

# Vrste pogonskih strojeva sinkronih generatora

---

Sušanj, Robert

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:937943>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-08**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET

Prijediplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Završni rad

**VRSTE POGONSKIH STROJEVA SINKRONIH GENERATORA**

Rijeka, rujan 2023.

Robert Sušanj

0069084679

SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET

Prijediplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Završni rad

**VRSTE POGONSKIH STROJEVA SINKRONIH GENERATORA**

Mentor: Doc. dr. sc. Rene Prenc

Rijeka, rujan 2023.

Robert Sušanj

0069084679

Rijeka, 10. ožujka 2023.

Zavod: **Zavod za elektroenergetiku**  
Predmet: **Električni strojevi**  
Grana: **2.03.02 elektrostrojarstvo**

## ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Robert Sušanj (0069084679)**  
Studij: Sveučilišni prijediplomski studij elektrotehnike

Zadatak: **Vrste pogonskih strojeva sinkronih generatora / Types of drive engines for synchronous generators**

### Opis zadatka:


U završnom radu će se prikazati način rada i izvedbe sinkronih generatora. Posebno će biti obrađeni sinkroni generatori prema vrsti pogonskog stroja (turbogeneratori, hidrogeneratori i dizelski generatori). Navedenim pogonskim strojevima će se detaljno prikazati konstrukcijske značajke i princip rada, te navesti konkretne primjere uporabe. Također će poseban fokus biti stavljen na opis uzbudnih sustava, te na konstruiranje pogonske karte sinkronih generatora, ovisno o tipu pogonskog stroja.

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

*Sušanj Robert*

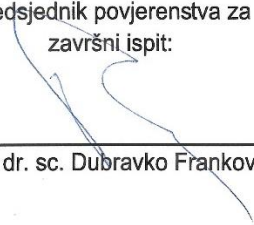
Zadatak uručen pristupniku: 20. ožujka 2023.

Mentor:



Doc. dr. sc. Rene Prenc

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:

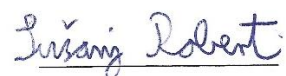


Prof. dr. sc. Dubravko Franković

## IZJAVA

Sukladno članku 8. Pravilnika o završnom radu, završnom ispitu i završetku preddiplomskih sveučilišnih studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, izjavljujem da sam samostalno izradio završni rad pod naslovom „Vrste pogonskih strojeva sinkronih generatora“ uz vodstvo mentora doc. dr. sc. Rene Prenca.

Rijeka, rujan 2023.



Robert Sušan

# ZAHVALNICA

Prvo bih se želio zahvaliti svom mentoru doc. dr. sc. Rene Prencu na svim smjernicama i dostupnosti tijekom izrade ovog završnog rada.

Također bih se želio zahvaliti svim profesorima i asistentima Tehničkog fakulteta na svom prenesenom znanju tijekom studiranja.

Zahvaljujem se svim svojim kolegama i prijateljima što su mi studiranje učinili zanimljivijim, lakšim i kvalitetnijim.

Na kraju, najveće hvala ide mojoj obitelji koja je uvijek bila puna razumijevanja, strpljenja i najveća potpora kroz cijelo moje školovanje i u lijepim i u teškim trenucima.

# Sadržaj

1. UVOD .....	1
2. SINKRONI GENERATOR .....	2
3. NAČIN RADA SINKRONOG GENERATORA .....	4
4. IZVEDBE SINKRONIH GENERATORA .....	6
5. TURBOGENERATOR .....	9
5.1. Izvedbe turbogenerators .....	11
5.2. Područja primjene turbogenerators .....	12
5.3. Parna turbina .....	13
5.4. Plinska turbina .....	14
6. HIDROGENERATOR .....	16
6.1. Izvedba hidrogenerators .....	17
6.2. Područja primjene hidrogenerators .....	18
6.3. Vodna turbina .....	19
7. DIZELSKI GENERATORI .....	21
7.1. Izvedbe dizelskih generators .....	22
7.2. Područja primjene dizelskih generators .....	24
7.3. Dizelski motor .....	25
8. UZBUDNI SUSTAVI SINKRONOG GENERATORA .....	27
9. POGONSKA KARTA SINKRONOG GENERATORA .....	29
9.1. Pogonska karta turbogenerators .....	30
9.2. Pogonska karta hidrogenerators .....	34
10. ZAKLJUČAK .....	39
11. LITERATURA .....	40
SAŽETAK .....	42
ABSTRACT .....	42

## 1. UVOD

Sinkroni generatori uvedeni su kao vrsta izmjeničnih električnih strojeva, zajedno sa njihovom važnosti u svakodnevnom životu. Moderna tehnologija svakim danom se sve brže razvija, a s njom je i sve veća potreba za električnom energijom. Proizvodnja električne energije u elektroenergetskom sustavu, u najvećoj mjeri dolazi upravo iz sinkronih generatora. Osnovna namjena sinkronog generatora je pretvorba mehaničke energije dobivene od pogonskog stroja (npr. turbine) u električnu energiju koju predaju mreži (npr. trošilima) osiguravajući tako pouzdan i stabilan izvor energije.

Električnu energiju koju koristimo u našim domovima ili industriji uglavnom proizvodi sinkroni generator. Iz tog razloga, sinkroni generatori kao ključni elementi proizvodnje električne energije moraju neprestano raditi. Njihovi zastoji bi uzrokovali probleme u opskrbi električne energije, stoga ih je potrebno konstantno provjeravati.

Upotrebljavaju se najviše u elektranama, a još se mogu koristiti u vozilima i brodskim sustavima. Postoje mnoge vrste podjela sinkronih generatora, a najčešća je ona prema vrsti pogonskog stroja, gdje razlikujemo turbogeneratore, hidrogeneratore i dizelske generatore. Upravo će se na to obratiti posebna pozornost u ovom radu.



## 2. SINKRONI GENERATOR

Sinkroni generator je veliki rotacijski električni stroj. Može biti jednofazni i trofazni, no zbog nekih tehničkih i ekonomskih prednosti najviše se koristi trofazni. Veliki sinkroni generatori koriste se u nuklearnom, termoenergetskom i hidroenergetskom sustavu za stvaranje napona.

Njegova glavna uloga je pretvorba mehaničke energije u električnu energiju koju predaju mreži (trošilima). Mehanička energija je dobivena od pogonskog stroja (npr. turbine ili dizelskog motora). Vrijede sljedeći izrazi:

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

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

Gdje je:

$P_{el}$  – električna snaga [W]

$P_{meh}$  - mehanička snaga [W]

E – elektromotorna sila [V]

I – struja [A]

B – magnetska indukcija [T]

l - duljina vodiča [m]

v – brzina gibanja vodiča [m/s]

F – sila [N]

Snaga sinkronog generatora je ovisna o njegovoj namjeni i vrsti pogonskog stroja. Ako se koriste kao pričuveni izvori, snaga iznosi oko 50 MVA, a za potrebe elektroenergetskih sustava može iznositi i do nekoliko tisuća MVA. To je najveća snaga bilo kojeg električnog stroja.

Sinkroni generator se još naziva i alternator zato što proizvodi električnu energiju izmjenične struje (njem. alternator = izmjeničan).

Sinkroni generator sadrži tri namota:

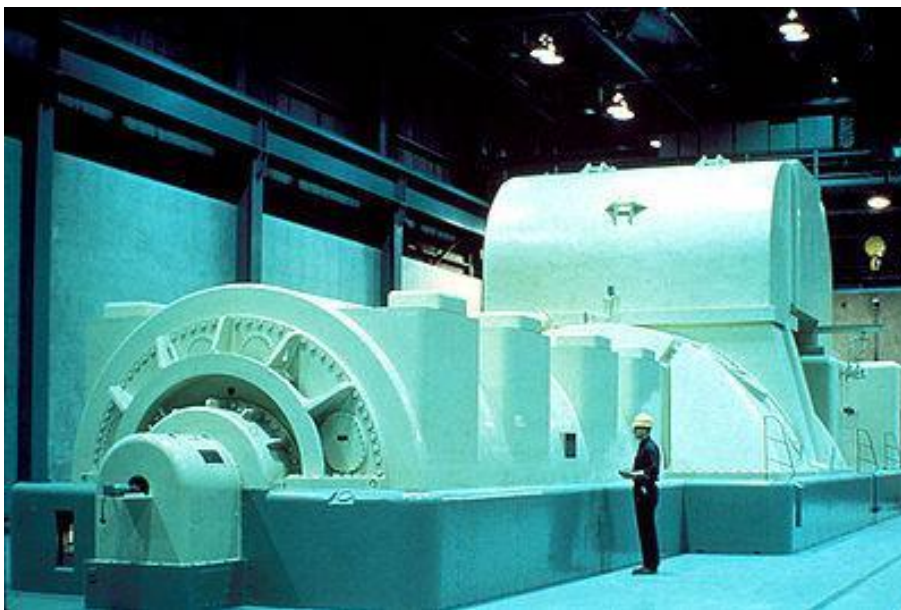
- armaturni namot
- uzбудni namot
- prigušni namot

Generatori većih snaga sadrže sva tri namota, no kod motora s permanentnim magnetima, gdje je manja snaga, ne postoji uzbudni namot.

Armaturni namot je smješten na statoru generatora simetrično raspoređen po obodu stroja. U njemu se inducira napon pod utjecajem promjene magnetskog toka. Prilikom izrade armaturnog namota, potrebno je dobiti tri sinusna napona koji sadrže jako malo viših harmonika. Viši harmonici mogu biti vrlo štetni za strojeve.

Uzbudni namot nalazi se na rotoru i izvodi se na više načina. Prvi je preko četkica i kliznih kolutova, gdje se klizanjem četkica odvija prijenos energije po kolutima čime se napaja strojna uzbuđa. Drugi način je izveden pomoću beskontaktnog sustava uzbuđe, u kojem se iz izmjeničnog uzbudnika dobije istosmjerna struja s armaturom na rotoru.

U obod istaknutih polova rotora se često ugrađuju prigušni namoti. Oni smanjuju nepoželjne dodatne gubitke i prenapone u prijelaznim stanjima i pri nesimetričnim opterećenjima sinkronog generatora.



*Slika 2.1. Sinkroni generator*

### 3. NAČIN RADA SINKRONOG GENERATORA

Sinkroni generator se zasniva na principu elektromagnetske indukcije, tj. kada se promijeni magnetski tok u vodiču, u njemu se inducira, elektromotorna sila. Kako bi se inducirao izmjenični napon, potrebno je da magnetsko polje bude presijecano vodičima armature. To je moguće postići rotacijom istosmjernog elektromagnetskog polja, koje je dobiveno puštanjem struje kroz vodiče u utorima rotora i tada rotor dobiva ulogu elektromagneta. Rotor je spojen na zajedničku osovinu s izvorom mehaničkog rada (npr. turbinom ili motorom s unutarnjim izgaranjem). Kako se vrti rotor, tako se vrti i njegovo magnetsko polje, kojeg stvara uzbudni namot, kroz koji teče istosmjerna struja. Silnice magnetskog polja će pri vrtnji sjeći vodiče statora, i tako objediniti namot postavljen u utorima statora. Magnetsko polje je konstantno nepokretno. Stvaranje magnetskog polja na rotoru ima veliku prednost, a to je da se izmjenična struja ne mora odvoditi preko četkica i kliznih koluta. Pri visokom naponu ili struji to predstavlja veliki problem. Za uzbudu rotorskog namota, istosmjerni napon iznosi do 500 V, a potrebna je i relativno mala uzbudna snaga. Općenito, kod sinkronih rotacijskih strojeva, okretno magnetsko polje i rotor su sinkronizirani, te od tuda dobivamo naziv sinkroni.

Radi promjene polariteta magnetskog polja u zračnom rasporu, vodiči statora presijecani magnetskim poljem induciraju napon. Statorski namot ima tri prostorno pomaknute faze, te se u njima induciraju vremenski razmaknuti naponi za  $120^\circ$ . Tako nastaje trofazni sustav napona, koji bez priključene potrošnje ne može tjerati nikakvu struju, što znači da statorski namoti ne stvaraju magnetsko polje kada je generator u praznom hodu. Iznos napona je određen sljedećim izrazom:

$$E = B \cdot l \cdot v \quad (3.1)$$

Gdje je:

E – inducirani napon na vodiču [V]

B – magnetska indukcija [T]

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

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

Ili u obliku:

$$E = 4,44 \cdot \phi \cdot f \cdot N \cdot f_n \quad (3.2)$$

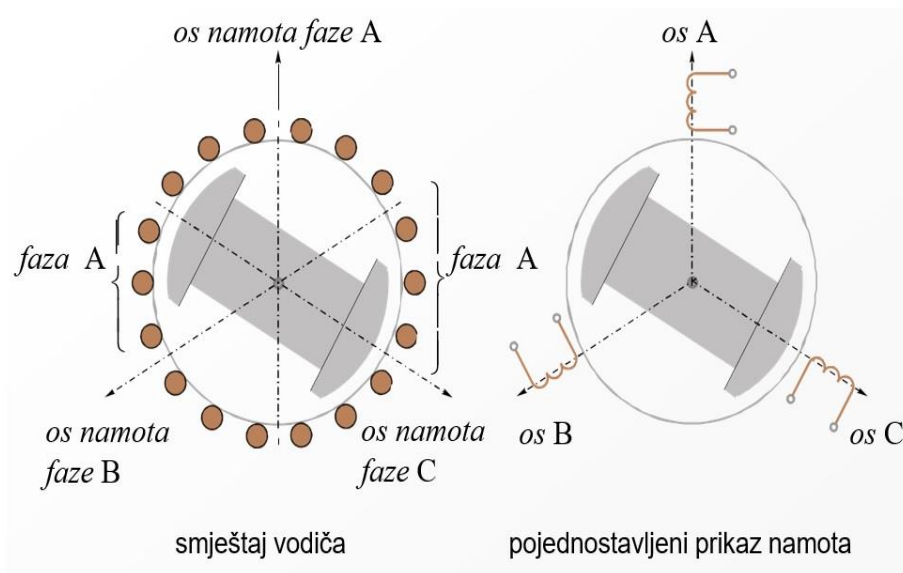
Gdje je :

$\Phi$  – magnetski tok [Vs]

$f$  – frekvencija [Hz]

$N$  – broj zavoja

$f_n$  – namotni faktor [Hz]



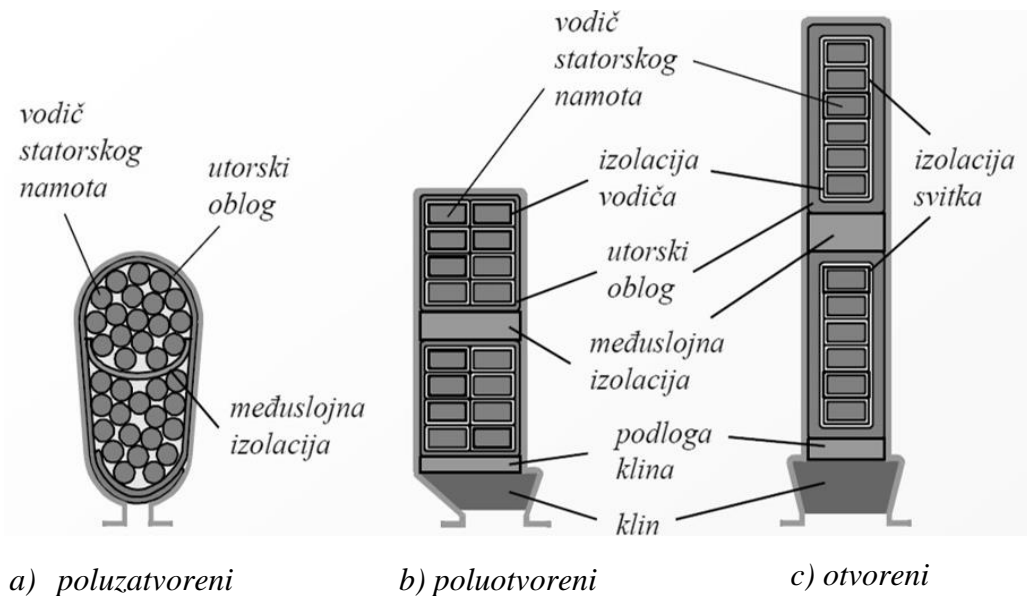
Slika 3.1. Shema 3-faznog statorskog namota

Priključkom trošila, inducirani napon kroz vodiče generatora statora potjera struju, pa dolazi do nastanka sile jer se vodiči nalaze u magnetskom polju rotora. Ta sila se suprotstavlja vrtnji rotora, odnosno koči ga. Kočna sila raste s povećanjem opterećenja generatora, što znači da je potrebna veća snaga pogonskog stroja, kako bi se zadržao konstantan broj okretaja. Napon generatora regulira se uzbuđnom strujom, a frekvencija brojem okretaja pogonskog stroja.

Ako se okreće osovina rotora, tada se napon neće inducirati. Tada magnetski tok ne postoji i zato neće biti puštena uzbuda.

## 4. IZVEDBE SINKRONIH GENERATORA

Osnovni dijelovi sinkronog generatora, kao i svih rotacijskih električnih strojeva su rotor i stator. Stator je izveden u obliku šupljeg valjka koji je sastavljen od prstenastih, međusobno izoliranih magnetskih limova, te je formiran paralelnim slaganjem. Na unutrašnjem obodu su u uzdužnom smjeru i na jednakim razmacima smješteni utori. Namot armature (u spoju zvijezda, trofazni) je postavljen unutar utora. Namot svake faze je raspodijeljen na nekoliko utora. Utori mogu biti građeni u poluzatvorenom, poluotvorenom i otvorenom obliku kao što je prikazano na slici 4.1. Poluzatvoreni oblik se koristi kod strojeva niskog napona, poluotvoreni kod strojeva srednjeg napona, a otvoreni kod strojeva visokog napona. Budući da nazivni napon stroja ovisi o njegovoj snazi, možemo isto tako reći da oblik utora ovisi o snazi stroja. Dijelovi statorskog paketa između utora nazivaju se zubi, a preostali dio statora čini jaram, koji je umetnut između utora i vanjskog promjera paketa statora.



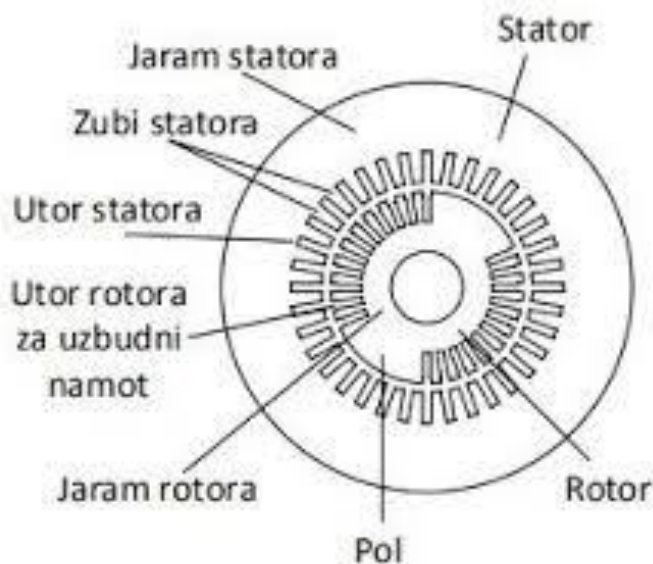
Slika 4.1. Oblici utora statora sinkronog generatora

Na rotoru je smješten uzбудni namot, kroz koji teče istosmjerna struja i tako stvara magnetsko polje. Sastoji se od osovine, jarma rotora i polova s uzbudnim namotom. Jaram je pričvršćen na osovinu i na njemu su urezani polovi. U šupljine tih polova se stavlja uzbudni namot. Kako bi se vodio potreban magnetski tok i kako bi se podnijela centrifugalna sila kojom je napregnut cijeli rotor pri vrtnji, jaram rotora mora biti točno mehanički i magnetski dimenzioniran za takav pothvat. Rotor, kao i stator sadrži međusobno izolirane, prstenaste magnetske limove. Limovi se koriste za smanjenje vrtložnih struja koje protječu kroz materijal i za održavanje mehaničke čvrstoće.

Sinkroni generator može imati dvije izvedbe rotora:

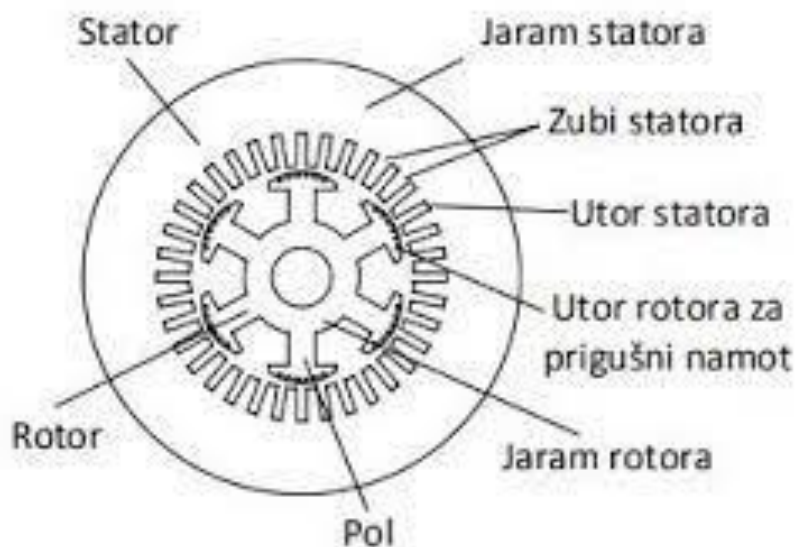
- turbo-rotor (cilindrični rotor)
- hidro-rotor (s istaknutim polovima)

Turbo-rotor (cilindrični rotor) je valjkastog oblika s paralelnim utorima u kojima je smješten uzbudni namot. Velike je duljine i relativno malog promjera. Koristi se kod izvedbi za velike brzine (više od 1000 o/min). Vanjski izvor istosmjerne struje doveden je na koncentrično postavljene prstenove preko četkica.



*Slika 4.2. Presjek željezne jezgre 2-polnog sinkronog generatora s cilindričnim rotorom*

Hidro-rotor (rotor s istaknutim polovima) se sastoji od elektromagneta postavljenih na valjak. Namoti elektromagneta proizvode elektromagnetsko polje, a armaturni namoti su na statoru na koji je narinut električni napon. Uzbudni namoti su namotani unutar istaknutih polova. Male je duljine i velikog promjera. Koristi se kod izvedbi za male brzine (do 1500 o/min) jer zbog pojave snažnih centrifugalnih sila takva konstrukcija ne bi podnijela velike brzine.



*Slika 4.3. Presjek željezne jezgre 6-polnog sinkronog stroja s istaknutim polovima*

Prema potrebi se izvode posebne vrste s pripadajućom konstrukcijom. Najbitniji podaci za proces izvedbe generatora su snaga koja je nastala poslije pretvorbe energije, te brzina vrtnje određena pogonskim strojem.

I tako stižemo do podjele sinkronih generatora prema vrsti pogonskog stroja:

- turbogeneratori
- hidrogeneratori
- dizelski generatori

## 5. TURBOGENERATOR

Turbogenerator je električni generator koji kao pogonski stroj koristi parnu ili plinsku turbinu. Radi takvih vrsta turbina stvaraju se velike brzine vrtnje, što dovodi do proizvodnje velikih centrifugalnih sila. Vrijednost centrifugalne sile raste proporcionalno s kvadratom brzine vrtnje i udaljenosti masa koje se rotiraju oko središta. Ova tvrdnja se može dokazati sljedećim izrazom:

$$dF_c = \frac{d \cdot m_{rtc} \cdot v_r^2}{\frac{d_r}{2}} \quad (5.1)$$

Gdje je:

$d \cdot m_{rtc}$  – djelić mase na obodu rotora

$v_r$  – obodna brzina [m/s]

$d_r$  – promjer rotora [m]

Obodna brzina  $v_r$  se dobiva pomoću formule:

$$v_r = \frac{d_r}{2} \cdot \frac{n\pi}{30} \quad (5.2)$$

Gdje je:

$d_r$  – promjer rotora [m]

$n$  – brzina vrtnje [okr/min]

Velika brzina vrtnje uvjetuje malen broj parova polova i izvedbu s cilindričnim rotorom. Formula za brzinu vrtnje:

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (5.3)$$

Gdje je:

$f$  – frekvencija mreže [Hz]

$p$  – broj pari polova generatora



Turbogenerator radi na principu elektromagnetske indukcije. Kada je turbina priključena na električni generator, tada kinetička energija pare zaustavlja ventilator turbine. U tom slučaju će se rotor električnog generatora okretati i proizvoditi električnu energiju. Turbogenerator ima sposobnost pretvorbe bilo kojeg oblika energije (voda, plin, zrak, itd.) u električnu energiju. Turbine se mijenjaju ovisno o primjeni i koriste se za iskorištavanje snage.

Turbogenerator ima mnoge prednosti poput:

- visoka pouzdanost i učinkovitost
- dugi vijek trajanja
- ne ovisi o temperaturi zraka
- jednostavan za korištenje
- vrlo jednostavan dizajn
- ekonomičniji u odnosu na druge tipove generatora

Ali ima i neke nedostatke kao što su:

- troškovi održavanja su visoki
- dostupan je u ogromnim veličinama i težak je
- koristi vrlo malu brzinu zraka
- velika mogućnost strujnog udara



*Slika 5.1. Turbogenerator*

Pošto generator mora imati najmanje dva pola, tj. jedan par polova, za europsku mrežu frekvencije 50 Hz, maksimalna brzina vrtnje iznosi 3000 okr/min. Radi toga, negativan utjecaj centrifugalnih sila neće doći do izražaja. Električna radna snaga je sjedinjena sa mehaničkom snagom pogonske turbine, a nazivna snaga je ustvari prividna snaga. Prividna snaga je zbroj vektora radne i jalove snage. Za turbogeneratore najvećih snaga (1.5 – 2 GVA) koristi se i brzina od 1500 okr/min, stoga turbogeneratori najčešće imaju dva ili četiri pola, te se turbogeneratori s takvim snagama nalaze u nuklearnim elektranama. Za brzohodne strojeve su također karakteristične takve brzine.

### **5.1. Izvedbe turbogenerators**

Rotirajući dijelovi turbogenerators su zbog velike brzine rada izloženi velikim mehaničkim naprezanjima. Kako bi rotor bio mehanički otporan u najvećim turbogeneratorima, najčešće ga se kuje od čvrstog čelika i legura poput kroma, nikla ili molibdena. Rotor turbogenerators je mali (oko 1 m), što znači da će imati manjak snage. Izvedbom rotora s izrazito većom dužinom nego li je sami promjer, taj manjak snage se nadomjesti.

Stator kod velikih turbogenerators je izgrađen od dva ili više dijelova, dok je kod malih turbogenerators izgrađen u jednom cjelovitom komadu. Tijelo statora je ograđeno s plinom, a njegova struktura je izgrađena od visokokvalitetnog čelika. Jezgra statora pruža mehaničku potporu, te uspješno prenosi magnetski tok. Za smanjenje vibracija i svladavanje pritiska plinske topline se koristi okvir statora, koji je ujedno i najteži dio turbogenerators.

Vrlo bitan dio turbogenerators su čahure. One odvajaju trofazne namote od okvira statora kako bi se osigurala izolacija višeg napona. Spojene su na okvir statora, na kraju uzbudnika.

U turbogeneratoru rashladni sustav igra ključnu ulogu jer otapa proizvedenu toplinu različitim gubicima i također produljuje vijek trajanja izolacijskog materijala. Sustav hlađenja obično sadrži tri komponente: voda, zrak i vodik. Rashladni zrak se raspršuje pomoću aksijalnih ventilators koji su smješteni na osovini rotora.

Ovi generatori dizajnirani su u različitim veličinama i oblicima kako bi zadovoljili mnoge stambene i industrijske zahtjeve. Također se mogu konfigurirati da koriste električnu energiju, paru i nekoliko različitih biogoriva.

Turbogeneratori se nalaze pokraj parne turbine, na horizontalnoj osovini.

## 5.2. Područja primjene turbogenerators

Turbogenerators su u današnje doba zastupljeni u mnogim područjima. Mogu se koristiti za iskorištavanje snage vjetra u vjetroelektranama, vode ili jezera u hidroelektranama ili pak plina u termoelektranama. Turbine koriste sustav lopatica koje se okreću i preko osovine pokreću generator, koji u konačnici proizvodi električnu energiju.

U termoelektranama, turbogenerator pretvara mehaničku energiju dobivenu preko vratila turbine u električnu energiju. Turbogenerator sadrži razne uređaje za kontrolu plina, temperature i tlaka unutar termoelektrane. Turbine pokreću generator dok se para odvodi i pretvara natrag u tekući oblik u kondenzatoru hlađenom vodom. Kao rashladni medij, turbogenerator koristi vodikov plin. Turbogenerators koji se pokreću parom proizvode većinu svjetske energije. Peć se koristi za većinu konvencionalnih turbogenerators i zagrijava vodu pod visokim tlakom kako bi se pretvorila u paru. Budući da unutar uređaja postoji samo jedna izlazna točka, para izlazi velikom brzinom i pokreće turbinu za proizvodnju električne energije. Veći okretaji turbine mogu se postići povećanjem ukupne temperature unutar peći, a neki turbogenerators drže dva različita izvora topline kako bi stvorili pregrijavanje. Još jedan popularan primjer turbogenerators na parni pogon je motor lokomotive ili turbopunjač unutar vozila, a oba rade gotovo identično kao što je prije navedeno.

Turbogenerators imaju vezu i sa plinskim turbinama, također poznate kao turbine s unutarnjim izgaranjem. U njima se turbogenerators često koriste u pogonu zrakoplova kao dio turbomlaznih motora. Za proizvodnju električne energije, vrući plin proizveden u komori za izgaranje, uz prisutnost komprimiranog zraka, gura se kroz lopatice uzrokujući rotaciju turbine. Prednost plinsko-turbinskih elektrana je to što se mogu vrlo brzo izgraditi pomoću industrijski proizvedenih modula. Plinske turbine često su uparene s postrojenjem koje vraća dio topline iz ispušnih plinova u tzv. procesu kogeneracije.

U vjetroelektranama, funkciju turbine obavlja propeler s tri tanke lopatice koje su okrenute prema vjetru. Takav propeler je još poznatiji kao rotor. Oštrice su izrađene od stakloplastike ili ugljičnih vlakana radi niske težine. Standardna brzina kojom se rotor okreće nije dovoljna za proizvodnju električne energije. Zato rotor okreće zupčanike koji povećavaju brzinu do 1500 okr/min u generatoru. Podzemni kabel povezuje vjetroturbinu s transformatorskom stanicom koja podiže napon napajanja na 225 ili 400 kV. Izlaz je proporcionalan površini koju zahvati rotor i kubu brzine vjetra. Gustoća zraka je također faktor. Turbogenerators također imaju svoju ulogu i na brodovima. Plovni objekt proizvodi paru kako bi se pogonila turbina za propulziju, što znači da se dio pare upotrebljava i za proizvodnju električne energije.

### 5.3. Parna turbina

Parna turbina je toplinski pogonski stroj u kojem se energija vodene pare visokog tlaka i temperature najprije pretvara u kinetičku energiju, a poslije toga u mehanički rad (vrtnju rotora). Upotrebljavaju se u mnogim granama industrije, kao što su postrojenja za proizvodnju nafte i plina. Također, parne turbine su priključene na električni generator kako bi se proizvela električna energija.

Postoje dva osnovna elementa koji se nalaze u svakoj parnoj turbini. To su statorske lopatice (sapnice) i rotor sa lopaticama koje su smještene po obodu diska.

U tzv. međulopatičnim kanalima, koji se sastoje od lopatica rotora i statora, održavaju se pretvorbe energije. Jedan red lopatica statora ispred jednog reda lopatica rotora čini jedan stupanj turbine. S povećanjem broja stupnjeva, povećava se iskoristivost turbine jer se postupnom pretvorbom učinkovitije iskorištava energija pare.

Statorske lopatice pretvaraju potencijalnu energiju fluida u kinetičku energiju. Daju povoljan smjer i brzinu toku pare na ulazu u rotorske lopatice. Oblikovane su na način da se strujanje odvija sa što manje gubitaka, te kako bi se izdržala mehanička naprezanja.

Glavni dio turbine je rotor. Pričvršćen je na vratilo turbine preko kojeg se dobiveni okretni moment prenosi na radni stroj preko spojke. Kako se rotor ne bi oštetio, dijelovi turbine se smještaju u kućište. Rotor se nalazi na potpornim nosivim ležajima koji preuzimaju silu nastalu zbog mase rotora. Nosivi ležajevi također osiguravaju radijalne i aksijalne zazore pri rotaciji.

Postoje neka pravila prema kojima se održava parna turbina.

To su:

- barem jednom godišnje se pregledavaju unutarnji dijelovi turbine
- turbina uvijek mora biti čista
- jednom mjesečno je potrebno ispitati sigurnosne regulatore broja okretaja
- svako malo provjeriti ulje i prema potrebi zamijeniti
- prema uputama proizvođača, izvršiti kontrolu istrošenosti dijelova



*Slika 5.2. Parna turbina*

#### **5.4. Plinska turbina**

Plinska turbina je energetska mašina koja pretvara energiju plinova povišene temperature i tlaka u koristan mehanički rad. Spada u strojeve s unutarnjim izgaranjem. Stupanj iskoristivosti plinskih turbina iznosi 30%. Temperatura ispuha iznosi maksimalno 600 °C, dok se temperature izgaranja kreću oko 700 °C – 1400 °C. Plinske turbine se koriste za pogon brodova, zrakoplova i električnih generatora.

Glavne komponente svake plinske turbine su:

- kompresori
- komora izgaranja
- turbina

Kompresor se može pokrenuti pomoću elektromotora, dizel motora i parnog stroja. Prema izvedbi mogu biti stapni ili vijčani. Primjenjuju se za dopremu zraka. Hlađenje se može odvijati pomoću zraka, vode i ulja. Kompresori u plinskim turbinama mogu biti u aksijalnoj i radijalnoj izvedbi. Kod većih snaga se koristi aksijalna izvedba, dok se kod manjih snaga koristi radijalna izvedba. U aksijalnim kompresorima zrak protječe kroz lopatice rotora i statora u smjeru vratila, dok je u radijalnim kompresorima, smjer protoka zraka radijalan na rotorsko kolo.

U komori izgaranja, kemijska energija goriva se pretvara u toplinsku energiju.

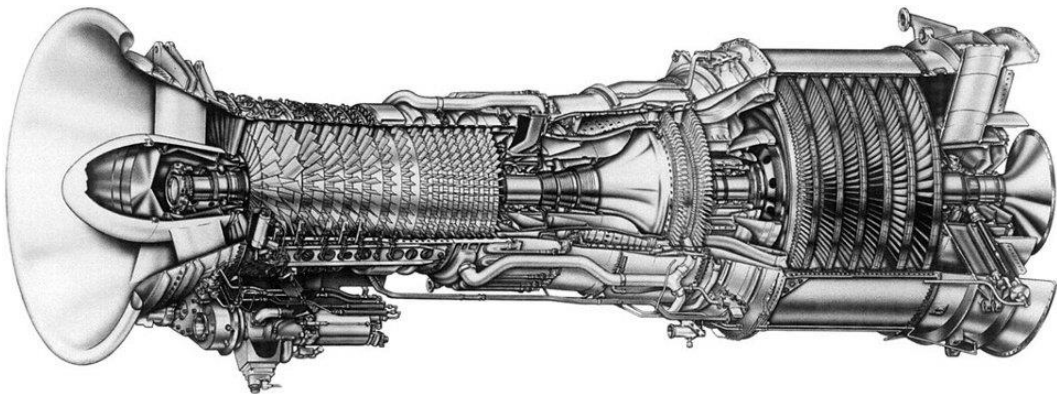
Omjer zraka i goriva je 50:1. Osnovna uloga komore izgaranja je dovođenje topline radnom fluidu. Taj radni fluid je uglavnom zrak. Važnu ulogu kod komore izgaranja ima difuzor. On preusmjerava zrak u komore izgaranja na pravilan način, kako bi izgaranje bilo što djelotvornije.

Kod turbine se entalpijski pad dimnih plinova pretvara u kinetičku energiju, a zatim kinetička energija u mehanički rad.

Lopatice su najosjetljiviji dio turbine zato jer rade u vrlo teškim uvjetima. Na njih djeluju mlaz radnog medija, visoke temperature, te centrifugalna sila.

Za pravilno održavanje plinske turbine, potrebno je voditi računa o nekoliko parametara.

Potrebno je ugraditi filtre na usisu zraka kako čestice prašine u zraku ne bi izazvale eroziju ili koroziju na radnim dijelovima plinske turbine. Nakon nekog vremena je potreban kompletan pregled svih dijelova turbine, kako bi se pravodobno zamijenili oštećeni dijelovi.



*Slika 5.3. Plinska turbina*

## 6. HIDROGENERATOR

Hidrogenerator ili sinkroni generator s istaknutim polovima je električni generator koji kao pogonski stroj koristi vodnu turbinu. Njegova sinkrona brzina vrtnje se određuje prema vrsti vodne turbine i prema hidrauličkim prilikama (npr. količina i protok vode, te raspoloživi pad). Stoga, radi svojstava turbine, hidrogenerator karakterizira mala brzina vrtnje rotora zbog čega je potreban velik broj parova polova generatora. Broj pari polova se računa prema formuli:

$$p = \frac{60 \cdot f}{n} \quad (6.1)$$

Gdje je:

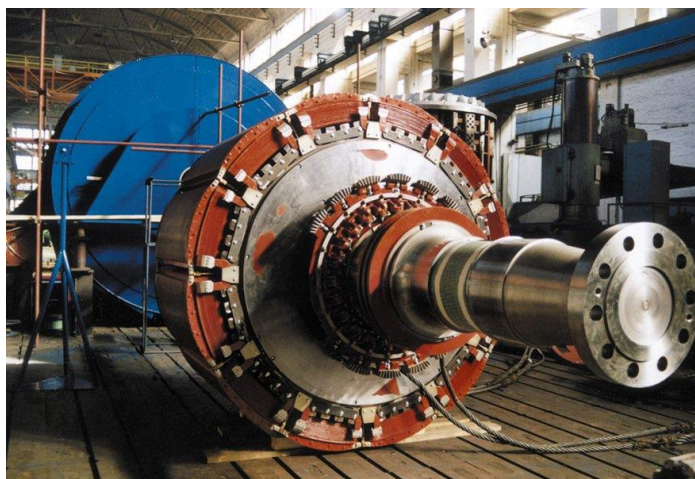
f – frekvencija [Hz]

n – broj okretaja rotora generatora [okr/min]

Brzina vrtnje hidrogenatora obično se kreće 50 – 1000 okr/min, što znači da više odgovara radu u hidroelektranama. Zbog manje brzine imaju veći promjer, koji može biti do 20-ak metara, ali obodna brzina vrtnje je faktor koji ograničava još veći promjer rotora. Hidrogeneratori se izvode s okomitom osovinom, a turbina se nalazi ispod generatora.

Pomoću hidrogenatora se kinetička energija pretvara u električnu energiju koja se zatim dovodi u električnu mrežu za napajanje kućanstva, poduzeća i industrije.

Funkcionira na način da voda iznad brane teče prema dolje kroz cjevovode. Svaki cjevovod ima svoja „vrata“ kako bi se zaustavio protok vode, te tzv. spiralnu kutiju. Unutar nje se nalaze lopatice koje kontroliraju protok vode kroz turbinu. Lopatice su oblikovane tako da izvuku najveću moguću brzinu vrtnje iz vode koja teče, te su povezane sa generatorom preko zajedničke osovine. Iznad generatora se nalazi uzбудnik koji je napajan preko vanjskog izvora, kojeg nazivamo automatski regulator napajanja. Unutar generatora se nalazi rotor, dok se na vanjskom, stacionarnom dijelu nalazi stator. Lopatice turbine okreću rotor. Na rotoru se nalazi niz silnica elektromagnetskog polja, koji su nastali pomoću istosmjerne struje dobivene iz uzбудnika. Rotacijom rotora, silnice sijeku statorske vodiče koji će inducirati trofazni sustav napona sinusoidalne karakteristike.



*Slika 6.1. Hidrogenerator*

### **6.1. Izvedba hidrogeneratora**

Hidrogenerator se sastoji od dva glavna dijela: statora i rotora. Na statoru je smješten armaturni namot koji miruje, dok se na rotoru nalazi uzbudni namot.

Statorski namot je najvažniji dio generatora i kružno je postavljen u utore u obliku štapova koji su pravilno fazno raspoređeni i međusobno pomaknuti za  $120^\circ$ . Tako će inducirani napon u svim fazama biti jednak i iste frekvencije.

Postoje dvije osnovne vrste statorskih namota:

- petljasti namot
- valoviti namot

Petljasti namot nazvan je prema načinu na koji je izveden namot. Vodiči čine zatvorenu petlju, koja je uložena u utore statorskog paketa. Kod statorskog paketa visine do 1.5 metara, namot statora se izvodi u obliku petljastog namota sa svitcima, dok se za veće visine koriste štapovi jer je teško proizvesti dugačke svitke. Petljasti namot je pogodniji za manje napone, a najveći strojevi se mogu izvesti samo pomoću njega. Stroj s petljastim namotom je osjetljiviji prema netočnosti izrade, no ima veću mogućnost izbora broja utora.

Valoviti namot se koristi kod generatora velikih dimenzija, sa visinom utorskog paketa od 0.8 metara do 2.5 metara. Statorski namot je izveden u obliku valovitog namota sa štapovima. Prema položaju u utoru statorskog paketa, štapovi valovitog namota mogu biti gornji ili donji. Donji štap se spaja sa gornjim i međusobno su razmaknuti za nekoliko utora. Valoviti namot je pogodniji za manje strojeve i više napone zbog manjeg broja paralelnih grana.



Jaram motora, istaknuti polovi s namotom, te osovina su ključni dijelovi rotora hidrogeneratora. Rotor hidrogeneratora sadrži više od 30 pari polova zbog toga što vodne turbine imaju mali broj okretaja. Unutar istaknutih polova rotora su smješteni namoti hidrorotora. Postavljeni su tako da neprekidno prate sjeverni i južni pol magneta. Zahtjeva se visok stupanj sigurnosti mehaničke konstrukcije rotora, zbog mogućih prekoračenja brzine vrtnje.

Hidrogeneratori imaju velike dimenzije i težine zbog prethodno spomenutih velikih brojeva pari polova.

Neujednačen raspored magnetskog toka u zraku može izazvati problem prilikom konstrukcije hidrogeneratora. Razlog je taj što inducirana elektromotorna sila i gustoća magnetskog toka neće biti u istoj fazi.

## **6.2. Područja primjene hidrogeneratora**

Kada su hidroelektrane tek nastale, koristila se snaga vode za okretanje lopatica oko osi. No, u 19. stoljeću su izumljene različite vrste turbina kako bi olakšali rad hidroelektrana. To su Peltonov kotač, Francisova turbina i Kaplanova turbina.

Peltonov kotač izvlači energiju iz impulsa vode koja se kreće pomoću malih katica u obliku žlice. Idealan je za hidroelektrane s visokim padom (preko 200 metara) koje se napajaju iz akumulacije. Francisova turbina uzrokuje rotaciju lopatica prije nego što voda izađe kroz vučnu cijev, koja se nalazi ispod turbine. Najučinkovitija je u hidroelektranama sa srednjim padom (između 30 i 200 metara) na vodotocima koja se nalaze na niskim reljefnim područjima.

Kaplanova turbina je model u obliku propelera s lopaticama koje se mogu podešavati ovisno o protoku vode. Postavlja se na postrojenja s niskim padom (ispod 30 metara).

Za protok rijeke potrebna je mala brzina vrtnje hidrogeneratora, dok je za korištenje u visokonaponskim pogonima potrebna velika brzina vrtnje.

U tvornici Končar u Zagrebu su proizvedeni hidrogeneratori koji rade diljem svijeta. Najposebniji po veličini i konstrukciji su izrađeni za HE Zakučac, HE Đerdap, Split, te HE Shiroro u Nigeriji.

U današnje vrijeme se proizvedu hidrogeneratori snage do 800 MVA.

### 6.3. Vodna turbina

Vodna turbina je jedna od prvih izuma čovjeka kojim se životinjski ili ljudski rad zamjenjuje potencijalnom energijom vode iz okoline koju dobivamo. Svaka ima isti način rada u kojem se najprije potencijalna energija vode pretvara u kinetičku energiju koja se odvija u prirodi.

Nakon toga slijedi oduzimanje energije vode pomoću rotora turbine, te pretvorbe iste u mehaničku energiju. Pomoću generatora se mehanička energija pretvara u električnu energiju. To se postiže priključivanjem hidroelektrane u prirodnu cirkulaciju vode na Zemlji.

Generalno, konstrukcija vodne turbine se ne razlikuje od ostalih. Njezini glavni dijelovi su rotor, statorske lopatice, regulacijske lopatice, glavčina, vratilo generatora, difuzor i generator.

Vodna turbina ima dvije vrste, a to su akcijske (impulsne) i reakcijske turbine. Osnovna razlika između njih je mjesto gdje dolazi do pada tlaka. Kod akcijskih turbina, pad tlaka se događa u statorskim lopaticama, dok kod reakcijskih turbina tlak pada djelomično u statorskim lopaticama i djelomično u rotorskim lopaticama.

Akcijska turbina upotrebljava mlaznice za usmjeravanje toka vode i pretvorbu potencijalne energije vode u kinetičku energiju prije nego što voda udari lopatice turbine. Pri izlasku iz sapnica, mlaz vode usmjeren je prema rotorskim lopaticama, te kod udara dolazi do promjene smjera gibanja mlaza vode. Time se stvara sila na rotorske lopatice koja okreće turbinu. Općenito, akcijske turbine se koriste pri visokim padovima vode.

Pod akcijske turbine spadaju: Peltonova turbina, turbina s kružnim presjekom, Teslina turbina i Turgo turbina.

Kod reakcijske turbine, zakretni moment rotora se dobiva promjenom količine gibanja, te reakcijskom silom uvjetovanom razlikom tlaka. Dolaskom mlaza vode na reakcijsku turbinu, mijenja se tlak kroz cijelu turbinu, te tlak pada i na rotorskim i na statorskim lopaticama. Turbine moraju biti uronjene u vodenom toku ili moraju biti u kućištu kako bi održale tlak vode, što kod akcijskih turbina nije bio slučaj. Reakcijske turbine se upotrebljavaju pri niskom ili srednjem hidrostatskom tlaku i više se koriste nego akcijske turbine.

Pod reakcijske turbine spadaju Kaplanova turbina, Arhimedov puž i Francisova turbina (najčešće se koristi).

Vodne turbine su konstruirane tako da rade desetak godina i uz to nije potrebno veliko održavanje glavnih elemenata. Zamjena dijelova se izvršava u intervalu od nekoliko godina.

Rotor i dijelovi izloženi vodi se održavaju odstranjivanjem i popravkom istrošenih dijelova.

Čelični elementi se popravljaju zavarivanjem, dok se oštećena područja izrezuju ili bruse, pa kasnije se zavaruju natrag na poboljšani način.



*Slika 6.2. Francisova turbina*

## 7. DIZELSKI GENERATORI

Dizelski generator je električni generator koji je pogonjen dizelskim motorom. Rabi se za velike raspone brzina, dok mu je snaga manja nego kod turbogeneratora i hidrogeneratora (maksimalno 50 MVA). Uglavnom se rade s istaknutim polovima. Obično je dizajniran za rad na dizelsko gorivo, ali neki su tipovi prilagođeni za druga tekuća goriva ili prirodni plin. Koriste se na mjestima gdje nema priključka na elektroenergetsku mrežu i mogu poslužiti kao napajanje u slučaju kvara mreže.

Način rada dizelskog generatora se zasniva na izgaranju koji pretvara kemijsku energiju prisutnu u dizelskom gorivu u mehaničku energiju u obliku rotirajućeg vratila. Motor je obično izravno spojen na alternator s jednim ležajem preko zamašnjaka. No ako alternator ima dva ležaja, spojeni su preko fleksibilne spojke. Dok se motor okreće, okreće se i glavni rotor alternatora, te se snaga prenosi kroz mehaničku spojku stvarajući tako električnu energiju u obliku napona na stezaljkama alternatora. Ovu energiju proizvodi magnetsko polje iz glavnog rotora koje inducira struju u glavnom statoru.

Dizelski generatori zahtijevaju pažljivo redovito održavanje, ovisno o proizvođaču. Najbitnija stavka koju treba servisirati obično je motor. Motor zahtijeva servis nakon 250 ili 500 sati. Posebno je važno voditi računa o održavanju generatora kako bi isporučio električnu energiju kada je to potrebno.



*Slika 7.1. Dizelski generator*

Prednosti dizelskog generatora:

- izdržljivost u raznim uvjetima
- relativno sigurno skladištenje (paljenje je manje riskantno kod dizela nego kod drugih vrsta goriva)
- robusni i pouzdani
- jednostavan pristup gorivu
- mogu podnijeti veća opterećenja snage
- traju dulje od ostalih vrsta generatora

Nedostatci dizelskog generatora:

- cijene dizela su visoke
- vrlo su bučni pri radu
- teški su i glomazni
- potrebno ih je držati na suhom inače lako korodiraju
- skloniji su kvarovima

### **7.1. Izvedbe dizelskih generatora**

Kako bi se izbjegla niska opterećenja i manjak energije, potrebna je pravilna konstrukcijska izvedba dizelskog generatora. Dizajniran je po uzoru na izvedbe u modernoj elektronici. Obično su konstruirani za rad pomoću dizelskog goriva, no postoje neke druge vrste koje su prilagođene za druga tekuća goriva ili prirodni plin. Plinska turbina je kompaktnija i učinkovitija pri punom opterećenju od dizelskog motora. No, za redovita djelomična opterećenja, dizelski motori ponekad imaju prednost nad plinskim turbinama zbog njihove učinkovitosti.

Glavne komponente dizelskog generatora su: dizelski motor, alternator, regulator napona, sustav hlađenja, ispušni sustav, filter za zrak, upravljačka ploča, spremnik goriva i sustav podmazivanja.

Dizelski motor je izvor ulazne mehaničke energije za generatore. Njegova veličina i izlazni kapacitet određuju koliko snage se može proizvesti.

Alternator proizvodi električnu energiju iz mehaničkog ulaza koji daje dizelski motor. Alternator se sastoji od rotora, koji proizvodi izmjeničnu električnu energiju stvaranjem magnetskog polja. Rotor se smatra primarnom komponentom alternatora.

Regulator napona je neophodna komponenta u sastavu dizelskog generatora, te je njegov rad vrlo složen. Bez njega bi proizvedena izmjenična struja varirala ovisno o brzini motora. Budući da moderna električna oprema zahtijeva vrlo stabilno napajanje, mora se nešto učiniti kako bi se ono uravnotežilo.

Sustav hlađenja smanjuje proizvedenu toplinu za vrijeme rada generatora, koji neprestano zagrijava različite komponente. Tu toplinu apsorbira većinom rashladna tekućina, ali ne uvijek voda, koja zatim prolazi kroz izmjenjivač topline, ispuštajući svoju toplinu u zrak ili ponekad u sekundarnu rashladnu tekućinu.

Ispušni sustav otklanja vrlo otrovne kemikalije, nastale ispušnim plinovima, koje emitira dizelski generator.

Filter za zrak je sastavljen od vlaknastih materijala, te uklanjaju krute čestice iz zraka kao što su pelud, prašina, plijesan i bakterije.

Upravljačka ploča je korisničko sučelje koje upravlja generatorom. Sadrži gumb Start/Stop, te indikatore za različite parametre, kao što su: kontrole uključivanja i isključivanja, odabir faze, prekidač načina rada motora, brzina motora, kontrola goriva, punjenje baterije, itd.

Spremnik goriva skladišti gorivo koje će generator koristiti i obično ima odgovarajući kapacitet da generator radi u prosjeku 6-8 sati. Kemijska energija goriva prenosi se u mehaničku energiju, koju motor na kraju pretvara u električnu energiju. Za male, prijenosne generatore, spremnik goriva je ugrađen unutar kućišta generatora, dok se kod većih, trajno instaliranih generatora gleda kao posebna vanjska struktura.

Sustav podmazivanja osigurava nesmetan rad različitih komponenti dizelskog generatora. Kako bi se izbjegli bilo kakvi problemi, važno ga je stalno paziti. Budući da generator ima mnogo dijelova koji se okreću, ključno je imati dobar sustav podmazivanja koji ne samo da štiti pokretne dijelove od trenja, već ih i održava hladnima.

## 7.2. Područja primjene dizelskih generatora

Dizelski generatori su vrlo svestrani i mogu se koristiti za različite primjene u raznim industrijama. Osnovna uloga im je da budu rezervno napajanje u slučaju kvara mreže, no imaju još poneku primjenu kao što je: rezanje vršne struje, izvoz u elektroenergetsku mrežu, te podrška mreži. Mogu imati i sekundarnu funkciju napajanja komunalnih mreža bilo tijekom vršnih razdoblja ili razdoblja kada postoji manjak velikih generatora električne energije. Moderni dizelski generatori dizajnirani su za kontinuirano praćenje električne struje i automatski se pokreću kada dođe do prekida napajanja i isključuju se kada se komunalna usluga ponovno uključi.

Kada se u elektranama isključi napajanje iz glavne mreže, dizelski generatori odmah krenu napajati važne dijelove kao što su ventilatori, pumpe, hidrauličke jedinice, punjači baterija, itd. U hidroelektranama kontroliraju preljevna vrata kako ne bi došlo poplava zbog nestanka struje iz glavne mreže.

Dizelski generatori se uvelike koriste u rudarstvu. Daju više od 70 % sve snage u rudarskim operacijama za koje je potrebna teška oprema, kao što su bušilice, strojevi za iskopavanje i dizalice. Lako su prenosivi i koriste se u rudarskim zonama s ekstremnim uvjetima. Pružaju vrhunsku izdržljivost i kapacitet, što ih čini savršenim izvorom energije i rezervnom opcijom za sve teške aktivnosti u rudarskim poljima.

Vrlo važna primjena dizelskog generatora je u zdravstvu. U slučaju nestanka struje u bolnici, dizelski generatori odmah posluže kao hitno napajanje. Bez njih, mnogi bi pacijenti izgubili živote. Ozbiljno bolesni ili ozlijeđeni pacijenti bili bi u opasnosti jer strojevi za održavanje života (npr. respirator) ne bi radili ni pri najmanjem nestanku struje. Dizelski generatori su najpouzdaniji rezervni izvor napajanja u bolnicama jer ih je jednostavnije održavati nego generatore prirodnog plina i osiguravaju neprekidnu opskrbu električnom energijom u slučaju kvara komunalne mreže sve dok se ne potroši raspoloživa količina goriva. Rezervno napajanje može trajati više od 48 sati.

Ukoliko dođe do nestanka struje u nekoj od komercijalnih industrija, tvrtka će se suočiti s velikim gubicima prihoda na blagajni, problemima za IT sektor i drugu automatiziranu opremu, što bi značilo potpuno obustavljanje rada. Ulaganjem u dizelski generator, sve te neugodnosti se mogu jednostavno spriječiti. Dizelski generator omogućuje zaštitu prihoda, poslovnih interesa i neometano odvijanje operacija.

U građevinarstvu, dizelski generatori su imperativ. Građevinski projekti često zastaju zbog prekida opskrbe električnom energijom ili zbog nestanka struje na nekim gradilištima. Zbog konstantnih prekida napajanja, može doći do odgode završetka rada, što znači i skuplje troškove zbog kašnjenja u rasporedu. Dizelski generatori daju prijeko potrebnu energiju za osiguranje rasvjete za gradnju, pokreću strojeve za klimatizaciju, napajaju komunikacijske sustave i pokreću građevinsku opremu. Također, pružaju pomoćno napajanje glavnoj mreži ako dođe do prekida napajanja zbog vanjskih sila ili smetnji koje proizlaze iz gradilišta.

U slučaju nestanka struje u industriji proizvodnje, utječe se na sve procese, od nabave sirovina do prodaje proizvoda. Planirane aktivnosti su prekinute, sirovine se pokvare, te je oštećena kvaliteta proizvoda, što znači i gubitak povjerenja kod kupaca. Tu stvar spašavaju dizelski generatori, koji u takvim situacijama osiguravaju hitno napajanje električnom energijom. Štite proizvodne industrije od velikih gubitaka proizvoda, financijskih gubitaka i u konačnici gubitka ugleda.

Računala i podatkovni centri danas su srce svake industrije. Mnoge tvrtke ih koriste za pohranjivanje, sigurnosno kopiranje i obradu ključnih informacija. Pristup tim podacima je potreban u svakom trenutku, kako bi tvrtka radila bez problema. Sa prekidom napajanja, može doći do gubitka bitnih informacija, što automatski znači gubitak poslova i novaca. Također, poslužitelji mogu biti napadnuti od strane hakera. Dizelski generatori pokazali su se vrlo pouzdanima u pružanju trenutne rezervne snage kad god dođe do kvara na električnoj mreži. Podatci ostanu dostupni, te se sve operacije podatkovnog centra mogu nastaviti.

Velika većina ljudi na svijetu se oslanja na telekomunikacijske tornjeve zbog telefoniranja i slanja poruka. Kada bi u nekom telekomunikacijskom tornju nestalo struje, sve vrste komunikacija u tom području bi prestale. Dizelski generatori obično se koriste za pružanje rezervne energije telekomunikacijskim tornjevima i osiguravaju da kontinuirani komunikacijski kanali mogu ostati aktivni.

### **7.3. Dizelski motor**

Dizelski motor je motor s unutarnjim izgaranjem u kojima se toplinska energija pretvara u mehaničku energiju. Pretvorba energije se događa u kućištu motora (cilindru), gdje se miješa zrak sa gorivom, te se izaziva zapaljenje kako bi se dobila potrebna snaga za pokretanje vozila.

Dizelski motor se sastoji od tri osnovna dijela, a to su glava motora, blok motora i kućište radilice.

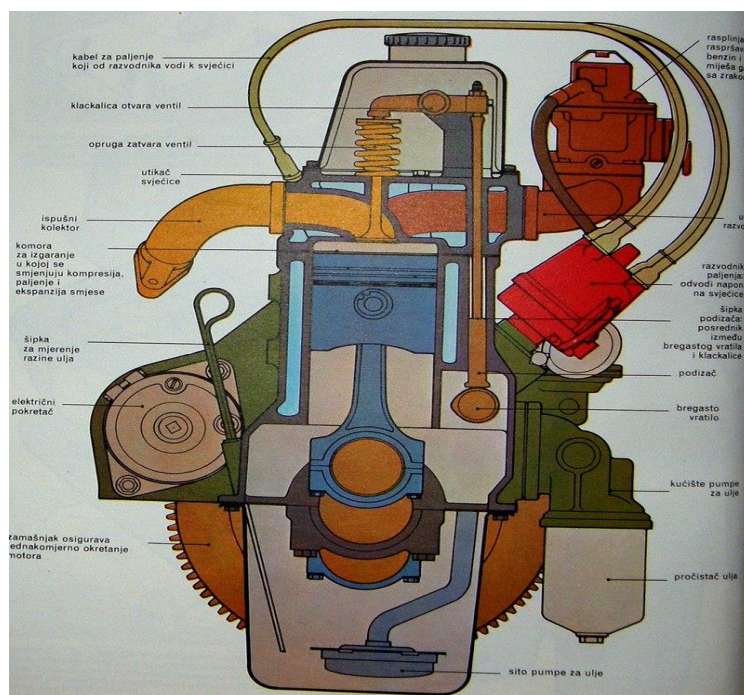


Glava motora pokriva cilindre, te stvara kompresijski prostor. Na njoj se nalaze otvori za usis goriva i ispuh plinova nakon izgaranja, te ventili, raspršivač, klackalica, podizač ventila itd.

Blok motora se naziva još i „srce motora“ zbog procesa izgaranja koji se u njemu odvijaju. Na njemu se nalaze otvori za cilindre, otvori za prijenos rashladne tekućine, te bregasta osovinica. Pumpa visokog pritiska se također može postaviti na blok motora. Blok motora može izdržati velike temperaturne razlike, te eksploziju mješavine goriva i zraka, stoga je građen u jednom komadu kako ne bi došlo do pucanja.

U kućištu radilice se nalazi cijeli mehanizam radilice, te njezini ležajevi. To je najsloženiji lijevani dio dizelskog motora zbog kanala za hlađenje i ulja. Štiti radilicu i klipnjaču od krhotina. Koristi se još kao komora za tlak za smjesu goriva i zraka, te za pohranjivanje i cirkulaciju ulja. Napravljeno je od aluminija, što znači da je lagano, te ima čvrstoću i dizajn za izdržati pritiske tijekom korištenja motora.

Jedna od najvažnijih stvari za održavanje dizelskog motora je redovna kontrola rashladne tekućine. Usljed oksidacije, rashladna tekućina postaje kisela, te ako se zanemari, može dovesti do propadanja drugih dijelova sustava za hlađenje. Također, bitno je održavati čistoću motora od prljavštine i čađa, redovito mijenjati ulje i filtere za zrak.



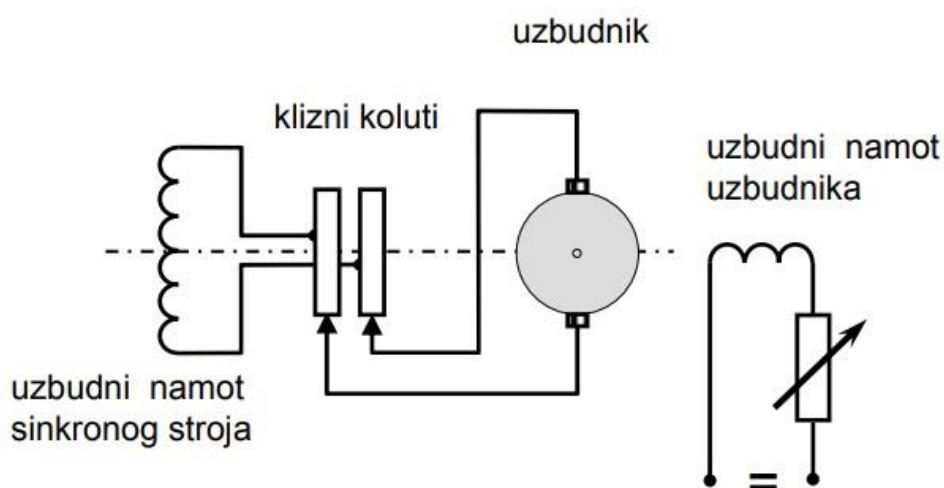
Slika 7.2. Poprečni presjek dizelskog motora

## 8. UZBUDNI SUSTAVI SINKRONOG GENERATORA

Uzbudni sustavi kod sinkronog generatora su namijenjeni za induciranje magnetskog polja. Time se može očuvati stabilnost generatora na mreži, na način da se u kratkom roku reagira na poremećaje. Uzbuda se izvodi na rotoru. Kroz namot rotora poteče istosmjerna struja, i kako ta struja teče kroz uzbudni namot, naziva se uzbudna struja. Postoje tri glavna rješenja za izvor uzbudne struje:

- uzbuda s istosmjernim uzbudnikom
- statička uzbuda
- beskontaktna uzbuda

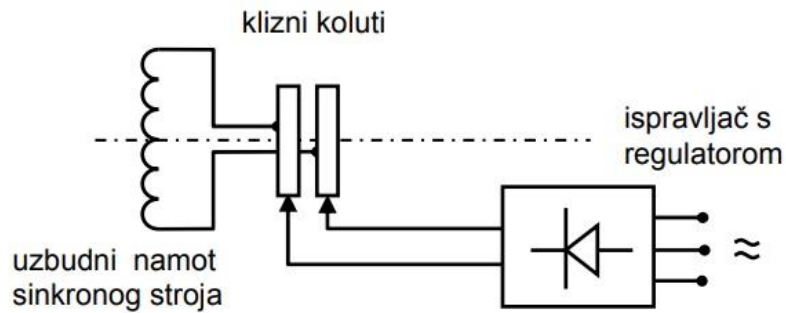
Uzbuda s istosmjernim uzbudnikom je najstarije rješenje koje se u današnje vrijeme, zbog vrlo visokih cijena istosmjernog uzbudnika i održavanja, vrlo rijetko koristi. Istosmjerni generator (uzbudnik) je dograđen na zajedničku osovinu. Radi na način da se struja iz uzbudnika dovodi u uzbudni namot sinkronog generatora preko četkica i kliznih koluta. Regulacijom uzbude uzbudnika, uz pomoć automatskog regulatora, dolazimo do regulacije uzbudne struje. Najslabija karika ovog rješenja je kolektor uzbudnika.



Slika 8.1. Uzbuda s istosmjernim uzbudnikom

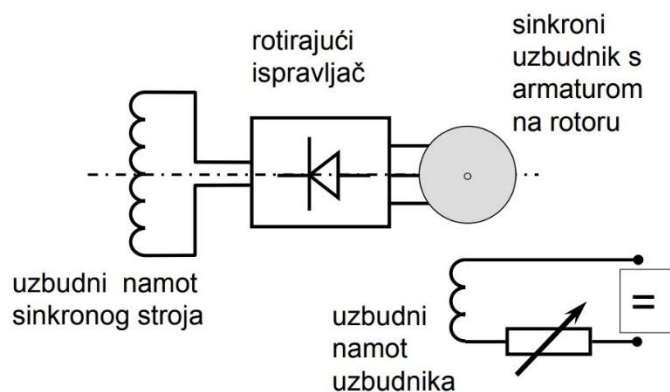
Statička uzbuda je rješenje koje se sve češće upotrebljava. Istosmjerni generator (uzbudnik) zamijenjen je tiristorskim ispravljačem. On ispravlja struju iz izmjeničnog izvora i na njega

djeluje regulator uzbudne struje. Kao i u slučaju uzbude s istosmjernim uzбудnikom, struja se dovodi u uzbudni namot sinkronog generatora preko četkica i kliznih koluta, što je loša strana ovog rješenja. Unatoč tome, statička uzbuda je pouzdanije rješenje od uzbude s istosmjernim uzбудnikom.



Slika 8.2. Statička uzbuda

Beskontaktna uzbuda se primjenjuje za uzbudu manjih generatora ili onih koji rade na vlastitoj mreži (npr. male hidroelektrane ili mali industrijski pogoni). Kao uzбудnik se koristi mali sinkroni generator koji ima uzbudu na statoru, a armaturni dio na rotoru. Ispravljački uređaj je zajedno sa rotorom uzбудnika postavljen na osovinu generatora, te se zajedno vrte. Armaturni namot uzбудnika je izravno spojen s uzбудnim namotom sinkronog generatora preko ispravljačkog uređaja. Regulacijom uzbude pomoćnog generatora se postiže regulacija uzbudne struje. Prednost beskontaktna uzbude je što ne sadrži kolektor i klizne prstene, pa ne zahtijevaju održavanje.



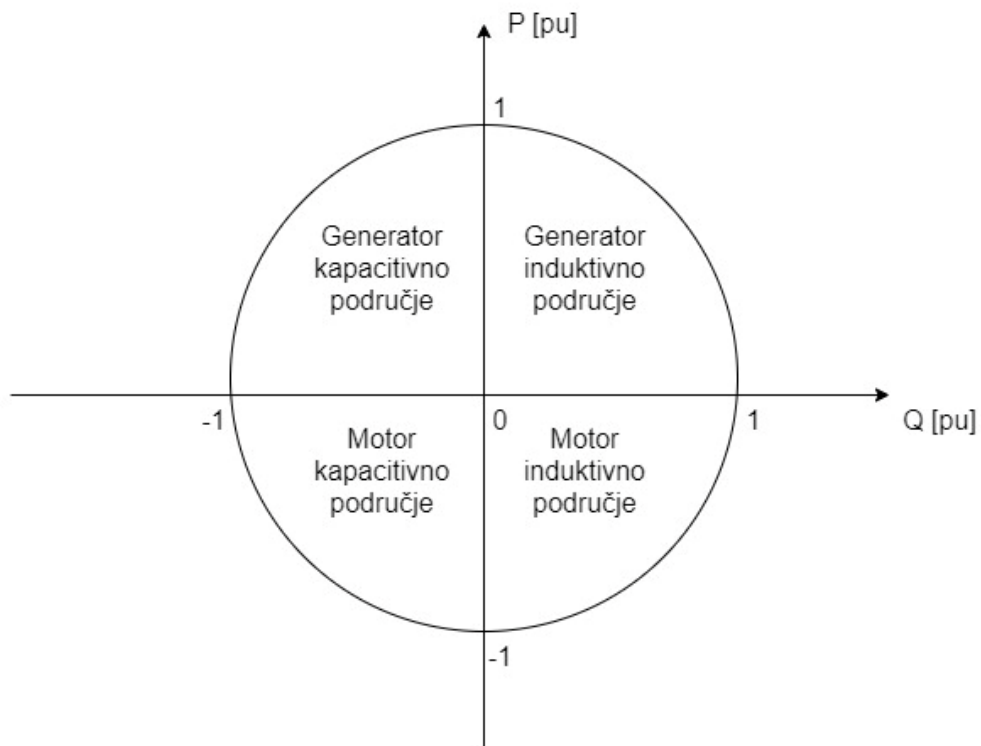
Slika 8.3. Beskontaktna uzbuda

## 9. POGONSKA KARTA SINKRONOG GENERATORA

Pogonska karta je prikaz fizikalnih veličina u sinkronom stroju. Pokazuje prilike u generatoru u stacionarnom pogonu, uz pretpostavku da vlada konstantan napon na priključnicama generatora. Zasniva se na vektorsko – fazorskom dijagramu generatora, te se crta u  $PQ$  koordinatnom sustavu snaga. Prikazuje granice opterećenja generatora, uzevši u obzir opterećenje generatora i radnom (djelatnom) i jalovom snagom.

Zbog lakšeg konstruiranja, sve veličine se prikazuju u jediničnim vrijednostima (per unit).

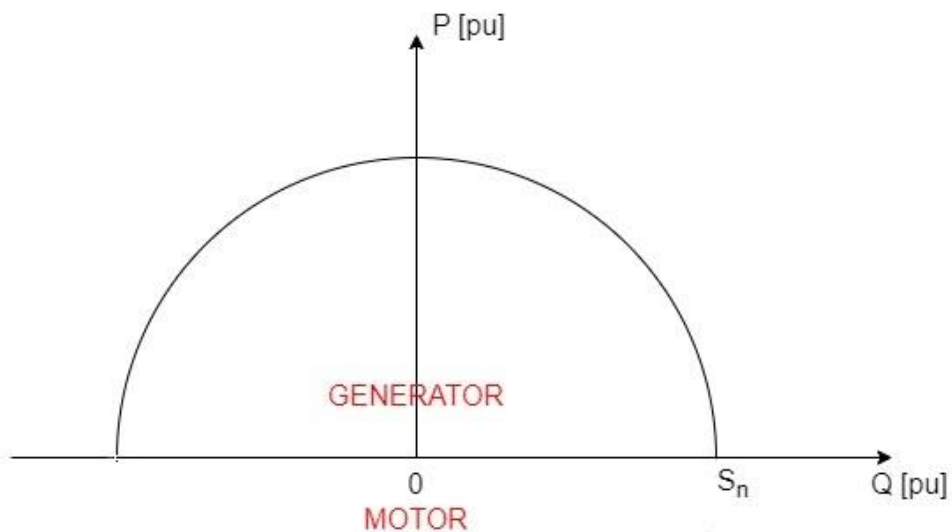
Na slici 9.1. je prikazana podjela radnih područja. Gledamo da sinkroni stroj radi kao generator.



Slika 9.1. Podjela radnih područja

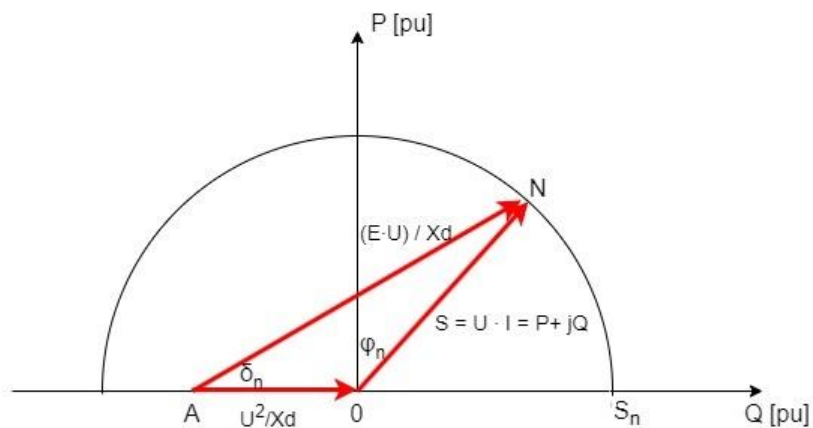
## 9.1. Pogonska karta turbogeneratora

Konstrukcija pogonske karte turbogeneratora započinje sa ucrtavanjem gornje polovice jedinične kružnice. Ona predstavlja ograničenje zbog nazivne prividne snage. Crta se samo gornja polovica, zbog toga što se na njoj nalaze pozitivne vrijednosti komponente radne snage, što znači da stroj radi u generatorskom režimu rada. Donji dio kružnice predstavlja područje motorskog režima rada.



Slika 9.2. Pogonska karta turbogeneratora – jedinična kružnica

Nakon toga slijedi ucrtavanje vektorskog prikaza snaga kao što je prikazano na slici 9.3.



Slika 9.3. Pogonska karta turbogeneratora – nazivna radna točka

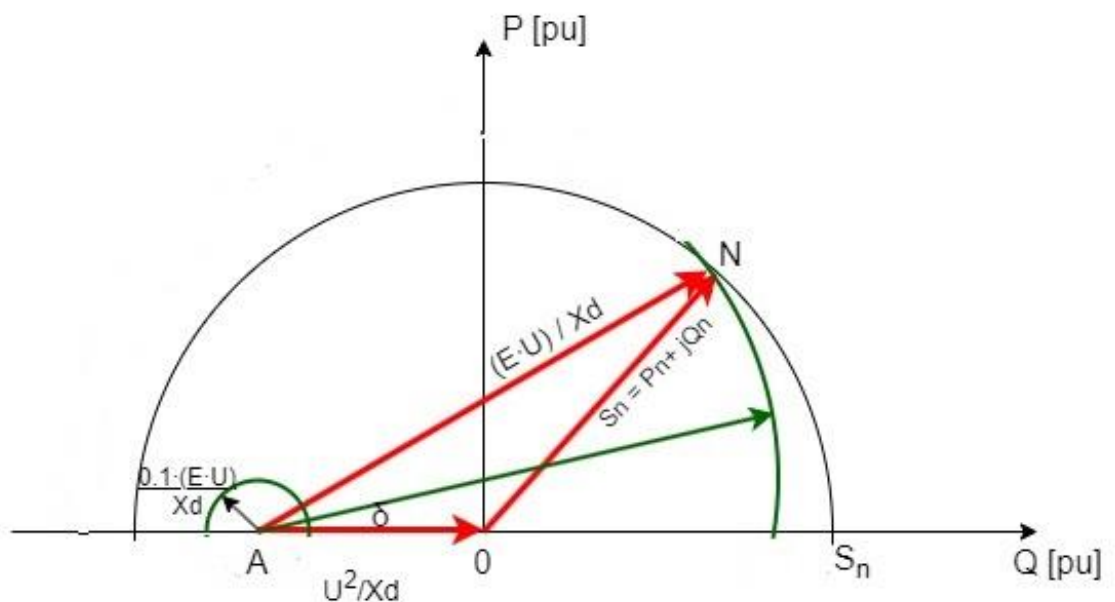
Nazivnu radnu točku generatora predstavlja točka N. Dobiva se na nekoliko načina:

- dodavanjem vektora snage  $\vec{U} \cdot \vec{I}$  pod kutem  $\varphi_n$  u odnosu na x-os, odnosno Q- os
- dodavanjem nazivne uzbude pod nazivnim kutom opterećenja. To je kut između vektora napona generatora i njegove uzbude  $\delta_n$

Za vrijednost  $\frac{U^2}{X_d}$  je točka A udaljena od ishodišta.

Radi minimalne i maksimalne uzbude postoje neka ograničenja:

- obično je maksimalna vrijednost uzbude jednaka nazivnoj vrijednosti uzbude, a minimalna uzbuda je jednaka 10% vrijednosti nazivne uzbude.
- neosjetljivost regulatora napona uzbude na niskim vrijednostima napona je objašnjenje zašto postoji ovo ograničenje.
- ograničenje se konstruira pomoću dvije kružnice polumjera  $\frac{E \cdot U}{X_d}$  i  $0.1 \cdot \frac{E \cdot U}{X_d}$  sa središtem u točki A, kao što je prikazano na slici 9.4.



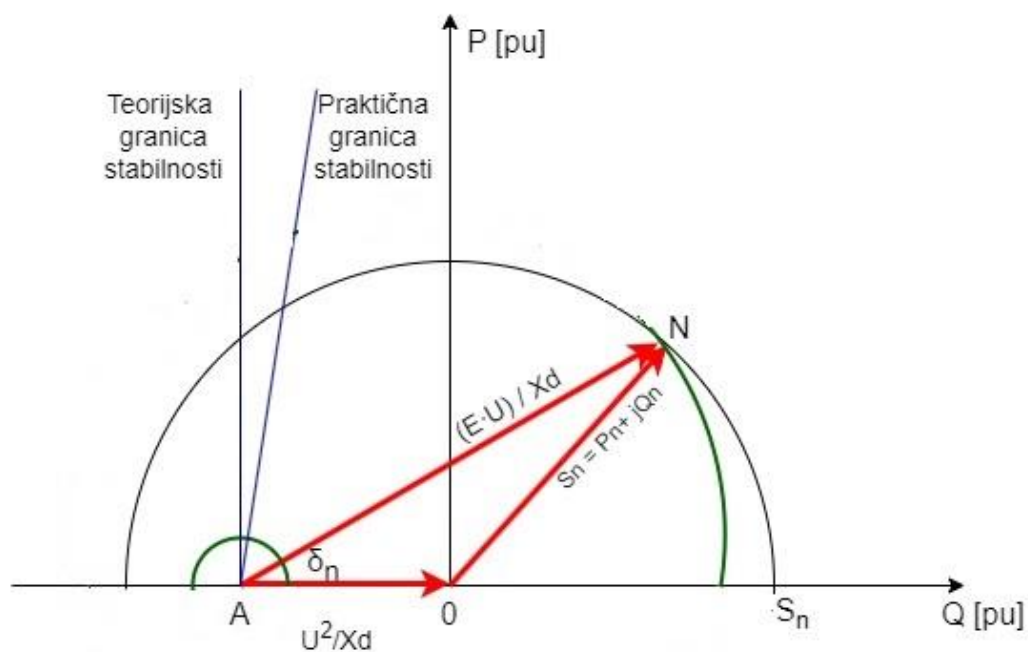
Slika 9.4. Pogonska karta turbogeneratora – ograničenja uzbude

Postoje još dva ograničenja pogonske karte turbogeneratorske:

- teorijska granica stabilnosti
- praktična granica stabilnosti

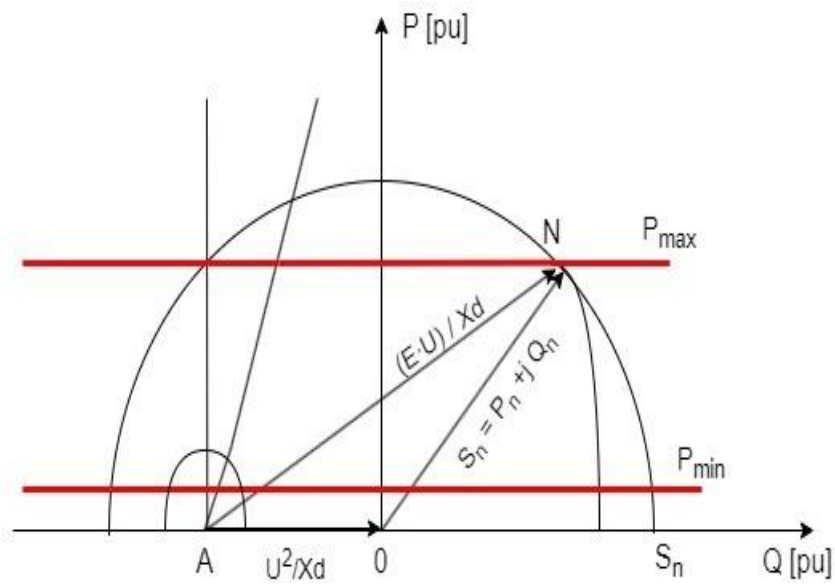
Teorijska granica stabilnosti se crta tako da se povuče okomica u točki A. Dopušteni kut opterećenja  $\delta$  iznosi do  $90^\circ$ , te jedino tako turbogenerator može raditi stabilno.

Kod praktične stabilnosti, smanjuje se kut opterećenja na oko  $70^\circ$ , ostavljajući rezervu do teorijske granice stabilnosti. Konstruira se povlačenjem pravca u točki A pod određenim kutom.

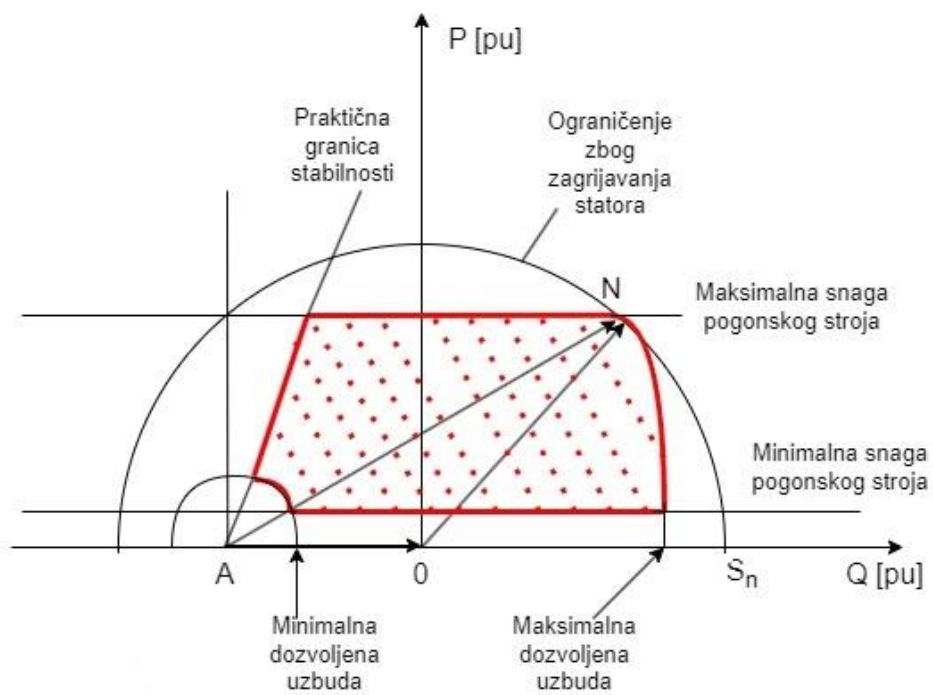


Slika 9.5. Pogonska karta turbogeneratorske – granice stabilnosti

Važno je spomenuti ograničenja zbog minimalno i maksimalno dozvoljene snage pogonskog stroja. Kao što je već rečeno, pogonski stroj turbogeneratorske je parna ili plinska turbina. Tehnički minimum pogonskog sustava turbine određuje kolika je minimalna dozvoljena radna komponenta turbogeneratorske, ispod koje pogonski stroj ne može raditi konstantno i stabilno.



Slika 9.6. Pogonska karta turbogeneratora – ograničenja zbog minimalne i maksimalne snage



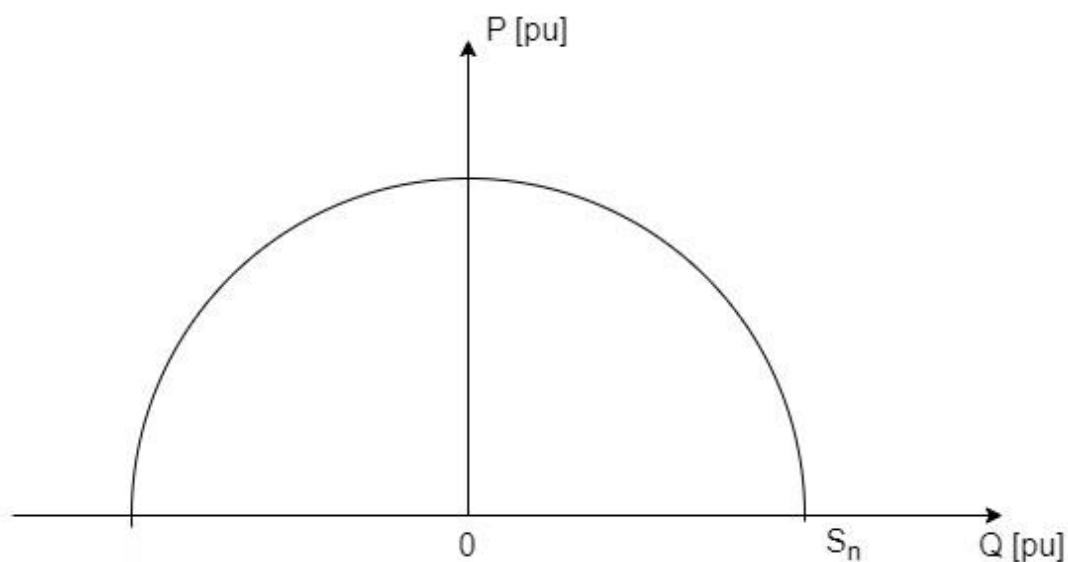
Slika 9.7. Konačna pogonska karta turbogeneratora



## 9.2. Pogonska karta hidrogeneratora

Izrada pogonske karte hidrogeneratora je kompliciranija od pogonske karte turbogeneratora. Razlog je taj što su kod hidrogeneratora različiti iznosi reaktancije armature u d i q osima. Vrijedi da je  $X_d > X_q$ .

Izrada pogonske karte hidrogeneratora kreće sa ucrtavanjem jedinične kružnice, kao i kod turbogeneratora. Struja kroz armaturu se određuje pomoću nazivne snage, što znači da generator ne može raditi s većom prividnom snagom od nazivne, iz razloga što bi došlo do taljenja armaturnih namota.

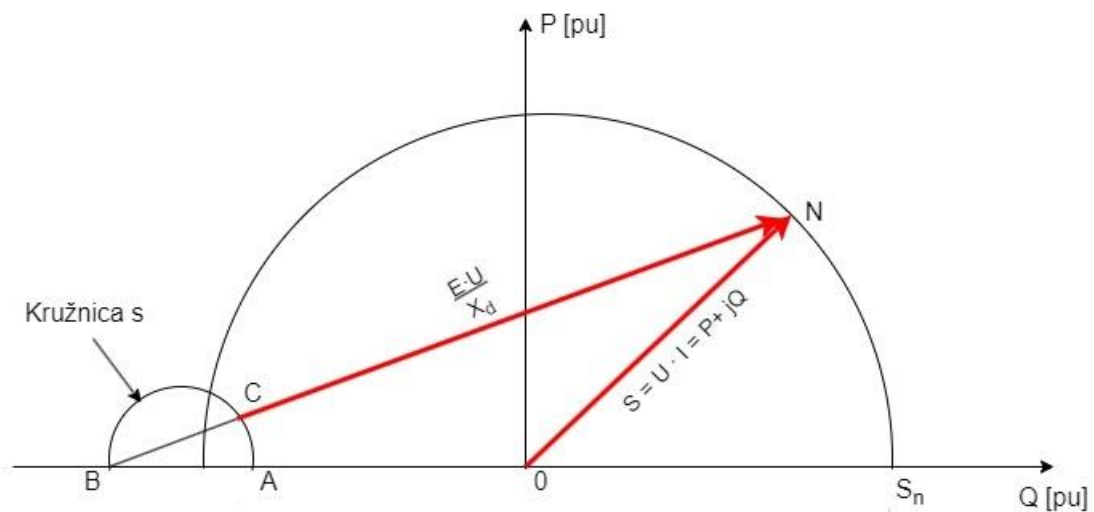


Slika 9.8. Pogonska karta hidrogeneratora – jedinična kružnica

Na X-os se postavje:

- točka A za  $\frac{U^2}{X_d}$  udaljena od ishodišta
- točka B za  $\frac{U^2}{X_q}$  udaljena od ishodišta

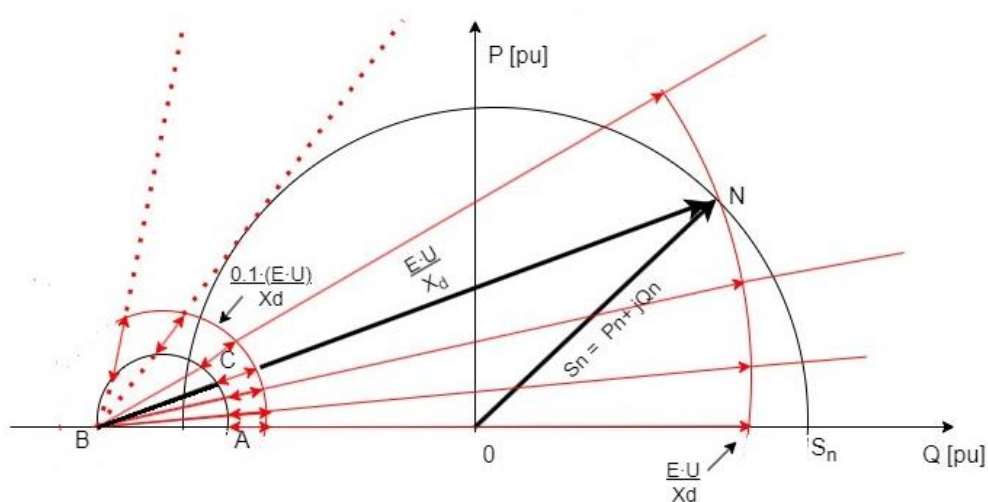
Ucrtava se kružnica  $s$  koja sadrži te dvije točke.



Slika 9.9. Pogonska karta hidrogeneratora – nazivna radna točka

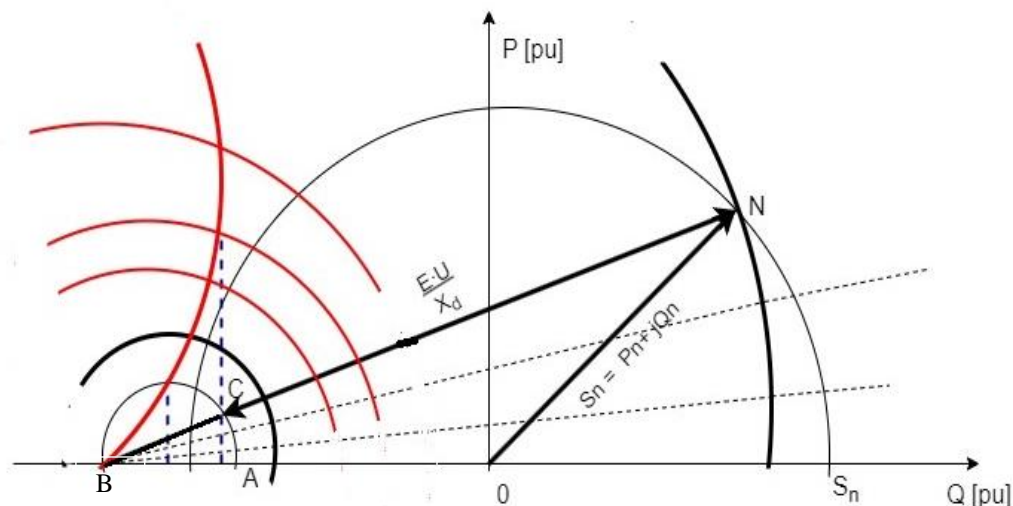
Kod konstrukcije pogonske karte turbogeneratora se ograničenje uzbude dobivalo jednostavnim crtanjem kružnica sa središtem u točki A, no kod hidrogeneratora potreban je drugačiji princip. Linije koje spajaju točke jednake vrijednosti uzbude leže na tzv. Pascalovim krivuljama, a ne na kružnicama kao što je bio slučaj kod turbogeneratora.

Pascalove krivulje se dobiju tako da se iz točke B povuku pravci, te se na njima označe točke koje su od kružnice *s* jednako udaljene. Spajanjem tih točaka dobiju se prve Pascalove krivulje, odnosno linije koje povezuju mjesta iste razine uzbude. Minimalna uzbuda jednaka je 10% nazivne vrijednosti uzbude, dok je maksimalna uzbuda jednaka nazivnoj.



Slika 9.10. Pogonska karta hidrogeneratora – dozvoljene razine uzbude

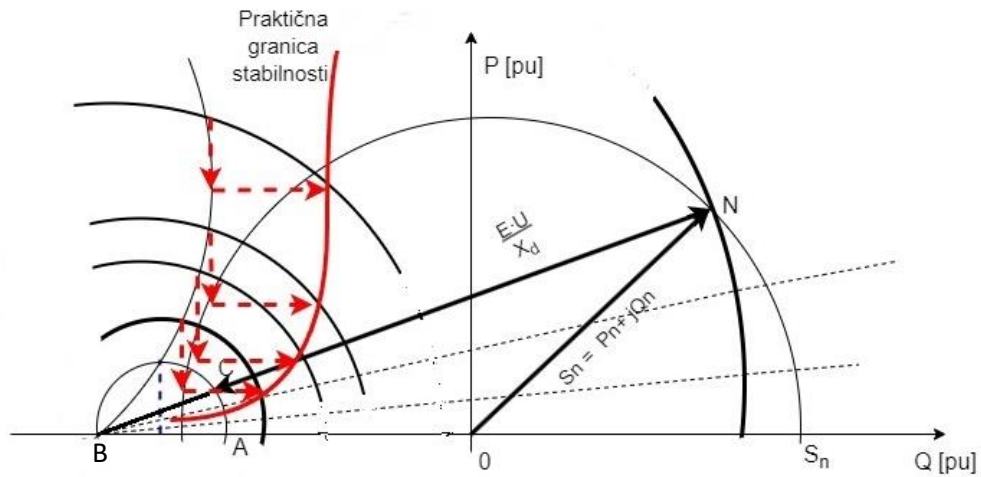
Nakon što su ucrtane Pascalove krivulje, započinje se s određivanjem granica stabilnosti. Teorijska granica stabilnosti se konstruira spajanjem tjemernih vrijednosti krivulje konstantne uzbude. Tjemena vrijednost dobivene krivulje konstantne uzbude predstavlja maksimalnu djelatnu snagu koju može proizvesti generator. U pogonu nije moguće postići teorijsku granicu stabilnosti zato što bi sa svakim povećanjem opterećenja generatora došlo do ispada generatora iz sinkronizma s ostatkom mreže.



Slika 9.11. Pogonska karta hidrogenatora – teorijska granica stabilnosti

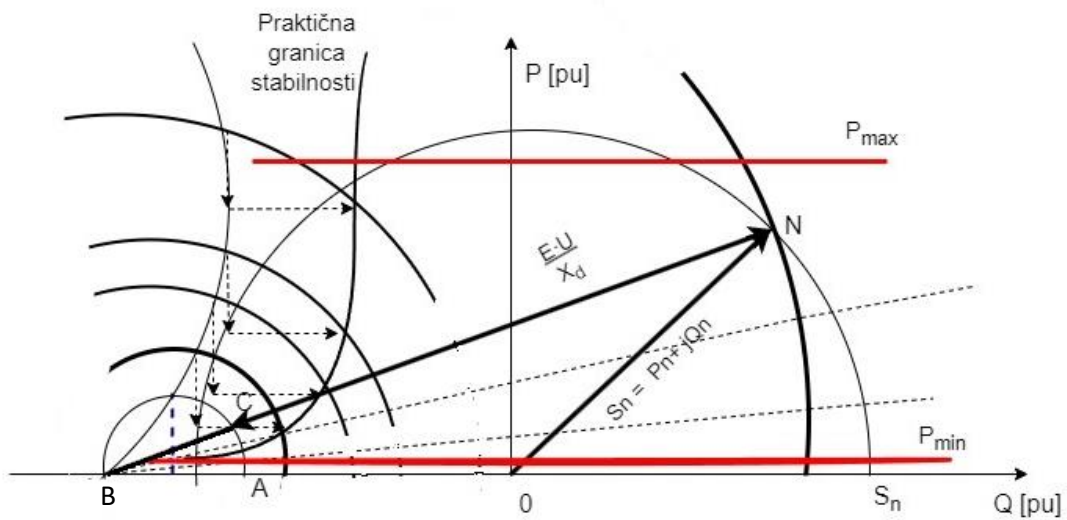
Praktična granica stabilnosti se dobiva tako da se od svake točke teorijske granice stabilnosti, nazivna prividna snaga smanji za 10%. Potrebno se pomaknuti za 10% okomito prema dolje od tjemernih vrijednosti pojedinih razina uzbude i pomaknuti se vodoravno prema desno dok se ne presiječe ista krivulja jednake uzbude.

Potrebno je ponoviti postupak za svaku Pascalovu krivulju teorijske stabilnosti, sve dok se ne stigne do početne jedinične kružnice. Dobiveno sjecište daje točku praktične granice stabilnosti, a spajanjem tih točaka nastaje krivulja praktične stabilnosti.

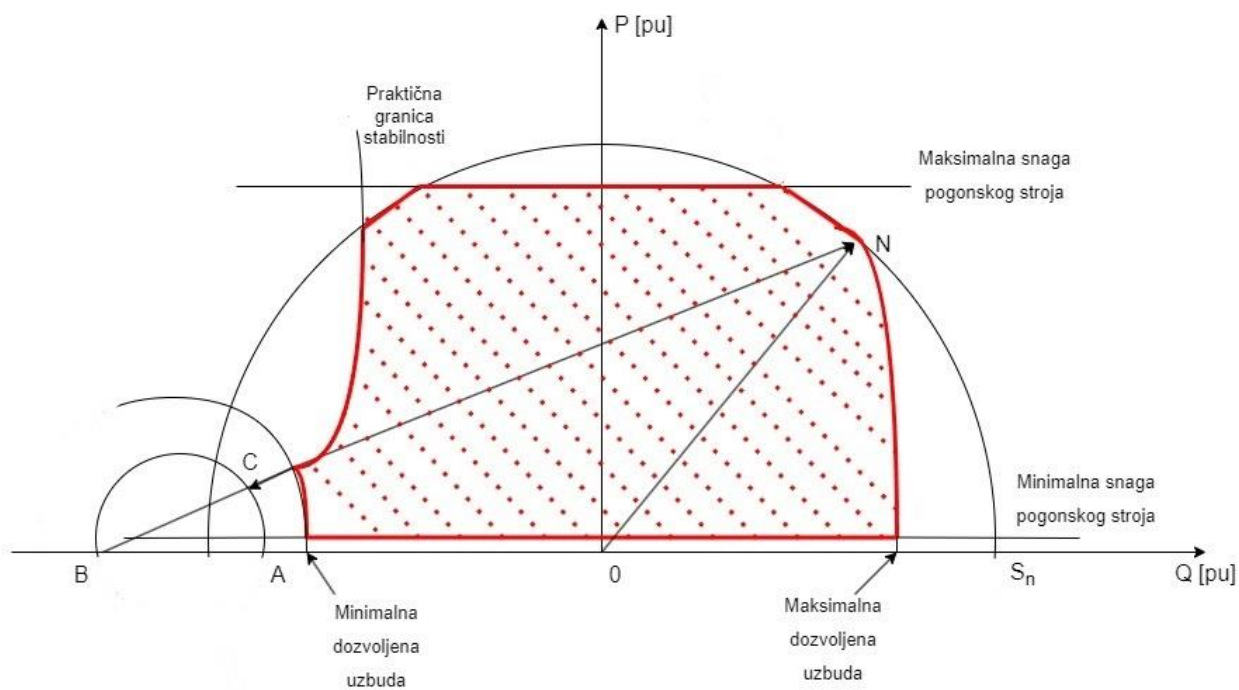


Slika 9.12. Pogonska karta hidrogeneratora – praktična granica stabilnosti

Granice minimalne i maksimalne snage pogonskog stroja se ucrtavaju na jednak način kao kod turbogeneratora. Kako ne bi došlo do turbulentnih strujanja, postoje vrste hidroturbina kojima je potreban minimalni protok vode. Također, postoje hidroagregati koji nemaju ograničenje minimalne radne snage.



Slika 9.13. Pogonska karta hidrogeneratora – ograničenja zbog minimalne i maksimalne snage



Slika 9.14. Pogonska karta hidrogeneratora

## 10. ZAKLJUČAK

Sinkroni generator je rotacijski električni stroj koji služi za pretvorbu mehaničke energije u električnu energiju. Mehanička energija je dobivena od pogonskog stroja (npr. turbine ili dizelskog motora). Koriste se u termoenergetskom, hidroenergetskom i nuklearnom sustavu za stvaranje napona.

Sinkroni generatori se mogu razvrstati na više načina, no ona koja se najčešće koristi je prema vrsti pogonskog stroja, te se u ovom radu obratila posebna pozornost na nju. Ključni podaci za odabir generatora su snaga poslije pretvorbe energije, te brzina vrtnje određena pogonskim strojem. Prema vrsti pogonskog stroja, sinkroni generatori se dijele na turbogeneratore, hidrogeneratore i dizelske generatore. Sa njima se susrećemo gotovo svakodnevno. U ovom radu su objašnjeni njihovi načini rada, konstrukcijske značajke, te njihova područja primjene.

Turbogenerator ima sposobnost pretvorbe bilo kojeg oblika energije (voda, zrak, plin, itd.) u električnu energiju. Dokazano je, da uz pravilno i periodično održavanje, turbogenerator ima veću sigurnost i fleksibilnost od hidrogeneratora i dizelskog generatora. Hrvatsko poduzeće „Končar - Elektroindustrija d. d.“ već dugo godina uspješno razvija turbogeneratore za elektrane širom svijeta.

Hidrogenerator, kao što mu i samo ime govori, se najčešće primjenjuje u hidroelektranama. Svaka hidroelektrana diljem svijeta koristi hidrogeneratore kao svoje proizvodne jedinice. Električna energija proizvedena u hidroelektrani ima veliku prednost u odnosu na ostale elektrane zato što nema negativnog utjecaja na okoliš.

Dizelski generatori se koriste na mjestima bez priključka na električnu mrežu i za hitno napajanje. Mogu se uključiti i isključiti u samo nekoliko sekundi, što znači da mogu brzo reagirati u hitnim slučajevima. Vrlo je važno redovito održavanje generatora kako bi isporučio električnu energiju kada je to potrebno. Ponekad dizelski generator može biti jeftiniji od električne energije iz mreže, ali obično je to skuplja opcija.

Iz ovog rada se može zaključiti koliko su zapravo sinkroni generatori prema pogonskom stroju često korišteni u današnje doba, te koliko su u nekim situacijama gotovo neophodni.

## 11. LITERATURA

- [1] Mandić, I.; Tomljenović, V.; Pužar, M.: „Sinkroni i asinkroni električni strojevi“, Tehničko veleučilište u Zagrebu, Zagreb, 2012.
- [2] Vučetić, D.: „Brodski električni strojevi“, Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet, Rijeka, 2015.
- [3] Wolf, R.: „Osnove električnih strojeva“, Školska knjiga, Zagreb, 1996.
- [4] Tešnjak, S.; Grgić, D.; Kuzle, I.: „Pogonska karta sinkronog generatora“, s Interneta, <https://pdfcoffee.com/elektrane-09-pogonska-karta-pdf-free.html>, 02.06.2023.
- [5] Kolarec, D.: „Zaštita sinkronih generatora od prenapona“, s Interneta, <https://zir.nsk.hr/en/islandora/object/etfos%3A1596/datastream/PDF/view>, 09.04.2023.
- [6] Koons, K.: „What is a Turbo Generator ?“, s Interneta, <https://www.aboutmechanics.com/what-is-a-turbo-generator.htm>, 12.04.2023.
- [7] Kirkpatrick, J.: „Hydrogenerator Design manual“, U.S. Department of Interior, Denver, Colorado, 1992.
- [8] Marić, J.: „Sinkroni generator s istaknutim polovima“, s Interneta, <https://repositorij.etfos.hr/islandora/object/etfos%3A1292/datastream/PDF/view>, 19.04.2023.
- [9] „What is a Turbo Generator : Working & Its Applications“ , s Interneta, <https://www.elprocus.com/turbo-generator/>, 13.04.2023.
- [10] Jurković, V.; Miklošević, K.; Špoljarić, Ž.: „Excitation System Models of Synchronous Generator“, Faculty of Electrical Engineering Osijek, Osijek, 2010.
- [11] „Diesel Generator and its Major Components“ , s Interneta, <https://www.topone-power.com/info/diesel-generator-and-its-major-components/>, 16.04.2023.
- [12] „COMMON DIESEL GENERATOR USES & APPLICATIONS“, s Interneta, <https://woodstockpower.com/blog/common-diesel-generator-uses-applications/>, 16.04.2023.
- [13] „How They Work: Turbo Generators“, s Interneta, <https://www.planete-energies.com/en/media/article/how-they-work-turbo-generators>, 10.04.2023.
- [14] Barbir, J.: „Parne turbine za pogon pumpi tereta“, s Interneta, <https://repository.pfri.uniri.hr/islandora/object/pfri%3A2141/datastream/PDF/view>, 05.08.2023.

[15] Parancin, M.: „Kombinirani plinsko i parno-turbinski propulzijski sustavi“, s Interneta, <https://repozitorij.unizd.hr/islandora/object/unizd:77/preview>, 08.08.2023.

[16] „Motori s unutrašnjim izgaranjem“, s Interneta, [https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/motori\\_s\\_unutrasnjim\\_izgaranjem.pdf](https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/motori_s_unutrasnjim_izgaranjem.pdf), 15.08.2023.

[17] Franković, F.: „Analiza strujanja kroz difuzor vodne turbine tip 1“, s Interneta, <https://zir.nsk.hr/islandora/object/riteh:3017/datastream/PDF/view>, 14.08.2023.



## SAŽETAK

U ovom radu je objašnjen način rada i izvedbe sinkronih generatora. Posebno su obrađeni sinkroni generatori prema vrsti pogonskog stroja (turbogeneratori, hidrogeneratori i dizelski generatori). Detaljno su prikazane konstrukcijske značajke i principi rada navedenih pogonskih strojeva, te su navedeni konkretni primjeri uporabe. Također, poseban fokus je stavljen na opis uzбудnih sustava, te na konstruiranje pogonske karte sinkronih generatora, ovisno o tipu pogonskog stroja.

**Ključne riječi:** sinkroni generator, turbogenerator, hidrogenerator, dizelski generator, uzбудni sustavi, pogonska karta, parna turbina, plinska turbina, vodna turbina, dizelski motor

## ABSTRACT

This paper explains the working principle of synchronous generators and their performance. Especially are processed types of drive engines for synchronous generators (turbogenerators, hydrogenerators and diesel generators). The constructional features and the working principle of the mentioned drives engines are presented in detail, and concrete examples of use are given. Also, a special focus is placed on the description of the excitation systems and design of the operating states of synchronous generators, depending on the type of drive engine.

**Key words:** synchronous generator, turbogenerator, hydrogenerator, diesel generator, excitation systems, operating state, steam turbine, gas turbine, water turbine, diesel engine