

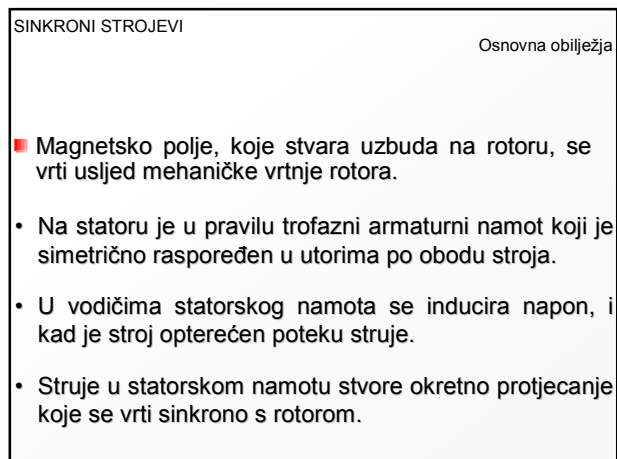
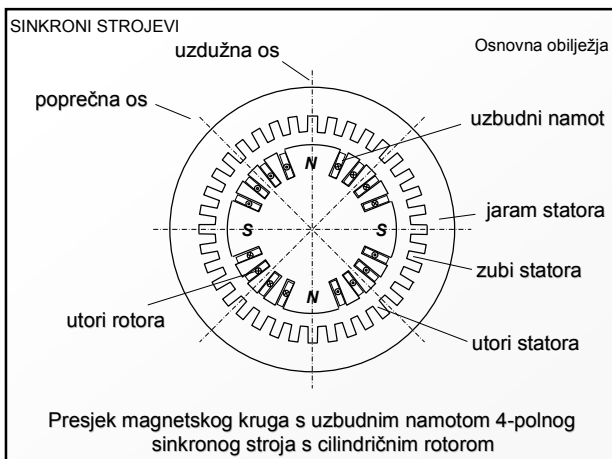
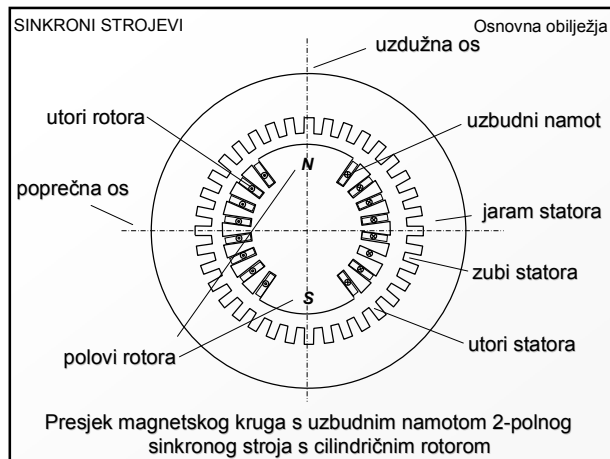
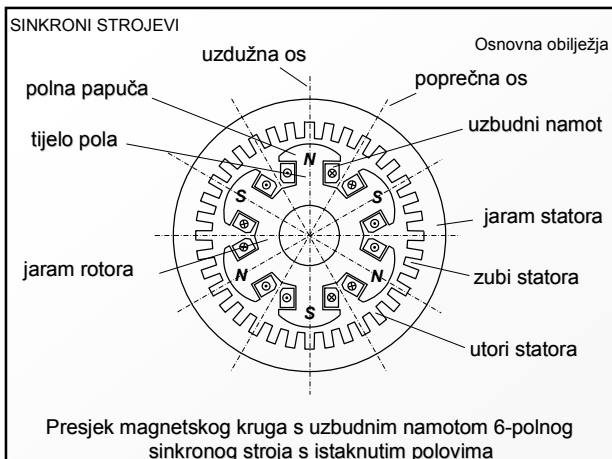
SINKRONI STROJEVI

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).



Vrste sinkronih strojeva

- Sinkroni strojevi se mogu razvrstati na više načina, i to prema:
 - vrsti pogonskog stroja,
 - konstrukciji rotora i
 - brzini vrtnje.
- Jako mali sinkroni strojevi (induktorski, reluktantni, histerezni) se ubrajaju u male motore su specifične izvedbe, načina rada i primjene.

- Prema vrsti pogonskog stroja se razlikuju:
 - turbogeneratori,
 - hidrogeneratori,
 - dizelski generatori,
 - motori i
 - kompenzatori (danas se malo koriste).
- Prema konstrukciji rotora se razlikuju strojevi s:
 - cilindričnim rotorom i
 - istaknutim polovima.

- Prema brzini vrtnje se dijele na:
 - brzohodne,
 - strojeve srednje brzine i
 - sporohodne.
- Najčešće se koristi podjela prema vrsti pogonskog stroja, a pokazuje se da ona sadrži u sebi i podjelu prema drugim obilježjima.
- Međutim, za teoretska razmatranja je bitna izvedba stroja.

- **Turbogeneratori** su brzohodni strojevi, izvedeni s cilindričnim rotorom.
- Koriste se kao izvori električne energije u termoelektranama (i nuklearnim elektranama).
- Pogone se parnim ili plinskim turbinama koje imaju veliku brzinu vrtnje.

- Pogonska parna turbina nameće veliku brzinu vrtnje.
- Velika brzina uvjetuje malen broj polova i izvedbu s neistaknutim polovima (cilindrični rotor).
- Najveći promjer rotora turbogeneratora iznosi nešto više od 1m.
- Da bi se dobila velika snaga, radi malog promjera mora biti velika duljina rotora, koja može iznositi i nekoliko metara.

- **Hidrogeneratori** se koriste kao izvori električne energije u hidroelektranama.
- Pogone se vodnim turbinama - odatle i naziv.
- Hidrogeneratori su najčešće sporohodni strojevi.
- Brzina vodne turbine jako ovisi o količini vode i pritisku (pad vode) i obično se kreće 50-1000 o/min.
- Generator treba biti prilagođen turbini - on mora imati istu brzinu vrtnje.

- Rotor hidrogeneratora se izvodi uvijek s izraženim polovima na kojima je koncentrirani uzbudni namot.
- Takav rotor može za veliki broj polova imati jako veliki promjer (gotovo 20 m), pa su obodne brzine znatne (~100 m/s).
- Tako ovi rotori mogu biti jako napregnuti centrifugalnim silama.
- Hidrogeneratori se izvode najčešće s vertikalnom osovinom.

- **Dizelski generatori** su strojevi za široki raspon brzina.
- To su strojevi manjih snaga nego turbogeneratori i hidrogeneratori (do najviše 50 MVA), a najčešće se rade s istaknutim polovima.
- Pogoni ih dizelski motor.
- Najčešće rade kao samostalne jedinice za napajanje vlastite mreže (brodovi, pričuvni izvori u poslovnim zgradama i robnim kućama).

- **Sinkroni motori** su strojevi koji se koriste za pogone s konstantnom brzinom vrtnje.
- Grade se za široki raspon snaga (od nekoliko mW do nekoliko stotina MW) i široki raspon brzina.
- U novije vrijeme se sinkroni motori sve više koriste u reguliranim pogonima s napajanjem iz pretvarača.
- Izvoru napajanja može se mijenjati frekvencija, pa je i brzina vrtnje promjenljiva.

- Najveći sinkroni motori su strojevi dvostruke namjene i koriste se u reverzibilnim hidroelektranama.
- Rade kao generatori kad je potrebno proizvoditi električnu energiju.
- U vrijeme kad postoji višak električne energije rade kao motori i pumpaju vodu u akumulacijsko jezero.

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

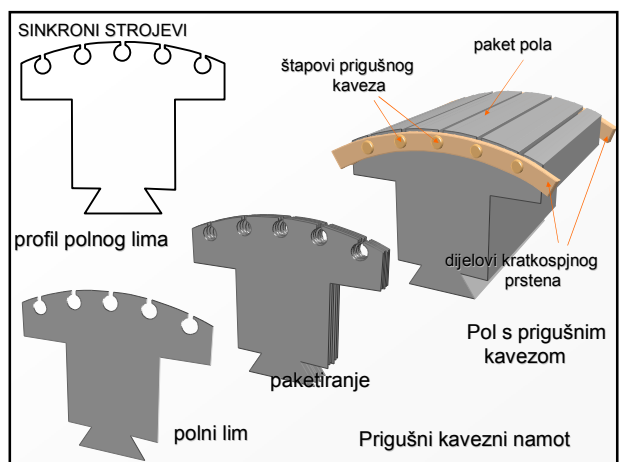
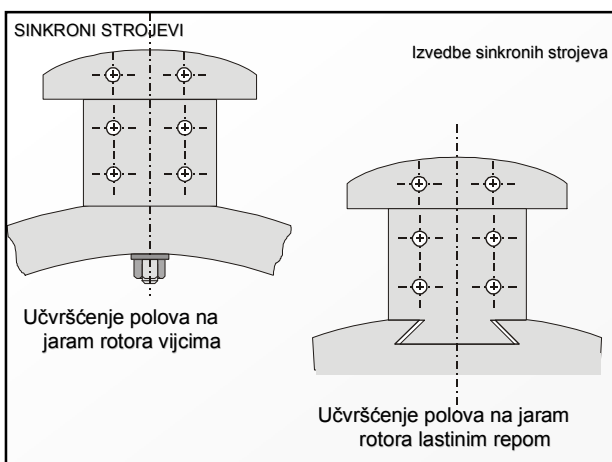
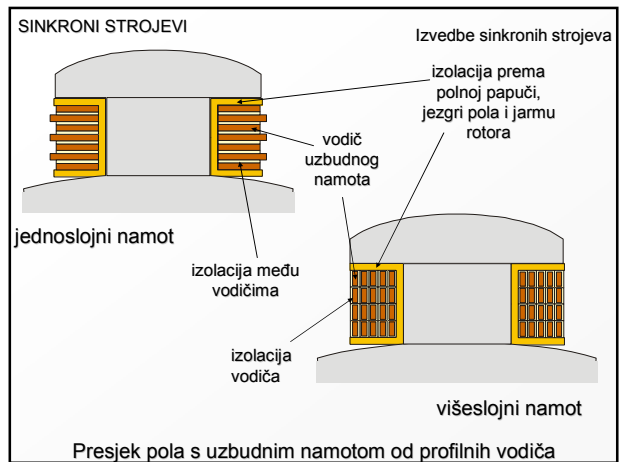
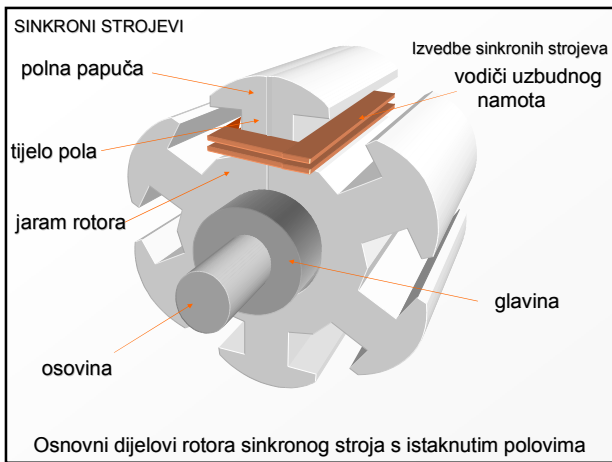
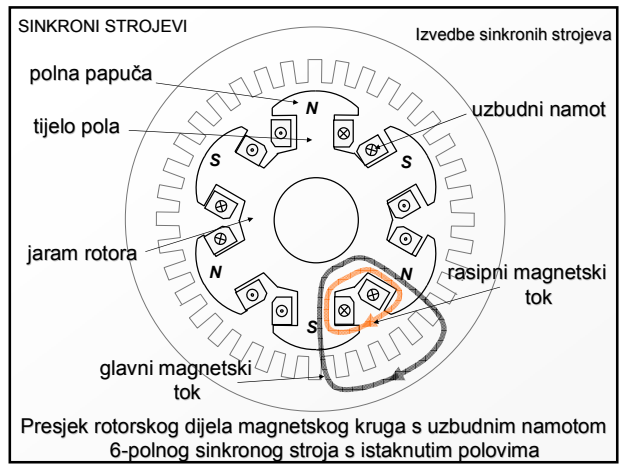
Tipični oblici statorskih utora sinkronih strojeva

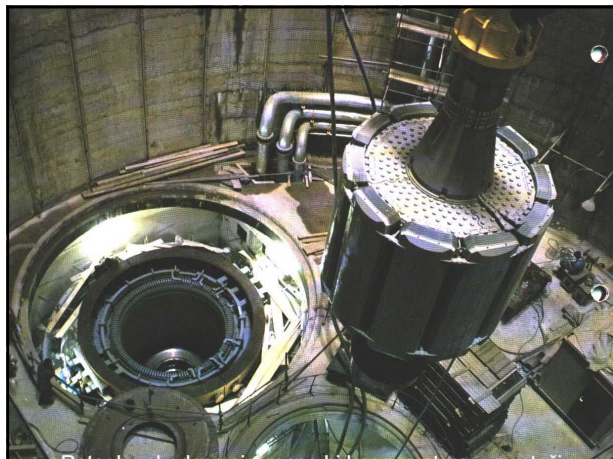
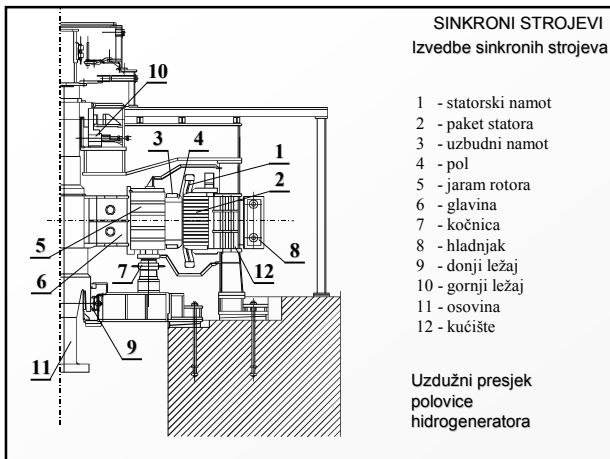
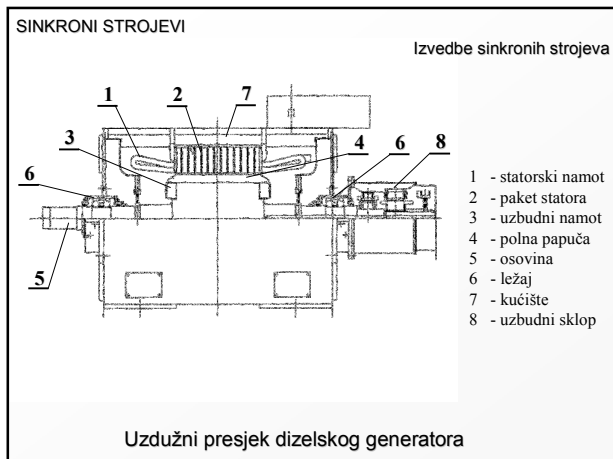
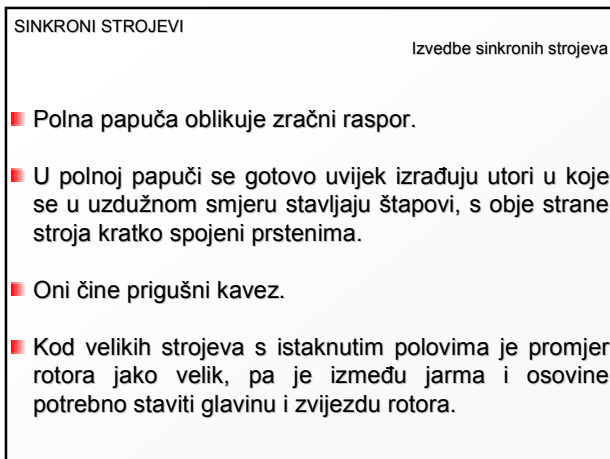
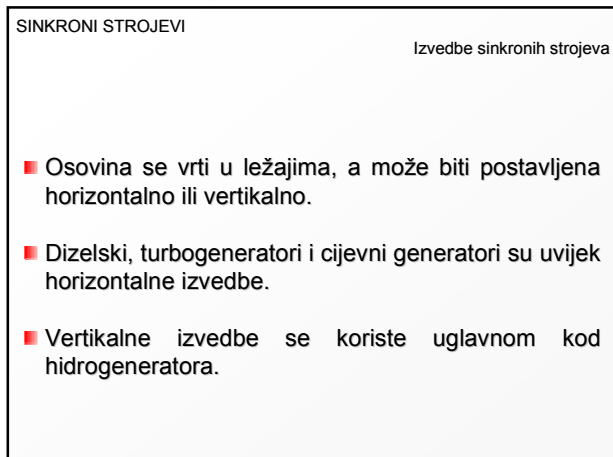
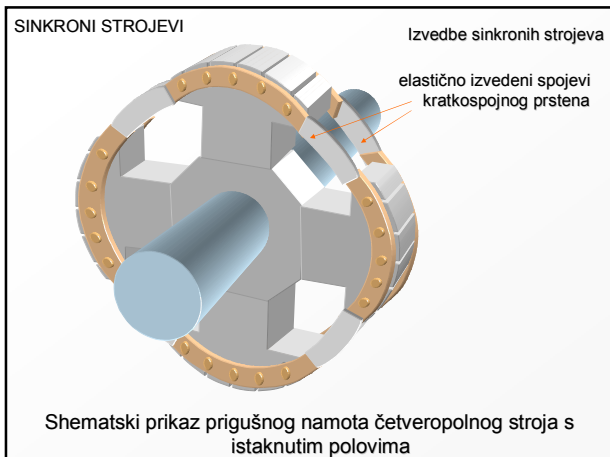
SINKRONI STROJEVI Izvedbe sinkronih strojeva

- **Rotor** sinkronog stroja predstavlja njegov uzбудni dio.
- Sastoji se od:
 - osovine,
 - jarma rotora i
 - polova s uzbudnim 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 istosmjernan.
- Stoga svi dijelovi na rotoru mogu biti od masivnog željeza.



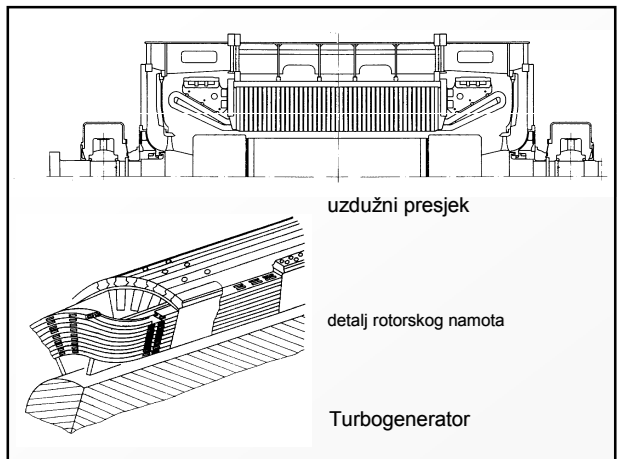
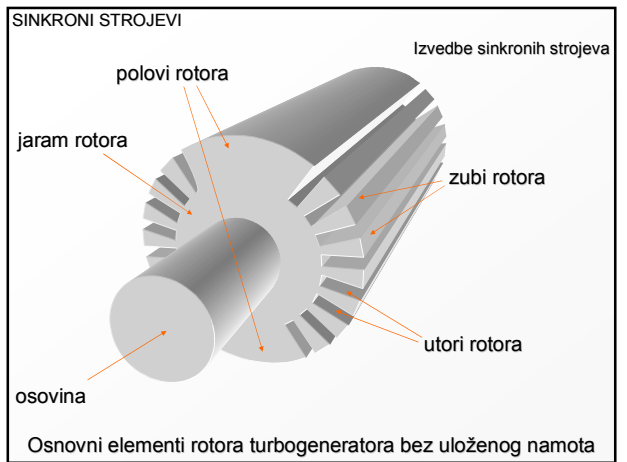
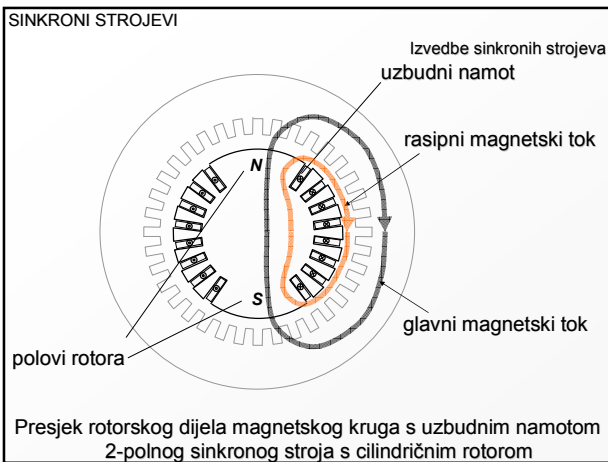




SINKRONI STROJEVI

Izvedbe sinkronih strojeva

- Konstrukcijska izvedba cilindričnog rotora (turborotora) znatno se razlikuje od konstrukcije rotora s istaknutim polovima.
- Rotor turbogenerators (cilindrični rotor, turborotor) izrađuje se uvijek iz jednog komada kovanog čelika.
- Uzbudni namot je raspodijeljen u utore.
- Tom raspodjelom postiže približno sinusoidalna raspodjela protjecanja duž zračnog raspora.



SINKRONI STROJEVI Izvedbe sinkronih strojeva

- Na rotor turbogeneratorsa nikad se ne ugrađuje prigušni kavez.
- Prigušni kavez nije potreban, jer su polovi od punog čelika, u kojem se slobodno mogu zatvarati vrtložne struje.
- Te vrtložne struje igraju istu ulogu kao i struje u prigušnom kavezu strojeva s istaknutim polovima.

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

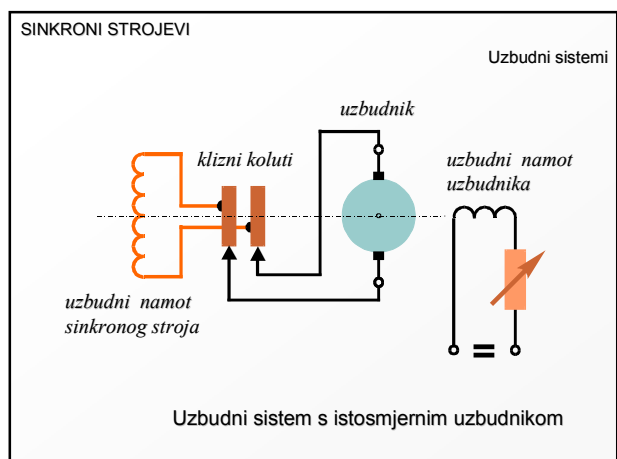
- Turbogeneratori i dizelski generatori su uvijek horizontalne izvedbe.
- Hidrogeneratori se najčešće izvode s vertikalnom ososvinom.
- Iznimka su hidrogeneratori za pogon s Pelton turbinom i cijevni generatori, kod kojih je cijeli generator zajedno s kućištem potopljen u tok vode.

SINKRONI STROJEVI

Uzbudni sistemi

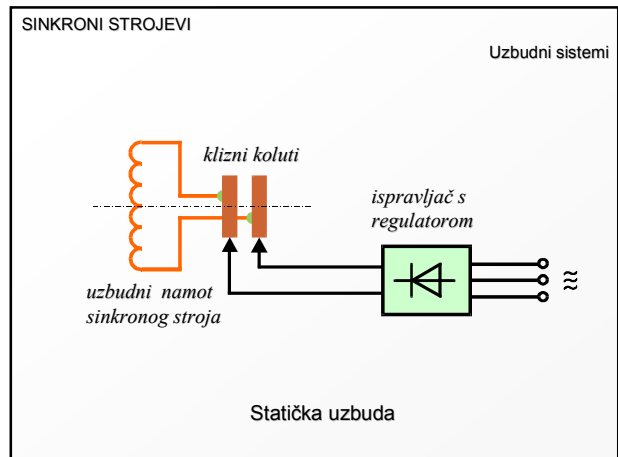
SINKRONI STROJEVI Uzbudni sistemi

- 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.



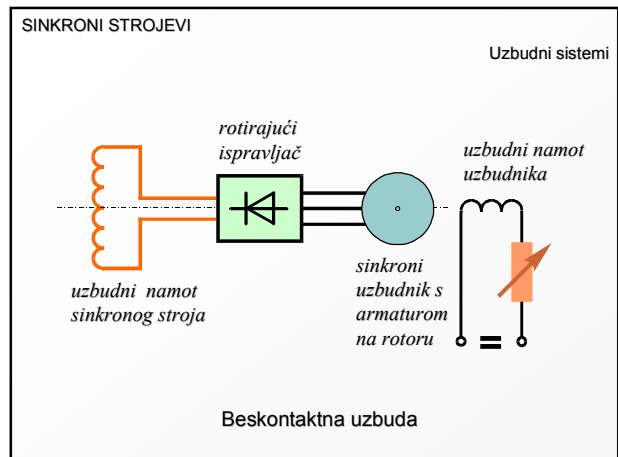
SINKRONI STROJEVI Uzbudni sistemi

- 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 uzbudne struje se postiže regulacijom uzbuđe uzbudnika pomoću automatskog regulatora.
- Slaba je strana ovog rješenja u kolektoru uzbudnika koji je i inače najslabija točka istosmjernih strojeva.



SINKRONI STROJEVI Uzbudni sistemi

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



SINKRONI STROJEVI Uzbudni sistemi

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

SINKRONI STROJEVI Uzbudni sistemi

- Regulacija uzbuđe struje se postiže regulacijom uzbuđe pomoćnog generatora.
- Prednost je ovakvog rješenja što ne zahtijeva ni kolektor ni klizne prstena pa traži manje održavanja.
- Koristi se jako često za uzbudu manjih generatora koji rade samostalno na vlastitoj mreži.
- Kao izvor za napajanje uzbuđe uzbuđnika 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} .

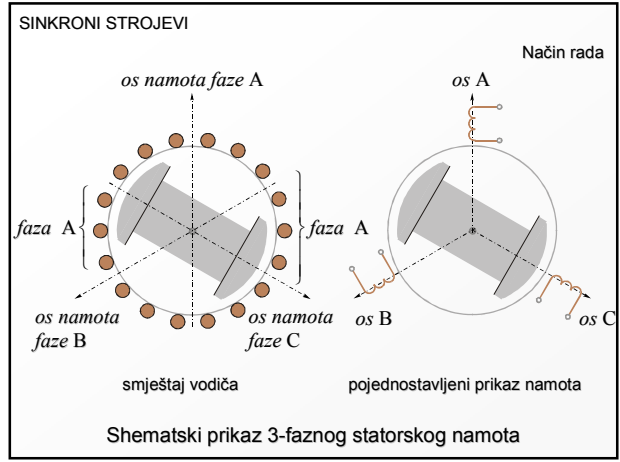
- Kao nazivna snaga se za generator daje električna prividna snaga, određena radnim i jalovim opterećenjem jer opterećenje generatora ne mora biti samo radnog karaktera.
- To je važno zbog zagrijavanja stroja za što su mjerodavni napon i ukupna struja, dakle prividna, a ne samo radna snaga.
- Na primjer,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

- Za sinkrone motore se obično daje radna snaga na osovini, ali se u slučajevima kad on radi i kao kompenzator daje prividna električna snaga.
- Ukoliko se držimo podataka s natpisne pločice, stroju se u pogonu neće ništa dogoditi.
- Ako ga opteretimo većom snagom, narinemo viši napon ili slično, može doći do ozbiljnog kvara - izgaranja izolacije kao posljedice pregrijavanja.

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 pola.
- 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.

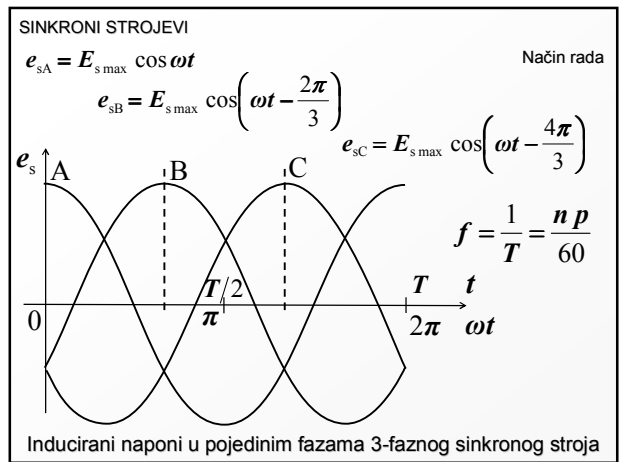


SINKRONI STROJEVI Način rada

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

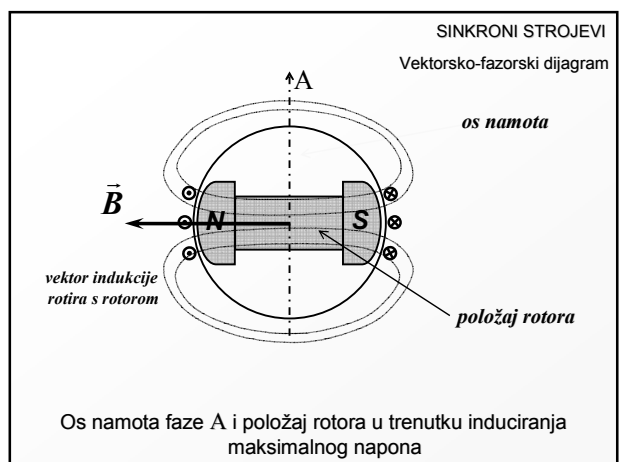
$$f = f_s = \frac{n p}{60}$$

- 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.

SINKRONI STROJEVI

Vektorsko-fazorski dijagram

- U promatranom trenutku imamo maksimalni inducirani napon u fazi A.
- Taj napon smatramo pozitivnim.
- Struju u istom smjeru također smatramo pozitivnom.
- Protjecanje koje stvara ta struja također je pozitivno i ono se poklapa sa smjerom osi faze A.

SINKRONI STROJEVI

Vektorsko-fazorski dijagram

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

$$\Theta_A = \frac{2\sqrt{2}I_s N_s}{\pi} \frac{1}{a} \frac{1}{p} k_{ws}$$

struja statorske faze (pointing to I_s)
broj zavoja (pointing to N_s)
faktor namota statorskog namota (pointing to k_{ws})
broj faza statorskog namota (pointing to p)
broj paralelnih grana (pointing to a)
broj pari polova (pointing to π)
protjecanje višefaznog namota (pointing to Θ_a)
 $\Theta_a = \frac{m_s}{2} \Theta_A$

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:

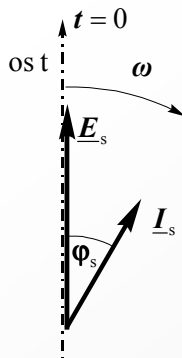
$$e_s = E_{s \max} \cos \omega t = \sqrt{2} E_s \cos \omega t$$

$$i_s = I_{s \max} \cos(\omega t - \varphi_s) = \sqrt{2} I_s \cos(\omega t - \varphi_s)$$

- U tom slučaju se ove veličine mogu prikazati fazorima:

$$\underline{E}_s = E_s e^{-j\varphi_s}$$

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



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

vektor indukcije rotira s rotorom

isti efekt dobijemo ako rotor stoji, a stator se vrti u suprotnom smjeru

Vektorski prikaz indukcije pri vrtnji referentne osi udesno (prikaz u rotorskim koordinatama)

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

Zajednički vektorsko-fazorski dijagram indukcije i napona

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 I_s .
- Zato je u zajedničkom vektorsko-fazorskom dijagramu smjer vektora armaturnog protjecanja jednak smjeru fazora struje u fazi statorskog namota.

SINKRONI STROJEVI

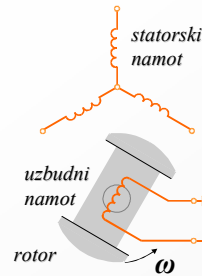
Vektorsko-fazorski dijagram

Struja armature u fazi s naponom

Struja armature kasni u fazi za naponom

Zajednički vektorsko-fazorski dijagram indukcije, induciranog napona, armaturnog protjecanja i struje u fazi statora

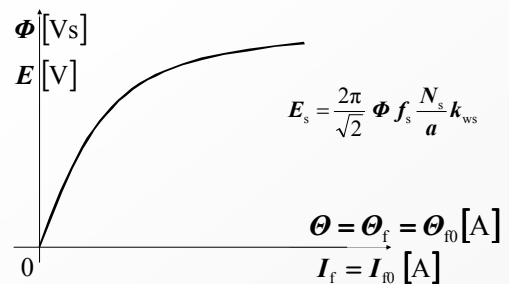
Prazni hod



Schema spoja sinkronog generatora u praznom hodu

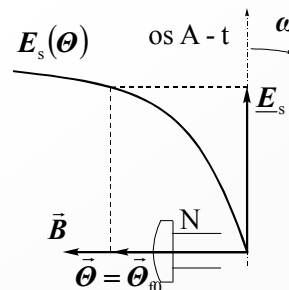
- Magnetski tok ovisi o protjecanju $\Phi = f(\theta)$ na način koji je određen magnetskom karakteristikom.
- Zbog željeza u magnetskom krugu ta je karakteristika nelinearna.
- Inducirani napon je proporcionalan magnetskom toku po polu Φ - njegova efektivna vrijednost je:

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



Magnetska karakteristika (karakteristika praznog hoda) sinkronog generatora

- Isti dijagram predstavlja i karakteristiku praznog hoda (ovisnost induciranog napona E_s o uzbuđnoj struji I_f) budući da je ovisnost induciranog napona o toku linearna.
- Ovu karakteristiku možemo ucrtati u vektorsko-fazorski dijagram i to kao funkciju protjecanja rotora θ_f pa dobijemo ovisnost $E_s = f(\theta_f) = f(\theta)$.
- Osi vektora indukcije \vec{B} i uzbuđnog protjecanja $\vec{\theta}_{f0}$ se poklapaju s osi namota rotora.



Zajednički vektorsko-fazorski dijagram indukcije, induciranog napona i uzbuđnog protjecanja (prazni hod)

SINKRONI STROJEVI Prazni hod

- Vektori uzbuđnog 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 θ_a .
- Protjecanje θ_a se vektorski zbraja s protjecanjem rotora θ_f i tvori protjecanje θ :

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

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.

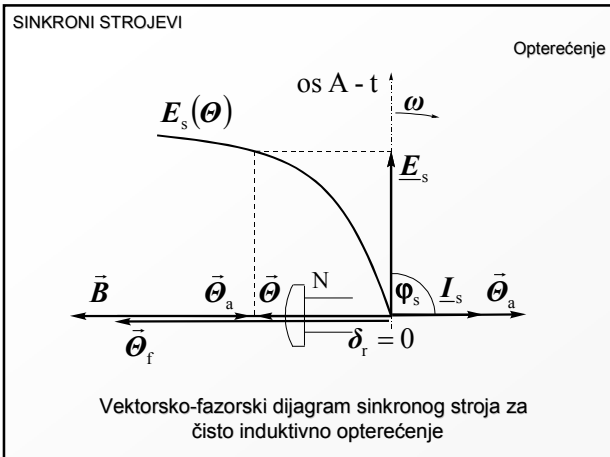
SINKRONI STROJEVI Opterećenje

os A - t

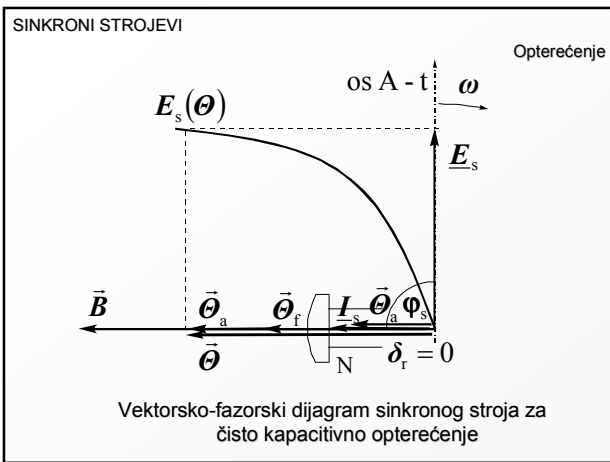
Vektorsko-fazorski dijagram sinkronog stroja pod opterećenjem

SINKRONI STROJEVI Opterećenje

- Dijagram pokazuje da je:
 - rezultatno protjecanje manje nego u praznom hodu (ako ne povećamo uzbuđu) i
 - kut između rotorskog protjecanja i induciranog napona povećan za kut opterećenja δ_r .
- Prikazani slučaj predstavlja radno-induktivno opterećenje generatora.

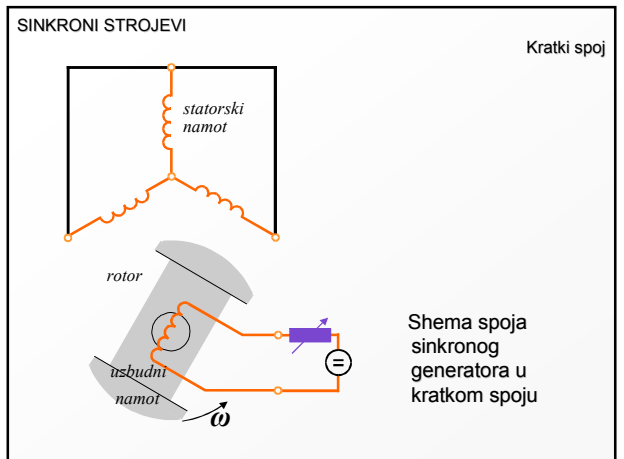


- SINKRONI STROJEVI Opterećenje
- Kod čisto induktivnog opterećenja je kut opterećenja rotora δ_r jednak nuli, kao u praznom hodu, ali je inducirani napon manji ako ne povećamo uzbuđu.
 - Nasuprot tome čisto kapacitivno opterećenje (struja prethodi naponu za kut $\varphi_s=90^\circ$) poveća inducirani napon ako ne smanjimo uzbuđu u odnosu na prazni hod.
 - Kut opterećenja rotora δ_r je i ovdje jednak nuli.



Kratki spoj

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

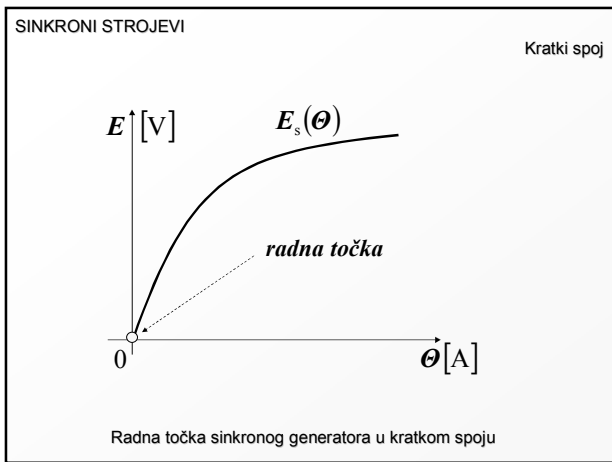


SINKRONI STROJEVI Kratki spoj

- 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 uzbudu 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.



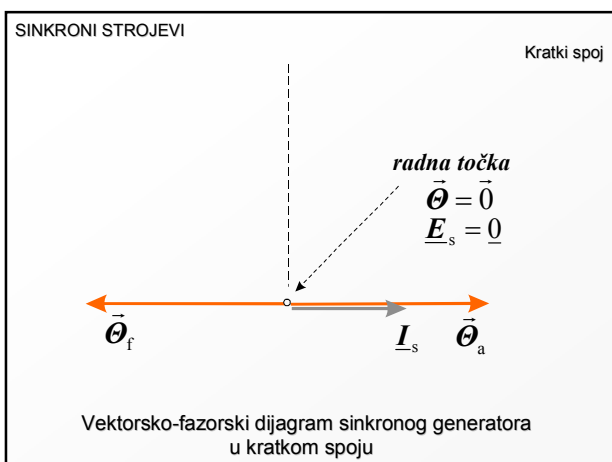
SINKRONI STROJEVI Kratki spoj

- 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:

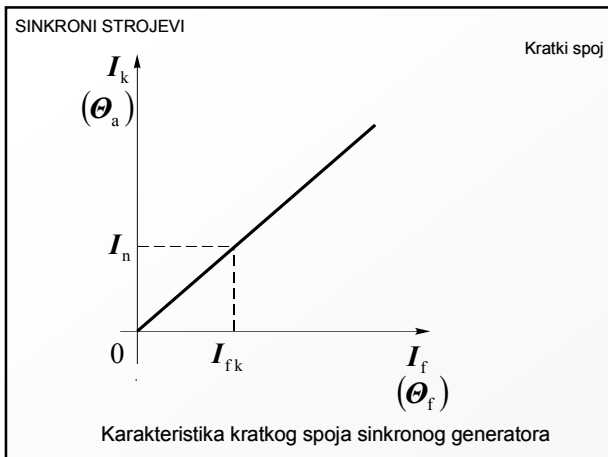
$$\vec{\Theta}_a + \vec{\Theta}_f = \vec{\Theta} = \vec{0}$$
- Iz toga proizlazi da je:

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



SINKRONI STROJEVI Kratki spoj

- Ako povećamo uzbudu, 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.



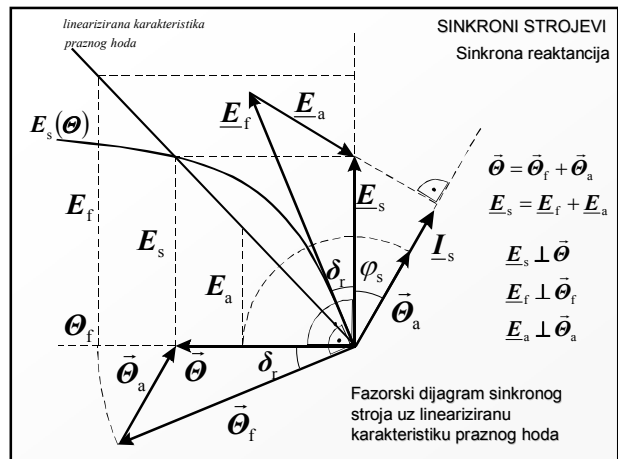
SINKRONI STROJEVI

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:

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

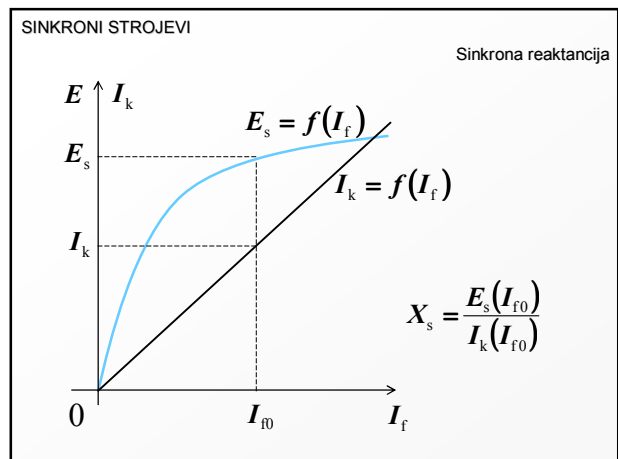
$$\underline{E}_s = \underline{E}_f + \underline{E}_a$$



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

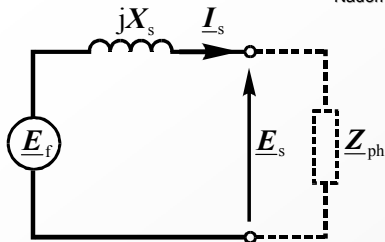
$$\underline{E}_a = -jX_s \cdot \underline{I}_s$$
 - Napon na stezaljkama je:

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



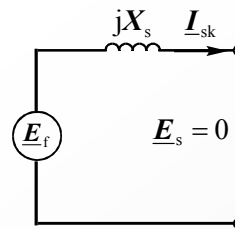
Nadomjesna shema

- 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.

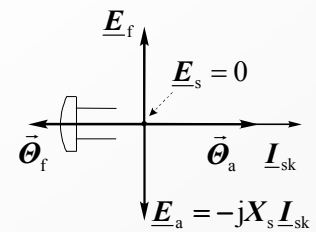


Nadomjesna shema sinkronog stroja

- 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

Energetska ravnoteža

mehanička snaga $P_{mec} = P_{el}$ *električna snaga*

mehanički moment $P_{mec} = T_{mec} \Omega_m$ $T_e = \frac{\pi}{\tau_p} V B \Theta_f \sin \delta_r$

mehanička kutna brzina $\Omega_m = \frac{n \pi}{30}$

$P_{mec} = \Omega_m \frac{\pi}{\tau_p} V B \Theta_f \sin \delta_r = K_T B \Theta_f \sin \delta_r$

konstantno

SINKRONI STROJEVI Energetska ravnoteža

$P_{mec} = P_{el}$ $E_s = 4.44 B \tau_p I_s f_s \frac{N_s}{a} k_{ws}$ $\tau_p = \frac{d_s \pi}{2p}$

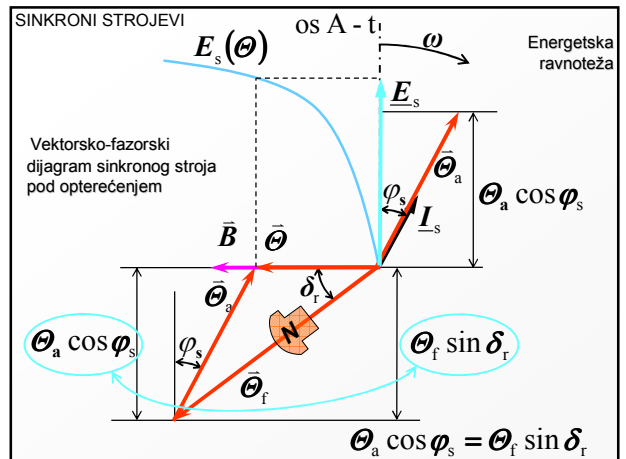
za m_s -fazni stroj $f_s = \frac{n p}{60}$

$P_{el} = m_s E_s I_s \cos \varphi_s$

efektivne fazne vrijednosti napona i struje $I_s = \Theta_a \frac{\pi}{m_s \sqrt{2}} \cdot \frac{a}{N_s} \cdot \frac{p}{\Omega_m} = \frac{n \pi}{30}$

struja izražena preko protjecanja armature $P_{el} = \Omega_m \frac{\pi}{\tau_p} V B \Theta_a \cos \varphi_s = K_T B \Theta_a \cos \varphi_s$

K_T $P_{mec} = K_T B \Theta_f \sin \delta_r$



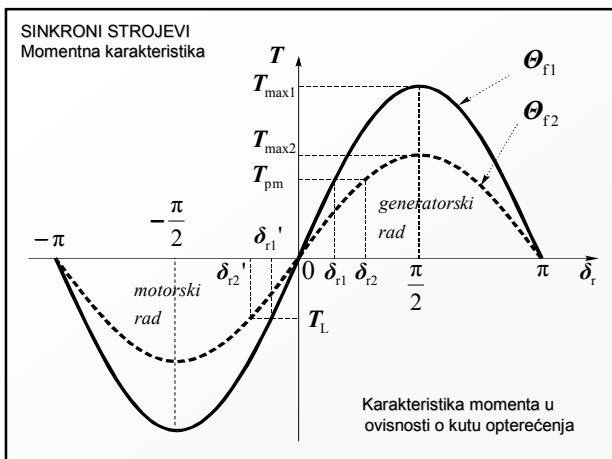
SINKRONI STROJEVI

Momentna karakteristika

SINKRONI STROJEVI Momentna karakteristika

- Elektromagnetski moment izmjeničnog stroja iznosi:

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

Idealni i realni stroj

SINKRONI STROJEVI Idealni i realni stroj

■ Osnovna razlika između idealnog i realnog stroja je u tome što u realnom stroju imamo:

- radne otpore namota koji stvaraju padove napona i gubitke,
- rasipne reaktancije koje također stvaraju padove napona,
- gubitke u željezu (uslijed histereze i vrtožnih struja) i
- gubitke trenja i ventilacije.

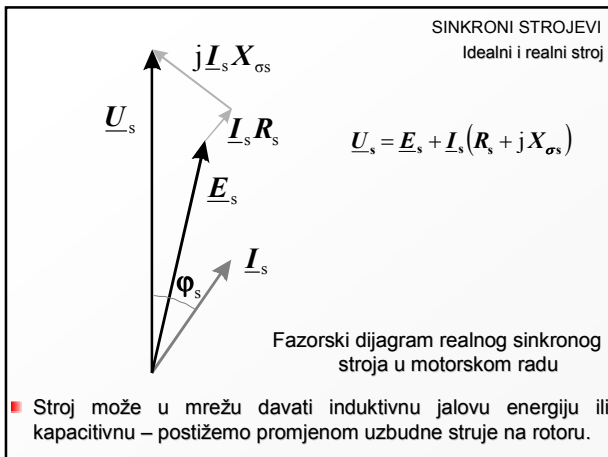
■ Vanjski napon faze realnog generatora bit će:

$$\underline{U}_s = \underline{E}_s - \underline{I}_s (R_s + jX_{\sigma s})$$

SINKRONI STROJEVI
Idealni i realni stroj

$\underline{U}_s = \underline{E}_s - \underline{I}_s (R_s + jX_{\sigma s})$

Fazorski dijagram realnog sinkronog generatora



- SINKRONI STROJEVI
Idealni i realni stroj
- Gubici u stroju iznose obično nekoliko postotaka snage, a isto tako i padovi napona.
 - U većini razmatranja ćemo i dalje zanemariti gubitke, rasipne reaktancije i radne otpore stroja.
 - I dalje ćemo promatrati idealni stroj u kojem je izlazni fazni napon jednak induciranom:

$$\underline{U}_s = \underline{E}_s$$

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.
 - U ovakvom slučaju 1 sinkroni stroj ne može raditi kao motor.

- 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 krutu mrežu:
 - 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.

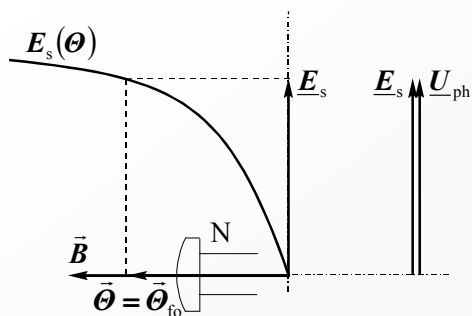
Ravnoteža napona

■ 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: $\vec{\Theta}_a = \vec{0}$



Neopterećeni generator pri radu na krutoj mreži

Ravnoteža protjecanja

■ Prema ranije rečenom, napon generatora mora biti konstantan i određen je naponom mreže.

■ Stoga i rezultatno 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 uzbude i protjecanja armature i mora biti konstantan:

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

■ Na vektor protjecanja uzbude možemo djelovati dvojako:

– promjenom uzbudne struje mijenjamo veličinu vektora uzbudnog protjecanja,

– promjenom momenta na osovini mijenjamo položaj vektora uzbudnog 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.

SINKRONI STROJEVI
RAD NA KRUTOJ MREŽI Ravnoteža protjecanja

- Razmotrimo najjednostavniji slučaj - prazni hod.
- Ako se poveća uzbudno protjecanje, pojavi se takva struja armature koja održi ukupno protjecanje na konstantnom iznosu.
- Za prikazani slučaj ta struja ima induktivni karakter (stroj se ponaša kao kondenzator).
- Ako smanjimo uzbudnu struju struja armature imat će kapacitivni karakter.

SINKRONI STROJEVI
RAD NA KRUTOJ MREŽI Ravnoteža protjecanja

Ravnoteža protjecanja u praznom hodu generatora
pri povećanju uzbudne struje

SINKRONI STROJEVI
RAD NA KRUTOJ MREŽI Ravnoteža protjecanja

- Razmotrimo povećanje momenta na osovini iz praznog hoda, bez promjene uzbudne struje.
- Pojavi se struja armature koja održi ukupno protjecanje konstantnim.
- Struja ima kapacitivni karakter za mrežu (stroj se ponaša kao prigušnica).
- Stroj daje u mrežu i aktivnu snagu koja za trofazni generator iznosi :

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

SINKRONI STROJEVI
RAD NA KRUTOJ MREŽI Ravnoteža protjecanja

Ravnoteža protjecanja generatora pri povećanju momenta na osovini u odnosu na prazni hod

SINKRONI STROJEVI
RAD NA KRUTOJ MREŽI Ravnoteža protjecanja

- Razmotrimo povećanje uzbudne struje i aktivnog momenta na osovini iz stanja praznog hoda.
- Pojavi se takva struja armature koja održi ukupno protjecanje konstantnim.
- Struja ima induktivni karakter za mrežu (stroj se ponaša kao kondenzator).
- Stroj daje u mrežu i aktivnu snagu koja za trofazni generator i u ovom slučaju iznosi :

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

SINKRONI STROJEVI
RAD NA KRUTOJ MREŽI Ravnoteža protjecanja

Ravnoteža protjecanja generatora pri povećanju uzbudne struje i momenta na osovini u odnosu na prazni hod

SINKRONI STROJEVI
RAD NA KRUTOJ MREŽI Ravnoteža protjecanja

- Jednako vrijedi i za opterećivanje momentom - u motorskom radu.
- Važno: uspostava ravnoteže protjecanja odvija se prirodno, bez regulacije!
- Pojavi se takva struja armature da vektorski zbroj armaturnog i uzbudnog protjecanja ostane konstantan.
- Promjenom momenta na osovini mijenjamo električnu aktivnu snagu koju stroj daje u mrežu.
- Promjenom uzbudne struje mijenjamo reaktivnu snagu.

SINKRONI STROJEVI
RAD NA KRUTOJ MREŽI

Ravnoteža frekvencija

SINKRONI STROJEVI
RAD NA KRUTOJ MREŽI 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

SINKRONI STROJEVI
RAD NA KRUTOJ MREŽI Ravnoteža frekvencija

- Ravnoteža frekvencija je apsolutno nužan uvjet za stabilan rad sinkronog stroja na krutoj mreži.
- Zamislimo:
 - generator u praznom hodu, bez struje armature
 - pogonskim strojem vrtimo rotor nešto brže od sinkronizma
 - pritom ne mijenjamo uzbudnu struju.
- Vektor uzbudnog protjecanja bi se kretao po kružnici.

SINKRONI STROJEVI
Ravnoteža frekvencija

Rad generatora pri povećanju brzine vrtnje (točke 1, 2 i 3) u odnosu na sinkronu brzinu (točka 0)

SINKRONI STROJEVI
RAD NA KRUTOJ MREŽI Ravnoteža frekvencija

- Ukupno protjecanje mora ostati konstantno.
- Pojavljuje se nestacionarna struja armature - stvara armaturno protjecanje tako da održava ukupno protjecanje jednakim.
- Stroj prelazi iz generatorskog u motorski rad i natrag, uz promjenljive struje armature.
- U takvom režimu ne može raditi - dolazi do ispadanja iz sinkronizma.
- To se mora riješiti isključenjem iz mreže.

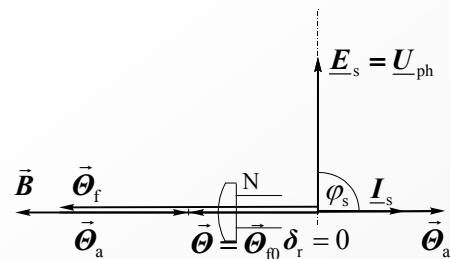
Utjecaj uzbude

- Utjecaj uzbude smo već vidjeli kod ravnoteže protjecanja.
- Razmotrimo stroj na krutoj mreži u praznom hodu:

$$\vec{\Theta} = \vec{\Theta}_{f0}$$

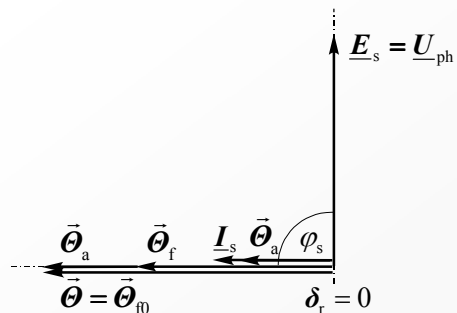
- Samo mijenjamo uzbudnu struju, bez promjene momenta na osovini.

- Ako povećamo uzbudu, pojavi se struja armature tako da ukupno protjecanje ostane nepromijenjeno.
- U odnosu na mrežu se stroj ponaša kao kondenzator:
 - daje u mrežu induktivnu jalovu snagu, odnosno
 - kao da uzima kapacitivnu.
- Pritom nema prijenosa radne snage.
- Stroj je naduzbuđen jer mu je uzbuda veća nego u praznom hodu.

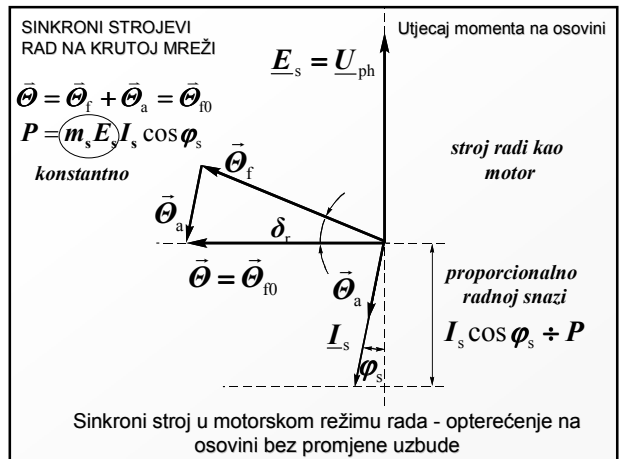
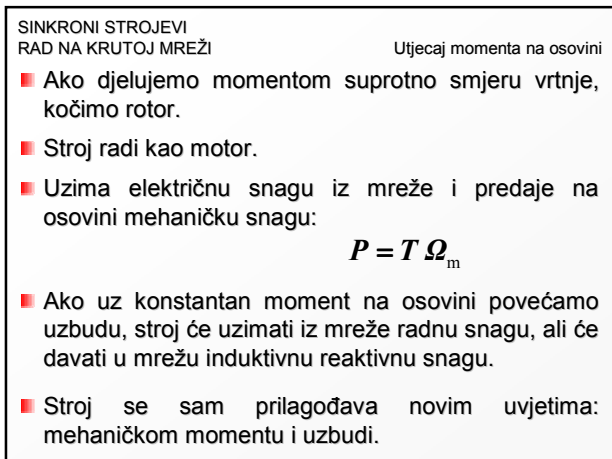
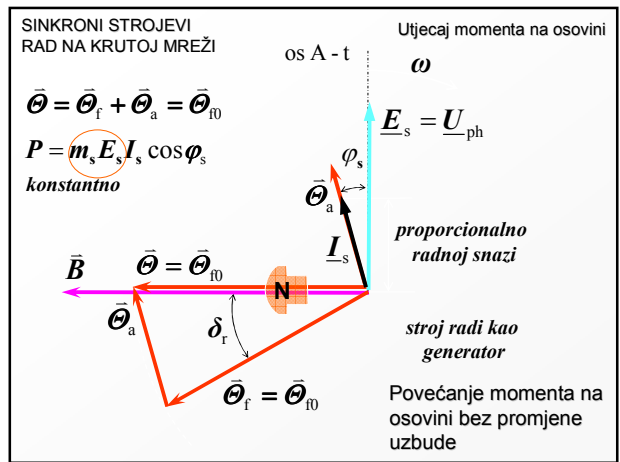
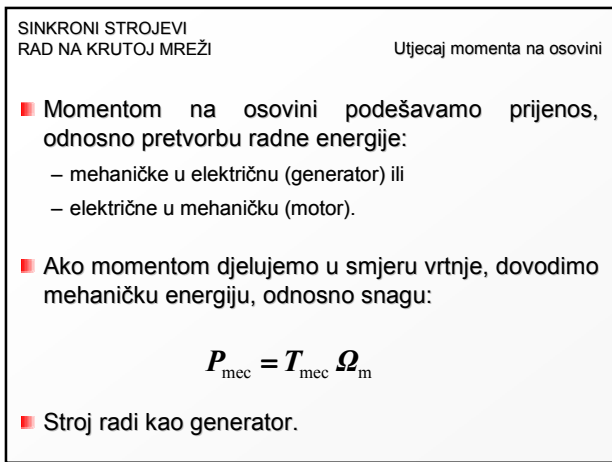
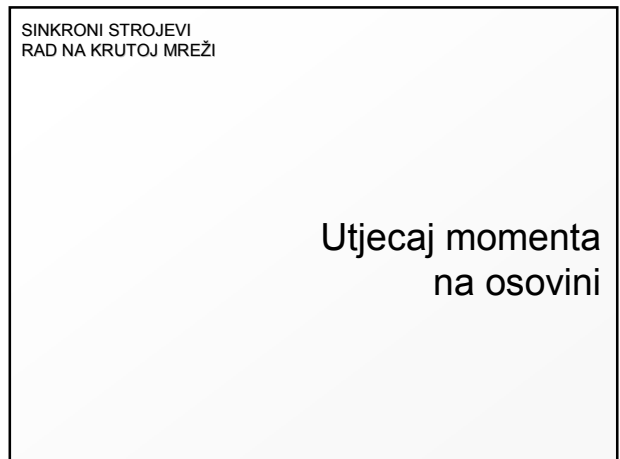
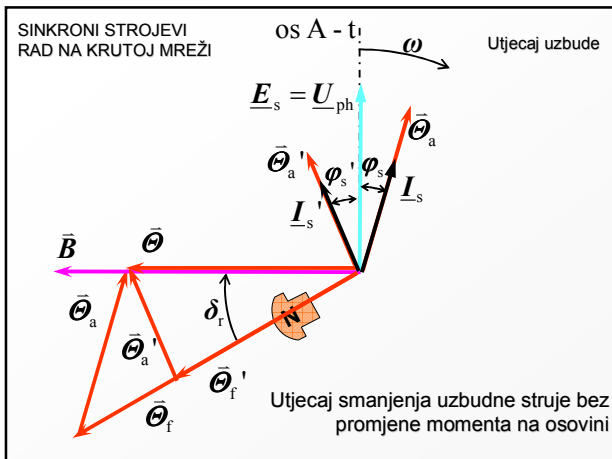


Rad generatora na krutoj mreži pri povećanju uzbudne struje

- Ako smanjimo uzbudu, poteče u armaturi struja koja sa stanovišta mreže ima induktivni karakter.
- Stroj se ponaša kao prigušnica:
 - uzima iz mreže jalovu induktivnu snagu, a
 - daje u mrežu kapacitivnu.
- Uzbuda je pritom manja nego u praznom hodu - stroj je poduzbuđen.
- To isto vrijedi i kad stroj prenosi radnu snagu.



Utjecaj smanjenja uzbude u praznom hodu generatora



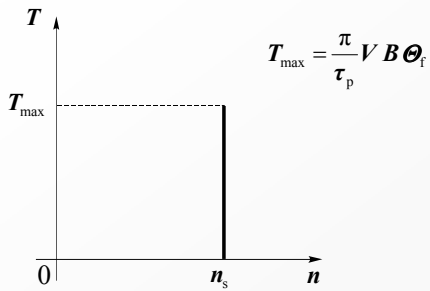
Sinkroni motor

■ 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.



Karakteristika momenta sinkronog motora

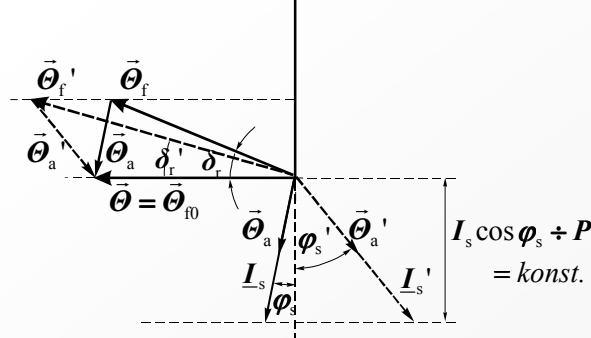
■ Moment motora je jednak momentu tereta na osovini.

■ 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.



Vektorsko-fazorski dijagram sinkronog motora pri promjeni uzbude

■ Promjenom uzbudne struje se mijenja kut opterećenja i jalova komponenta struje.

■ Uz jednak moment na osovini pri promjeni uzbude se mijenja jalova komponenta armature 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 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 motor se bez uzbude priključi na mrežu i zaleti kao asinkroni kavezni motor do približno sinkrone brzine.
- Onda se uključi uzbuda, i motor uskoči u sinkronizam.
- To je ujedno i najjednostavniji način pokretanja, ali motor mora imati prigušni kavez.

- Sinkroni zalet se izvodi pomoću drugog generatora ili statičkog pretvarača.
- Uzbuđenom motoru se postepeno podižu napon i frekvencija do punog napona i brzine vrtnje.
- Tada se priključi na mrežu.
- Rješenje sa statičkim pretvaračem se koristi u reguliranim pogonima i za pokretanje velikih strojeva u reverzibilnim elektranama.

- Treće rješenje je zalet s pomoćnim motorom ("pony" motor).
- Pomoćni motor je mehanički spojen sa sinkronim motorom.
- Tim motorom se sinkroni motor zaleti do sinkronizma i tada priključi na mrežu.
- Pomoćni motor služi samo za zalet (ako je asinkroni) ili se kasnije koristi kao uzбудnik (ako je istosmjerni stroj).

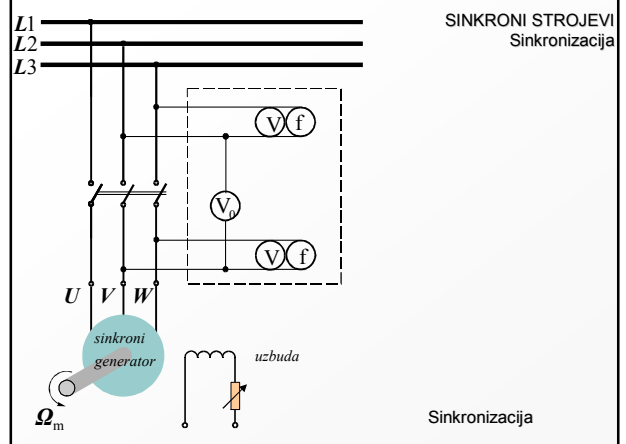
Sinkronizacija

- Postupak priključivanja stroja na mrežu se zove sinkronizacija.
- Sinkroni stroj može raditi na krutoj mreži ako su:
 - frekvencije tog stroja i mreže jednake,
 - naponi stroja i mreže jednaki po iznosu,
 - redosljedi faza jednaki i
 - fazni kutevi između napona pripadnih faza stroja i mreže jednaki nuli.

SINKRONI STROJEVI
RAD NA KRUTOJ MREŽI

Sinkronizacija

- Prvo trebamo pripremiti generator da ima odgovarajuću brzinu vrtnje i napon na stezaljkama.
- Generator ćemo pokrenuti pogonskim strojem (vodnom ili parnom turbinom ili dizel-motorom) do sinkronog broja okretaja.
- Uzбудu ćemo podesiti tako da na stezaljkama dobijemo napon jednak naponu mreže.
- Generator će raditi u praznom hodu.

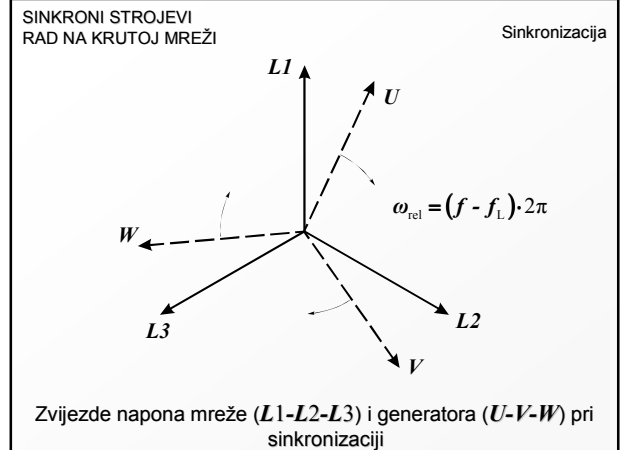


Sinkronizacija

SINKRONI STROJEVI
RAD NA KRUTOJ MREŽI

Sinkronizacija

- Prekidač za spoj s mrežom je pritom otvoren.
- Napone i frekvencije mreže i generatora mjerimo nezavisnim voltmetrima i frekvencmetrima.
- Kad smo postigli jednake napone i frekvencije, još uvijek se naponi mogu razlikovati po fazi.
- Ako frekvencija generatora nije točno jednaka frekvenciji mreže, onda se zvijezda fazora napona vrti u odnosu na zvijezdu mreže brzinom koja je proporcionalna razlici frekvencija.



Zvijezde napona mreže (L1-L2-L3) i generatora (U-V-W) pri sinkronizaciji

SINKRONI STROJEVI
RAD NA KRUTOJ MREŽI

Sinkronizacija

- Zvijezdu napona generatora moramo dovesti u istovjetan položaj sa zvijezdom napona mreže.
- Trebamo ubrzati ili usporiti generator pomoću pogonskog stroja.
- Napon između odgovarajućih faza mreže i generatora možemo mjeriti nul-metrom.
- Kad je taj napon jednak nuli, uključimo sklopku.
- Sklop instrumenata nazivamo uređajem za sinkronizaciju - prikazan je u elementarnom obliku.

SINKRONI STROJEVI

ISPITIVANJA I KARAKTERISTIKE

Ispitivanja pri gradnji

- Pri gradnji sinkronih strojeva, osobito onih velike snage, provode se mnogobrojna ispitivanja.
- Većina je ovih provjera definirana standardima, i proizvođač ih je dužan provesti.
- Ispitivanja pri gradnji možemo svrstati u dvije osnovne grupe:
 - ulazna kontrola i
 - provjera tehnoloških postupaka.

- Ulazna kontrola obuhvaća ispitivanja kvalitete materijala koji se ugrađuju:
 - konstrukcijski materijali,
 - magnetski materijali,
 - bakar i
 - izolacijski materijali.

- Provjera tehnoloških postupaka obuhvaća:
 - provjeru varova,
 - provjeru paketa limova (statora),
 - provjeru kvalitete izolacije statorskog namota i
 - ispitivanje sklopova.
- Od ispitivanja sklopova su među najvažnijima provjera simetričnosti rotora i pokus vitlanja.

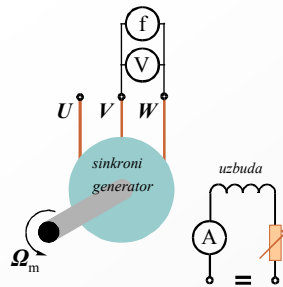
- Ako postoji nesimetrija, treba izbalansirati rotor da se izbjegnu radijalne centrifugalne sile zbog viška mase.
- Pokus vitlanja predstavlja provjeru mehaničke čvrstoće rotora pri povećanoj brzini vrtnje.
- To je vrtnja rotora generatora maksimalnom mogućom brzinom koju rotor može doseći u najnepovoljnijim uvjetima:
 - nestanak električnog opterećenja i
 - zatajivanje svih regulacionih i sigurnosnih mehanizama,

Karakteristika praznog hoda

- Karakteristika praznog hoda predstavlja ovisnost napona na stezaljkama o uzbuđnoj 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 uzbuđne struje i bez opterećenja na statoru (otvorene stezaljke).



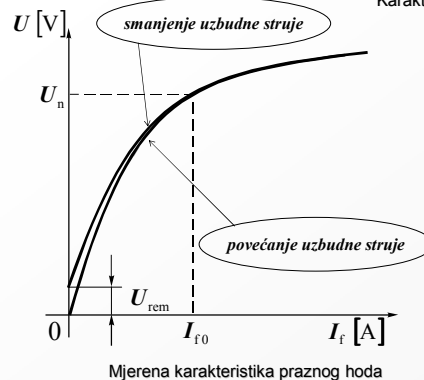
Shema mjerenja karakteristike praznog hoda

■ Mjerimo:

- napon na stezaljkama,
- frekvencija tog napona,
- uzbuđna struja i
- brzina vrtnje stroja.

■ Karakteristika praznog hoda se snima:

- uz povećanje uzbuđne struje od 0 A do neke vrijednosti koja daje napon veći od nazivnog i
- potom uz smanjenje uzbuđne struje do nule.

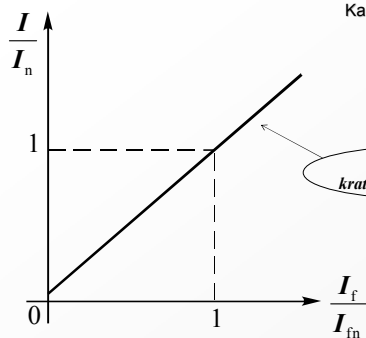
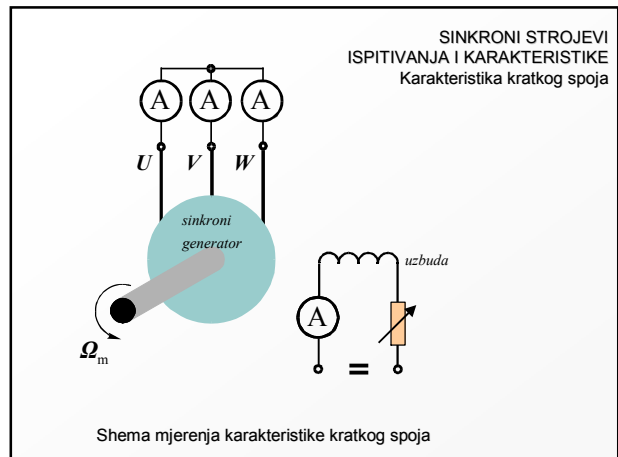


- I bez uzbuđne struje imamo na stezaljkama napon remanencije ili remanentni napon.
- Naziva se napon remanencije ili remanentni napon.
- On je posljedica histereze magnetskog materijala od kojeg je napravljen rotor.

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 uzbudnoj struji, uz održavanje konstantnog broja okretaja rotora:

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



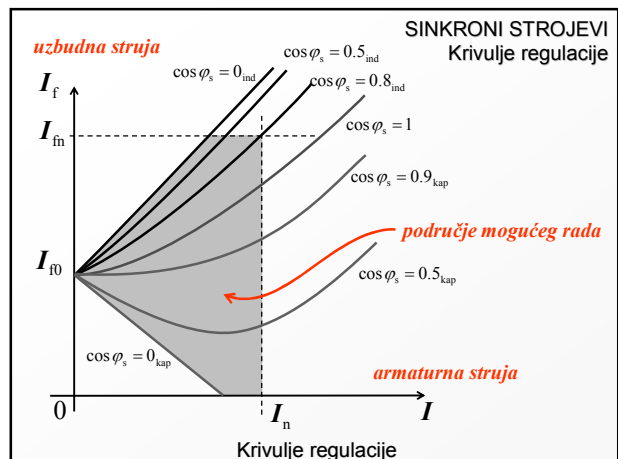
Krivulje regulacije

- 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

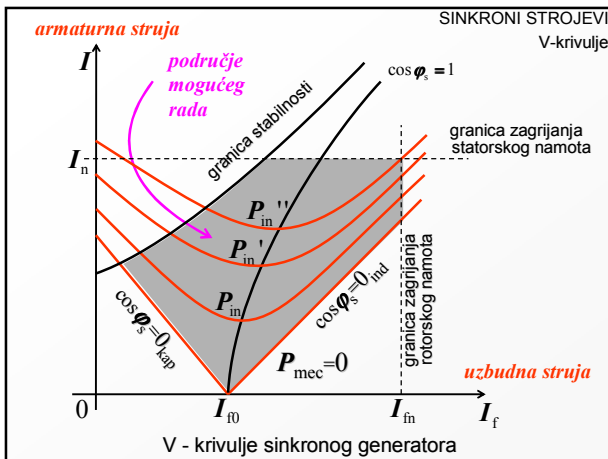
- V-krivulje prikazuju ovisnost struje statora o uzbudnoj struji za različite faktore snage, uz iste radne snage:

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

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

$$U = U_n = konst.$$

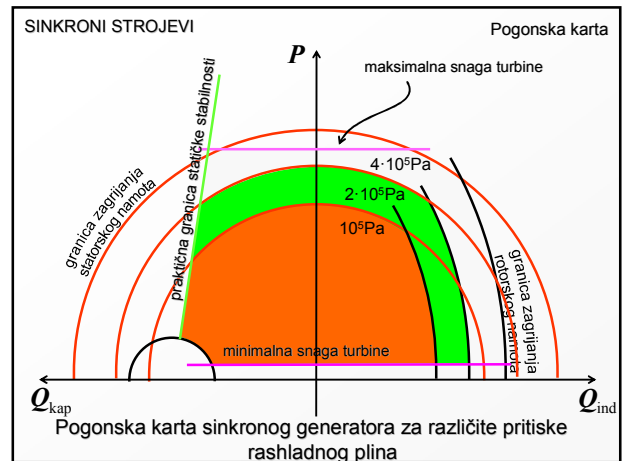
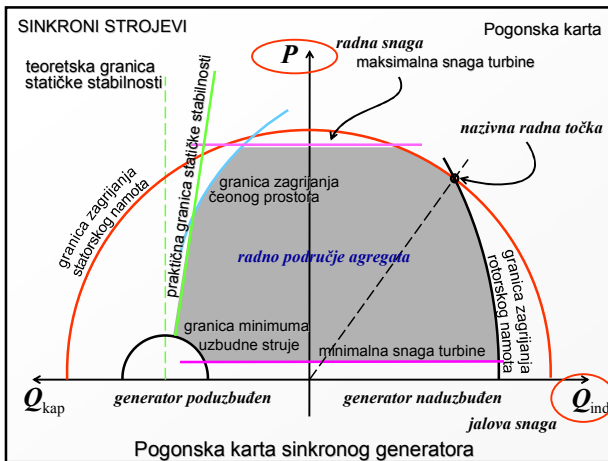
$$n = n_n = konst.$$



- 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).



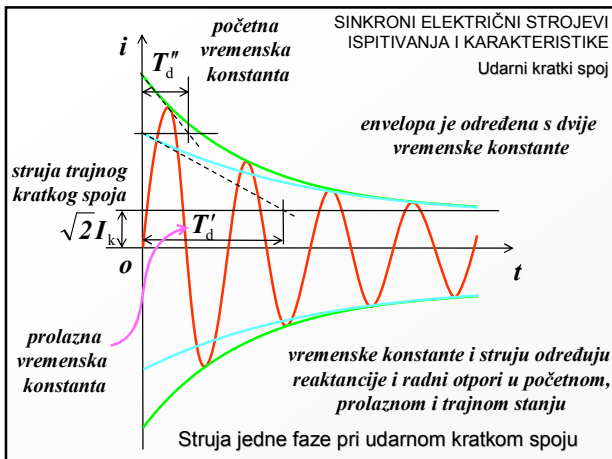
SINKRONI STROJEVI
ISPITIVANJA I KARAKTERISTIKE

Udarni kratki spoj

- SINKRONI STROJEVI
ISPITIVANJA I KARAKTERISTIKE
- Udarni kratki spoj
- Pokus udarnog kratkog spoja provodi se tako da se kratko spoji namot statora uzbuđenog stroja koji radi u praznom hodu.
 - Ovaj se pokus često izvodi na generatorima u okviru prototipnog ispitivanja.
 - Udarni kratki spoj predstavlja veliko opterećenje za stroj, prvenstveno u mehaničkom pogledu.
 - Stroj mora izdržati takav pokus bez oštećenja jer postoji realna mogućnost da se kratki spoj dogodi na generatoru u pogonu.

- SINKRONI STROJEVI
ISPITIVANJA I KARAKTERISTIKE
- Udarni kratki spoj
- Prije trenutka kratkog spajanja imamo u stroju magnetski tok koji se sinkrono vrti s rotorom.
 - Taj magnetski tok ulančuje i statorski namot.
 - Magnetski tok se može promijeniti samo postepeno, brzinom koju određuju vremenske konstante rotorskog i statorskog namota.

- SINKRONI STROJEVI
ISPITIVANJA I KARAKTERISTIKE
- Udarni kratki spoj
- Da bi magnetski tok zadržao svoju vrijednost, namotom statora moraju poteći struje koje su deset i više puta veće od trajne struje kratkog spoja.
 - Ovisno o trenutnom položaju rotora u času kratkog spoja te struje mogu imati i istosmjernu komponentu.
 - Iznos istosmjerne komponente ovisi o položaju osi faze namota statora u odnosu na uzdužnu os stroja u trenutku kratkog spoja.



SINKRONI STROJEVI
ISPITIVANJA I KARAKTERISTIKE

Udarni kratki spoj

- Kod istaknutih polova se moraju uzeti u obzir različiti magnetski otpori u uzdužnoj i poprečnoj osi.
- Analizom mjerenih vrijednosti struje iz oscilograma može se doći do vrijednosti početnih, prijelaznih i trajnih reaktancija.
- Ove reaktancije karakteriziraju generator pri dinamičkim pojavama.
- Pri gradnji generatora treba osigurati određene vrijednosti tih veličina.