

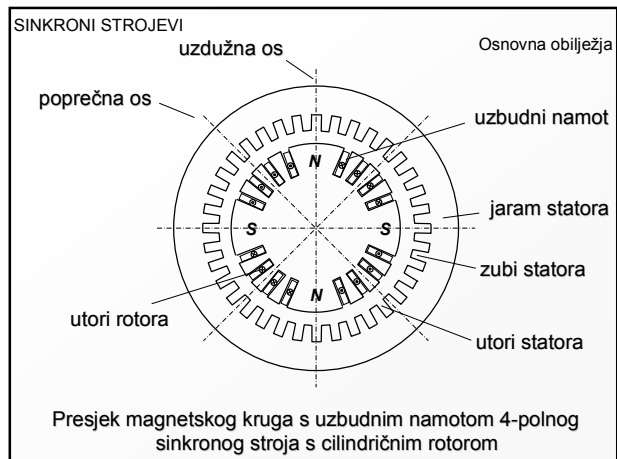
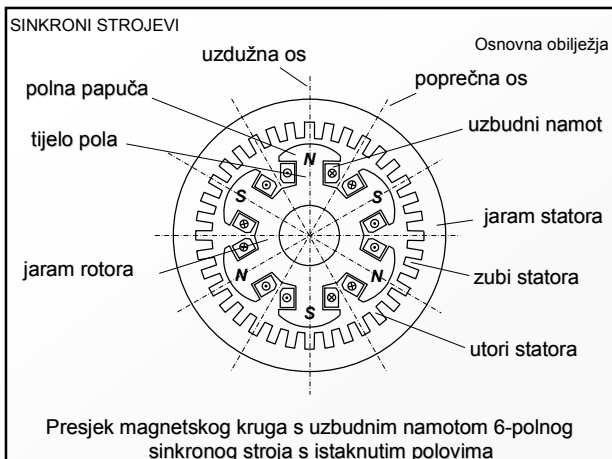
SINKRONI STROJEVI

Osnovna obilježja

SINKRONI STROJEVI

Osnovna obilježja

- Odnos snaga najmanjih i najvećih izvedenih sinkronih strojeva je 10^{12} .
- Strojevi su izvedeni za snage od nekoliko mW do nekoliko GW.
- Najmanji strojevi se rade za različite instrumente.
- Najveći strojevi su napravljeni za potrebe velikih elektroenergetskih sustava (elektrane).



SINKRONI STROJEVI

Osnovna obilježja

- Magnetsko polje, koje stvara uzbuđena na rotoru, se vrti usljed mehaničke vrtnje rotora.
- Na statoru je u pravilu trofazni armaturni namot koji je simetrično raspoređen u utorima po obodu stroja.
- U vodičima statorskog namota se inducira napon, i kad je stroj opterećen poteku struje.
- Struje u statorskom namotu stvore okretno protjecanje koje se vrti sinkrono s rotorom.

SINKRONI STROJEVI

Izvedbe sinkronih strojeva

SINKRONI STROJEVI Izvedbe sinkronih strojeva

- **Stator** uobičajenih izvedbi sinkronih strojeva sličan je za sve izvedbe.
- Omjeri duljine i promjera statora sinkronih strojeva se znatno razlikuju.
- Osim ove razlike drugih bitnih razlika nema.

SINKRONI STROJEVI Izvedbe sinkronih strojeva

Statorski paket sinkronog stroja

SINKRONI STROJEVI Izvedbe sinkronih strojeva

Lim statorskog paketa sinkronog stroja

Segment lima

SINKRONI STROJEVI Izvedbe sinkronih strojeva

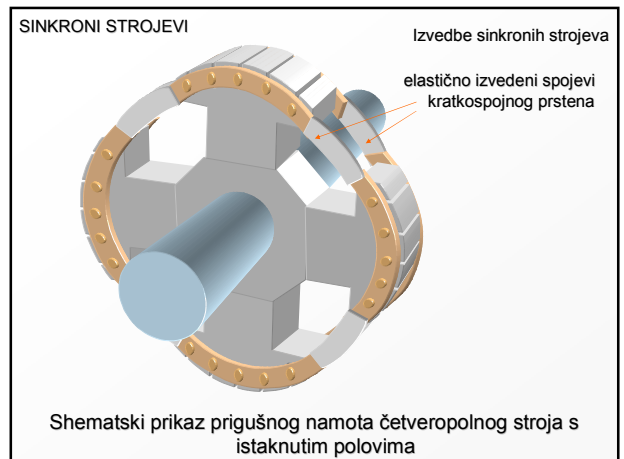
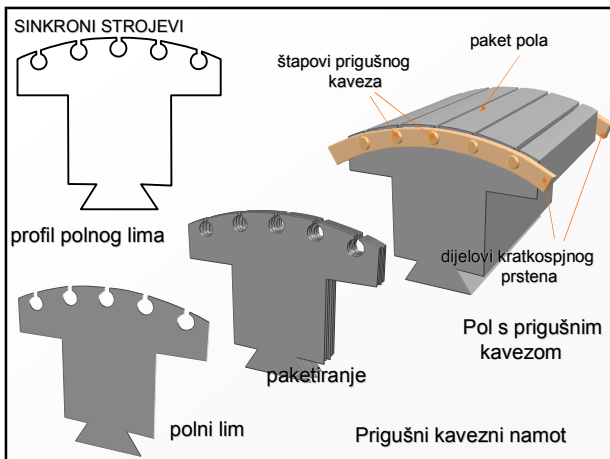
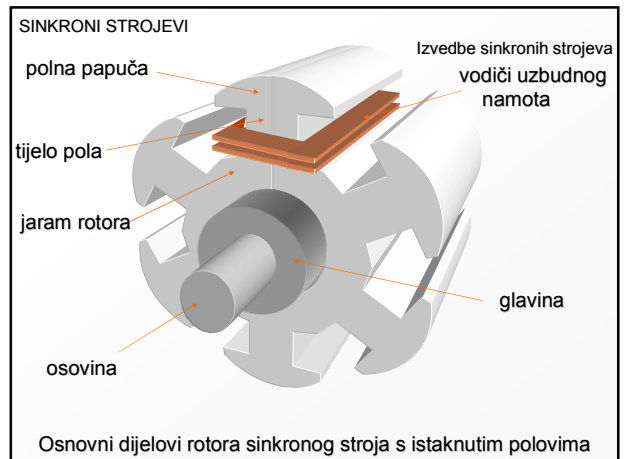
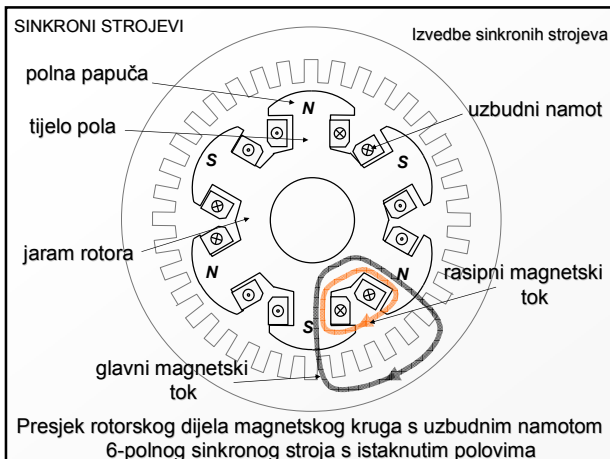
- Magnetski krug statora sinkronog stroja je napravljen u obliku šupljeg valjka koji se naziva statorski paket.
- Sastavljen je od prstenastih, međusobno izoliranih magnetskih limova debljine 0.35, 0.5 ili 0.63 mm.
- Uzduž statorskog paketa, u provrtu su utori.
- U utore se stavlja dvoslojni trofazni namot armature, koji se najčešće spaja u zvijezdu.

SINKRONI STROJEVI Izvedbe sinkronih strojeva

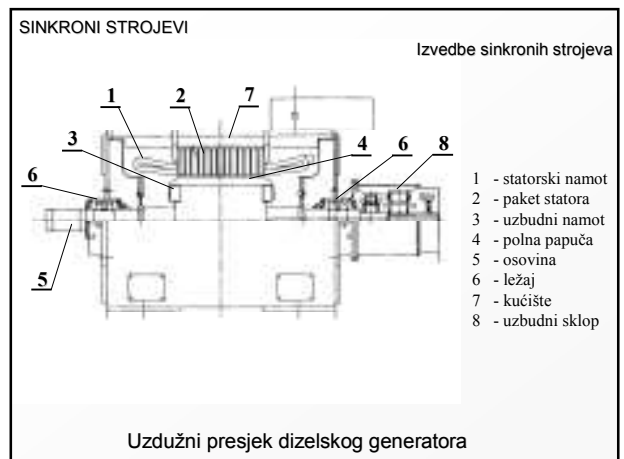
- **Rotor** sinkronog stroja predstavlja njegov uzбудni dio.
- Sastoji se od:
 - osovine,
 - jarna rotora i
 - polova s uzбудnim namotom.
- Izvedbe rotora strojeva s istaknutim polovima (hidrogenerator) i strojeva s cilindričnim rotorom (turbogenerator) znatno se razlikuju.

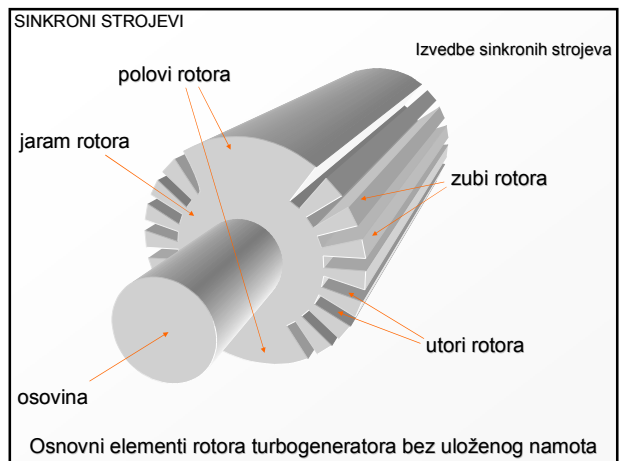
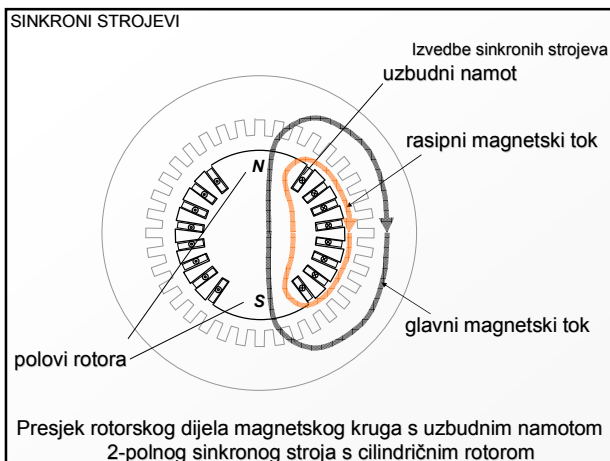
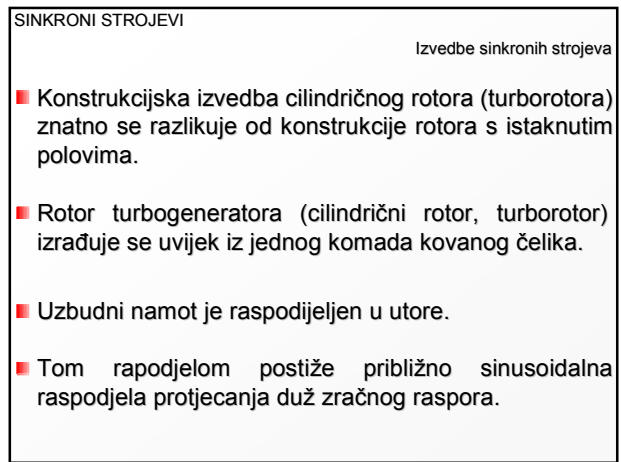
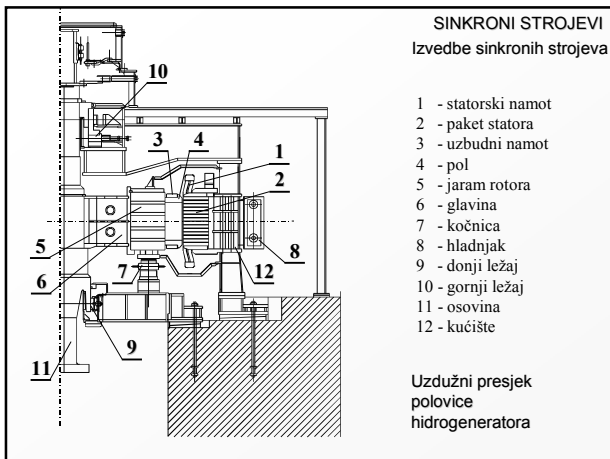
SINKRONI STROJEVI Izvedbe sinkronih strojeva

- Na rotoru je smješten uzбудni namot, kroz koji teče istosmjerna struja i tako stvara magnetsko polje.
- Uzбудni namot je tako spojen da se naizmjenično nalaze sjeverni i južni magnetski polovi.
- U rotoru je magnetski tok uzbuđen istosmjernom strujom, pa je i on istosmjern.
- Stoga svi dijelovi na rotoru mogu biti od masivnog željeza.



- SINKRONI STROJEVI Izvedbe sinkronih strojeva
- Polna papuča oblikuje zračni raspod.
 - U polnoj papučici se gotovo uvijek izrađuju utori u koje se u uzdužnom smjeru stavljaju štapovi, s obje strane stroja kratko spojeni prstenima.
 - Oni čine prigušni kavez.
 - Kod velikih strojeva s istaknutim polovima je promjer rotora jako velik, pa je između jarma i osovine potrebno staviti glavinu i zvijezdu rotora.

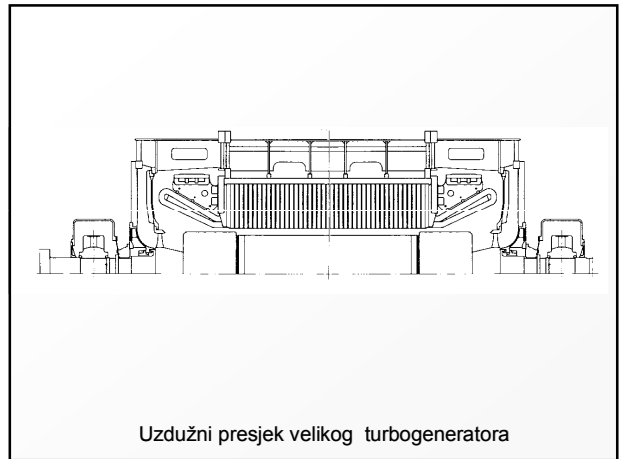






SINKRONI STROJEVI
Izvedbe sinkronih strojeva

Rotor
turbogeneratorsa
u izradi



Uzdružni presjek velikog turbogeneratorsa

SINKRONI STROJEVI Izvedbe sinkronih strojeva

- Aktivni dio stroja smješten je u kućište koje služi kao zaštita paketa i namota i kao nosač čitavog stroja.
- Kućišta velikih sinkronih strojeva izvode se danas isključivo kao varena kutijaste konstrukcije.
- Veliki turbogeneratori hlade se vodikom pod povećanim tlakom, pa kućište mora biti odgovarajuće dimenzionirano.

SINKRONI STROJEVI Izvedbe sinkronih strojeva

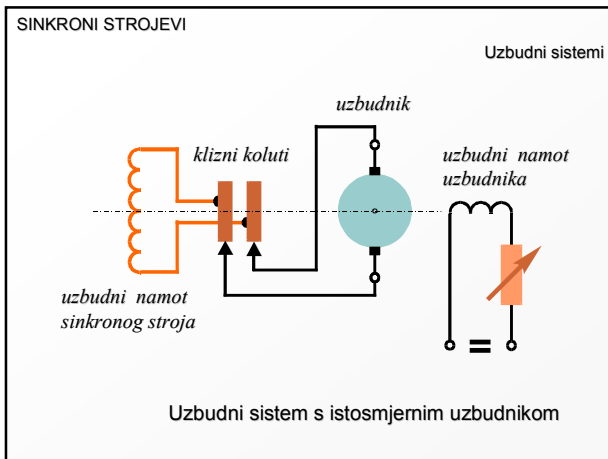
- Turbogeneratori i dizelski generatori su uvijek horizontalne izvedbe.
- Hidrogeneratori se najčešće izvode s vertikalnom ososvinom.
- Iznimka su hidrogeneratori za pogon s Pelton turbinom i cijevni generatori, kod kojih je cijeli generator zajedno s kućištem potopljen u tok vode.

SINKRONI STROJEVI

Uzbudni sistemi

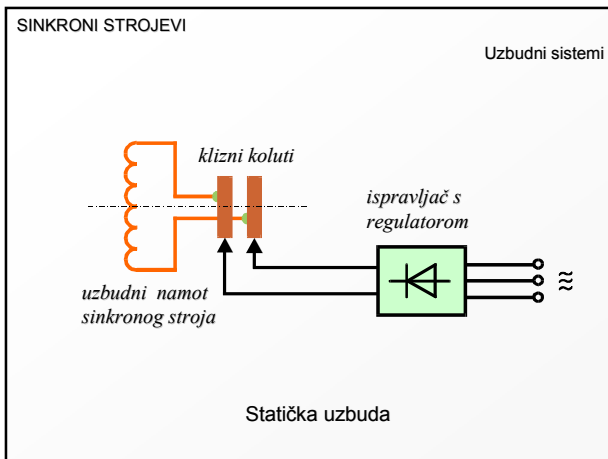
SINKRONI STROJEVI Uzbudni sistemi

- Veći generatori grade se isključivo s uzbudom pomoću istosmjerne struje.
- Ta struja teče uzbudnim namotom i naziva se uzbudna struja.
- Kao izvori uzbudne struje koriste se u praksi tri osnovna rješenja:
 - uzbuda s istosmjernim uzbudnikom,
 - statička uzbuda i
 - beskontaktna uzbuda.
- Danas se sve više koristi uzbuda pomoću permanentnih magneta, naročito kod motora.



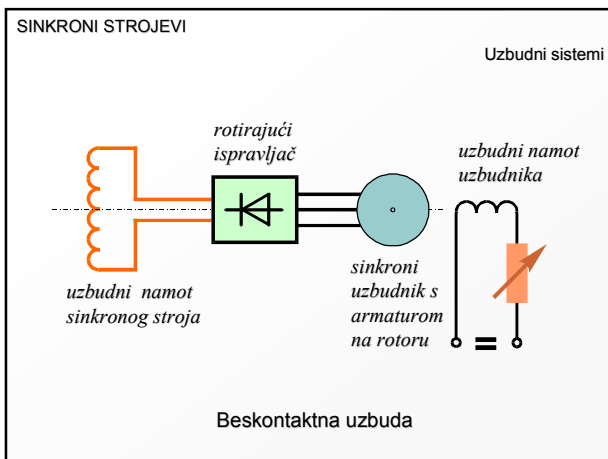
SINKRONI STROJEVI Uzbudni sistemi

- Uzbuda s istosmjernim uzбудnikom je najstarije rješenje koje se uglavnom više ne primjenjuje.
- Na zajedničku osovinu je prigraden istosmjerni generator (uzbudnik) čije su izlazne stezaljke spojene s uzбудnim namotom generatora preko četkica i kliznih prstena.
- Regulacija uzбудne struje se postiže regulacijom uzбудne uzбудnika pomoću automatskog regulatora.
- Slaba je strana ovog rješenja u kolektoru uzбудnika koji je i inače najslabija točka istosmjernih strojeva.



SINKRONI STROJEVI Uzbudni sistemi

- Drugo, danas često korišteno rješenje je statička uzbuda.
- Kod statičke uzбудne je istosmjerni generator zamijenjen statičkim ispravljačem.
- Struja iz izmjeničnog izvora se ispravlja upravljivim tiristorskim ispravljačem na koji djeluje regulator uzбудne struje.
- Ovo je pouzdaniji sistem od istosmjernog uzбудnika, ali još uvijek ostaju klizni prsteni i četkice kao mogući izvor problema.



SINKRONI STROJEVI Uzbudni sistemi

- Treće moguće rješenje je beskontaktna uzbuda.
- Kao uzбудnik služi mali sinkroni generator koji ima uzбудu na statoru, a armaturni namot na rotoru.
- Rotor uzбудnika i ispravljački uređaj su montirani na osovinu generatora i zajedno se vrte.
- Armatura uzбудnika je preko ispravljačkog uređaja izravno spojena s uzбудnim namotom sinkronog generatora.

- Regulacija uzbudne struje se postiže regulacijom uzbude pomoćnog generatora.
- Prednost je ovakvog rješenja što ne zahtijeva ni kolektor ni klizne prstene pa traži manje održavanja.
- Koristi se jako često za uzbudu manjih generatora koji rade samostalno na vlastitoj mreži.
- Kao izvor za napajanje uzbude uzбудnika koristi se tada mali generator s permanentnim magnetima na rotoru.

Osnovni podaci

- Osnovne podatke o izvedenom stroju možemo saznati s natpisne pločice.
- Natpisna pločica sadrži:
 - osnovne podatke o proizvođaču,
 - godinu proizvodnje,
 - standarde po kojima je stroj izrađen i
 - nazivne podatke za koje je stroj građen.

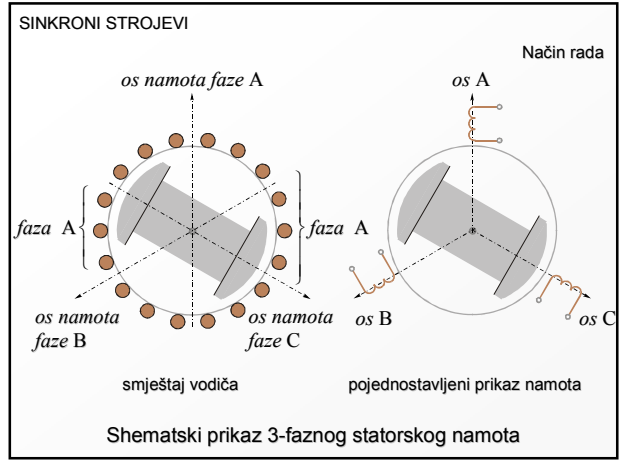
- Nazivni podaci sinkronog stroja su:
 - nazivna snaga S_n ,
 - nazivni napon U_n (efektivna vrijednost linijskog napona),
 - nazivna struja I_n (efektivna vrijednost linijske struje),
 - nazivna frekvencija f_n ,
 - nazivna brzina vrtnje n_n ,
 - nazivni faktor snage $\cos\varphi_n$,
 - uzbudna struja I_{fn} i
 - nazivni uzbudni napon U_{fn} .

- Kao nazivna snaga se za generator daje električna prividna snaga, određena radnim i jalovim opterećenjem jer opterećenje generatora ne mora biti samo radnog karaktera.
- To je važno zbog zagrijavanja stroja za što su mjerodavni napon i ukupna struja, dakle prividna, a ne samo radna snaga.
- Na primjer, u slučaju čisto induktivnog opterećenja struja generatora i zagrijavanje mogu poprimiti nazivne vrijednosti, a radna snaga koju predaje je jednaka nuli.

Način rada

SINKRONI STROJEVI Način rada

- Sinkroni strojevi najčešće se izvode kao trofazni generatori, s dva ili više polova.
- Za kvalitativna teoretska razmatranja dovoljno je promatrati samo dva polova.
- Fizikalna slika (magnetsko polje, namot) identična je za svaki par polova.
- Za kvantitativne račune treba uzeti u obzir stvarni broj polova, broj faza, broj paralelnih grana, broj zavoja, oblik namota i ostale veličine.

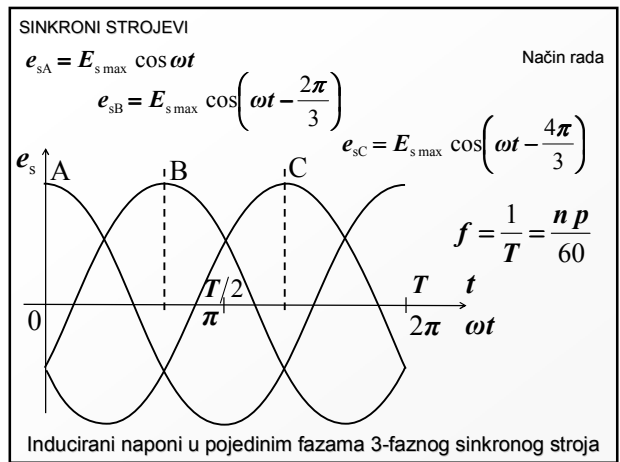


SINKRONI STROJEVI Način rada

- Rotacijsko magnetsko polje inducira u namotima pojedinih faza napone koji se vremenski mijenjaju konstantnom frekvencijom:

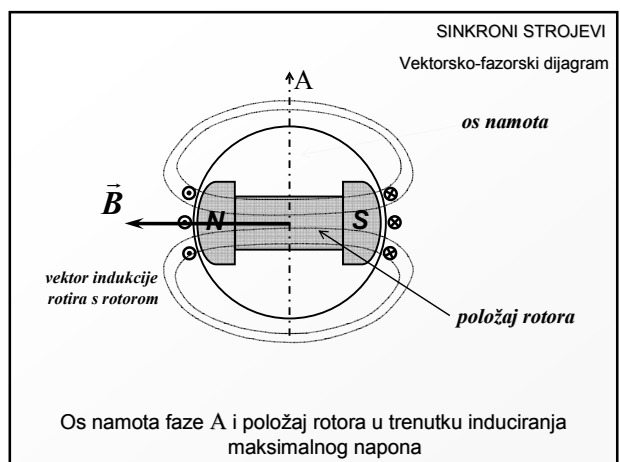
$$f = f_s = \frac{n p}{60}$$

- Zbog prostornog rasporeda namota su inducirani naponi vremenski pomaknuti za 120° el. ($2\pi/3$).
- Punom okretu rotora odgovara cijela perioda inducirano napona na statoru.



SINKRONI STROJEVI

Vektorsko-fazorski dijagram



SINKRONI STROJEVI Vektorsko-fazorski dijagram

- Indukcija B u zračnom rasporu je prostorno sinusno raspoređena, i možemo je predstaviti prostornim simboličkim vektorom.
- Vektor protjecanja uzbudnog namota se poklapa s vektorom indukcije.
- Možemo prikazivati samo vektore, pa se u odnosu na statičnu os faze A vektori indukcije i protjecanja rotora vrte sinkronom brzinom ulijevo.
- U promatranom trenutku imamo maksimalan inducirani napon u fazi A.

SINKRONI STROJEVI Vektorsko-fazorski dijagram

- Struja stvara pozitivno protjecanje statora.
- Maksimalum statorskog protjecanja je u sredini namota, poklapa se s osi namota.

SINKRONI STROJEVI Vektorsko-fazorski dijagram

- Vremenski promjenljive veličine (napone, struje) možemo prikazati simbolički pomoću fazora.
- Trenutne vrijednosti napona e_s i struje i_s u jednoj fazi statorskog namota su dane izrazima:

$$e_s = E_{s \max} \cos \omega t = \sqrt{2} E_s \cos \omega t$$

$$i_s = I_{s \max} \cos(\omega t - \varphi_s) = \sqrt{2} I_s \cos(\omega t - \varphi_s)$$
- U tom slučaju se ove veličine mogu prikazati fazorima:

$$\underline{E}_s = E_s e^{j\omega t}$$

$$\underline{I}_s = I_s e^{-j\varphi_s}$$

SINKRONI STROJEVI Vektorsko-fazorski dijagram

$$\underline{E}_s = E_s e^{j0}$$

$$\underline{I}_s = I_s e^{-j\varphi_s}$$

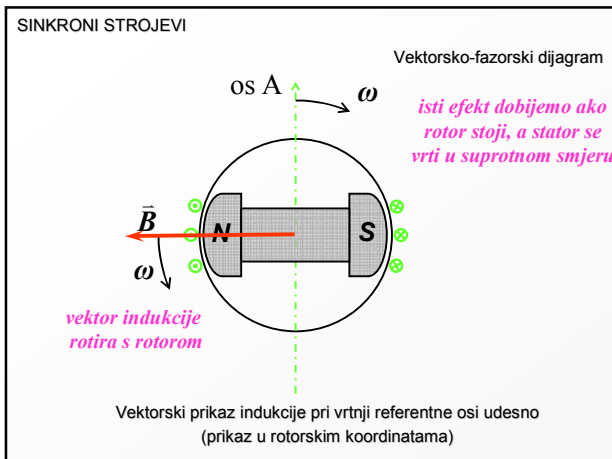
Fazorski prikaz vremenski promjenljivog napona i struje u fazi statorskog namota

SINKRONI STROJEVI Vektorsko-fazorski dijagram

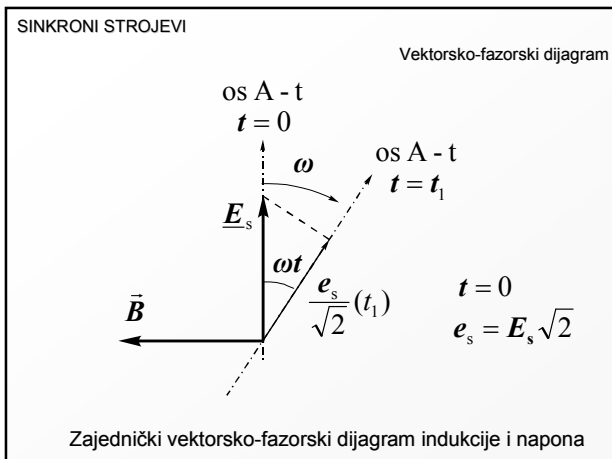
- Uzimamo da su fazori nepomični, a vremenska os rotira udesno kružnom frekvencijom ω .
- Projekcija fazora neke veličine na vremensku os (koja rotira) daje trenutnu vrijednost te veličine.
- Ovdje koristimo fazore efektivnih vrijednosti napona i struje.
- Projekciju tih fazora na vremensku os trebamo pomnožiti s $\sqrt{2}$ da dobijemo njihove trenutne vrijednosti.

SINKRONI STROJEVI Vektorsko-fazorski dijagram

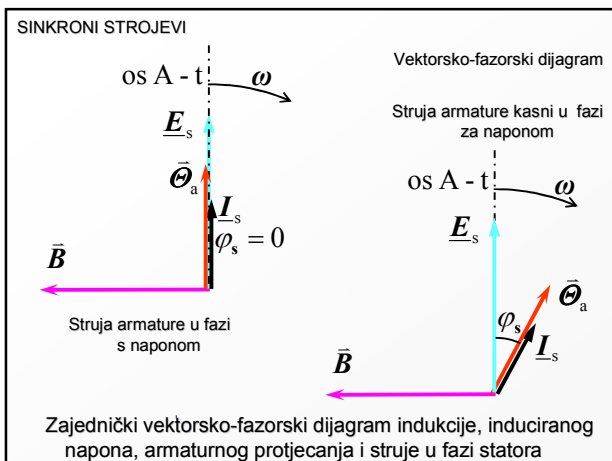
- Strujni oblog, protjecanje i indukcija predstavljaju po obodu stroja raspoređene veličine.
- Ako promatramo samo osnovni prostorni harmonik, onda se te veličine mogu predstaviti vektorima.
- Pri tome smatramo da se položaj odgovarajućeg vektora poklapa s položajem maksimuma pripadne veličine.



- SINKRONI STROJEVI
- Vektorsko-fazorski dijagram
- Prostorna os faze A se vrti udesno istom brzinom kao vremenska os u fazorskom dijagramu.
 - Stoga fazorski dijagram napona i struje i vektorski dijagram indukcije i protjecanja možemo staviti u jedan zajednički vektorsko-fazorski dijagram.
 - Pritom imamo zajedničku vremensku i referentnu prostornu os, os A-t, koja se vrti električnom kutnom brzinom ω udesno.

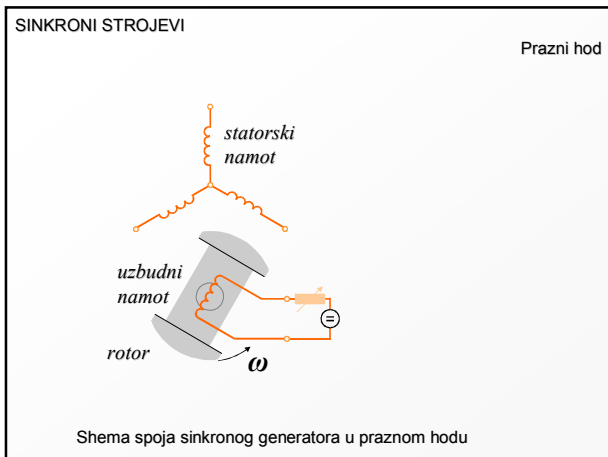


- SINKRONI STROJEVI
- Vektorsko-fazorski dijagram
- Struja u fazi A može biti vremenski pomaknuta u odnosu na napon, na primjer može kasniti za kut φ_s .
 - Protjecanje statora će imati maksimum u smjeru osi faze A onda kada je struja u fazi A maksimalna, odnosno kad se os A-t poklopi s fazorom struje \underline{I}_s .
 - Zato je u zajedničkom vektorsko-fazorskom dijagramu smjer vektora armaturnog protjecanja jednak smjeru fazora struje u fazi statorskog namota.



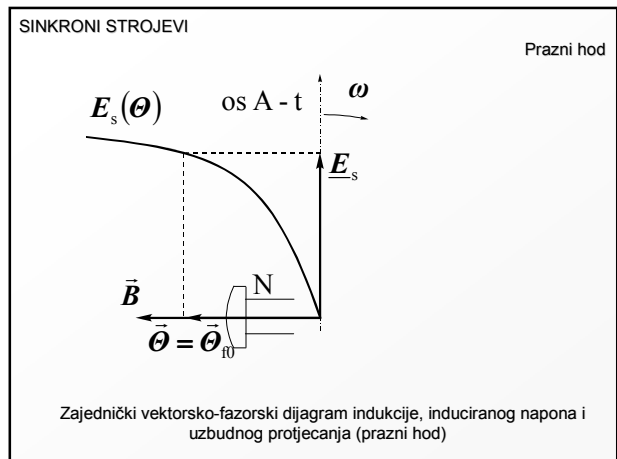
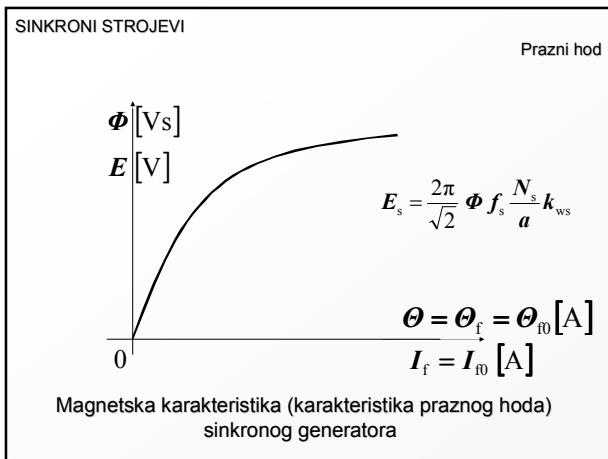
SINKRONI STROJEVI

Prazni hod



SINKRONI STROJEVI Prazni hod

- Magnetski tok ovisi o protjecanju $\Phi=f(\theta)$ na način koji je određen magnetskom karakteristikom.
- Zbog željeza u magnetskom krugu ta je karakteristika nelinearna.
- Inducirani napon je proporcionalan magnetskom toku po polu Φ - njegova efektivna vrijednost je:

$$E_s = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \Phi f_s \frac{N_s}{a} k_{ws}$$


SINKRONI STROJEVI Prazni hod

- Vektori uzbudnog protjecanja i indukcije nisu proporcionalni - međusobno ovise u skladu s karakteristikom magnetiziranja, ali imaju isti smjer.
- Ovaj slučaj odgovara pogonskom stanju koje nazivamo prazni hod.
- Statorskim namotom ne teku nikakve struje, pa je protjecanje armature $\theta_a=0$.

SINKRONI STROJEVI

Opterećenje

SINKRONI STROJEVI Opterećenje

- Pri opterećenju teku u statorskim namotima struje.
- One stvaraju protjecanje $\vec{\theta}_a$.
- Protjecanje $\vec{\theta}_a$ se vektorski zbraja s protjecanjem rotora $\vec{\theta}_f$ i tvori protjecanje $\vec{\theta}$:

$$\vec{\theta} = \vec{\theta}_a + \vec{\theta}_f$$

SINKRONI STROJEVI Opterećenje

- Rezultatno protjecanje određuje smjer prostornog vala indukcije kojeg predstavljamo vektorom.
- Inducirani napon je okomit na taj vektor indukcije, a veličina mu je određena krivuljom $E_s = f(\theta)$.
- Struja u fazi A zatvara s naponom kut φ_s koji je određen impedancijom tereta.

SINKRONI STROJEVI Opterećenje

os A - t

ω

$E_s(\theta)$

\vec{E}_s

$\vec{\theta}_a$

\vec{I}_s

$\vec{\theta}$

\vec{B}

$\vec{\theta}_f$

δ_r

φ_s

N

Vektorsko-fazorski dijagram sinkronog stroja pod opterećenjem

SINKRONI STROJEVI Opterećenje

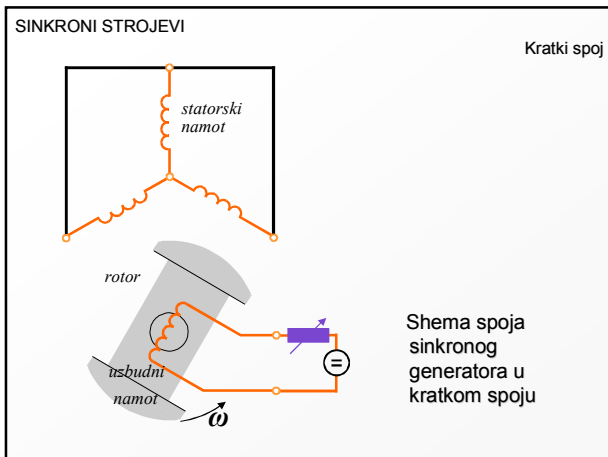
- Dijagram pokazuje da je:
 - za jednako rezultantno protjecanje moramo povećati uzбудu u odnosu na prazni hod, i
 - kut između rotorskog protjecanja i induciranog napona povećan za kut opterećenja δ_r .
- Prikazani slučaj predstavlja radno-induktivno opterećenje generatora.

SINKRONI STROJEVI

Kratki spoj

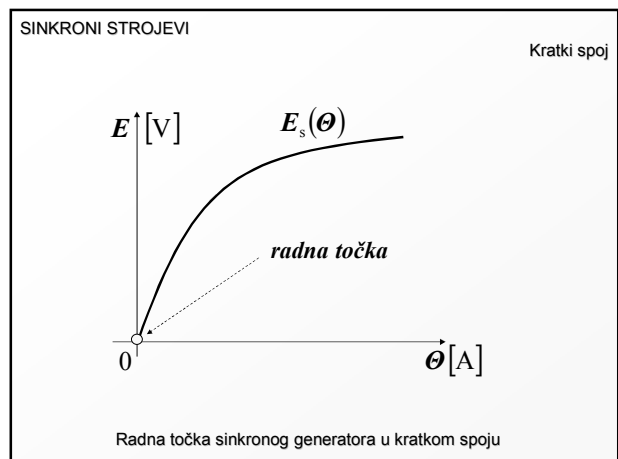
SINKRONI STROJEVI Kratki spoj

- U pogonskom stanju praznog hoda nije bilo pretvorbe energije (mehaničke u električnu ili obrnuto).
- S energetskeg stajališta postoji još jedno takvo pogonsko stanje, a to je kratki spoj.
- U kratkom spoju sinkronog generatora su stezaljke statorskog namota kratko spojene.



- SINKRONI STROJEVI Kratki spoj
- Razmatramo idealni slučaj:
 - vanjski otpori spojeva stezaljki jednaki nuli,
 - stroj nema ni radnih otpora, ni rasipnih reaktancija,
 - stroj nema gubitaka.

- SINKRONI STROJEVI Kratki spoj
- Kratki spoj - realizacija:
 - stezaljke kratko spojimo, uključimo uzбудu i rotor vrtimo ili
 - uzbuđeni stroj kratko spojimo.
 - Napon U između stezaljki je jednak nuli ($U=0$).
 - U stroju se uspostavi takvo magnetsko stanje (indukcija) da je inducirani napon $E_s=0$.
 - Prema karakteristici praznog hoda je radna točka u ishodištu.



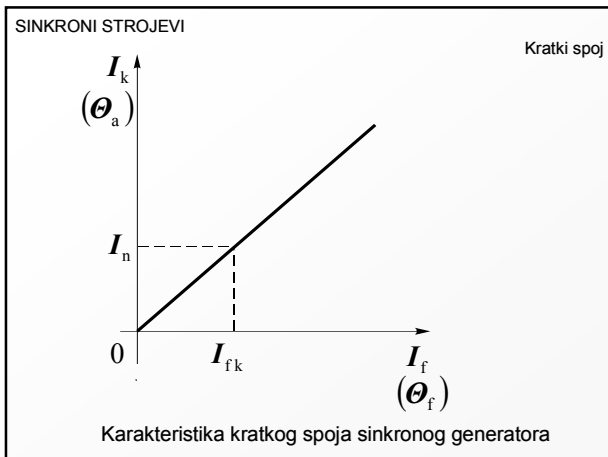
- SINKRONI STROJEVI Kratki spoj
- Inducirani napon je jednak nuli samo ako je ukupno (rezultantno) protjecanje jednako nuli :

$$\theta = 0$$
 - To znači da vektorski zbroj uzbuđnog i armaturnog protjecanja mora biti jednak nuli:

$$\vec{\theta}_a + \vec{\theta}_f = \vec{\theta} = \vec{0}$$
 - Iz toga proizlazi da je:

$$\vec{\theta}_a = -\vec{\theta}_f$$

- SINKRONI STROJEVI Kratki spoj
- Ako povećamo uzбудu, poveća se armaturna struja.
 - Inducirani napon je i dalje jednak nuli.
 - Ukupni magnetski tok je jednak nuli.
 - Nema pojave zasićenja, pa je ovisnost armaturne struje o uzbuđnoj struji $I_k = f(I_f)$ linearna.
 - Teoretski je karakteristika kratkog spoja $I_k = f(I_f)$ linearna za bilo koji iznos uzbuđne struje.



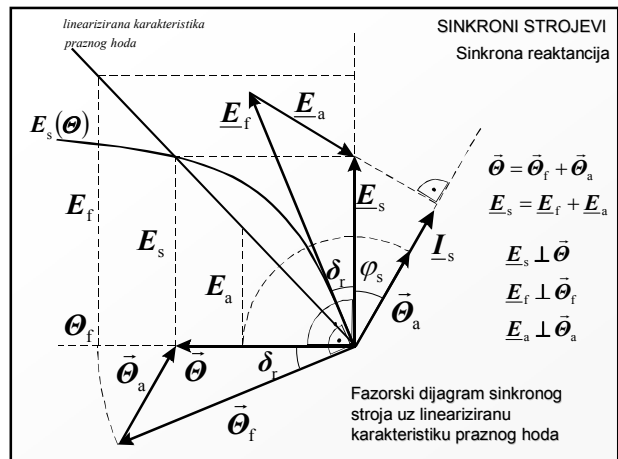
SINKRONI STROJEVI

Sinkrona reaktancija

- SINKRONI STROJEVI Sinkrona reaktancija
- Zbog nelinearne karakteristike magnetiziranja odnosi napona i struja u stroju nisu linearni.
 - Ako se, međutim, zadržimo na istom magnetskom toku, koji odgovara nazivnom naponu, magnetsku karakteristiku možemo linearizirati.
 - Karakteristiku magnetskog kruga lineariziramo pravcem od ishodišta do stvarne radne točke.
 - Pri tome je trokut protjecanja sličan trokutu napona:

$$\vec{\Theta} = \vec{\Theta}_f + \vec{\Theta}_a$$

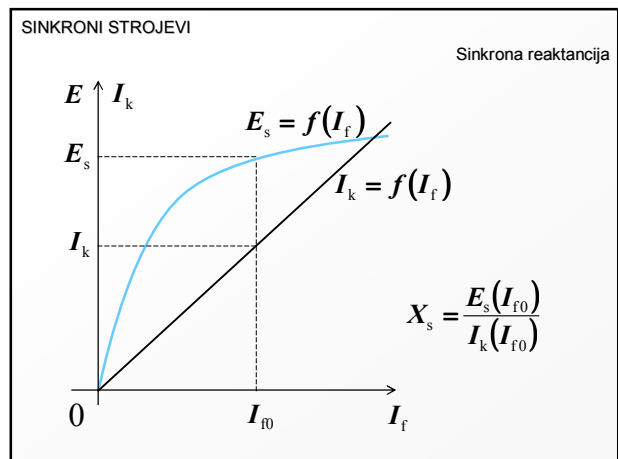
$$\underline{E}_s = \underline{E}_f + \underline{E}_a$$



- SINKRONI STROJEVI Sinkrona reaktancija
- Napon E_a je proporcionalan struji – predstavlja pad napona na fiktivnoj reaktanciji X_s :

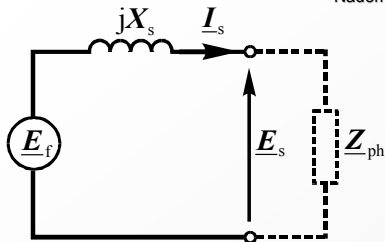
$$\underline{E}_a = -jX_s \cdot \underline{I}_s$$
 - Napon na stezaljkama je:

$$\underline{E}_s = \underline{E}_f - jX_s \underline{I}_s = \underline{E}_f + \underline{E}_a$$
 - X_s se naziva sinkrona reaktancija.
 - Stroj se ponaša kao izvor koji ima neku unutrašnju reaktanciju X_s .



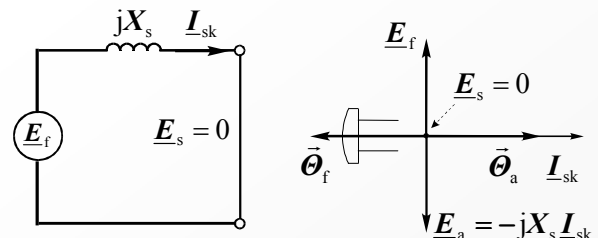
Nadomjesna shema

- Pomoću X_s smo definirali unutarnju reaktanciju sinkronog stroja.
- Možemo nacrtati jednostavnu nadomjesnu shemu sinkronog stroja.
- U shemi je zanemaren radni otpor faze statorskog namota, a rasipna reaktancija je pribrojena sinkronoj reaktanciji.
- Preko ove nadomjesne sheme možemo sada analizirati prilike u kratkom spoju.



Nadomjesna shema sinkronog stroja

- E_f je onaj napon koji bi se inducirao u armaturnom namotu u praznom hodu ako bi vrijedila linearna karakteristika praznog hoda.



nadomjesna shema

vektorsko fazorski dijagram

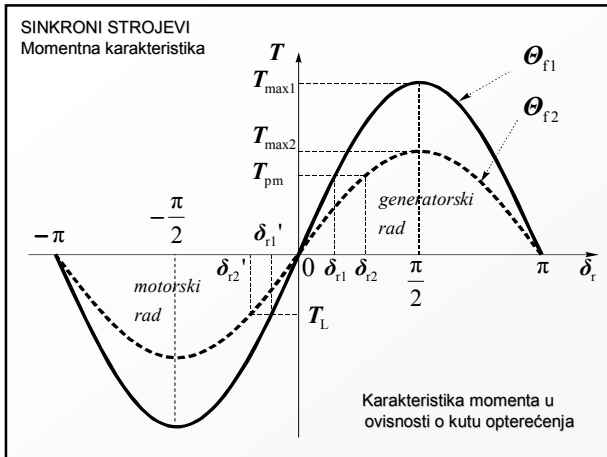
Kratki spoj sinkronog stroja

Momentna karakteristika

- Elektromagnetski moment izmjeničnog stroja iznosi:

$$T_c = \frac{\pi}{\tau_p} V B \Theta_f \sin \delta_r$$

- Uz čvrste iznose indukcije B i uzbudnog protjecanja Θ_f kut opterećenja δ_r se sam podesi tako da razvijeni elektromagnetski moment odgovara mehaničkom momentu na osovini.



SINKRONI STROJEVI
Momentna karakteristika

- Izraz za moment možemo napisati i kao:

$$T = T_{\max} \sin \delta_r$$
- Maksimalni moment iznosi:

$$T_{\max} = \frac{\pi}{\tau_p} V B \Theta_f$$
- Maksimalni moment ovisi o indukciji B (dakle naponu) i uzbudnom protjecanju Θ_f .
- Ako je napon konstantan, onda je maksimalni moment proporcionalan uzbudnom protjecanju.

SINKRONI STROJEVI
Momentna karakteristika

- Razvijeni elektromagnetski moment je jednak maksimalnom $T = T_{\max}$ kad je kut opterećenja:

$$\delta_r = \pm \frac{\pi}{2}$$
- To je nestabilna statička radna točka.
- Ako kut δ_r definiramo pozitivnim za generatorski rad, onda je područje stabilnog rada za:

$$0 < \delta_r < \frac{\pi}{2}$$
- U motorskom režimu rada je kut δ_r negativan, pa je područje stabilnog rada za:

$$-\frac{\pi}{2} < \delta_r < 0$$

SINKRONI STROJEVI
Momentna karakteristika

- Ako stroj potjeramo na osovini, rotor će se sam postaviti u takav položaj da stroj razvije odgovarajući elektromagnetski moment T_e potreban da drži ravnotežu pogonskom momentu T_{pm} :

$$T_e = T_{pm}$$
- Stroj tada radi kao generator.

SINKRONI STROJEVI
Momentna karakteristika

- Ako stroj mehanički opteretimo na osovini, rotor će zaostati za kut δ_r takav da je razvijeni elektromagnetski moment T_e jednak momentu na osovini T_L :

$$T_e = T_L$$
- Stroj tada radi kao motor.

SINKRONI STROJEVI

RAD NA KRUTOJ MREŽI

SINKRONI STROJEVI
RAD NA KRUTOJ MREŽI

- Dva su osnovna načina na koje sinkroni generator može opskrbljivati svoje potrošače:
 - vlastita mreža (otočni rad) i
 - kruta mreža.
- Primjeri otočnog rada su male mreže s jednim generatorom i više potrošača:
 - brod,
 - rezervni generator u robnoj kući, poslovnoj zgradi, visokoj stambenoj zgradi i slično.

SINKRONI STROJEVI
RAD NA KRUTOJ MREŽI

- Kruta mreža u pravilu predstavlja veliku mrežu, s puno priključenih generatora, koja ima konstantan (čvrst) napon i frekvenciju.
- Pojedinačni generator koji priključimo praktički ne utječe ni na napon, ni na frekvenciju mreže, bez obzira na pogonsko stanje u kojem se nalazi.
- Primjer krute mreže je elektroenergetski sistem jedne zemlje.

SINKRONI STROJEVI
RAD NA KRUTOJ MREŽI

- Dva su osnovna uvjeta koja generator mora ispunjavati pri radu na krutoj mreži:
 - napon generatora U mora biti konstantan i jednak naponu mreže U_L (po veličini i po fazi):

$$\underline{U} = \underline{U}_L$$

- frekvencija napona generatora f mora biti konstantna i jednaka frekvenciji mreže f_L :

$$f = f_L$$

- Ako ova dva uvjeta nisu ispunjena, sinkroni generator ne može trajno raditi spojen na mrežu.

SINKRONI STROJEVI
RAD NA KRUTOJ MREŽI

Ravnoteža napona

SINKRONI STROJEVI
RAD NA KRUTOJ MREŽI

Ravnoteža napona

- Iz zahtjeva da napon bude konstantan po iznosu i po fazi proizlazi da stroj mora imati konstantno protjecanje.

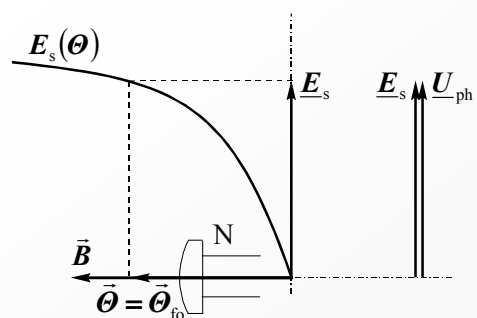
- Promatramo idealni slučaj za koji je: $\underline{E}_s = \underline{U}_s$

- Za prazni hod vrijedi: $\underline{E}_s = \underline{U}_{ph}$
 $\vec{\theta} = \vec{\theta}_{f0}$

- Protjecanja armature nema: $\vec{\theta}_a = \vec{0}$

SINKRONI STROJEVI
RAD NA KRUTOJ MREŽI

Ravnoteža napona



Neopterećeni generator pri radu na krutoj mreži

Ravnoteža protjecanja

- Prema ranije rečenom, napon generatora mora biti konstantan i određen je naponom mreže.
- Stoga i rezultantno protjecanje u stroju mora biti konstantno.
- Vektor indukcije, koji leži u istom smjeru kao i vektor protjecanja, također mora imati čvrst položaj i iznos.
- Vektor protjecanja je vektorska suma protjecanja uzbuđene i protjecanja armature i mora biti konstantan:

$$\vec{\Theta} = \vec{\Theta}_f + \vec{\Theta}_a = konst.$$

- Na vektor protjecanja uzbuđene možemo djelovati dvojako:
 - promjenom uzbuđne struje mijenjamo veličinu vektora uzbuđnog protjecanja,
 - promjenom momenta na osovini mijenjamo položaj vektora uzbuđnog protjecanja.
- Ukupno protjecanje mora ostati konstantno.
- Bilo koja od ovih promjena će izazvati promjenu struje i protjecanja armature, i to tako da ukupno protjecanje ostane konstantno.

Ravnoteža frekvencija

- Zahtjev za konstantnom frekvencijom određuje - stroj se mora vrtjeti konstantnom, sinkronom brzinom n .

- Sinkrona brzina je vezana uz frekvenciju mreže :
$$n = n_s = \frac{60 f_L}{p}$$

Sinkrone brzine vrtnje za razne polaritete stroja pri frekvenciji 50 Hz

2p	2	4	6	8	10
n [o/min]	3000	1500	1000	750	600

Sinkrone brzine vrtnje za razne polaritete stroja pri frekvenciji 60 Hz

2p	2	4	6	8	10
n [o/min]	3600	1800	1200	900	720

Utjecaj momenta na osovini

- Momentom na osovini podešavamo prijenos, odnosno pretvorbu radne energije:
 - mehaničke u električnu (generator) ili
 - električne u mehaničku (motor).
- Ako momentom djelujemo u smjeru vrtnje, dovodimo mehaničku energiju, odnosno snagu:

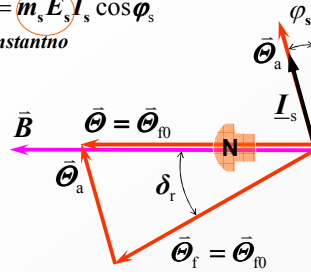
$$P_{\text{mec}} = T_{\text{mec}} \Omega_m$$

- Stroj radi kao generator.

$$\vec{\Theta} = \vec{\Theta}_f + \vec{\Theta}_a = \vec{\Theta}_{f0}$$

$$P = m_s E_s I_s \cos \varphi_s$$

konstantno



$$E_s = U_{\text{ph}}$$

proporcionalno
radnoj snazi

stroj radi kao
generator

Povećanje momenta na
osovini bez promjene
uzbude

- Ako djelujemo momentom suprotno smjeru vrtnje, kočimo rotor.
- Stroj radi kao motor.
- Uzima električnu snagu iz mreže i predaje na osovini mehaničku snagu:

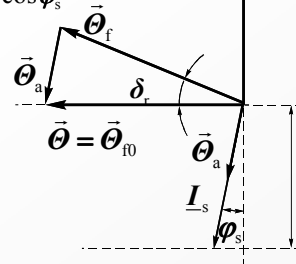
$$P = T \Omega_m$$

- Ako uz konstantan moment na osovini povećamo uzbudu, stroj će uzimati iz mreže radnu snagu, ali će davati u mrežu induktivnu reaktivnu snagu.
- Stroj se sam prilagođava novim uvjetima: mehaničkom momentu i uzbudi.

$$\vec{\Theta} = \vec{\Theta}_f + \vec{\Theta}_a = \vec{\Theta}_{f0}$$

$$P = m_s E_s I_s \cos \varphi_s$$

konstantno



stroj radi kao
motor

proporcionalno
radnoj snazi
 $I_s \cos \varphi_s \div P$

Sinkroni stroj u motornom režimu rada - opterećenje na osovini bez promjene uzbude

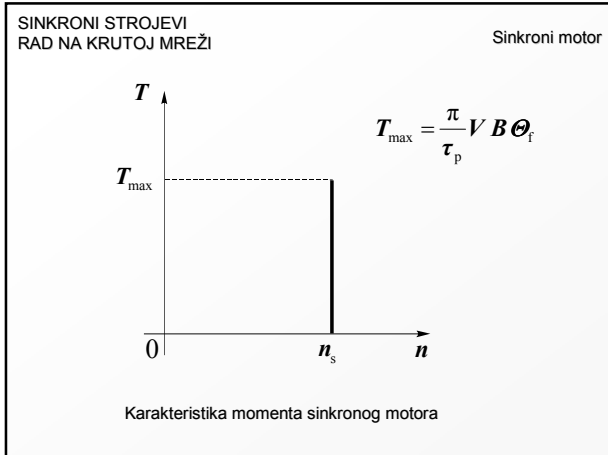
Sinkroni motor

- Ako sinkroni stroj spojen na krutu mrežu opteretimo momentom, umjesto da ga tjeramo pogonskim strojem, on počinje raditi kao motor.

- Brzina n je stalna i jednaka:

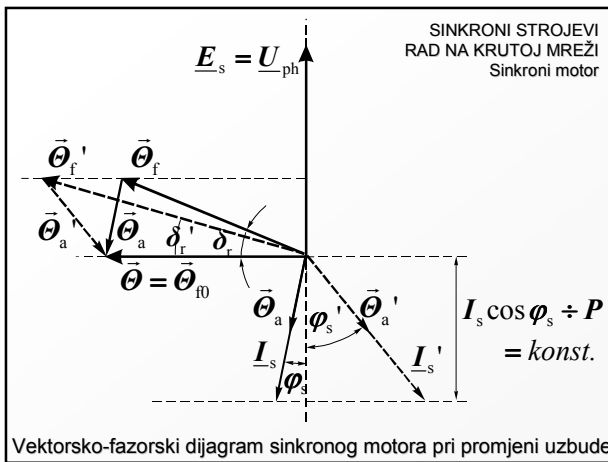
$$n = \frac{60 f_L}{p}$$

- Svojstva motora se prikazuju krivuljom momenta u ovisnosti o brzini vrtnje.

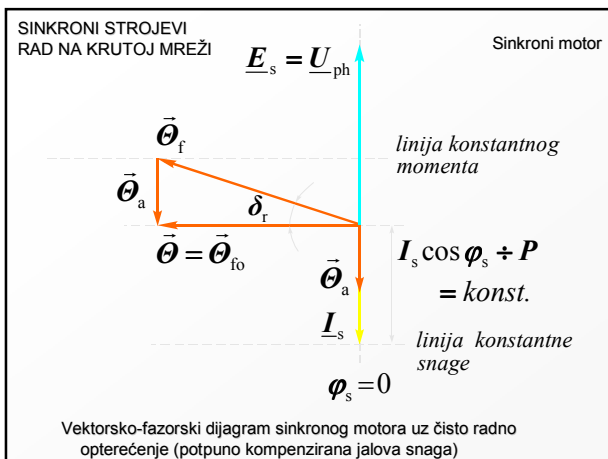


- SINKRONI STROJEVI
RAD NA KRUTOJ MREŽI
- Sinkroni motor
- Moment motora je jednak momentu tereta na osovini.
 - Time je određena radna snaga koju motor uzima iz mreže:

$$P_{\text{in}} = m_s E_s I_s \cos \varphi_s$$
 - Uz čvrsti napon je time određena i radna komponenta struje statora.
 - Vektor indukcije mora ostati čvrst jer je definiran naponom mreže.



- SINKRONI STROJEVI
RAD NA KRUTOJ MREŽI
- Sinkroni motor
- Promjenom uzbudne struje se mijenja kut opterećenja i jalova komponenta struje.
 - Uz jednak moment na osovini pri promjeni uzbude se mijenja jalova komponenta armaturene struje, dok radna komponenta te struje ostane ista.
 - Sinkroni motori mogu promjenom uzbude raditi kao kompenzatori jalove energije (obično induktivne).
 - Promjenom uzbude se može podesiti da stroj radi s faktorom snage $\cos \varphi_s = 1$, kao čisti radni teret.



- SINKRONI STROJEVI
RAD NA KRUTOJ MREŽI
- Sinkroni motor
- Sinkroni motor nema momenta u kratkom spoju, pri brzini vrtnje $n = 0$ (zakočen rotor).
 - Sinkroni motor u kratkom spoju i nije sinkroni stroj!
 - Kod sinkronih motora se javlja problem pokretanja.
 - Postoji nekoliko mogućih rješenja:
 - asinkroni zalet,
 - sinkroni zalet i
 - pomoćni motor.

- Asinkroni zalet se izvodi pomoću prigušnog kaveza ugrađenog u polne papuče.
- Sinkroni zalet se izvodi pomoću drugog generatora ili statičkog pretvarača.
- Treće rješenje je zalet s pomoćnim motorom ("pony" motor) koji je mehanički spojen sa sinkronim motorom i služi samo za zalet.

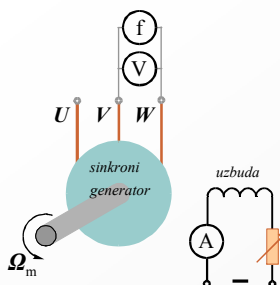
KARAKTERISTIKE

Karakteristika praznog hoda

- Karakteristika praznog hoda predstavlja ovisnost napona na stezaljkama o uzbudnoj struji generatora u praznom hodu, uz održavanje konstantne brzine vrtnje:

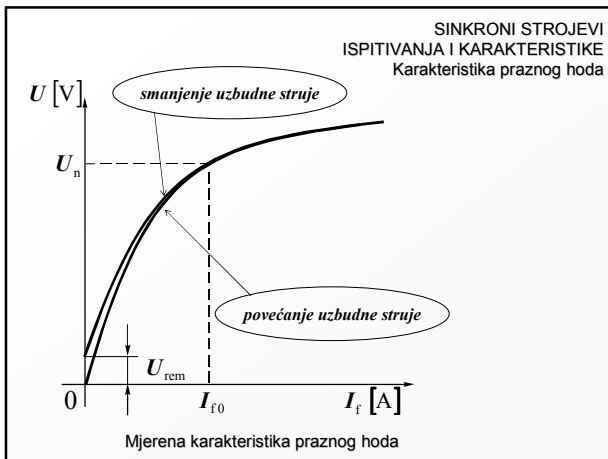
$$U = f(I_f), \quad n = konst.$$

- Generator je u praznom hodu ako se vrti konstantnom brzinom (obično nazivnom), uz neki iznos uzbudne struje i bez opterećenja na statoru (otvorene stezaljke).



Shema mjerenja
karakteristike praznog hoda

- Mjerimo:
 - napon na stezaljkama,
 - frekvencija tog napona,
 - uzbudna struja i
 - brzina vrtnje stroja.
- Karakteristika praznog hoda se snima:
 - uz povećanje uzbudne struje od 0 A do neke vrijednosti koja daje napon veći od nazivnog i
 - potom uz smanjenje uzbudne struje do nule.

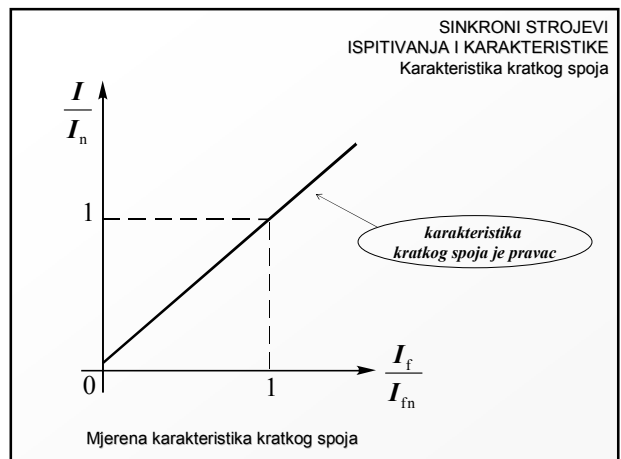
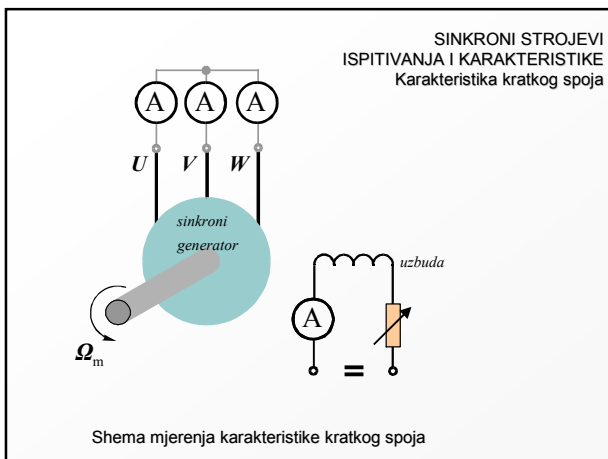


- SINKRONI STROJEVI
ISPITIVANJA I KARAKTERISTIKE
Karakteristika praznog hoda
- I bez uzbudne struje imamo na stezaljkama napon remanencije ili remanentni napon.
 - Naziva se napon remanencije ili remanentni napon.
 - On je posljedica histereze magnetskog materijala od kojeg je napravljen rotor.

SINKRONI STROJEVI
ISPITIVANJA I KARAKTERISTIKE

Karakteristika kratkog spoja

- SINKRONI STROJEVI
ISPITIVANJA I KARAKTERISTIKE
Karakteristika kratkog spoja
- Za generator kažemo da je u kratkom spoju ako se vrti konstantnom brzinom (obično nazivnom), uz neki iznos uzbudne struje i uz kratko spojene stezaljke statorskog namota.
 - Karakteristika kratkog spoja predstavlja ovisnost struje kroz kratko spojene stezaljke generatora o uzbuđnoj struji, uz održavanje konstantnog broja okretaja rotora:
- $$I_k = f(I_f), \quad n = konst.$$



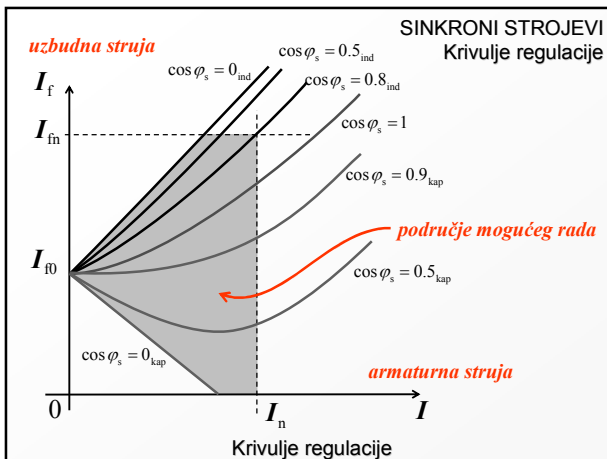
Krivulje regulacije

- U eksploataciji sinkronih strojeva važno je poznavanje uzbudne struje za zadani teret i faktor snage.
- Podatak o tome dobivamo iz krivulja regulacije.
- Krivulje regulacije prikazuju ovisnost uzbudne struje o opterećenju (statorskoj linijskoj struji), za različite faktore snage $\cos\varphi_s$:

$$I_f = f(I), \quad \cos\varphi_s = konst.$$

$$U = U_n = konst.$$

$$n = n_n = konst.$$



V-krivulje

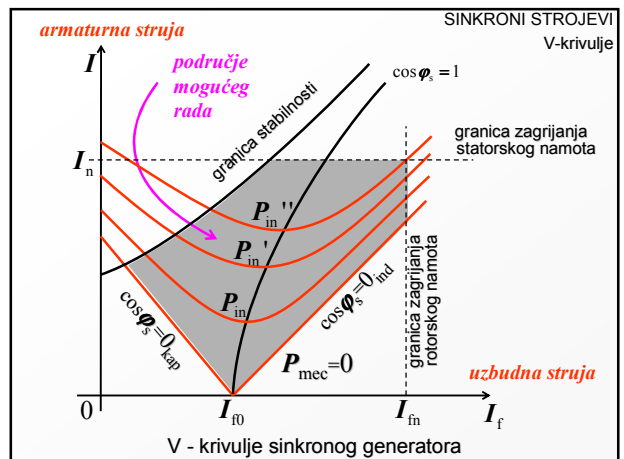
- V-krivulje prikazuju ovisnost struje statora o uzbuđnoj struji za različite faktore snage, uz iste radne snage:

$$I = f(I_f) \quad P_{in} = konst.$$

$$\cos\varphi_s \neq konst.$$

$$U = U_n = konst.$$

$$n = n_n = konst.$$



- Za svaki prividni teret postoji točka za koju je struja armature najmanja.
- To je točka za koju je faktor snage $\cos\varphi_s=1$.
- Minimumi V-krivulja leže svi na regulacionoj krivulji za $\cos\varphi_s=1$.

Pogonska karta

- Pogonska karta određuje dopušteno područje rada sinkronog stroja.
- Na apscisi je jalova snaga, a na ordinati radna.
- Područje rada ograničavaju:
 - zagrijanje statorskog namota,
 - zagrijanje rotorskog namota,
 - granica stabilnosti,
 - minimum uzbudne struje,
 - zagrijanje čeonog prostora i
 - maksimalna snaga pogonskog stroja i
 - minimalna snaga pogonskog stroja (tehnološki minimum).

