Priključak malih hidroelektrana na elektroenergetsku mrežu

Ivanković, Ivan

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:168:446042

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-23**

Repository / Repozitorij:

FER Repository - University of Zagreb Faculty of Electrical Engineering and Computing repozitory

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 65

PRIKLJUČAK MALIH HIDROELEKTRANA NA ELEKTROENERGETSKU MREŽU

Ivan Ivanković

Zagreb, veljača 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 65

PRIKLJUČAK MALIH HIDROELEKTRANA NA ELEKTROENERGETSKU MREŽU

Ivan Ivanković

Zagreb, veljača 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

Zagreb, 2. listopada 2023.

DIPLOMSKI ZADATAK br. 65

Pristupnik:	**Ivan Ivanković (0036516608)**
Studij:	Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Profil:	Elektroenergetika
Mentor:	prof. dr. sc. Ivica Pavić

Zadatak: **Priključak malih hidroelektrana na elektroenergetsku mrežu**

Opis zadatka:

U posljednjih dvadesetak godina došlo je do znatnog povećanja udjela obnovljivih izvora u ukupnoj proizvodnji elektroenergetskog sustava. Male hidroelektrane koje spadaju u tu skupinu, zbog svoje relativno male snage (od nekoliko stotina kW do nekoliko MW) u pravilu se priključuju na distribucijsku elektroenergetsku mrežu. Uslijed priključka malih hidroelektrana, ali i ostalih obnovljivih izvora manje snage, distribucijska mreža sve više poprima karakteristike aktivne mreže, čime se povećavaju i zahtjevi na njen pogon i vođenje. U okviru diplomskog rada potrebno je sagledati problematiku priključka malih hidroelektrana na distribucijsku mrežu u svjetlu novih pravila za priključenje i mrežnih pravila. U skladu s tim potrebno je na jednoj stvarnoj mreži provesti osnovne proračune i analize za normalna i izvanredna pogonska stanja na temelju kojih je moguće definirati predvidive uvjete rada male hidrolektrane. Proračune je potrebno provesti u nekom od standardnih programskih paketa za analizu elektroenergetskih sustava, kao npr. PSS/E, ETAP, Neplan i sl.

Rok za predaju rada: 9. veljače 2024.

Zahvaljujem prof. Ivici Paviću na pomoći, strpljenju i mentoriranju prilikom izrade ovog rada.

Zahvaljujem prijateljima i kolegama koji su mi studentski put učinili zanimljivijim i nezaboravnim.

Veliku zahvalu dajem svojoj obitelji, a osobito sestrama Mihaeli i Katarini koje su uvijek bile uz mene.

Najveću zahvalu iskazujem svojim roditeljima, Mihi i Karmeli, bez kojih ništa ne bi bilo moguće. Hvala vam na ukazanom povjerenju, strpljenju i ljubavi.

Naposljetku, hvala dragom Bogu koji je sve te ljude stavio na moj životni put.

Sadržaj

Popis slika ii
Popis tablica iii
Uvod 1
1. Male hidroelektrane 2
1.1 Vrste malih hidroelektrana 2
2. Generator 6
2.1 Sinkroni generatori 6
2.2 Asinkroni generatori 8
3. Turbine 10
3.1 Francisova turbina 10
3.2 Kaplanova turbina 11
3.3 Peltonova turbina 11
4. Naponske i strujne prilike u normalnom pogonu i pri pojavi kvara 13
4.1 Proračun tokova snaga 13
4.2 Proračun kratkog spoja 14
5. Zaštita postrojenja male hidroelektrane 17
5.1 Diferencijalna zaštita generatora 17
5.2 Nadstrujna zaštita generatora 18
5.3 Podfrekventna i nadfrekventna zaštita generatora 19
5.4 Zaštita generatora od gubitka uzbude 20
5.5 Zaštita od nesimetričnog opterećenja 20
6. Zakonske odredbe 21
7. Analiza mreže u programu NEPLAN 27
7.1 Analiza tokova snaga 31
7.2 Analiza promjene napona na sabirnicama 34
7.3 Analiza promjena struja kratkog spoja 36
8. Zaključak 39
Literatura 41
Sažetak 43
Abstract 44

Popis slika

Slika 1.1 Prikaz niskotlačne MHE sa strojarnicom na dnu brane [10] 3
Slika 1.2 Prikaz niskotlačne MHE sa sifonskim dovodom [10] 3
Slika 1.3 Prikaz MHE integrirane unutar kanala za navodnjavanje s uronjenom strojarnicom [10] 4
Slika 1.4 Prikaz MHE integrirane unutar kanala za navodnjavanje u već postojećem kanalu [10] 4
Slika 1.5 Prikaz MHE ugrađena u vodoopskrbi sustav [10]..... 5
Slika 2.1 Prikaz SPM, IPM te SynREL stroja [1] 7
Slika 2.2 Presjek motora sa cilindričnim rotorom [2] 8
Slika 2.3 Presjek motora s rotorom s istaknutim polovima [2]..... 8
Slika 3.1 Francisova turbina [11] 10
Slika 3.2 Kaplanova turbina [12] 11
Slika 3.3 Peltonova turbina [13] 12
Slika 4.1 Struktura vršenja proračuna [3] 14
Slika 4.2 Pojednostavljen prikaz vrsta kratkih spojeva [4]..... 15
Slika 5.1 Karakteristika diferencijalne zaštite [6] 18
Slika 5.2 Karakteristika nadstrujne zaštite [8] 19
Slika 5.3 Karakteristika zaštite nesimetričnog opterećenja [7] 20
Slika 6.1 Dijagram procesa jednostavnog priključenja na distribucijsku mrežu [16]..... 25
Slika 6.2 Dijagram procesa složenog priključenja na distribucijsku mrežu [16]..... 26
Slika 7.1 Modelirana mreža 27
Slika 7.2 Prikaz modelirane mreže s dodanom malom hidroelektranom ... 30
Slika 7.3 Prikaz tokova snaga u programu NEPLAN prije dodavanja male hidroelektrane 33
Slika 7.4 Prikaz tokova snaga u programu NEPLAN nakon dodavanja male hidroelektrane 33
Slika 7.5 Prikaz dijela mreže iz programa NEPLAN s vrijednostima struja kratkog spoja prije priključenja male hidroelektrane 38
Slika 7.6 Prikaz dijela mreže iz programa NEPLAN s vrijednostima struja kratkog spoja nakon priključenja male hidroelektrane 38

Popis tablica

Tablica 4.1 Odabir naponskog faktora c za izračun kratkog spoja [4] 16
Tablica 7.1 Podatci generatora iz mreže 28
Tablica 7.2 Podatci blok transformatora iz mreže 28
Tablica 7.3 Podatci ostalih transfomatora u modeliranoj mreži 28
Tablica 7.4 Podatci vodovo iz modelirane mreže 28
Tablica 7.5 Podatci o kabelu u modeliranoj mreži 29
Tablica 7.6 Podatci o aktivnoj mreži 29
Tablica 7.7 Podatci o motorima u modeliranoj mreži 29
Tablica 7.8 Podatci male hidroelektrane kao dodatnog izvora 30
Tablica 7.9 Tokovi snaga prije ugradnje male hidroelektrane 31
Tablica 7.10 Tokovi snaga nakon ugradnje male hidroelektrane 32
Tablica 7.11 Naponi na sabirnicama prije ugradnje male hidroelektrane ... 34
Tablica 7.12 Naponi na sabirnicama nakon ugradnje male hidroelektrane 35
Tablica 7.13 Struje kratkog spoja prije dodavanja male hidroelektrane 37
Tablica 7.14 Struje kratkog spoja nakon dodavanja male hidroelektrane .. 37

Uvod

S porastom globalne potrošnje električne energije i hitne potrebe za smanjenjem emisija stakleničkih plinova, zastupljenost obnovljivih izvora u proizvodnji električne energije se kontinuirano povećava, međutim postojeći kapacitet ovih izvora još uvijek nije u potpunosti iskorišten stoga je jedan od glavnih izazova s kojima se svijet trenutno suočava učinkovito iskorištavanje obnovljivih izvora energije.

U takvom kontekstu, male hidroelektrane predstavljaju iznimno efikasno rješenje. Njihova prostorna raspoređenost blizu potrošača omogućuje lokalno zadovoljenje energetskih potreba, prilagodljive su potrošnji stoga su dobre za regulaciju distribucijskog sustava te su blagonaklone prema okolišu.

Unatoč dobrom udjelu korištenja hidroenergije u Republici Hrvatskoj za proizvodnju električne energije, postoje neiskorišteni potencijali koji se mogu dodatno razviti implementacijom malih hidroelektrana, posebice uzimajući u obzir njihovo smještanje blizu urbaniziranih područja kako bi se smanjili gubitci prijenosa energije.

Međutim, proces izgradnje i integracije malih hidroelektrana suočava se s raznim izazovima. Zakonske odredbe, kako one koje se odnose na ekologiju tako i kapacitet električne mreže, predstavljaju prepreke za projektante, investitore te izvođače. Navedeni aspekti značajno utječu na stabilnost i djelotvornost prijenosnog i distribucijskog sustava, stvarajući potrebu za pažljivim analizama i prilagodbama kako bi se postigao optimalan rezultat.[14]

Ovaj rad će se baviti temeljnim problemima s kojima se suočava projekt male hidroelektrane, uz poseban naglasak na analizi utjecaja na distribucijsku mrežu. Analiza će se vršiti uz pomoć programa NEPLAN za dio elektroenergetske mreže. Kroz ovakve analize možemo razumjeti kako optimizirati integraciju malih hidroelektrana, pridonoseći održivijem i učinkovitijem elektroenergetskom sustavu.

1.Male hidroelektrane

Svaka država ima svoje zakonske propise za povezivanje distribuiranih izvora energije, bilo na niskonaponskoj ili srednje naponskoj razini. Kada je riječ o tehničkim karakteristikama malih elektrana, snagu generatora određuju vlasnik elektrane i proizvođač generatora. Na temelju te snage određuje se napon generatora, koji može biti 0,4 kV, 3 kV, 6 kV ili 10 kV. Elektrane snage do 500 kW priključuju se na niskonaponsku mrežu, a priključak može biti na niskonaponski vod ili niskonaponske sabirnice transformatorske stanice. Elektrane snage do 100 kW mogu se priključiti na niskonaponski vod. Elektrane snage veće od 500 kW do 10 MW priključuju se na srednje naponsku mrežu, ali mogu se priključiti i manje elektrane. U Republici Hrvatskoj, gornja granica snage male hidroelektrane iznosi 10 MW.

1.1 Vrste malih hidroelektrana

Prema načinu rada postoji više vrsta malih hidroelektrana. Male hidroelektrane ne posjeduju akumulaciju nego su većinski protočne. Izuzetak je ako određena akumulacija već postoji te se može iskoristiti za rad male hidroelektrane.

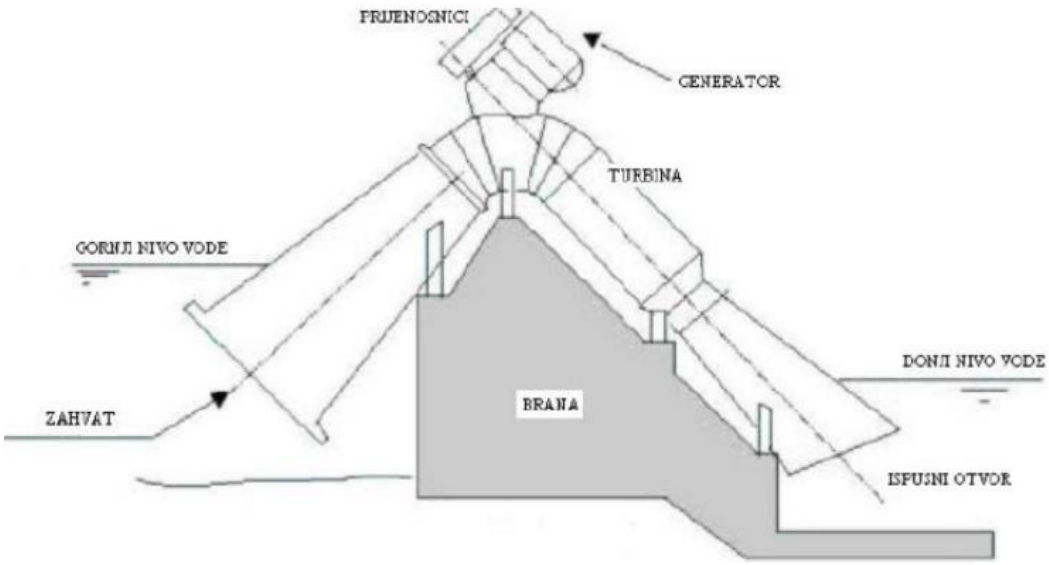
- Niskotlačne MHE sa strojarnicom na dnu brane

Niskotlačna MHE sa strojarnicom na dnu brane koristi akumulaciju za svoj rad. Primjenjuju se za male padove vode koja prolaskom kroz prolaz u brani dolazi do strojarnice gdje svojom kinetičkom energijom pokreće turbinu spojenu na generator te proizvodi električnu energiju. Slika 1.1 prikazuje glavne dijelove niskotlačne MHE sa strojarnicom na dnu brane.

Slika 1.1 Prikaz niskotlačne MHE sa strojarnicom na dnu brane [10]

- Niskotlačne MHE sa sifonskim dovodom

Niskotlačne MHE sa sifonskim dovodom se koriste kada brana nije previsoka (do 10 m). Integralni sifonski dovod omogućuje elegantnu izvedbu postrojenja, najčešće do visine 10 m i za postrojenje do 1000 kW. Slika 1.2. prikazuje takav tip male hidroelektrane.

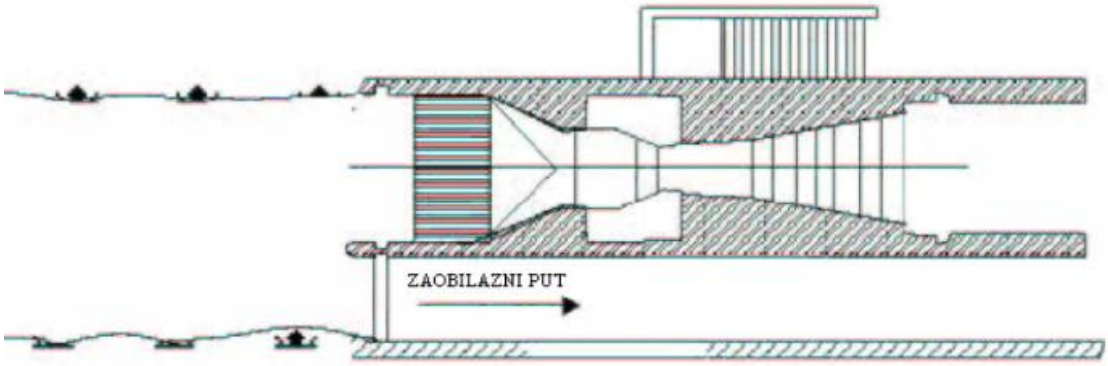


Slika 1.2 Prikaz niskotlačne MHE sa sifonskim dovodom [10]

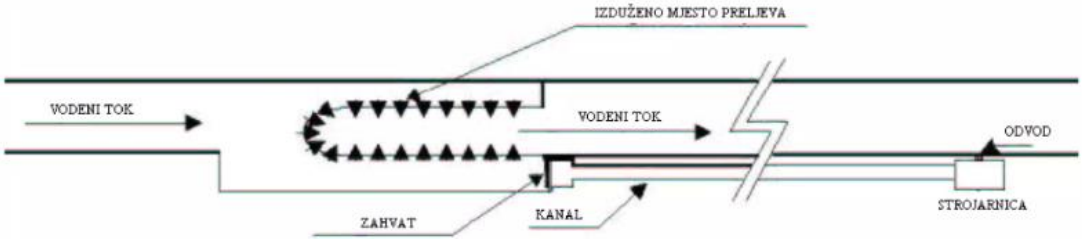
- MHE integrirane unutar kanala za navodnjavanje

Ako je kanal dovoljno prostran da se u njega integriraju postrojenja, strojarnice, odvodi i bočni obilazi za vodu, koristi se izvedba s potpuno potopljenom strojarnicom opremljenom desnom kutnom pogonskom Kaplanovom turbinom. Kako bi se osiguralo kontinuirano opskrbljivanje vodom za navodnjavanje, ova konfiguracija zahtijeva prisustvo bočnog obilaza u slučaju isključenja turbine. Međutim, važno je napomenuti da takva izvedba zahtijeva planiranje hidroelektrane paralelno s planiranjem kanala za navodnjavanje. Integracija u već postojeći kanal koji je već u funkciji mogla bi biti financijski zahtjevna opcija. Slika 1.3 Prikaz MHE integrirane unutar kanala za navodnjavanje s uronjenom strojarnicom.

U slučaju da kanal već postoji, prikladna opcija prikazana je slikom 1.4. Za smještaj postrojenja i preljeva kanal bi trebao biti blago proširen. Kako bi se smanjila širina postrojenja na minimum, ugrađuje se izduženi preljev. Voda se od postrojenja transportira kroz tlačni cjevovod do turbine, a zatim se kroz kratki ispust vraća u kanal. Obično nema migracija riba u kanalima, stoga prolazi za ribe nisu potrebni.



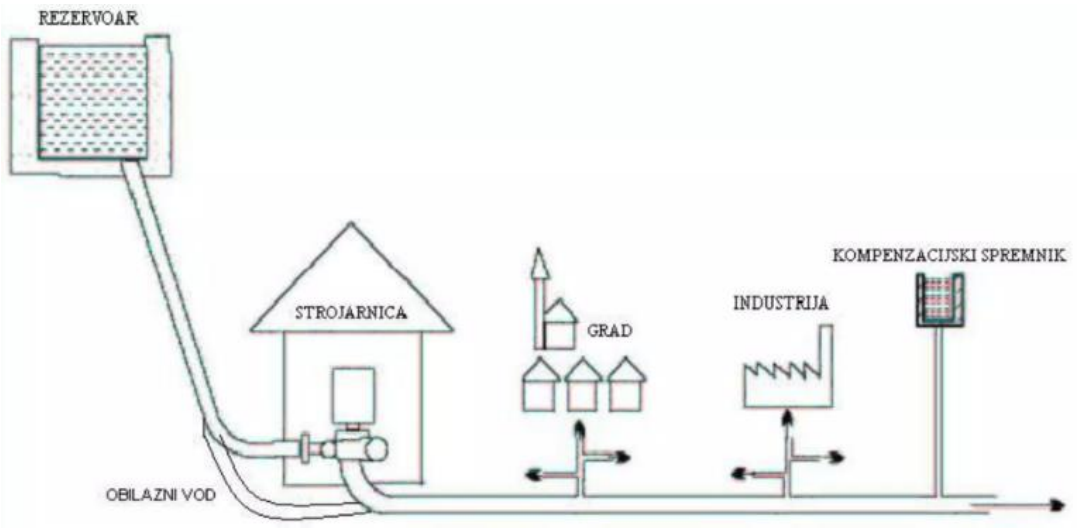
Slika 1.3 Prikaz MHE integrirane unutar kanala za navodnjavanje s uronjenom strojarnicom [10]



Slika 1.4 Prikaz MHE integrirane unutar kanala za navodnjavanje u već postojećem kanalu [10]

- MHE ugrađena u vodoopskrbi sustav

Voda za piće se transportira u grad putem vode iz višeg rezervoara kroz cjevovod pod pritiskom. Uobičajeno je u ovakvim instalacijama smanjiti gubitak energije na nižem dijelu cjevovoda, na ulazu u postrojenje za pročišćavanje vode, koristeći posebne ventile. Postavljanje turbine na kraj cjevovoda kako bi pretvorila već izgubljenu energiju u električnu energiju je praktična opcija, uz preduvjet izbjegavanja vodenog udara. Za osiguranje neprekidne opskrbe vodom potrebno je ugraditi sustav obilaznih ventila. U nekim vodoopskrbnim sustavima, turbina ima ispušni otvor u otvorenom bazenu ili jezeru, a sustav za kontrolu održava razinu vode u bazenu. U slučaju mehaničkog kvara ili zastoja turbine, sustav obilaznih ventila također može održavati razinu vode u bazenu. Kada glavni obilazni ventil prestane funkcionirati, stvara se nadtlak, a pomoćni obilazni ventil se brzo otvara. Kontrolni sustavi su još složeniji u sustavima gdje je izlaz iz turbine izložen protupritisku vodovodne mreže. Slika 1.5 prikazuje shematski prikaz jedne takve male hidroelektrane. [10]



Slika 1.5 Prikaz MHE ugrađena u vodoopskrbi sustav [10]

2.Generator

Jedan od najbitnijih dijelova svake hidroelektrane pa tako i malih hidroelektrana je generator. Generator pretvara mehaničku energiju u električnu. Voda svoju kinetičku energiju prenosi na lopatice turbine te se uz pomoć vratila ta energija prenosi do generatora koji djelovanjem elektromagnetske indukcije proizvodi električnu energiju [1]. Generatore dijelimo u dvije glavne skupine:

- Sinkroni generatori
- Asinkroni generatori

2.1 Sinkroni generatori

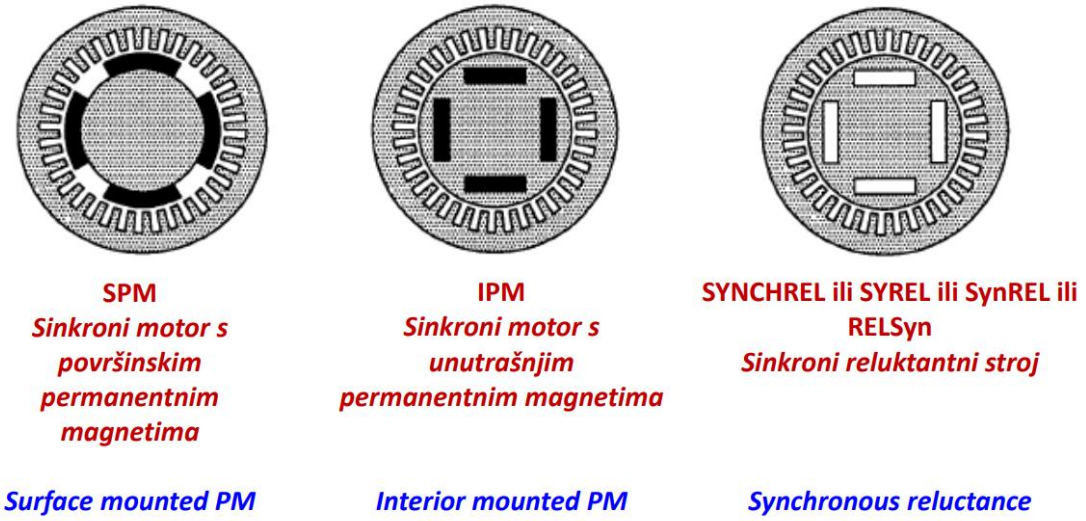
Sinkroni stroj je električni uređaj čiji se rotor okreće istom brzinom kao i rotirajuće magnetsko polje koje ga pokreće. Sastoji se od statora i rotora. Stator, vanjski nepomični dio stroja, ima armaturni namot na koji su namotane faze armature prostorno razmaknute za određeni kut, određen brojem faza u mreži. Tijekom rada u motorskom načinu, kroz armaturni namot teče struja koja generira rotirajuće magnetsko polje.

Rotor je pokretni dio stroja na koji je namotan uzbudni namot. Kroz ovaj namot prolazi istosmjerna uzbudna struja, stvarajući magnetsko polje. U motorskom načinu rada, rotor slijedi rotirajuće magnetsko polje statora. Umjesto uzbudnog namota, ponekad se koriste stalni (permanentni) magneti, ili se rotor konstruira na način da pod utjecajem rotirajućeg magnetskog polja stvara reluktantni moment. Sinkroni stroj može raditi i kao motor i kao generator.

U generatorskom načinu rada, osovinu stroja pokreće vanjska mehanička energija, što rezultira induciranjem izmjeničnog napona na statoru. U motorskom načinu rada, stator je povezan na izmjeničnu struju koja generira rotirajuće magnetsko polje, prisiljavajući rotor na sinkrono okretanje s magnetskim poljem.

S obzirom na način izrade rotora razlikujemo 3 vrste sinkronih strojeva: SPM (Surface mounted permanent magnet), IPM (Interior mounted permanent magnet) te SynREL (Synchronous reluctance). SPM je sinkroni stroj kod kojeg su magneti zalijepljeni na površini rotora što mu ograničava mehanička svojstva. IPM je sinkroni stroj kod kojeg se magneti nalaze unutar rotora što mu daje bolja mehanička

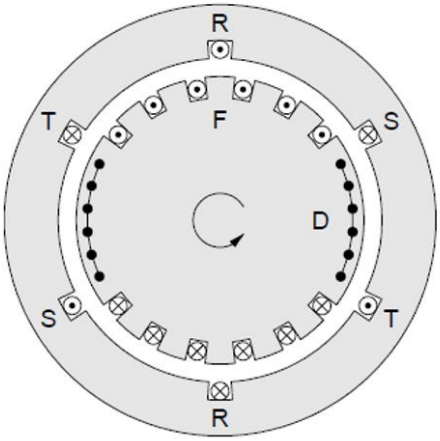
svojstva te veće nazivne brzine i snage. Danas se IPM motori najviše koriste kao pogonski motori električnih automobila. Najkompliciranija izvedba sinkronog stroja je reluktantni sinkroni stroj (SynREL) koji na rotoru nema permanentne magnete nego samo šupljine te se uz pomoć prijelaza između šupljina i zraka javlja reluktantni moment koji pokreće ovaj tip stroja. Kako bi se poboljšala efikasnost ovog stroja potrebna je što preciznija tehnologija rezanja limova od kojih je rotor sastavljen koja je skupa te je samim tim izrada ove vrste sinkronog stroja dosta skuplja od prije navedena dva. Slika 2.1 prikazuje smještaj magneta u rotoru SPM i IPM stroja te je prikazana jedna vrsta dizajna rotora reluktantnog stroja.



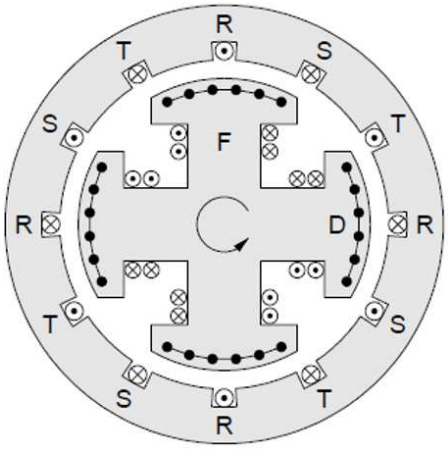
Slika 2.1 Prikaz SPM, IPM te SynREL stroja [1]

Sinkroni strojevi se u elektroenergetskom sustavu najčešće koriste kao generatori. U tom slučaju se ne koriste permanentni magneti nego uzbudni namoti na statoru na koje se dovodi istosmjerna struja preko kliznih prstenova ili četkica te se tako mehanički pretvara u izmjeničnu. Postoje dvije glavne vrste sinkronih generatora prema vrsti rotora, a to su sinkroni generatori s cilindričnim rotorom i sinkroni generatori s rotorom s istaknutim polovima. Cilindrični rotori koriste se kod turbina s velikim brzinama poput parnih ili plinskih turbina. Iz tog razloga generatori s cilindričnim rotorima nazivaju se i turbogeneratori. Mogu imati nazivne snage do čak 1800 MVA po jedinici. Zbog velikih centrifugalnih sila, rotor se sastoji od dugog, uskog, čvrstog čeličnog cilindra. Rotori s istaknutim polovima koriste se s hidro-turbinama male brzine s nazivnim snagama do 800 MVA po jedinici. Da bi se dobila prikladna frekvencija napona, usprkos maloj brzini rotora, rotori obično imaju više

pari polova. Za protočne hidroelektrane broj polova može doseći i p = 200. Takvi rotori imaju vrlo velike promjere (nekoliko metara) i kratke duljine. Slika 2.2 prikazuje sinkroni generatori s cilindričnim rotorom dok slika 2.2 prikazuje sinkroni generator s rotorom s istaknutim polovima. [2]



Slika 2.2 Presjek motora sa cilindričnim rotorom [2]



Slika 2.3 Presjek motora s rotorom s istaknutim polovima [2]

2.2 Asinkroni generatori

Asinkroni strojevi kao generatori se ne koriste u velikoj mjeri u elektroenergetskom sustavu. Razlikuju se od sinkronih po tome što nemaju potrebu za točnim podudaranjem brzine rotacije s frekvencijom električne mreže, odnosno rotor se ne vrti u sinkronizmu s magnetskim poljem statora već postoji određena razlika koja je izražena klizanjem (s).

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \tag{2.1}$$

s – iznos klizanja

n_s – sinkrona brzina [rpm]

n – brzina vrtnje rotora [rpm]

Prednosti asinkronih generatora uključuju jednostavnu konstrukciju, otpornost na oscilacije brzine rotacije, te sposobnost rada u širem rasponu uvjeta. To ih čini prikladnima za hidroelektrane gdje brzina vodnog toka može varirati.

Iako asinkroni generatori nude određene prednosti, s njima dolaze i izazovi. Primarni problem leži u potrebi za dodatnim uređajima za regulaciju i kontrolu brzine rotacije, što može povećati složenost sustava. Također, asinkroni generatori nisu idealni za primjene na područjima na kojima je potrebna precizna sinkronizacija s električnom mrežom.

3.Turbine

Turbina je mehanički uređaj dizajniran za pretvaranje energije fluida u rotacijsku energiju koja se preko vratila dalje šalje u generator gdje se pretvara u električnu energiju. Dizajn turbine se prilagođava karakteristika toka fluida. Postoji više vrsta turbina međutim najistaknutije među njima su: Francisova, Kaplanova i Peltonova turbina. [17]

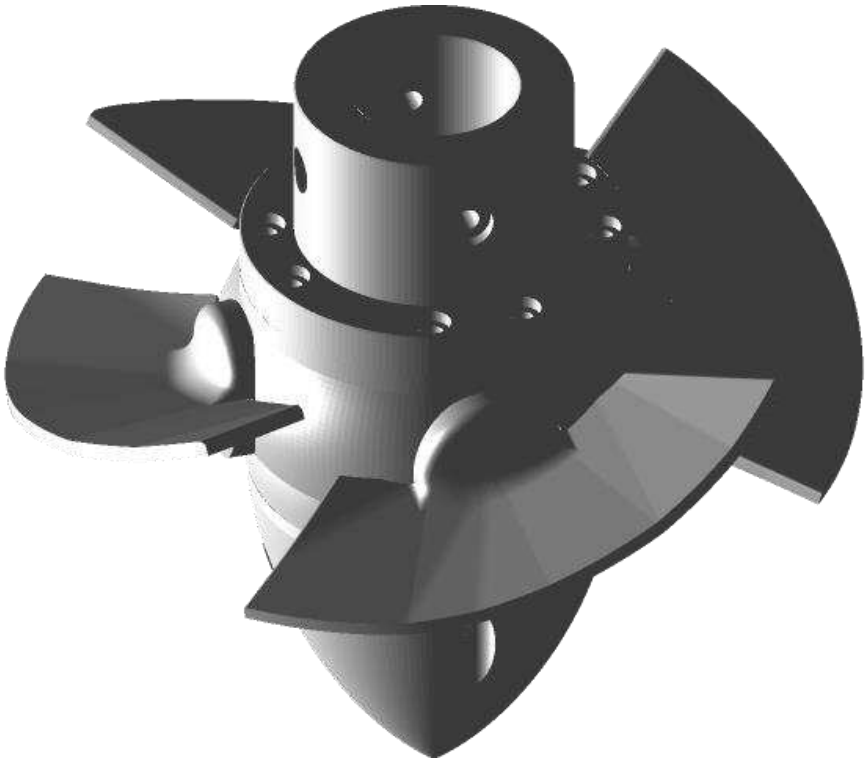
3.1 Francisova turbina

Francisove turbine imaju veliki stupanj iskoristivosti kapaciteta s preko 90 %, te veliki raspon djelovanja u odnosu na visinu fluida pri protoku kroz turbinu. Francisova turbina je reakcijska ili pretlačna turbina, a to su vodne turbine u kojima je tlak na ulazu u rotor veći od onoga na njegovom izlazu. Jedna od prednosti Francisove turbine je njezina prilagodljivost promjenama protoka vode te je ta karakteristika čini idealnom za lokacije gdje se protok vode značajno mijenja tijekom godine. Slika 3.1 prikazuje Francis turbinu.

Slika 3.1 Francisova turbina [11]

3.2 Kaplanova turbina

Kaplanova turbina je još jedna turbina iz kategorije reakcijskih. Ova vrsta turbine ima posebnu sposobnost prilagodbe različitim protocima vode i niskim padovima što je čini izuzetno efikasnom. Ključna karakteristika Kaplanove turbine su regulacijske lopatice koje omogućavaju podešenje kuta lopatica u skladu s promjenama protoka vode. Najčešće se koristi u područjima s varijacijama u vodostaju. Slika 3.2 prikazuje 3D model Kaplanove turbine.



Slika 3.2 Kaplanova turbina [12]

3.3 Peltonova turbina

Za razliku od prethodne dvije Peltonova turbina nije reakcijska nego impulsna s obzirom na to da ne dolazi do promjene tlaka vode na ulazu i izlazu iz turbine nego se mijenja kinetička energija vode. Uz pomoć mlaznica voda se usmjerava na lopatice koje su podijeljene na dvije polovice kako bi se maksimalno iskoristila kinetička energija vode. Regulacija ove turbine se vrši uz pomoć igle koja određuje protok vode kroz mlaznice. Peltonova turbina se koristi u područjima s velikim

tlakom i manjim protocima vode kao što su planinska područja. Slika 3.3 prikazuje Peltonovu turbinu.

Slika 3.3 Peltonova turbina [13]

4. Naponske i strujne prilike u normalnom pogonu i pri pojavi kvara

Naponske i strujne prilike elektroenergetskog sustava se u normalnom pogonu održavaju unutar propisanih granica kako bi se osigurala stabilnosti i pouzdanost sustava. Proizvodnja električne energije se prilagođava potrošnji kako bi sva potrošnja bila zadovoljena. U svrhu dobrog uvida i poboljšanja vođenja sustava rade se proračuni tokova snaga među elementima mreže.

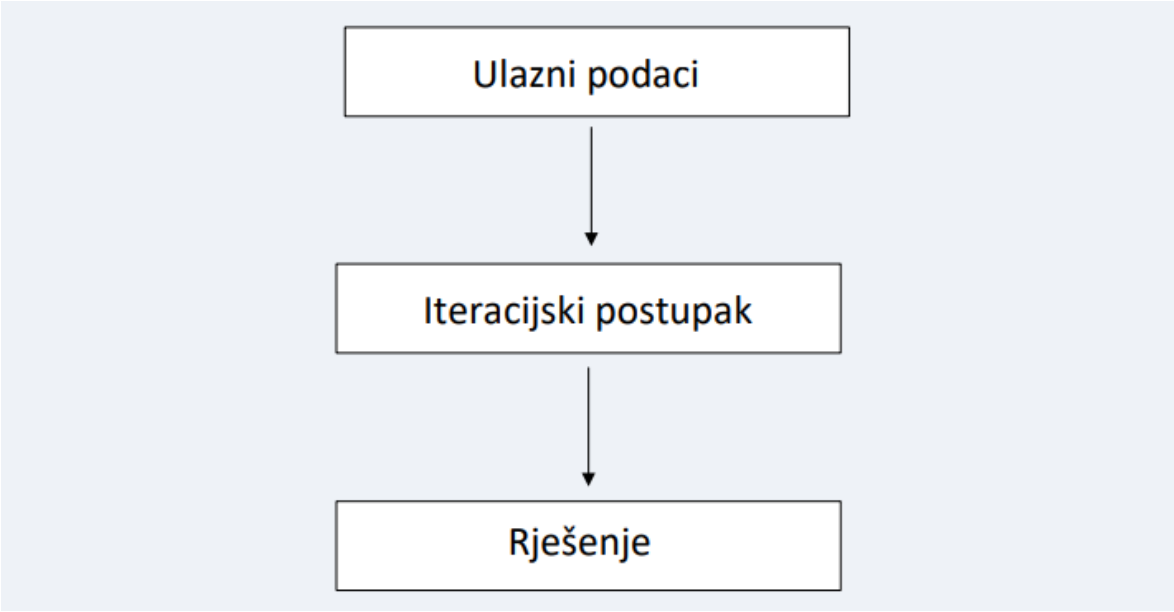
Pri pojavi kvara sustav podliježe dinamičkim promjenama. Zaštita reagira kako bi izolirala dio sustava u kojem se dogodio kvar te minimizirali utjecaj kvara na ostatak mreže. Elementi elektroenergetskog sustava te postavke zaštite se određuju s pomoću rezultata proračuna kratkog spoja kojim dobijemo maksimalnu i minimalnu struju kratkog spoja.[3]

4.1 Proračun tokova snaga

Jedan od osnovnih proračuna u elektroenergetskom sustavu je proračun tokova snaga. Potreban je za vođenje sustava, planiranje razvoja, projektiranje određenih dijelova sustava i tomu slično. Proračun se provodi u stacionarnom stanju te je njegov cilj odrediti napone po iznosu i kutu u svim čvorištima mreže. Rezultat proračuna je vektor napona svih čvorišta koji se sastoji od iznosa i kuta napona. Iz dobivenih rezultata moguće je izračunati iznose radne i jalove snage kroz grane mreže, injekcije snage u čvorištima te gubitke snage u mreži. Svako čvorište mreže je definirano s četiri električne vrijednosti: injektirana djelatna snaga, injektirana jalova snaga, iznos napona i fazni kut napona. U proračunu tokova snage za svako čvorište vrijedi da su dvije električne veličine zadane dok su dvije rezultat proračuna. Na osnovu toga koje su dvije vrijednosti poznate, a koje je potrebno izračunati, čvorišta se dijele na:

- Čvorišta tereta (poznato P, Q)
- Generatorska čvorišta (poznato |V|, P)
- Referentno čvorište (poznato |V|, δ)

Slika 4.1 prikazuje strukturu kojom se vrši proračun tokova snaga.



Slika 4.1 Struktura vršenja proračuna [3]

Ulazni podatci koji moraju biti zadani:

- Konfiguracija mreže
- Parametri elemenata mreže (impedancije vodova)
- Djelatna i jalova snaga u potrošačkim čvorištima
- Iznos (modul) napona i djelatne snage u generatorskim čvorištima
- Napon u referentnom čvorištu (kut se obično uzima za nulu)

Kako bi iteracijski postupak mogao započeti potrebno je postaviti početne vrijednosti napona čvorišta za koje se uzimaju nazivne vrijednosti. Osnovne metode proračuna tokova snaga temeljene na iteracijskim numeričkim postupcima su:

- Gauss-Seidel metoda pomoću Z-matrice
- Gauss-Seidel metoda pomoću Y-matrice
- Newton-Raphson metoda

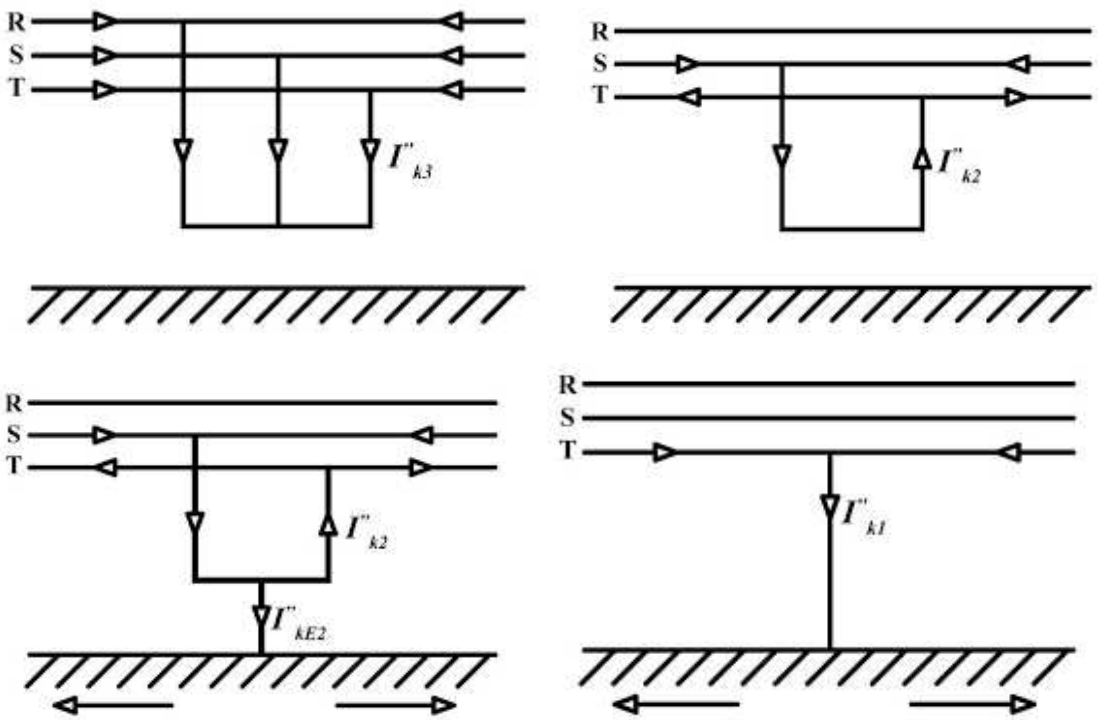
4.2 Proračun kratkog spoja

Kratki spoj je jedan od mogućih kvarova u elektroenergetskoj mreži. Karakteriziraju ga velike struje te po načinu nastanka može biti trofazni (sve tri faze su u kratkom spoju), dvofazni (dvije faze su međusobno povezane), dvofazni sa zemljom (dvije faze su spojene na zemlju), jednofazni (jedna faza spojena na

zemlju) te dvostruka jednofazna (dvije faze su pojedinačno spojene na zemlju). Slika 4.2 prikazuje shematski pojednostavljeni prikaz vrsta kratkih spojeva. Proračun kratkog spoja se započinje s pretpostavkama da su svi aktivni elementi simetrični te da je mreža u trenutku kratkog spoja neopterećena. Ovisno o vrsti kvara, definiraju se strujno-naponske prilike na mjestu kvara te se na temelju vrste kratkog spoja određuju vrijednosti simetričnih impedancija točnije direktna, inverzna i nulta impedancija. Nakon izračunatih vrijednosti struja i napona uz pomoć matrica simetričnih komponenti određuju se stvarne strujno-naponske prilike na mjestu kvara. Matrice prijelaza iz sustava simetričnih komponenti u trofazni sustav te obratno su prikazane jednadžbom 4.1 i 4.2 gdje su I_R , I_S i I_T struje triju faza sustava dok su I_d , I_i.i I_0 direktna, inverzna i nulta struja u sustavu simetričnih komponenti.

$$\begin{bmatrix} I_R \\ I_S \\ I_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_d \\ I_i \\ I_0 \end{bmatrix} \tag{4.1}$$

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_i \\ I_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_R \\ I_S \\ I_T \end{bmatrix} \tag{4.2}$$



Slika 4.2 Pojednostavljen prikaz vrsta kratkih spojeva [4]

IEC 60909 standard uzima u obzir naponske prilike u trenutku nastanka kratkog spoja preko naponskog faktora c. Faktor c je potreban zbog promjena koje nastaju za vrijeme kratkog spoja. Za vrijeme trajanja kratkog spoja mijenjaju se naponi i regulacijske sklopke transformatora dok se generatori i motori različito ponašaju u određenim periodima kratko spoja. Tablica 4.1 Odabir naponskog faktora c za izračun kratkog spoja prikazuje određivanje naponskog faktora c prema IEC 60909 standardu.[4]

Tablica 4.1 Odabir naponskog faktora c za izračun kratkog spoja [4]

<table>
<tr><td rowspan="2">Nazivni napon, U_n</td><td colspan="2">Naponski faktor c za proračun (Prema IEC 60909)</td></tr>
<tr><td>Maksimalne struje KS, c_{max}</td><td>Minimalne struje KS, c_{min}</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Niski napon
100 V – 1000 V</td><td>1,05 (sustavi s tolerancijom napona ±6%)</td><td rowspan="2">0,95

0,90</td></tr>
<tr><td>1,10 (sustavi s tolerancijom napona ±10%)</td></tr>
<tr><td>Srednji napon
>1 kV – 35 kV</td><td rowspan="2">1,10</td><td rowspan="2">1,00</td></tr>
<tr><td>Visoki napon
>35 kV</td></tr>
</table>

5. Zaštita postrojenja male hidroelektrane

Kao i svakom postrojenju tako i malim hidroelektranama je potreban sustav zaštite koji će štititi generator od vanjskih utjecaja u elektroenergetskoj mreži te također mrežu od utjecaja generatora pri određenom kvaru. Ako se dogodi kvar na mreži, npr. kratki spoj, taj kvar ne smije utjecat na rad generatora također ako dođe do kvara na generatoru zadaća zaštite je smanjiti utjecaj kvara na ostatak mreže. Sustav zaštite radi trajno. Ispravnost sustava zaštite očituje se proradom kada dođe do kvara te njegovim mirovanjem u normalnom pogonskom stanju. U nastavku ćemo se bazirati na neke od glavnih zaštitnih funkcija koje se koriste u pogonu male hidroelektrane. [5]

5.1 Diferencijalna zaštita generatora

Diferencijalna zaštita je glavna, najvažnija i najbrža zaštita od kratkih spojeva. Koristi se za detektiranje kvarova unutar štićenog područja koje je određeno smještajem pripadnih strujnih transformatora, a zasniva se na usporedbi struja ispred i iza štićenog uređaja koje moraju biti jednake. Diferencijalna zaštita generatora mora udovoljavati dvama uvjetima: osjetljivo detektiranje i brza prorada kod kvarova unutar štićenog područja i stabilnost tijekom kvarova izvan štićenog područja.

Osjetljivost detekcije diferencijalne struje za vrijeme kvarova unutar štićenog područja podešava se odgovarajućim osnovnim parametrom, a stabilnost zaštite tijekom kvarova izvan štićenog područja ovisi o drugom faktoru kojim se definira nagib proradne karakteristike. Osjetljivost treba biti što veća da se omogući registriranje što većeg broja kvarova, ali dovoljno visoka da se ne ugrozi normalan rad štićenog stroja. Ovdje se misli na neželjenu proradu zaštite generatora zbog pogrešaka strujnih transformatora. Diferencijalna struja koja se može pojaviti kao posljedica pogreške mjernih transformatora obično se pretpostavlja na 10 % nazivne pa iz toga slijedi i minimalno podešenje.[8]

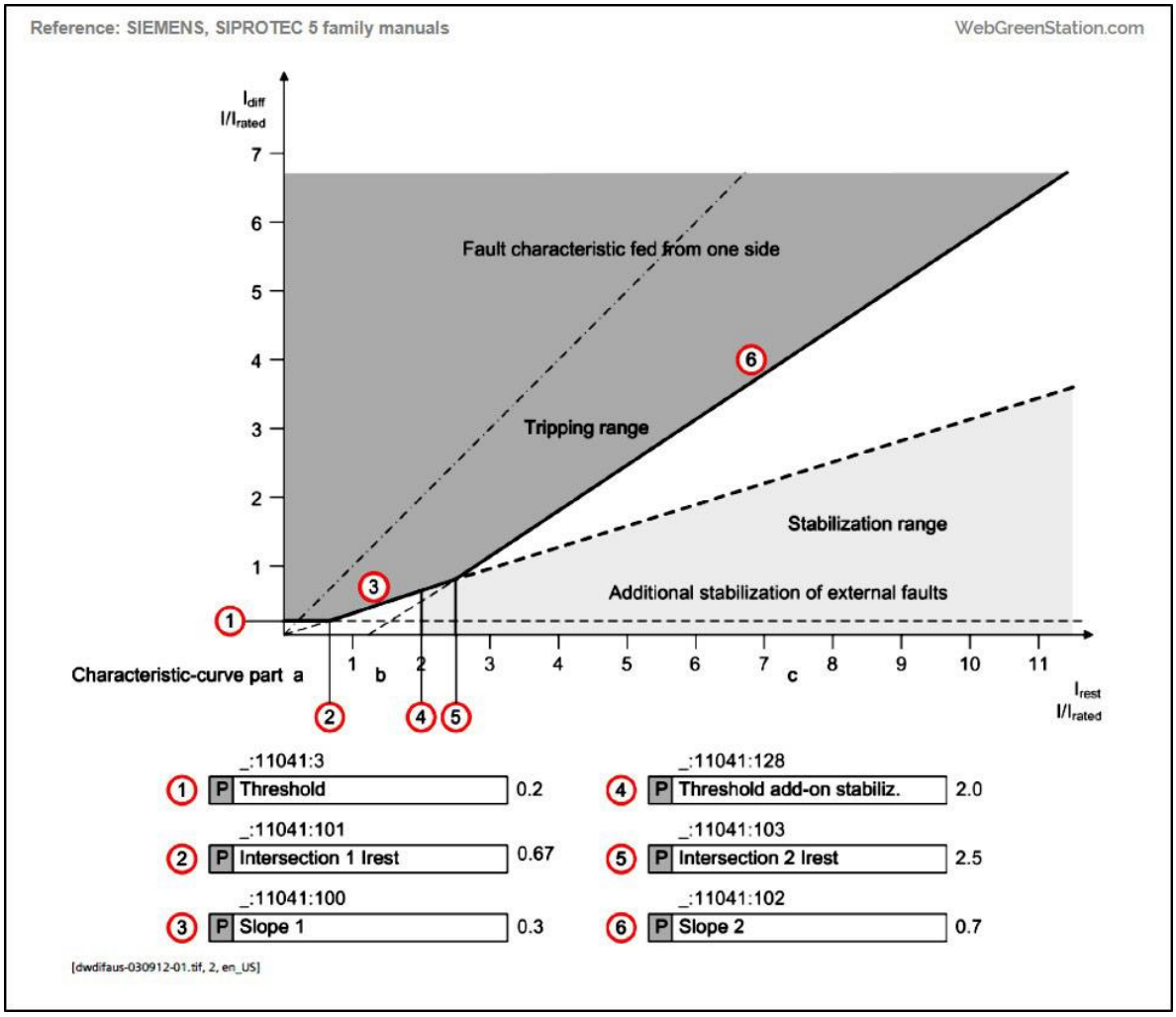
U slučaju da se dogodi vanjski kvar tj. kvar u mreži, a ne unutar područja štićenja strujni mjerni transformatori mogu doći u zasićenje. Kroz mjerno mjesto releja koje registrira razliku struja pri unutarnjem kvaru generatora poteći će vrlo

velika struja I_{diff}. Da bi se takvo stanje izbjeglo definirana je tzv. stabilizirajuća struja I_{stab}.

$$I_{diff} = \left(\underline{I_1} + \underline{I_2}\right) \tag{5.1}$$

$$I_{stab} = Max(\left|\underline{I_1}\right|; \left|\underline{I_2}\right|) \tag{5.2}$$

Kada su te dvije struje jednake tada se dogodio unutarnji kvar generatora tj. nastala je stvarna diferencijalna struja i dobivamo isprekidano-točkastu karakteristiku pod nagibom 45° na slici 5.1 [6]



Slika 5.1 Karakteristika diferencijalne zaštite [6]

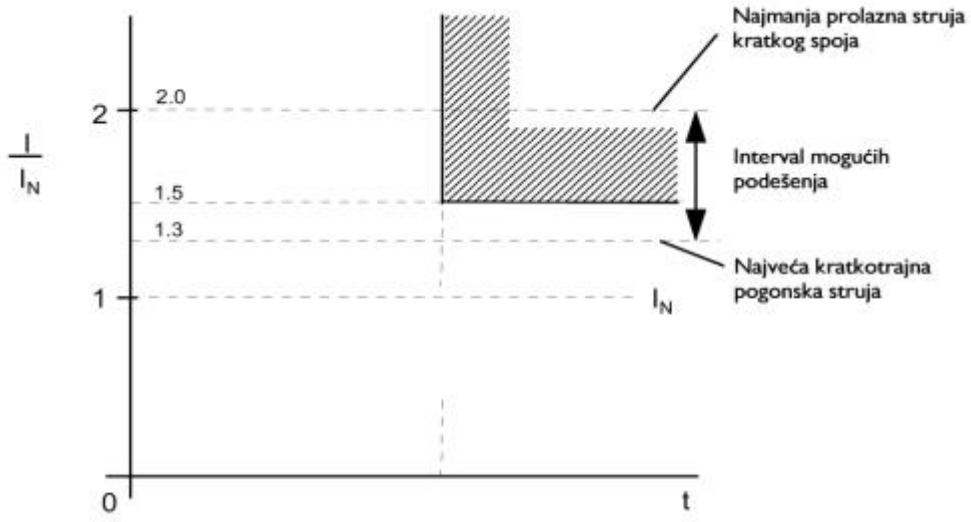
5.2 Nadstrujna zaštita generatora

Nadstrujna zaštita služi za nadzor prevelikih pogonskih struja i za otkrivanje poremećaja kao rezervna zaštita. Spaja se na strujne transformatore smještene u

zvjezdištu generatora sa zadatkom zaštite zone između neutralne točke generatora i prekidača na visokonaponskoj strani. Zaštitno strujno podešenje treba biti između minimalne prolazne struje kvara (obično pri dvopolnom kratkom spoju u mreži) i maksimalne kratkotrajne pogonske struje. Ta najveća struja određuje se u skladu sa:

- najvećom trajnom pogonskom strujom
- uklopnim stanjem u mreži
- utjecajem najveće moguće vrijednosti napona
- točnošću mjerenja struje

Struja svake faze se uspoređuje s parametrom I> i s vremenskim zatezanjem T I>. Vrijednost na kojoj zaštita prestaje s djelovanjem je 95 % vrijednosti prorade. Prorada ne smije nastati zbog preopterećenja pa se zato najveći dopušteni teret parametrira 20-30 % više za generatore. Slika 5.2 prikazuje karakteristiku nadstrujne zaštite te područje njezine prorade.[7]



Slika 5.2 Karakteristika nadstrujne zaštite [8]

5.3 Podfrekventna i nadfrekventna zaštita generatora

Frekvencijska zaštita štiti generator od vibracija i prekomjernog zagrijavanja. Rad generatora s frekvencijama višim ili nižim od nazivne može rezultirati vibracijama opasnim po generator i sam pogonski stroj. Veća frekvencija znači veće gubitke u željezu, a frekvencije znatno veće od nazivne zabrinjavajuće su i zbog

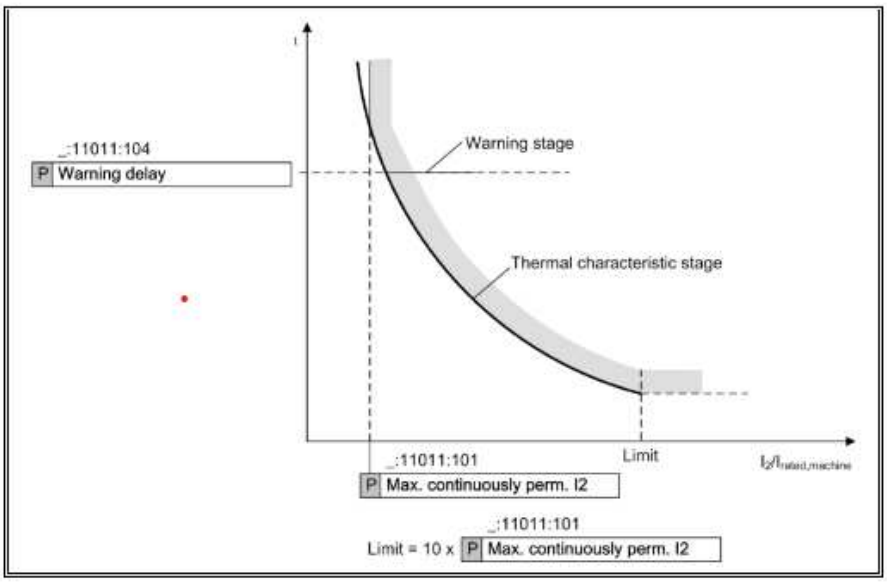
velikih centrifugalnih sila. Tada nadfrekvencijska zaštita djeluje kao rezerva regulatoru brzine.

5.4 Zaštita generatora od gubitka uzbude

Odnos radne i jalove snage koju generator daje u mrežu neposredno ovisi o uzbudi, a ako je uzbudna struja premala, nemoguće je proizvesti zahtijevani iznos jalove snage. Struja u namotima statora može postati i kapacitivna. Rad poduzbuđenog generatora u kapacitivnom području može rezultirati nestabilnošću i gubitkom sinkronizma. Karakteristika zaštite od gubitka uzbude korespondira s granicom statičke stabilnosti, a podešenje slijedi ovisno o sinkronoj i prijelaznoj reaktanciji generatora. Vremensko zatezanje se određuje na način da ne dođe do pogrešne prorade pri prijelaznim pojavama (njihanje). [6]

5.5 Zaštita od nesimetričnog opterećenja

Rotor sinkronog stroja najopterećeniji je njegov elektromehanički dio. Posebice, kad se pojavljuje nesimetrični pogon. Inverzno polje armature generira vrtložne struje dvostruke frekvencije na rotorskoj površini što posredno dovodi do pregrijavanja prigušnih namota. Slika 5.3 prikazuje karakteristiku prorade zaštite nesimetričnog opterećenja kako ne bi došlo do pregrijanja.



Slika 5.3 Karakteristika zaštite nesimetričnog opterećenja [7]

6. Zakonske odredbe

Liberalizacijom tržišta te povećanjem energetske učinkovitosti došlo je do promjena i u elektroenergetskom sustavu. Uvodi se novi pojam aktive mreže s obzirom na to da sada snage teku u oba smjera jer određeni potrošači mogu imati svoj distribuirani izvor te slati višak proizvedene snage u sustav. Aktivna mreža zahtijeva drugačiju organizaciju zaštite i vođenja distribucijskog sustava. Male elektrane, s obzirom na distribucijsku mrežu na koju se priključuju, mogu biti namijenjene: prvenstveno proizvodnji za pokrivanje vlastitih potreba, za prodaju cjelokupne proizvedene električne energije, ili pak kombinaciji ove dvije varijante. Priključak distribuiranih izvora na distribucijsku mrežu može biti na niskonaponskoj ili na srednjenaponskoj razini, na sabirnicama ili u mreži, ovisno o ukupnoj snazi male elektrane, okolnostima mreže i drugim faktorima. Pri odlučivanju o mogućnostima i uvjetima priključka treba voditi računa o snazi i planiranoj godišnjoj proizvodnji, vršnoj snazi i potrošnji na mjestu priključka, vrsti i osobinama pogona, snazi kratkog spoja mreže na mjestu priključka.

Da bi se određena elektrana priključila na distribucijsku mrežu potrebno je prije svega izvršiti proračune tokova snaga, proračun kratkih spojeva, a kod većih snaga i utjecaj male elektrane na stabilnost elektroenergetskog sustava. Malu elektranu treba projektirati, izgraditi i voditi u pogonu tako da se izbjegnu, odnosno ograniče negativna povratna djelovanja na distribucijsku mrežu i postojeće potrošače.

Svaka država propisuje svoje zakone i propise za priključenje distribuiranih izvora bilo na niskonaponsku ili srednjenaponsku razinu. Što se tiče tehničkih podataka male elektrane, jediničnu snagu generatora određuje vlasnik elektrane i proizvođač generatora, prema kojoj se onda određuje napon generatora koji može biti: U_{ng} = 0,4 kV, 3 kV, 6 kV i 10 kV. Članci 47 i 48 Mrežnih pravila distribucijskog sustava omogućuju priključenje postrojenja i instalacija pojedinačnog proizvođača na srednjenaponske sabirnice u transformatorskoj stanici (TS) visokonaponske/srednjenaponske razine, s priključnom snagom do uključivo 20 MW. Međutim, važno je napomenuti da postoji uvjet da se za priključnu snagu jednaku ili veću od 10 MW mora provesti analiza prijenosne mreže u suradnji s operatorom prijenosnog sustava (EOTRP).

Analiza prijenosne mreže u EOTRP-u provodi se prilikom razmatranja mogućnosti priključenja postrojenja i instalacija proizvođača s priključnom snagom između 5 MW i 10 MW. Ova analiza posebno se fokusira na situaciju gdje se postrojenje povezuje na mrežu koja se opskrbljuje iz TS VN/SN razine. Bitno je naglasiti da ukupna priključna snaga postojećih i budućih proizvođača mora biti veća ili jednaka nazivnoj snazi najmanjeg energetskog transformatora VN/SN razine ugrađenog u navedenoj TS VN/SN razine. Male elektrane ukupne snage do uključujući 500 kW priključuju se na niskonaponsku mrežu. Priključak može biti ostvaren na niskonaponski vod ili niskonaponske sabirnice transformatorske stanice. Na niskonaponski vod mogu se priključiti elektrane ukupne snage do uključujući 100 kW. Uz radnu snagu male hidroelektrane u mrežu isporučuju i jalovu u iznosu 0-75 % radne snage. Proizvodnja jalove snage ovisi o karakteristikama mreže na mjestu priključka. U slučaju da dođe do povećanja napona u mreži, uređaji za vođenje pogona male hidroelektrane su dužni smanjiti proizvodnju jalovine, a posljedično i radne snage. Kako bi distribucijskog sustava mogao pravilno i pravovremeno upravljati svojim sustavom potrebno je da stalno bude u kontaktu s proizvođačima električne energije među kojima su i vlasnici malih hidroelektrana.

Vlasnik male elektrane koja zahtijeva priključenje na distribucijsku mrežu prema članku 30 stavku 2 Mrežnih pravila distribucijske mreže na mjestu priključenja mora ispuniti temeljne tehničke uvjete koji se odnose na: odstupanje frekvencije, odstupanje napona, valni oblik napona, nesimetriju napona, pogonsko i zaštitno uzemljenje, razinu kratkog spoja, razinu izolacije, zaštitu od kvarova i smetnji te faktor snage. Vlasnik je također odgovoran za usklađivanje svoje zaštite od kvarova s odgovarajućom zaštitom u distribucijskoj mreži. Cilj je osigurati da eventualni kvarovi na njegovom postrojenju ili instalacijama ne uzrokuju poremećaje u distribucijskoj mreži niti kod drugih korisnika mreže.

Utjecaj male elektrane na padove napona i tokove snaga u sustavu određuje se proračunom tokova snaga u kojem se uzimaju vršna opterećenja karakterističnih točaka opterećenja. Razlog tomu je dobivanje tokova snaga i padova napona za ”najgori slučaj“, tj. slučaj kada je sustav najopterećeniji. Male elektrane instalirane snage do 1 MVA ne mogu znatnije povećati snagu kratkog spoja u distribucijskoj mreži pa je provjera kriterija snage kratkog spoja obavezna samo ako snaga male elektrane prelazi 1 MVA. Za priključenje se koristi spojni prekidač na mjestu

priključenja male elektrane ili izuzetno generatorski prekidač. Mala elektrana mora na mjestu priključka zadovoljiti uvjete kvalitete napona prema EN 50160 i elektromagnetsku kompatibilnost prema IEC 61000-x-x, što se provjerava tijekom pokusnog rada.

Prema članku 34. Mrežnih pravila distribucijske mreže, ako nije drukčije dogovoreno, faktor snage treba iznositi od 0,95 induktivno do 1, stoga, prema članku 50 postrojenje i instalacija proizvođača priključeni na mrežu moraju imati mogućnost pogona s faktorom snage 0,9 induktivno (poduzbuđeno) do 0,9 kapacitivno (naduzbuđeno). Članak 38 navodi granične veličine poput treperenja napona od 0,9 za kratkotrajno te 0,7 za dugotrajno, razinu ukupnog izobličenja (THD) od 6,5 %, nesimetričnost napona od 95 % 10-minutnih prosjeka efektivnih vrijednosti inverzne komponente napona za razdoblje od tjedan dana. U cilju ograničavanja kumulativnog utjecaja svih korisnika mreže na iznos planirane razine nesimetričnosti napona, granične vrijednosti nesimetričnosti napona uzrokovane pojedinim korisnikom mreže, na mjestu priključenja, određuju se proporcionalno njegovoj priključnoj snazi. [15]

Uz Mrežna pravila distribucijske mreže prije početka projekta male hidroelektrane na nekom području potrebno je proučiti i Pravila o priključenju na distribucijsku mrežu kojima se utvrđuje:

- postupak priključenja
- postupak promjene na priključku
- upute sudionicima u postupku priključenja i promjena na priključku
- izdavanje uvjeta priključenja
- izdavanje posebnih uvjeta
- izdavanje elektroenergetske suglasnosti
- izrada i sadržaj elaborata o mogućnosti priključenja na mrežu
- izrada i sadržaj elaborata optimalnog tehničkog rješenja priključenja, koji je uvjet za utvrđivanje posebnih uvjeta i uvjeta priključenja u skladu s propisima iz područja prostornog uređenja i gradnje
- sadržaj preliminarnog mišljenja operatora distribucijskog sustava o mogućnosti priključenja na distribucijsku elektroenergetsku mrežu te o mogućim opcijama za priključenje

- način i uvjeti za nabavu roba, usluga i radova za izgradnju priključka i stvaranje tehničkih uvjeta u mreži
- uvjeti za ovlaštenog izvođača pridjeljivih poslova
- postupak rješavanja prigovora i žalbi
- obrasci dokumenata i ugovora
- detaljnije uređenje informacija o katastru vodova

U postupku priključenja na distribucijsku mrežu prema člancima 47 i 48 Mrežnih pravila distribucijske mreže, razmatra se mogućnost i opcije izgradnje priključka, utvrđuje tehničko rješenje priključka te određuju tehnički, ekonomski i ostali uvjeti priključenja građevine na mrežu. Propisi iz područja prostornog uređenja i gradnje također se primjenjuju na postupak priključenja. Postupak započinje podnošenjem odgovarajućeg zahtjeva operatoru distribucijskog sustava, a zahtjeve u postupku priključenja mogu podnositi investitor, vlasnik građevine ili projektant.

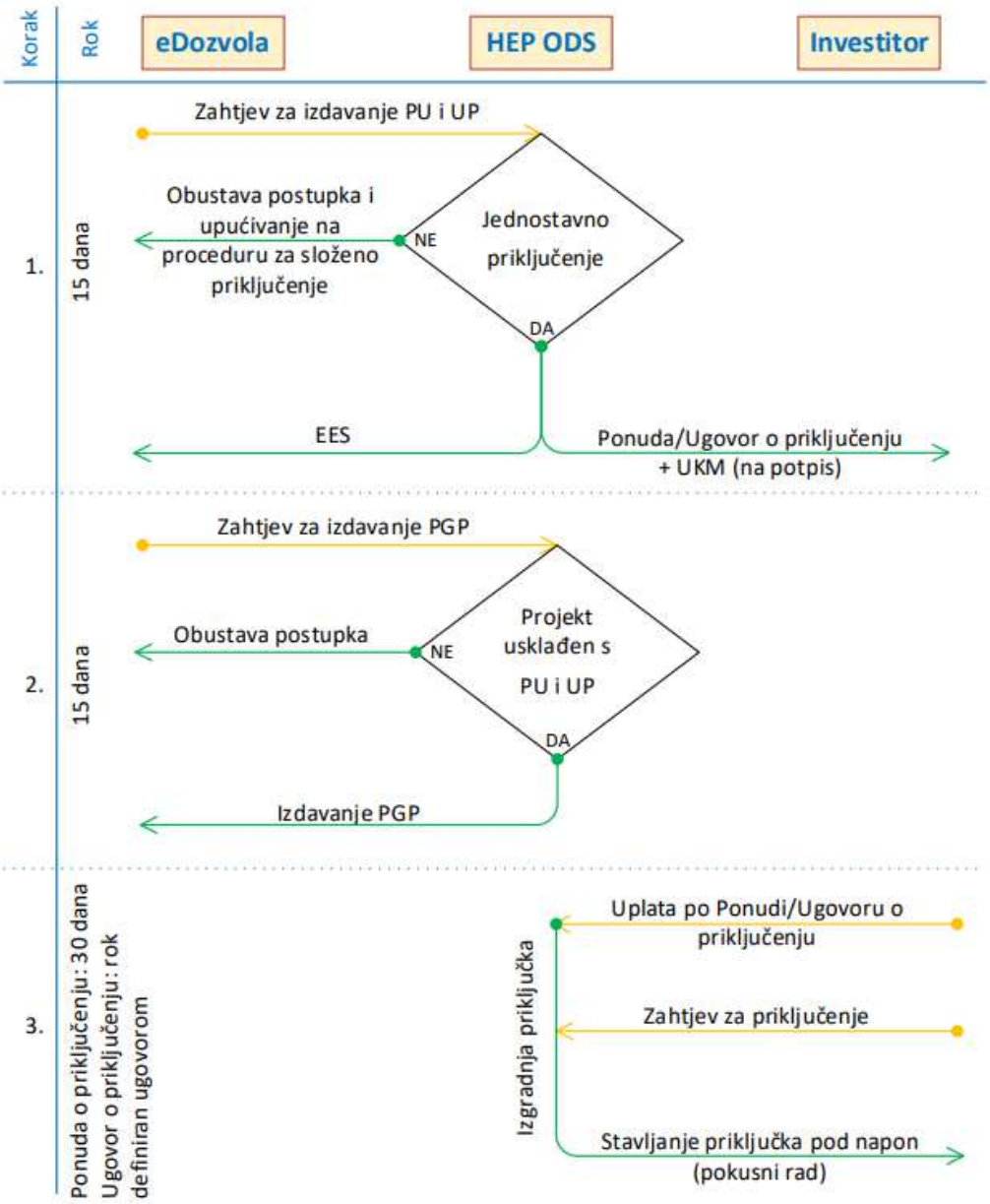
Postupak se dijeli na dvije vrste prema složenosti priključenja krajnjeg kupca ili kupca s vlastitom proizvodnjom: jednostavno i složeno priključenje. Nakon primitka zahtjeva za izdavanje EES (Energetski certifikat sustava) za krajnjeg kupca ili kupca s vlastitom proizvodnjom, operator distribucijskog sustava procjenjuje složenost postupka priključenja.

U slučaju jednostavnog priključenja, operator izdaje EES i dostavlja investitoru ili vlasniku građevine ponudu o priključenju. Ako je priključak složen, operator obavještava podnositelja zahtjeva o razlozima odbijanja i predlaže provedbu složenog postupka priključenja, pritom dostavljajući ponudu za izradu EOTRP-a (Elaborat o tehničkim rješenjima priključka).

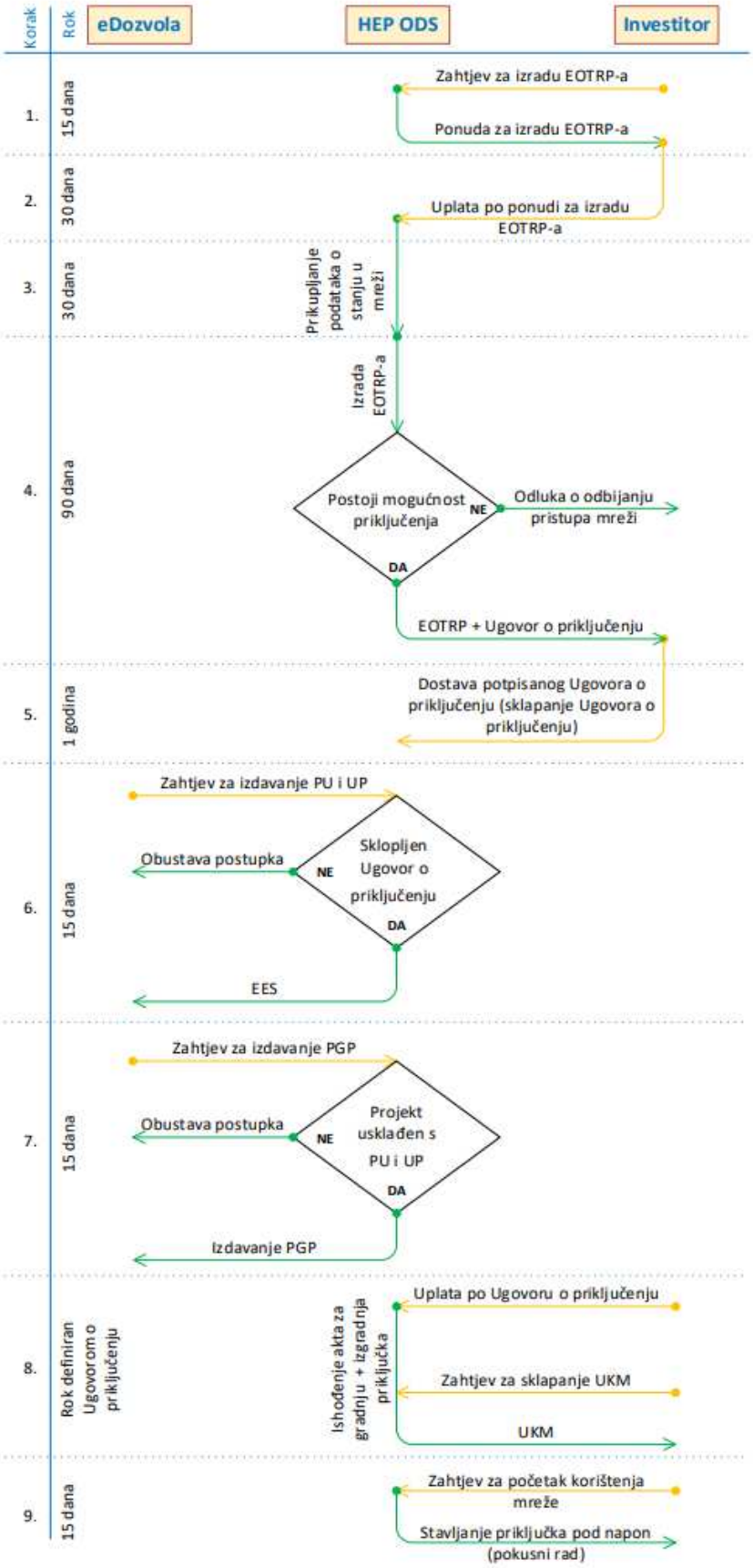
U iznimnim situacijama, gdje su tehnički uvjeti potrebni samo u niskonaponskoj (NN) mreži ili ako se stvaranje tehničkih uvjeta odnosi na izgradnju transformatorske stanice srednje/niže razine (TS SN/NN) koja je u fazi realizacije, operator distribucijskog sustava primjenjuje odredbe postupka jednostavnog priključenja. Umjesto ponude o priključenju, investitoru ili vlasniku građevine dostavlja se ugovor o priključenju koji definira rokove i uvjete za priključenje.

U situacijama gdje je priključak složen zbog rješavanja imovinskopravnih odnosa s trećim stranama, operator distribucijskog sustava također primjenjuje odredbe postupka jednostavnog priključenja, izdaje EES i umjesto ponude o

priključenju dostavlja investitoru ili vlasniku građevine ugovor o priključenju s definiranim rokovima i uvjetima. Nakon što operator distribucijskog sustava primi zahtjev za izdavanje EOTRP-a, a ako smatra da je moguće provedbom jednostavnog priključenja, odbija zahtjev za EOTRP-om i potiče podnositelja zahtjeva da podnese zahtjev za EES-om (Energetski certifikat sustava). Slika 6.1 i Slika 6.2 prikazuju dijagrame jednostavnog i složenog priključenja na mrežu. [16]



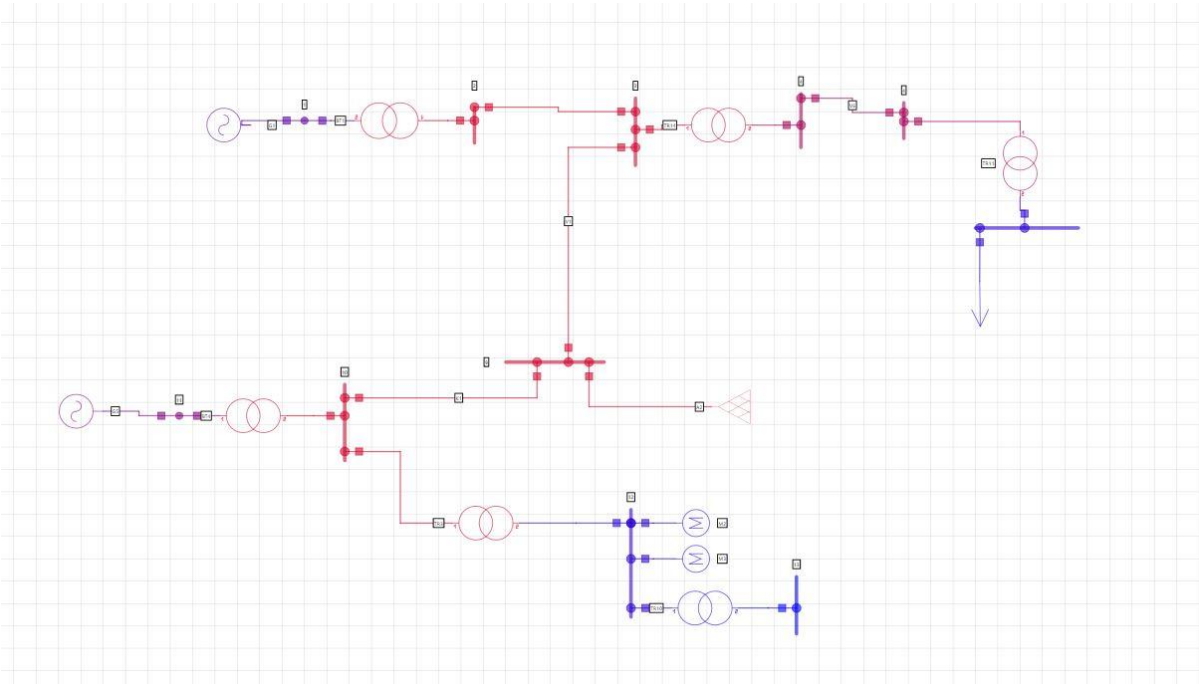
Slika 6.1 Dijagram procesa jednostavnog priključenja na distribucijsku mrežu [16]



Slika 6.2 Dijagram procesa složenog priključenja na distribucijsku mrežu [16]

7. Analiza mreže u programu NEPLAN

NEPLAN je softverski alat za analizu, planiranje, optimizaciju i simulaciju mreža. Korisničko grafičko sučelje prilagođeno korisniku omogućuje učinkovito izvođenje studijskih slučajeva. Prilagodljiv softver ima modularni koncept i obuhvaća sve električne aspekte u prijenosu, distribuciji, proizvodnji i mrežama. Najbolje odgovara za sustave obnovljive energije i primjene pametne mreže jer su svi potrebni modeli i metode simulacije integrirani s visokom točnošću i performansama. Osim proračuna u stacionarnom stanju, aspekata kvalitete napajanja i optimizacije te dizajna zaštite, NEPLAN simulator omogućuje modeliranje vjetroelektrana i solarnih elektrana s njihovim kontrolama za detaljne dinamičke simulacije (RMS/EMT) te integrira i modele Matlab/Simulink. U ovom slučaju smo koristili studentsku besplatnu verziju te smo stoga bili ograničeni na 15 čvorova mreže. Slika 7.1 Modelirana mreža prikazuje modeliranu mrežu u svrhu ovog rada.



Slika 7.1 Modelirana mreža

U Modeliranoj mreži nalaze se 2 generatora čiji su podatci prikazani u tablici 7.1.

Tablica 7.1 Podatci generatora iz mreže

Naziv	U_n (kV)	$\cos\varphi_n$	S_n (MVA)	X_d'' %	X_d' %	X_d %	X_i %	X_0 %
G1	10,5	0,85	80	12	20	140	12	∞
G5	15	0,8	150	15	21	192	20	∞

Svaki generator posjeduje blok transformator a tablica 7.2. prikazuje njihove podatke.

Tablica 7.2 Podatci blok transformatora iz mreže

Naziv	S_n(MVA)	U_{n1}/ U_{n2}	u_{kd}(%)	u_{rd}(%)	U_{k0}(%)	U_{r0}(%)	grupa spoja	uzemljenje	
								primar	sekundar
BT1	80	110/10,5	11	0,4	9,9	0,4	YNd5	direktno	---
BT4	150	110/15	10,6	0,4	9,54	0,4	YNd5	direktno	---

Ostalih transformatora ima još 4, a njihovi podatci su prikazani tablicom 7.3.

Tablica 7.3 Podatci ostalih transfomatora u modeliranoj mreži

Naziv	S_n (MVA)	U_{n1}/ U_{n2}	u_{kd}(%)	u_{rd}(%)	U_{k0}(%)	U_{r0}(%)	grupa spoja	uzemljenje	
								primar	sekundar
TR3	150	110/10	13	0,5	11,7	0,5	YNd5	20jΩ	---
TR10	1	10/0,4	6	1,35	5,4	1,35	Dyn5	---	direktno
TR11	8	35/10	7,5	0,6	7,5	0,6	Dyn5	---	direktno
TR14	20	110/35	11,6	0,55	10,8	0,55	Yy0	---	---

Kako bismo sve povezali koristili smo vodove iz tablice 7.4 te kabel iz tablice 7.5.

Tablica 7.4 Podatci vodova iz modelirane mreže

Naziv	U (kV)	Tip	Duljina od – do (km)	Z_{dv} (Ω/km)	Z_{0v} (Ω/km)
V1	110	Al/Fe 240/40 mm^2	20 – 130	0,121 +j0,406	0,36 + j1,23
V2	110	Al/Fe 150/25 mm^2	20 – 90	0,19 +j0,412	0,57 + j1,23
V6	35	AlFe 3*120 mm^2	5 – 20	0,253 + j0,35	0,4 + j1,47

Tablica 7.5 Podatci o kabelu u modeliranoj mreži

Naziv	U (kV)	Tip	Duljina od – do (km)	Z_{dv} (Ω/km)	Z_{0v} (Ω/km)
K1	110	XLPE 33x(1x1000) mm^2	2 – 30	0,029 + j0,158	0,51 + j0,23

Unutar mreže se nalazi i aktivna mreža. Tablica 7.6 prikazuje podatke aktivne mreže.

Tablica 7.6 Podatci o aktivnoj mreži

Naziv	U (kV)	R_d/X_d	R_0/X_0	X_0/X_d	S''_{k3} (MVA)
A2	110	0,1	0,2	3,3	3400

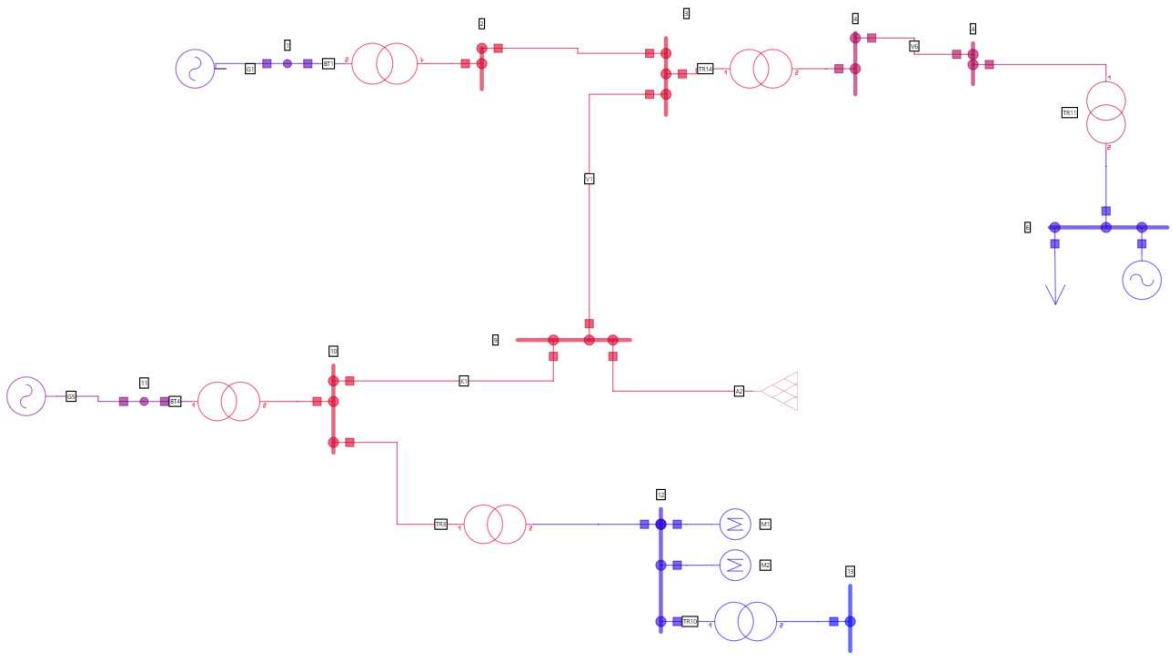
Mreža posjeduje i dva motora s podatcima iz tablice 7.7.

Tablica 7.7 Podatci o motorima u modeliranoj mreži

Naziv	U (kV)	P (MW)	p	$\cos\varphi_n$	η_n	I_p/I_n	R (Ω)
M1	10	7	1	0,88	0,975	5	0
M2	10	9	1	0,88	0,975	5	0

Te također u mreži je primjetan i teret s 1200 MW radne, 300 MVAr jalove snage te faktorom snage od 0.97.

Na spomenutoj mreži ćemo u nastavku rada analizirati promjene u tokovima snaga pojedinih elemenata te promjene u vrijednosti struja kratkog spoja pri dodavanju male hidroelektrane snage 6 MVA na sabirnicu broj 6. Slika 7.2 prikazuje model mreže nakon dodavanja male hidroelektrane.



Slika 7.2 Prikaz modelirane mreže s dodanom malom hidroelektranom

Mala hidroelektrana je dodana kao sinkroni generator s podatcima iz tablice 7.8.

Tablica 7.8 Podatci male hidroelektrane kao dodatnog izvora

Naziv	U_n (kV)	$\cos\varphi_n$	S_n (MVA)	X_d'' %	X_d' %	X_d %	X_i %	X_0 %
G3	10	0,87	6	12	20	140	12	∞

7.1 Analiza tokova snaga

Tablica 7.9 prikazuje tokove snaga pojedinih elemenata prije ugradnje male hidroelektrane. Iz navedene tablice vidimo da zbog tereta na sabirnici 6 imamo protok snage vod V6 u smjeru iz sabirnice 4 u sabirnicu 5.

Tablica 7.9 Tokovi snaga prije ugradnje male hidroelektrane

Name	Element Type	Nodes	P (MW)	Q (MVAr)
TR11	2W transformer	Bus-5	1.201	0.315
TR11	2W transformer	Bus-6	-1.200	-0.300
TR10	2W transformer	Bus-12	0.000	0.000
TR10	2W transformer	Bus-13	0.000	0.000
BT4	2W transformer	Bus-11	120.000	0.834
BT4	2W transformer	Bus-10	-119.615	9.335
V6	Line	Bus-4	1.205	0.321
V6	Line	Bus-5	-1.201	-0.315
TR3	2W transformer	Bus-10	16.011	8.927
TR3	2W transformer	Bus-12	-16.000	-8.635
G5	Synchronous machine	Bus-11	-120.000	-0.834
TR14	2W transformer	Bus-3	1.205	0.331
TR14	2W transformer	Bus-4	-1.205	-0.321
BT1	2W transformer	Bus-2	-67.768	8.530
BT1	2W transformer	Bus-1	68.000	-2.170
G1	Synchronous machine	Bus-1	-68.000	2.170
K1	Line	Bus-9	-103.074	21.153
K1	Line	Bus-10	103.604	-18.262
M2	Asynchronous machine	Bus-12	9.000	4.857
A2	External grid	Bus-9	159.702	-56.878
V2	Line	Bus-3	-62.317	20.351
V2	Line	Bus-2	67.768	-8.530
M1	Asynchronous machine	Bus-12	7.000	3.778
V1	Line	Bus-9	-56.628	35.724
V1	Line	Bus-3	61.111	-20.682
LOAD-1	Load	Bus-6	1.200	0.300

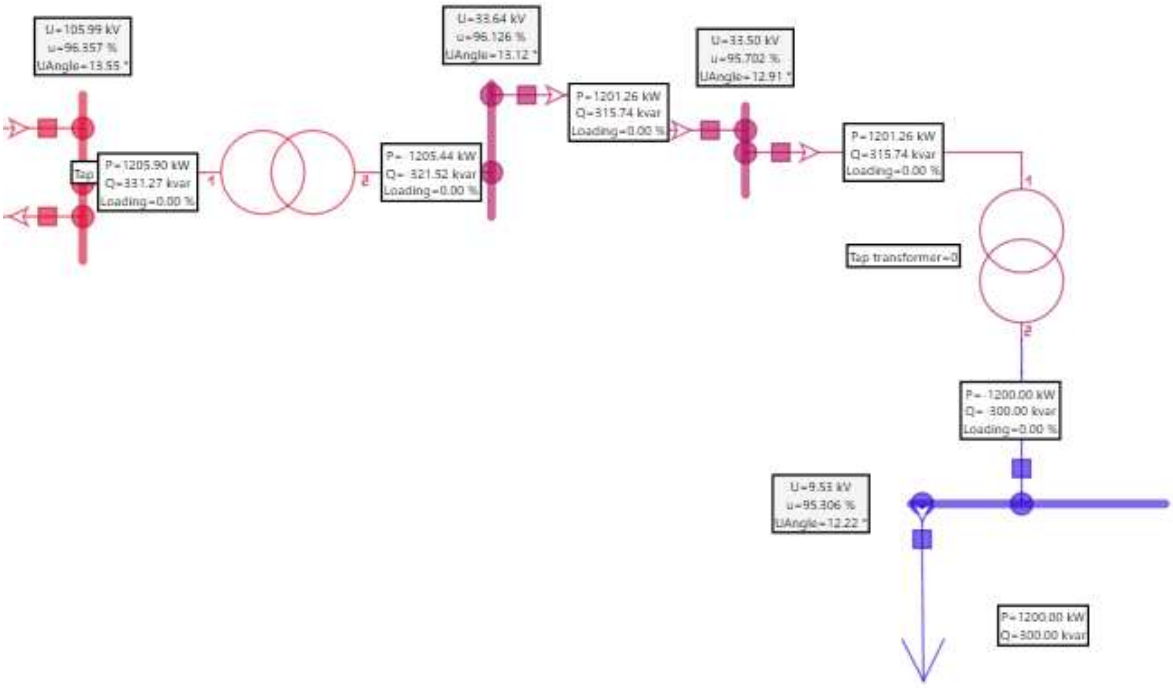
Nakon dodavanja male hidroelektrane došlo je do promjene tokova snaga u mreži. Usporedbom prethodne tablice i tablice 7 .10 vidimo da se najveća promjena dogodila na vodu V6 gdje nam sada snaga ide iz smjera sabirnice 5 prema sabirnici 4. To se naravno dogodilo zbog dodanog izvora u vidu male hidroelektrane. Snaga

proizvodnje male hidroelektrane se raspoređuje na teret koji se nalazi na istoj sabirnici kao i mala hidroelektrana dok ostatak snage ide u mrežu preko voda V6.

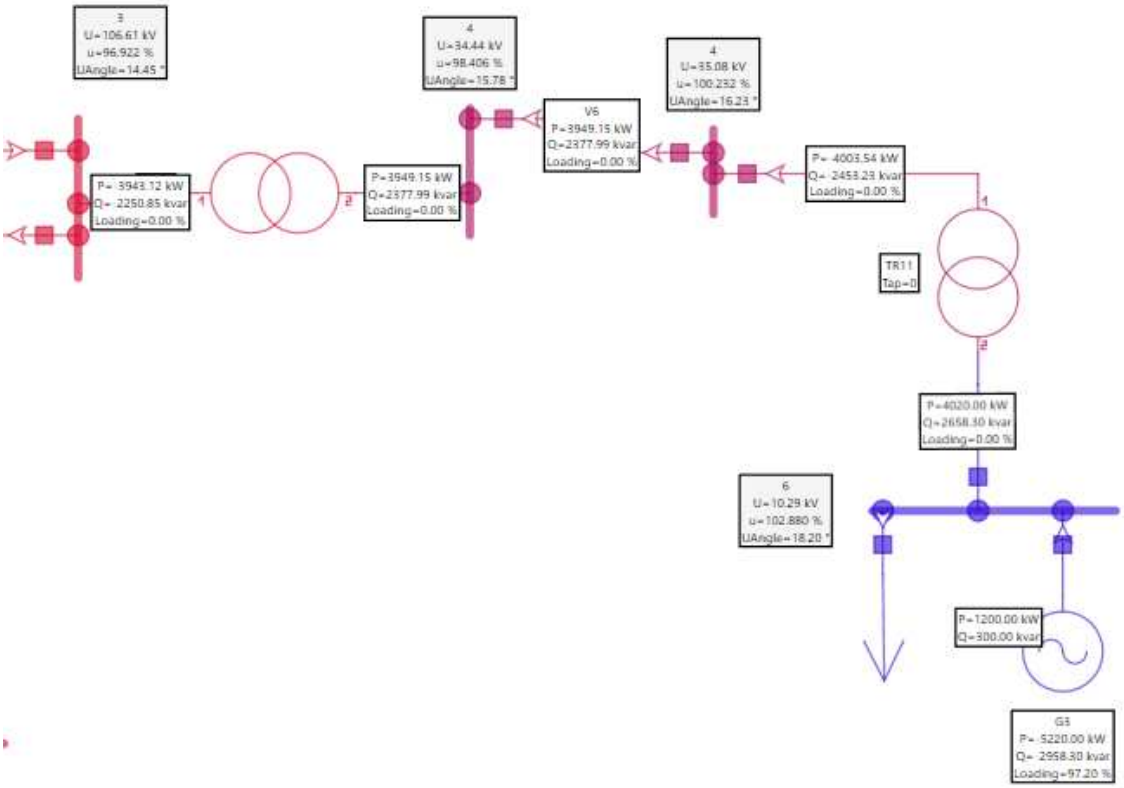
Tablica 7.10 Tokovi snaga nakon ugradnje male hidroelektrane

Name	Element Type	Nodes	P (MW)	Q (MVAr)
TR11	2W transformer	Bus-5	-4.003	-2.453
TR11	2W transformer	Bus-6	4.020	2.658
TR10	2W transformer	Bus-12	0.000	0.000
TR10	2W transformer	Bus-13	0.000	0.000
BT4	2W transformer	Bus-11	120.000	0.834
BT4	2W transformer	Bus-10	-119.615	9.335
V6	Line	Bus-4	-3.949	-2.377
V6	Line	Bus-5	4.003	2.453
TR3	2W transformer	Bus-10	16.011	8.927
TR3	2W transformer	Bus-12	-16.000	-8.635
G5	Synchronous machine	Bus-11	-120.000	-0.834
TR14	2W transformer	Bus-3	-3.943	-2.250
TR14	2W transformer	Bus-4	3.949	2.377
BT1	2W transformer	Bus-2	-67.768	9.913
BT1	2W transformer	Bus-1	68.000	-3.542
G1	Synchronous machine	Bus-1	-68.000	3.542
K1	Line	Bus-9	-103.074	21.153
K1	Line	Bus-10	103.604	-18.262
M2	Asynchronous machine	Bus-12	9.000	4.857
A2	External grid	Bus-9	164.247	-57.692
V2	Line	Bus-3	-62.307	21.753
V2	Line	Bus-2	67.768	-9.913
M1	Asynchronous machine	Bus-12	7.000	3.778
V1	Line	Bus-9	-61.173	36.539
V1	Line	Bus-3	66.250	-19.502
HIDRO	Synchronous machine	Bus-6	-5.220	-2.958
LOAD-1	Load	Bus-6	1.200	0.300

Posljedično promjeni protoka snage kroz vod V6 došlo je promjene protoka i kod ostalih vodova međutim te promjene su dosta manje. Slika 7.3 i slika 7.4 prikazuju isječak mreže iz programa NEPLAN s vodom V6 te tokove snaga tim vodom prije i nakon dodavanja male hidroelektrane.



Slika 7.3 Prikaz tokova snaga u programu NEPLAN prije dodavanja male hidroelektrane



Slika 7.4 Prikaz tokova snaga u programu NEPLAN nakon dodavanja male hidroelektrane

7.2 Analiza promjene napona na sabirnicama

Uz promjene tokova snaga dodavanjem male hidroelektrane dolazi i do promjene napona u pojedinim dijelovima mreže. U ovom slučaju nam mala hidroelektrana doprinosi naponskoj stabilnosti mreže s obzirom na to da su naponi imali donje granične vrijednosti kao što možemo vidjeti u tablici 7.11. Dodavanjem male hidroelektrane povećali smo proizvodnju te smo time povećali napone na srednjenaponskoj sabirnici 4 kako bi taj napon što manje odudarao od nazivnog napona u iznosu od 35 kV. Tablica 7.12 sadrži podatke o naponima pojedinih sabirnica nakon dodavanja male hidroelektrane te nazivne napone tih sabirnica.

Tablica 7.11 Naponi na sabirnicama prije ugradnje male hidroelektrane

Name	U (kV)	U_n (kV)
Bus-1	10.50	10.5
Bus-10	109.98	110
Bus-11	15.00	15
Bus-12	9.92	10
Bus-13	0.39	0.4
Bus-2	110.43	110
Bus-3	105.99	110
Bus-4	33.64	35
Bus-5	33.49	35
Bus-6	9.53	10
Bus-9	110.00	110

Tablica 7.12 Naponi na sabirnicama nakon ugradnje male hidroelektrane

Name	U (kV)	U_n (kV)
Bus-1	10.50	10.5
Bus-10	109.98	110
Bus-11	15.00	15
Bus-12	9.92	10
Bus-13	0.40	0.4
Bus-2	110.64	110
Bus-3	106.61	110
Bus-4	34.44	35
Bus-5	35.08	35
Bus-6	10.29	10
Bus-9	110.00	110

7.3 Analiza promjena struja kratkog spoja

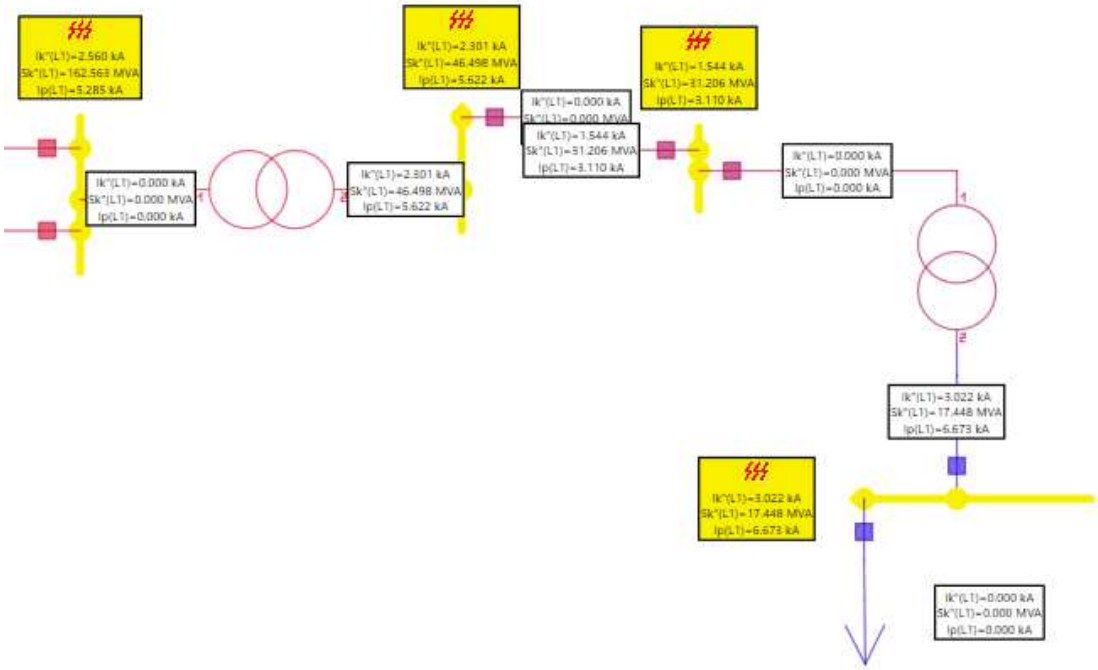
Kako bismo analizirali utjecaj male hidroelektrane na struje kratkog spoja u obzir smo uzeli najgori slučaj tj. tropolni kratki spoj. Program NEPLAN nam daje mogućnost odabiranja jednog ili više mjesta kvara stoga smo odlučili analizirati struje kratkog spoja u svakoj sabirnici kako bismo dobili bolji uvid utjecaja male hidroelektrane na sveukupni mrežu. Tablica 7.13 prikazuje podatke za struje kratkog spoja prije priključenja dok tablica 7.14 prikazuje struje kratkog spoja nakon priključenja male hidroelektrane na mrežu. Ponajviše pozornosti ćemo pridodati sabirnicama 3, 4, 5 i 6 s obzirom na to da se one nalaze najbliže novo dodanoj hidroelektrani te će stoga ona imati najveći utjecaj na kratke spojeve upravo na tim sabirnicama. Vidljivo je da su udaljenost sabirnice od hidroelektrane i razlika struja kratkog spoja obrnuto proporcionalne veličine, točnije s povećanjem udaljenosti utjecaj hidroelektrane na struje kratkog spoja pada. Posljedično tome struja kratkog spoja kvarom u sabirnici 6 na kojoj se nalazi hidroelektrana se poduplala, s 3 kA na 6 kA. Nadalje veća povećanja struje kratkog spoja vidimo u spomenutim sabirnicama 3, 4 i 5 koje iznose oko 500 A. Mala hidroelektrana nije imala utjecaja na velike struje kratkog spoja u sabirnicama 1, 11, 12 i 13 s obzirom na to da su one imale jednako velike vrijednosti i prije priključenja male hidroelektrane. Slika 7.5 Prikaz dijela mreže iz programa NEPLAN s vrijednostima struja kratkog spoja prije priključenja male hidroelektrane dok slika 7.6 prikazuju isječak mreže iz programa NEPLAN na kojima su prikazane vrijednosti tropolnog kratkog spoja nakon dodavanja male hidroelektrane.

Tablica 7.13 Struje kratkog spoja prije dodavanja male hidroelektrane

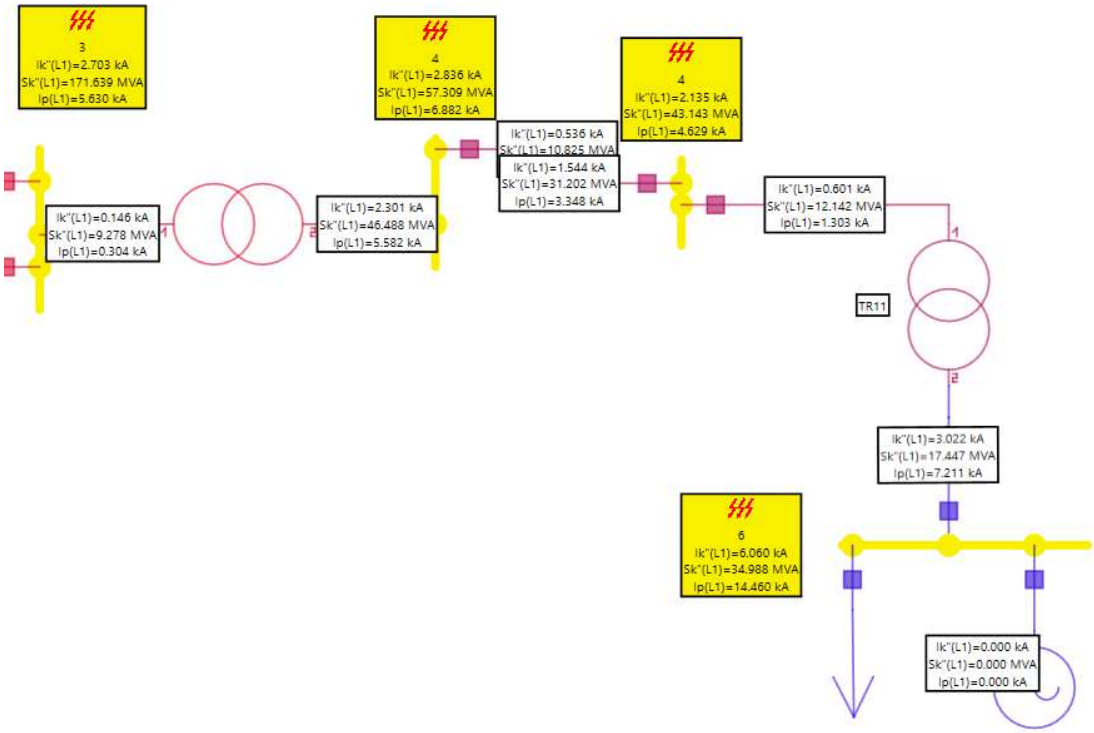
Name	Ik"(L1) (kA)
Bus-1	46.420
Bus-10	13.869
Bus-11	75.954
Bus-12	55.880
Bus-13	25.734
Bus-2	2.843
Bus-3	2.560
Bus-4	2.301
Bus-5	1.544
Bus-6	3.022
Bus-9	21.770

Tablica 7.14 Struje kratkog spoja nakon dodavanja male hidroelektrane

Name	Ik"(L1) (kA)
Bus-1	46.755
Bus-10	13.884
Bus-11	75.976
Bus-12	55.899
Bus-13	25.734
Bus-2	2.889
Bus-3	2.705
Bus-4	2.837
Bus-5	2.135
Bus-6	6.060
Bus-9	21.822



Slika 7.5 Prikaz dijela mreže iz programa NEPLAN s vrijednostima struja kratkog spoja prije priključenja male hidroelektrane



Slika 7.6 Prikaz dijela mreže iz programa NEPLAN s vrijednostima struja kratkog spoja nakon priključenja male hidroelektrane

8. Zaključak

Budućnost nam donosi povećanu brigu za okoliš koja će obuhvatiti i sektor elektroenergetike stoga obnovljivi izvori energije predstavljaju najučinkovitiji prijelaz na „zelenu“ energiju. Pojedine države, poput Hrvatske imaju dobar potencijal za iskorištavanje obnovljivih izvora energije, međutim taj potencijal nije u potpunosti iskorišten.

Ovaj rad govori o jednoj od mogućnosti većeg iskorištenja potencijala energije vode uz pomoć malih hidroelektrana koje bi se instalirale na mjestima većih potrošača. Postoji nekoliko tipova malih hidroelektrana, nekoliko tipova generatora te nekoliko tipova turbine. Odgovarajući elementi se kombiniraju ovisno o mjestu gdje će se instalirati mala hidroelektrana. Prije same instalacije ponajprije moramo ispitati potrebu za novim izvorom energije i njegov učinak na ostatak mreže na planiranom mjestu ugradnje. Vrše se mnogi proračuni kako bi utvrdilo ostaje li mreža, a i sam proizvođač unutar zakonski propisanih granica za vrijednosti poput maksimalnog odstupanja napona i frekvencije, faktora snage u mreži koji mora iznositi od 0,95 induktivno do 1, faktora snage same elektrane koji mora moći dosegnuti vrijednosti od 0.9 induktivno do 0.9 kapacitivno u svrhu regulacije mreže te mnoge druge vrijednosti. Jedan od načina ispitivanja utjecaja novih izvora na postojeću mrežu jest modeliranje mreže u programu NEPLAN. Mreža u ovom radu se sastojala od dva postojeća generatora te dodana mala hidroelektrana, šest transformatora, dva asinkrona motora, jednom aktivnom mrežom te jednim teretom. Sve je povezano u cjelinu preko devet sabirnica, tri voda i jednog kabela.

Usporedbom rezultata protoka snaga, napona i struja kratkog spoja u mreži prije i nakon dodavanja male hidroelektrane snage 6MVA analizirali smo njezin utjecaj na spomenute veličine u mreži. Mala hidroelektrana je preuzela svu potrošnju tereta koji se nalazi na istoj sabirnici kao i ona, a ostatak energije je slala dalje u mrežu kako bi se zadovoljile i potrebe ostalih potrošača za energijom stoga se smjer protoka snage na vodu 6 koji vodi od generatora do tereta promijenio te je snaga išla od tereta tj. male hidroelektrane u mrežu. Dodavanjem novog izvora dobrim smo dijelom povećali naponsku stabilnost mreže te smo smanjili odstupanja napona sabirnica i vrijednost napona približili nazivnim vrijednostima. Međutim, naspram pozitivnog učinka na napone u mreži, nova hidroelektrana je imala

negativan utjecaj na struje kratkog spoja koje su se povećale, osobito u sabirnici na kojoj se elektrana nalazi gdje je struja povećala svoju vrijednost s 3 kA na 6 kA.

U slučaju koji je razmatran mala hidroelektrana bi pozitivno doprinijela radu mreže stoga je njezina ugradnja moguća, međutim to ne mora uvijek biti slučaj zato se ovakve analize provode. U slučaju da se analizom utvrdi da novi izvor ima previše negativan utjecaj na mrežu HEP i HOPS ne izdaju elektroenergetsku suglasnost te u tom trenutku ne postoji mogućnost izgradnje te vrste elektrane na planiranom području te je potrebno ili izmijeniti prvotni projekt i plan kako elektrana ne bi imala velik utjecaj na mrežu ili odustati od gradnje na tom području te potražiti pogodnije područje za provedbu projekta.

Literatura

[1] Žarko D. i Stipetić S. Uvod u sinkrone motore s permanentnim magnetima,
PDF dokument, URL https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/SAS_2023_2024_uvod_u_SMP M.pdf

[2] Engineering articles, URL https://top10electrical.blogspot.com/2015/02/synchronous-machine-rotor-types.html, pristupljeno : 2.11.2023

[3] Pavić I. , Delimar M. , Grdenić G. Analiza elektroenergetskog sustava − predavanje 5 : Proračun tokova snaga, PDF dokument, pristupljeno : 7.11.2023

[4] Filipović-Grčić B. , Beus M. , Havelka J. Elektroenergetski sustavi 1 – predavanje 1 : Proračun kratkog spoja, PDF dokument, pristupljeno: 7.11.2023

[5] Marušić A. Osnove numeričke zaštite sustava za distribuciju električne energije, pristupljeno : 23.11.2023

[6] Siemens, Motor differential protection (ANSI 87) SIPROTEC 5 Setting and highlights, URL https://www.webgreenstation.com/motor-differential-protection-siprotec-5-siemens-settings-si5076/

[7] Prévé C. *Protection of Electrical Network*, 2006

[8] J. Havelka, A. Marušić *Zaštita generatora pomoću digitalnih releja*, Četvrto savjetovanje HK CIGRÉ, R 34.09, Cavtat, Hrvatska, Listopad 1999., ISBN 953-6408-36-8, 73-82

[9] Alstom, *Network Protection and Automation Guide*, 2011.

[10] Andričević R. , *Male hidroelektrane*, PDF dokument, URL https://gradst.unist.hr/Portals/9/docs/katedre/Privredna%20hidrotehnika/DSG%20Iskoristenje%20VS/Iskoristavanje%20vodnih%20snaga-pred5.pdf , pristupljeno : 23.10.2023.

[11] Grabcad community, URL https://grabcad.com/library/francis-turbine-runner-1, pristupljeno : 5.11.2023

[12] Grabcad community, URL https://grabcad.com/library/kaplan-turbine-runner-3, pristupljeno : 5.11.2023

[13] Freez cast, URL https://www.freeze-cast.com/everything-you-need-to-know-about-pelton-turbines/ , pristupljeno : 5.11.2023

[14] Ali W. , Farooq H. , Rehman A. , Jamil M. Grid Interconnection of Micro Hydro Power Plants: Major Requirements, Key Issues and Challenges. U *2018 IEEE International Symposium on Recent Advance on Electrical Engineering,* Islamabad, Pakistan, URL https://www.researchgate.net/publication/330351115_Grid_Interconnection_of_Micro_Hydro_Power_Plants_Major_Requirements_Key_Issues_and_Challenges

[15] HEP-Operator distribucijskog sustava d.o.o. *Mrežna pravila distribucijskog sustava ,* NN 74/2018, pristupljeno 10.12.2023

[16] HEP-Operator distribucijskog sustava d.o.o. *Pravila o priključenju na distribucijsku mrežu,* NN 111/21, pristupljeno 10.12.2023

[17] Grgić D. , Kuzle I. , Holjevac N. Proizvodnja električne energije – Vrste hidrauličkih turbina, PDF dokument

Priključak malih hidroelektrana na elektroenergetsku mrežu

Sažetak

Povećanjem svijesti za očuvanjem okoliša kao najodrživiji izvori prijeko potrebne energije ističu se obnovljivi izvori. Jedan od ključnih obnovljivih izvora energije su hidroelektrane. Kako bismo maksimizirali iskoristivost energije vode u sustav se kod velikih potrošača ugrađuju male hidroelektrane snage do 10 MW. Prije početka izgradnje potrebno je analizirati utjecaj mogućeg novog izvora na ostatak mreže. Program NEPLAN jedan je od mogućih alata za analizu. Potrebno je odrediti nalazi li se mreža nakon priključenja male hidroelektrane u zakonskim granicama propisanih od strane pojedine države. U slučaju da elektrana nema prevelik negativan utjecaj na ostatak mreže, operatori prijenosnog i distribucijskog sustava izdaju elektroenergetsku suglasnost te projekt može krenuti u provedbu.

Ključne riječi : Mala hidroelektrana, očuvanje okoliša, NEPLAN, utjecaj na elektroenergetsku mrežu

Connection of small hydropower plants to the power grid

Abstract

Increasing awareness for environmental protection renewable sources stand out as the most sustainable sources of much-needed energy. One of the key renewable energy sources is hydroelectric power plants. In order to maximize the use of water energy, small hydroelectric power plants with a capacity of up to 10 MW are integrated into the system for large consumers. Before starting construction, it is necessary to analyze the impact of a potential new source on the rest of the grid. The NEPLAN program is one of the possible tools for analysis. It is necessary to determine whether the network, after connecting a small hydroelectric power plant, complies with the legal limits prescribed by each country. In case the power plant does not have a significant negative impact on the rest of the network, transmission and distribution system operators issue an electro-energy approval, and the project can proceed to implementation.

Keywords: small hydropower plant, enviromental protection, NEPLAN, impact on power grid