

# Sinkroni generator s istaknutim polovima

---

**Marić, Jurica**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2017**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:221109>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-27**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



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

**Sveučilišni studij**

**SINKRONI GENERATOR S ISTAKNUTIM POLOVIMA**

**Diplomski rad**

**Jurica Marić**

**Osijek, 2017.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada**

Osijek, 19.06.2017.

**Odboru za završne i diplomske ispite****Imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada**

<b>Ime i prezime studenta:</b>	Jurica Marić
<b>Studij, smjer:</b>	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika, smjer Elektroenergetika
<b>Mat. br. studenta, godina upisa:</b>	D-791, 07.10.2014.
<b>OIB studenta:</b>	57617932878
<b>Mentor:</b>	Prof.dr.sc. Marinko Stojkov
<b>Sumentor:</b>	
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Predsjednik Povjerenstva:</b>	Prof.dr.sc. Damir Šljivac
<b>Član Povjerenstva:</b>	Doc.dr.sc. Danijel Topić
<b>Naslov diplomskog rada:</b>	Sinkroni generator s istaknutim polovima
<b>Znanstvena grana rada:</b>	<b>Elektrostrojarstvo (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Zadatak diplomskog rada:</b>	Karakteristike generatora; Pogonska karta; Utjecaj kod rada s odstupanjem od nazivnog napona; Stabilnost generatora; Samouzbuđivanje generatora.
<b>Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada):</b>	Izvrstan (5)
<b>Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:</b>	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 3 razina
<b>Datum prijedloga ocjene mentora:</b>	19.06.2017.
Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija:	Potpis:
	Datum:

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 18.07.2017.

**Ime i prezime studenta:**

Jurica Marić

**Studij:**

Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika, smjer Elektroenergetika

**Mat. br. studenta, godina upisa:**

D-791, 07.10.2014.

**Ephorus podudaranje [%]:**

1%

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Sinkroni generator s istaknutim polovima**

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

i sumentora

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

Potpis studenta:

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. SINKRONI GENERATOR.....	2
2.1. Osnovne značajke električnih strojeva .....	2
2.2. Princip rada i osnovne značajke sinkronog stroja .....	3
2.1.1. Turbogenerator.....	7
2.1.2. Hidrogenerator .....	8
3. SINKRONI GENERATOR S ISTAKNUTIM POLOVIMA .....	9
3.1. Utjecaj istaknutih polova .....	10
3.2. Fazorski dijagram sinkronog generatora s istaknutim polovima.....	14
3.3. Nadomjesna shema sinkronog generatora .....	19
3.4. Uzbudni sustav hidrogeneratora .....	20
3.5. Samouzbuđivanje generatora.....	22
4 KARAKTERISTIKE SINKRONOG GENERATORA.....	24
4.1. Karakteristika praznog hoda.....	24
4.2. Karakteristika kratkog spoja.....	26
4.3. Pogonska karta.....	28
4.4. Stabilnost generatora .....	33
4.4.1. Stabilnost kuta rotora.....	35
4.4.2. Naponska stabilnost.....	36
4.4.3. Frekvencijska stabilnost .....	41
4.4.4. Automatska regulacija napona (AVR) .....	45
5. PRORAČUN.....	47
5.1 Generator HE Vinodol.....	52
5.2 Mala hidroelektrana Pleternica .....	55
5.3 Karakteristika praznog hoda sinkronog generatora s istaknutim polovima .....	56
5.4 Proračun karakteristika momenta i snaga sinkronih generatora.....	58

5.4.1 Proračun karakteristika za HE Vinodol .....	59
5.4.2. Proračun karakteristika za mHE Pleternica .....	62
5.4.3 Varijacije izlazne snage .....	64
5.4.4 Varijacije izlazne snage u ovisnosti o promjeni faktora snage .....	69
ZAKLJUČAK .....	73
SAŽETAK.....	76
SUMMARY .....	76
ŽIVOTOPIS .....	77

# 1. UVOD

Proizvodnja električne energije u najvećoj mjeri u elektroenergetskom sustavu dolazi iz sinkronih generatora. Sinkroni generatori se mogu podijeliti na dvije najčešće izvedbe: turbogeneratore (plinske i parne turbine) i hidrogeneratore (vodne turbine). Hidrogeneratori ili sinkroni generatori s istaknutim polovima imaju drukčije karakteristike i svojstva od turbogeneratora. Sinkroni generatori s istaknutim polovima imaju uglavnom manju brzinu vrtnje, što automatski znači da imaju veći broj polova. Takvi generatori imaju veći promjer rotora te se njihova pogonska osovina najčešće ugrađuje okomito. Sinkroni generatori s istaknutim polovima ugrađuju se u hidroelektranama te je njihov doprinos ukupnoj proizvedenoj električnoj energije značajan, budući da je proizvodnja električne energije u svijetu iz hidroelektrana iznosila 16% (2013.g), a za Hrvatsku je taj postotak još veći te je iznosio 38% (2013.g).

U drugom poglavlju opisane su osnovne značajke električnih strojeva, te su predstavljeni osnovni konstrukcijski dijelovi sinkronih strojeva te princip rada sinkronih strojeva. Pojašnjene su uloge statora, rotora, armaturnih i uzбудnih namota te ostalih ključnih konstrukcijskih dijelova.

Treće poglavlje detaljnije obrađuje sinkrone generatore s istaknutim polovima. Objasnit će se utjecaj istaknutih polova na rad sinkronog generatora te konstrukcija fazorskog dijagrama sinkronog generatora s istaknutim polovima s tipičnim vrijednostima reaktancija. Također će se pokazati kako se iz matematičkog modela dolazi do nadomjesne sheme sinkronog generatora.

Četvrto poglavlje opisuje osnovne karakteristike sinkronog generatora s istaknutim polovima kao što su karakteristike kratkog spoja i praznog hoda. Detaljno je objašnjena konstrukcija pogonske karte koja prikazuje osnovne fizikalne veličine sinkronog generatora. Zadnje potpoglavlje se bavi stabilnosti generatora (naponska, frekvencijska, stabilnost kuta rotora) te se promatra uloga automatske regulacije napona na sinkronom generatoru u elektroenergetskom sustavu.

U petom poglavlju opisana je teorijska podloga potrebna za proračun i izrađivanje karakteristika snage i momenta sinkronih generatora. Prikazane su detaljne tehničke specifikacije odabranih generatora sa istaknutim polovima, te su odabrani razni scenariji u kojima se moglo jasno vidjeti kako se može utjecati na izlazna snagu hidroelektrana.

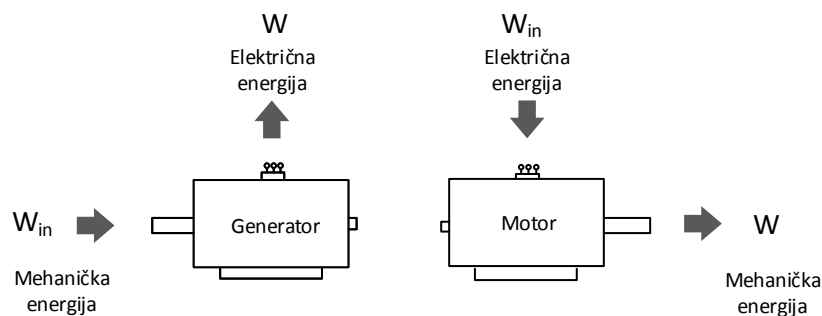
## 2. SINKRONI GENERATOR

### 2.1. Osnovne značajke električnih strojeva

Električni strojevi su elektromehanički uređaji s rotacijskim dijelovima koji služe za pretvorbu energije iz mehaničke u električnu i obratno. U odnosu na smjer pretvorbe energije postoje dva osnovna tipa električnih strojeva [1]:

- Generatori
- Motori

Motori su električni strojevi koji pretvaraju električnu energiju u mehaničku, dok generatori pretvaraju mehaničku u električnu energiju [1]. Motori i generatori rade na istom principu, te između njih ne postoji velika konstrukcijska razlika. Hoće li neki električni stroj raditi kao generator ili motor, ovisi o načinu uporabe toga stroja. Pri tome vrijedi da je predana energija uvijek manja od uložene energije iz sustava, zbog činjenice da se kod svih strojeva prilikom pretvorbe energije određeni dio energije gubi i pretvara u toplinu (zagrijavanje strojeva).



Sl. 2.1. Pretvorba energije u električnom stroju [1]

Sinkroni generatori u kombinaciji s parnim, vodnim ili plinskim turbinama predstavljaju uobičajenu kombinaciju za proizvodnju električne energije u većini elektroenergetskih sustava. Sinkroni generatori koji se koriste u parnim i plinskim elektranama uglavnom imaju dva ili četiri električna pola kako bi u 50 Hz sustavu postigli brzinu okretanja od 3000 ili 1500 okretaja u minuti. Kako bi se smanjile centrifugalne sile, turbogeneratori imaju relativno mali promjer rotora, ali dugačku osovinu te se postavljaju vodoravno. Hidrogeneratori su sinkroni generatori koji se koriste u hidroelektranama te je njihova brzina vrtnje uobičajeno oko 500 okretaja u minuti ili manje. Zbog toga se njihova konstrukcija razlikuje od standardnih generatora te hidrogeneratori posjeduju velik broj parova električnih polova. Promjer rotora hidrogeneratora je značajno veći od turbogeneratora dok je duljina osovine kraća [1].



Osnovni dijelovi svih rotacijskih električnih strojeva su rotor i stator koji se prave od magnetskog čelika. Namoti armature, kroz koje teče struja tereta te dovodi energiju do sustava, nalazi se na vanjskim slojevima statora te se sastoji od tri identična trofazna namota. Rotor turbogeneratora sadrži uzbudne namote kroz koje teče istosmjerna struja, dok se kod hidrogeneratora uzbudni namoti nalaze na istaknutim polovima. Prigušni namoti se postavljaju kako bi smanjili mehaničke oscilacije pri vrtnji rotora.

## 2.2. Princip rada i osnovne značajke sinkronog stroja

Sinkroni generatori i motori su uglavnom veliki trofazni strojevi. U sinkronim strojevima dolazi do pretvorbe električne u mehaničku energije, te mehaničke u električnu energiju, odnosno vrijede sljedeći izrazi [2]:

$$P_{el} = E \cdot I = v \cdot B \cdot l \cdot I \quad (2-1)$$

$$P_{meh} = F \cdot v = I \cdot l \cdot B \cdot v \quad (2-2)$$

Gdje je: B – gustoća magnetskog toka [T]

l – duljina vodiča koji se nalazi u magnetskom polju indukcije [m]

v – brzina relativnog gibanja vodiča prema silnicama magnetskog polja [m/s]

I – priključak vodiča na vanjski strujni krug preko kojeg se vodiču može dovesti ili odvesti struja I [A]

Kada kroz vodič proteče struja oko njega se stvara magnetsko polje. Magnetsko polje vodiča se može pojačati namatanjem vodiča što neće uzrokovati povećavanje potrebnog iznosa struje. Magnetsko polje u generatoru stvaraju namoti na rotoru i statoru. Uzbudni namoti na rotoru su protjecani istosmjernom strujom, te rotor postaje elektromagnet. Budući da se rotor vrti, može se reći da se i magnetsko polje rotora također vrti, odnosno u tom slučaju se govori o okretnom magnetskom polju [2].

Magnetsko polje armaturnog namota kod motora se također mora vrtjeti sinkrono s magnetskim poljem rotora. To se postiže tako da se kroz armaturne namote pusti trofazna izmjenična struja, jednakih iznosa i kutnog pomaka za 120°. Stvara se magnetsko polje konstantnog iznosa. Frekvencija kojom magnetsko polje rotira jednaka je frekvenciji mreže, odnosno frekvenciji izmjenične struje koja teče kroz armaturne namote [2,3].

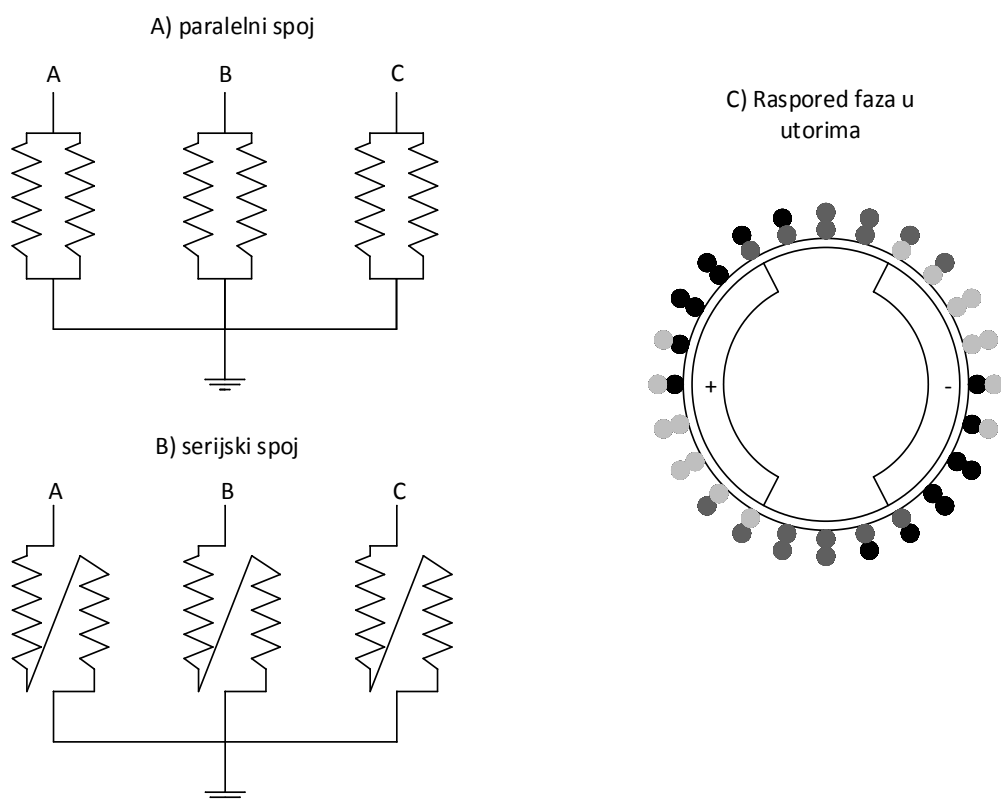
Sinkroni strojevi su rotacijski električni strojevi kod kojih se rotor u stacionarnom stanju vrti jednakom brzinom kao i okretno polje stroja, odnosno rotor je u sinkronizmu s okretnim poljem, zbog toga i dolazi naziv sinkroni strojevi [1].

Sinkroni generator je stroj čija je uloga pretvorba mehaničke energije u električnu energiju. Njegova snaga ovisna je o vrsti pogonskog stroja i namjeni generatora, te može iznositi 50-ak MVA, za generatore koji se koriste kao pričuvni izvori, pa do nekoliko tisuća MVA, za potrebe elektroenergetskih sustava, što je i najveća snaga bilo kojeg električnog stroja [3].

Sinkroni generatori posjeduju tri vrste namota [1]:

1. Uzbudni namot
2. Armaturni namot
3. Prigušni namot

Generatori većih snaga posjeduju sva tri namota, dok postoje neke izvedbe manjih snaga kao što je to slučaj kod reluktantnih motora i motora s permanentnim magnetima, gdje ne postoji uzbudni namot.



Sl. 2.2. A) Paralelni spoj dva svitka, b) serijski spoj dva svitka, c) raspored faza u utorima, svaka faza je označena drugom bojom [1]

Armaturni namot je u većini slučajeva smješten na statoru sinkronog stroja i simetrično je raspoređen u utorima po obodu stroja. U armaturnom namotu se inducira napon i kroz njega teku struje opterećenja. Prilikom dizajniranja armaturnog namota moraju se postići tri uravnotežena sinusna napona koji sadrže vrlo malo viših harmonika. Viši harmonici napona i struje su vrlo štetni za stroj, pogotovo kod velikih strojeva koji su trajno opterećeni nazivnim vrijednostima [3].

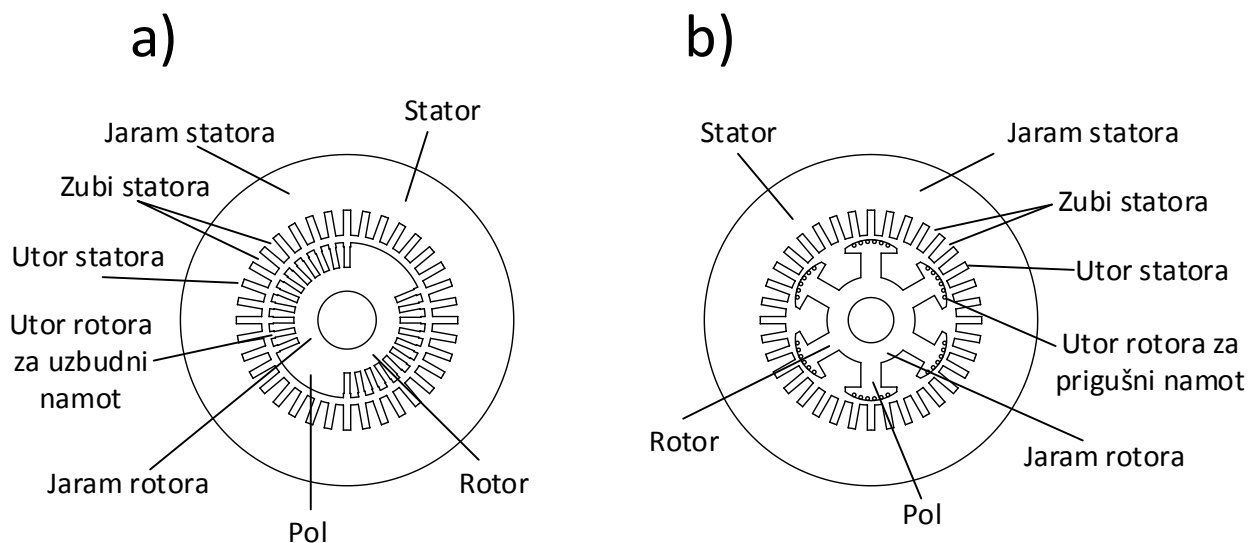
Kako bi se postigao određeni napon armature potrebno je složiti namot od niza vodiča oblikovanih u svitke i zavoje, kao što je to prikazano na slici 2.2. Vodiči armaturnog namota su smješteni duž oboda rotora. Presjeci vodiča se dimenzioniraju za očekivane vrijednosti struja kako presjek vodiča ne bi bio prevelik te kako bi se smanjili dodatni gubici zbog potiskivanja struje [2].

Uzbudni namot je smješten na rotoru, postoje dvije uobičajene verzije. Kod cilindričnih rotora prikazanog na slici 2.3.a) uzbudni namot se nalazi u utorima rotora i takav se generator koristi kod izvedbi za velike brzine. Druga verzija je predstavljena slikom 2.3.b) i prikazuje generator s istaknutim polovima kod kojeg se uzbudni namot nalazi na posebno oblikovanim polovima, te se takvi generatori koriste kada su potrebne manje brzine vrtnje. Kroz uzbudni namot teče istosmjerna struja i stvara uzbudno protjecanje, odnosno magnetsko polje koje je neophodno za elektromagnetsku pretvorbu.

Postoji nekoliko načina napajanja uzbude na rotoru [2,3,4]. Prvi način je preko kliznih kolutova i četkica. Kolutovi se nalaze na rotoru, dok su četkice smještene na statoru. Klizanjem četkica po kolutima dolazi do prijenosa energije te se tako napaja uzbuda stroja.

Drugi način uzbude stroja je preko beskontaktnih sustava uzbude kod kojih se istosmjerna struja dobiva iz izmjeničnog uzbudnika s armaturom na rotoru i rotirajućeg ispravljača.

Uzbudni namot sinkronog generatora s istaknutim polovima je izveden od koncentričnih svitaka. Svaki svitak je izveden s mnogo zavoja koji su međusobno izolirani staklenim opletom i učvršćeni su lakom. Kod velikih strojeva nema toliko puno zavoja na polovima pa je moguće izvesti namote od plosnatog neizoliranog bakra, gdje su zavoji međusobno izolirani ulošcima, prema polnoj jezgri s odgovarajućim folijama, a rubovi namota su izolirani tvrdim izolacijskim pločama. Velika prednost jednoslojnih namota je učinkovitije hlađenje jer postoji više dostupnog prostora oko vodiča kroz koje može strujati zrak i tako hladiti vodiče namota.



Slika 2.3. a) presjek željezne jezgre 2-polnog sinkronog stroja s cilindričnim rotorom,  
 b) presjek željezne jezgre 6-polnog sinkronog stroja s istaknutim polovima [1]

Prigušni namot se ugrađuje u generatore zbog nekoliko razloga [1]:

- Prigušivanje inverznog okretnog polja zbog nesimetričnog opterećenja po fazama
- Prigušivanje njihanja sinkronog generatora kao posljedice poremećaja u mreži
- Omogućuje asinkroni zalet kod sinkronih motora i kompenzatora

Prigušni namot smanjuje nepoželjne dodatne gubitke i prenapone u prijelaznim stanjima i nesimetričnim opterećenjima sinkronog generatora. Prigušni namoti se ugrađuju u polne nastavke istaknutih polova na rotoru, što se može vidjeti na slici 2.3.b) Vodiči su smješteni u utore polnog stopala i povezani su prstenovima s obje strane polnog stopala. Takva izvedba prigušnog namota zove se kavez. Postoji i verzija gdje se zbog jednostavnosti izvedbe spajaju vodiči samo jednog pola, bez međusobnog spoja među polovima. Takva verzija prigušnog namota zove se nepotpuni kavez ili rešetka. Kod turbogeneratora prigušni namot se može izostaviti jer je rotor izrađen od kovanog čelika. [2]

Način izvedbe generatora određuje njegova veličina, najmanji zahtijevaju jednostavnu i jeftinu serijsku proizvodnju te se tome prilagođava i njihova konstrukcija. Za veće jedinice poseže se ponekad i za skupljim rješenjima u konstrukciji i tehnologiji u korist postizanja što manjih gubitaka u pretvorbi snage odnosno što bolje ekonomičnosti. Glavni podaci u procesu izvedbe generatora su: podaci o snazi koja nastaje nakon pretvorbe, te podaci o brzini vrtnje koju kod

generatora određuje glavni dio, a to je pogonski stroj. Zbog toga se sinkroni generatori dijele prema vrsti pogonskog stroja na [1]:

- turbogeneratore
- hidrogeneratore
- dizelske generatore
- kompenzatori

Prema brzini vrtnje dijele se na:

- brzohodne
- strojeve srednje brzine
- sporohodne

### 2.1.1. Turbogenerator

Turbogenerator je vrsta generatora čiji je pogonski stroj parna ili plinska turbina. Takva vrsta turbine uzrokuje velike brzine vrtnje što može proizvesti velike centrifugalne sile, čija vrijednost raste proporcionalno s brzinom vrtnje na kvadrat i proporcionalno s udaljenošću masa što rotiraju oko središta. Tvrdnja se dokazuje iz izraza za centrifugalnu silu  $dF_c$  na djelić mase  $dm_{rtc}$  na obodu rotora koja iznosi [1] :

$$dF_c = \frac{dm_{rtc} v_r^2}{\frac{d_r}{2}} \quad (2-3)$$

gdje je :  $dm_{rtc}$  - djelić mase na obodu rotora

$v_r$  - obodna brzina

$d_r$  - promjer rotora

Brzina vrtnje ovisna je o paru polova generatora, što je broj polova veći, brzina je manja. S obzirom da je minimalan broj parova polova kod generatora jedan, tada se prema formuli [1]:

$$n = 60 f / p = 60 f, \quad (2-4)$$

gdje je :  $f$  – frekvencija

$p$  – broj parova polova generatora,

Može se zaključiti da za europsku mrežu frekvencije 50 Hz, brzina vrtnje niti ne može biti veća od 3000 o/min te se time izbjegava štetan utjecaj centrifugalnih sila.

### 2.1.2. Hidrogenerator

Hidrogenerator je sinkroni stroj kojega pokreće vodna turbina koju karakterizira brzina vrtnje znatno niža od dopuštenih  $3000 \text{ r/min}^{-1}$ , a ovisi o raspoloživom padu te količini vode. Zbog manje brzine vrtnje rotora, potreban je velik broj parova polova generatora, te se on računa prema formuli [2]:

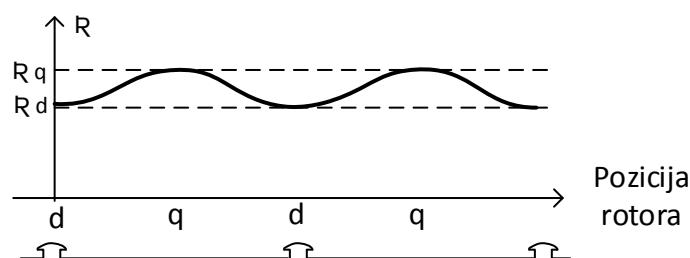
$$p = \frac{60f}{n} \quad (2-5)$$

gdje je :             $f$  – frekvencija  
                            $n$  – broj okretaja rotora generatora

Prema relaciji (2-5), za slučaj brzine vrtnje  $n=50 \text{ o/min}$  i za frekvenciju vrijednosti  $f=50 \text{ Hz}$ , broj para polova za ovaj tip generatora je  $p=60$ , odnosno 120 polova.

Rotor hidrogeneratora se izvodi uvijek s izraženim polovima na kojima je smješten koncentrirani uzbudni napon, te kao takav može imati jako velik promjer pri čemu su brzine znatne. Tako i ovi rotori mogu biti jako napregnuti centrifugalnom silom, no ne u tolikoj mjeri kao kod turbogeneratora. Uobičajena izvedba hidrogeneratora sadrži više od dva para polova.

Glavni problem prilikom modeliranja generatora s istaknutim polovima je razmak između polova, zračni raspor na generatoru je najmanji duž  $d$  osi, a najduži raspor se proteže preko  $q$  osi[5]. Posljedica takvog dizajna je nejednolika raspodjela magnetskog toka u zračnom rasporu. Tok varira između svog minimuma i maksimuma kao što je prikazano na slici 2.5[5]. Zbog toga dolazi do problema u projektiranju, jer ne vrijedi svojstvo da su inducirana elektromotorna sila i gustoća magnetskog toka u fazi, kao što je to slučaj u turbogeneratoru.



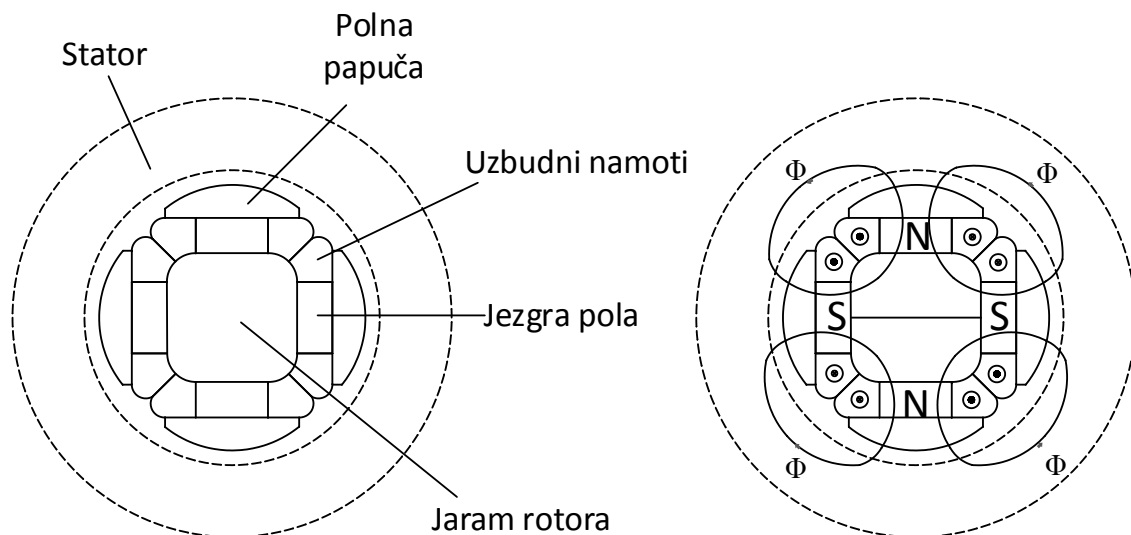
Slika 2.5. Promjena vrijednosti reluktancije ovisno o poziciji rotora [5]

### 3. SINKRONI GENERATOR S ISTAKNUTIM POLOVIMA

Sinkroni generator s istaknutim polovima, odnosno hidrogenerator sastoji se od dva glavna dijela, statora i hidrorotora,. Na statoru se nalazi armaturni namot koji miruje dok je na rotoru uzbudni namot odnosno radni dio generatora.

Rotor hidrogeneratorsa sastoji se od osovine, jarma motora i istaknutih polova s namotom. Svaki pol ima svoju jezgru, uzbudni namot i polno stopalo koje zatvara svitak uzbudnog napona s vanjske strane. Namoti su kod hidrorotora izvedeni od bakrenih vodiča okruglog ili profilnog oblika, a mogu biti složeni u jedan ili više slojeva. Nalaze se na istaknutim polovima složeni tako da po obodu naizmjenično slijede južni i sjeverni magnetski pol. Na slici 3.1. prikazana je skica hidrorotora s 4 pola te način spajanja uzbudnog namota. Rotor na sinkronom stroju, generatoru i motoru, sastoji se od osovine, jarma rotora, uzbudnih namota, jezgre pola i polova na kojima se nalaze uzbudni namoti [1].

Rotori generatora snage do 1 MVA izrađuju se od dinamo-limova. Lim potreban za konstrukciju rotora izrezuje se iz jednog komada, gdje su polovi i jaram napravljeni u jednom komadu. Time se postiže velika čvrstoća rotora što je potrebno kako bi rotor mogao izdržati velika mehanička naprezanja tijekom višegodišnje upotrebe. Kod strojeva većih snaga, polovi se mogu ugraditi na jaram rotora pomoću više metoda, najpopularnija je lastin rep.



Sl. 3.1. Dijelovi četveropolnog rotora s istaknutim polovima [1]

Osim uzbudnog se na tijelu hidrorotora, točnije na polnoj papučici ugrađuje i prigušni namot. Njega čine metalni štapovi u uzdužnim utorima na polnim nastavcima bočno s obje strane

međusobno povezani kratkospojenim prstenima. Uloga prigušnog namota koji se još naziva kratkospojeni kavez rotora, je [1] :

- smanjivanje dodatnih gubitaka i prenapona u prijelaznim stanjima
- prigušenje njihanja rotora nastalih zbog poremećaja u mreži
- asinkrono pokretanje trofaznog sinkronog motora

Položaj prigušnog namota na polnoj papučici vidljiv je na slici 3.1. Uloga polne papučice je oblikovanje zračnog raspora.

Statorski magnetski krug izvodi se u obliku šupljeg valjka sastavljenog od međusobno izoliranih limova koji se naziva i statorski paket. Na unutrašnjem obodu statorskog paketa nalaze se uzdužni utori u koje se ulaže dvoslojni, trofazni, armaturni namot. Dijelovi paketa između utora paketa nazivaju se zubi dok se preostali dijelovi izoliranih limova nazivaju jaram. Statorski namoti dijele se na [2] :

- jednofazne ili višefazne
- jednoslojne ili dvoslojne

Generatori velikih snaga s istaknutim polovima imaju veliki promjer rotora pa je nužno između jarma rotora i osovine postaviti glavinu ili zvijezdu rotora koja će poslužiti kao mehanička veza između jarma i osovine[1]. Osovina se vrti u ležajima, a može biti postavljena horizontalno ili vertikalno, što je češći slučaj kod generatora s istaknutim polovima. Dizelski i turbogeneratori su u pravilu gotovo uvijek horizontalne izvedbe [1].

### 3.1. Utjecaj istaknutih polova

Najvažnija značajka izvedbe generatora s istaknutim polovima je nejednoliki zračni raspored na rotoru. Kao posljedica nejednolikog zračnog rasporeda, magnetske reluktancije u uzdužnoj i poprečnoj osi stroja nisu jednake. Zbog toga se vektor ukupnog protjecanja i vektor indukcije ne moraju poklapati po smjeru [1].

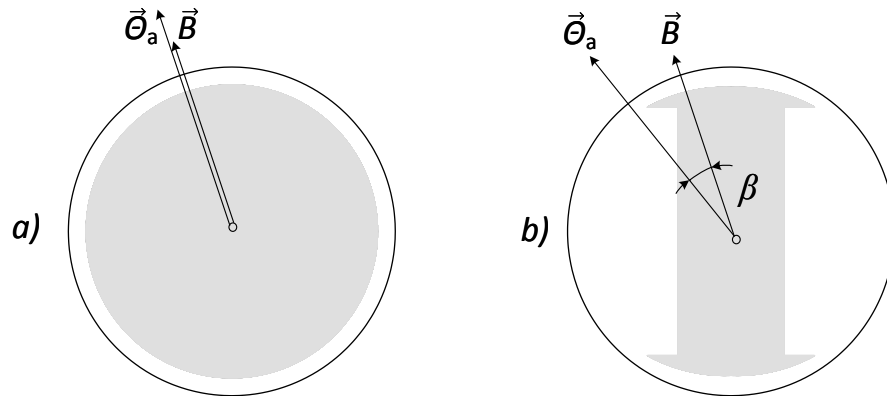
Ako se promatra najjednostavniji slučaj, a to je kada nema uzbude na rotoru, dakle nema ni uzbuđenog protjecanja. Jedino protjecanje u sinkronom stroju dolazi iz armature, te vrijede sljedeće jednačbe [1]:

$$\vec{\theta}_f = \vec{0} \quad (3-1)$$

$$\vec{\theta} = \vec{\theta}_a \quad (3-2)$$



Kod sinkronih strojeva s cilindričnim rotorom smjerovi vektora armaturnog protjecanja i vektora indukcije se poklapaju, pa je kut opterećenja statora jednak nuli, iz čega slijedi da je i moment jednak nuli. Na slici 3.2. prikazani su vektori indukcije i armaturnog protjecanja za sinkrone strojeve s cilindričnim rotorom u usporedbi sa sinkronim strojem sa istaknutim polovima.



Slika 3.2. Vektori indukcije i armaturnog protjecanja sinkronog stroja bez uzbude za

a) cilindrični rotor, b) rotor s istaknutim polovima [1]

Kod strojeva s istaknutim polovima zbog manje magnetske reluktancije (magnetskog otpora) u uzdužnoj osi pola rotora, vektor indukcije  $\vec{B}$  se pomiče za kut  $\beta$  od vektora protjecanja  $\vec{\Theta}_a$ . Posljedica pomaka vektora indukcije je pojava momenta  $M_{rel}$  koji djeluje na stator sinkronog stroja. Izraz kojim se opisuje djelovanje reluktantnog momenta je [1]:

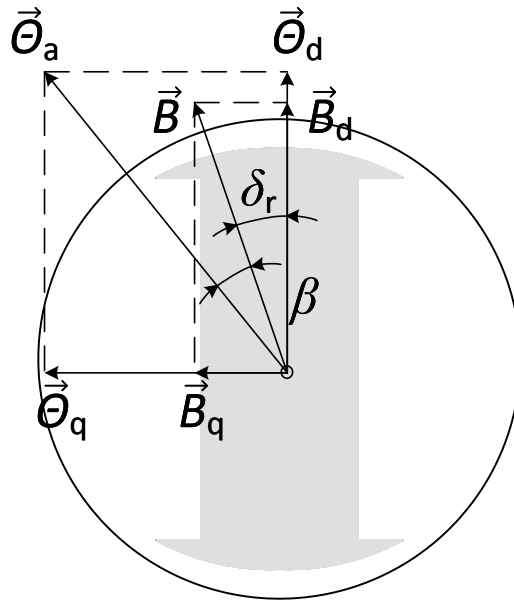
$$M_{rel} = \frac{\pi}{\tau_p} VB \Theta_a \sin \beta \quad (3-3)$$

U slučaju kada na rotoru postoji uzbuda, vektor ukupnog protjecanja se tada može prikazati kao suma svih vektora protjecanja, vektora protjecanja u uzdužnoj osi  $\vec{\Theta}_d$  i poprečnoj osi  $\vec{\Theta}_q$  :

$$\vec{\Theta} = \vec{\Theta}_d + \vec{\Theta}_q \quad (3-4)$$

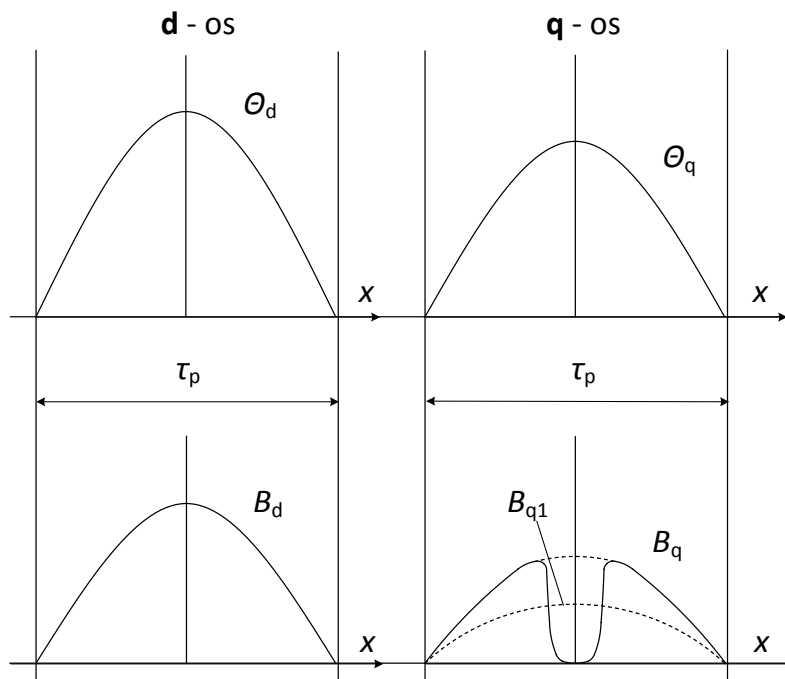
Budući da magnetske reluktancije nemaju jednake iznose u uzdužnoj i poprečnoj osi, vektorima protjecanja će pripadati različiti vektori indukcije  $\vec{B}_d$  i  $\vec{B}_q$ . Vektor ukupne indukcije prikazan je na slici 3.3 te je jednak sumi vektora indukcije u uzdužnoj i poprečnoj osi.

$$\vec{B} = \vec{B}_d + \vec{B}_q \quad (3-5)$$



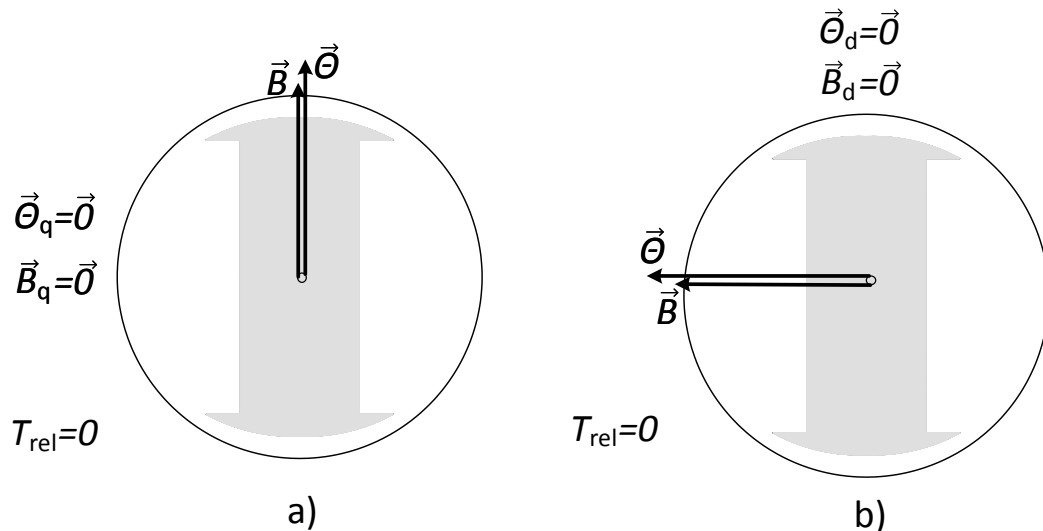
Slika 3.3. Stvarni vektori indukcije i protjecanja u uzdužnoj i poprečnoj osi sinkronog stroja s istaknutim polovima [1]

Na slici 3.4. prikazani su stvarni valovi protjecanja i indukcije sinkronog stroja s istaknutim polovima. Slučaj pod a) prikazuje protjecanje u uzdužnoj osi, a pod b) u poprečnoj osi.  $B_{q1}$  označava osnovni harmonik indukcije u poprečnoj osi.



Slika 3.4. Prostorni raspored protjecanja i indukcije sinkronog stroja s istaknutim polovima na uzdužnoj i poprečnoj osi [1]

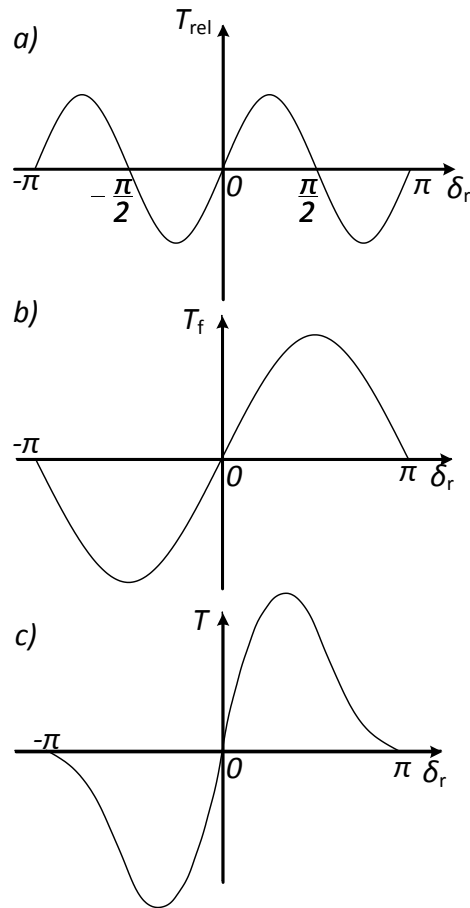
Reluktantni moment ovisi o položaju protjecanja u odnosu na uzdužnu os stroja. Kada je protjecanje samo u uzdužnoj osi, ne dolazi do razvijanja reluktantnog momenta, što se može vidjeti sa slike 3.5. Najveći iznos reluktantnog momenta javit će se između ta dva položaja.



Slika 3.5. Protjecanje i indukcija samo u jednoj osi sinkronog stroja s istaknutim polovima  
a) u uzdužnoj osi, b) u poprečnoj osi [1]

Slika 3.6. prikazuje reluktantni, osnovni i ukupni moment na sinkronom stroju s istaknutim polovima u ovisnosti o kutu opterećenja. Reluktantni moment zbraja se momentom koji se razvija zbog uzbude. Ukupni moment tada više nema sinusoidalni oblik jer dolazi do povećanja amplitude kao posljedica zbrajanja reluktantnog i uzbuđenog momenta.

Pojava reluktantnog momenta je omogućila jednu novu vrstu sinkronih strojeva, a to su strojevi bez rotorskog namota. Uobičajeno su takvi strojevi manjih snaga te se najčešće izvode kao motori, rjeđe kao generatori. Konstrukcija takvih strojeva je jednostavnija od standardnih sinkronih strojeva, ali posljedica je znatno manji maksimalni moment.



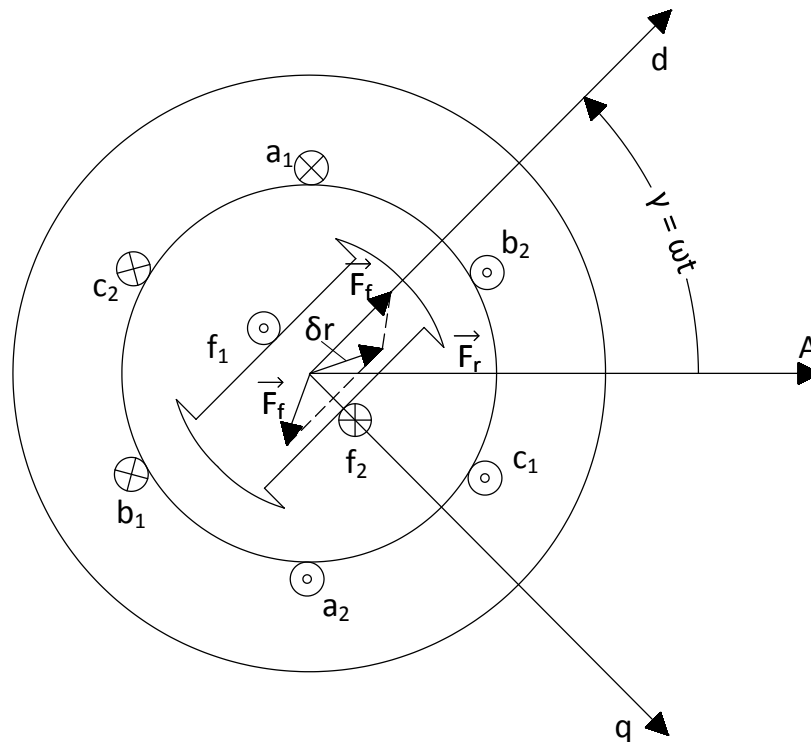
Slika 3.6. Momenti sinkronog stroja s istaknutim polovima:

a) reluktantni, b) osnovni, c) ukupni [1]

### 3.2. Fazorski dijagram sinkronog generatora s istaknutim polovima

Magnetski tok prolazi kroz put najmanjeg otpora te se zbog toga vektor toka pomiče prema  $d$  osi, na kojoj se nalazi minimum reluktancije. Jedini slučaj kada će magnetski tok i inducirana magnetomotorna sila biti u fazi, je slučaj kada je vektor magnetomotorne sile položen na  $d$  osi, odnosno u poziciji najmanje reluktancije, ili u  $q$  osi kada se privlačne sile međusobno ponište[5].

Sinkrona reaktancija se ne može izmjeriti na stroju u mirovanju, međutim sve dok je inducirani napon konstantan, stroj će se ponašati kao izvor koji ima unutrašnju reaktanciju  $X_s$ . Inducirana elektromotorna sila  $E_f$  je sila koja bi se inducirala u armaturnom namotu nakon rasterećenja generatora, odnosno u praznom hodu, kada bi vrijedila linearna karakteristika praznog hoda. Prema tome to je fiktivna inducirana elektromotorna sila [1].



Slika 3.7. Pojednostavljeni prikaz generatora s istaknutim polovima[5]

A.Blondel je razvio teoriju dvostruke reakcije koja uzima u obzir nejednoliku raspodjelu magnetskog toga duž zračnog raspora, odnosno d i q osi stroja[5]. Magnetomotorna sila i magnetski tok se razmatraju odvojeno, gdje im se dodjeljuju različite ali konstantne vrijednosti reaktancija zbog magnetskih tokova na pripadajućim osima. Taj princip je prikazan na slici 3.7, gdje se armaturna magnetomotorna sila  $F_a$ , i struja armature  $I$  razdvajaju na dvije komponente. Jedan dio komponente djeluje na  $d$  osi, a drugi dio na  $q$  osi. Ne postoji potreba za razdvajanje sile  $F_f$  na dvije komponente zbog činjenice da uzбудna magnetomotorna sila  $F_f$  uvijek djeluje duž  $d$  osi.

Rezultantna magnetomotorna sila se može prikazati sljedećim izrazom[5]:

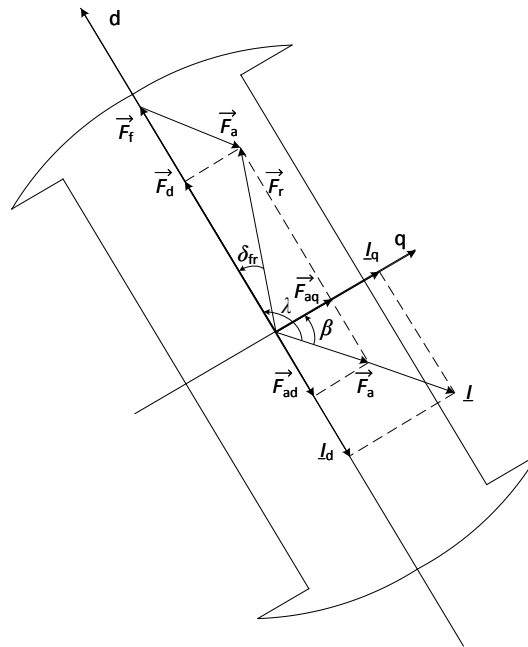
$$\vec{F}_r = \vec{F}_d + \vec{F}_q \quad (3-6)$$

Analogno tome vrijedi i izraz za rezultantnu struju[5]:

$$\underline{I} = \underline{I}_d + \underline{I}_q \quad (3-7)$$

Rezultantna elektromotorna sila kroz zračni raspoređ jednaka je ukupnoj sumi svih komponenti elektromotorne sile. Prema tome, rezultantna elektromotorna sila je zbroj komponenti  $F_f$ ,  $F_{ad}$  i  $F_{aq}$ . Budući da uzбудna magnetomotorna sila  $F_f$  djeluje samo duž  $d$  osi, elektromotorna

sila  $E_f$  ovisi samo o reluktanciji na  $d$  osi  $R_d$ , te je njena vrijednosti konstantna za danu vrijednost uzbudne struje. Na slici 3.8. prikazano je rastavljanje magnetomotorne sile i struje na uzdužne i poprečne komponente.



Slika 3.8. Rastavljanje magnetomotorne sile i struja na: uzdužne ( $d$ ) i poprečne ( $q$ ) komponente[5]

Budući da elektromotorna sila kasni za magnetomotornom silom za  $\pi/2$ , vektor elektromotorne sile  $E_f$  se nalazi uzduž  $q$  osi. Elektromotorna sila koju uzrokuje armatura na  $d$  osi je proporcionalna sa strujom  $I_d$  i pomaknuta za  $\pi/2$ . Zbog toga se navedena komponenta elektromotorne sile može zapisati kao :

$$\underline{E}_{aq} = -jX_{ad}\underline{I}_d , \quad (3-8)$$

gdje je  $X_{ad}$  reaktancija na  $d$  osi zbog reakcije armature. Magnetski tok kroz raspor sinkronog stroja ovisi o protjecanju svih namota koji su ulančani tim tokom. Kada je sinkroni stroj u praznom hodu kroz armaturni namot ne teče struja pa je magnetski tok posljedica protjecanja uzbudnog namota. U trenutku kada kroz armaturni namot poteče struja koja svojim protjecanjem mijenja rezultatno protjecanje, nastaje novi rezultatni tok u stroju. Takvo djelovanje armaturnog protjecanja naziva se reakcija armature.

Magnetska polja u stroju se mogu zbrajati samo u slučajevima kada su svi odnosi između polja i protjecanja linearni, što je u praksi jako rijetko zbog pojave zasićenja, [2].

$X_{ad}$  je obrnuto proporcionalna s direktnom magnetskom reluktancijom.

Elektromotorna sila koja je posljedica magnetomotorne sile na  $q$  osi je proporcionalna s  $I_q$  te pomaknuta za  $\pi/2$ , takva elektromotorna sila je usmjerena duž  $d$  osi i može se izraziti prema izrazu(3-9) [5]:

$$\underline{E}_{ad} = -jX_{aq}I_q \quad (3-9)$$

Gdje je  $X_{aq}$  reaktancija na  $q$  osi nastala zbog reakcije armature. Također se može reći da je  $X_{aq}$  obrnuto proporcionalna s magnetskom reluktancijom  $R_q$ . Rezultantna elektromotorna sila u zračnom rasporu se tada može zapisati kao:

$$\underline{E}_r = \underline{E}_f + \underline{E}_{aq} + \underline{E}_{ad} = \underline{E}_f - jX_{ad}I_d - jX_{aq}I_q \quad (3-10)$$

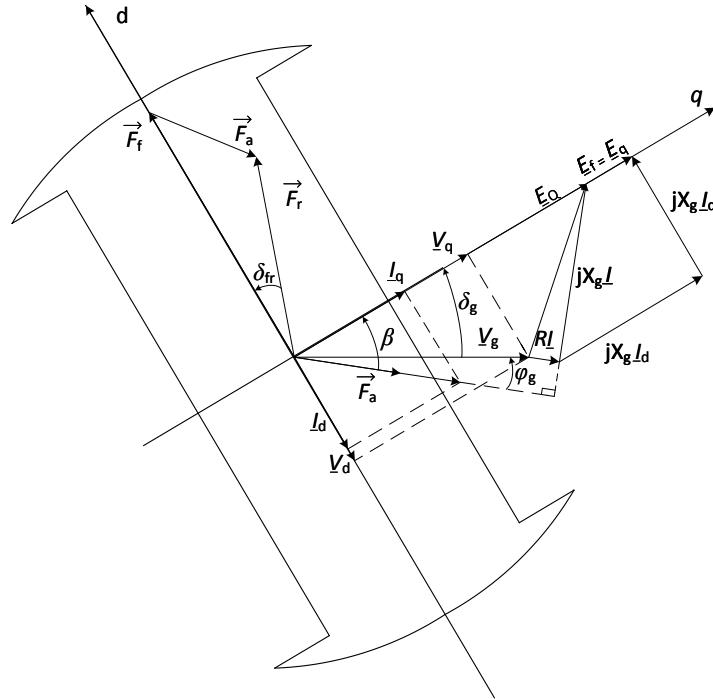
Napon na priključnicama generatora  $V_g$  se dobije kada se uzme u obzir pad napona uzrokovan reakcijom armature te se dobije sljedeći izraz:

$$\begin{aligned} \underline{V}_g &= \underline{E}_r - jX_l I_f - RI = \underline{E}_f - jX_{ad}I_d - jX_{aq}I_q - jX_l(I_d + I_q) - RI \\ &= \underline{E}_f - j(X_{ad} + X_l)I_d - j(X_{aq} + X_l)I_q - RI \end{aligned} \quad (3-11)$$

Sređivanjem izraza (3-11) dobije se:

$$\underline{E}_f = \underline{V}_g + jX_d I_d + jX_{aq} I_q + RI \quad (3-12)$$

Gdje je  $X_d = X_{ad} + X_l$  sinkrona reaktancija na  $d$  osi, a  $X_q = X_{aq} + X_l$  sinkrona reaktancija na  $q$  osi. Zbog činjenice da je magnetska reluktancija najveća duž  $q$  osi, zračni raspor je tamo najveći, slijedi da je  $X_d > X_q$ .



Slika 3.9. Fazorski dijagram generatora s istaknutim polovima

Slika 3.9. prikazuje fazorski dijagram prema jednađbi (3-12). Kako bi se mogle odrediti veličine  $I_d$  i  $I_q$ , potrebno je odrediti kut  $\delta_g$ , odnosno kut između  $V_g$  i  $q$  osi. Budući da je elektromotorna sila  $E_f$  smještena na  $q$  osi, iz izraza (3-13) slijedi da je :

$$\underline{E}_f = \underline{V}_g + R\underline{I} + jX_{aq}\underline{I} + j(X_d - X_q)\underline{I}_d = \underline{E}_Q + j(X_d - X_q)\underline{I}_d \quad (3-13)$$

Gdje je  $E_q$  jednaka :

$$\underline{E}_Q = \underline{V}_g + (R + jX_q)\underline{I} \quad (3-14)$$

Budući da se množenjem sa strujom  $I_d$ , rezultatni fazor zakreće za  $\pi/2$ , drugi dio jednađbe, odnosno  $j(X_d - X_q)\underline{I}_d$ , usmjeren je duž  $q$  osi. Ako je otprije poznato da i vektor elektromotorne sile  $E_f$  leži na  $q$  osi,  $E_q$  također mora biti smješten na istoj  $q$  osi.

Poznavanjem  $V_g$  i  $I$ , zbrajanjem vrijednosti fazora  $(R + jX_q)\underline{I}$  s  $V_g$ , dobije se vrijednost fazora  $E_q$ . Ovim postupkom se može točno odrediti smjer  $q$  osi i kuta  $\delta_g$ . Nakon što se odredi pozicija  $q$  osi, fazor struje  $I$  se može razložiti na dvije komponente  $I_d$  i  $I_q$ , te se time završava crtanje fazorskog dijagrama.



### 3.3. Nadomjesna shema sinkronog generatora

Nadomjesna shema sinkronog generatora s istaknutim polovima temelji se na izrazu 3-15, gdje je potrebno razložiti dobiveni izraz na d i q komponente[5].

$$d - os \quad E_d = V_d + RI_d + X_q I_q = 0 \quad (3-15)$$

$$q - os \quad E_q = V_q + RI_q - X_d I_d = E_f \quad (3-16)$$

Ove jednadžbe se mogu zapisati i u obliku matrice[5]:

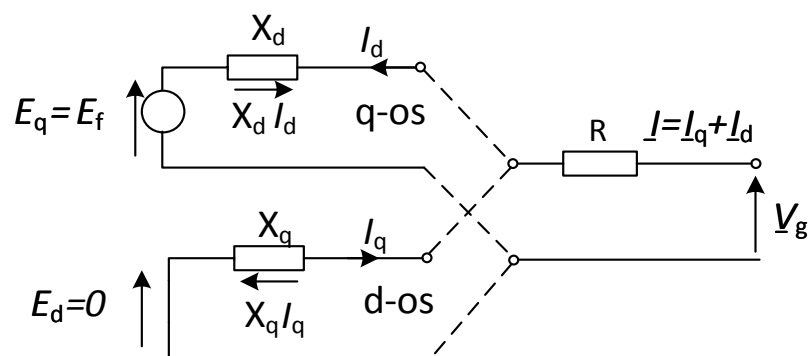
$$\begin{bmatrix} E_d \\ E_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{gd} \\ V_{gq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R & +X_q \\ -X_d & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} \quad (3-17)$$

Potrebno je primijetiti da su sve varijable iz zadanih jednadžbi te da su vrijednosti varijabli realni, a ne kompleksni brojevi. Prema tome, vrijednosti  $d$  i  $q$  komponenti za napon na priključnicama se mogu zapisati kao[5]:

$$\begin{aligned} V_d &= -V_g \sin \delta_g & I_d &= -I \sin \beta \\ V_q &= V_g \cos \delta_g & I_q &= I \cos \beta \end{aligned} \quad (3-18)$$

Gdje je kut  $\beta = \delta_g + \varphi_g$ .

Predznak minus kod komponenti na  $d$  osi proizlazi iz činjenice što su vektori struje i napona usmjereni u suprotnom smjeru od  $d$  osi. Poznavanjem navedenih izraza može se pristupiti crtanju nadomjesne sheme sinkronog generatora s istaknutim polovima. Shema se sastoji od dva dijela s pripadajućim  $d$  i  $q$  komponentama.



Slika 3.10. Nadomjesna shema strujnih krugova za uzdužnu i poprečnu os sinkronog generatora s istaknutim polovima [5]

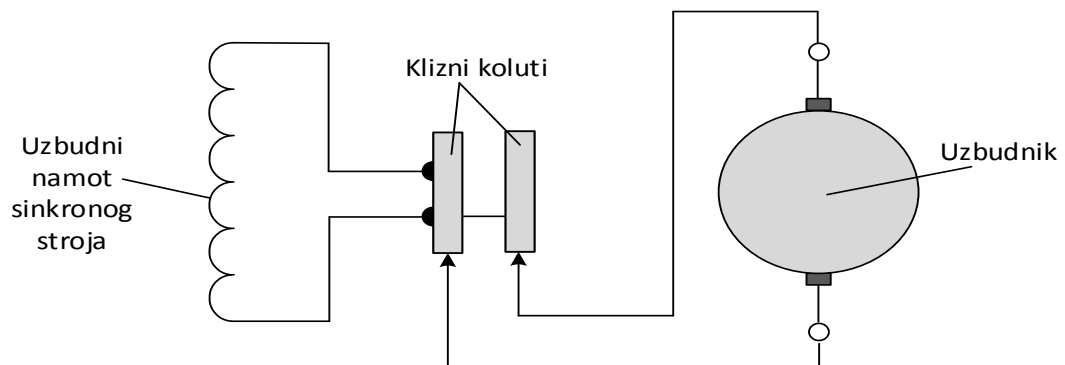
Budući da su sve varijable iz izraza (3-17) u fazi, reaktancije  $X_d$  i  $X_q$  se mogu prikazati simbolom za radni otpor, jer će se na tim otporima stvoriti pad napona koji će biti u fazi sa strujom. Ovakva nadomjesna shema sinkronog generatora s istaknutim polovima sadrži jednu nelogičnost a to je smjer struje  $I_d$ . Smjer struje  $I_d$  na ovoj shemi pokazuje kako struja  $I_d$  teče prema generatoru, umjesto da teče iz generatora. Taj smjer kretanja struje je posljedica toga što se pretpostavlja da  $d$  os prethodi  $q$  osi, što je proizvoljna odluka koju je IEEE donio na temelju toga što struja na  $d$  osi uzrokuje razmagnetiziranje stroja i treba biti negativna u okvirima promatranja stroja. Međutim, ukoliko se pretpostavi da  $d$  os kasni za  $q$  osi, tada se gubi predznak minusa iz jednadžbi (3-18) te se dobije očekivani smjer struje na  $d$  osi [5].

### 3.4. Uzbudni sustav hidrogenatora

Kod generatora velike snage rade se sustavi uzbude stroja kako bi se omogućilo stvaranje magnetskog polja u stroju čime se osigurava stabilnost generatora na mreži i to na način brzog reagiranja na poremećaje. Osim toga uzbudom se omogućava upravljanje i zaštita stroja pomoću regulacije uzbudnog napona, a time i uzbudne struje. Načini uzbude koji se koriste u praksi su [1]:

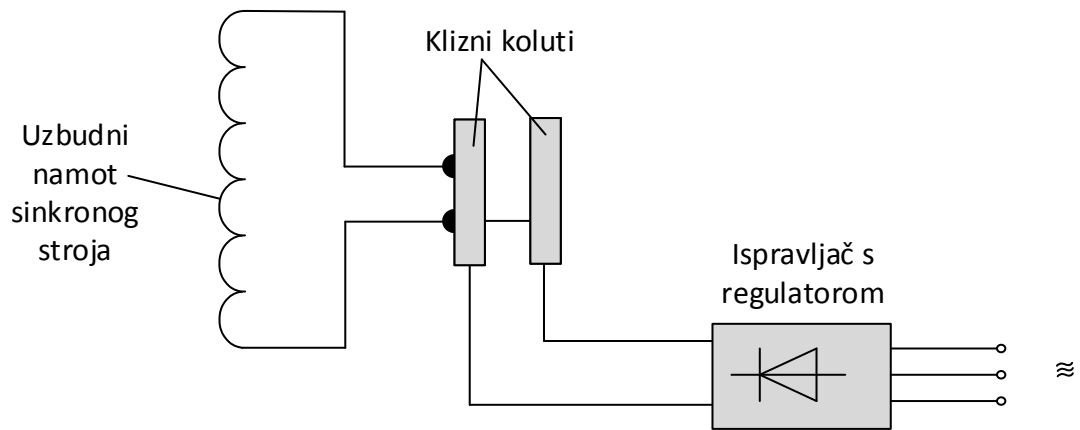
- uzbuda s istosmjernim uzбудnikom
- statička uzbuda
- beskontaktna uzbuda.

Istosmjerni uzбудnik može biti istosmjerni generator ili istosmjerni generator s produženim ispravljačem. Radi se tako da se struja iz generatora-uzbudnika dovodi u uzbudni namot hidrogenatora preko četkica i kliznih prstenova. Ovaj način uzbude najskuplji je zbog održavanja i velike cijene istosmjernih uzbudnika te se i postojeći uzbudnici zamjenjuju tako da se pri obnavljanju starih generatora ugrađuje jedan od novijih sustava uzbude. Shematski prikaz vidljiv je na slici 3.11.



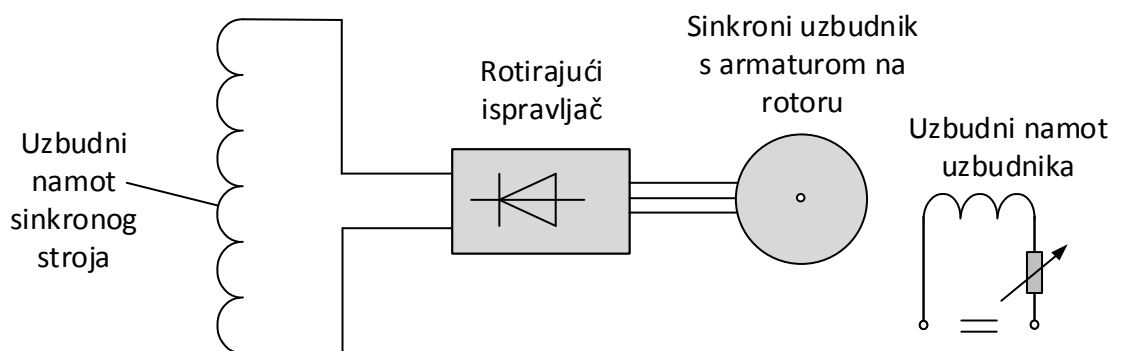
Slika 3.11. Shematski prikaz uzbude istosmjernim uzбудnikom [1]

U novije vrijeme koristi se sustav statičke uzbude kao što je prikazano na slici 3.12. U sustavu je umjesto istosmjernog uzбудnika postavljen tiristorski ispravljač koji ispravlja struju iz istosmjernog trofaznog izvora. Ispravljač upravlja regulator, a do generatora struja dolazi preko kliznih koluta i četkica.



Slika 3.12. Shematski prikaz statičke uzbude [1]

Treći način uzbude je beskontaktna ili samouzbuđena generatora koja se koristi za uzbudu manjih generatora ili onih koji rade na vlastitoj mreži. Glavni uzбудnik je sinkroni generator kojemu je uzbuda na statoru, a armaturni dio na rotoru. Uzбудnik se zajedno sa ispravljačkim uređajem postavlja na osovinu generatora i s njom se zajedno vrti. Uzbudna struja se od uzбудnika do generatora dovodi uzбудnim namotom kao što je prikazano na slici 3.13.



Slika 3.13. Shematski prikaz beskontaktna uzbude [1]

### 3.5. Samouzbuda generatora

Samouzbuda generatora ili uzbuda preko shunta koristi izlazne veličine sa statora generatora kako bi dobila prave veličine za ulazne vrijednosti i postavke automatskog regulatora napona (AVR). Automatski regulator napona tako može držati vrijednost napona u dozvoljenim granicama i istovremeno osiguravati da uzbuda stroja radi pravilno. Ovakav pristup je relativno jednostavan i financijski isplativ jer automatski regulator napona zahtijeva pravilnu uzbudu generatora kako bi mogao normalno raditi.

Jednostavnost samouzbude generatora preko shunta je i najveća mana takve uzbude, budući da na kvalitetu ulazne snage u automatski regulator napona na promatranom generatoru utječu promjene u svim ostalim generatorima u sustavu. Kada u sustavu dođe do tranzijentnih stanja uslijed uključivanja ili isključivanja velikih potrošača, doći će do promjene iznosa napona i frekvencija sustava. AVR će povećati uzbudnu struju kako bi pokušao održati zadanu vrijednost napona, međutim ukoliko napon padne ispod određene razine, automatski regulator napona više neće biti u pogonu. Takav scenarij se najčešće događa kod velikih kratkih spojeva u mreži kada dolazi do naponskih propada. Automatski regulatori napona u takvim slučajevima ne mogu održavati napon dovoljno dugo dok se ne otkloni kvar u mreži.

EBS (Excitation Boost System) predstavlja još jedan oblik samouzbuđenog sustava generatora koji ima određeno „pojačanje“ u odnosu na gore spomenuti samouzbuđni sustav preko shunta. Konstrukcijski EBS sustav ima sličan princip rada kao i samouzbuđni sustav preko shunta. Sadrži sklopove za mjerenje napona i snage potrebne za rad automatskog regulatora napona, te dodatno sadrži modul za upravljanje pojačanjem uzbude i mali uzbudni generator koji su spojeni na ne-pogonski dio osovine.

Upravljački modul je spojen na automatski regulator napona i daje mu mogućnost da postavi nekoliko razina dopuštenih uzbudnih struja ovisno o potrebama generatora. Dodatna snaga omogućava rad uzbudnom sustavu, automatski regulator može održavati napon sve dok neki od prekidača u mreži ne otkloni kvar i vrati vrijednosti napona i frekvencije u normalno stanje.

Mali uzbudni generator koji se koristi u ovom sustavu konstrukcijski je sličan uzbudnom sustavu generatora s permanentnim magnetima. Osnovna razlika je ta da ovaj manji uzbudni generator nije namijenjen za kontinuiranu opskrbu energijom automatskog regulatora već je njegova namjena dati energije u izvanrednim kratkoročnim situacijama. Konstrukcija EBS sustava omogućava dinamički odziv prilikom startanja motora te na kratke spojeve u mreži. Budući da se od EBS sustava ne zahtijeva kontinuirani rad, oni su jeftinije i konstrukcijski jednostavnije

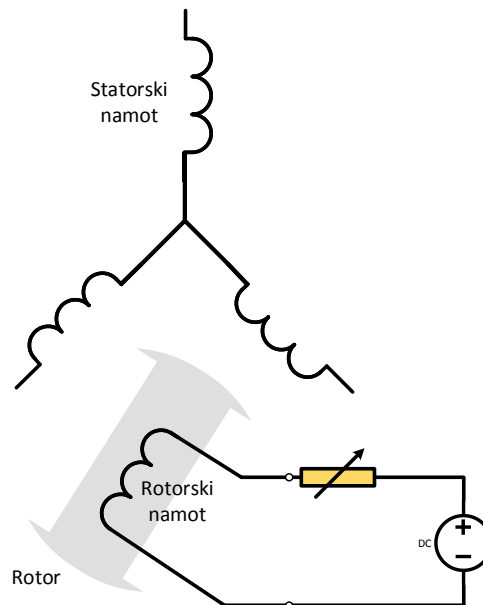
rješenje, ali su također spremni podnijeti struju kratkog spoja do 3 puta veće od nazivne struje u generatoru.

Prilikom normalnog pokretanja generatora ovi sustavi su izvan funkcije kako ne bi došlo do neželjenog rasta napona na priključnicama generatora.

## 4 KARAKTERISTIKE SINKRONOG GENERATORA

### 4.1. Karakteristika praznog hoda

Prazni hod je pogonsko stanje generatora u kojem je stroj uzbuđen i vrti se određenom brzinom. U armaturnom namotu induciraju se elektromotorne sile ali generator nije opterećen, odnosno stezaljke generatora su otvorene te u armaturnom namotu ne teku struje. Prikaz praznog hoda predstavljen je shemom sa slike 4.1. [1].

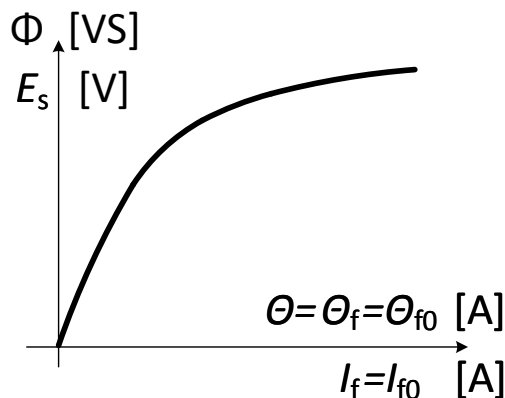


Slika 4.1. Shema spoja sinkronog generatora u praznom hodu [1]

Efektivna vrijednost inducirane elektromotorne sile po fazi računa se po sljedećem izrazu prema [1]:

$$E_s = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \Phi f_s N_s k_{ws} \quad (4-1)$$

U izrazu (4-1),  $\Phi$  predstavlja magnetski tok po polu te on ovisi o protjecanju, odnosno određen je magnetskom karakteristikom. Slika 4.2. prikazuje magnetsku karakteristiku sinkronog generatora. Nelinearnost karakteristike proizlazi iz  $BH$  karakteristike magnetskih limova od kojih je sačinjen rotor generatora [1]. Povećavanjem uzbuđenja sinkroni generator dolazi u zasićenje.



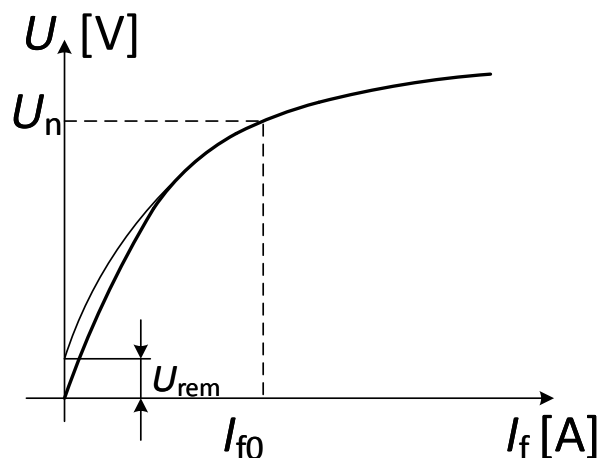
Slika 4.2. Magnetska karakteristika sinkronog generatora u praznom hodu [1]

Karakteristika praznog hoda predstavlja ovisnost napona na stezaljkama generatora u odnosu na uzбудnu struju generatora u praznom hodu, uz konstantnu brzinu vrtnje [1].

$$U = f(I_f), n = konst. \quad (4-2)$$

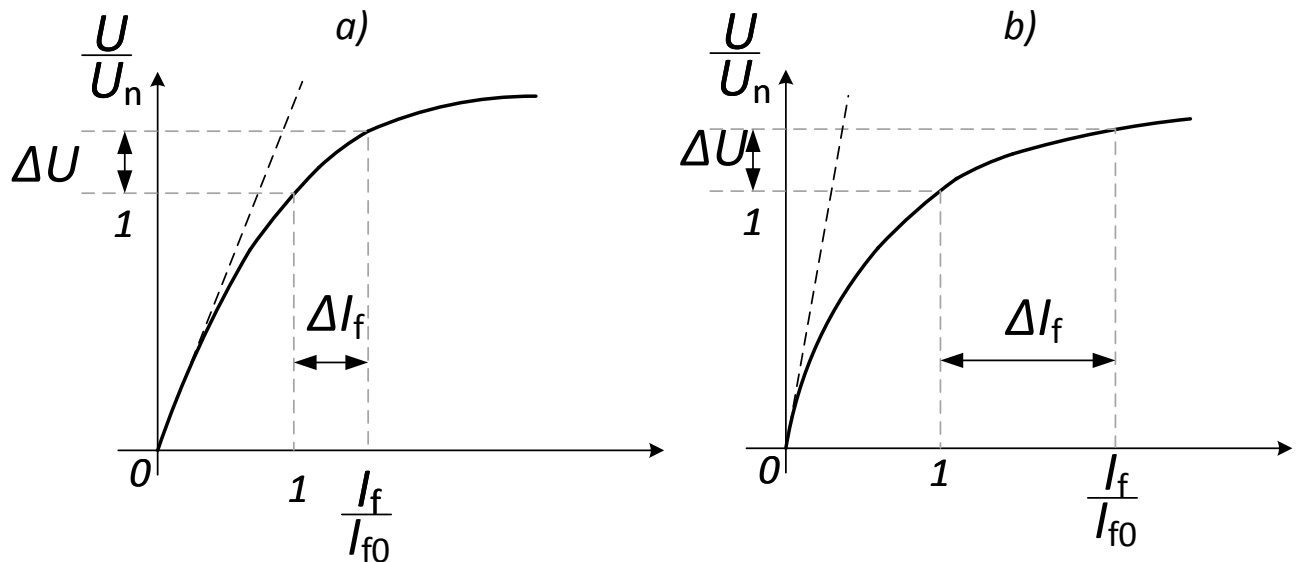
Karakteristika praznog hoda generatora ista je kao magnetska karakteristika protjecanja. Slika 4.2. prikazuje karakteristiku praznog hoda generatora gdje se uzbudna struja povećava od 0 A do vrijednosti uzbudne struje za koju generator poprima napon veći od nazivnog, te se potom uzbudna struja smanjuje do 0 A.

Kada se uzbudna struja smanji do 0 A, napon ne pada na 0 V nego ostaje na niskoj vrijednosti što je posljedica magnetske remanencije [1], pa se taj napon zove napon remanencije ili remanentni napon. Remanentni napon je izravna posljedica histereze magnetskog materijala od kojih su napravljeni magnetski limovi koji čine rotor. Spomenuta pojava se može primijetiti na stvarnoj mjerenoj karakteristici praznog hoda sinkronog generatora koja je prikazana slikom 4.3.



Slika 4.3. Mjerena karakteristika praznog hoda [1]

S obzirom na oblik karakteristike, postoje dvije uobičajene podjele: tvrda i mekana karakteristika (slika 4.4.). Tvrda karakteristika znači da je potrebna velika promjena uzbudne struje za određenu promjenu napona, dok mekana karakteristika prikazuje da se za male promjene uzbudne struje dobiju jednake promjene napona.



Slika 4.4. Mjerene karakteristike praznog hoda:

a) mekana karakteristika, b) tvrda karakteristika [1]

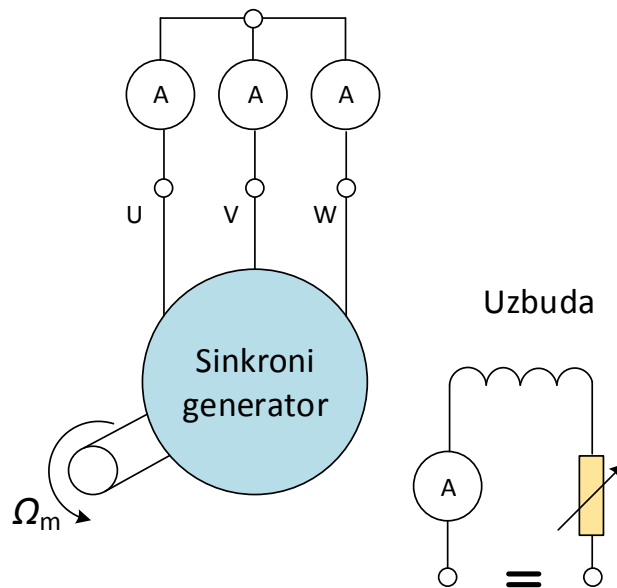
## 4.2. Karakteristika kratkog spoja

Karakteristika kratkog spoja sinkronog generatora prikazuje ovisnost struje prilikom kratkospojenih stezaljki generatora o uzbudnoj struji, uz održavanje konstantne brzine vrtnje rotora [1].

$$I_k = f(I_f), n = konst. \quad (4-3)$$

Shema spoja za pokus mjerenja struje kratkog spoja je jednostavna i prikazana je na slici 4.5.:



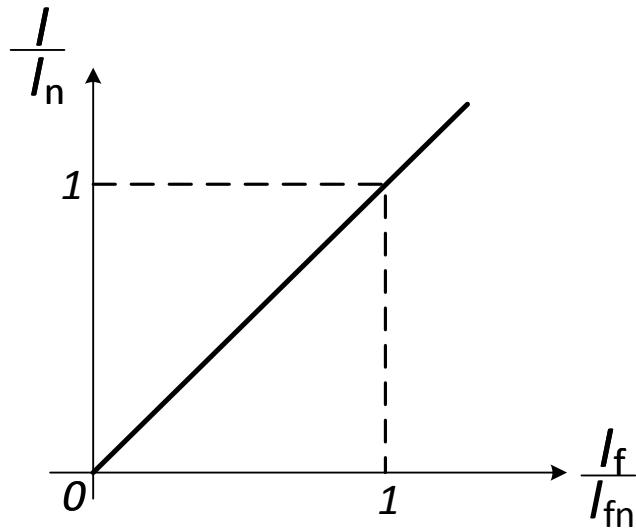


Slika 4.5 Shema mjerenja karakteristike kratkog spoja sinkronog generatora [1]

Prilikom mjerenja brzina vrtnje rotora se održava konstantnom, a uzbudna struja se povećava sve dok kroz statorski namot generatora ne poteče nazivna struja. Zbog zagrijavanja generatora, pokus kratkog spoja se najčešće izvodi od najveće struje prema nuli, tako da se uzbudna struja smanjuje. Stezaljke statorskog namota spojene su u zvijezdu, te se u idealnom slučaju pretpostavlja da su vanjski otpori spojeva stezaljki jednaki nuli te se također pretpostavlja da stroj nema radnih otpora, gubitaka niti rasipnih reaktancija.

Napon između stezaljki generatora jednak je nuli. Ukoliko se uzmu u obzir sve pretpostavke te se takav stroj uzbudi i rotor se zavrti određenom konstantnom brzinom, u generatoru će se uspostaviti magnetsko polje koje će inducirati elektromotornu silu  $E_s = 0$  V. Elektromotorna sila može imati iznos 0 V samo ako je resultantno protjecanje također jednako nuli.

Karakteristike kratkog spoja se često prikazuju u relativnim odnosima, odnosno tako da se podijele izmjerene vrijednosti armaturne struje  $I$  s vrijednošću nazivne struje  $I_n$ , a izmjerene vrijednosti uzbudne struje  $I_f$ , s vrijednošću nazivne uzbudne struje  $I_{fn}$ . Relativna karakteristika kratkog spoja prikazana je na slici 4.6 [1]:

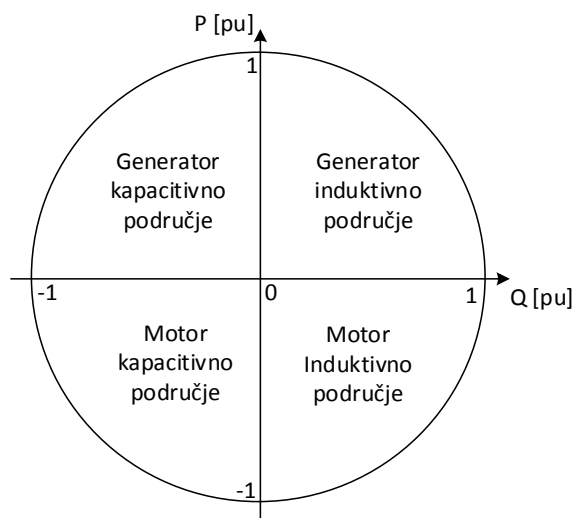


Slika 4.6 Mjerena karakteristika kratkog spoja [1]

### 4.3. Pogonska karta

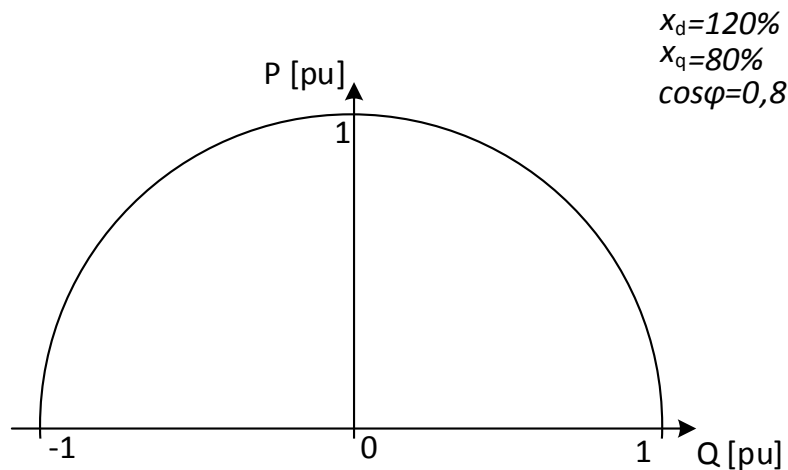
Pogonska karta je prikaz fizikalnih veličina u sinkronom stroju [2]. Pogonska karta prikazuje prilike u generatoru u stacionarnom pogonu uz pretpostavku da na priključnicama generatora vlada konstantan napon. Zasniva se na fazorskom dijagramu, te se crta u  $PQ$  koordinatnom sustavu snaga i pokazuje granice opterećenja generatora uzimajući u obzir opterećenje generatora i djelatnom i jalovom snagom [6].

Budući da sinkroni stroj gledamo u generatorskom smislu, vrijedi podjela radnih područja prikazanih na slici 4.7.

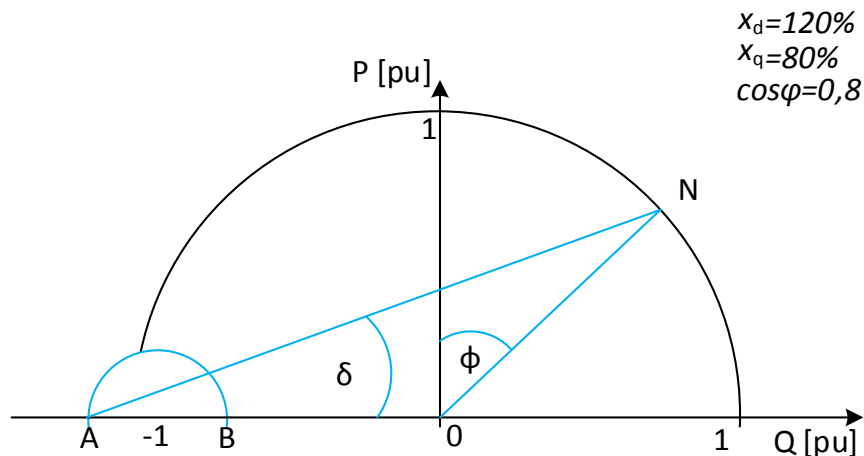


Slika 4.7. Podjela radnih područja [2]

Izrađivanje pogonske karte hidrogenatora kreće od naponskog fazorskog dijagrama, prikazanog na slici 4.8. Potrebno je podijeliti dobivenu veličinu s reaktancijom, odnosno zakrenuti dijagram udesno za  $90^\circ$ , iz čega se dobije strujni fazorski dijagram, slika 4.9. Zatim je potrebno pomnožiti sve s naponom i tu se već mogu vidjeti prve naznake pogonskog dijagrama, slika 4.10. Pogonska karta generatora s istaknutim polovima je složena zbog različitih iznosa reaktancija armature u  $d$  i  $q$  osima, gdje vrijedi da je  $x_d > x_q$ .



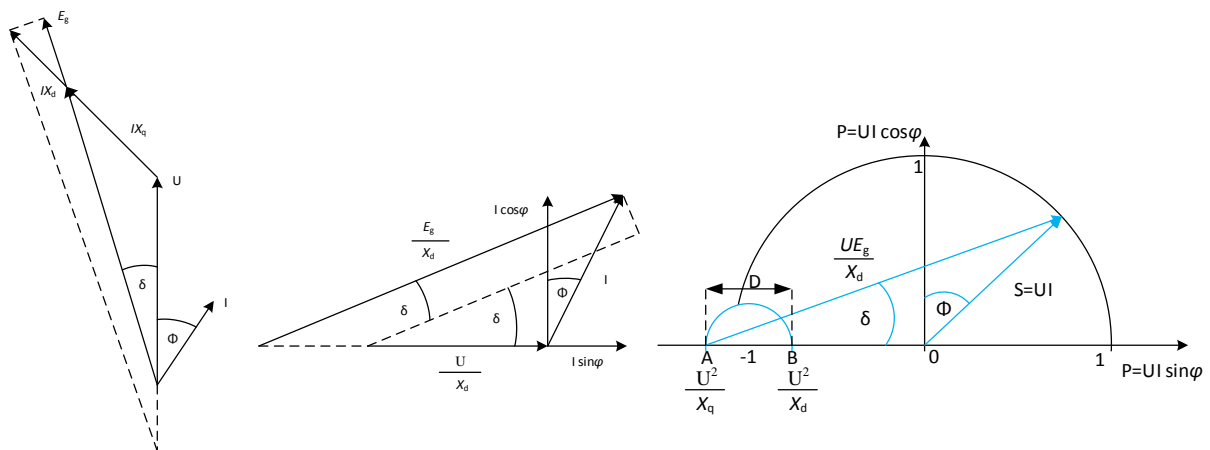
Slika 4.8. Pogonska karta hidrogenatora – jedinična kružnica [2]



Slika 4.9. Pogonska karta hidrogenatora – nazivna radna točka [2]

Prije nego što se krene u daljnje korake za crtanje pogonske karte, potrebno je poznavati očekivane karakteristične veličine sinkronog generatora s istaknutim polovima. Pretpostavit će se da je sinkrona reaktancija u  $d$  osi 120%, a sinkrona reaktancija u  $q$  osi 80%, nazivna radna točka ima  $\cos\varphi = 0,8$ , minimalna uzbuda je 0,1 (10%), a praktična granica stabilnosti je 10% od  $S_n$ , što

je manje od teorijske granice stabilnosti. Minimalna uzbuda je ona vrijednost uzbude pri kojoj generator neće ispasti iz sinkronizma. Također, pri vrijednosti minimalne uzbude postiže se zaštita statora i rotora generatora od lokalnog pregrijavanja. Generatori koji rade s minimalnom uzbudom ili u poduzbuđenom režimu rade, spojeni su na sustave s dugačkim i malo opterećenim prijenosnim vodovima. Maksimalna vrijednost uzbude u većini je slučajeva jednaka njenoj nazivnoj vrijednosti, dok je minimalna vrijednost uzbude jednaka 10% od nazivne vrijednosti uzbude.



Slika 4.10. Nastajanje pogonske karte hidrogenatora [2]

Crtanje pogonske karte kreće od jedinične kružnice iz čega dobijemo točku A i točku B, te nazivnu radnu točku N. Nazivna snaga određuje struju kroz armaturu, pa generator ne može raditi s većom prividnom snagom od nazivne, inače bi došlo do taljenja armaturnih namota.

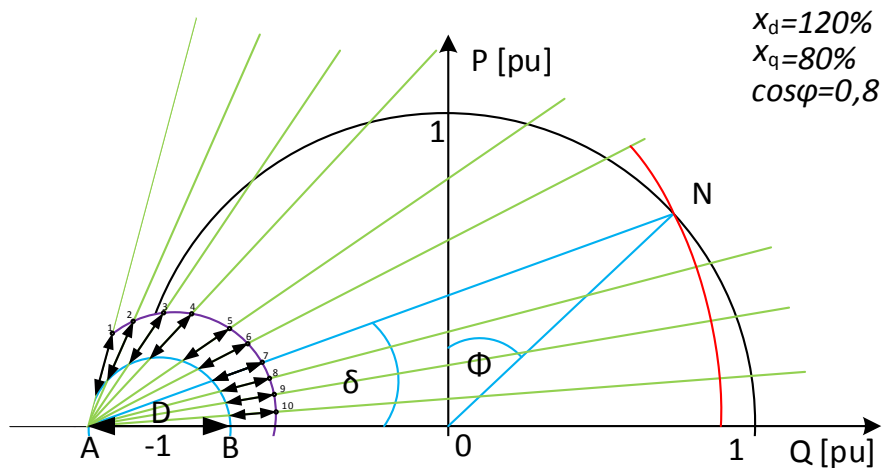
Koordinate točke A su  $(U^2/x_q)$ , u ovom slučaju je to  $-1,25 (-1^2/0,8)$ , a koordinate točke B su  $(U^2/x_d)$ , odnosno  $-0,83 (-1^2/1,2)$ .

Promjer male kružnice promjera D, računa se iz sljedećeg izraza(4-4) [2]:

$$D = U^2 \cdot \frac{x_d - x_q}{x_d \cdot x_q} = 1^2 \cdot \frac{1,2 - 0,8}{1,2 \cdot 0,8} = 0,416 \quad (4-4)$$

Sljedeći korak crtanja pogonske karte je određivanje ograničenja uzbude pomoću linija koje spajaju točke jednake vrijednosti uzbude, odnosno takve linije se zovu Pascalove krivulje [6].

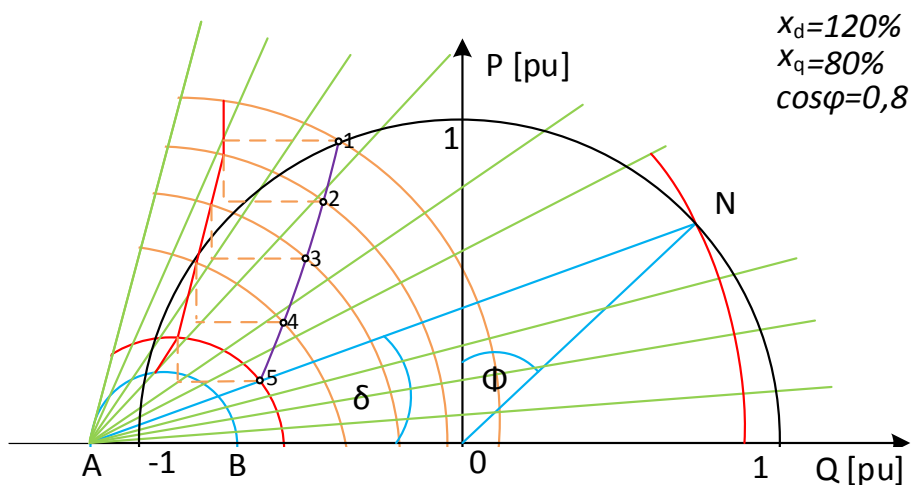
Pascalove krivulje se dobiju tako da se iz točke A povuče nekoliko pravaca i na njima označe točke jednako udaljene od kružnice promjera D.



Slika 4.11. Crtanje Pascalovih krivulja na pogonskoj karti hidrogeneratora [2]

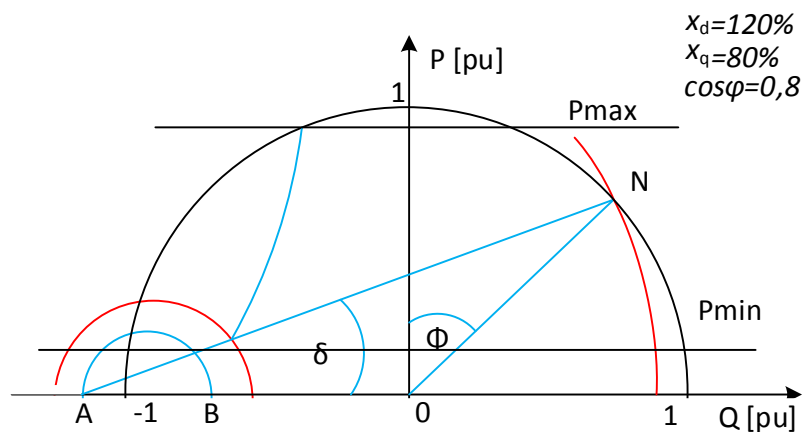
Na slici 4.11. označene su točke od 1 do 10 jednako udaljene od kružnice promjera  $D$ . Spajanjem tih točaka dobije se prva Pascalove krivulje, odnosno linije koje spajaju mjesta iste razine uzbude. Ljubičastom bojom označena je prva konstruirana Pascalova krivulja. Crvena linija koja ide od nazivne točke  $N$  je također Pascalova linija i predstavlja granicu maksimalne uzbude. Budući da je nazivna uzbuda jednaka maksimalnoj uzbudi, a minimalna uzbuda je 10% od nazivne vrijednosti uzbude, poznati su svi podaci potrebni za ucrtavanje ograničenja.

Nakon što se ucrtaju neke Pascalove krivulje, na slici 4.12 označene su narančastom bojom, može se započeti s određivanjem granica statičke stabilnosti. Granica statičke stabilnosti je krivulja koja spaja sve maksimume Pascalovih krivulja. [2] Tjemena vrijednost dobivene krivulje konstantne uzbude predstavlja maksimalnu djelatnu snagu koju generator može proizvesti. Međutim, teorijska granica stabilnosti u pogonu se ne može postići jer bi sa svakim povećanjem opterećenja generatora došlo do ispada generatora iz sinkronizma s ostatkom mreže [6].



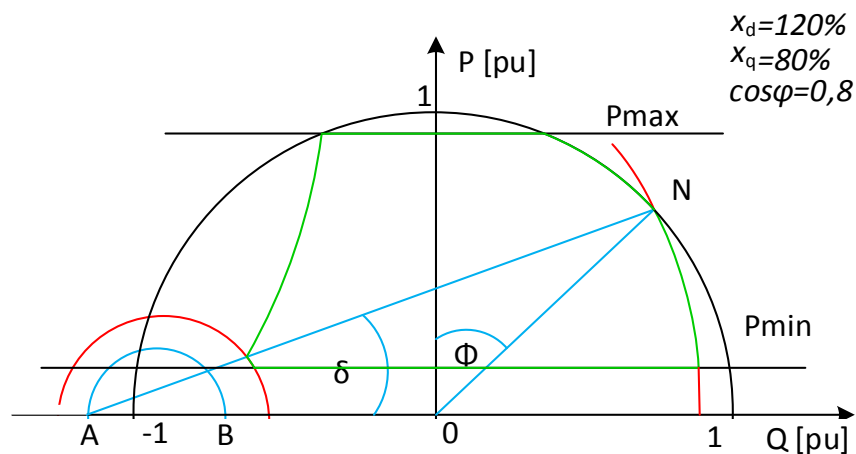
Slika 4.12. Pogonska karta hidrogeneratora – granice stabilnosti [2]

Praktična granica statičke stabilnosti se dobije tako da se od svake točke teoretske granice statičke stabilnosti oduzme  $0,1 S_n$ , te se nađe presjecište te horizontale s pripadnom Pascalovom krivuljom. Potrebno je odabrati točku na Pascalovoj krivulji teoretske granice (označena crvenom bojom), zatim sepotrebno pomaknuti za 10% okomito prema dolje, i vodoravno se pomaknuti prema desno dok se ne presiječe ista krivulja jednake uzbude. Dobiveno sjecište krivulja predstavlja praktični maksimum Pascalovih krivulja. Potrebno je ponoviti postupak za sve ostale Pascalove krivulje teoretske stabilnosti, odnosno dok se ne dođe do početne jedinične kružnice. Sjecišta krivulja prikazana su točkama (1-5). Dobivene točke povezane su ljubičastom linijom te prikazuju krivulju praktične granice statičke stabilnosti. Spajanjem dobivenih točaka dobije se krivulja praktične granice statičke stabilnosti.



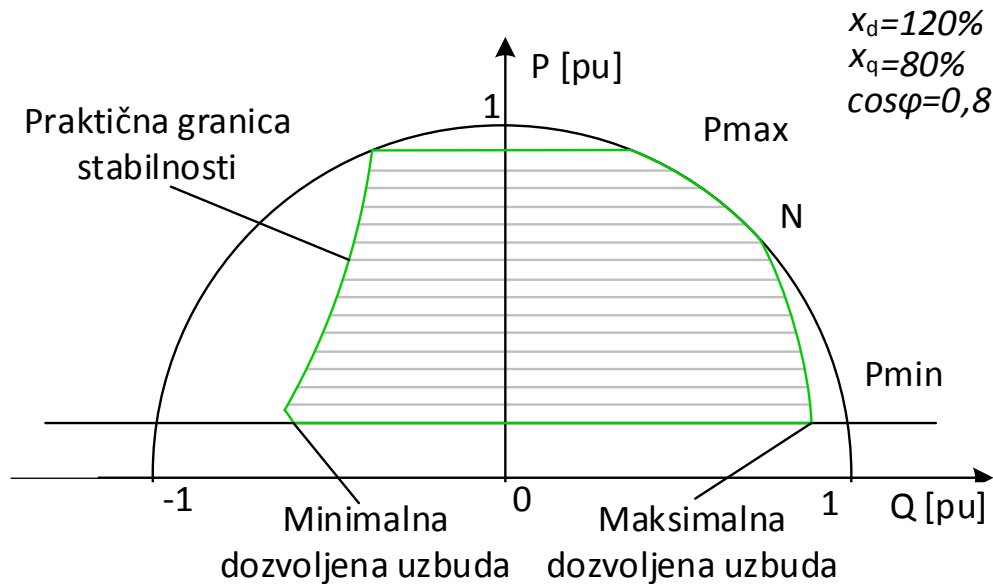
Slika 4.13. Pogonska karta – minimalna i maksimalna radna snaga [2]

Sljedeći korak uključuje dodavanje granica maksimalne i minimalne radne snage na pogonsku kartu, te se nakon toga počinju nazirati obrisi potpune pogonske karte sinkronog generatora s istaknutim polovima [2].



Slika 4.14. Pogonska karta – označavanje granica radnog područja [2]

Nakon što su ucrtane granice maksimalne i minimalne radne snage, s dijagrama se mogu ukloniti suvišne linije. Slika 4.14.prikazuju pogonsku kartu s označenim dozvoljenim granicama radnog područja hidrogenatora, dok se na slici 4.15 nalazi krajnji oblik, odnosno kompletna pogonska karta sinkronog generatora s istaknutim polovima.



Slika 4.15. Pogonska karta hidrogenatora [2]

#### 4.4. Stabilnost generatora

Stabilnost elektroenergetskog sustava se može definirati kao svojstvo elektroenergetskog sustava da ostane u radnom stanju i nakon što sustav bude izložen poremećajima [7]. Nestabilnosti u energetsom sustavu se pojavljuju u mnogo različitih oblika ovisno o konfiguraciji sustava i radnom režimu. Najčešći uzroci nestabilnosti vezani su uz održavanje sinkronizacije generatora na mrežu. Budući da su sinkroni generatori glavni nositelji proizvodnje u elektroenergetskom sustavu, nužan uvjet stabilnosti je da su svi generatori u takvom sustavu u sinkronizmu. Održavanje sinkronizma generatora postiže se regulacijom kuta rotora na generatoru i odnosima radne snage i kuta napona u sustavu. Stabilnost nastupa djelovanjem sila koje ubrzavaju ili usporavaju brzinu vrtnje jednog ili više generatora u mreži. Kod stabilnih sustava postoji ravnoteža između ulazne mehaničke snage i izlazne električne snage na svim strojevima u sustavu, te je u takvim sustavima brzina vrtnje konstantna. Ako se dogodi poremećaj u mreži dolazi do neravnoteže snaga, što će imati za posljedicu usporavanje ili ubrzavanje brzine vrtnje generatora. Ako se jedan generator trajno vrti većom brzinom od ostalih generatora u mreži, doći će do promjene kuta rotora u generatoru. Promjenom kuta rotora prebacit će se dio opterećenja sa sporijeg generatora na brži generator, ovisno o odnosu snage i kuta rotora generatora, kako bi se

postiglo ravnomjernije opterećenje [7]. Odnos snage i kuta rotora generatora je izrazito nelinearna karakteristika te će se i za određene vrijednosti povećavanjem kuta rotora smanjiti proizvedena snaga na generatoru, što dalje vodi u nestabilnost.

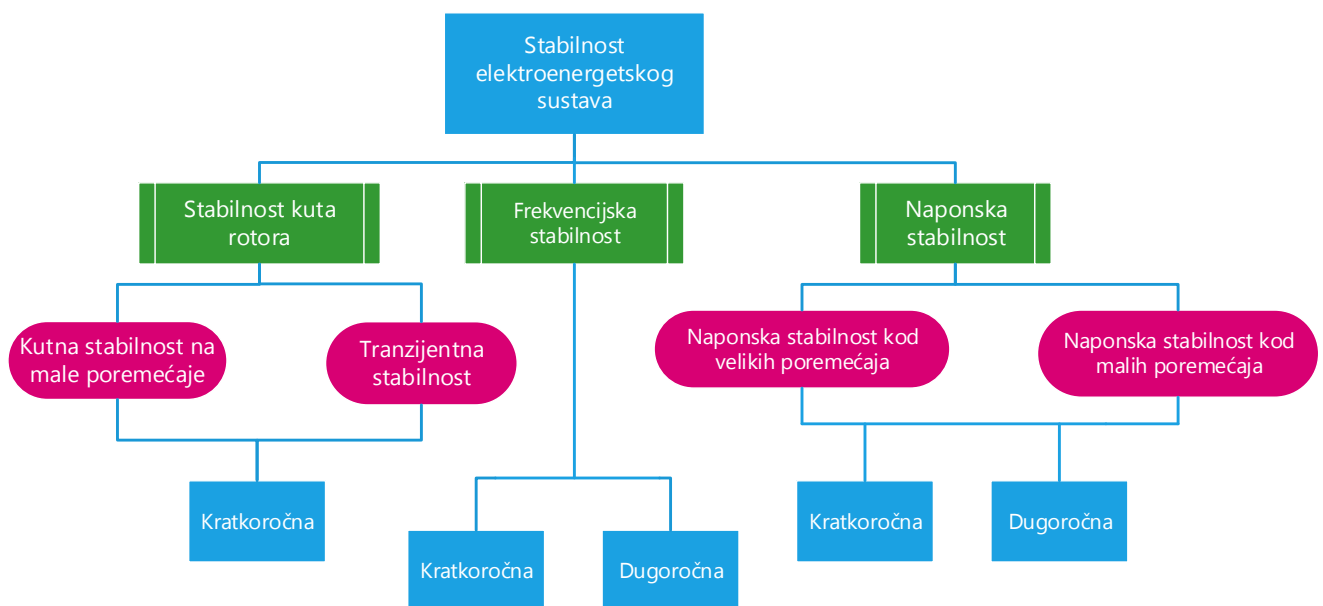
Kada sinkroni generator izgubi sinkronizam s ostatkom sustava, rotor takvog generatora se vrti većom ili manjom brzinom od nazivne brzine. Razlika u brzini vrtnje rotora i okretnog magnetskog polja uzrokuje velika kolebanja izlazne snage generatora, struji te naponu generatora. Posljedica takvih promjena nazivnih vrijednosti uzrokovat će djelovanje zaštite generatora koja će proraditi i odspojiti generator s mreže[7].

Stabilnost sustava ovisi o postojanju sinkronizirajućeg momenta koji će održavati sinkrone strojeve u sinkronizmu s ostatkom mreže. Manjak sinkronizirajućeg momenta može dovesti do nestabilnosti i uzrokovati aperiodični pomak kuta rotora. Također, ukoliko ne postoji prigušni moment koji treba vratiti sustav u područje nazivnih vrijednosti, doći će do oscilatorne nestabilnosti.

Prema tome, stabilnost elektroenergetskog sustava može se podijeliti na [7]:

- naponsku stabilnost
- frekvencijsku stabilnost
- stabilnost kuta rotora generatora

Detaljnija klasifikacija stabilnosti u sustavu prikazana je slikom 4.16.



Slika 4.16. Klasifikacija stabilnosti u elektroenergetskom sustavu[7]



#### 4.4.1. Stabilnost kuta rotora

Stabilnost kuta rotora je mogućnost međusobno povezanih sinkronih strojeva u energetsom sustavu da ostanu u sinkronizmu. Problem stabilnosti u ovom slučaju ovisi o elektromehaničkim oscilacijama koje se događaju unutar generatora prilikom poremećaja, odnosno tijekom i nakon značajnih poremećaja u mreži, promjenom kuta rotora utječe se na predanu snagu generatora [7].

Stabilnost sustava s obzirom na kut rotora dijeli se na:

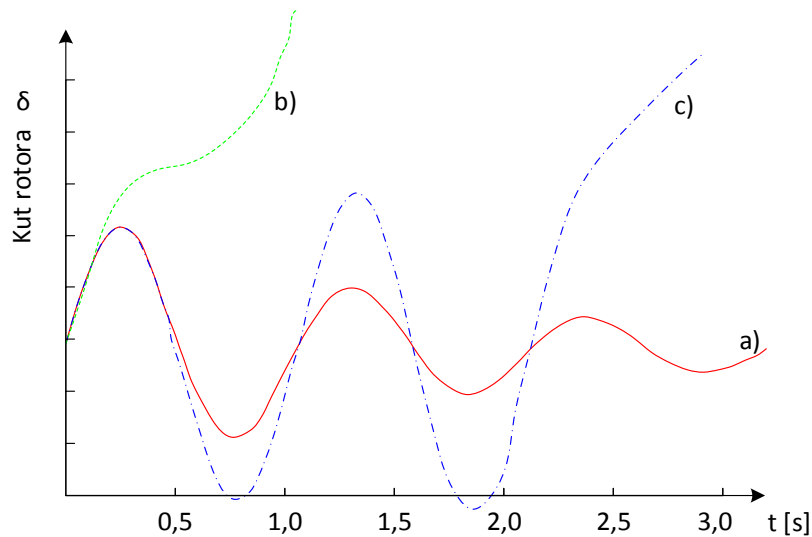
- Stabilnost prilikom manjih poremećaja
- Tranzijentnu stabilnost

Stabilnost sustava prilikom manjih poremećaja je sposobnost sustava da ostane u sinkronizmu prilikom manjih odstupanja u mreži. Takva odstupanja javljaju se kontinuirano u mreži zbog malih varijacija u proizvodnji električne energije i očekivane potrošnje. Nestabilnosti se očituju u tome što dolazi do povećavanja kuta rotora generatora zbog nedostatka sinkronizirajućeg momenta ili do oscilacija rotora zbog nedostatka prigušnog momenta [7].

Odziv sustava na male poremećaje u mreži ovisi o više faktora kao što su početni režim rada generatora, prijenosna moć vodova i vrsta uzbuđenog sustava generatora. Kod generatora koji su spojeni radijalno s ostatkom sustava, u slučaju kada ne postoji automatska regulacija napona na generatoru, doći će do nestabilnosti koja nije oscilatorna ali ipak dolazi do nedozvoljenog rasta vrijednosti. Generatori koji posjeduju automatske regulatore napona mogu izdržati takve manje poremećaje u mreži budući da se postiže konstantna regulacija napona u nazivnim vrijednostima.

Tranzijentna stabilnost je svojstvo sustava da održi sinkronizam kada je sustav izložen značajnim poremećajima u prijelaznom stanju. Odzivi sustava u takvom slučaju uključuju veliki pomak kuta rotora generatora, što je veliki problem zbog nelinearne karakteristike kuta rotora i snage generatora. Stabilnost sustava ovisi o početnom stanju sustava i prirodi poremećaja. Nakon prijelaznog stanja uglavnom nastupa stanje u kojem su novonastale vrijednosti napona, struje i snage različite od onih iz početnog stanja [7].

Prilikom dizajniranja i upravljanja elektroenergetskog sustava u obzir se uzimaju očekivani poremećaji u mreži kao što su kratki spojevi. Najčešći kratki spojevi u mreži su: jednofazni kratki spoj sa zemljom, dvofazni kratki spoj sa zemljom te trofazni kratki spoj. Navedeni kratki spojevi uglavnom nastaju na prijenosnim vodovima, no postoje i slučajevi kada dolazi do kratkih spojeva na sabirnicama ili transformatorima. Kvar se tada može otkloniti odgovarajućim zaštitnim elementima kao što su to prekidači, kako bi se izolirao element mreže koji je u kvaru.



*Slika 4.17 Dijagram odziva kuta rotora generatora na prijelazni poremećaj u mreži [7]*

Slika 4.17. prikazuje ponašanje sinkronog generatora u stabilnim i nestabilnim uvjetima. Pokazano je kako se kut rotora mijenja u jednom stabilnom slučaju (a) i dva nestabilna slučaja (b,c). U stabilnom slučaju (a), kut rotora se povećava do svog maksimuma nakon čega se kut smanjuje i oscilira sa smanjujućom amplitudom sve dok se ne postigne stabilno stanje.

U drugom slučaju (b) kut rotora se nastavlja povećavati sve dok se ne izgubi sinkronizam. Ovakav tip nestabilnosti uzrokovan je nedostatkom sinkronizirajućeg momenta.

U trećem slučaju (c) sustav je u početku stabilan, ali prelazi u nestabilno stanje zbog rastućih oscilacija. Ovakav tip nestabilnosti javlja se kod sustava koji nisu dobro dizajnirani za male poremećaje, te nije nužno rezultat tranzijentnih poremećaja u mreži.

U studijama koji se bave promatranjem tranzijentne stabilnosti sustava, vremenski period koji se promatra je od 3 do 5 sekundi, u nekim iznimnim slučajevima se povećava do 10 sekundi, kada je riječ o velikim sustavima.

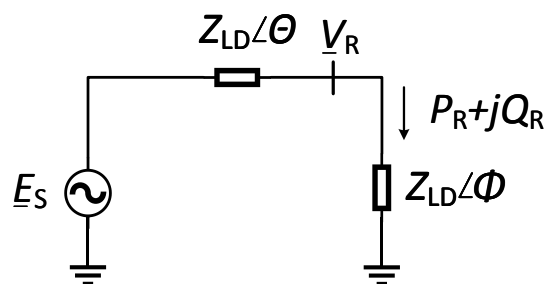
#### **4.4.2. Naponska stabilnost**

Naponska stabilnost je svojstvo sustava da održi napon u dopuštenim granicama na svim sabirnicama u sustavu tijekom normalnog režima rada te nakon poremećaja snaga u sustavu[7]. Naponska nestabilnost se javlja u slučajevima kada se u sustavu pojavi neočekivana potreba za električnom energijom ili se zbog većih promjena u mreži dogodi nedopušteni propad napona. Glavni uzrok naponske nestabilnosti je nemogućnost sustava da ispuni zahtjeve mreže za reaktivnom energijom.

Injektiranjem reaktivne snage u bilo koju sabirnicu u mreži može se utjecati na iznos napona na toj sabirnici. Kada se injektiranjem reaktivne snage više ne može podići napon na sabirnici, odnosno napon nastavi nekontrolirano padati, tada se može zaključiti da je takav sustav naponski nestabilan [7].

Naponska nestabilnost je uglavnom lokalne prirode, međutim takva pojava u mreži može imati dalekosežne posljedice. Propad napona je mnogo kompleksniji od obične naponske nestabilnosti i obično je rezultat slijeda događaja koje prati naponska nestabilnost i koji naposljetku vode do nedozvoljeno niskog napona u velikom dijelu mreže.

Postoji nekoliko varijacija nastajanja naponske nestabilnosti. U najjednostavnijem obliku naponska nestabilnost se može prikazati pomoću dvije sabirnice kao na slici 4.18.



Slika 4.18. Jednostavna radijalna mreža za prikaz naponske stabilnosti sustava [7]

Slika 4.18. prikazuje stalni naponski izvor  $E_s$  koji napaja potrošač  $Z_{ld}$  preko serijske impedancije  $Z_{ln}$ . Ovo je prikaz jednostavne radijalne mreže gdje se potrošnja napaja preko prijenosnog voda.

Amplituda struje opisana je izrazom [7]:

$$I = \frac{E_s}{\sqrt{(Z_{LN} \cos \theta + Z_{LD} \cos \phi)^2 + (Z_{LN} \sin \theta + Z_{LD} \sin \phi)^2}} \quad (4-5)$$

To se može skratiti uvođenjem supstitucijskog člana  $F$ :

$$F = 1 + \left(\frac{Z_{LD}}{Z_{LN}}\right)^2 + 2 \left(\frac{Z_{LD}}{Z_{LN}}\right)^2 \cos(\theta - \phi) \quad (4-6)$$

Iz toga se dobije slijedeći izraz:

$$I = \frac{1}{\sqrt{F}} \frac{E_s}{Z_{LN}} \quad (4-7)$$

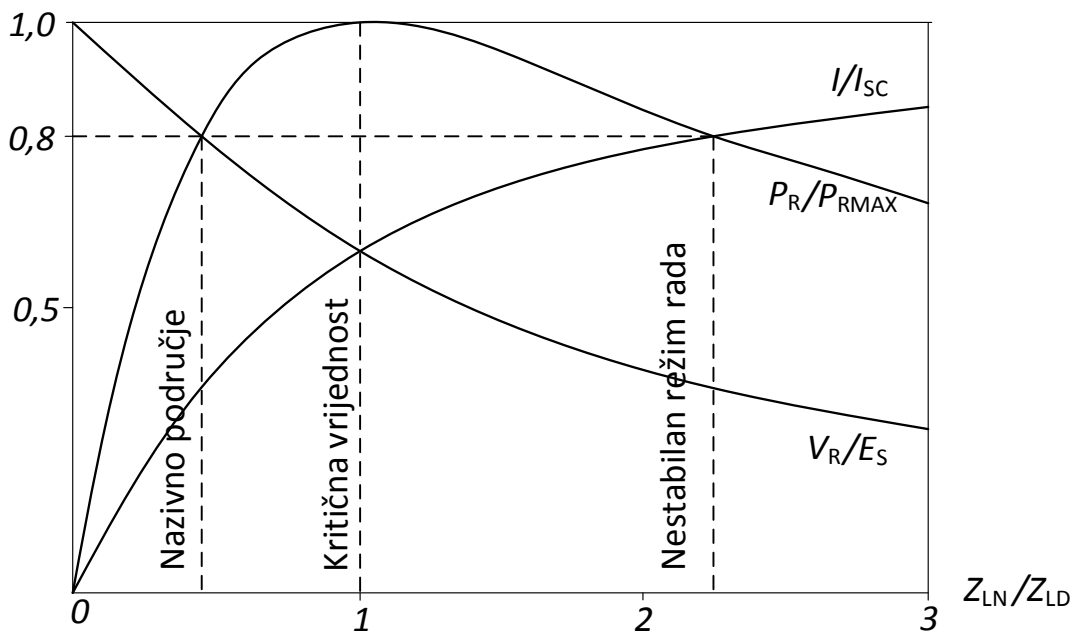
Amplituda napona na potrošačkom dijelu je:

$$V_R = Z_{LD} I = \frac{1}{\sqrt{F}} \frac{Z_{LD}}{Z_{LN}} E_S \quad (4-8)$$

Snaga kojom se napajaju potrošači se dobije iz izraza (4-9) [7]:

$$P_R = V_R I \cos \varphi = \frac{Z_{LD}}{F} \left( \frac{E_S}{Z_{LN}} \right)^2 \cos \varphi \quad (4-9)$$

Krivulje koje prikazuju  $I, V_R, P_R$  prikazane su na slici 4.19. kao funkcije  $Z_{LN}/Z_{LD}$  za slučaj kada je  $\tan \varphi = 10,0$  i  $\cos \varphi = 0,95$ . Na slici se može vidjeti kako se za povećavanje potrebe za električnom energijom smanjuje impedancije  $Z_{LD}$ , snaga  $P_r$  se isprva naglo povećava i zatim se taj rast polako usporava sve dok se ne postigne maksimum snage, nakon koga snaga krene opadati. Prema tome, ovdje se može primijetiti kako postoji maksimalna vrijednost radne snage koja se može prenijeti preko impedancije pomoću stalnog naponskog izvora.

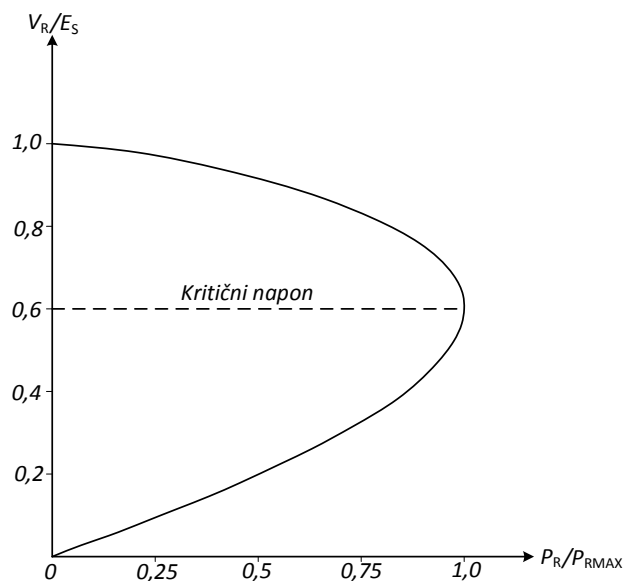


Slika 4.19. Prikaz napona, struje i snage kao funkcija potrebe potrošača za električnom energijom u sustavu [7]

Maksimum snage koje se može prenijeti javlja se kada je pad napona jednak amplitudi  $V_r$ , odnosno kada je  $Z_{LN}/Z_{LD}=1$ . Budući da  $Z_{LD}$  postupno opada, struja  $I$  se povećava i napon  $V_r$  se smanjuje. Kod većih zahtjeva za energijom, upravljanje snagom pomoću mijenjanja opterećenja jer smanjivanje impedancije tereta smanjuje snage, dovodilo bi sustav u nestabilno stanje. Hoće li

određeni sustav postati nestabilan ovisi o karakteristici potrošnje. Kod potrošača sa statičkom karakteristikom potrošnje, sustav se stabilizira pri vrijednostima snage i napona u dopuštenim granicama. Za razliku od statičke karakteristike potrošnje, kod karakteristike potrošača s konstantnom snagom, sustav postaje nestabilan prilikom pada napona na sabirnici potrošača. Napon se stoga može odrediti preko kompozitne karakteristike prijenosnog voda i potrošača. Ako se potrošač napaja preko transformatora s automatskog regulacijskom sklopkom, regulacijska sklopka će reagirati i pokušati podići vrijednost napona. To će uzrokovati smanjenje vrijednosti impedancije  $Z_{ld}$  i smanjiti će se  $V_r$ , što će dovesti do progresivnog smanjivanja vrijednosti napona. Ovo je najjednostavniji i najčešći primjer naponske nestabilnosti u sustavu.

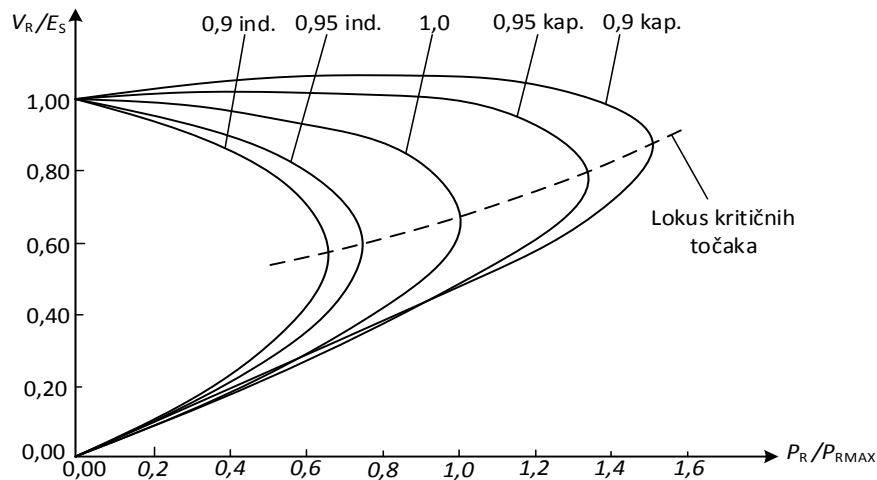
Iz jednadžbe (4-9) može se primijetiti koliko faktor snage utječe na karakteristiku napona i snage sustava. To je očekivano budući da je pad napona na prijenosnom vodu funkcija vezana uz radnu, ali i reaktivnu snagu. Prema tome, može se zaključiti da naponska stabilnost ovisi o odnosu između radne snage, reaktivne snage i napona. Prikaz nabrojanih veličina nalazi se na slikama 4.20. i 4.21.



Slika 4.20. Karakteristika ovisnosti snage i napona u sustavu [7]

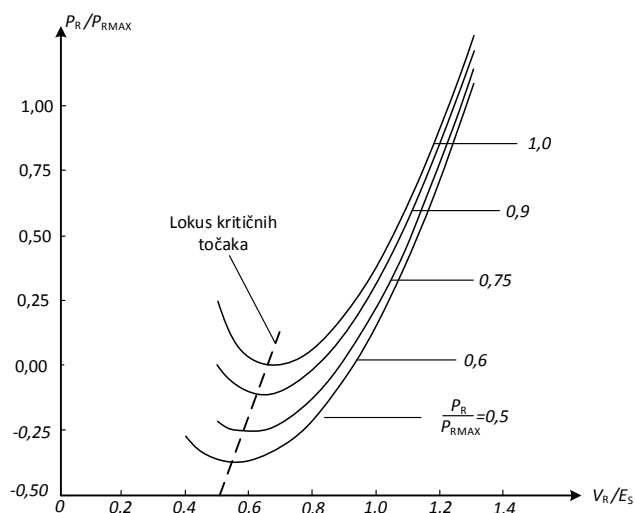
Slika 4.20. pokazuje krivulju snage i napona za gore spomenuti jednostavni sustav sa slike 4.19, za različite vrijednosti faktora snage. Mjesta kritičnih radnih točaka prikazane su iscrtkanom linijom na slikama. Stabilne radne točke nalaze se samo iznad kritičnih točaka. Naglim smanjenjem faktora snage, odnosno povećavanjem reaktivne snage  $Q_r$ , sustav se može dovesti iz stabilnog radnog režima u potencijalno nestabilni sustav, tako što će sustav imati radnu točku iz donjeg dijela  $V-P$  krivulje.

Na slici 4.22. prikazana je familija krivulja ovisnosti napona o radnoj snazi za različite vrijednosti faktora snage. Faktor snage se mijenja od 0,9 induktivnog do 0,9 kapacitivnog karaktera.



Slika 4.21.  $V_r P_r$  karakteristike za jednostavan radijalni sustav i različite faktore snage [7]

Slika 4.21. prikazuje familije krivulja koje se također odnose na jednostavni sustav sa slike 4.18, gdje svaka krivulja prikazuje odnos  $V_r$  i  $Q_r$  za određenu vrijednost  $P_r$ . Sustav je stabilan u području pozitivne derivacije  $dQ_r/dV_r$ . Granica naponske stabilnosti se postiže kada je vrijednost derivacije jednaka nuli. Zbog toga dijelovi  $Q-V$  krivulje desno od minimuma predstavljaju stabilno radno područje, a dijelovi lijevo predstavljaju nestabilno radno područje. Stabilan režim rada u području gdje je derivacija  $dQ_r/dV_r$  negativna može se postići samo sa kompenzacijom reaktivne snage gdje će odnos veličina  $Q/V$  biti suprotnog polariteta u odnosu na normalan režim rada.



Slika 4.22.  $V_r Q_r$  karakteristike za jednostavan radijalni sustav i različite omjere snaga [7]

Naponska stabilnost se može podijeliti na dvije podvrste [8]:

- 1) Naponska stabilnost kod velikih poremećaja
- 2) Naponska stabilnost kod manjih poremećaja

Prilikom velikih poremećaja u mreži kao što su kvarovi na elementima mreže, prestanak proizvodnje i slično, riječ je o naponskoj stabilnosti kod velikih poremećaja. Stabilnost je u ovakvim slučajevima određena karakteristikama potrošnje te kontinuiranim i diskretnim upravljanjem sustavom te zaštitom sustava. Određivanje naponske stabilnosti kod poremećaja velikih razmjera zahtijeva razmatranje nelinearnih promjenljivih performansi sustava u dovoljno velikom vremenskom periodu. Promatrani vremenski period pri tome može varirati od nekoliko sekundi do nekoliko desetaka minuta. Prema tome, za analizu takvih sustava potrebne su opsežne i dugotrajne dinamičke simulacije sustava[7,8].

Kriterij za stabilnost kod velikih poremećaja je taj da sustav nakon velikog poremećaja i svih aktivnosti u sustavu koje su poduzete da se suzbiju nastale negativne prilike u mreži, vrijednosti napona na svim sabirnicama u mreži budu u dopuštenim granicama.

Naponska stabilnost kod manjih poremećaja u mreži određena je svojstvom sustava da kontrolira napone nakon što u sustavu dođe do inkrementalne promjene u potrošnji energije. Ovaj tip stabilnosti određen je karakteristikom potrošnje, kontinuiranim upravljanjem i diskretnim upravljanjem u bilo kojem trenutku.

Prilikom promatranja utjecaja manjih poremećaja na naponsku stabilnost, može se provoditi statička analiza za sustav u normalnom stacionarnom stanju. Statičkom analizom se mogu odrediti granice stabilnosti te faktori koji uzrokuju nestabilnost sustava.

Kriterij za naponsku stabilnost kod manjih poremećaja je taj da će na svakoj sabirnici u mreži, napon na sabirnici rasti s injektiranjem reaktivne snage. Sustav je nestabilan čak i kada se na samo jednoj od sabirnica iz mreže napon smanjuje s injektiranjem reaktivne snage[8].

#### **4.4.3. Frekvencijska stabilnost**

Naponska stabilnost i stabilnost kuta rotora su stabilnosti vezane uz trenutne poremećaje u ravnoteži snaga u mreži, odnosno između potrebe za električnom energijom i energijom koju generatori proizvode i predaju u elektroenergetski sustav. Takvi trenutni poremećaji nastaju zbog kratkih spojeva u mreži, te se takvi kvarovi otklanjaju dovoljno brzo tako da nema potrebe za smanjivanjem snage koja se proizvodi ili koja je dostupna potrošačima. Međutim, u slučajevima

kada se iz mreže isključe ili naglo uključe potrošači velike snage, ili u slučaju kada zbog djelovanja zaštite dođe do odspajanja generatora s mreže, doći će do velike neravnoteže u snagama u cijelom sustavu. Neravnoteža se u početku pokušava nadoknaditi rotirajućom rezervom turbina, generatora i motora, te se kao posljedica toga frekvencija sustava mijenja.

Elektroenergetski sustav se zasniva na ravnoteži snaga. Svi generatori u sustavu moraju proizvesti u svakom trenutku toliku djelatnu snagu, koliko to zahtijevaju svi potrošači u sustavu uključujući i gubitke energije u prijenosu. Ako je u nekom promatranom trenutku, potrošnja u sustavu veća od dostupne proizvedene snage, generatori će se dodatno opteretiti kako bi pokušali nadoknaditi manjak u proizvodnji te će vrtjeti manjom brzinom od nazivne što će uzrokovati manju frekvenciju u sustavu. Ako je potrošnja u sustavu manja od proizvedene snage, generatori će se rasteretiti te će se početi vrtjeti brzinom većom od nazivne, što će prouzročiti porast frekvencije sustava.

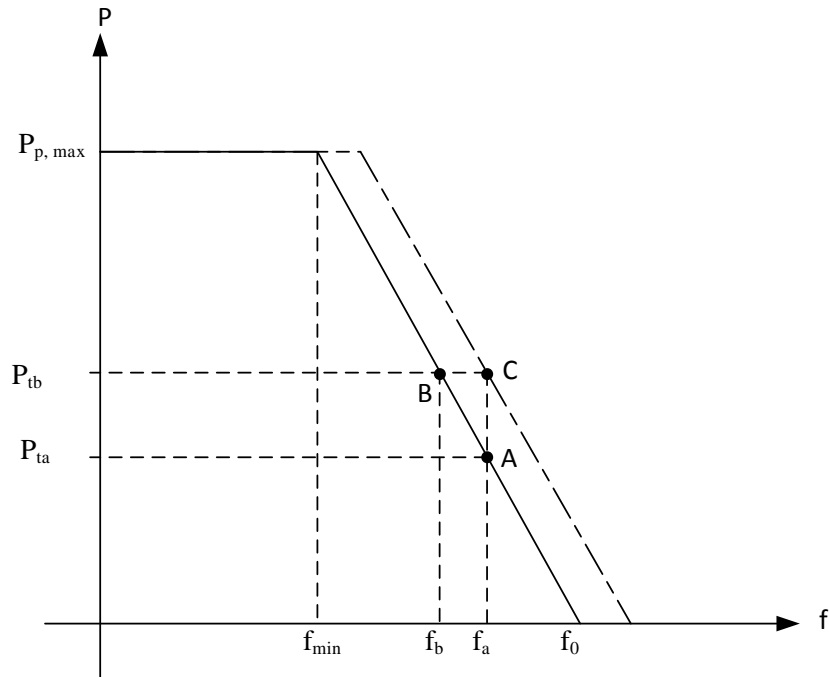
Postoje tri metode regulacije frekvencije kojima se pokušava održati stabilnost frekvencije u dopuštenim granicama [8]:

1. Primarna regulacija
2. Sekundarna regulacija
3. Tercijarna regulacija

Primarna regulacija obuhvaća regulaciju snage pomoću ulaznih ventila na turbinama kako bi se proizvedena snaga na generatorima uskladila sa zahtjevima potrošača u sustavu. Primarnom regulacijom se opisuje djelovanje turbinskih regulatora na odstupanje frekvencije od nazivne vrijednosti nakon značajnog poremećaja u ravnoteži snaga u mreži.

Karakteristika primarne regulacije pokazana je slikom 4.23.[8]. Primarna regulacija djeluje u periodu od 5 do 30 sekundi nakon poremećaja, ovisno o proizvodnim karakteristikama svih agregata u sustavu.





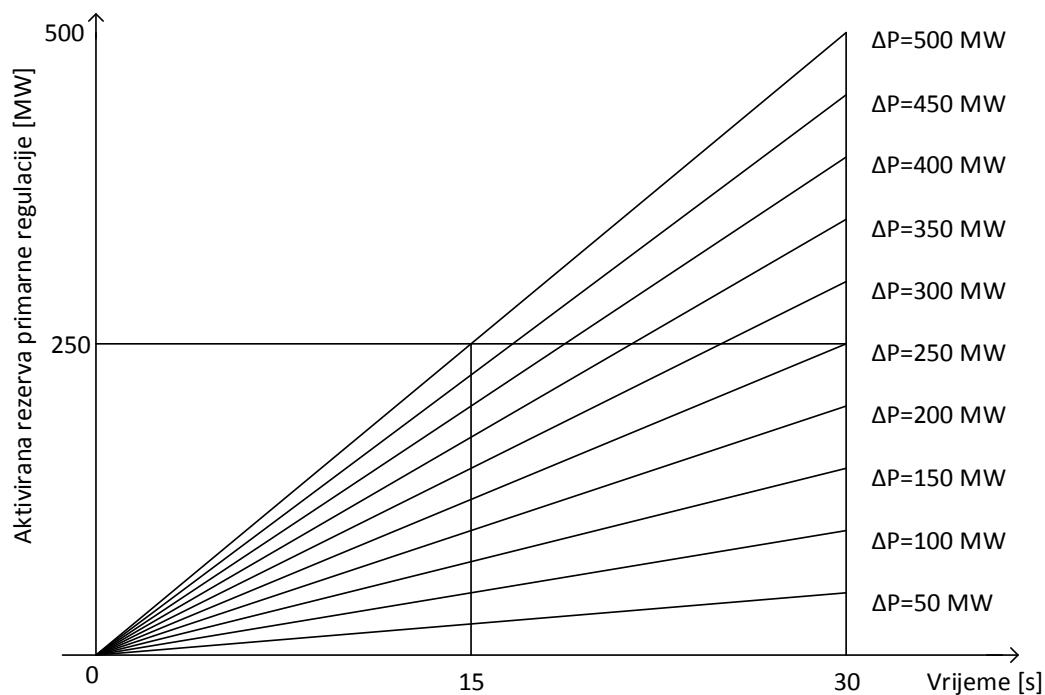
Slika 4.23. Karakteristike primarne i sekundarne regulacije[8]

Frekvencija praznog hoda je označena s  $f_0$  i na toj frekvenciji se sinkroni generatori najbrže vrte u neopterećenom stanju. Proporcionalno s rastom opterećenja frekvencija sinkronih generatora opada. Maksimalna proizvedena snaga postiže se na frekvenciji  $f_{min}$  koja je u praksi od 4% do 6% manja od frekvencija praznog hoda[8].

Djelovanjem primarne regulacije na promjene opterećenja u mreži stvaraju se nepovoljne promjene frekvencije sustava. Regulacijska energija je varijabla koja najbolje opisuje rad regulatora primarne regulacije. Regulacijska energija je u stvari predstavljena strminom karakteristike primarnog regulatora te se vrijednost navedene energije može računati prema [8] :

$$k_p = -\frac{\Delta P_p}{\Delta f} \left[ \frac{MW}{Hz} \right] \quad (4-10)$$

Što je karakteristika regulatora strmija, postiže se manja statičnost sustava što dovodi do većih oscilacija frekvencije. Primarnom regulacijom mora se postići ravnoteža proizvedene i potrošene snage u mreži uzimajući kao uvjet ravnoteže vrijednost nazivne frekvencije sustava. Kada frekvencija počinje padati ispod dopuštenih granica pomoću primarne regulacije potrebno je aktivirati dostupnu rezervu radne snage u sustavu[8,9].



Slika 4.24. Aktiviranje primarne regulacije[9]

Slika 4.24. pokazuje aktiviranje primarne regulacije po direktivama HOPS-a[9]. Desetak sekundi nakon poremećaja u mreži aktivira se 50% dostupne rezerve radne snage primarne regulacije. Povećavanje korištenja rezerve se linearno povećava sve do 30 sekundi nakon poremećaja kada se dostiže 100% iskorištenost rezerve. Osjetljivost primarne regulacije ili najmanja vrijednost odstupanja od dozvoljene vrijednosti frekvencije u normalnom radnom stanju je  $\pm 20$  mHz. Osjetljivost primarne regulacije proizlazi iz zbrajanja točnosti mjerenja frekvencije i neosjetljivosti turbinske regulacije [9].

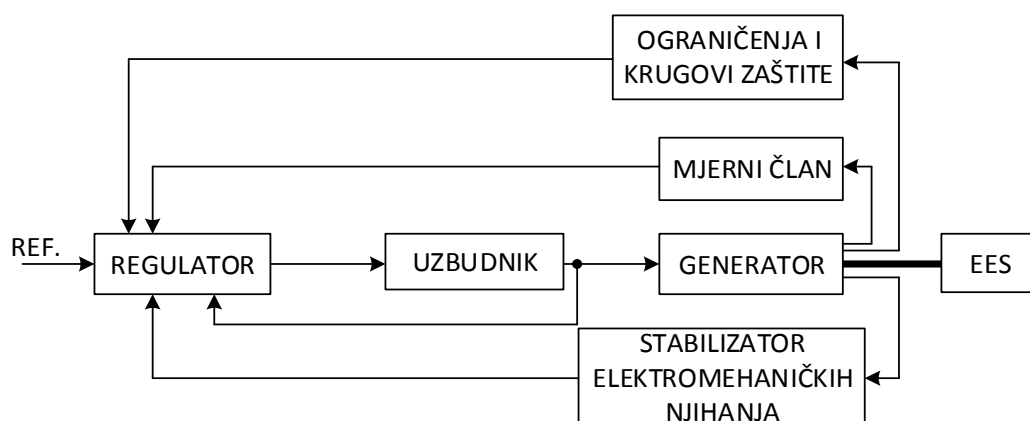
Sekundarna regulacija frekvencije ispravlja osnovni nedostatak primarne regulacije, a to je nepostojanje mogućnosti preciznog održavanja frekvencije prilikom veće promjene snage opterećenja. Sekundarna regulacija omogućava pomicanje karakteristike lijevo i desno duž osi apscise [9]. Promatrajući sliku 4.23. može se odrediti prva radna točka A, koja za opterećenje  $P_{ta}$  ima proizvedenu snagu  $P_{ta}$  te joj pripada frekvencija  $f_a$ , jednaka nazivnoj frekvenciji  $f_n$ . Ako opterećenje poraste na iznos  $P_{tb}$ , primarni regulator turbine povećat će proizvedenu snagu na  $P_{pb} = P_{tb}$ , sustav će postići novu radnu točku B. Takvo povećanje opterećenja dovodi do nedopušteno niske frekvencije  $f_b$ . Uloga sekundarne regulacije je uspostaviti ponovno frekvenciju  $f_a = f_n$ . Potrebno je karakteristiku primarnog regulatora pomaknuti udesno za iznos  $f_a - f_b$ . Nakon svih navedenih radnji, dobije se nova karakteristika regulacije s radnom točkom C koja je pomaknuta udesno od osnovne karakteristike te je prikazana kao iscrtkana linija na slici 4.24.

Pomicanjem karakteristike moguće je uspostaviti nazivnu vrijednost frekvencije za različite iznose snaga opterećenja. Sekundarna regulacija nastupa nakon primarne, odnosno 30 sekundi nakon poremećaja. Nazivna vrijednost frekvencije se mora postići najkasnije 15 minuta nakon poremećaja [9].

Tercijarna regulacija odnosi se na upravljanje rezervama snage u sustavu te na ekonomično vođenje svih elektrana koje su dio elektroenergetskog sustava. Uloga tercijarne regulacije je rasterećenje sekundarne regulacije, tako što će se aktivirati dodatne rezerve snage ukoliko se ustanovi da je regulacijska pogreška izvan dozvoljenih vrijednosti.

#### 4.4.4. Automatska regulacija napona (AVR)

Automatski regulatori napona kontroliraju vrijednost napona na generatoru tako što povećavaju ili smanjuju struju koja dolazi iz uzбудnika u namote generatora [5,8]. Na slici 4.25. prikazan je blokovski dijagram koji opisuje na kojem principu radi automatski regulator napona. Mjerni član mjeri struju, snagu, napon te frekvenciju generatora. Izmjerena vrijednost napona generatora  $V_g$  je kompenzirana za struju tereta zbog potrošača  $I_g$ . Napon  $V_g$  se zatim uspoređuje s referentnom vrijednosti za napon generatora  $V_{ref}$ , a razlika napona  $\Delta V$  se naziva naponska greška. Naponska greška  $\Delta V$  dolazi na pojačalo te se vrijednost razlike napona, odnosno naponske greške koristi za promjenu izlaznih parametara na uzбудniku kako bi se napon vratio na nazivnu vrijednost i otklonila razlika između trenutne i nazivne vrijednosti napona generatora. Ovaj blokovski prikaz predstavlja uobičajenu regulaciju sustava sa zatvorenom petljom. Regulacijski proces se stabilizira koristeći negativnu povratnu vezu koja dolazi izravno s pojačala ili uzбудnika.



Slika 4.25. Funkcijska blokovska shema sustava uzbude sinkronog generatora [5]

Unutar automatskog regulatora napona (AVR) postoje podsustavi čija je uloga zaštititi uzбудnik i generator od prevelikih napona i struja. Zaštita od nedozvoljenih vrijednosti napona i struje temelji

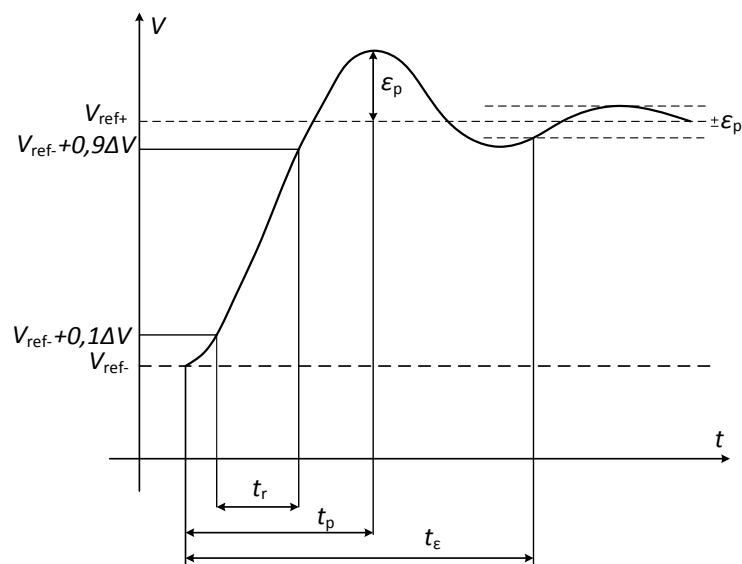
se na održavanju signala iz automatskog regulatora u dozvoljenim granicama. Pojačalo se štiti od signala prevelike vrijednosti, uzбудnik i generator od prevelike struje, generator se također štiti od prevelike struje armature i prevelikog kuta snage [10].

Stabilizator snage sustava (PSS) se često dodaje kao podsustav u AVR, kako bi se prigušila njihanja snaga u sustavu. Njihanje snaga u sustavu proizlazi iz neravnoteže proizvodnje električne energije u generatoru i stvarne potrebe za energijom koju koriste potrošači.

Stabilizator snage sustava promatra brzinu vrtnje generatora, izlaznu frekvenciju i stvarnu električnu snagu na izlazu generatora, te na osnovu tih veličina korigira rad generatora.

Parametri koji će se regulirati pomoću AVR-a trebaju se odabrati s obzirom na traženu razinu kvalitete napona. Kod manjih poremećaja u mreži, kvaliteta napona se može odrediti promatranjem dinamičkog odziva napona generatora na skokovitu promjenu neke od referentnih vrijednosti na generatoru. Slikom 4.26. prikazan je takav poremećaj u mreži, gdje dolazi do skokovite promjene napona, [5].

$E_p$  predstavlja razliku između vršne vrijednosti napona i nazivne vrijednosti napona, uglavnom se prikazuje kao postotak. Vrijeme koje je potrebno da se dosegne vršna vrijednost je  $t_p$ , a vrijeme porasta  $t_r$  je vrijeme za koje će napon porasti s 10% na 90%. Brzina porasta napona ne bi smjela biti manja od  $1,5 U_{ref}$  po sekundi.



Slika 4.26. Dinamički odziv napona na skokovitu promjenu referentne vrijednosti [5]

## 5. PRORAČUN

Sve osnovne relacije iz teorijske elektrotehnike proizlaze iz Maxwellovih jednažbi koje opisuju temeljna načela kao što je pojava sile na vodič u magnetskom polju kroz koji teče struja.

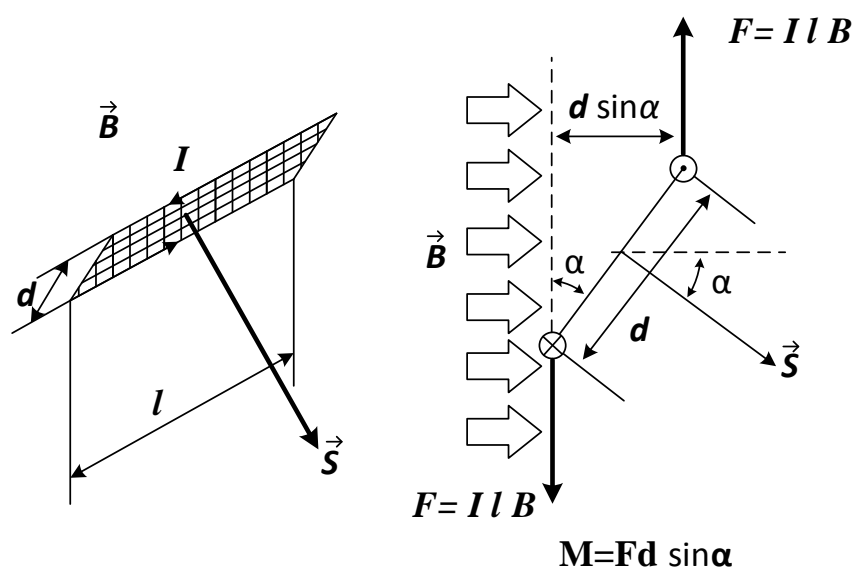
$$F = I \cdot l \cdot B \cdot \sin \alpha \quad (5-1)$$

- $I$  – struja koja teče kroz vodič [A]
- $l$  – duljina vodiča u metrima [m]
- $B$  – gustoća magnetskog toka u magnetnom polju [T]
- $\alpha$  – kut između vodiča i vektora magnetske indukcije

Na štapnom vodiču javiti će se pozitivni i negativni naboji, pri čemu se na mjestu pozitivnih naboja zamišlja pozitivni pol, a na mjestu južnog pola negativni magnetski naboj. Između pozitivnog i negativnog pola doći će do stvaranja dipolnog momenta, koji se definira kao vektor iznosa produkta duljine magneta i magnetskog naboja. Smjer magnetskog momenta je od južnog prema sjevernom polu. Djelovanjem sile na tijelo koje je fiksirano oko jedne čvrste točke dolazi do zakretanja tijela, odnosno nastaje moment. Magnetski moment je ovisan o gustoći magnetskog polja

$$M = F \cdot d \cdot \sin \alpha \quad (5-2)$$

- $d$  – duljina magnetskog dipola, udaljenost između sjevernog i južnog pola na dipolu

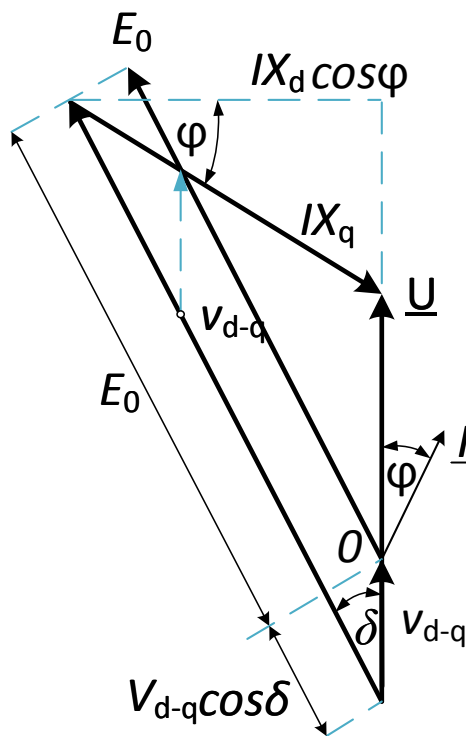


Slika 5.1. Osnovne relacije sile i momenta na vodič u magnetskom polju

Maxwellove jednađbe su teorijska osnova po kojoj su izvedeni svi izrazi za fizikalne veličine kojima se opisuje upravljanje i djelovanje sinkronih strojeva. Iz navedenih saznanja dolazi pojednostavljeni izraz koji je poveznica između momenta sinkronog stroja i nazivne brzine vrtnje predstavljen je jednađbom (5-3):

$$M = \frac{P_{elm}}{\omega_m} = P_{elm} \frac{p}{\omega} = P_{elm} \frac{1}{\pi \frac{n}{30}} = 9,55 \frac{P_{elm}}{n} \quad (5-3)$$

- $P_{elm}$  – električna snaga sinkronog stroja [W]
- $\omega_m$  – kutna brzina okretanja sinkronog stroja [rad/s]
- $p$  – broj pari polova sinkronog stroja
- $n$  – brzina okretanja sinkronog stroja [okr/min]



Slika 5.2. Fazorski dijagram sinkronog generatora s istaknutim polovima [11]

Pomoću pojednostavljene verzije fazorskog dijagrama sa slike 5.2., koji je izveden iz fazorskog dijagrama sinkronog generatora sa istaknutim polovima te je detaljnije opisan u potpoglavlju 3.2. Na ovom fazorskom dijagramu nalaze se samo fazori struje i napona u generatoru. Kut  $\phi$  predstavlja kut između napona i struje.  $V_{d-q}$  je pomoćna komponenta napona koja nam je potrebna kako bi mogli doći do izraza za vrijednost fazora napona  $E_0$ . Pomoćna komponenta napona  $V_{d-q}$ , računa se pomoću sljedećeg izraza:

$$V_{d-q} = U_{faz} \frac{X_d - X_q}{X_d} \quad (5-4)$$

Kut  $\delta$  je kut između  $E_0$  i  $V_{d-q}$ , te poznavajući specifične veličine za generator kao što je poprečna reaktancija  $X_q$ , te uzdužna reaktancija  $X_d$ , možemo postaviti sljedeći izraz za struju kroz generator:

$$I \cos\varphi = \frac{(E_0 + V_{d-q} \cos\delta) \sin\delta}{X_d} \quad (5-5)$$

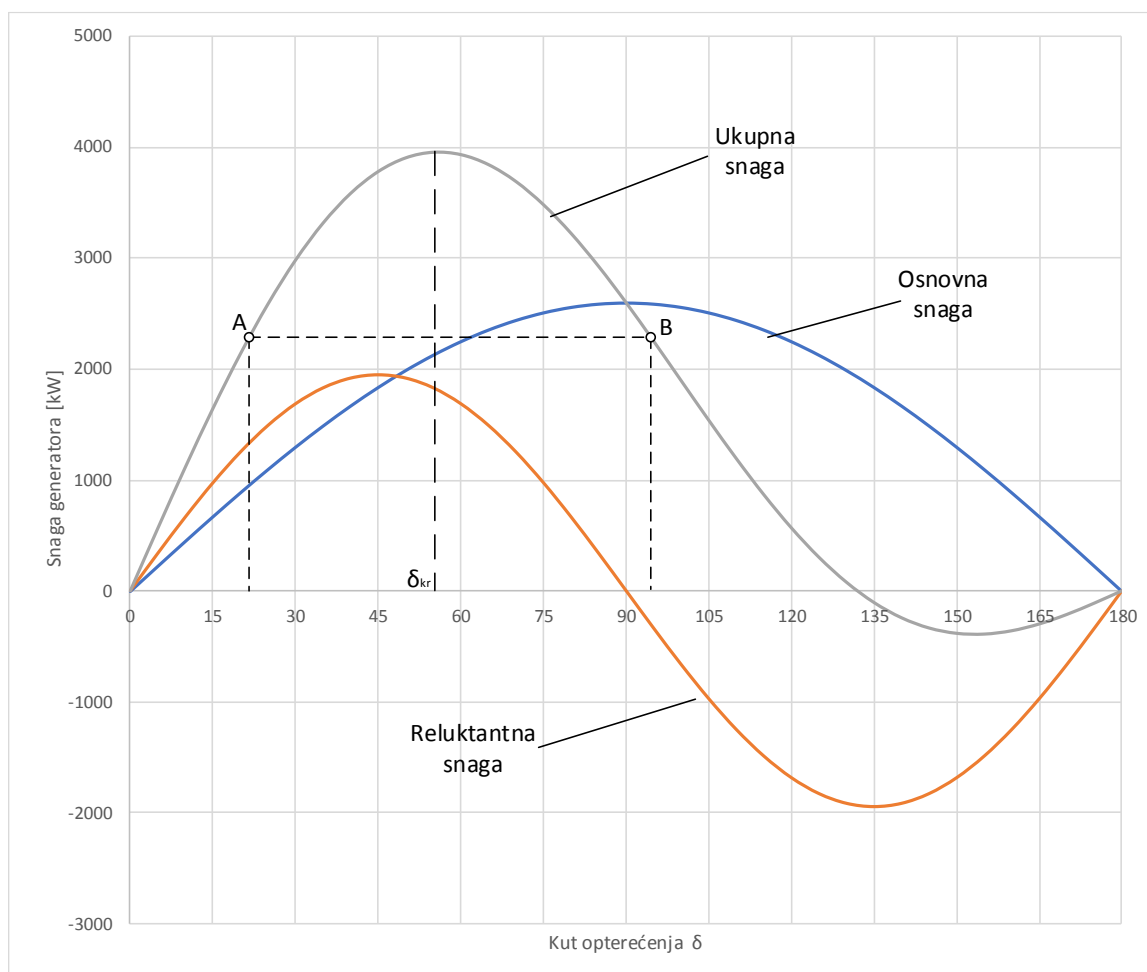
Snaga koja se razvija na sinkronom generatoru ili motoru je usko vezano uz razvijanje momenta na rotoru, te se analogno izrazima za moment može doći do izraza za električnu snagu sinkronog stroja:

$$P = \sqrt{3}IU \cos\varphi = 3IU_{faz} \cos\varphi \quad (5-6)$$

Ako se izrazi (5-4) i (5-5) uvrste u snagu trofaznog sinkronog stroja dobije se (5-7):

$$P = 3 \left[ \frac{E_0 U_{faz}}{X_d} \sin\delta + \frac{U_{faz}^2}{2} \frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \sin(2\delta) \right] \quad (5-7)$$

Na grafu sa slike 5.3. prikazana je karakteristika snaga sinkronog generatora s istaknutim polovima. Ukupna snaga  $P$  dobije se zbrajanjem krivulje snage  $P_u$ , koja je nastala zbog protjecanja statorskih i rotorskih struja, i krivulje snage  $P_e$  koja je posljedica osnovnog momenta sinkronog stroja. Karakteristika snage sinkronog generatora s istaknutim polovima ima nepravilniju karakteristiku u odnosu na generator s cilindričnim rotorom što je posljedica konstrukcijskih razlika između sinkronih generatora.



Slika 5.3 Karakteristika snage sinkronog generatora s istaknutim polovima [11]

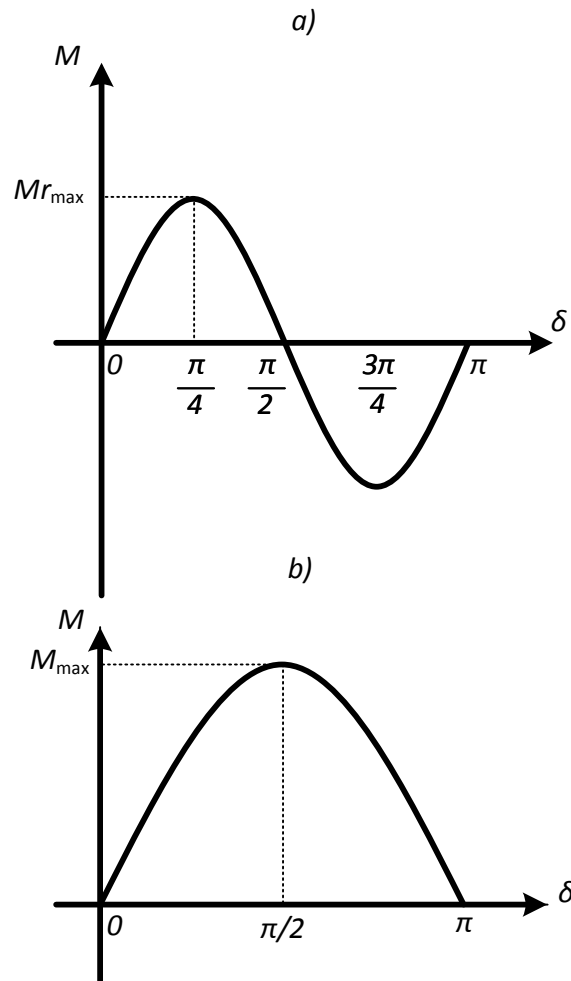
Elektromagnetski moment sinkronog stroja se izvodi tako da se u formulu (5-7) uvrsti izraz (5-3) koji povezuje brzinu vrtnje sinkronog stroja s momentom. Kada se spoje spomenuti izrazi dobije se konačni oblik koji predstavlja moment sinkronog stroja s istaknutim polovima (5-8):

$$M = P \frac{30}{\pi n} = \frac{28,65}{n} \left[ 3 \frac{E_0 U_{faz}}{X_d} \sin \delta + \frac{U_{faz}^2}{2} \frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \sin(2\delta) \right] \quad (5-8)$$

Elektromagnetski moment sinkronog stroja sastoji se od dvije komponente:

- 1) Reluktantnog momenta koji je nastao djelovanjem statorskog protjecanja na istaknute rotorske polove
- 2) Osnovnog momenta koji je nastao međudjelovanjem rotorskog i statorskog protjecanja



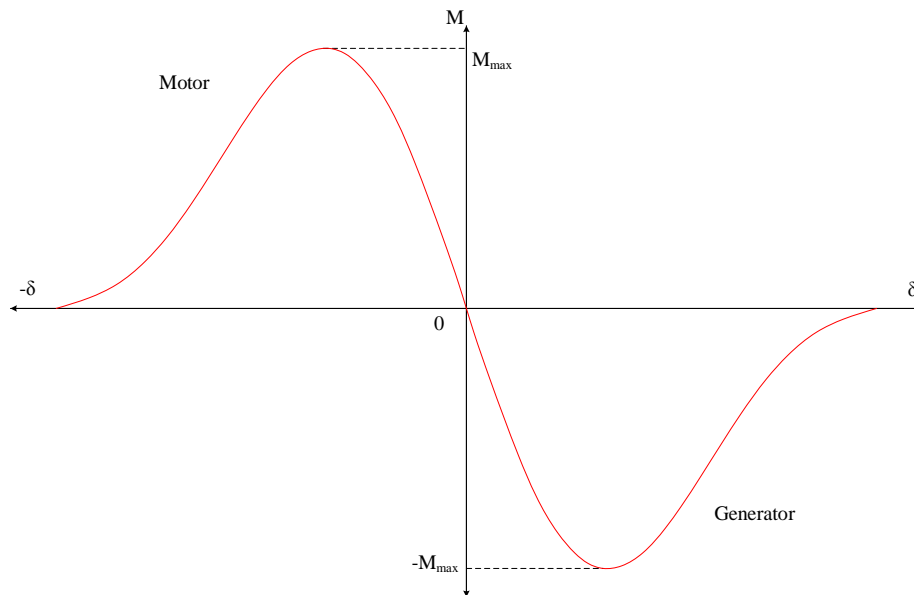


Slika 5.4. Karakteristike momenta sinkronog generatora: a) reluktantni moment, b) osnovni moment

Zbrajanjem osnovnog i reluktantnog momenta dobije se ukupni moment sinkronog generatora ili motora. Može se primijetiti kako su valni oblici momenta pravilni sinusoidalni valovi s različitim amplitudama i frekvencijama. Reluktantni moment pri tome ima manju amplitudu i dvostruko veću frekvenciju u promatranom periodu.

Karakteristika snage sinkronog stroja prikazuje ovisnost snage sinkronog stroja u ovisnosti o kutu opterećenja  $\delta$ . Ukupna razvijena snaga se dobije zbrajanjem karakteristika snage razvijene iz reluktantnog momenta i snage razvijene iz osnovnog momenta. Lijeva strana karakteristike prikazuje karakteristične vrijednosti za motorski režim rada sinkronog stroja, dok desna strana karakteristike opisuje generatorski režim rada sinkronog stroja s istaknutim polovima. Prilikom računanja karakteristika momenta i snaga sinkronog generatora, zbog preglednosti će se generatorska karakteristika iz IV. kvadranta preslikati u I. kvadrant. Tako ćemo promijeniti

predznak momenta iz negativnog u pozitivan, odnosno gledat će se kao da generator razvija moment, a ne da ga prima od pogonskog stroja, u ovom slučaju hidroturbine.



Slika 5.5 Momentna karakteristika sinkronog stroja s istaknutim polovima [1]

## 5.1 Generator HE Vinodol

Glavna hidroelektrana Vinodol smještena je na području Primorsko-goranske županije u mjestu Tribalj. HE Vinodol je puštena u pogon 1952. godine te koristi vodnu snagu sa slivnih područja Lokvarke i Ličanke zajedno s još nekoliko manjih potoka. Iako se ove rijeke ne mogu svrstati u velika slivna područja, velika energetska vrijednost ovoga sustava dolazi iz iskoristivog bruto pada od čak 658 m, budući da se područja HE Vinodol nalazi na 700 metara nadmorske visine. Bruto pad od 658 metara svrstava HE Vinodol među jedan od najviših ostvarenih padova u hidroelektranama u cijeloj Europi.

HE Vinodol je akumulacijska hidroelektrana ukupne instalirane snage od 94,5 MW, 3 agregata po dvije turbine. U HE Vinodol su ugrađene visokotlačne Peltonove turbine uz instalirani protok  $Q_i$  16,7 m<sup>3</sup>/s. Godišnja proizvodnja električne energije u HE Vinodol se kreće između 100 GWh i 200 GWh, proizvodnja energije po godinama je prikazana u tablici 5.1 [12].

Tablica 5.1 Godišnja proizvodnja električne energije u HE Vinodol [12]

Godišnja proizvodnja	2010.	2011.	2012.	2013.	2014.	2015.
HE Vinodol	190,4 GWh	97,89 GWh	123,00 GWh	194,00 GWh	224,5 GWh	91,00 GWh

U tablicama 5.2, 5.3, 5.4. i 5.5 navedene su detaljne tehničke specifikacije HE Vinodol iz [13], iz kojih će se iščitati podatci potrebni za kreiranje karakteristika snaga i momenata za različite scenarije koji će se promatrati u računskom dijelu.

Tablica 5.2 Tehničke specifikacije turbine HE Vinodol [13]

$P_T=32$ MW	Maksimalna snaga turbine
$P_{\min}=0$ MW	Minimalna snaga turbine
$\eta_G=0,9809$	Korisnost generatora
$P_{\max}= P_T \cdot \eta_G =31,5$ MW	Maksimalna djelatna snaga generatora
$S_n=35$ MVA	Nazivna prividna snaga
$\cos\varphi=0,9$	Faktor snage
$P_n=31,5$ MW	Nazivna djelatna snaga

Tablica 5.3 Tehničke specifikacije armaturnog kruga generatora HE Vinodol [13]

Naponi i struje armature	
$U_n=U_2=10,5$ kV	Nazivni napon generatora (linijski)
$n_s=0,95$	Koeficijent sniženja napona
$U_1=0,95 \cdot U_2=9,975$ kV	Minimalni nazivni napon
$N_p=1,05$	Koeficijent povišenja napona
$I_{an}=1\ 925$ A	Struja armature za nazivno opterećenje uz nazivni napon
$I_1 =S_n/ U_1$	Struja armature za nazivno opterećenje uz sniženi napon
$I_2 =S_n/ U_2$	Struja armature za nazivno opterećenje uz nazivni napon
$I_3 =S_n/ U_3$	Struja armature za nazivno opterećenje uz povišeni napon
$I_{\max}=I_1$	$I_{\max}=\max\{I_1, I_2, I_3\} = I_1$
$\delta_n=26,3^\circ$	Nazivni kut opterećenja

Tablica 5.4 Tehničke specifikacije uzbuđnog kruga generatora HE Vinodol [13]

Naponi i struje uzbuđe	
$U_f=95,8 \text{ V}$	Napon uzbuđe pri nominalnom opterećenju
$I_f=684,4 \text{ A}$	Struja uzbuđe za nominalni teret
$I_{f0}=400 \text{ A}$	Struja uzbuđe praznog hoda
$I_{fg}=334 \text{ A}$	Struja uzbuđe praznog hoda za nezasićeno stanje
$I_{fk}=420 \text{ A}$	Struja uzbuđe kratkog spoja
$I_{fmin}= 70 \text{ A}$	Minimalna uzbuđa, cca 10%

Tablica 5.5 Tehničke specifikacije reaktancija generatora HE Vinodol [13]

Reaktancije	
$X_{dmj}=1,26$	Sinkrona reaktancija u uzdužnoj osi (nezasićena)
$X_{qkap}=0,72$	Sinkrona reaktancija u poprečnoj osi (pretežno kap. opterećenja)
$X_{dzas}=1,05$	Sinkrona reaktancija u uzdužnoj osi (zasićena)
$X_{qind}=0,59$	Sinkrona reaktancija u poprečnoj osi
$X_{\sigma}=0,0955$	Rasipna reaktancija armature
$X_{da}=1,182$	Uzdužna reaktancija reakcije armature
$X_{qa}=0,694$	Poprečna reaktancija reakcije armature
$X_d=1,277$	Sinkrona reaktancija u uzdužnoj osi
$X_q=0,789$	Sinkrona reaktancija u poprečnoj osi
$k_c= I_{f0} / I_{fk}=0,95$	Kratkospojni omjer

## 5.2 Mala hidroelektrana Pleternica

Mala hidroelektrana Pleternica [14] pozicionirana je na rijeci Orljavi (pritok rijeke Save), na sjevernom dijelu Pleternice. Na poziciji gdje se nalazi mala hidroelektrana nalazi se betonska brana dugačka 88,5 m i na njoj se nalazi pad od 4 m. Izgradnja hidroelektrane Pleternica bila je dio nacionalnog energetskog projekta izgradnje malih hidroelektrana s ciljem povećanja iskorištavanja potencijala obnovljivih izvora energije. Vrijednost investicije za izgradnju navedene hidroelektrane bila je 4,7 milijuna kuna, gdje je 4 milijuna uloženo iz Fonda za energetske učinkovitost i Ministarstva regionalnog razvoja RH, a 700 000 kuna uložio je grad Pleternica. Planirana proizvodnja male hidroelektrane Pleternice je 1,27 MWh što bi pokrivalo troškove javne rasvjete grada i okolnih 38 naselja. Malom hidroelektranom Pleternicom planirana je ušteda od 850 000 kn/god. Hidroelektrana izvedena je kao pribransko postrojenje s ugrađenom Kaplanovom turbinom s generatorom. Postrojenje se sastoji od usisnog kanala, strojarnice u dvije etaže i odlaznog kanala. U hidroelektrani Pleternica nalazi se sinkroni generator s permanentnim magnetima snage 220 kW. Neto pad hidroelektrane je znatno manji od HE Vinodol te iznosi svega 3,7 metara. Maksimalni protok vode kroz turbinu je 7,24 m<sup>3</sup>/s, a minimalni tok vode je 0,1m<sup>3</sup>/s.

Karakteristike Kaplanove turbine:

- Tip: Kaplan TK4-1,3
- Neto pad: 3,7 m
- Maksimalni protok: 7,24 m<sup>3</sup>/s
- Promjer: 1300 mm
- Brzina vrtnje: 250 min<sup>-1</sup>
- Broj lopatica radnog kola: 4
- Broj lopatica privodnog kola: 18

Karakteristike generatora:

- 3 f generator sa bezkontaktnom (rotirajućom uzбудom) – generator bez četkica
- Oblik: vertikalni
- Nazivna snaga: 220 kVA
- Nazivni napon: 400 V
- Nazivna struja: 332 A
- Broj polova: 24

- Frekvencija: 50 Hz
- $\cos\phi$ : 0,9
- Stupanj djelovanja: 0,883 – 0,912
- Hlađenje: zrakom
- Masa: 6500 kg

Uz opisanu turbinu i generator, hidroelektrana ima i grubu rešetku (zaustavljanje većih komada koji plivaju rijekom), tablasti zatvarač, finu rešetku i odvodnu cijev. Elektro i mjerna oprema nalazi se u prostoriji s generatorom. Kontrola i upravljanje izvode se pomoću KONreg SHP 100 kontrolorom, tipskim uređajima za regulaciju, mjerenje, zaštitu i signalizaciju te energetsom opremom prilagođenom snazi generatora.

Tablica 5.6. Osnovni tehnički podaci generatora mHe Pleternica [15]

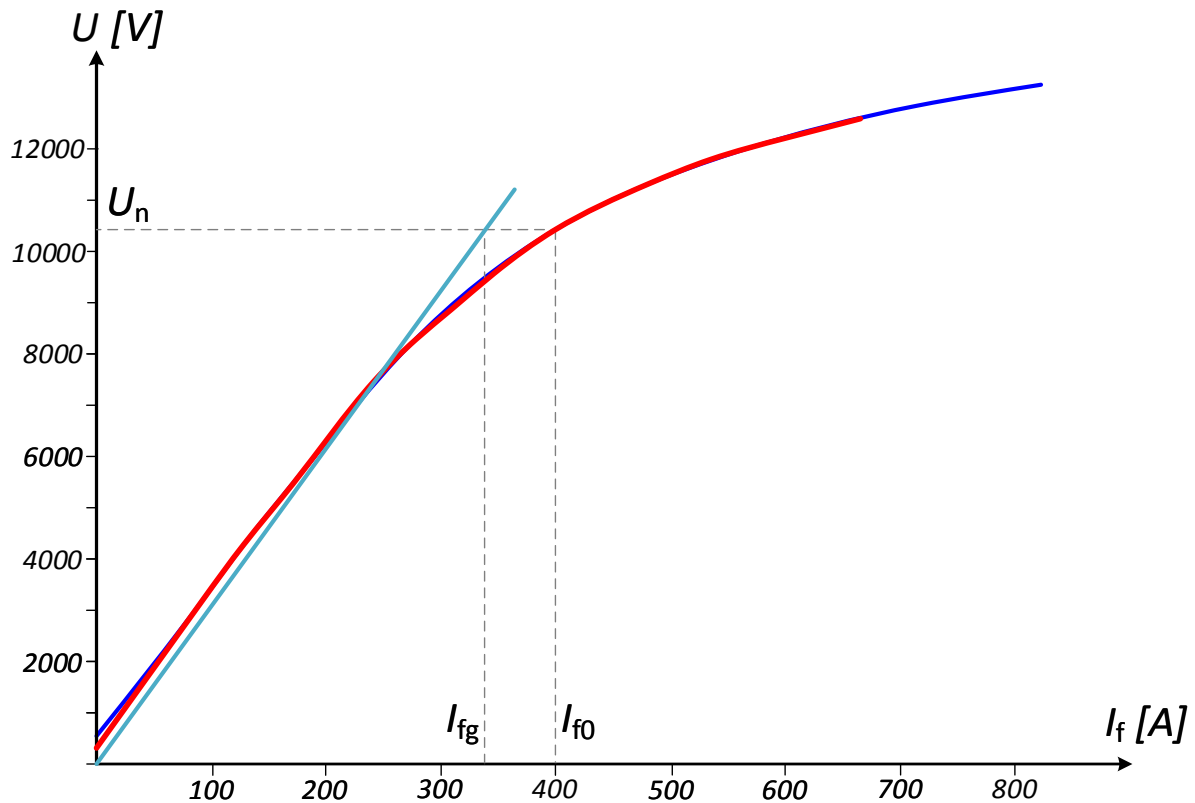
Osnovni tehnički podaci	
Prividna snaga	$S=230 \text{ kVA}$
Broj polova	24
Broj faza	3
Frekvencija	50 Hz
Faktor snage	0,90
Okretaja u minuti	250
Masa	6500
Pogonski stroj	Vodna turbina
Moment inercije	$215 \text{ kgm}^3$
Nazivni napon	$U_n=400 \text{ V}$
Nazivna struja	$I_n=332 \text{ A}$
Nazivna reaktancija	$X_n=0,696 \Omega$
Ustaljena vrijednost struje kratkog spoja	$I_{kt}=130,5 \text{ A}$
Subtranzijentna reaktancija u direktnoj osi	$X_d''=0,1558 \Omega$
Tranzijentna reaktancija u direktnoj osi	$X_d'=0,1868 \Omega$
Udarna struja kratkog spoja pri nazivnom naponu	$I_{\max, pk}=3773,1 \text{ A}$

### 5.3 Karakteristika praznog hoda sinkronog generatora s istaknutim polovima

Mjerenje i snimanje karakteristike praznog hoda sinkronog generatora predstavlja tehnološki zahtjevan proces, bez obzira što se radi o relativno jednostavnim postupcima mjerenja. Prilikom pokusa praznog hoda, u pravilu nisu dovoljni rezultati mjerenja samo pri nazivnoj brzini, jer se

zbog pojave previsokih napona ili prenisko podešene prenaponske zaštite, uzbudna struja ne smije ili se ne može povećavati iznad maksimalno dopuštene granice koju određuje dopušteni napon na stezaljkama sinkronog generatora.

Kako bi se prilikom mjerenja obuhvatio i zasićeni dio karakteristike, potrebno je postići  $1,25 U_n$  pri nazivnoj brzini, te se zatim brzina vrtnje postupno smanjuje do 90% nazivne brzine vrtnje.



Slika 5.6 Karakteristika praznog hoda sinkronog generatora iz HE Vinodol [13]

Na slici 5.6 je prikazana karakteristika praznog hoda sinkronog generatora, crvenom bojom označena je karakteristika praznog hoda pri nazivnoj brzini vrtnje. Plavom linijom označena je karakteristika praznog hoda pri sniženoj brzini vrtnje i preračunata na nazivnu brzinu vrtnje. Iz karakteristike praznog hoda mogu se očitati vrijednosti uzбудnih struja  $I_{f0}$  i  $I_{fg}$ .

- $I_{f0}=400$  A
- $I_{fg}=334$  A

Iz dobivene krivulje može se primijetiti kako se nazivna radna točka hidrogenatora iz HE Vinodol nalazi u zasićenom području, svijetloplavom krivuljom prikazana je linearna ovisnost napona i struje uzbude, odnosno linearizirana karakteristika praznog hoda koja bi bila moguća kada ne bi dolazilo do magnetskog zasićenja unutar sinkronog generatora.

Iz karakteristike mjerenja praznog hoda sinkronog generatora može se primijetiti da napon pri najmanjoj vrijednosti uzbudne struje ne pada na 0 V nego ostaje na relativno niskoj vrijednosti napona. Kao što je prethodno spomenuto, to je posljedica magnetske remanencije, te se taj napon zbog toga zove napon remanencije ili remanentni napon. Remanentni napon je izravna posljedica histereze magnetskog materijala od kojih su napravljeni magnetski limovi koji čine rotor. Iznos remanentnog napona za ovaj generator je između 300 V i 500 V, ovisno gleda li se karakteristika s nazivnom brzinom vrtnje ili karakteristika s nižom brzinom vrtnje koja je preračunata na nazivnu brzinu.

#### 5.4 Proračun karakteristika momenta i snaga sinkronih generatora

Uzdužna sinkrona reaktancija  $X_d$  prema standardu IEC 60034-4 [15] je ona vrijednost reaktancije koja se dobije kao kvocijent trajne izmjenične vrijednosti osnovne komponente armaturnog napona uzrokovanog ukupnim magnetskim tokom uzdužne osi kojeg je prouzročila uzdužna komponenta armaturne struje, te vrijednosti osnovnog harmonika izmjenične komponente struje, uz uvjet da se stroj vrti nazivnom brzinom vrtnje. Navedene vrijednosti se mogu dobiti iz pokusa kratkog spoja i praznog hoda generatora.

$$x_{d\%} = \frac{I_{fk}}{I_{fg}} = \frac{420}{334} = 1,26 \text{ (p. u.)} \quad (5-9)$$

Struja  $I_{fk}$  se očitava iz mjerene karakteristike praznog hoda prema [13], te je vrijednost uzbudne struje u praznom hodu jednaka 334 A. Kako bi iz per unit vrijednosti uzdužne reaktancije došli do stvarne vrijednosti reaktancije izražene u omima [ $\Omega$ ], koristi se izraz (5-17).  $U_B$  predstavlja baznu vrijednost napona na koju će se računati vrijednost reaktancije, te se za tu vrijednost napona uzima nazivni napon generatora.  $S_{n,G}$  predstavlja nazivnu prividnu snagu generatora u voltamperima [VA].

$$X_{G,d} = \frac{X_{d\%}}{100} \cdot \frac{U_B^2}{S_{n,G}} \quad (5-10)$$

Poprečna sinkrona reaktancija  $X_q$  se određuje iz pokusa reverziranja uzbude (negativne uzbude) i asinkronog rada s malim klizanjem (low slip). Također, moguća metoda mjerenja poprečne



sinkrone reaktancije je određivanje reaktancije opterećenog stroja pri radu na mreži uz mjerenje kuta opterećenja.

$$X_q = \frac{U \cdot \sin\delta}{I \cdot \sin(90^\circ - \varphi - \delta)} \quad (5-11)$$

Kako bi se mogla računski odrediti karakteristika snage i momenta sinkronog stroja, potrebno je izračunati sljedeće vrijednosti struja i napona čije su relacije izvedene s fazorskog dijagrama sa slike 5.1.

Prvi korak je određivanje vrijednosti struje iz izraza za snagu trofaznog sinkronog stroja :

$$P = \sqrt{3}IU \cos\varphi = 3IU_{faz} \cos\varphi \quad (5-12)$$

$$I = \frac{P}{3U_{faz} \cos\varphi} \quad (5-13)$$

Iz izraza za struju sa fazorskog dijagrama (5-21) može se izlučiti vrijednost inducirano napona  $E_0$  dobije se izraz (5-22):

$$I \cos\varphi = \frac{(E_0 + V_{d-q} \cos\delta) \sin\delta}{X_d} \quad (5-14)$$

$$E_0 = \frac{I \cos\varphi X_d}{\sin\delta} - V_{d-q} \cos\delta \quad (5-15)$$

Gdje je pomoćna vrijednost napona  $V_{d-q}$  određena sa fazorskog dijagrama :

$$V_{d-q} = U_{faz} \frac{X_d - X_q}{X_d} \quad (5-16)$$

#### 5.4.1 Proračun karakteristika za HE Vinodol

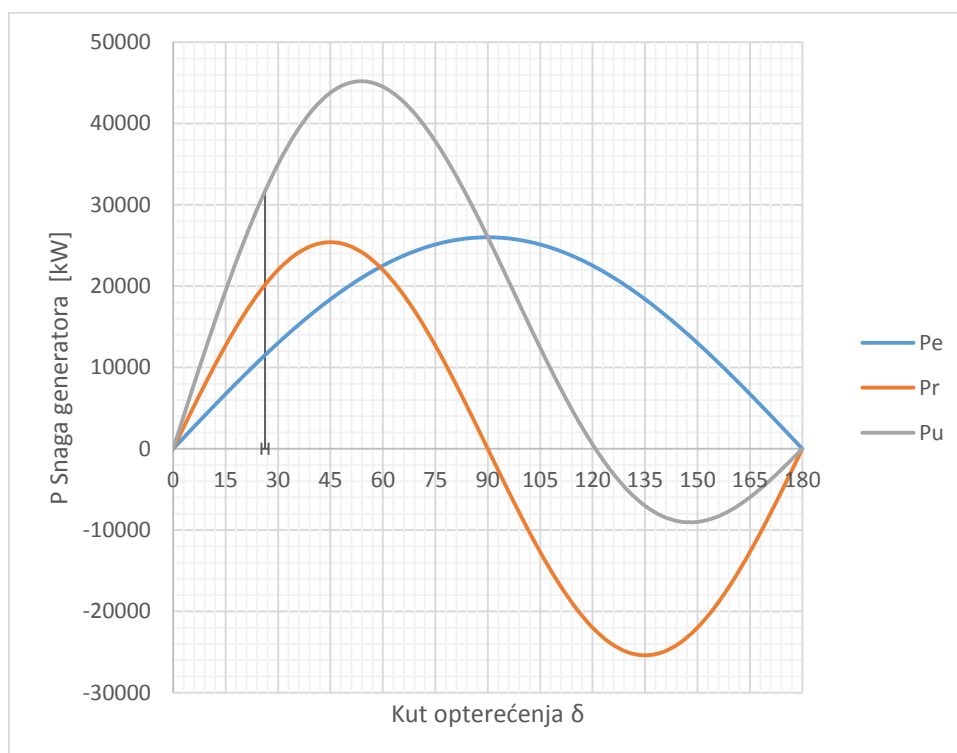
Vrijednosti koje su nam potrebne za računanje navedenih izraza uzete su iz tablica s tehničkim specifikacijama generatora HE Vinodol prema [13].

- $U_l=10,5$  kV, linijski napon generatora
- $U_{faz}=6061,18$  V, fazni napon generatora
- $P=31,5$  MW, nazivna snaga generatora
- $n=375$  okr/min
- $\delta = 26,3^\circ$  – nazivni kut opterećenja

- $x_d=1,277$  p.u., uzdužna sinkrona reaktancija
- $X_d=1,34 \Omega$ , preračunato na  $U_B=6062,18$  V (vrijednost faznog napona generatora)
- $x_q=0,789$  p.u., poprečna sinkrona reaktancija
- $X_q=0,828 \Omega$ , preračunato na  $U_B=6062,18$  V (vrijednost faznog napona generatora)
- $\cos\varphi=0,9$ , faktor snage
- $\varphi=25,84^\circ$ , kut između struje i napona generatora

Osnova za izradu momentne karakteristike je gore spomenuti izraz (5-7), u koji će se uvrštavati navedene vrijednosti. Prvi promatrani generator biti će sinkroni generator iz HE Vinodol.

$$P = 3 \left[ \frac{E_0 U_{faz}}{X_d} \sin\delta + \frac{U_{faz}^2}{2} \frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \sin(2\delta) \right] \quad (5-7)$$



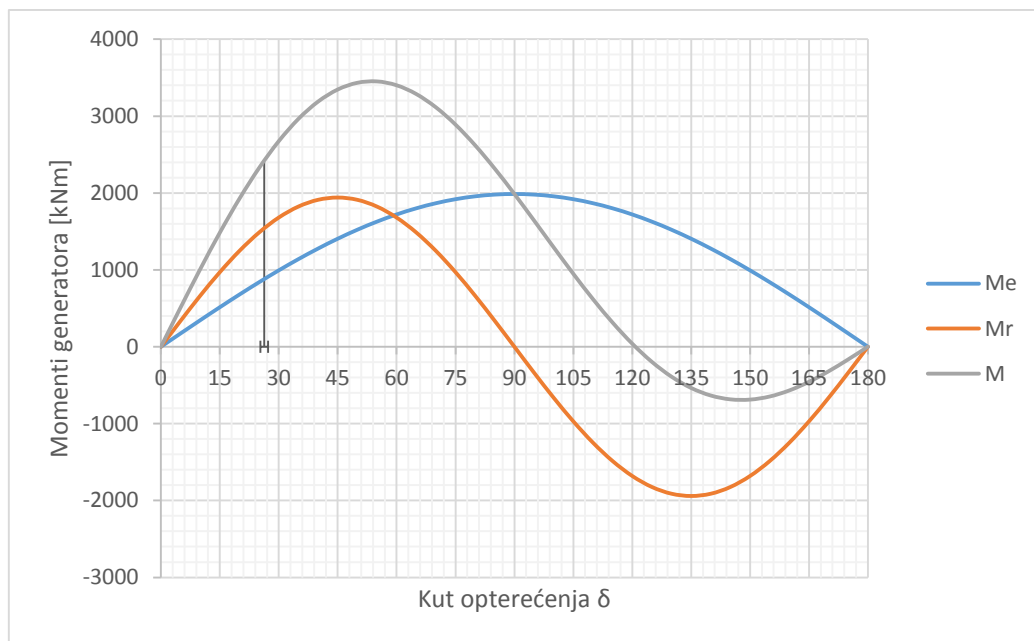
Slika 5.7 Terećenje sinkronog generatora HE Vinodol – karakteristika snaga

Proračun karakteristika radi se pomoću Microsoft Excela. Sve potrebne veličine i izračunate vrijednosti iskoristit će se za crtanje grafova koji predstavljaju karakteristiku snage i momenta sinkronog generatora.

Jedina varijabla pri tome će biti kut opterećenja  $\delta$ , sve ostale vrijednosti napona i struja će se smatrati nepromjenjivima. Ukupna snaga sinkronog generatora dobije se zbrajanjem valnih oblika,

odnosno karakteristika snage nastale zbog djelovanja reluktantnog i osnovnog momenta sinkronog generatora. Nazivna radna snaga nastupa pri nazivnom kutu opterećenja od  $\delta=26,3^\circ$ . Povećavanjem kuta opterećenja moguće je povećati radnu snagu generatora, međutim kut opterećenja se ne može povećavati unedogled već je ograničen konstrukcijskim parametrima. Kritični kut opterećenja je najveća dopuštena vrijednost kuta opterećenja prije nego generator pređe iz stabilnog u nestabilan režim rada, međutim u praksi se strogo izbjegava rad generatora s kutom opterećenja znatno većim od nazivnog kuta opterećenja. Kritični kut opterećenja turbogeneratora je  $90^\circ$ , jer je karakteristika snage turbogeneratora valnog oblika kao karakteristika snaga zbog osnovnog momenta, dok je kritični kut opterećenja sinkronog generatora s istaknutim polovima zbog nepravilnije karakteristike snage uvijek manji od  $90^\circ$ , te u prvom promatranom slučaju kod generatora iz HE Vinodol iznosi približno  $55^\circ$ .

$$M = P \frac{30}{\pi \cdot n} = \frac{28,65}{n} \left[ 3 \frac{E_0 \cdot U_{faz}}{X_d} \sin\delta + \frac{U_{faz}^2 X_d - X_q}{2 X_d \cdot X_q} \sin(2\delta) \right] \quad (5-8)$$



Slika 5.8 Terećenje sinkronog generatora HE Vinodol – karakteristika momenata

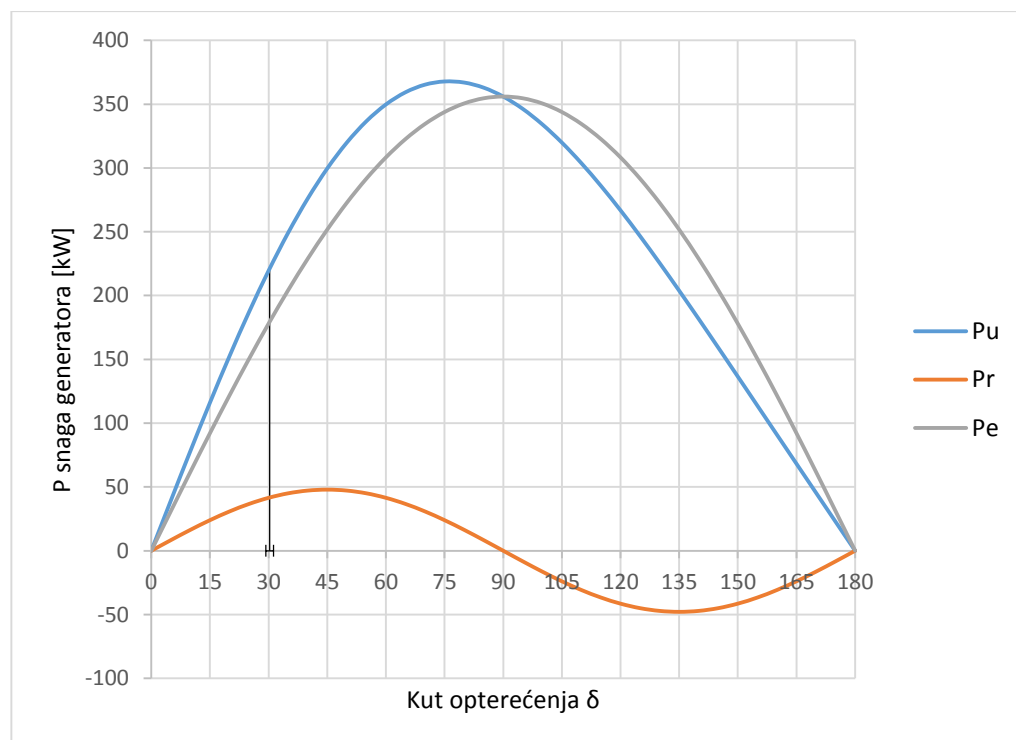
Sa slike 5.8. moguće je i grafički odrediti nazivnu radnu točku generatora HE Vinodol, iz koje se može očitati nazivni radni moment sinkronog generatora od 2400 kNm pri nazivnim vrijednostima struje i napona u generatoru.

### 5.4.2. Proračun karakteristika za mHE Pleternica

Za proračun karakteristika snaga i momenata koristiti će se vrijednosti koje su preuzete iz tablica s tehničkim specifikacijama generatora prema [15].

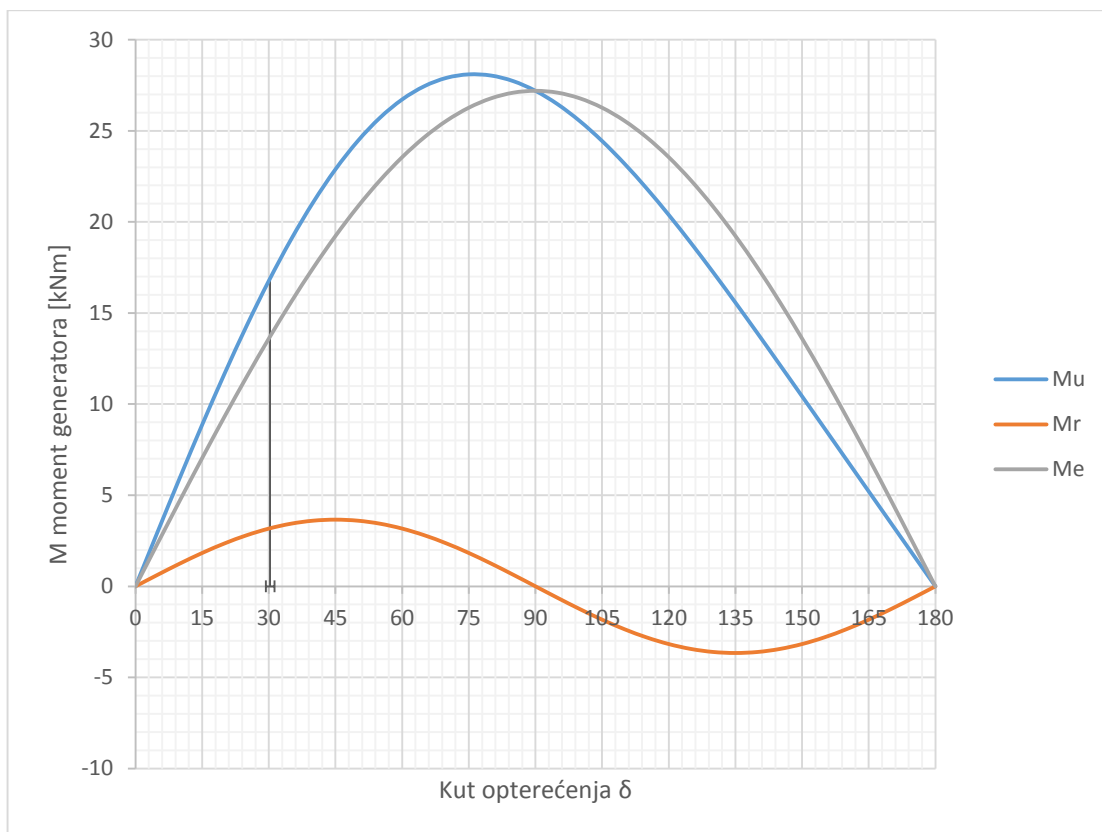
- $U_l=0,4$  kV, linijski napon generatora
- $U_{faz}=230$  V, fazni napon generatora
- $S=230$  kVa, nazivna prividna snaga generatora
- $n=250$  okr/min
- $\delta = 30,3^\circ$  – nazivni kut opterećenja
- $X_n=0,696\Omega$ , nazivna reaktancija
- $X_d=0,835 \Omega$ , preračunato na 120% nazivne reaktancije
- $X_q=0,0,557 \Omega$ , preračunato na 80% nazivne reaktancije
- $\cos\varphi=0,9$ , faktor snage
- $\varphi=25,84^\circ$ , kut između struje i napona generatora

Osnovni tehnički podaci mHe Pleternice slijede iz [15] te je po njima izrađena karakteristika terećenja generatora, pomoću gore navedenih izraza za računanje karakteristike trofazne snage i momenata u sinkronom generatoru s istaknutim polovima.



Slika 5.9 Terećenje sinkronog generatora mHE Pleternica – karakteristika snaga

Slikom 5.9. predstavljena je karakteristika terećenja sinkronog generatora iz mHE Pleternice nazivne snage 220 kW. Može se primijetiti kako se karakteristike snaga znatno razlikuju od prvog primjera, generatora iz HE Vinodol. Snaga nastala zbog reluktantnog momenta je značajno manja u odnosu na HE Vinodol, te zbog toga je manji i doprinos snaga  $P_r$  ukupnoj snazi koje se razvija na generatoru. Dominantna snaga u ovom slučaju je snaga koja nastaje iz razvijenog osnovnog momenta na sinkronom generatoru s istaknutim polovima. Pri nazivnom kutu opterećenja sinkroni generator razvija nazivnu snagu od 220 kW, te se u tom trenutku generator nalazi u nazivnoj radnoj točki. Ako bi se generator i dalje napajao s nazivnim vrijednostima za napone i struju, a povećavao bi se kut opterećenja, došlo bi do veće predane snage u mrežu. Međutim, kut opterećenja se može povećavati samo do određene granice prije nego generator pređe u nestabilan režim rada.



Slika 5.10 Terećenje sinkronog generatora mHE Pleternica – karakteristika momenata

Slika 5.10 prikazuje karakteristiku momenata na sinkronom generatoru iz mHE Pleternica. Valni oblici krivulja su gotovo jednaki karakteristikama snaga generatora mHE Pleternica.

Pri nazivnom kutu opterećenja sinkroni generator razvija nazivni moment koji iznosi približno 17 kNm. Kut opterećenja kod sinkronog generatora s istaknutim polovima je moguće povećavati do kritične vrijednosti kuta opterećenja. Sa slike 5.9. može se odrediti kritični kut opterećenja koji je

u ovom slučaju veći ako se uspoređi s prethodnim generatorom iz HE Vinodol. Vrijednost kritičnog kuta opterećenja je približno  $75^\circ$ . Povećavanjem kuta opterećenja preko nazivnog, generator se udaljava od nazivne radne točke i približava se nestabilnom režimu rada. Ukoliko se premaši kritični kut opterećenja, zbog kriterija statičke stabilnosti generator prelazi u nestabilan režim rada, te se takvi slučajevi u praksi moraju strogo izbjegavati.

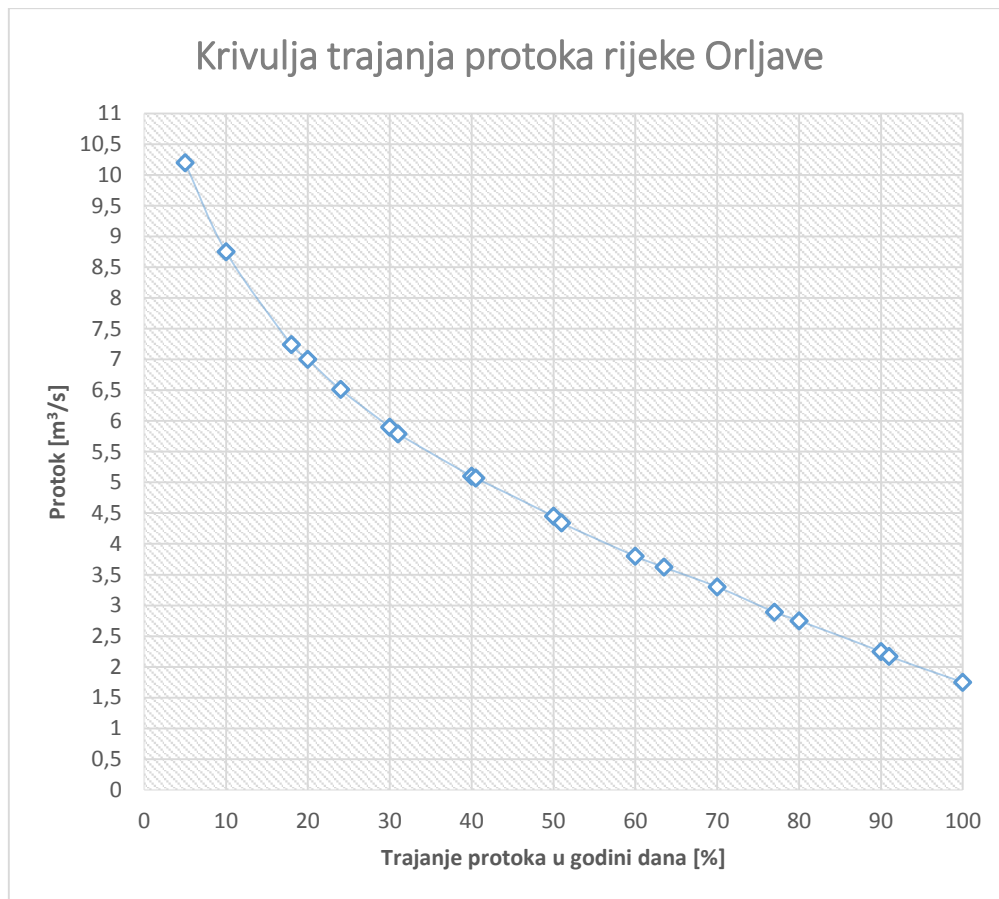
### 5.4.3 Varijacije izlazne snage

Osnovna formula pomoću koje se može prikazati snaga hidroelektrane je izraz (5-17) za instaliranu električnu snagu hidroagregata, koja prikazuje koliku električnu snagu je moguće dobiti na generatoru ovisno o protoku vode kroz vodnu turbinu, neto razlici visina vode prije i poslije hidroelektrane i ukupne korisnosti hidroelektrane koja se dobije tako da se u obzir uzmu gubitci u generatoru, turbini i svi ostali mehanički gubitci zbog trenja u sustavu.

$$P_i = 9,81 \cdot Q_i \cdot H_n \cdot \eta \quad (5-17)$$

- $Q_i$  – instalirani protok u  $\text{m}^3/\text{s}$
- $H_n$  – neto pad [m]
- $\eta$  – ukupna korisnost hidroagregata

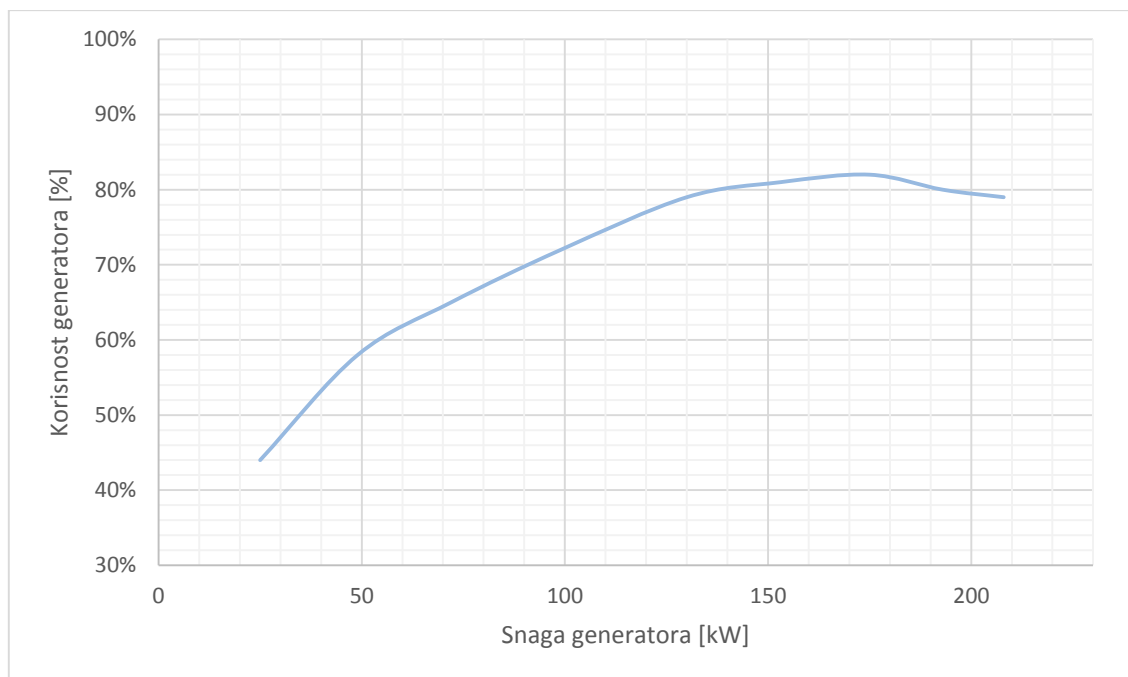
Krivulja trajanja protoka prikazana je slikom 5.11. Iz krivulje trajanja protoka moguće je očitati koliki se očekivani protok rijeke Orljave može očekivati na godišnjoj razini. Primjerice, protok od  $7 \text{ m}^3/\text{s}$  može se očekivati 20% vremena u godini dana, odnosno preračunato u sate, ako u jednoj godini ima 8760 sati, 20% od toga je 1752 sata godišnje. Krivulja trajanja protoka se izrađuje prema višegodišnjim mjerenjima protoka rijeka te se iz nje može vrlo precizno odrediti ukupna očekivana proizvodnja električne energije.



*Slika 5.11. Krivulja trajanja protoka za rijeku Orljavu [17]*

Površina ispod krivulje trajanja protoka predstavlja moguću proizvodnju električne energije na godišnjoj razini. Također, potrebno je uzeti u obzir pri kojem protoku elektrana kreće s proizvodnjom električne energije, te oduzeti taj dio površine od ukupne površine ispod krivulje. Protok vode koji je veći od instaliranog protoka za određenu elektranu ostati će neiskorišten. Višak vode će se odvesti zaobilaznim kanalima, te će se kroz turbinu pustiti samo nazivni, odnosno instalirani protok.

Korisnost hidroelektrane nije konstantna vrijednost nego ovisi o protoku kroz vodnu turbinu. Slika 5.12. prikazuje ovisnost ukupne korisnosti hidroelektrane te se iz prikazane slike može primijetiti kako korisnost hidroelektrane raste s povećanjem protoka sve do određene vrijednosti, odnosno nazivne točke vodne turbine. Nakon toga krivulja ulazi u zasićenje i počinje se polagano smanjivati.



*Slika 5.12 Ovisnost ukupnog stupnja iskorištenja hidroelektrane mHE Pleternice o izlaznoj snazi*

Iz poznatih vrijednosti sa slike 5.11., odnosno iz krivulje trajanja protoka i slike 5.12 koja predstavlja krivulju ovisnosti ukupnog stupnja faktora iskoristivosti hidroelektrane, mogu se izračunati vrijednosti u tablici 5.7. U tablici 5.7. izračunata je izlazna snaga hidroelektrane Pleternica za vrijednosti protoka od 20% do 100% nazivnog protoka, uzimajući u obzir promjenu stupnja djelovanja turbine i generatora s pripadajućim protokom. Grafički prikaz predstavljen je slikom 5.13.

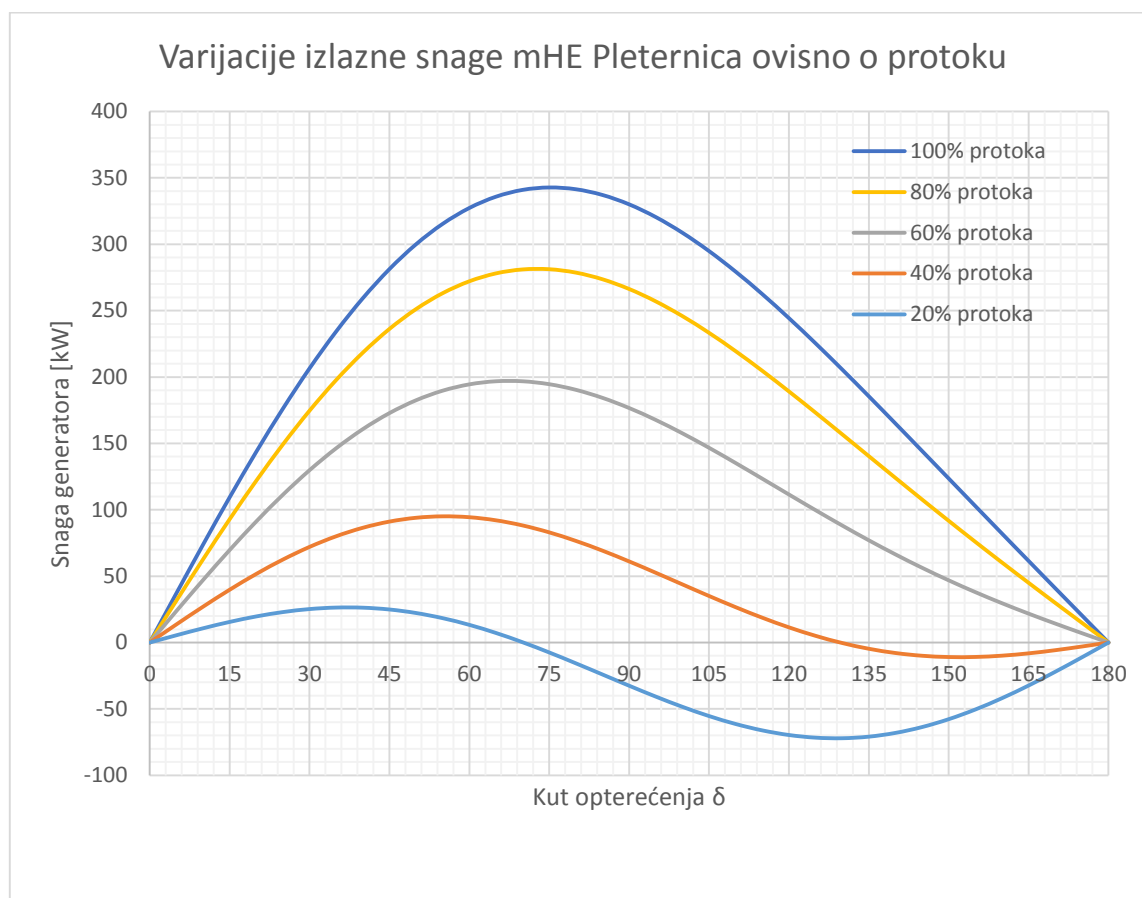
*Tablica 5.7. Ovisnost izlazne snage o protoku i stupnju djelovanja za mHE Pleternica*

Relativni protok [%]	Ukupni stupanj djelovanja	Električna snaga [kW]
20%	44%	25
30%	58%	49
40%	65%	72
50%	72%	99
60%	79%	130
70%	81%	153
80%	82%	175
90%	80%	193
100%	79%	208



Slika 5.13. predstavlja ovisnost izlazne snage o promjeni protoka i stupnju djelovanja. Najviša krivulja predstavlja karakteristiku izlazne snage pri nazivnom protoku i stupnju djelovanja od 79%. Prikazano su još četiri krivulje, smanjujući protok 20% na svakoj sljedećoj krivulji.

Može se primijetiti sa slike kako se izlazna snaga pri nazivnom kutu opterećenja od  $30,3^\circ$  počinje značajno smanjivati nakon što protok padne ispod 60% nazivnog protoka. Povećavanjem kuta opterećenja moguće je nadoknaditi snagu izgublenu zbog smanjenog protoka, međutim povećavanje kuta opterećenja povlači za sobom pitanje stabilnosti generatora i u praksi se takvo vođenje sustava strogo izbjegava.



Slika 5.13. Varijacije izlazne snage mHE Pleternica ovisno o protoku

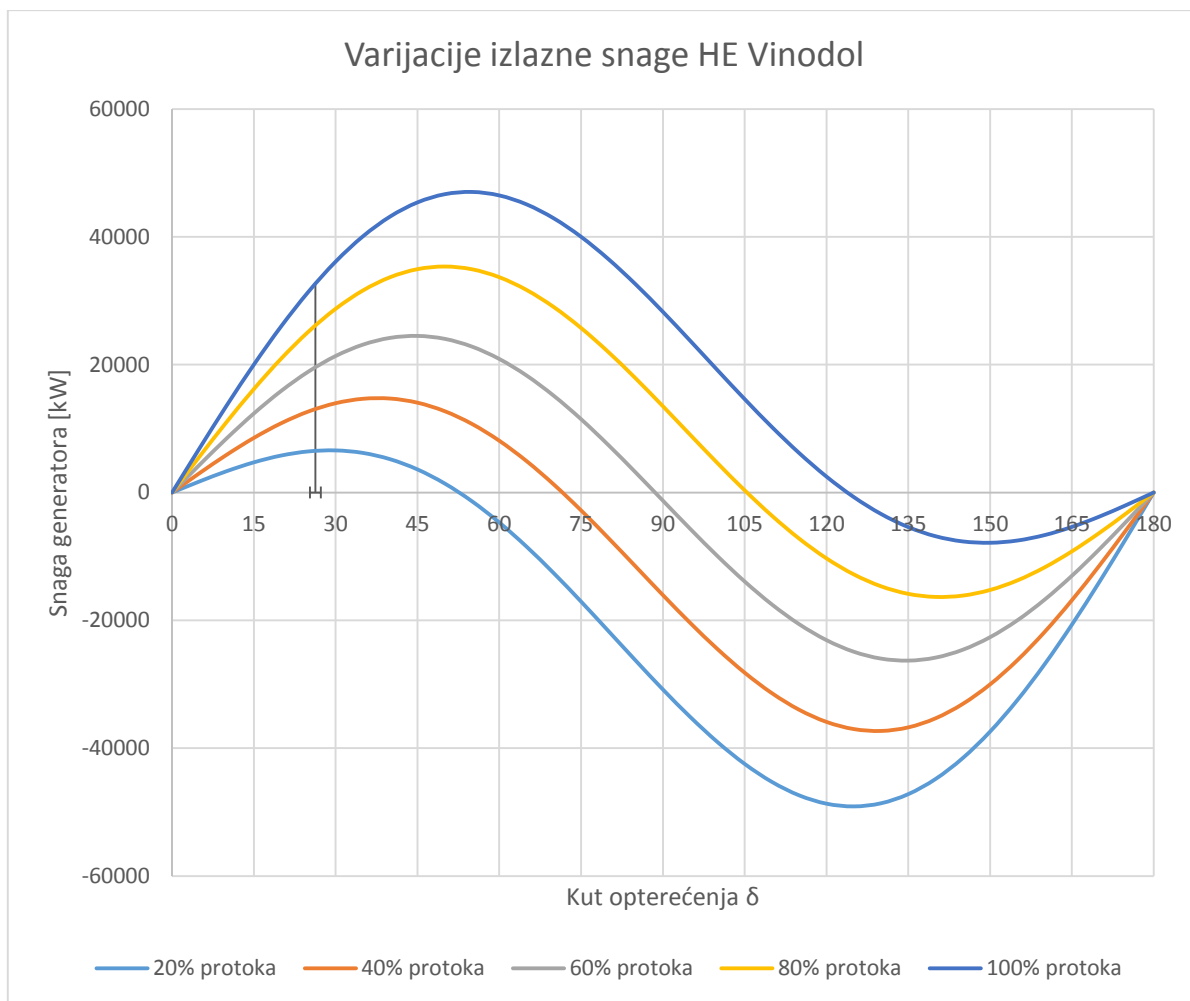
HE Vinodol spada u red akumulacijskih hidroelektrana za razliku od mHE Pleternica koja je protočna hidroelektrana. Osim znatnih razlika u snazi generatora, ovo je također velika razlika u izvedbi hidroelektrana što se očituje u razlikama promjene protoka kroz hidroelektranu. Postoje dvije izvedbe akumulacijskih hidroelektrana: derivacijske i pribranske. Kod pribranskih se hidroelektrana nalazi ispod same brane, dok je kod derivacijskih hidroelektrana smještena puno niže od brane te je cjevovodima spojena s akumulacijskim jezerom. HE Vinodol se ubraja u derivacijske brane.

Tablica 5.8. Ovisnost izlazne snage o protoku za HE Vinodol

Relativni protok [%]	Električna snaga [MW]
20%	6,3
30%	9,45
40%	12,6
50%	15,75
60%	18,90
70%	22,05
80%	25,2
90%	28,35
100%	31,5

Budući da krivulja ovisnosti protoka o ukupnom stupnju djelovanja nije poznata za generatore iz HE Vinodol, zanemariti će se gubici u vodnoj turbini, odnosno pretpostaviti će se generator radi s konstantnim stupnjem djelovanja. Povećavanjem protoka od 20% nazivnog protoka sve do 100% nazivnog protoka, snaga generatora se proporcionalno povećava, što je u skladu sa svim poznatim pretpostavkama i ranije spomenutim proračunima snaga generatora.

Sa slike 5.14 mogu se uočiti varijacije izlazne snage HE Vinodol, te se također može primijetiti kako pri manjim protocima stabilnost generatora dolazi u pitanje, jer se već pri malim kutovima opterećenja postiže kritična vrijednost kuta opterećenja. Tako se može uočiti da se pri protoku od 20% nazivnog protoka, kritični kut opterećenja nalazi na približno  $30^\circ$ . Ako se u obzir uzme da je nazivni kut opterećenja generatora HE Vinodol  $26,3^\circ$ , to pokazuje o kakvom se nepovoljnom režimu rada govori.



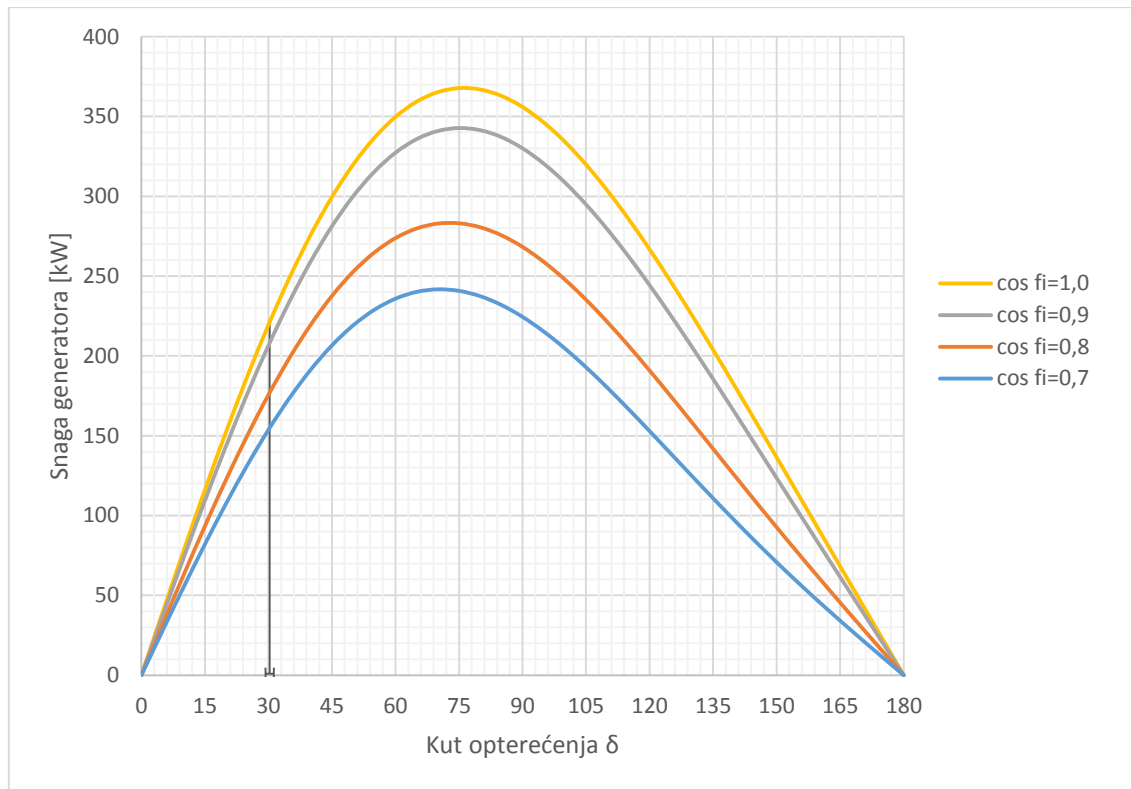
Slika 5.14. Varijacije izlazne snage ovisno o protoku za HE Vinodol

#### 5.4.4 Varijacije izlazne snage u ovisnosti o promjeni faktora snage

Jedan od faktora koji također može utjecati na izlaznu snagu hidroelektrane je faktor snage s kojim radi hidroelektrana. Faktor snage se može definirati na više načina, osnovna definicija opisuje faktor snage kao omjer radne snage i prividne snage. Faktor snage se poistovjećuje s  $\cos\varphi$ , kutom između struje i napona. Faktor snage i  $\cos\varphi$  će biti istovjetni ako se uzimaju obzir savršeno sinusoidalni valni oblici struje i napona frekvencije 50 Hz. Ukoliko se u obzir uzmu harmonici s višim frekvencijama doći će do odstupanja u očekivanim vrijednostima, te se u tom slučaju faktor snage i  $\cos\varphi$  više ne mogu smatrati jednakima. U ovom slučaju će se zanemariti viši harmonici u mreži.

Kada je vrijednost faktora snage 1, u tom slučaju će prividna snaga biti jednaka radnoj snazi, a vrijednosti reaktivne snage će biti 0. U praksi se prilikom vođenja sustava izbjegava vrijednost

faktora snage 1 zbog potrebe mreže za reaktivnom energijom. Pomoću reaktivne energije se održavaju vrijednosti napona u zadanim granicama te reaktivna energija značajno doprinosi stabilnost u mreži, pogotovo ako se u mreži nalaze veliki induktivni potrošači (veliki motori, generatori) kojima je potrebna reaktivna energija za magnetiziranje prilikom pokretanja.



Slika 5.15. Varijacije izlazne snage mHE Pleternica u ovisnosti o faktoru snage

Slika 5.15. prikazuje varijacije izlazne snage mHE Pleternica pri promjeni faktora snage. Nazivni faktor snage je 0,9. Promjena faktora snage ima za izravnu posljedicu injektiranje radne i reaktivne snage u mrežu, uz pretpostavku da generator radi s nazivnim protokom i pri nazivnoj prividnoj snazi od 220 kVA.

Tablica 5.9 Vrijednosti faktora snage, radne snage i reaktivne snage za mHE Pleternica

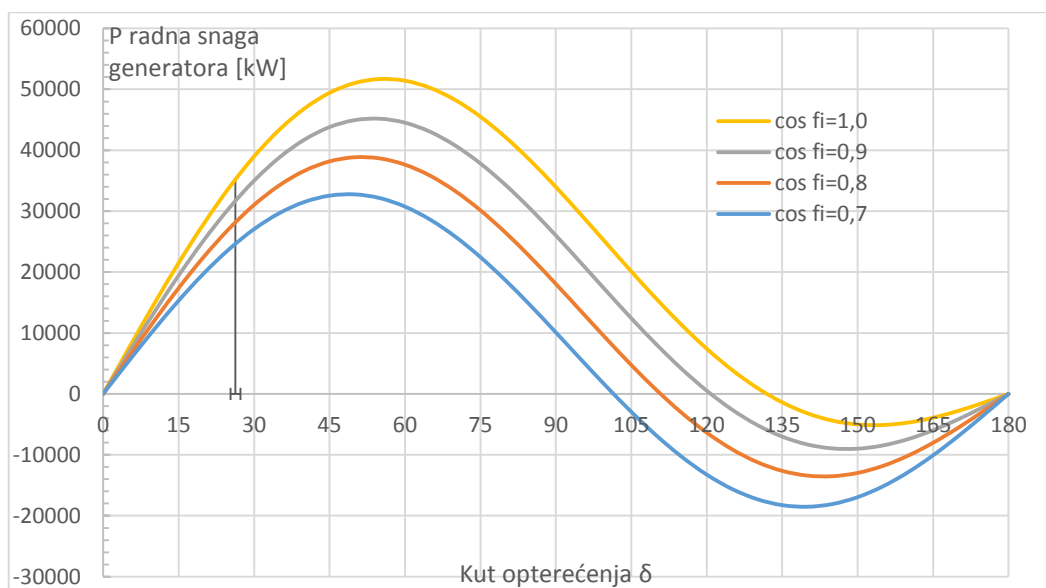
Faktor snage	Radna snaga P [kW]	Reaktivna snaga Q [kVAr]
0,7	154	157
0,8	176	132
0,9	198	96
1,0	220	0

Idući promatrani slučaj također će prikazati promjenu izlazne snage u ovisnosti o faktoru snage za HE Vinodol. Budući da je HE Vinodol akumulacijska hidroelektrana, odnosno prije hidroelektrane se nalazi akumulacijsko jezero te se tako može održavati približno konstantan protok ukoliko se u jezeru nalazi dovoljno količina vode. Time se postiže konstantnost u proizvodnji električne energije, te se takvi izvori energije ubrajaju u bazne izvore energije, tj. One izvore energije koji će biti u pogonu što je više vremena moguće kako bi pokrili osnovne zahtjeve potrošača za električnom energijom zajedno s ostalim baznim elektranama kao što su to termoelektrane (plin, ugljen) te nuklearne elektrane.

Tablica 5.10 Vrijednosti faktora snage, radne snage i reaktivne snage za HE Vinodol

Faktor snage	Radna snaga P [MW]	Reaktivna snaga Q [MVar]
0,7	24,5	25
0,8	28	21
0,9	31,5	15,25
1,0	35	0

Ako se pretpostavi da je protok kroz HE Vinodol nepromjenjiv te da će uvijek biti jednak u svim promatranim slučajevima, varijacije izlazne snage moguće je postići promjenom faktora snage. Promjenom faktora snage utječe se na predanu radnu snagu, povećavajući udio reaktivne snage sa smanjivanjem faktora snage.



Slika 5.16. Ovisnost izlazne radne snage generatora s promjenom faktora snage

Može se primijetiti kako se karakteristika linearno skalira smanjivanjem faktora snage pri koraku od 0,1. Krivulja označena žutom linijom predstavlja karakteristiku snage za faktor snage 1, odnosno hidroelektrana u mrežu predaje samo radnu snagu. Smanjivanjem faktora snage, krivulje se jednoliko smanjuju sve do posljednje krivulje označene svijetloplavom bojom gdje je faktor snage iznosio 0,7.

Pri faktoru snage 0,7 predana izlazna radna snaga pri nazivnom kutu opterećenja iznosi 24,5 MW, međutim predana reaktivna snaga pri istim uvjetima iznosi čak 25 MVA<sub>r</sub>, što je prikazano tablicom 5.9. Tako velika količina reaktivne energije neće biti potrebna sustavu osim u iznimnim slučajevima, te se tako veliki sustavi ne moraju voziti s toliko niskim faktorom snage.

## ZAKLJUČAK

Cilj ovoga diplomskog rada je prikazati osnovna teorijska načela funkcioniranja sinkronih generatora s istaknutim polovima. Bilo je potrebno opisati konstrukcijske dijelove sinkronih generatora, te objasniti razliku između sinkronih generatora s istaknutim polovima i sinkronih generatora s cilindričnim rotorom. Osnovna razlika između spomenutih je konstrukcija rotora koja za sobom povlači mnoštvo faktora koji posljedično utječu na izvedbu, upravljanje i namjenu takvih sinkronih generatora.

Sinkroni generator s istaknutim polovima zove se još i hidrogenerator, te je već iz samog imena jasno gdje se najčešće primjenjuje. Gotovo sve velike hidroelektrane u svijetu koriste sinkrone generatora s istaknutim polovima kao svoje proizvodne jedinice. Zajednička osnovna značajka svih sinkronih generatora s istaknutim polovima je da su namijenjeni za male brzine vrtnje te da imaju veliki promjer rotora, kao i veliki broj polova na rotoru.

Poznavanjem fazorskih dijagrama i osnovnih relacija koje opisuju rad i upravljanje sinkronog generatora s istaknutim polovima, bilo je moguće konstruirati karakteristike ovisnosti snage i momenta generatora pri promjeni kuta opterećenja. Iz relacija sa fazorskog dijagrama izračunate su sve potrebne veličine, te se povećavanjem kuta opterećenja mogu izračunati vrijednosti snage i momenta. Ukupna karakteristika snage i momenta, dobije se zbrajanjem osnovnog i reluktantnog valnog oblika momenta generatora, odnosno snage. Ta činjenica proizlazi iz konstrukcije samog sinkronog generatora s istaknutim polovima, odnosno u tome što su uzdužna i poprečna reaktancija generatora različite. Kod sinkronog generatora s cilindričnim rotorom, valni oblik karakteristika snage i momenta ima pravilni sinusni oblik, dok je kod generatora s istaknutim polovima taj sinusni oblik deformiran. Posljedica toga je smanjeni kritični kut opterećenja generatora, odnosno nepravilnija karakteristika snage i momenta. Završni dio proračuna se odnosio na varijacije izlazne snage generatora, gdje se izlazna snaga odabranih generatora mijenjala promjenom faktora snaga, što je za posljedicu imalo povećanje reaktivne snage generatora. Promjenom protoka vode kroz vodnu turbinu se također može utjecati na izlaznu snagu, promatrajući krivulju trajanja protoka se može ustanoviti da se instalirani protok javlja manje od 20% vremena godišnje, te se u tom pogledu varijacije izlazne snage javljaju ovisno o dostupnom protoku vode kroz hidroelektrane.

## LITERATURA

- [1] I.Mandić, V. Tomljenović, M. Pužar, Sinkroni i asinkroni električni strojevi, Tehničko veleučilište u Zagrebu, Elektrotehnički odjel, Zagreb, 2012.
- [2] M. Vražić, Sinkroni stroj, Elektromehaničke i električne pretvorbe, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zavod za elektrostrojarstvo i automatizaciju, Zagreb, 2012.
- [3] R. Wolf, Osnove električnih strojeva, Zagreb, 1995
- [4] B. Skilacki, J. Grilec, Električni strojevi i pogoni, Zagreb, 2005.
- [5] J. Machowski, J.W. Bialek, J.R. Bumby, Power system dynamics: Stability and control, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK, 2008.
- [6] S. Tešnjak, D. Grgić, I. Kuzle, Pogonska karta sinkronog generatora, Fakultet elektrotehnike u računarstva, Zavod za visoki napon i energetiku Zagreb, <http://documentslide.com/documents/elektrane-09-pogonska-karta.html>, pristup ostvaren 29.3.2017.
- [7] P. Kundur, Power system stability and control, Electric power research institute, McGraw-Hill Inc., Surrey, SAD, 1993.
- [8] L. Josza, Vođenje pogona elektroenergetskog sustava, Elektrotehnički fakultet Osijek, Zavod za elektroenergetiku, Grafika, Osijek, 2008.
- [9] Mrežna pravila elektroenergetskog sustava, Ministarstvo gospodarstva, rada i poduzetništva, Zagreb, 2006.
- [10] I. Erceg, Uzbudni sustavi sinkronih generatora, Sustavi uzbude, Sinkroni strojevi i uzbudni sustavi, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zavod za energetiku i automatizaciju, Zagreb, 2011.
- [11] Z. Maljković, Momenti u sinkronom stroju, FER Zagreb, 2005.
- [12] Glavna HE Vinodol, HEP Proizvodnja, <http://proizvodnja.hep.hr/proizvodnja/osnovni/hidroelektrane/zapad/vinodol.aspx>, pristup ostvaren, 3. svibnja 2017.
- [13] I. Ilić, Z. Maljković, I. Gašparac, M. Pavlica, D. Ilić-Zubović, V. Jarić, A. Višković, R. Belobrajčić, Primjer provedbe algoritma izrade korisničke pogonske karte hidroagregata, Energija, god 56(2007), br.4., Zagreb, 2007.



- [14] Mala hidroelektrana Pleternica, Hrastović Inženjering d.o.o, <https://www.hrastovic-inzenjering.hr/primjena-energije/energetski-clanci/item/523-mala-he-pleternica.html>, pristup ostvaren 16.svibnja 2017.
- [15] Končar, Samouzbudni sinkroni beskontaktni generator 6SB01 560S1-24 Pogonske upute, Zagreb, Studeni 2011.
- [16] Končar, Mjerni list trolnog kratkog spoja, Končar - Generatori i motori, Zagreb, 2012.
- [17] Enerkon d.o.o.: Analiza opravdanosti izgradnje mHE Pleternica na rijeci Orljavi, elaborat, Zagreb, listopad 2010.

## **SAŽETAK**

Tema ovog diplomskog rada je dati detaljniji uvid u djelovanje i primjenu sinkronog generatora s istaknutim polovima. Opisane su tehničke specifikacije sinkronih generatora s istaknutim polovima, te su pokazane konstrukcijske i upravljačke razlike u odnosu na generator s cilindričnim rotorom. Pomoću fazorskih dijagrama i karakteristika snage i momenta postavljena je teorijska podloga za izradu proračuna. U računskom dijelu izrađene su karakteristike snage i momenta za generator velike snage HE Vinodol, te generator znatno manje snage mHE Pleternica. Također su prikazane mogućnosti varijacije izlazne snage na generatoru kroz promjenu radnih točki upravljanjem faktora snage i protoka kroz hidroelektrane.

## **KLJUČNE RIJEČI**

Sinkroni strojevi, sinkroni generator s istaknutim polovima, hidrogenerator, fazorski dijagram generatora, stabilnost, automatska regulacija napona, pogonska karta, karakteristika snage i momenta, varijacije izlazne snage

## **SUMMARY**

Salient-pole synchronous generators

The theme of this Master's thesis was using and application of salient pole synchronous generators. Technical specifications of salient pole synchronous generator are described, as well as the main construction and control difference from cylindrical pole generators. Using the phasor diagrams, power and torque characteristics a theoretical basis for calculation have been set. Power and torque characteristics were calculated for the high-power hydro plant HE Vinodol, as well as for the much smaller hydro power plant mHE Pleternica. The research also showed the possibility of variation of output power switching between generators working points, by changing the flow of the water and controlling the power factor of the generator.

## **KEYWORDS**

Synchronous machines, salient pole synchronous generator, hydrogenerator, generators phasor diagram, system stability, automatic voltage regulator, actual PQ diagram, power and torque characteristics, variation of output power.

## ŽIVOTOPIS

Jurica Marić rođen je 28. veljače 1991. u Požegi, u Požeško-slavonskoj županiji. Pohađao je osnovnu školu Dobriše Cesarića u Požegi od 1998. do 2006. Nakon osnovne škole završio je srednju Tehničku školu – smjer elektrotehničar u Požegi, koju je pohađao od 2006. do 2010. Nakon završene srednje škole, 2010. upisuje Elektrotehnički fakultet u Osijeku – stručni studij, smjer elektroenergetika.

Stručni studij završava u rujnu 2013. godine sa završnim radom „Solarni kolektori“ pod mentorstvom izv. prof. dr. sc. Tomislava Barića. Iste godine nastavlja akademsko obrazovanje i upisuje razlikovnu godinu kojom stječe pravo upisa na diplomski studij. Godine 2014. upisuje diplomski studij elektrotehnike, smjer elektroenergetika.

Potpis:

---