 Glavni dijelovi rasklopnih postrojenja

### 4.1 Sabirnice

Sabirnice su integralni dijelovi rasklopnih postrojenja. Služe za povezivanje vodova koji dovode energiju s vodovima koji ju odvođe. Sabirnice se izvode od neizoliranih bakrenih ili aluminijskih vodiča. Za rasklopna postrojenja nazivnog napona do 35 kV se koriste okrugli, plosnati ili U-profil dok se za rasklopna postrojenja visokog napona koriste užad ili cijevi. Izbor presjeka sabirnica se vrši s obzirom na:

- Maksimalnu struju u normalnom pogonu
- Povišenje temperature sabirnice za vrijeme trajanja kratkog spoja
- Na mehaničko naprezanje u slučaju kratkog spoja

#### 1) Dimenzioniranje s obzirom na maksimalnu struju u normalnom pogonu

Maksimalna struja u normalnom pogonu je najveća struja koja u normalnom pogonu prolazi kroz najopterećeniji dio sabirnice. Prema tom najopterećenijem dijelu dimenzioniraju se cijele sabirnice. Zagrijavanje sabirnice iznad temperature okoline je mjerilo za određivanje dopuštenog opterećenja sabirnice uz pretpostavku da maksimalna struja traje neograničeno dugo. Za dopuštenu temperaturu se koristi 30°C iznad temperature okoline. Zagrijavanje plosnatih profila sabirnica određeno je pretpostavkom da je dulja stranica presjeka okomita na površinu poda te da je razmak pojedinih vodiča jednak širini vodiča. Položaj vodiča utječe na odvođenje topline te se dopuštena trajna opterećenja moraju pomnožiti s faktorom korekcije. Ako je dopušteno veće ili manje povišenje temperature od 30°C onda se trajno opterećenje vodiča dobiva po formuli:

$$I = I_{30} \frac{\sqrt{\Delta\vartheta}}{30} \quad (4.1)$$

gdje je:  $I$  dopušteno opterećenje vodiča

$I_{30}$  dopušteno opterećenje vodiča uz povišenje od 30°C

$\Delta\vartheta$  dopušteno povišenje temperature u °C

Bojanjem sabirnica se povećava odvođenje topline pa su zbog toga posebno određena dopuštena opterećenja za obojane i za nebojane vodiče. Zbog čvrstoće u postrojenjima do

35 kV ne izvode se sabirnice profila manjeg od 40 x 5 mm dok za napone od 110 kV i više minimalni presjek određen je zahtjevom sprečavanja pojave korone. Za rasklopna postrojenja nazivnog napona 110 kV minimalni presjek je 95 mm<sup>2</sup>, a minimalni promjer 30 mm dok je za nazivni napon od 220 kV minimalni presjek 300 mm<sup>2</sup>, a minimalni promjer 50 mm.

## 2) Dimenzioniranje s obzirom na ugrijavanje za vrijeme kratkog spoja

Zagrijavanje vodiča u nepovoljnom trenutku može izazvati oštećenje sabirnice. Povišenje temperature nastaje brzo i može se pretpostaviti da se za vrijeme trajanja kratkog spoja toplina ne odvodi u okolinu, pa je ugrijavanje proporcionalno toplini koja se stvara u vodiču. Uz ove pretpostavke možemo postaviti jednadžbu:

$$G c \Delta\vartheta = I_t^2 r t \quad (4.2)$$

gdje je:  $G$  masa vodiča u kg

$c$  specifična toplina vodiča u Ws/kg °C

$\Delta\vartheta$  povišenje temperature u °C za vrijeme kratkog spoja

$I_t$  struja mjerodavna za ugrijavanje u A

$t$  vrijeme trajanja kratkog spoja u s

$r$  djelatni otpor vodiča u  $\Omega$

Lijeva i desna strana jednadžbe predstavljaju toplinu razvijenu u vodiču za vrijeme trajanja kratkog spoja. Otpor  $r$  može se izraziti preko duljine  $l$ , presjeka  $q$  i specifičnog otpora  $\rho$ . Masu vodiča  $G$  možemo izraziti kao umnožak gustoće vodiča  $y$  presjeka  $q$  i duljine  $l$  te dobivamo izraz:

$$\Delta\vartheta = \frac{I_t^2}{q^2} t \frac{\rho}{y c} \quad (4.3)$$

gdje je:  $y$  gustoća vodiča u kg/m<sup>3</sup>

$c$  specifična toplina vodiča u Ws/kg °C

$\Delta\vartheta$  povišenje temperature u °C za vrijeme kratkog spoja

$I_t$  efektivna vrijednost struje kratkog spoja u A

$t$  vrijeme trajanja kratkog spoja u s

$l$  duljina u m

$q$  presjek u m<sup>2</sup>

$\rho$  specifičan otpor u  $\Omega$  m<sup>2</sup>/m

U obzir se treba uzeti utjecaj promjene temperature, prilikom određivanja specifičnog otpora, prema relaciji:

$$\rho_1 = \rho_0[1 + \alpha(\vartheta_1 - \vartheta_0)] \quad (4.4)$$

gdje je:  $\alpha$  temperaturni koeficijent

$\rho_0$  specifični otpor na temperaturi  $\vartheta_0$

$\vartheta_1$  temperatura na kraju kratkog spoja

Srednji specifični otpor možemo dobiti iz relacije:

$$\rho = \rho_0[1 + \alpha\left(\frac{\vartheta_1 + \vartheta_2}{2} - \vartheta_0\right)] \quad (4.5)$$

Pri određivanju potrebnog presjeka koristimo sljedeći izraz izveden iz jednadžbe 4.3.

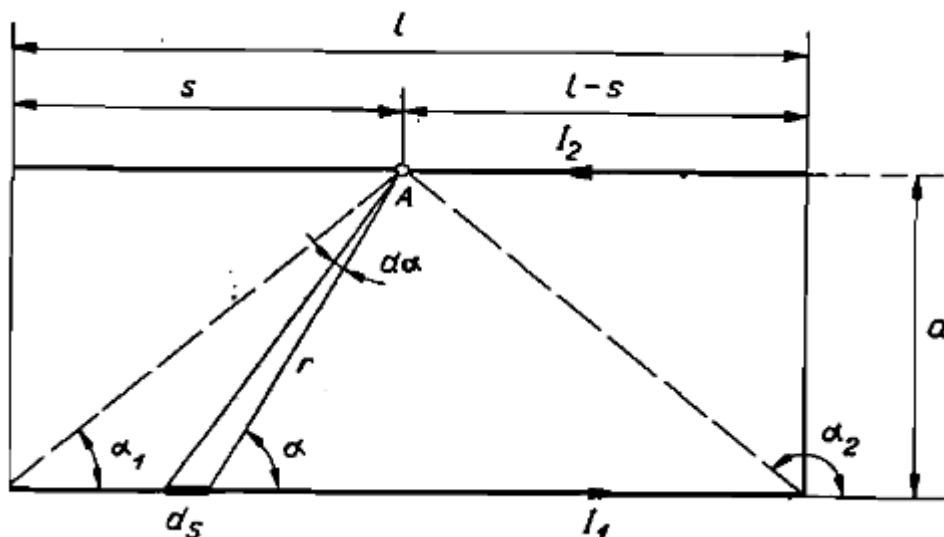
$$q = I_t \sqrt{t} \sqrt{\frac{\rho}{y c \Delta\vartheta}} \quad (4.6)$$

Presjek određen prema formuli 4.6 je presjek potreban za sprečavanje povišenja temperature vodiča iznad dopuštene granice za vrijeme trajanja kratkog spoja.

### 3) Dimenzioniranje s obzirom na mehaničko naprezanje u slučaju kratkog spoja

#### a) Sile među paralelnim vodičima

Paralelni vodiči kroz koje teku struje  $I_1$  i  $I_2$  prikazani su na slici 4.1. Između njih se stvara privlačna ili odbojna sila.



Slika 4.1. Prikaz paralelnih vodiča za određivanje sila

Promjenu magnetskog polja možemo odrediti iz izraza:

$$dH = \frac{I}{4\pi} \frac{ds \sin \alpha}{r^2} \quad (4.7)$$

gdje je:  $dH$  promjena magnetskog polja

$I$  struja koja protječe kroz vodič

$ds$  element vodiča

$r$  udaljenost između elementa  $ds$  i točke  $A$

$\alpha$  kut između elementa  $ds$  i  $r$

Element vodiča  $ds$  možemo definirati kao:

$$ds = \frac{r da}{\sin \alpha} \quad (4.8)$$

Udaljenost između elementa  $ds$  i točke  $A$  u kojoj definiramo jakost magnetskog polja dobivamo iz izraza:

$$r = \frac{a}{\sin \alpha} \quad (4.9)$$

gdje je:  $r$  udaljenost između elementa i točke

$a$  udaljenost između točke  $A$  i vodiča elementa  $ds$

$\alpha$  kut između elementa  $ds$  i  $r$

Uvrštavanjem izraza za udaljenost  $r$  i element vodiča  $ds$  u izraz 4.7 dobivamo:

$$dH = \frac{I}{4\pi} \frac{da \sin \alpha}{a} \quad (4.10)$$

Integriranjem prijašnjeg izraza u granicama  $a_1$  do  $a_2$  dobivamo izraz za jakost magnetskog polja u točki  $A$ :

$$H(A) = \frac{I}{4\pi a} \int_{a_1}^{a_2} \sin \alpha da = \frac{I}{4\pi a} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) \quad (4.11)$$

Udaljenost točke  $A$  od kraja paralelnog vodiča možemo definirati sa  $s$  te izraz 4.11 napisati kao:

$$H(s) = \frac{I}{4\pi a} \left[ \frac{s}{\sqrt{s^2 + a^2}} + \frac{l-s}{\sqrt{(l-s)^2 + a^2}} \right] \quad (4.12)$$

gdje je:  $H(s)$  jakost magnetskog polja u točki  $A$

*a udaljenost između točke A i vodiča elementa ds*

*s udaljenost točke A od kraja vodiča*

*l dužina vodiča*

*I struja kroz vodič*

Za beskonačno dug vodič jakost magnetskog polja bilo koje točke na paralelnom vodiču iznosi:

$$H = \frac{I}{2\pi a} \quad (4.13)$$

Silu na jedinicu duljine elementa  $ds$  kroz koji protječe struja  $I_2$ , a nalazi se u magnetskom polju struje  $I_1$  možemo odrediti iz jednadžbe:

$$\frac{dF}{ds_2} = I_2 B_1 \quad (4.14)$$

gdje je:  $B_1$  magnetska indukcija

$I_2$  struja kroz vodič

$\frac{dF}{ds_2}$  sila po jedinici duljine

Magnetska indukcija  $B_1$  odgovara jakosti magnetskog polja  $H_1$ , struje  $I_1$  te vrijedi:

$$B_1 = \mu H_1 \quad (4.15)$$

gdje je:

$$\mu = 4\pi 10^{-7} \text{ [H/m]} \quad (4.16)$$

Ako uzmemo u obzir udaljenost točke A od kraja vodiča dobijemo izraz za silu na vodič određene duljine u točki A uzimajući u obzir relaciju 4.12.

$$\frac{dF}{ds_2} = \frac{I_1 I_2}{a} 10^{-7} \left[ \frac{s}{\sqrt{s^2 + a^2}} + \frac{l-s}{\sqrt{(l-s)^2 + a^2}} \right] \text{ [N/m]} \quad (4.17)$$

gdje je:  $I_2$  struja kroz vodič

$I_1$  struja kroz vodič

$a$  udaljenost između točke A i vodiča elementa  $ds$

$s$  udaljenost točke A od kraja vodiča

$l$  dužina vodiča

Za vodiče beskonačne duljine, silu na jedinicu dobivamo uzimajući u obzir relaciju 4.13:

$$\frac{dF}{ds_2} = 2 \frac{I_1 I_2}{a} 10^{-7} \text{ [N/m]} \quad (4.18)$$

Ukupna sila koja djeluje na vodič je definirana izrazom:

$$F = \int \frac{dF}{ds_2} ds_2 \text{ [N]} \quad (4.19)$$

Integriranjem izraza 4.17 dobivamo izraz za ukupnu silu na vodič duljine  $l$ .

$$F = 2 \frac{I_1 I_2}{a} 10^{-7} (\sqrt{l^2 + a^2} - a) \text{ [N]} \quad (4.20)$$

gdje je:  $I_2$  struja kroz vodič

$I_1$  struja kroz vodič

$a$  udaljenost između točke  $A$  i vodiča elementa  $ds$

$l$  dužina vodiča

$F$  ukupna sila

Ukupna sila na vodič iste duljine s pretpostavkom da raspodjela sila odgovara vodiču beskonačne duljine se dobiva integriranjem relacije 4.18 što iznosi:

$$F_\infty = 2 \frac{I_1 I_2}{a} l 10^{-7} \text{ [N]} \quad (4.21)$$

Odnos između ukupne sile s obzirom na konačne duljine vodiča i ukupne sile s pretpostavkom beskonačno dugog vodiča definiran je izrazom:

$$\frac{F}{F_\infty} = \sqrt{1 + \frac{a^2}{l^2}} - \frac{a}{l} \quad (4.22)$$

#### b) Sile među vodičima koji nisu paralelni

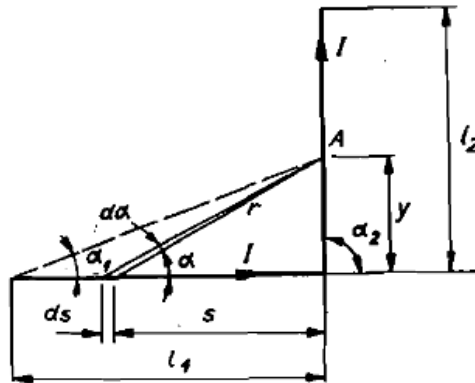
U rasklopnim postrojenjima postoje spojevi aparata sa sabirnicama koji nisu paralelni. U praksi se ne određuju naprezanja u spojnim vodičima, nego se njihove dimenzije odabiru u odnosu na dimenzije sabirnica ili prema približnim formulama.

Kod vodiča savijenog u obliku slova „L“, analognim razmatranjem dolazimo do relacije za jakost polja u točki  $A$ :

$$H(A) = \frac{I}{4\pi y} \int_{a_1}^{a_2} \sin a \, da = \frac{I}{4\pi y} \cos a_1 \quad (4.23)$$

Uzimajući u obzir sliku 4.2 možemo zamijeniti izraz  $\cos \alpha_1$  s pripadajućim oznakama te dobivamo izraz:

$$H(A) = \frac{I}{4\pi y} \frac{l_1}{\sqrt{l_1^2 + y^2}} \quad (4.24)$$



Slika 4.2. Određivanje sile između vodiča spojenih u obliku slova „L“

S obzirom na relacije 4.14 i 4.16 dobivamo relaciju za silu po jedinici duljine:

$$f = \frac{dF}{dy} = \frac{I^2}{y} \frac{l_1}{\sqrt{l_1^2 + y^2}} 10^{-7} \text{ [N/m]} \quad (4.25)$$

Uz pretpostavku da je  $l_1 = \infty$  sila koja djeluje na jedinicu duljine okomito postavljenog vodiča jednaka je:

$$f_{\infty} = \frac{dF}{dy} = \frac{I^2}{y} 10^{-7} \text{ [N/m]} \quad (4.26)$$

Ukupna sila koja djeluje na vodič dobiva se iz relacije 4.19 uz granice integracije od  $d/2$  do  $l_2$  te kad je  $l_1$  konačna duljina ukupna sila iznosi:

$$F = I^2 \ln \frac{2l_2}{d} \frac{l_1 + \sqrt{l_1^2 + \frac{d^2}{4}}}{l_1 + \sqrt{l_1^2 + l_2^2}} \text{ [N]} \quad (4.27)$$

gdje je:  $F$  ukupna sila

$I$  struja kroz vodič

$l_1$  duljina prvog vodiča

$l_2$  duljina drugog vodiča

$d$  udaljenost točke  $A$

Kada je  $l_1$  beskonačno vrijedi:

$$F_{\infty} = I^2 10^{-7} \ln \frac{2l_2}{d} \text{ [N]} \quad (4.28)$$

Kod vodiča savijenog u obliku slova „S“ za određivanje sile na jedinici duljine uzimamo u obzir relaciju 4.23 s granicama integracije  $a_1$  do  $a_2$  i  $b_1$  do  $b_2$  te dobivamo izraz:

$$f = \frac{dF}{dy} = I^2 10^{-7} \left[ \frac{l_1}{y \sqrt{l_1^2 + y^2}} - \frac{l_3}{(l_2 - y) \sqrt{l_3^2 + (l_2 - y)^2}} \right] \text{ [N/m]} \quad (4.29)$$

gdje je:  $I$  struja kroz vodič  
 $l_1$  duljina prvog vodiča  
 $l_2$  duljina drugog vodiča  
 $l_3$  duljina trećeg vodiča  
 $y$  udaljenost točke A od  $l_1$

Uz pretpostavku  $l_1 = l_3 = \infty$  dobit ćemo silu na jedinicu duljine:

$$f_{\infty} = I^2 10^{-7} \left( \frac{1}{y} - \frac{1}{l_2 - y} \right) \text{ [N/m]} \quad (4.30)$$

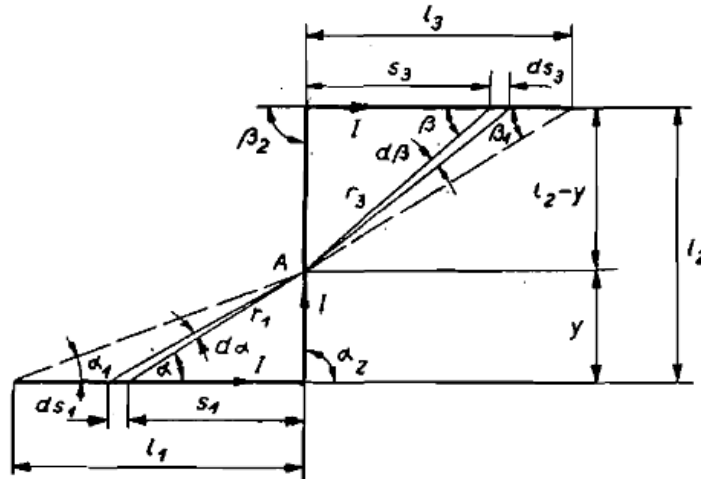
Kod vodiča savijenog u obliku slova „S“ pojavljuju se sile među paralelnim dijelovima te se onda jakost magnetskog polja određuje prema relaciji 4.11 s obzirom da kosinuse kuteva moramo zamijeniti točnim omjerima definiranim prema slici 4.3. Sila po jedinici duljine se onda dobiva iz relacije:

$$f = \frac{dF}{ds_3} = \frac{I^2}{l_2} 10^{-7} \left[ \frac{l_1 + s_3}{\sqrt{l_2^2 + (l_1 + s_3)^2}} - \frac{s_3}{\sqrt{l_2^2 + s_3^2}} \right] \text{ [N/m]} \quad (4.31)$$

Uz pretpostavku  $l_1 = \infty$  dobivamo:



$$f_{\infty} = \frac{dF}{ds_3} = \frac{I^2}{l_2} 10^{-7} \left( 1 - \frac{s_3}{\sqrt{l_2^2 + s_3^2}} \right) \text{ [N/m]} \quad (4.32)$$



Slika 4.3. Određivanje sile na srednji dio vodiča u obliku slova „S“

Na dio vodiča  $l_3$  djeluje sila uzrokovana strujom u okomitom dijelu vodiča  $l_2$  koju možemo odrediti prema relaciji 4.25:

$$f' = \frac{I^2}{s_3} 10^{-7} \frac{l_2}{\sqrt{l_2^2 + s_3^2}} \text{ [N/m]} \quad (4.33)$$

Kod vodiča savijenog u obliku slova „U“ jakost magnetskog polja dijela vodiča duljine  $l$  određena je relacijom 4.23, a jakost polja dijela vodiča duljine  $l_3$  analognom relacijom te je sila po jedinici duljine srednjeg dijela vodiča određena izrazom:

$$f = \frac{dF}{dy} = I^2 10^{-7} \left[ \frac{l_1}{y \sqrt{l_1^2 + y^2}} + \frac{l_3}{(l_2 - y) \sqrt{l_3^2 + (l_2 - y)^2}} \right] \text{ [N/m]} \quad (4.34)$$

gdje je:  $I$  struja kroz vodič

$l_1$  duljina prvog vodiča

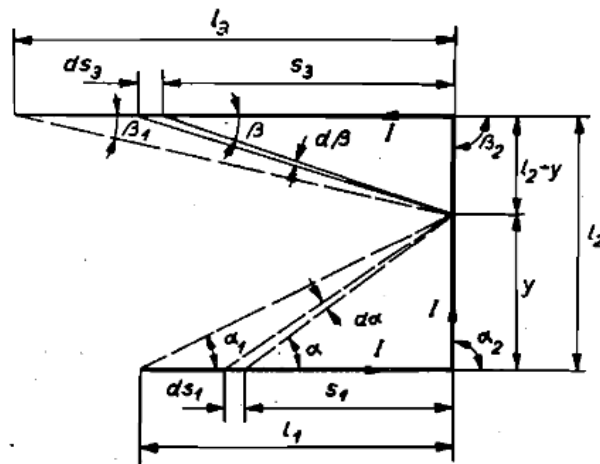
$l_2$  duljina drugog vodiča

$l_3$  duljina trećeg vodiča

$y$  udaljenost točke  $A$  od  $l_1$

Uz pretpostavku  $l_1=l_3=\infty$  dobit ćemo silu na jedinicu duljine:

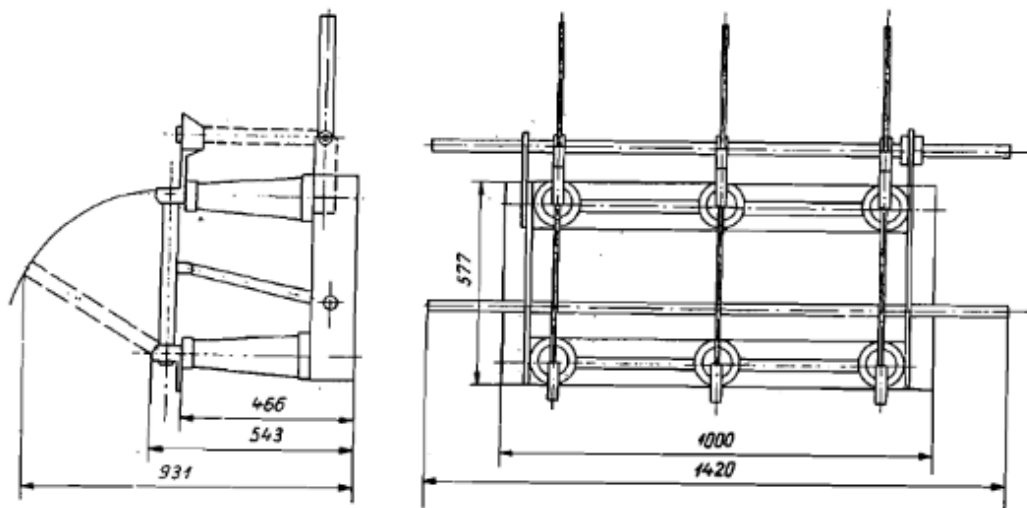
$$f_{\infty} = \frac{dF}{dy} = I^2 10^{-7} \left( \frac{1}{y} - \frac{1}{l_2-y} \right) \text{ [N/m]} \quad (4.35)$$



Slika 4.4. Određivanje sile na srednji dio vodiča u obliku slova „U“

## 4.2 Rastavljači

Rastavljači služe za odvajanje dijela rasklopnog postrojenja koje nije pod naponom od dijela koji je pod naponom. Glavna zadaća rastavljača je povećanje sigurnosti osoblja koje radi na dijelu rasklopnog postrojenja. Izbor rastavljača se vrši prema nazivnom naponu i maksimalnoj struji u normalnom pogonu. Maksimalna struja u normalnom pogonu mjerodavna je za izbor rastavljača prema nazivnoj struji. Nakon izbora rastavljača prema nazivnoj struji potrebno je rastavljač kontrolirati s obzirom na mehanička naprezanja određena udarnom strujom. Rastavljač se ne koristi za prekidanje struje nego za isklup kada kroz rastavljač ne teče struja, ali ga je moguće koristiti za prekidanje u slučaju malih struja. Za više napone rastavljači se konstruiraju male tlocrtne površine. Rastavljači su konstruirani da se uklapanje i isklapanje vrši u sve tri faze istovremeno. Upravljanje može biti ručno, pomoću poluga vezanih s osovinom rastavljača, pneumatsko koje koristi komprimirani zrak, ili elektromotorno koje se danas u visokonaponskim postrojenjima isključivo koristi.



Slika 4.5. Izvedba rastavljača za napon 35 kV

### 4.3 Prekidači

Prekidači su elementi koji služe za otvaranje i zatvaranje strujnog kruga. Razlikujemo zračne prekidače, uljni prekidače, malouljne prekidače, pneumatske prekidače, vakuumske prekidače i SF<sub>6</sub> prekidače. Zračni prekidači imaju znatne razmake između kontakata i uzemljenih dijelova da ne bi došlo do kratkih spojeva među fazama za vrijeme trajanja luka. Kod uljnih prekidača prekidanje struje se vrši među kontaktima u ulju, a u pneumatskim prekidača luk se gasi pomoću komprimiranog zraka. Kod malouljnih prekidača ulje služi samo za gašenje luka dok je izolacija prema uzemljenim dijelovima i polovima kruti izolacioni materijal. Postoje još i hidromatski prekidači koji su slični malouljnim prekidačima, ali sadrže umjesto ulja vodu pomiješanu sa sredstvom protiv smrzavanja i imaju elastičnu komoru. Izbor prekidača vrši se prema nazivnoj struji, nazivnom naponu i nazivnoj prekidnoj moći. Nazivna struja mora biti veća od maksimalne moguće struje kroz prekidač u normalnom pogonu.

$$I_n \geq \frac{S_{max}}{\sqrt{3}U_n} \text{ [A]} \quad (4.36)$$

Prekidna moć je određena kao zbroj prekidnih moći sva tri pola prekidača. Polovi su međusobno jednaki te je ukupna prekidna moć jednaka:

$$S = \sqrt{3}U_p I_r \text{ [MVA]} \quad (4.37)$$

$U_p$  je linijski napon mreže na mjestu ugradnje prekidača, a  $I_r$  je efektivna vrijednost struje u trenutku otvaranja kontakata koja iznosi :

$$I_r = \sqrt{I_s^2 + I_a^2} \text{ [A]} \quad (4.38)$$

#### 4.3.1 Vakuumski prekidači

Vakuumski prekidači su vrsta prekidača koji koriste vakuum kao medij za gašenje luka. Standard su za SN postrojenja, tj. u postrojenjima do 35 kV. Vakuumski prekidači imaju sve veću primjenu zbog jednostavne izvedbe, niske cijene, malih dimenzija i pouzdanosti. Dielektrična čvrstoća vakuuma je osam puta veća od čvrstoće zraka i četiri puta veća od SF<sub>6</sub> plina. Zbog velike dielektrične čvrstoće vakuumski prekidači imaju mogućnost gašenja luka uz vrlo mali razmak među kontaktima.

#### 4.3.2 SF<sub>6</sub> prekidači

SF<sub>6</sub> prekidači su prekidači koji koriste plin sumpor heksafluorid za gašenje električnog luka. Danas se koriste najviše u VN postrojenjima. Plin SF<sub>6</sub> ima veliku gustoću i 2.5 puta veću dielektričnu čvrstoću od zraka. Prednosti SF<sub>6</sub> prekidača su u njihovoj brzini gašenja luka i dugovječnost, ali ne rade na niskim temperaturama i cijena konstrukcije je visoka.

U slučaju kvara kontakti prekidača se razdvajaju i između njih se stvara luk. SF<sub>6</sub> plin je komprimiran i pod visokim pritiskom pohranjen u spremniku koji prilikom razdvajanja kontakata ulazi u komoru i ispunjava ju. Električni luk se gasi dok se SF<sub>6</sub> plin opet komprimira za ponovnu upotrebu.

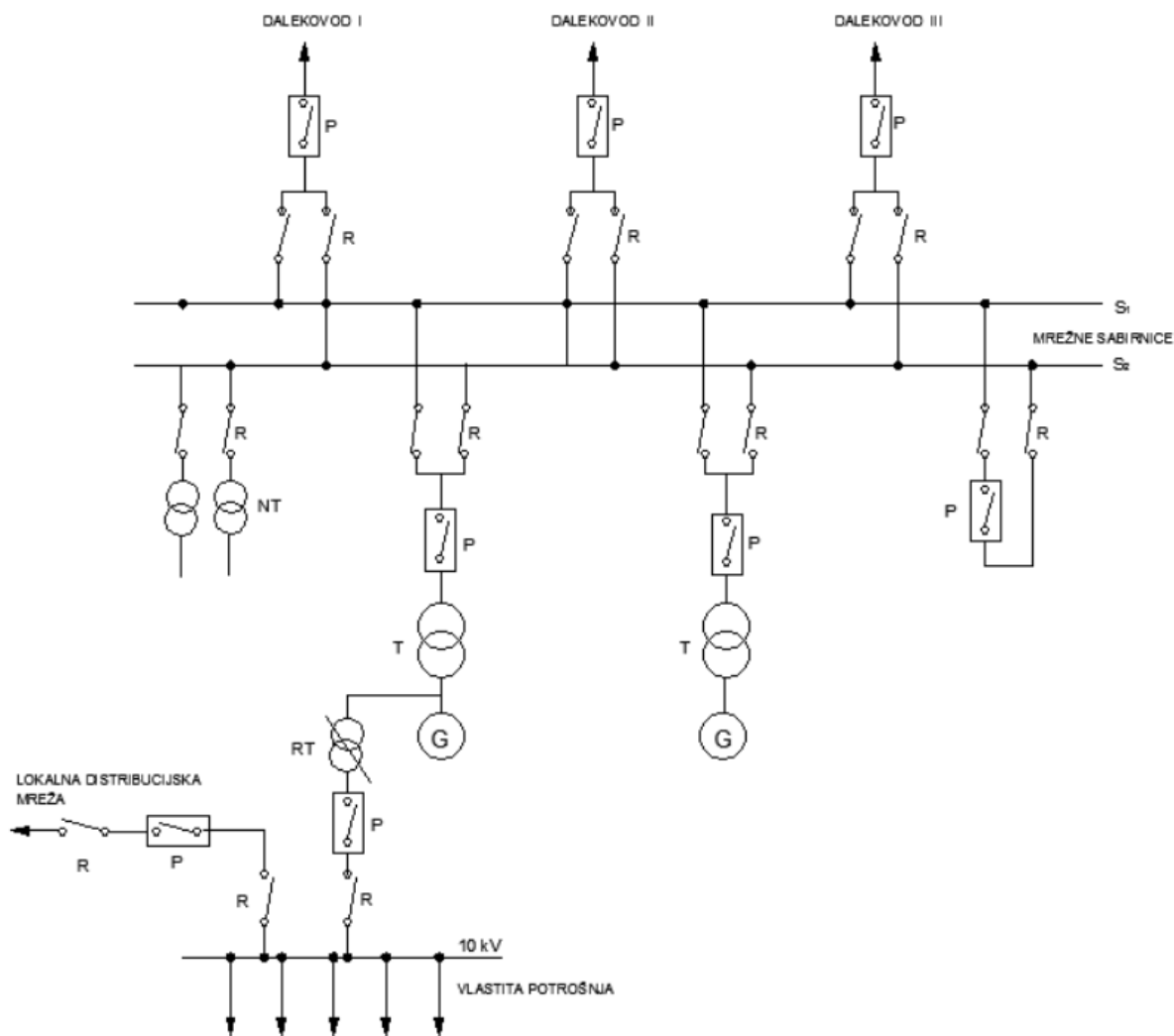
## 5 Jednopolna shema i vlastita potrošnja hidroelektrane

Hidroelektrane nisu zasebna postrojenja nego sastavni dijelovi elektroenergetskog sustava. Jednopolna shema je shema spoja hidroelektrane na elektroenergetsku prijenosnu mrežu i shema za napajanje vlastite potrošnje. Izbor jednopolne sheme je ovisan o zahtjevima pogona i mogućnostima izvedbe u odnosu na cijenu i trošak. Pogonske zahtjeve određuje visina prijenosnog napona, opskrba vlastite potrošnje i zaštita i sigurnost pogona. Veličina generatora te transformatora i prekidača utječu na izbor jednopolne sheme. Male hidroelektrane obično koriste jednostruke ili dvostruke sabirnice bez transformatora za priključak na mrežu.

Priključak hidroelektrane na prijenosnu elektroenergetsku mrežu uobičajeno se rješava na dva načina. Preko blok-spoja generator transformator i priključka s generatorskim sabirnicama. Hidroelektrane se priključuju na mrežu čija je naponska razina viša od napona generatora. U slučajevima priključenja na dvije mreže višeg napona blok-spoj transformator generator se koristi kao spoj sa mrežom višeg napona, a transformator se koristi kao veza s drugom mrežom. Sastavni dio svake hidroelektrane su pomoćni uređaji nužni za siguran i stabilan rad elektrane. Konstantno napajanje tih uređaja je obavezno za trajan rad. Pod nazivom pomoćnih (vlastitih) potrošača spadaju:

- pogoni hidromehaničke opreme
- crpke za vodu hlađenja
- crpke za tlačno ulje
- motori dizalica
- rasvjeta i klimatizacija
- kompresorski uređaji
- ispravljači za punjenje akumulatorske baterije

Vlastita potrošnja, ovisno o veličini hidroelektrane, koristi između 3 i 5% ukupne snage elektrane.



Slika 5.1. Jednopolna shema hidroelektrane

Vlastita potrošnja bi trebala imati najmanje dva neovisna izvora napajanja zbog njene važnosti i funkcije u pogonu. Načini napajanja se odabiru prema izboru jednopolne sheme te u slučajevima kada dođe do prekida napajanja glavnog izvora vlastiti potrošači se moraju automatski prebaciti na sekundarni rezervni izvor napajanja. Vrste neovisnih izvora napajanja mogu biti:

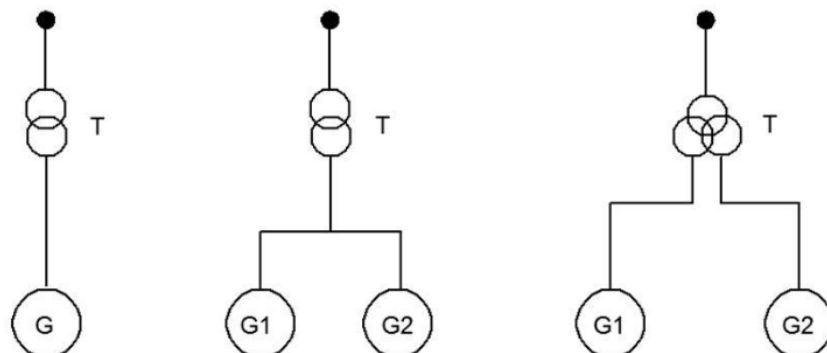
- kućni agregat na pogon vodnom turbinom
- dizel agregat
- lokalna mreža srednjeg napona

- transformator priključen na generatorske sabirnice
- pogonski dalekovod koji povezuje obližnje elektrane
- transformator na odcjepu generatora

### 5.1 Blok-spoj generator-transformator

Transformatori u elektranama koji su spojeni između generatora i visokonaponske mreže nazivaju se generatorski transformatori ili blok-transformatori. Napon električne energije proizvedene u generatoru je manji od napona prijenosne mreže te ga je potrebno podići na razinu napona mreže. Za podizanje napona se koristi blok transformator. Povećanjem generatorskog napona smanjuje se iznos proizvedene struje, ali i gubici nastali protjecanjem struje kroz vodič. Smanjujući iznos struje smanjuje se i presjek vodiča te materijal potreban za konstrukciju kabela. Primar transformatora je spojen na generator, a sekundar transformatora je spojen na elektroenergetsku mrežu. Blok transformatori korišteni u hidroelektranama su uljni transformatori gdje su im jezgra i namoti potopljeni u ulju. Cirkulacijom ulja između jezgre i vanjskih radijatora ostvaruje se hlađenje transformatora, a ulje služi kao rashladni medij.

U većini hidroelektrana se koristi jedno od rješenja prikazanih na slici 5.3. Prvi način priključka HE na mrežu je po načelu jedan generator i jedan blok-transformator. Ovo rješenje ima prednost u slučajevima kvara, jer isklapanje transformatora utječe na samo jedan generator. Izvedba je jednostavna, ali je najskuplja. U druga dva načina blok-transformator se koristi za spoj dva generatora, radi smanjena troškova. Nedostatak je naravno smanjena pouzdanost pogona jer u slučaju kvara na transformatoru oba generatora ostaju izvan pogona.



Slika 5.2. Načini spajanja transformatora sa generatorom u hidroelektranama

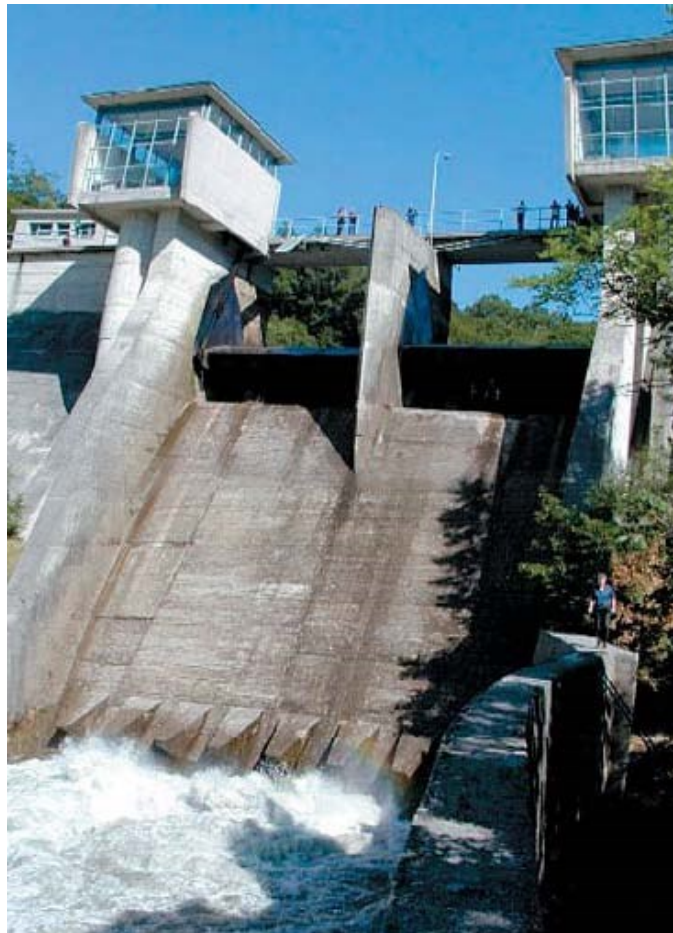
Spajanje rasklopnog postrojenja i transformatora ostvaruje se:

- Kabelima,
- Sabirnicama s krutom izolacijom,
- Sabirnicama s plinskom izolacijom.



## 6 Hidroelektrana Rijeka

Hidroelektrana Rijeka je visokotlačno derivacijsko postrojenje koje koristi vode vodotoka Rječine i organizacijski se nalazi u tvrtci HEP Proizvodnja d.o.o. kao sastavni dio GHE Vinodol. Vodni pad HE Rijeka iznosi 228,3 m uz instalirani protok od  $21 \text{ m}^3/\text{s}$ . Kod sela Grohovo izgrađena je betonska brana koja stvara bazen korisnog sadržaja od  $600\,000 \text{ m}^3$ . Najveća dubina u bazenu je 28 m, a najveći uspor je na koti 232.5 m nadmorske visine. Pogonska voda dolazi do podzemne strojarnice, smještene u podnožju brda Katarina, tlačnim tunelom promjera 3.2 m dužine 3117 m, zatim tlačnim rovom dužine 173 m, te kosim tlačnim cjevovodom promjera 2.2 m i dužine 803 m. Izlazna voda iz turbina ispušta se u korito Rječine. Ukupna raspoloživa snaga je 36.8 MW, instalirana u dva agregata, od kojih se svaki agregat sastoji od generatora koji je pogonjen preko vertikalnog vratila s Francis turbinom. S proizvodnjom električne energije hidroelektrana Rijeka je započela 1968. godine i u prosjeku se na godišnjoj razini proizvede 84.45 GWh električne energije dok je maksimalna godišnja proizvodnja iznosila 130 GWh.



Slika 6.1. Brana HE Rijeka

## 6.1 Priključak HE Rijeka na elektroenergetski sustav RH

Ključni dijelovi opreme prema kojoj je izvršeno dimenzioniranje visokonaponskog priključka HE Rijeka su dva generatora od 23.000 kVA koji su preko blok transformatora vezani na 110 kV elektroenergetski sustav RH. Priključak na prijenosnu mrežu izveden je preko rasklopnog postrojenja TS 110/35/20(10) kV Rijeka 900 metara od HE Rijeka i smještenog u neposrednoj blizini zasunske komore. Blok transformatori su također smješteni u istom rasklopnom postrojenju TS 110/35/20(10) kV Rijeka. Priključak hidroelektrane Rijeka na elektroenergetski sustav Republike Hrvatske ostvaruje se preko 110 kV polja BT1 i BT2 koja se nalaze u TS 110/35/20(10) Rijeka. Predmetna 110 kV polja kao i cjelokupno 110 kV rasklopište TS Rijeka je u nadležnosti HOPS d.o.o.

Hidrogeneratori tipa S 3505-10 su vertikalni sinkroni generatori pogonjeni Francis turbinom. Spoj generatora i turbine je izveden pomoću krute spojke. Generator 1 je pušten u pogon 23.07.1968. godine, a generator 2 točno mjesec dana nakon prvog generatora 23.08.1968.

Tablica 6.1. Nazivni podaci generatora

|                                  |                          |
|----------------------------------|--------------------------|
| Proizvođač                       | KONČAR d.o.o.            |
| Tip                              | S 3505-10                |
| Godina proizvodnje               | 1968.                    |
| Snaga [kVA]                      | 23.000                   |
| Napon [kV]                       | 10.500(+10%,-5%)         |
| Struja [kA]                      | 1.265(-10%,+5%)          |
| Faktor snage $\cos\varphi$       | 0.8                      |
| Brzina vrtnje/pobjega[min]       | 600/1060                 |
| Uzbuda                           | Tiristorska 136 V; 567 A |
| Frekvencija [Hz]                 | 50                       |
| Klasa izolacije statora i rotora | B/B                      |
| Zamašni moment                   | 150 $\text{tm}^2$        |

Između generatorskog postrojenja i blok transformatora položeni su kabelski spojni vodovi u kabelskom rovu uz tlačni cjevovod. Spoj generatora u HE Rijeka i blok transformatora smještenih u TS 110/35/20(10) Rijeka izveden je kabelima tipa ELPEX-35, 3x(3x1/185/25)  $\text{mm}^2$  (tri jednožilna kabela po fazi) na generatorskom naponu od 10.5 kV duljine 900 m.

Blok transformatori 1 i 2 ugrađeni su 1979. godine kada je napravljena rekonstrukcija 110 kV rasklopnog postrojenja TS 110/35/20(10) Rijeka te su stavljeni umjesto starih blok transformatora prijenosnog omjera 10.5/36.75 kV. Blok transformatori se nalaze u otvorenom dijelu 110 kV postrojenja, u trafo-boksovima međusobno odijeljenim protupožarnim zidovima. Trafo-boksovi su širine oko 9 m, a pregradni protupožarni zidovi su duljine oko 5.5 m. Ispod blok transformatora se nalazi uljna jama koja je cijevima povezana na sabirnu jamu. Sustav hlađenja je kombiniran ONAN/ONAF prema IEC 60076-2. U oba slučaja aktivni dio se hladi prirodnom cirkulacijom transformatorskog ulja. Do 60% nazivne snage transformatora nazivne nadtemperature se postiže uz prirodnu cirkulaciju zraka za hlađenje, dok se iznad tog opterećenja uključuju grupe ventilatora montiranih na hladnjacima koji služe za prisilnu cirkulaciju zraka za hlađenje.

Transformatori ne posjeduju regulacijsku sklopku pa je prijenosni omjer fiksiran. Od standardnih zaštita transformator posjeduje Bucholtzov relej, odušnik i kontakti termometar. Temperatura gornjeg ulja se mjeri pomoću Pt-100 sonde ugrađene u džepove na gornjem poklopcu transformatora. Kontakti termometar prati vrijednost ove temperature te ima funkciju upozorenja i alarmiranja te zaštite pomoću izbacivanja iz pogona ukoliko dođe do pregrijavanja gornjeg ulja u transformatoru. Za termički nadzor stanja namota transformatora ugrađeni su sustavi termo slike tip MTeC EPT 202, proizvodnje MESSKO, koji pomoću signala temperature gornjeg ulja i vrijednosti struje opterećenja određuje iznos najtoplije točke namota.

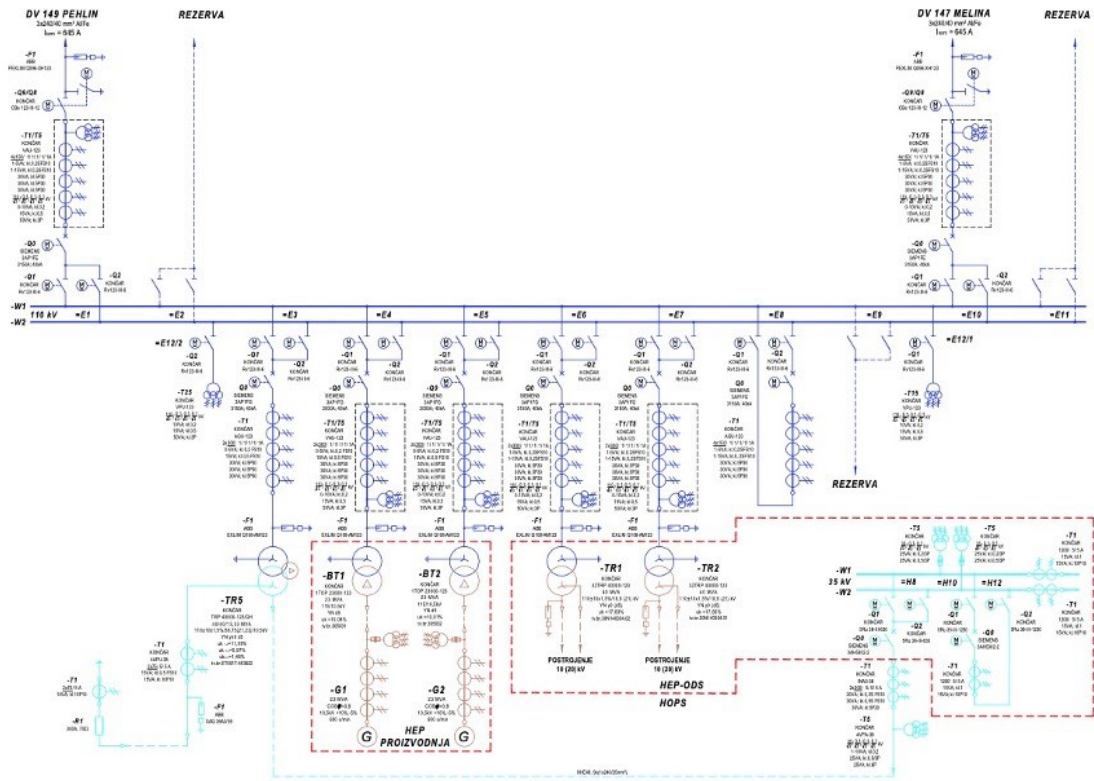
Transformatori su opremljeni automatiziranim stabilnim sustavom protupožarne zaštite koji koristi raspršenu vodu za gašenje požara te posjeduje digitalnu upravljačku centralu. Nazivni podaci blok-transformatora su prikazani u tablici 6.2.

Tablica 6.2. Nazivni podaci blok-transformatora

|                          |                               |
|--------------------------|-------------------------------|
| Proizvođač               | KONČAR d.o.o.                 |
| Tip                      | 1 TOP 23000-123               |
| Godina proizvodnje       | 1979.                         |
| Nazivna snaga            | 23 MVA                        |
| Nazivni prijenosni omjer | 10.5/115.5 kV                 |
| Nazivna struja           | 1265A(primar), 115A(sekundar) |

|                                       |  |
|---------------------------------------|--|
| Grupa spoja                           | YNd5   |
| Napon kratkog spoja $u_k$             | 10%  |
| Frekvencija                           | 50 Hz  |
| Broj faza                             | 3  |
| Tip hlađenja                          | ONAN/ONAF  |
| Regulacija napona                     | NE   |
| Gubici                                | 22 kW(prazan hod), 140 kW(kratki spoj)   |
| Najviše trajno dozvoljeni napon $U_m$ | 12 kV(primar), 123 kV(sekundar)  |
| Dozvoljene temperature                | 40 °C (najviša dnevna temperatura okoline)<br>60 K (najviše zagrijavanje gornjeg ulja)<br>65 K (srednje zagrijavanje namota) |
| Mase                                  | 18510 kg (aktivni dio)<br>8000 kg (ulje)<br>27000 kg (transportna masa)<br>34300 kg (ukupna masa)                            |

Visokonaponski izvodi transformatora su fleksibilnim AlČe užadima povezani na cijevni sustav 110 kV sabirnica. Nul-točka visokonaponskog namota je kruto uzemljena na uzemljivač TS Rijeka. Visokonaponski namoti transformatora su štice odvodnicima prenapona koji su smješteni u 110 kV polju transformatora.



Slika 6.2. Jednopolna shema TS/ HE Rijeka

## 7 ZAKLJUČAK

Obnovljivi izvori električne energije su bitan čimbenik u današnjoj, ali i budućoj proizvodnji električne energije u svijetu. Tema ovoga rada je priključak visokonaponskih postrojenja hidroelektrana na prijenosnu elektroenergetsku mrežu. Proučavanjem teme upoznali smo dijelove i način rada hidroelektrana te uobičajena rješenja priključivanja hidroelektrana na EES. U 3. poglavlju prikazali smo i objasnili način rada i glavne dijelove hidroelektrana te vrste i izvedbe vodnih turbina i generatora. U 4. poglavlju objasnili smo najbitnije dijelove rasklopnih postrojenja te njihov odabir, točnije načine izbora i dimenzioniranja sabirnica u istoimenim rasklopnim postrojenjima. U kasnijim dijelovima rada prikazali smo vrste i načine priključivanja postrojenja na mrežu. U 6. poglavlju vidjeli smo kako funkcionira hidroelektrana Rijeka te definirali transformatore i generatore koji se koriste u navedenom postrojenju.

Važno je navesti da velik broj čimbenika utječe na odabir opreme za priključak na prijenosnu mrežu, kao što su veličina postrojenja, naponske razine, udaljenost i troškovi. Kao i u svemu tehnologija i nova napredovanja u znanosti, iz dana u dan, mijenjaju najefikasnije i najekonomičnije metode dizajniranja i dimenzioniranja električne opreme.

## 8 LITERATURA

- [1] Ujević, L., Buntić, Z.: „Elektrane“, Zagreb 1993.
- [2] Clemen, D.M.: „Hydro Plant Electrical Systems“, HCI Publications, SAD 1999.
- [3] Prelec, Z.: „Energetska postrojenja“, Rijeka 2000.
- [4] Ravlić, V., Radošević, Ž.: „Povezivanje energetske transformatora i postrojenja srednjeg napona u TS 110/x kV“, HO CIRED, Šibenik 2008.
- [5] Arun, K.: „Teachers manual: Hydropower Engineering for Diploma Level Courses“, Roorkee (Indija) 2008.
- [6] Short, T.: „Electric power distribution equipment and systems“, CRC Press, Boca Raton 2006.
- [7] HEP Grupa, s interneta: <https://www.hep.hr>
- [8] Wikipedia, s interneta: <https://hr.wikipedia.org>
- [9] Hops d.o.o., s interneta: <https://www.hops.hr/prijenosna-mreza>
- [10] *How do you connect hydro to the grid?*, s interneta :  
<https://www.renewablesfirst.co.uk/hydropower/hydropower-learning-centre/how-do-you-connect-hydro-to-the-grid/>
- [11] HEP d.o.o. Služba za informiranje, Zahtjev za pristup informacijama
- [12] Požar, H.: „Visokonaponska rasklopna postrojenja“, Zagreb 1978.
- [13] Požar, H.: „Osnove energetike“, Zagreb 1976.
- [14] Meštrović, K.: „Prekidanje struje“, Tehničko veleučilište Zagreb

## **9 SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI**

U ovom radu prikazan je način priključka hidroenergetskih postrojenja na elektroenergetski sustav. Obrađene su teme generatora, transformatora, sabirnica te dijelovi i način rada hidroelektrana. Prikazani su podaci vezani za HE Rijeka koja pripada Proizvodnom području Zapad u sklopu tvrtke HEP Proizvodnja d.o.o..

Ključne riječi: priključak, hidroelektrane, prijenosna mreža, transformatori, generatori, sabirnice



## **10 SUMMARY AND KEY WORDS**

This paper explains hydroelectric power plant grid connection. Generators, transformers, busbars and main parts and the principle of production of hydroelectric powerplants are explained in depth. This paper presents information about hydroelectric power plant Rijeka which is a part of Production territory West of the company HEP Proizvodnja d.o.o..

Key words: connection, hydroelectric power plants, transmission network, transformers, generators, busbars