

# ISPITIVANJE SINKRONIH GENERATORA

---

Župić, Luka Ante

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Split / Sveučilište u Splitu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:228:664548>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-10**



Repository / Repozitorij:

[Repository of University Department of Professional Studies](#)



**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE**

Preddiplomski stručni studij Elektroenergetike

**LUKA ANTE ŽUPIĆ**

**ZAVRŠNI RAD**

**ISPITIVANJE SINKRONIH GENERATORA**

Split, rujan 2022

**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE**

Preddiplomski stručni studij Elektroenergetike

**Predmet:** Ispitivanje električnih strojeva

**ZAVRŠNI RAD**

**Kandidat:** Luka Ante Župić

**Naslov rada:** Ispitivanje sinkronih generatora

**Mentor:** Ivica Lovrić, struč. spec. ing. el.

Split, rujan 2022

## SADRŽAJ

SAŽETAK .....	1
SUMMARY .....	2
1. UVOD .....	3
2. OSNOVNE ZNAČAJKE I KARAKTERISTIKE SINKRONIH GENERATORA .....	4
2.1. Općenito o sinkronim generatorima .....	4
2.2. Podjela sinkronih generatora .....	6
2.2.1. Hidrogeneratori .....	6
2.2.2. Turbogeneratori.....	7
2.3. Karakteristika praznog hoda .....	8
2.4. Karakteristika kratkog spoja .....	9
2.5. Pogonska karta.....	11
2.6. Oblik vala elektromotorne sile.....	12
2.7. Krivulje regulacije .....	13
2.8. Švedski dijagram.....	14
2.9. V-krivulje.....	15
2.10. Vanjska karakteristika sinkronog generatora.....	16
2.11. Stabilnost generatora.....	17
2.11.1. Stabilnost kuta rotora .....	19
2.11.2. Naponska stabilnost .....	20
2.11.3. Frekvencijska stabilnost .....	20
2.11.4. Automatska regulacija napona (AVR).....	21
3. METODE I POSTUPCI ISPITIVANJA SINKRONIH GENERATORA.....	22
3.1. Ispitivanje pri proizvodnji stroja.....	23
3.2. Mjerenje otpora namota .....	24
3.3. Ispitivanje izolacije generatora .....	25
3.3.1. Mjerenje otpora izolacije namota i polarizacijskog indeksa .....	25
3.3.2. Mjerenje kuta dielektričnih gubitaka i kapaciteta izolacije statora .....	25
3.3.3. Provjera izolacije visokim naponom .....	26
3.3.4. Mjerenje parcijalnih izbijanja.....	26
3.3.5. Provjera izolacije između zavoja rotorskog namota .....	27
3.3.6. Provjera simetrije statorskog namota udarnim naponom.....	27
3.4. Mjerenje impedancije po polu .....	28
3.5. Magnetska ispitivanja statorske jezgre .....	29
3.6. Pokus zagrijavanja i hlađenja .....	29
3.7. Ispitivanje vibracija.....	30

4. ISPITIVANJE SINKRONOG GENERATORA U HE SALAKOVAC .....	31
4.1. Nazivni podaci sinkronog stroja .....	31
4.2. Kontrolno mjerenje i ispitivanje sinkronog generatora .....	32
4.3. Protokol ispitivanja sinkronog generatora .....	35
5. ZAKLJUČAK.....	37
LITERATURA .....	38
POPIS SLIKA .....	40
POPIS TABLICA.....	41

## SAŽETAK

### ISPITIVANJE SINKRONIH GENERATORA

Tema rada su sinkroni generatori koji će se u jednom trenutku svog postojanja pokvariti. Posebno će se obraditi teme ispitivanja i karakteristika sinkronih generatora kako bi se ti kvarovi rano otkrili i prevenirali. Uvod u temu je u prvom poglavlju. U drugom poglavlju će se obraditi osnovne značajke, podjela i karakteristike sinkronih generatora. U trećem poglavlju će se posebno obraditi metode ispitivanja sinkronih generatora, a u četvrtom poglavlju je opisan konkretni primjer za praktična ispitivanja.

**Ključne riječi:** električni strojevi, sinkroni strojevi, sinkroni generator, hidrogenerator, ispitivanja sinkronog generatora

## SUMMARY

### TESTING OF SYNCHRONOUS GENERATORS

The topic of the work is synchronous generators that will break down at some point in their existence. In particular, the topics of testing and characteristics of synchronous generators will be covered in order to detect and prevent these failures early. The introduction to the topic is in the first chapter. The second chapter will deal with the basic features, division and characteristics of synchronous generators. In the third chapter, the test methods of synchronous generators will be dealt with separately, and in the fourth chapter, a concrete example for practical tests is described.

**Keywords:** electrical machines, synchronous machines, synchronous generator, hydrogenerator, synchronous generator tests

## 1. UVOD

Tema ovog rada su elektromehanički uređaji koji služe za pretvaranje energije te se zovu sinkroni generatori. Obradjeni su u predmetu ispitivanje električnih strojeva koje se većinom bavi metodama ispitivanja električnih strojeva kao i njihovim karakteristikama koje su poveznica između praktičnog i teoretskog dijela te uvelike olakšavaju posao, smanjuju greške, vrijeme van rada, servise te omogućuje dulji vijek trajanja strojeva [1].

U drugom poglavlju su opisani sinkroni generatori kao ključni dijelovi elektroenergetskog sustava čijoj je zaštiti nužno posvetiti dosta pažnje. Ekonomski problemi nastaju kao posljedica zastoja i kvarova električnih strojeva, u ovom slučaju sinkronih generatora, ali primarni problem je prekid proizvodnje i distribucije električne energije sve bržem modernom svijetu iznimno ovisnom o električnoj energiji.

U trećem poglavlju će biti obrađena tema ispitivačkih metoda sinkronih generatora pošto neočekivana pojava kvara i ispad nekog stroja iz pogona može prouzročiti velike materijalne troškove i zastoje proizvodnje i distribucije električne energije. Primjenom odgovarajućih ispitivačkih metoda, kvarovi se mogu otkriti relativno rano, dok još šteta nije nastala. Tada se veći radovi obavljaju u tehnički predviđenoj i povoljnoj situaciji, a remont i nabavka rezervnih i pomoćnih dijelova se planiraju pomoću propisanih vremenskih intervala, naravno ako ne dođe do neplaniranih kvarova.

U četvrtom poglavlju će se obraditi praktični primjer ispitivanja sinkronog generatora iz hidroelektrane Salakovac.



## 2. OSNOVNE ZNAČAJKE I KARAKTERISTIKE SINKRONIH GENERATORA

Moderni svijet sve se brže razvija, ponuda i potražnja konstantno rastu, a s njima i enormni zahtjevi za električnom energijom. Sinkroni generatori kao ključni elementi proizvodnje električne energije neprestano rade, a njihovi zastoji uzrokuju probleme u opskrbi električne energije. Kako bi se ti zastoji sveli na minimalnu razinu potrebno je generatore konstantno držati pod povećalom. Ulogu praktične primjene preuzima ispitivanje električnih strojeva, a da bi to bilo moguće potrebno je poznavati princip rada strojeva, u ovom slučaju sinkronih generatora. Karakteristike su poveznica između principa rada i praktičnog ispitivanja generatora. Omogućavaju lakše, brže i efektivnije dolaženje do rezultata. Poznate su po velikom skraćivanju nepotrebnih izračuna i mjerenja. Ispitivanje sinkronih generatora je stručna grana koja obuhvaća niz ispitivanja, testova, analiza rada, zabilješki te predviđanja i planiranja budućih zahvata, servisa, promjene potrošnih dijelova te nabavke rezervnih dijelova.

### 2.1. Općenito o sinkronim generatorima

Sinkroni generatori su uglavnom veliki trofazni strojevi. U sinkronim strojevima dolazi do pretvorbe električne u mehaničku energije, te mehaničke u električnu energiju, odnosno vrijede sljedeći izrazi [20]:

$$P_{el} = E \cdot I = B \cdot l \cdot v \cdot I \quad (2.1)$$

$$P_{meh} = F \cdot v = B \cdot l \cdot v \cdot I \quad (2.2)$$

Gdje je:

$P_{el}$  – električna snaga

$P_{meh}$  – mehanička snaga

$B$  – 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]

$I$  – struja I [A]

E – elektromotorna sila

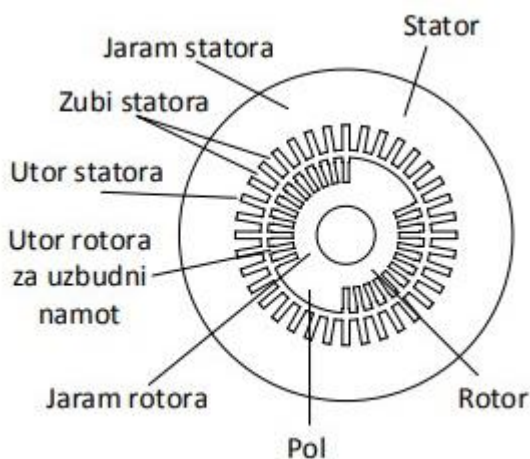
F – sila [N/m]

Protjecanjem struje kroz vodič stvara se magnetsko polje, a efektom pojačanja namatanjem vodičima struja ostaje ista. Rotorski i statorski namoti stvaraju magnetsko polje. Kroz uzbudni rotorski namot protječe istosmjerna struja, a rotor dobije ulogu elektromagneta. Okretno magnetsko polje je rezultat vrtnje rotora i magnetskog polja skupa s njim. Kod sinkronih rotacijskih strojeva rotor je sinkroniziran s okretnim magnetskim poljem statora čime je objašnjeno porijeklo imena sinkroni. [20]

Sinkroni generator ima tri namota [1]:

- uzbudni namot,
- armaturni namot i
- prigušni namot.

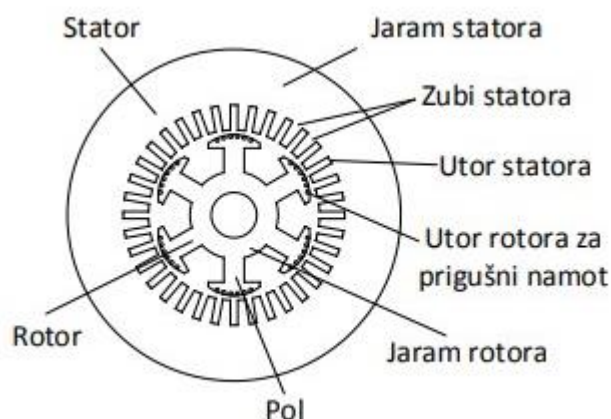
Armaturni namot se nalazi na statoru generatora a posložen je utorski simetrično po obodu generatora. Napon se inducira te poteče opteretna struja. Uzbudni namot se nalazi na rotoru, a imamo dvije inačice. Cilindrični rotor prikazan na slici 2.1 ima uzbudni namot u utorima rotora, a koristi se za veće brzine.



Slika 2.1. Presjek željezne jezgre 2-polnog sinkronog stroja s cilindričnim rotorom [1]

Druga inačica je ilustrirana slikom 2.2. Prikazan je generator s istaknutim polovima. U njegovom slučaju uzbudni namot se nalazi na specijalno napravljenim polovima, a upotrebljavaju se za niže brzine okretanja. Uzbuda na rotoru je izvedena na više načina. Prvi

spoj je preko kliznih kolutova i četkica gdje se prijenos energije odvija klizanjem četkica po kolutima čime se napaja strojna uzbuda. Drugi način uzbude stroja je beskontaktnim sustavom uzbude gdje se istosmjerna struja dobije iz izmjeničnog uzбудnika s armaturom na rotoru.



Slika 2.2. Presjek željezne jezgre 6-polnog sinkronog stroja s istaknutim polovima [1]

Dodatni gubici koji su iznimno nepoželjni se smanjuju prigušnim namotom. Također se reduciraju prenaponi prijelaznih stanja i nesimetrična opterećenja sinkronih generatora. Pozicioniraju se u polne nastavke istaknutih polova na rotoru. [20,21]

## 2.2. Podjela sinkronih generatora

Veličina generatora određuje njegov način izvedbe. Ponekad se izvode specijalni tipovi s odgovarajućom konstrukcijom. Ključni podaci za odabir generatora su snaga poslije pretvorbe te brzina okretanja određena pogonskim strojem. Upravo to je razlog sljedeće podjela prema pogonskom stroju [1]:

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

### 2.2.1. Hidrogeneratori

Sinkroni stroj kojega pokreće vodna turbina koju karakterizira manja brzina vrtnje se zove hidrogenerator. On ovisi o raspoloživom padu te količini i protoku vode. Brzina okretanja

rotora je manja pa je potreban veći broj pari polova generatora, a on se računa prema formuli [20]:

$$p = \frac{60 \cdot f}{n} \quad (2.3)$$

gdje je :

f – frekvencija

n – broj okretaja rotora generatora

p – broj pari polova

Hidrogeneratori su karakteristični zbog višeg broja polova, a brzine vrtnje im mogu biti niže od 70 okretaja u minuti, znači da više odgovaraju radu u hidroelektranama. Hidrogeneratori imaju veći promjer zbog manje brzine. Promjer može biti do dvadesetak metara, ali je obodna brzina vrtnje faktor koji ograničava još veći promjer rotora. Hidrogeneratori se izvode s okomitom osovinom, a turbina se nalazi ispod generatora. Maksimalna snaga hidrogeneratora je 700 MVA. Tijekom vrtnje generatori proizvode električnu energiju napona do 25 kV. [23]

### **2.2.2. Turbogeneratori**

Turbogeneratori posjeduju dva ili četiri pola. Za turbogeneratore građene za električnu mrežu frekvencije od 50 Hz brzina okretanja je 3000 ili 1500 okretaja/min , a 3600 ili 1800 okretaja/min ako je napravljen za električnu mrežu frekvencije 60 Hz karakteristične za SAD. Mehanička snaga pogonske turbine je u vezi s električnom djelatnom snagom, dok je nazivna snaga zapravo prividna snaga određena vektorskim zbrojem djelatne i jalove snage nužne za pravilan rad raznih potrošača u elektroenergetskom sustavu. Turbogeneratori najvećih snaga su postavljeni u nuklearne elektrane te imaju posebnu konstrukciju jer imaju veće centrifugalne sile. [24]

Osnovni izvor električne energije trofazni električni generator velike brzine vrtnje je turbogenerator. Brzina okretanja ( $\omega$  /min)  $n$  turbogeneratora je konstanta, a određena je frekvencijom električne mreže  $f$  i brojem parova magnetskih polova  $p$  prema izrazu [1]:

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (2.4)$$

Gdje je:

f – frekvencija

p – broj parova polova generatora

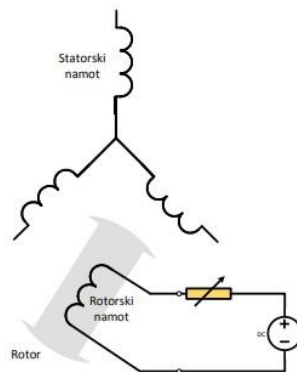
Turbogeneratori se nalaze pokraj parne turbine, na horizontalnoj osovini. Najveći turbogeneratori trenutno se koriste u nuklearnim postrojenjima te mogu doseći 1700 MVA nazivne snage [24].

### 2.3. Karakteristika praznog hoda

Pogonsko stanje generatora u kojem se uzbuđeni stroj neopterećeno vrti konstantnom brzinom se zove prazni hod. Elektromotorne sile se induciraju u armaturnom namotu, a stezaljke generatora su otvorene te u armaturnom namotu nema struje. Uglavnom se koristi generatorski postupak pri praznom hodu. Karakteristike koje dobijemo ispitivanjem sinkronih generatora u praznom hodu su [1]:

- oblik vala elektromotorne sile,
- karakteristika praznog hoda i
- gubici praznog hoda.

Prazni hod je predstavljen shemom sa slike 2.3 [1].



Slika 2.3. Shema spoja sinkronog generatora u praznom hodu [1]

$$E_0 = f(J_p), I = 0, n = \text{const.} \quad (2.5)$$

gdje je:

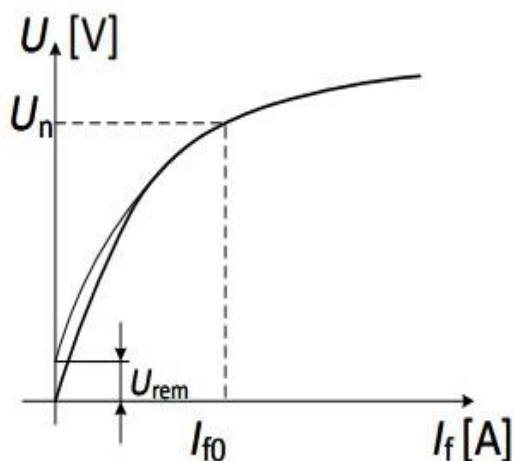
$E_0$  – inducirani napon

$J_p$  – istosmjerna uzбудna struja

$n$  – konstanta brzina vrtnje

$f_n$  – nazivna frekvencija

Karakteristika generatorskog praznog hoda prikazana na slici 2.4. jednaka je kao magnetska karakteristika protjecanja. Kada se uzbudna struja smanji do 0 A, napon ne pada na 0 V nego ostaje na niskoj vrijednosti što je posljedica magnetske remanencije, pa se taj napon zove napon remanencije ili remanentni napon [1].



Slika 2.4. Mjerna karakteristika praznog hoda [1]

## 2.4. Karakteristika kratkog spoja

Ovisnost struje o uzbudnoj struji prilikom kratkospojenih stezaljki tijekom konstantne brzine je karakteristika kratkog spoja sinkronog generatora. Prikazuje zavisnost generatora o uzbudnoj struji, uz održavanje stalne brzine okretanja rotora.

$$I_K = f(I_f), n = \text{const} \quad (2.6)$$

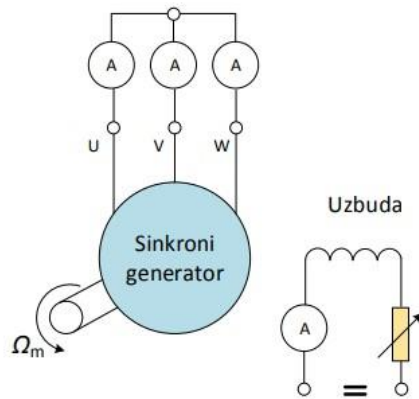
Gdje je:

$I_K$  – struja [A]

$I_f$  – uzбудna struja [A]

$n$  – brzina vrtnje

Shema kratkog spoja je ilustrirana na slici 2.5.

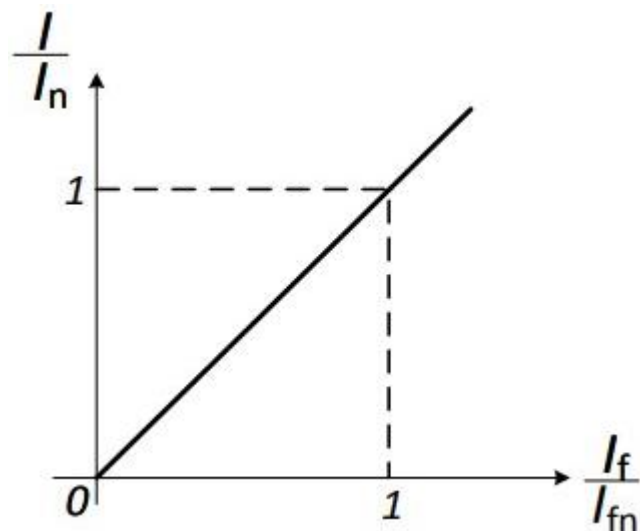


Slika 2.5. Shema mjerenja karakteristike kratkog spoja sinkronog generatora [1]

Karakteristika se dobije mjerenjem struja uzbuđe i struje kratkog spoja, jer su međusobno zavisne. Tijekom mjerenja rotor se vrti stalnom brzinom vrtnje, dok se uzbudna struja povećava sve dok kroz statorski namot ne poteče nazivna struja. Mjerenje se obavlja smanjivanjem uzbudne struje, od maksimalne vrijednosti do nule, zbog pojave zagrijavanja.

[1]

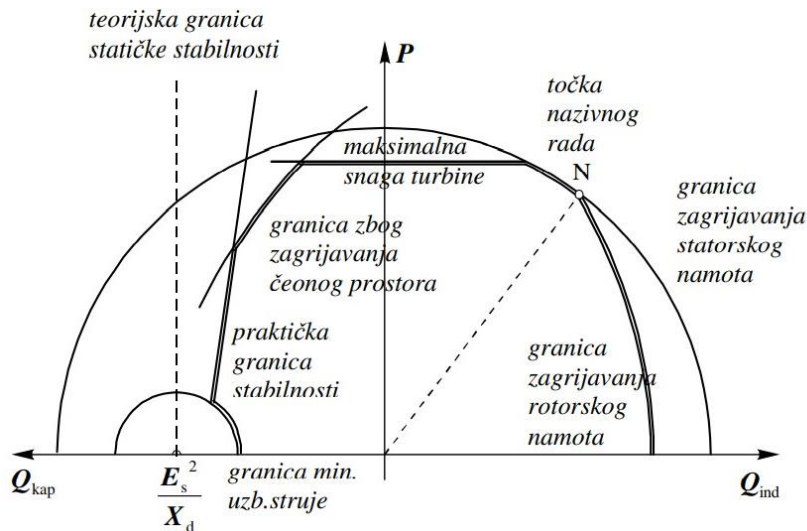
Karakteristika kratkog spoja prikazana je na slici 2.6. [1].



Slika 2.6. Mjerena karakteristika kratkog spoja [1]

## 2.5. Pogonska karta

Pogonska karta prikazana na slici 2.7. služi za precizno određivanje dozvoljenog područja rada sinkronog stroja.



Slika 2.7. Pogonska karta [1]

Područje rada je ograničeno [1]:

- maksimalnom snagom turbine
- minimumom uzbudne struje,
- zagrijavanjem čeonog prostora,
- zagrijavanjem statorskog i rotorskog namota te
- granicom stabilnosti.

Zagrijavanje statorskog namota je osnovna granica pogonske karte. Proporcionalno je kvadratu struje armature te nije ovisan o faktoru snage. Struja armaturnog namota  $I$  ne smije biti veća od maksimalne dopuštene. Polukružnicom je prikazana granica zbog zagrijavanja statorskog namota, a polumjer te kružnice je određen armaturnom strujom za koju se namot statora zagrije do najveće dopuštene temperature. Zatim postoji ograničenje zagrijavanja rotorskog namota. Proporcionalno je kvadratu uzbudne struje te ovisi o faktoru snage i prividnoj snazi. Uzbudna struja  $I_f$  također ne smije prelaziti maksimalnu dopuštenu struju. Opterećenje generatora ne smije prelaziti maksimalnu granicu snage, a opterećenje turbine



ne smije pasti ispod minimalne propisane granice. Generator je stabilan isključivo ako mu je kut opterećenja manji od  $90^\circ$ .

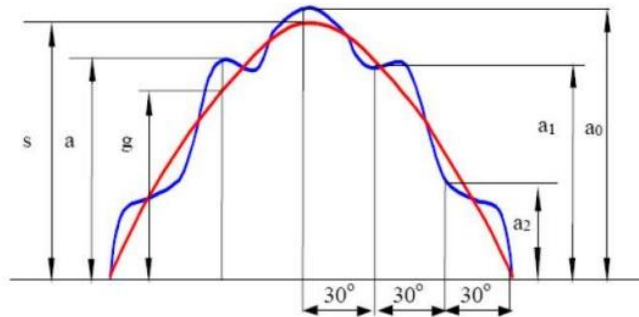
Za kapacitivno područje rada postoje tri ograničenja. Prvo ograničenje je granica stabilnosti koja je predstavljena kao teoretska vertikalna linija, no rad na samoj granici nije dopušten pa je područje rada još uže, pa se na pogonsku kartu unosi i praktična granica stabilnosti.

Drugo ograničenje je predstavljeno elementom uzbudne struje. Njezin minimum je 10% nazivne uzbudne struje pošto se niže vrijednosti ne mogu kontrolirati, a regulira se pomoću automatskog regulatora uzbudne struje. Polukružnica sa središtem u točki  $\frac{E_s^2}{X_d}$  je granica minimalne uzbudne struje. Zagrijavanje čeonog prostora predstavlja treće ograničenje. Jako magnetsko polje je uzrokovano zbrajanjem protjecanja glave namota rotora i statora. To polje izaziva vrtložne struje u statorskom paketu zbog kojeg dolazi do zagrijavanja čeonih dijelova stroja.

Vidljivo je da se sužavanje područja rada događa zbog raznih zagrijavanja, pa se radno područje povećava i širi instaliranjem kvalitetnih rashladnih sustava. [1,25]

## **2.6. Oblik vala elektromotorne sile**

Ispitivanje sinkronog stroja u praznom hodu zahtjeva kontrolu oblika vala elektromotorne sile odnosno napona oscilografom. Oblik krivulje elektromotorne sile treba biti koliko god je moguće bliže sinusnom. To se postiže nizom konstrukcijskih mjera. Namoti statora se spajaju u zvijezdu i treći se harmonik koji postoji u faznom naponu gubi u linijskom te se tako poništava utjecaj trećeg harmonika. U slučaju generatora visokog napona oblik krivulje elektromotorne sile ispituje se preko naponskih mjernih transformatora. Upotrebljavaju se mjerni transformatori više klase da se ne bi izobličio oblik krivulje elektromotorne sile. Oblik krivulje je sinusnog oblika prema propisima ako maksimalno odstupanje trenutne vrijednosti ne prelazi više od 5% maksimalne vrijednosti što je i prikazano na slici 2.8. [4]



Slika 2.8. Oblik vala elektromotorne sile [4]

## 2.7. Krivulje regulacije

Poznavanje uzbudne struje tereta i faktora snage je ključna stvar za pravilan rad sinkronih generatora. Navedeni podaci se dobivaju iz krivulja regulacije. One pokazuju ovisnost struje  $I_f$  o opterećenju uz konstantan faktor snage  $\cos \varphi$ .

$$I_f = f(I), \cos \varphi = \text{konst.}$$

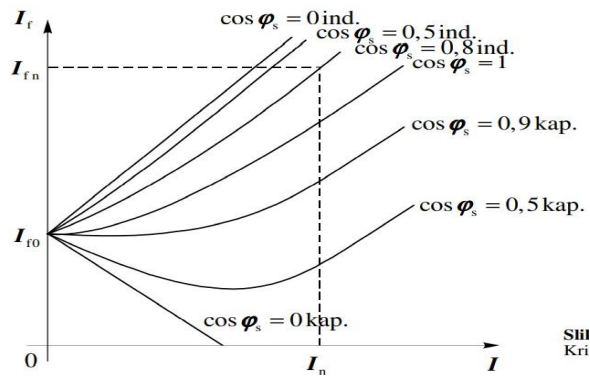
Gdje je:

$I_f$  – uzbudna struja

$\cos \varphi$  – faktor snage

Krivulje regulacije su skup krivulja definiranih za različite vrijednosti  $\cos \varphi$ .

Iz dijagrama sa slike se vidi da karakteristika nije linearna zbog resultantnog protjecanja uzbuđe i armature. S karakteristike na slici 2.9. je moguće odmah očitati vrijednost struje za određenu vrijednost faktora snage.

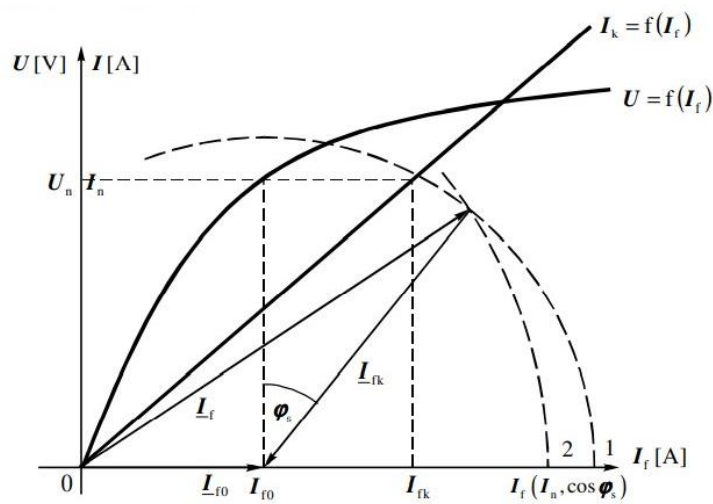


Slika 2.9. Krivulje regulacije [1]

Snimanja se obavljaju u tvornicama nakon izrade stroja, no samo za strojeve manjih snaga, Opisane krivulje imaju veliki nedostatak, ne mogu se snimati u elektranama i tvornicama za strojeve većih snaga, pa se u tu svrhu koriste švedski dijagrami. [1]

## 2.8. Švedski dijagram

Švedski dijagram prikazan na slici 2.10. je rješenje za snimanje krivulja regulacija za generatore većih snaga.



Slika 2.10. Švedski dijagram [1]

Za slučaj induktivnog opterećenja uzбудna struja za točku 1 iznosi:

$$I_f = I_{f0} + I_{fk} \quad (2.7)$$

Gdje je:

$I_f$  – uzbudna struja

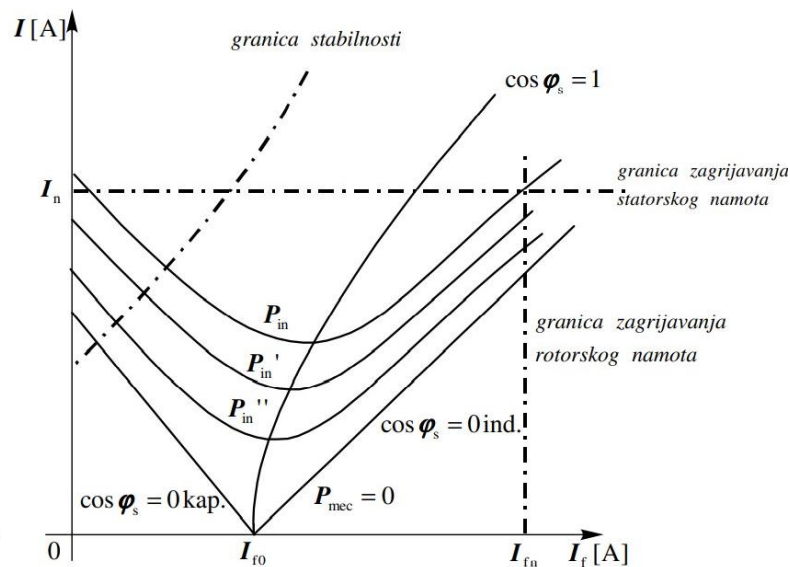
$I_{f0}$  – uzbudna struja u praznom hodu

$I_{fk}$  – uzbudna struja u kratkom spoju

Švedski dijagram nazivnog opterećenja se dobije tako da se ucrtta kružnica s polumjerom  $I_{fk}$  s centrom u točki  $I_{f0}$ . Struja  $I_{fk}$  se za zadani  $\cos \varphi_s$  nacrtta u točki  $I_{f0}$  pod kutem  $\varphi$  u ovisnosti na okomicu u toj točki. Duljina  $I_f$  spaja ishodište sa sjecištem struje  $I_{fk}$  i kružnice polumjera  $I_{fk}$ . Ta dužina se nanese na os uzbudne struje točke 2, pa se dobije iznos  $I_f$ . Kružnica s manjim polumjerom bi se mogla nacrtati ako bi odgovarala proporcionalno manjoj statorskoj struji. [1]

## 2.9. V-krivulje

V-krivulje služe za prikazivanje ovisnosti uzbudne struje o struji armature, pri različitim vrijednostima faktora snage  $\cos \varphi$ . Dijagram prikazan na slici 2.11. je karakterističan po tome što ima zamijenjene osi u odnosu na krivulje regulacije.



Slika 2.11. Dijagram v – krivulje [1]

$$I = f(I_f), P = \text{konst.}$$

$$(2.8)$$

Gdje je:

I – struja statora

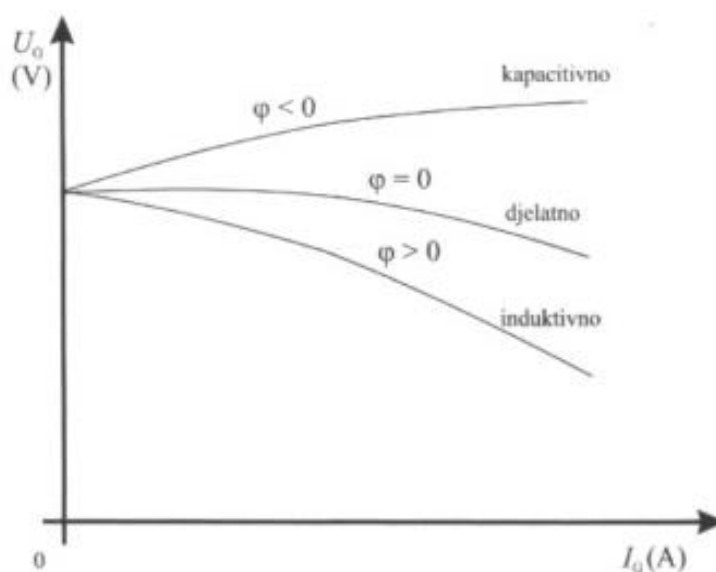
P – mehanička snaga

Točka za koju je faktor snage  $\cos \varphi_s = 1$  je točka za koju je struja armature najmanja, a zbog toga minimumi V-krivulja leže svi na regulacijskoj krivulji za navedeni  $\cos \varphi_s$ .

U dijagram se unose granice zagrijavanja rotorskog namota, zagrijavanja statorskog namota i granica stabilnosti. Maksimalna uzbudna struja uz koju se taj namot zagrije na dozvoljenu temperaturu klase izolacije je predstavljena kao granica zagrijavanja rotorskog namota. Maksimalna armaturna struja uz koju se taj namot zagrije na dozvoljenu temperaturu klase izolacije se zove granica zagrijavanja statorskog namota. [1]

## 2.10. Vanjska karakteristika sinkronog generatora

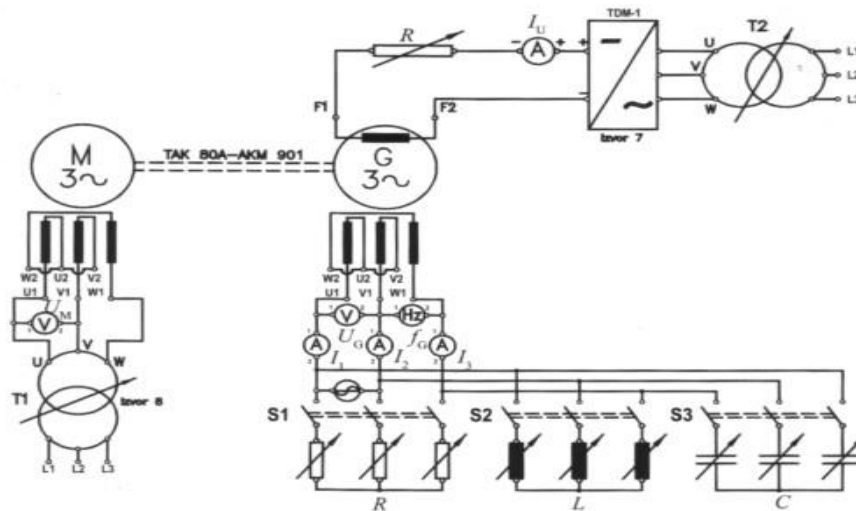
Vanjska karakteristika sinkronog generatora prikazana na slici 2.12. opisuje promjenu napona armature  $U_G$  u ovisnosti o armaturnoj struji opterećenja  $I_G$  pri konstantnim faktorom snage  $\cos \varphi$ , konstantnoj frekvenciji  $f_G$  te konstantnoj uzbudnoj struji  $I_U$ .



Slika 2.12. Vanjska karakteristika sinkronog generatora [25]

Za slučajeve induktivnog i radnog trošila napon generatora pada s povećanjem opterećenja, dok za kapacitivno opterećenje vrijedi da napon raste s povećanjem opterećenja.

Vanjska karakteristika generatora se snima tako da se snima napon generatora  $U_G$  na stezaljkama u ovisnosti o armaturnog struji  $I_G$  pri R, L, C opterećenju prema shemi prikazanoj na slici 2.13.



Slika 2.13. Shema za snimanje vanjske karakteristike sinkronog generatora [25]

Pomoću trofaznog regulacijskog autotransformatora narine se nazivni napon. Sklopkama S1, S2, S3 se uključuju različite vrste opterećenja. Uklop sklopke S1 generator optereti radnim opterećenjem. Struja opterećenja se namješta pomoću klizača na radnom otporu R. Bilježi se napon  $U_G$ , struja uzbude  $I_U$  te frekvencija  $f_G$  u ovisnosti o podešenoj struji opterećenja  $I_G$ . Postupak se ponavlja za uklop sklopki S2 i S3.

Tijekom snimanja je ključno održavanje konstantne uzbude i konstantne brzine vrtnje. [25]

## 2.11. Stabilnost generatora

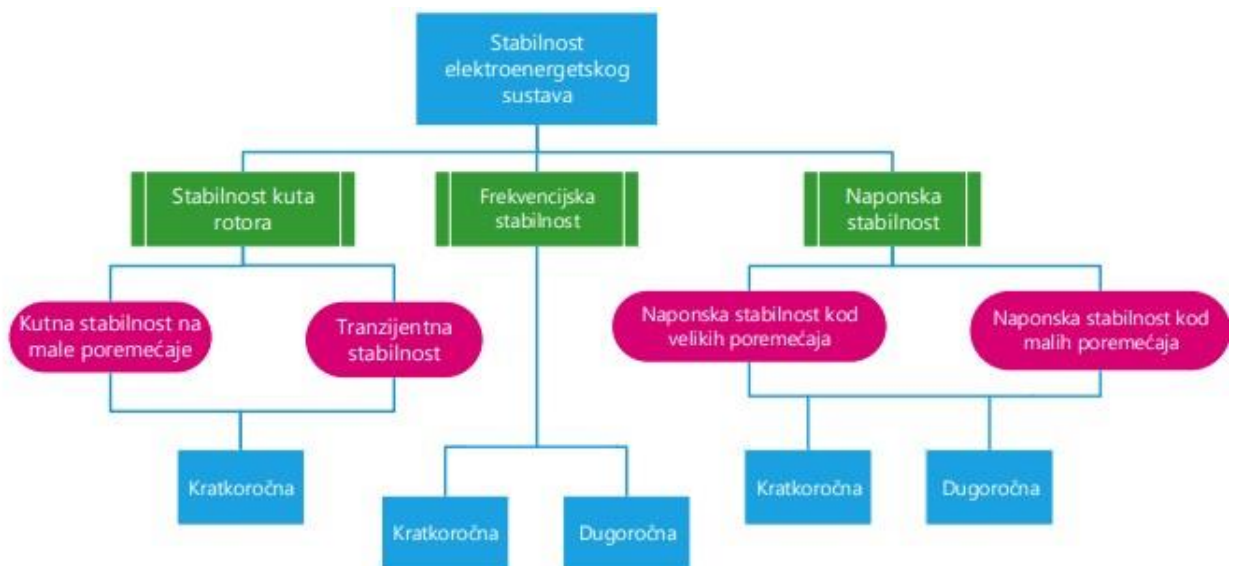
Svojstvo elektroenergetskog sustava da ostane u radnom stanju i nakon što sustav bude izložen poremećajima se naziva stabilnost elektroenergetskog sustava. Održavanje sinkronizacije generatora s mrežom stoga je vrlo važno. Sinkroni generatori su ključni dio proizvodnje u elektroenergetskom sustavu te svi generatori u sustavu trebaju biti u sinkronizmu. Regulacija kuta rotora je važna zbog sinkronizma generatora kao i odnosi snaga i brzina. Brzina vrtnje je konstanta kod sustava kod kojih postoji ravnoteža između

ulazne mehaničke snage i izlazne električne snage na svim strojevima. Poremećaji u mreži izazivaju neravnoteže snaga, što će imati za posljedicu tendenciju ubrzavanja ili usporavanja brzine okretanja stroja, dolazi do promjene kuta rotora, te konačno do ispada iz sinkronizma. Balansiranje i ravnomjernije opterećenje se provodi regulacijom kuta rotora ovisno o snagama generatora. Odnos snage i kuta rotora generatora je iznimno nelinearan što znači da će za određene vrijednosti povećavanja kuta rotora pasti proizvodnja snage na generatoru. Uslijed ispada iz sinkronizma, rotor će se okretati različitom brzinom od nazivne. To će uzrokovati velike poremećaje izlazne snage generatora, struje te napona generatora. Posljedica takvih promjena nazivnih vrijednosti je djelovanje zaštite te će se odspojiti generator s mreže. Sinkronizirajući moment je ključan čimbenik u održavanju sinkronizma s ostatkom mreže. Manjak sinkronizirajućeg momenta može dovesti do nestabilnosti i uzrokovati aperiodični pomak kuta rotora. Do oscilatorne nestabilnosti dolazi ako ne postoji prigušni moment koji treba vratiti sustav u područje nazivnih vrijednosti. [7]

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

- frekvencijsku stabilnost,
- stabilnost kuta rotora generatora i
- naponsku stabilnost.

Opća podjela ilustrirana je slikom 2.14.



Slika 2.14. Klasifikacija stabilnosti u elektroenergetskom sustavu [7]

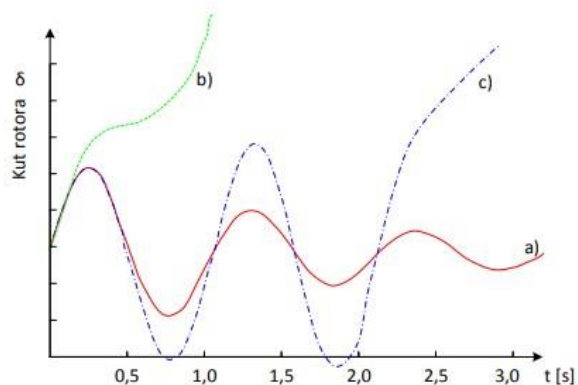
### 2.11.1. Stabilnost kuta rotora

Mogućnost međusobno povezanih sinkronih strojeva da ostanu u sinkronizmu u energetsom sustavu se zove stabilnost kuta rotora [7].

S obzirom na kut rotora, stabilnost sustava se dijeli na [7]:

- stabilnost prilikom manjih poremećaja i
- tranzijentnu stabilnost.

Faktori o kojima ovisi odziv sustava za male poremećaje mreže su početni režim rada generatora, prijenosna moć vodova i vrsta uzbudnog sustava generatora. Nestabilnost sustava je rezultat nedozvoljenog rasta vrijednosti napona zbog nedostatka automatske regulacije napona. Održavanje sinkronizma unatoč poremećajima prijelaznih stanja se zove tranzijentna stabilnost. Odzivi su prikazani na slici 2.15 te uključuju veliki pomak kuta rotora generatora, to predstavlja problem jer je karakteristika kuta rotora i snage generatora nelinearna. O početnom stanju sustava i prirodi poremećaja ovisi cijela stabilnost sustava. [7]



Slika 2.15. Dijagram odziva kuta rotora [7]

Na gornjoj slici je prikazano stabilno i nestabilno stanje sinkronih generatora u radu, promjena kuta rotora je u stabilnom stanju prikazana slučajem (a), dok su (b,c) u nestabilnom stanju. Za stanje (b) vrijedi da se kut rotora konstantno povećava dok ne izgubi sinkronizam. U (c) slučaju sustav je u početku stabilan, no ulazi u nestabilno stanje zbog rastućih oscilacija. [7]



### **2.11.2. Naponska stabilnost**

Naponska stabilnost je važna radi ravnoteže u elektroenergetskom sustavu, a opisana je kao svojstvo sustava da održava napon u zadanim okvirima na svim priključnicama u sistemu tijekom normalnog režima rada te nakon poremećaja snaga u sistemu. Pojavljuje se u slučaju pojave neočekivane potrebe za električnom energijom ili se zbog velikih oscilacija u mreži uslijed nedopuštenog pada napona. [7]

### **2.11.3. Frekvencijska stabilnost**

Trenutni poremećaji ravnoteže snaga mreže se stvore zbog kratkih spojeva na mreži, a ako se kvar popravi odmah ne treba se smanjivati snage koje se proizvode ili šalju potrošačima. Ravnoteža sustava je temelj elektroenergetskog sustava. U svakom momentu generatori trebaju moći proizvoditi i isporučiti zatraženu snagu inače dolazi do raznih nepoželjnih kompenzacija. [9]

Nabrojene su tri metode održavanja frekvencijske stabilnosti elektroenergetskog sustava [9]:

- primarna regulacija,
- sekundarna regulacija i
- tercijarna regulacija.

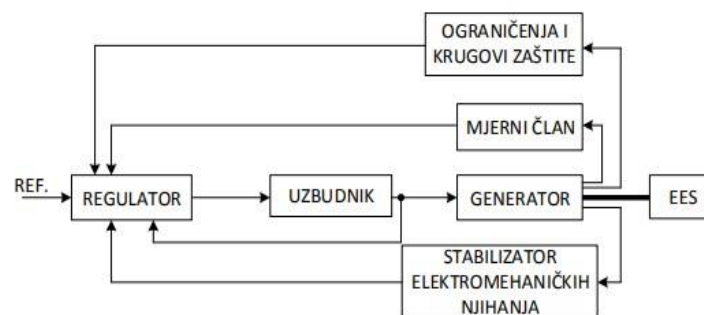
Regulacija snage ulaznim ventilima na turbinama zbog usklađivanja proizvedene snage na generatoru sa zahtjevom potrošača u sistemu se zove primarna regulacija. [9]

Sekundarna regulacija dolazi nakon primarne, to jest 30 sekundi iza poremećaja. Nazivna vrijednost frekvencije postiže se maksimalno 15 minuta iza poremećaja [11].

Pod tercijarnom regulacijom misli se na rukovođenje rezervama snage u sistemu te na ekonomično upravljanje svim elektranama povezanih elektroenergetskim sustavom. Sekundarna regulacija se rastereti tercijarnom regulacijom oslobađanjem pomoćnih izvora snage ako je potrebno sustavu [16].

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

Vrijednosti napona na sinkronom generatoru se upravljaju automatskim regulatorima povećanjem ili smanjenjem struje koja teče iz uzбудnika u generatorske namote [9]. Slikom 2.16. ilustriran je blok dijagram koji definira način rada automatskog regulatora napona. Mjere se osnovne mjerne veličine kao što je struja, snaga, napon te frekvencija stroja. Izmjerena vrijednost napona generatora  $U_g$  je kompenzirana teretnom strujom zbog trošila  $I_g$ . Napon  $U_g$  se uspoređi sa zadanom vrijednosti za napon generatora  $U_{ref}$ , a razlika napona  $\Delta V$  se naziva naponska greška. Naponska greška  $\Delta V$  dođe na pojačalo, a vrijednosti razlika napona koriste se za mijenjanje izlaznih parametara na uzбудniku kako bi se napon vratio na nazivnu vrijednost i otklonio razliku trenutne i nazivne vrijednosti napona generatora. [10]



Slika 2.16. Funkcijska blokovska shema sustava uzbude sinkronog generatora [12]

### 3. METODE I POSTUPCI ISPITIVANJA SINKRONIH GENERATORA

Električni strojevi su podvrgnuti brojnim ispitivanjima koja su regulirana nacionalnim i internacionalnim standardima. Kada se govori o ispitivanju sinkronih strojeva, uglavnom se misli na ispitivanje sinkronih generatora pošto oni imaju znatno veću primjenu nego sinkroni motori. Za ispitivanje sinkronih motora koriste se iste metode kao i za ispitivanje generatora pri čemu je ključno voditi računa o specifičnostima gubitaka, načinu puštanja u rad i slično. Zbog sve većih energetskehtjeva modernog svijeta potrebno je pravilno održavanje, ispitivanje i servisiranje stroja. Izum mikroprocesora je uvelike olakšao, centralizirao i automatizirao nadgledanje strojeva kao i povratne informacije sve razvijenijih uređaja. Aktivnosti ispitivanja električnih strojeva su strogo kontrolirane te su propisane mnogim standardima, a potrebno je i opširno znanje i iskustvo izvoditelja radova kako bi se greške svele na minimum. Održavanje uglavnom obavlja preventivnu kontrolu i planiranje servisnih intervala kako bi se rano predvidio kvar, smanjila šteta, a povećao životni vijek opreme. [3,6].

Električna ispitivanja su podijeljena na [3]:

- prikupljanje podataka,
- analiza podataka,
- ispitivanje oštećenja i
- donošenje zaključaka.

Tehnička dijagnostika se odnosi na detaljno prikupljanje i ekspertnu analizu podataka, a podijeljena je na faze [6]:

- upoznavanja sustava i radnog okoliša,
- mjerenje ulaznih i izlaznih veličina te usporedba s referentnim vrijednostima
- procjene trenutnog stanja te zaključci o mjestu, obliku i uzroku kvara,
- analiziranja ukupnih podataka i
- zaključivanje o budućim zahvatima te logističkoj pripremi.

Ispitivanje po fazama životnog vijeka opreme dijeli se na [6]:

- prijamna provjera,

- ispitivanja u proizvodnji,
- rutinska ispitivanja i
- posebna ispitivanja.

### **3.1. Ispitivanje pri proizvodnji stroja**

Tijekom izgradnje strojeva velikih snaga ključno je provoditi razna ispitivanja. Proizvođač je obvezan provoditi testove koji su definirani normama. Ako je dogovoreno kupoprodajnim ugovorom inspektor može prisustvovati kontroli [1].

Postoje dvije podjele ispitivanja pri gradnji [1]:

- provjera tehničkih procesa i
- ulazna kontrola.

Ulazna kontrola je ispit kvalitete građevnog materijala [1]:

- magnetskih materijala,
- konstrukcijskih materijala,
- bakra i
- izolacijskog sustava.

Mehanička čvrstoća i krutost je osnovna provjera konstrukcijskih materijala zbog mehaničkih naprezanja. Magnetskim materijalima testiraju se električna, magnetska i mehanička svojstva [1]:

- specifični gubici,
- površinska izolacija,
- krivulja magnetiziranja i
- deformacija lima.

Bakar za vodiče određen je standardima te nisu nužni specijalni testovi. Za posebne dimenzije bakra ispituju se dimenzije i vodljivost čistog bakra i izolacije. Izolaciji se testiraju [1]:

- električna svojstva,
- mehanička svojstva i
- dimenzije.

Kod ispitivanja tehnoloških postupaka se radi [1]:

- provjera statorskih paketa limova,
- provjera varova,
- provjera kvalitete izolacije statorskog namota i
- ispitivanje sklopova.

Što se ispita sklopa tiče najbitnije su provjera simetričnosti rotora i pokus vitlanja. U slučaju nesimetrije potreban je rebalans rotora da se ne događaju radijalne centrifugalne sile zbog veće mase. Za rotore koji se izrađuju u tvornici pokus vitlanja se izvede na mjestu proizvodnje. Također se testovi provode i nakon montaže radi dodatnih informacija i sigurnosti. [1]

### 3.2. Mjerenje otpora namota

U-I metoda je osnovni odabir za mjerenje otpora namota. Dodatnim promjenjivim otporom  $R$  podesi se veličina mjerne struje [1]. Veličina mjerne struje se bira u odnosu na veličinu nazivne struje zadanog namota te ne smije prijeći 10% nazivne struje jer se tada zanemaruje povećanje otpora uslijed zagrijavanja koje izazove mjerna struja. Mjerna područja instrumenta se odabiru da im otklon bude što veći u svrhu smanjenja pogreške mjerenja. Promjene omskog otpora mogu ukazivati na greške u nastajanju u trajnom radu na duže staze [14]. Zabilježava se temperatura namota. Gubitke u bakru namota se izračuna pomoću sljedećeg izraza [13]:

$$P_{cu} = 1.5 \cdot R_{ST} \cdot I^2 = 3 \cdot R_f \cdot I_f^2 \quad (3.1)$$

Gdje su:

$P_{cu}$  - gubici u bakru

$R_{ST}$  - otpor na stezaljkama statora

$I$  - struja

$R_f$  - fazni otpor

$I_f$  - fazna struja

Otpor namota rotora se mjeri neposredno preko kliznih kolutova [17].

### **3.3. Ispitivanje izolacije generatora**

Provodi se s ciljem procjene stanja izolacijskog sustava. Potrebno je izvršiti ispitivanja te odstupanja od nazivnih vrijednosti. O odstupanju s nazivnih vrijednosti će ovisiti buduće akcije kao što su sušenje, čišćenje, mijenjanje, servisni intervali, mijenjanje potrošnih dijelova te nabavka drugih zamjenskih ili pomoćnih dijelova. [1]

#### **3.3.1. Mjerenje otpora izolacije namota i polarizacijskog indeksa**

Mjerenje izolacijskog otpora se radi mjeračem otpora izolacije indukcijskim  $M\Omega$ -metrom. Propisane standardne veličine induciranih napona  $M\Omega$ -metra iznose 100, 500, 1000 i 2500 V. Mjeri se izolacijski otpor. Ako je otpor izolacije veći od 1  $M\Omega$ , stanje izolacije je zadovoljavajuće. Za otpore izolacije ispod 1  $M\Omega$  treba se namot sušiti. Za niskonaponske mreže propisano je da izolacijski otpor može imati vrijednosti 1  $k\Omega$  po 1 V pogonskog napona. Prema IEC propisima veličina ispitnog napona za stator generatora ispod 10 MVA i uzbudni namot uzбудnika iznosi  $2 U_n + 1000$  V [1]. Izolacija je ispravna ako ne dođe do proboja izolacije za dane ispitne napone te ako su mjerni rezultati zadovoljavajućih mjernih vrijednosti. Mjerenje otpora izolacije i indeksa polarizacije je efektivna i često korištena dijagnostička metoda, te se aplicira na više vrsta strojeva. Vrijednost indeksa polarizacije  $N=1$ , pokaziva vlažnost namota zaprljanje i nespremnost pogona za obavljanje svojih funkcija, ali je za vrijednosti indeksa polarizacije višeg od 2 izolacija zadovoljavajuća. [15]

#### **3.3.2. Mjerenje kuta dielektričnih gubitaka i kapaciteta izolacije statora**

Metoda je primjenjiva za statore motora i statore velikih generatora s neposrednim hlađenjem vodom, gdje postoji vjerojatnost curenja vode. Rast vrijednosti kapaciteta indicira vlagu u izolaciji ili zaprljanja krajeva namota vodljivim materijalom. Instrumenti za mjerenje kapaciteta moraju imati točnost veću od 0,1 %. Pad kapaciteta za 1% tijekom godine dana je upozorenje na termičko preopterećenje, dok porast za 5% indicira dosta veću vlažnost namota. Izvođenje testa se odvija pri međusobno izoliranim fazama i odspojenim kablovima. Tijekom ispitivanja jedne faze, druge dvije su uzemljene. Prvo se mjeri kapacitet pri nižem naponu, otprilike  $0,2 U_n$ , nakon toga se poveća na  $0,6 U_n$  te se mjeri kapacitet. Relativni kapacitet se računa danim izrazom [15].

Relativni kapacitet [15]:

$$\Delta C = \frac{C_{hv} - C_{lv}}{C_{lv}} \quad (3.2)$$

Gdje je:

$\Delta C$  – relativni kapacitet

$C_{hv}$  – kapacitet pri višem naponu

$C_{lv}$  – kapacitet pri nižem naponu

Iz odnosa radne i kapacitivne komponente struje kroz dielektrik odredi se faktor dielektričnih gubitaka ili kut gubitaka. Porast  $\tan\delta$  znači pojavu oštećenja izolacije. Pri nižim naponima gubici rastu zbog starosti, vlage ili nečistoća, a pri višim naponima zbog parcijalnih pražnjenja. [15]

### 3.3.3. Provjera izolacije visokim naponom

Ispitivanjem izolacije mjeri se struja postepenim naponskim koracima, gdje se traži koeficijent apsorpcije koji je definiran kao odnos između izmjerenih struja višeg i sljedećeg nižeg naponskog nivoa. Ispitni napon je veći od najvećeg izmjeničnog nazivnog napona. U slučaju stradanja izolacije, što znači da izolacija nije izdržala test, mijenja se oštećeni štap ili cijeli namot. Najčešći ispitni napon je  $2U_n$ . Slično se izvodi kao i visokonaponsko ispitivanje istosmjernim naponom te spada pod destruktivne metode. Ključna razlika između ove dvije metode je u veličini ispitnog napona i njegovoj raspodjeli kroz izolacije namota. [2]

### 3.3.4. Mjerenje parcijalnih izbijanja

Do parcijalnih izbijanja dolazi pri kritičnim jakostima električnog polja. Veliki iznosi električnih polja su uzrokovani dielektričnom konstantom materijala i oblikom volumena tijela. Parcijalno izbijanje nastaje kad se prijeđe granica električne čvrstoće šupljina. Za detekciju se koriste osjetljivi visokofrekventni uređaji. Napon se podiže tijekom testa i

analiziraju se parcijalna pražnjenja na osciloskopu. Prvo očitavanje parcijalnog pražnjenja se dogodi pri naponu paljenja. Zatim se napon diže na nazivnu ispitnu vrijednost. Test se obavlja od 10 do 15 minuta da se parcijalna pražnjenja mogu stabilizirati, a potom se snime najveće vrijednosti pražnjenja. [2,14,15]

### **3.3.5. Provjera izolacije između zavoja rotorskog namota**

Mjeri se pad napona i impedancije svakog pola s ciljem ispitivanja međuzavojne izolacije namota na rotoru. Autotransformator 120/240 V i voltmetar su ključni dijelovi opreme. Narine se izmjenični napon koji neće podići vrijednosti iznad nazivnih. Napon se mjeri na krajevima stezaljki svakog pola. Polovi s manjim naponom kratko su spojeni. Impedancija se može mjeriti multimetrom. Narine se napon za svaki individualni pol do vrijednosti struje od 10 A. Izmjerene napon se ne smije razlikovati za više od 10% od ostalih polova jer to ukazuje na kratki spoj. Otpor namota se računa pomoću izraza [15]:

$$R = \frac{P}{I^2} \quad (3.3)$$

Gdje je:

R – otpor

P – aktivna snaga

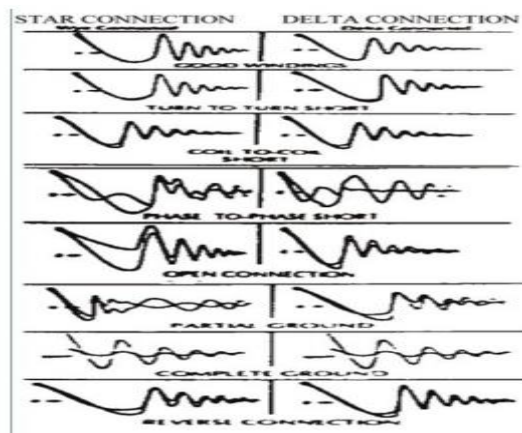
I – struja

### **3.3.6. Provjera simetrije statorskog namota udarnim naponom**

Ispitivanje iz naslova spada u vrstu provjere električne čvrstoće VN izolacije. Provjera udarnim naponom skupa s visokim naponom čini ovo ispitivanje predvidljivim što olakšava posao. Izrazito efektivno je u preveniranju nastanka kratkog spoja. Dovede se udarni naponski val na jedan namotaj, dok se preostala dva namota uzemlje, skupa s kućištem statora. Opisana metoda je zamjena za ispit slabih mjesta izolacije. Metodom se otkrivaju skriveni kratki spojevi u namotima rotacijskih strojeva. Preciznije mjerenje je omogućeno zbog valnog svojstva napona. Zapravo se mjere i kompariraju pobuda i odziv vala udarnog napona. Val je nužno kreirati, zabilježiti i analizirati razlike pobude i odziva. Udarni napon se ne smije miješati s pojmom prenapona 1,2/50  $\mu$ s ili prenaponima oblika 8/20  $\mu$ s, 250/2500



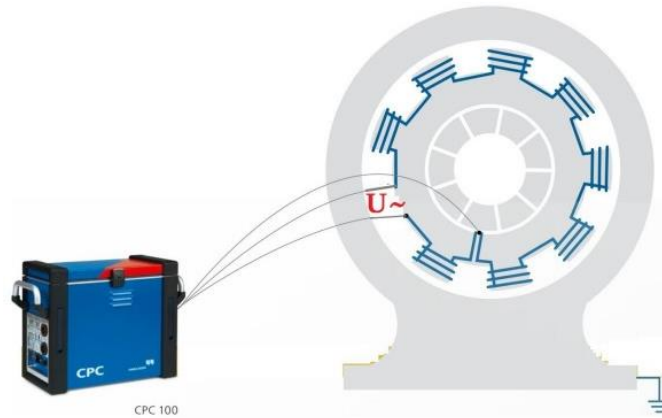
$\mu$ s. [14] Promjena odziva udarnog vala od pobudnog vala je rezultanta kratkog spoja u izolaciji. Negativne pojave su prikazane valovima na slici 3.1.



Slika 3.1. Valne greške simetrije namota [14]

### 3.4. Mjerenje impedancije po polu

Metoda mjerenja impedancije po polu ne može rano i preventivno otkriti kratki spoj. Nužno je poznavati stanje sustava zbog raznih nesimetrija. Nesimetrije magnetskih rotorskih polja uzrokovane su kratkim spojevima međuzavojnog rotorskog namota koji čini pol rotora te ima neposredan utjecaj na stvaranje vibracija vratila stroja. To stvara napon vratila, uzrokuje nesimetriju faznih struja generatora, mijenja toplinsko stanje u stroju. Izmjere se padovi napona na tim spojevima. Polovi, prikazani na slici 3.2, s manjim vrijednostima napona su kratkospojeni ako su im vrijednosti odstupile oko 10% od ostalih napona. Izravnom mjerenju napona namota se pristupa individualno. Dovodi se napon na namot pola i mjeri se struja. Omjer narinutog napona i struje koja teče kroz namot je impedancija. Kratak spoj je vjerojatnost ako impedancija odstupa 10 i više % tvorničke vrijednosti. [14]



Slika 3.2. Serijsko mjerenje impedancije po polu [14]

### 3.5. Magnetska ispitivanja statorske jezgre

Pristup kod traženja problema koji nastaju u izolaciji dinamo limova, željeznih limova u statorskoj jezgri sinkronih generatora u elektranama je stvaranje izmjeničnih magnetskih tokova dovoljno velikih da podignu temperaturu na mjestima oštećenja izolacije dinamo limova za minimalno 5 °C iznad temperature jezgre statora. To je moguće postići umetanjem nekoliko zavoja napajani vanjskim izmjeničnim izvorom napajanja. Za stvaranje takvih uvjeta nužan je dosta jak izvor napajanja. Tako stvoreni izmjenični magnetski tok je jako bitan jer istosmjerni ne bi stvorio vrtložnu struju. Zatim slijedi snimanje termokamerom i traganje za vrućim mjestima. Mjesta kvara, proboji ili prekidanje električne izolacije između dinamo limova i željeznih limova se zovu vruća mjesta. Uzrokuju nastanak vrtložnih struja koje su štetne zbog toplinskih gubitaka. [14]

### 3.6. Pokus zagrijavanja i hlađenja

Kad je stroj opterećen bliže nazivnim vrijednostima, provodi se pokus zagrijavanja. Nužno je održavati opisano stanje bez velikih oscilacija do ostvarenja stacionarnog toplinskog stanja gdje se temperatura mijenja za nekih 0,5 °C po satu. U slučaju neostvarenja održivog stanja, preračunavaju se dobivene vrijednosti na nazivno stanje. Nadtemperatura za statorski namot se određuje za nazivno opterećenje sljedećim izrazom [8]:

$$\Delta\vartheta_n = \Delta\vartheta_{mj} \left( \frac{I_n}{I_{mj}} \right)^2 \quad (3.4)$$

Gdje je:

$\Delta\vartheta_n$  – nadtemperatura statorskog namota pri nominalnom opterećenju

$\Delta\vartheta_{mj}$  – mjerena nadtemperatura statorskog namota

$I_n$  – nazivna struja statora

$I_{mj}$  – mjerena struja statora

### 3.7. Ispitivanje vibracija

Vibracije u strojevima mogu biti rotacijske i linijske. Česti uzrok vibracija je neuravnoteženost rotora u stroju. Centrifugalne sile izazvane neuravnoteženošću, kao i druge sile na rotoru kao što su magnetske i hidrauličke sile, izazivaju vibracije rotora i osovine rotora. Vibracije se prenose na kućište ležaja i oslonce stroja preko valjnih elemenata u ležajevima ili preko uljnog filma u kliznim ležajevima [18]. Amplituda prenesenih vibracija se analiziraju Fourierovom transformacijom [14].

Vibracije unutar električnih strojeva se pojavljuju zbog [14]:

- oštećenog ležaja,
- disbalansiranog rotora,
- lošeg temelja,
- nepravilnog postavljanja i temeljenja,
- lokalne rezonancije građevnih dijelova,
- rotacijskih i stacionarnih dijelova i
- električnih i magnetskih nesimetrija.

Mjerenje vibracija osovine i ležaja donosi najviše informacija te spada pod prioriteta ispitivanja vezanih za vibracije [22].

## 4. ISPITIVANJE SINKRONOG GENERATORA U HE SALAKOVAC

U HE Salakovac se nalazi sinkroni generator koji služi za proizvodnju električne energije. Jedan je od tri sinkrona generatora vertikalne izvedbe, snage 75 000 kVA. Klasa izolacije mu je F. Prijenos momenta ostvaren je putem osam cjevastih prizona između osovine turbine i zvijezde rotora, koja nosi kočioni prsten i ventilacijske zaslone. Sve radijalne i aksijalne sile generatora preuzimaju dva vodeća i jedan noseći ležaj. Generatorski prostor od turbinskog prostora podijeljen je donjim pokrovom generatora. Generator je odvojen od okoline donjim i gornjim pokrovom te armiranim betonskim zidom. Na vanjskom obodu kućišta generatora nalaze se generatorski hladnjaci koji od zraka dovedenog ventilacijskim djelovanjem rotora preuzimaju toplinu stvorenu u aktivnom dijelu generatora [17]. Opisani sinkroni generator je specifičan jer je HE Salakovac bila zahvaćena ratnim oštećenjima u kojima je bila nekim dijelom potopljena. Za vraćanje hidroelektrane su izvedena ispitivanja, analiziranja, testiranja, predviđanja budućih radova koji se detaljno vode u opsežnoj dokumentaciji. Sva naredna mjerenja su prethodno obrađena.

### 4.1. Nazivni podaci sinkronog stroja

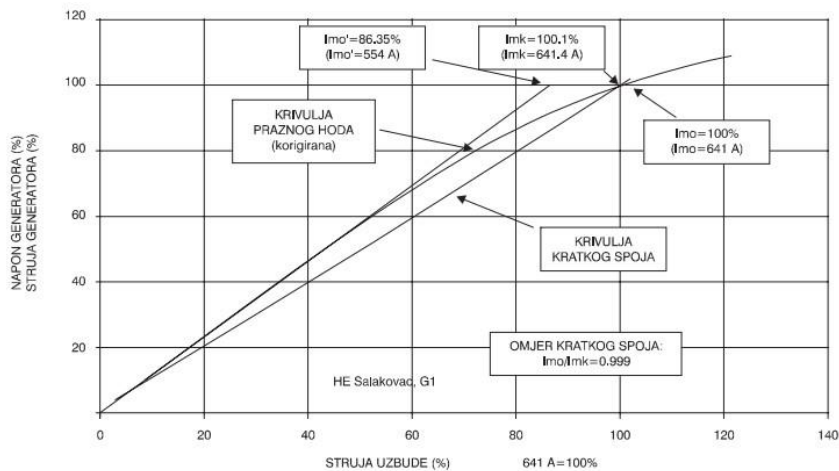
U tablici 4.1 su dani nazivni podaci prethodno opisanog sinkronog generatora koji se nalazi u HE Salakovac.

Tablica 4.1. Nazivni podaci sinkronog generatora u HE Salakovac [17]

Sinkroni generator	
Proizvođač	Rade Končar
Tip	S 7708-40
Tvornički broj	13870
Godina proizvodnje	1981
Snaga	75000 kVA
Napon	13 800 V $\pm$ 5 %
Struja	3183 A $\pm$ 5 %
Cos $\Phi$	0,9
Brzina vrtnje	150/455 $min^{-1}$ (390 $min^{-1}$ )
Frekvencija	50 Hz
Uzbuda	198 V, 1225 A
Klasa izolacije statora	F
Klasa izolacije rotora	F

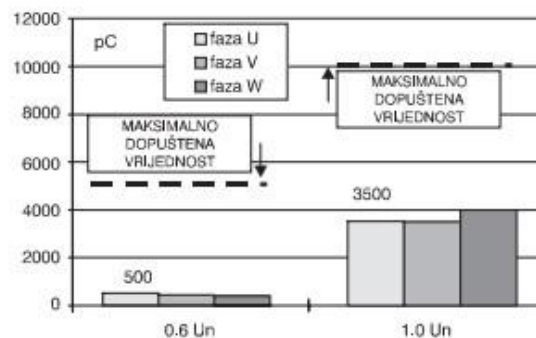
## 4.2. Kontrolno mjerenje i ispitivanje sinkronog generatora

Kontrolno mjerenje i ispitivanje sinkronog generatora se provodi s ciljem preventivnog održavanja kao direktne veze s ispitivanjem električnih strojeva kao i njihovom analiziranju te planiranju budućih radova. Iznimno važni podaci za predviđanje i podešavanje vremenskih intervala servisa, zamjene potrošnih dijelova, nabavke rezervnih ili pomoćnih dijelova te pripreme stroja za skidanje s pogona u povoljnijim uvjetima za rad. Sljedećom slikom 4.1 se prikazuju karakteristike praznog hoda i kratkog spoja.

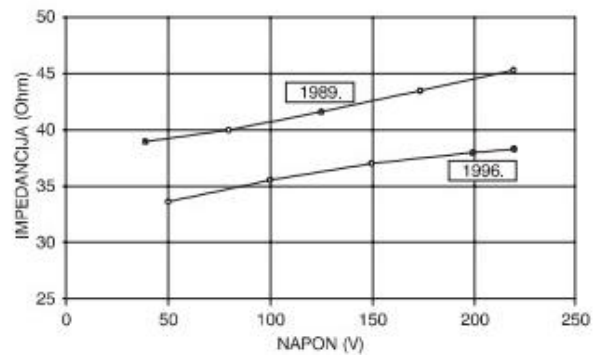


Slika 4.1. Karakteristike kratkog spoja i praznog hoda u HE Salakovac [17]

Također je obavljeno važno mjerenje parcijalnih izbijanja ilustrirano na slici 4.2., a usporedba impedancija rotora prije i nakon oštećenja na slici 4.3.



Slika 4.2. Mjerenje parcijalnih izbijanja [17]



Slika 4.3. Usporedba impedancija rotora [17]

Popis poduzetih aktivnosti je prikazan u tablici 4.2.

Tablica 4.2. Popis mjerenja i ispitivanja sinkronog generatora [19]

Mjerena veličina	Oznaka	
	Agregat 1	Agregat 2
Dijagnostički marker	1-MK	2-MK
Mjerenje aksijalnog pomaka	1-AX	2-AX
Mjerenje vibracija paketa statora	1-VP	2-VP
Mjerenje magnetskih indukcija	1-MX	2-MX
Mjerenje zračnog raspora, gornji davač	1-AG1	2-AG1
Relativni pomaci osovine, gornji vodeći ležaj, smjer 1	1-GR1	2-GR1
Relativni pomaci osovine, gornji vodeći ležaj, smjer 2	1-GR2	2-GR2
Apsolutne vibracije kućišta, gornji vodeći ležaj, smjer 1	1-GA1	2-GA1
Apsolutne vibracije kućišta, gornji vodeći ležaj, smjer 2	1-GA2	2-GA2
Temperatura gornjeg vodećeg ležaja, mjerno mjesto 1	1-TG1	2-TG1
Temperatura gornjeg vodećeg ležaja, mjerno mjesto 2	1-TG2	2-TG2
Relativni pomaci osovine, donji vodeći ležaj smjer 1	1-DR1	2-DR1
Relativni pomaci osovine, donji vodeći ležaj smjer 2	1-DR2	2-DR2
Apsolutne vibracije kućišta, donji vodeći ležaj, smjer 1	1-DA1	2-DA1
Apsolutne vibracije kućišta, donji vodeći ležaj, smjer 2	1-DA2	2-DA2
Temperatura donjeg vodećeg ležaja, mjerno mjesto	1-TD1	2-TD1
Struja generatora faze A	1-IA	2-IA
Struja generatora faze B	1-IB	2-IB
Struja generatora faze C	1-IC	2-IC
Linijski napon generatora A	1-UA	2-UA
Linijski napon generatora B	1-UB	2-UB
Linijski napon generatora C	1-UC	2-UC
Struja mreže faze A	1-Ia	2-Ia
Struja mreže faze B	1-Ib	2-Ib
Struja mreže faze C	1-Ic	2-Ic
Linijski napon mreže A	1-Ua	2-Ua
Linijski napon mreže B	1-Ub	2-Ub
Linijski napon mreže C	1-Uc	2-Uc
Napon uzbude	1-Uu	2-Uu
Struja uzbude	1-Iu	2-Iu
Struja zvjezdišta generatora, faza A	1-IzA	2-IzA
Struja zvjezdišta generatora, faza B	1-IzB	2-IzB
Struja zvjezdišta generatora, faza C	1-IzC	2-IzB

### 4.3. Protokol ispitivanja sinkronog generatora

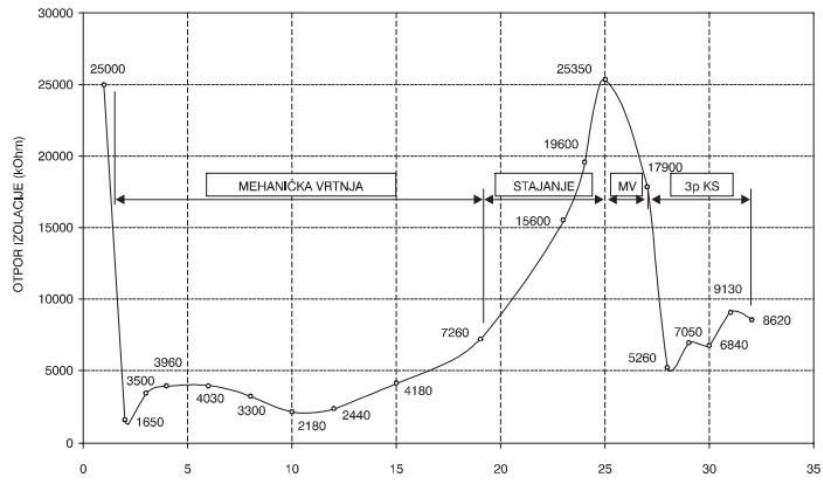
Dogovoreni i ustaljeni protokol ispitivanja sinkronog generatora prikazan je u tablici 4.3.

Tablica 4.3. Protokol ispitivanja sinkronog generatora [17]

r.broj	Aktivnost	Očekivana vrijednost	Izmjerena vrijednost	Napomena
1.	Mjerenje otpora namota			
1.1	Otpor namota armature	0.65 $\Omega$	0.62 $\Omega$	OK
1.2	Otpor namota pomoćnih polova	0.4 $\Omega$	0.39 $\Omega$	OK
1.3	Otpor namota uzbude	0.5 $\Omega$	0.49 $\Omega$	OK
2	Mjerenje otpora izolacije			
2.1	Rotorski namot ispitnim Naponom 1 – 5 KV	> 120 M $\Omega$	670 M $\Omega$	OK
3.	Pokus visokim naponom(2xUn) na statorskom namotu	>120 M $\Omega$	1400 M $\Omega$	OK
4.	Impedancija po polovima rotora	1 $\Omega$	1.3 $\Omega$	OK
5.	Indeks polarizacije	2	1	Namot je zaprljan i vlažan,potrebno izvršiti sušenje i čišćenje
6.	Intenzitet parcijalnih pražnjenja	<=30 db	37.5 db	OK
7.	Tangens kuta dielektričnih gubitaka[ $\text{tg}\delta(\omega,2)$ ]	0.04	0.404	Promjena od 1% ukazuje na oštećenje izolacije(zagrijavanje,vlažnost ili oštećenje)
8.	Brzina vibracija kućišta statora(G/S/D) za P.H(13800V)	0.52/0.41/0.20 mm/s		OK
9.	Kapacitet izolacije(relativna vrijednost $\Delta C$ )	1%	2%	Opadanje kapaciteta izolacije i povećanje $\text{tg}\delta$ ukazuju na oslabljenu izolaciju
10.	Mjerenje temperature izolacije(klasa F)	>100°C	97°C	OK

Promjena otpora izolacije na generatoru G1 je prikazana slikom 4.4.





Slika 4.4. Promjena otpora izolacije generatora G1 [17]

## 5. ZAKLJUČAK

Cilj ovog diplomskog rada je bio obraditi opsežnu temu ispitivanja sinkronih generatora što spada pod ispitivanja električnih strojeva. Objasnjena je razlika generatora i motora kao i podjela sinkronih generatora na hidrogeneratore i turbogeneratore koji se razlikuju po veličini, brzini okretanja i funkciji.

Sinkroni generatori kao ključni elementi elektroenergetskog sustava su detaljno obrađeni od njihove mehaničke konstrukcije, raznih funkcija, važnosti te naravno ispitivanja i testiranja kako bi se osigurao što pouzdaniji, ekonomičniji i sigurniji rad strojeva kao i duži životni vijek.

Ispitivanje električnih strojeva predstavlja veliki broj raznih testova od kojih su najbitniji kratki spoj, prazni hod, stabilnost generatora te ispitivanje izolacijskog sustava.

Za primjer je uzeta hidroelektrana HE Salakovac gdje su prikazani mjerni rezultati provedenih ispitivanja kratkog spoja, praznog hoda, parcijalnih izbijanja, impedancije rotora, izolacijskog sustava, vibracija, temperatura, svih struja i napona, zračnog raspora te magnetske indukcije.

## LITERATURA

- [1] Mandić, I., Tomljenović, V., Pužar, M., *Sinkroni i asinkroni električni strojevi*, Tehničko veleučilište u Zagrebu, Elektrotehnički odjel, Zagreb, 2012.
- [2] Stone G. C. i dr. *Electrical insulation for rotating machines*, IEEE Press, 2014.
- [3] Gill, P. *Electrical Power Equipment Maintenance and Testing - 2nd Edition*. Taylor & Francis group. New York, 2008.
- [4] Milanović, D. *Ispitivanje sinhronih mašina*. Internacionalni fakultet Travnik, Travnik, 2019.
- [5] Živaković, D., *Dijagnostika kablskih mreža metodom preostalog napona*, 6. savjetovanje HK CIGRE, Cavtat, 09.-13.11.2003., R.B1-02, 13-20
- [6] Mijović, B, *Održavanje strojeva i uređaja*. Veleučilište u Karlovcu, Karlovac, 2019.
- [7] Kundur, P., *Power system stability and control*, Electric powerresearch institute, McGrawHillInc.,Surrey, SAD, 1993.
- [8] ] Haračić, D. *Dijagnostičke metode za procjenu stanja izolacije namota sinhronih generatora*. 12. savjetovanje bosanskohercegovačkog komiteta-Neum. 04 – 08.10.2015.
- [9] Josza, L., *Vođenje pogona elektroenergetskog sustava*, Elektrotehnički fakultet Osijek, Zavod za elektroenergetiku, Grafika, Osijek, 2008.
- [10] Erceg, I., *Uzbudni sustavi sinkronih generatora, Sustavi uzbude, Sinkroni strojevi i uzbudni sustavi*, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zavod za energetiku i automatizaciju, Zagreb, 2011.
- [11] *Mrežna pravila elektroenergetskog sustava*, Ministarstvo gospodarstva, rada i poduzetništva, Zagreb, 2006
- [12] Machowski, J. ,Bialek, J.W., Bumby J.R., *Power system dynamics: Stability and control*, JohnWiley&SonsLtd, Chichester, UK, 2008.
- [13] Krčum, M., *Električni strojevi I*, Split, Sveučilište u Splitu, Sveučilišni odjel za stručne studije, 2009.
- [14] Mandarić ,A. *Testing synchronous generators*. PP HEP Jug Split,Split,2005, pp 28-351.
- [15] Dino Haračić, Magistarski rad: *"Revitalizacija sinhronog generatora u cilju produženja životne dobi"*, Fakultet elektrotehnike Univerzitet u Tuzli, Maj 2015 g
- [16] Marić. J. *Sinkroni generator s istaknutim polovima*. Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku. Osijek, 2017. [view \(nsk.hr\)](http://nsk.hr) [5.9.2022.]

- [17] Vajzović, J., Korajlić, V. *Pogonska dokumentacija HE Salakovac*. BIH, 1997.
- [18] ] de Silva, C.W. *Vibration Fundamentals and Practice*. Taylor & Francis group. New York, 2006.
- [19] Meško, B., Orešković, G. Djelić,, V. *Tehnički projekt i tehnički opis opreme sustava za trajni dijagnostički nadzor sa integriranim nadzorom kavitacije i korisnosti u HE Peruća*
- [20] Vražić, M., *Sinkroni stroj, Elektromehaničke i električne pretvorbe*, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zavod za elektrostrojarstvo i automatizaciju, Zagreb, 2012
- [21] Wolf, R., *Osnove električnih strojeva*, Zagreb, 1995
- [22] <https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/vibracije.pdf> [27.8.2022.]
- [23] [hidrogenerator - Google pretraživanje](#) [28.8.2022.]
- [24] [Turbogenerator – Wikipedija \(wikipedia.org\)](#) [1.9.2022.]
- [25] Krčum, M. *Repetitorij s laboratorijskim vježbama iz električnih strojeva*, Sveučilište u Splitu, Sveučilišni odjel za stručne studije, Split, 2009

## POPIS SLIKA

Slika 2.1. Presjek željezne jezgre 2-polnog sinkronog stroja s cilindričnim rotorom [1] .....	5
Slika 2.2. Presjek željezne jezgre 6-polnog sinkronog stroja s istaknutim polovima [1].....	6
Slika 2.3. Shema spoja sinkronog generatora u praznom hodu [1] .....	8
Slika 2.4. Mjerna karakteristika praznog hoda [1] .....	9
Slika 2.5. Shema mjerenja karakteristike kratkog spoja sinkronog generatora [1] .....	10
Slika 2.6. Mjerena karakteristika kratkog spoja [1] .....	10
Slika 2.7. Pogonska karta [1].....	11
Slika 2.8. Oblik vala elektromotorne sile [4] .....	13
Slika 2.9. Krivulje regulacije [1] .....	14
Slika 2.10. Švedski dijagram [1] .....	14
Slika 2.11. Dijagram $v$ – krivulje [1].....	15
Slika 2.12. Vanjska karakteristika sinkronog generatora [25].....	16
Slika 2.13. Shema za snimanje vanjske karakteristike sinkronog generatora [25].....	17
Slika 2.14. Klasifikacija stabilnosti u elektroenergetskom sustavu [7].....	18
Slika 2.15. Dijagram odziva kuta rotora [7] .....	19
Slika 2.16. Funkcijska blokovska shema sustava uzbude sinkronog generatora [12].....	21
Slika 3.1. Valne greške simetrije namota [14].....	28
Slika 3.2. Serijsko mjerenje impedancije po polu [14].....	29
Slika 4.1. Karakteristike kratkog spoja i praznog hoda u HE Salakovac [17] .....	32
Slika 4.2. Mjerenje parcijalnih izbivanja [17] .....	32
Slika 4.3. Usporedba impedancija rotora [17].....	33
Slika 4.4. Promjena otpora izolacije generatora G1 [17] .....	36

## **POPIS TABLICA**

Tablica 4.1. Nazivni podaci sinkronog generatora u HE Salakovac [17].....	31
Tablica 4.2. Popis mjerenja i ispitivanja sinkronog generatora [19].....	34
Tablica 4.3. Protokol ispitivanja sinkronog generatora [17] .....	35