



Senzori i aktuatori

Asinhroni motori



Sadržaj predavanja

- 1) Osnove asinhronih motora
- 2) Konstrukcija asinhronih motora
- 3) Princip rada asinhronih motora
- 4) Modelovanje asinhronog motora
- 5) Jednačine statorskog kola
- 6) Jednačine rotorskog kola
- 7) Naponske jednačine asinhronog motora
- 8) Moment asinhronog motora
- 9) Pojednostavljeni model asihronog motora
- 10) Stacionarni režim rada motora
- 11) Regulacija brzine okretanja asinhronog motora



Osnove asinhronih motora

- Danas najčešće korišćeni električki motor.
- Princip rada se zasniva na indukcionom delovanju između statora i rotora (obrotnom magnetnom polju).
- Asinhroni motor je dobio po tome što brzina obrtnog magnetnog polja i brzina rotora nisu iste, kao što je slučaj kod sinhronih motora.
- Rotor nije napajan strujom iz spoljnog izvora (što nije slučaj sa sinhronim motorom).
- Struje se u rotoru indukuju obrtnim poljem statora.
- Zato se motor često naziva i indukcionim motor.
- Na taj način se postiže pretvaranje električke energije u mehaničku bez električkih kontakata na rotirajućim delovima motora.



Osnove asinhronih motora

- Takav princip rada omogućuje jednostavnu, robusnu i jeftinu konstrukciju asinhronih motora.
- To su velike prednosti u odnosu na motore sa četkicama.
- Međutim, asinhroni motori imaju značajan nedostatak - teško su upravljivi.
- Rotor asinhronog motora prirodno teži da se vrti brzinom obrtnog magnetnog polja koje proizvodi stator, pa je brzina okretanja motora izrazito zavisna od frekvencije izvora napajanja.
- Da bi se bez velikih gubitaka energije menjala brzina okretanja asinhronog motora neophodno je da se istovremeno menjaju i frekvencija i napon napajanja motora.
- Ovo se ostvaruje pomoću frekventnog pretvarača



Osnove asinhronih motora

- Svaka od ovih promena može se izvesti posebno uz ne tako velike troškove, ali obe zajedno zahtevaju uređaje čija je cena relativno visoka u odnosu na cenu samog motora.
- Razvojem poluprovodničke tehnologije omogućuje se izrada jeftinijih uređaja za upravljanje AC motora.
- Zbog toga asinhroni motori imaju perspektivu u primenama i pogonima sa regulacijom, gde su do sada primat imali jednosmerni motori.
- Do sada su se AC motori (bilo sinhroni ili asinhroni) koristili uglavnom za specifične namene, uglavnom gde je primena jednosmernih neprikladna i nije dozvoljena zbog iskrenja na kolektoru (npr. rad u zapaljivim i eksplozivnim sredinama).

Osnove asinhronih motora

- Frekventni pretvarač



Konstrukcija asinhronih motora

- Asinhroni motori se izrađuju u vidu jednofaznih, dvofaznih, trofaznih i višefaznih motora.
- Najčešće se koriste trofazni asinhroni motori, koji se sastoje od po tri fazna namotaja na statoru i rotoru.
- Konstrukcija asinhronog motora prikazana je na slici.



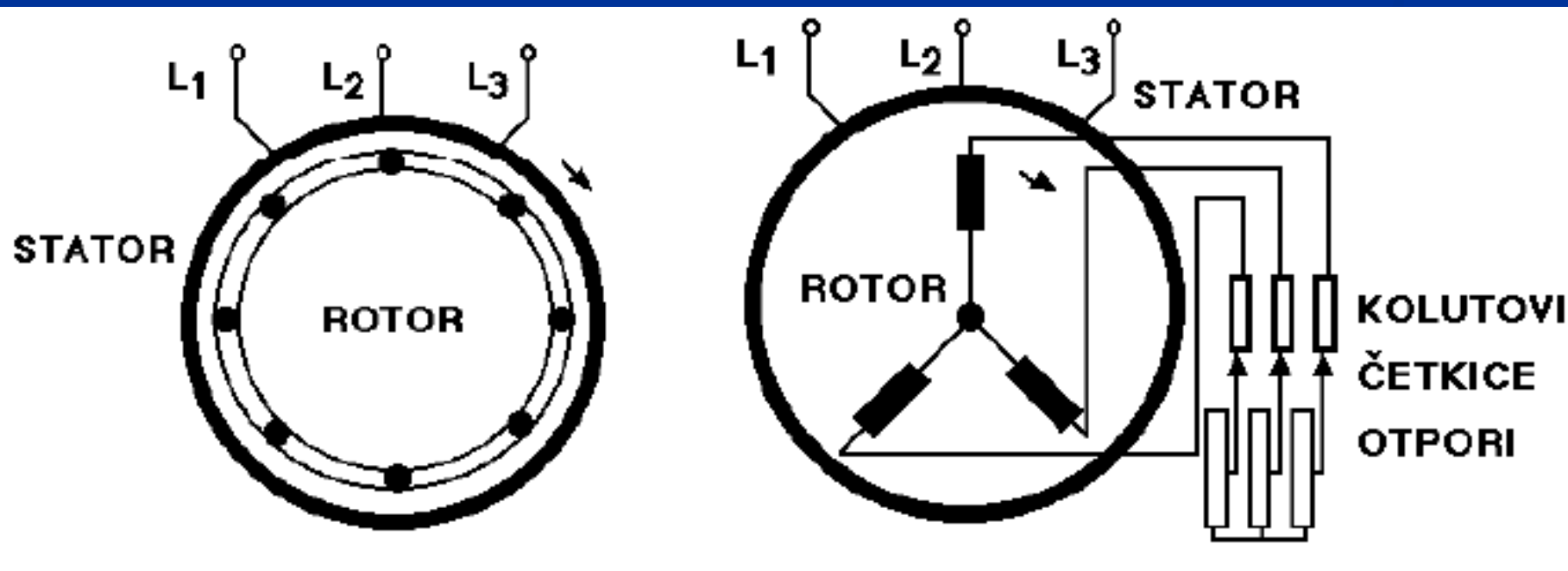


Konstrukcija asinhronih motora

- Stator je napravljen u obliku šupljeg valjka od dinamo limova, a uzduž valjka na unutrašnjoj strani nalaze se mesta u koje se stavlja trofazni namot.
- Kućište motora služi kao nosač i zaštita limova i namotaja, a izrađuje se od livenog gvožđa, čelika itd.
- U sredini se nalaze ležeći štitovi u obliku poklopca gde su smešteni ležajevi za osovinu na kojoj se nalazi rotor.
- Rotor je sastavljen slično kao i stator, a sastoji se od osovine i rotorskog paketa.
- Rotorski paket je izveden u obliku valjka od dinamo limova, a u uzdužnom smeru na spoljašnjoj strani valjka nalaze se mesta za smeštaj rotorskog namotaja.

Konstrukcija asinhronih motora

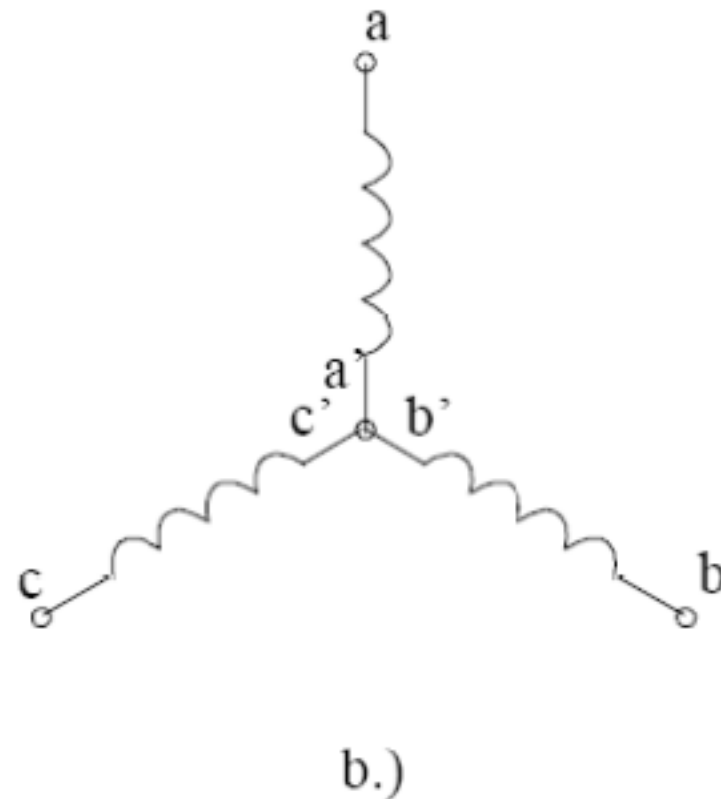
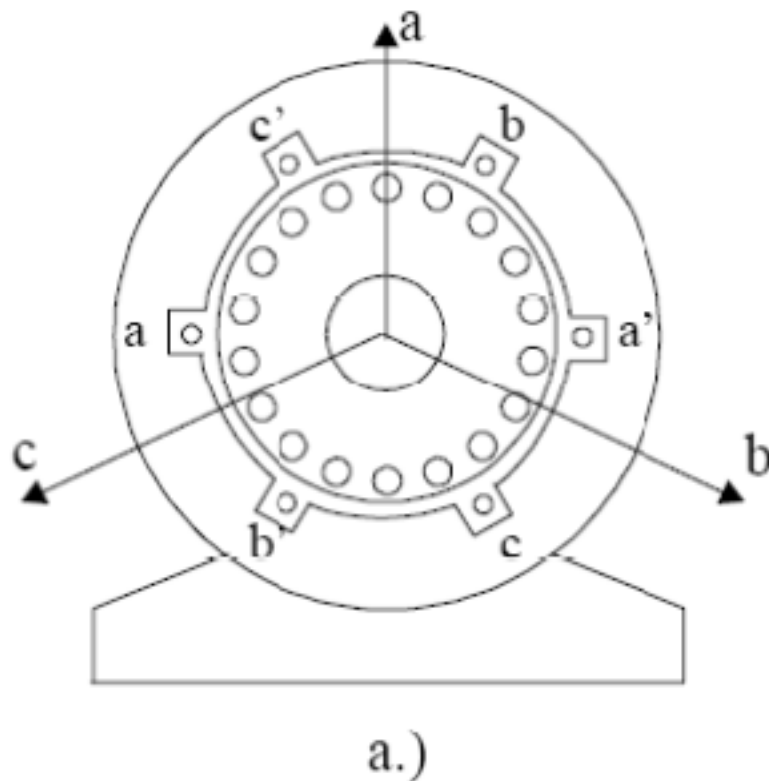
- Ako je rotorski namotaj izveden od štapova bakra, bronzе ili aluminijuma, koji su sa obe strane prstenima kratko spojeni i liči na kavez, tada je to kavezni asinhroni motor. Ili ako je rotorski namotaj izveden kao i statorski tada je to klizno kolutni asinhroni motor.



Konstrukcija asinhronih motora

■ Kavezni asinhroni motor

- stator sa trofaznim simetrično raspoređenim namotajem





Princip rada asinhronih motora

- Priključivanjem statorskog primarnog namotaja na AC trofaznu mrežu kroz trofazni namotaj proteće trofazna AC struja stvarajući obrtno magnetno polje koje rotira sinhronom brzinom n_s i zatvara se kroz stator i rotorski sekundarni namot.

$$n_s = \frac{60 f_1}{p},$$

f_x - frekvencija struja,
 p - broj pari polova statorskog namota motora.

- Obrtno magnetno polje indukuje u rotoru i tako indukuje rotorske struje.
- Interakcijom struja rotora i obrtnog mag. polja stvara se sila na koja okreće rotor u smeru obretnog magnetnog polja.

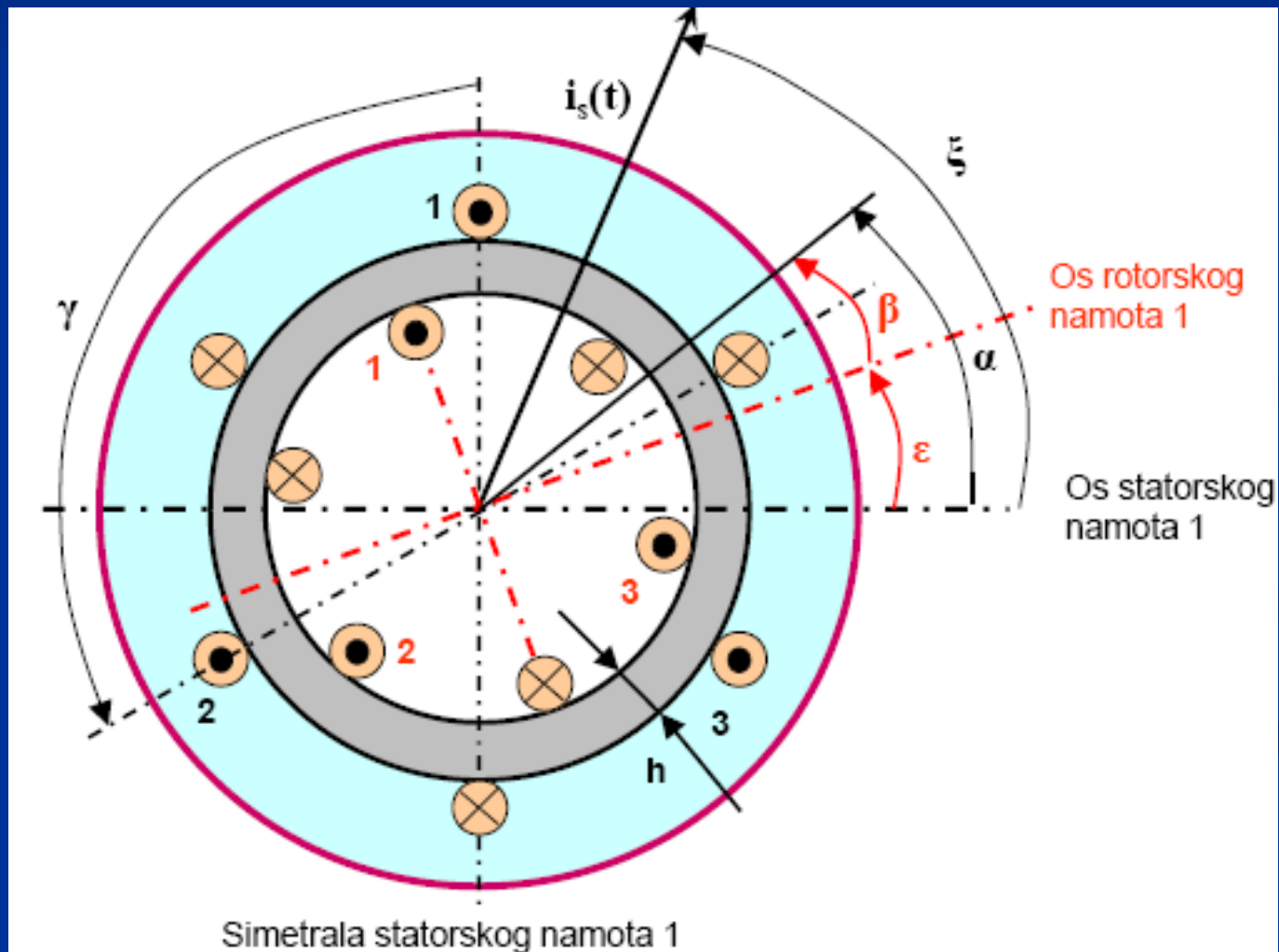


Princip rada asinhronih motora

- Smer okretanja obrtnog magnetnog polja i smer kretanja rotora su isti. Za promenu smera okretanja rotora, treba promeniti smer okretanja obrtnog magnetnog fliksa zamenom dveju faza.
- Brzina rotora uvek je manja od sinhronne brzine kojom se okreće obrtno magnetno polje i zavisna je od teretu na motoru. Rotor ne može nikada postići sinhronu brzinu okretanja, a kad bi rotor postigao sinhronu brzinu, ne bi više bilo razlike brzina obrtnog magnetnog fluksa i rotora i ne bi postojalo presecanje namotaja rotora magnetnim linijama. Zbog toga se ne bi u rotorskom namotuju indukovala EMS i ne bi bilo delovanja mehaničkih sila, te se ne može stvoriti moment za rotaciju.
- Rotor se uvek okreće asinhrono, po čemu je ovaj motor i dobio svoje ime.

Modelovanje asinhronog motora

- U nastavku se izvodi pojednostavljeni matematički model trofaznog simetričnog asinhronog motora za dinamičke uslove.





Konstrukcija asinhronih motora

Objašnjenje oznaka na slici

- α - ugaona koordinata u odnosu na centar 1. namotaj statora (proizvoljni ugao posmatranja jačine magnetnog polja)
 - vektor magnetnog polja 1. faze statora je u $\alpha=0^\circ$,
 - vektor magnetnog polja 2. faze statora je u $\alpha=120^\circ$,
 - vektor magnetnog polja 3. faze statora je u $\alpha=240^\circ$.
- β - ugaona koordinata u odnosu na centar 1. namotaja rotora.
- ε - ugao zaokreta rotora prema statoru.
- $\omega_r(t)=d\varepsilon/dt$ - ugaona brzina rotora.
- h – vazdušni procep između statora i rotora.
- $\gamma=120^\circ$ - ugao između dve susednih faze statora, odnosno rotora.
- $i_s(t)$ - vektor struja statora.
- ξ - ugao vektora struja statora prema centru namotaja prve faze statora.



Modelovanje asinhronog motora

Pretpostavke:

- Sve 3 faze simetrične.
- Motor je dvopolni (svaka faza 2 pola - za višepolne motore potrebno je korigovati sinhronu brzinu).
- Permabilnost statora beskonačna (stator izveden od aluminijumskih limova)
- Permabilnost rotora beskonačna.
- Zanemarivo zasićenje krive magnetizacije i uticaja vrtložnih struja.
- Širina vazdušnog procepa između statora i rotora konstantna po celom obodu rotora.
- Aktivni deo rotora i statora paralelan je osi rotacije.
- Namotaji statora spojeni u zvezdu (sa izolovanim zvezdištem).
- Namotiji rotora su kratko spojeni.



Jednačine statorskog kola

- Suma trenutnih vrednosti struja statora je

$$i_{s1}(t) + i_{s2}(t) + i_{s3}(t) = 0.$$

- Iznos ukupnog vektora magnetnog fluksa statora pod uglom α iznosi:

$$\Theta_s(\alpha, t) = N_s [i_{s1}(t) \cos(\alpha) + i_{s2}(t) \cos(\alpha - \gamma) + i_{s3}(t) \cos(\alpha - 2\gamma)],$$

- gde su:
 - N_s - broj namotaja statora po fazi,
 - γ - prostorni ugao između faza.



Jednačine rotorskog kola

- Jednačina magnetnog polja rotorskog kola:

$$\Theta_r(\beta, t) = N_r [i_{r1}(t) \cos \beta + i_{r2} \cos(\beta - \gamma) + i_{r3} \cos(\beta - 2\gamma)].$$

- Uvođenjem kompleksnog vektora struja, rotorsko magnetsko polje poprima oblik:

$$\Theta_r(\beta, t) = \frac{N_r}{2} [\underline{i}_r(t) e^{-j\beta} + \underline{i}_r^*(t) e^{j\beta}].$$

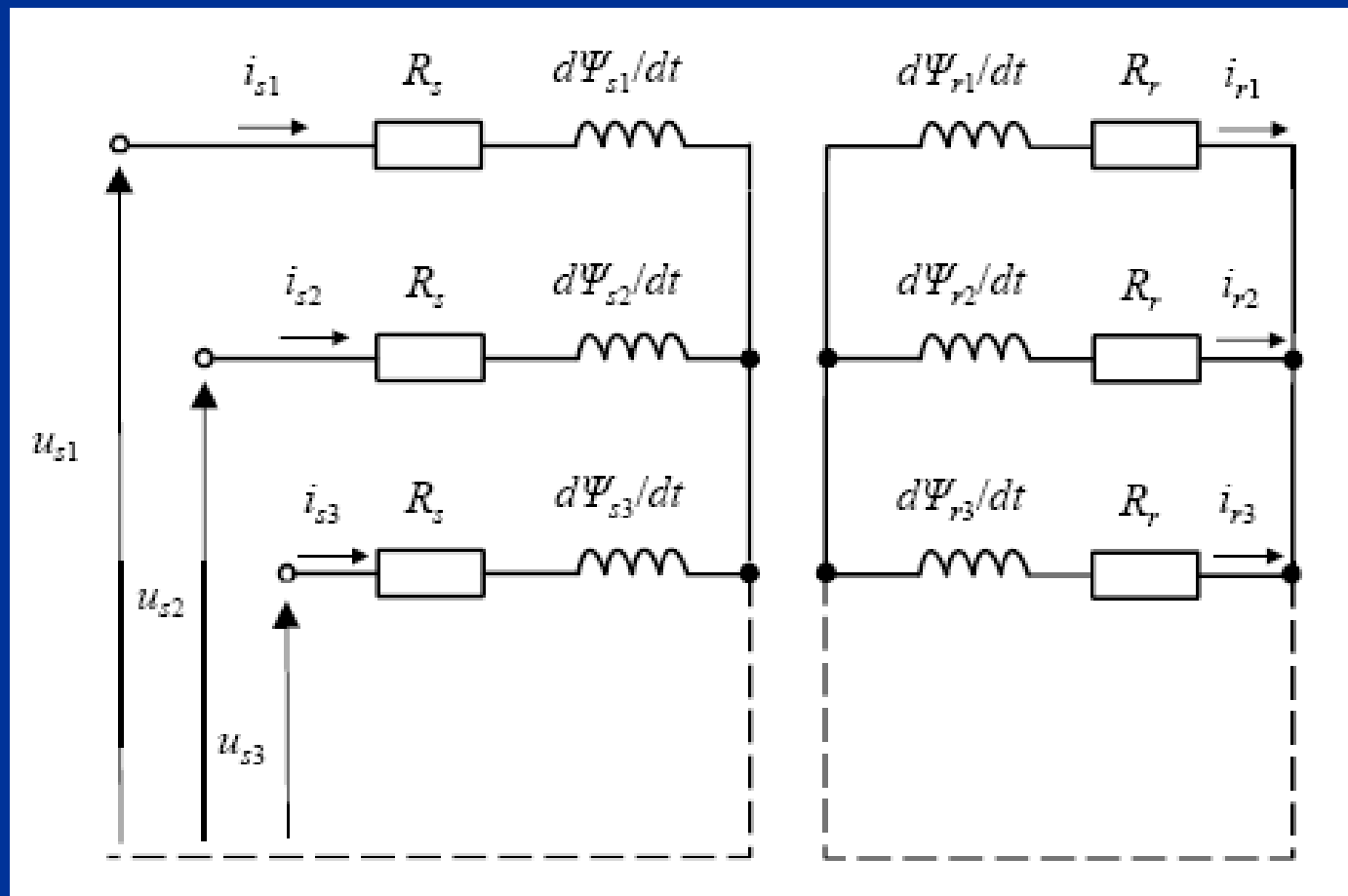
- Delovanje rotorskog magnetnog polja na stator - prelaz iz rotorskog u statorski koordinatni sistem ($\beta = \alpha - \varepsilon$):

$$\Theta_r(\alpha, \varepsilon, t) = \frac{N_r}{2} [\underline{i}_r(t) e^{-j(\alpha - \varepsilon)} + \underline{i}_r^*(t) e^{j(\alpha - \varepsilon)}].$$



Naponske jednačine asinhronog motora

- Ulančeni tokovi statora i rotora koriste se u naponskim jednačinama asinhronog motora.
- Tim jednačinama opisuje se šemom statorskih i rotorskih namotaja.





Naponske jednačine asinhronog motora

- Naponske jednačine namotaja statora:

$$\begin{aligned}R_s i_{s1}(t) + \frac{d\Psi_{s1}(t)}{dt} &= u_{s1}(t), \\R_s i_{s2}(t) + \frac{d\Psi_{s2}(t)}{dt} &= u_{s2}(t), \\R_s i_{s3}(t) + \frac{d\Psi_{s3}(t)}{dt} &= u_{s3}(t), \\ \underline{i}_s(t) &= i_{s1}(t) + i_{s2}(t)e^{j\gamma} + i_{s3}(t)e^{j2\gamma} \\ \underline{u}_s(t) &= u_{s1}(t) + u_{s2}(t)e^{j\gamma} + u_{s3}(t)e^{j2\gamma}.\end{aligned}$$

- Kombinovanjem gornjih izraza dobija se

$$R_s \underline{i}_s(t) + \frac{d\Psi_s(t)}{dt} = R_s \underline{i}_s(t) + L_s \frac{d\underline{i}_s(t)}{dt} + L_{sr} \frac{d}{dt}(\underline{i}_r e^{j\varepsilon}) = \underline{u}_s(t).$$



Naponske jednačine asinhronog motora

- Ako se uzme u obzir da je $d\varepsilon/dt=\omega$, prethodna jednačina poprima oblik:

$$R_s \underline{i}_s(t) + L_s \frac{d\underline{i}_s(t)}{dt} + L_{sr} \frac{d\underline{i}_r(t)}{dt} e^{j\varepsilon} + j\omega L_{sr} \underline{i}_r e^{j\varepsilon} = \underline{u}_s(t).$$

- Treći član na levoj strani jednačine predstavlja indukovani napon u statoru prouzrokovan vremenskom promenom vektora rotorskih struja, koji je u koordinatnom sistemu statora okrenut za ugao ε .
- Četvrti član predstavlja indukovani napon u statoru prouzrokovan okretanjem rotora strujom rotora i_r .
- Budući da se u jednačinama mehaničkog kretanja pojavljuje moment motora i taj je moment potrebno izraziti preko već uvedenih veličina za struje, napone i parametre stroja.



Moment asinhronog motora

- Moment proizvodi obrtno okretanje motora, a računa se kao posledica delovanja sila između statora i rotora.
- Ove sile nastaju međusobnim delovanjem magnetnog polja statora i rotorskih struja.
- Statorska struja u vazдушnom procepu uz sam rotor indukciju:

$$B_{rs}(\alpha, t) = k\mu_0 \frac{\Theta_s(\alpha, t)}{2h} = \frac{kN_s\mu_0}{4h} (\underline{i}_s(t)e^{-j\alpha} + \underline{i}_s^*(t)e^{j\alpha}).$$

- Izraz za indukciju izražen u koordinatnom sistemu rotora glasi:

$$B_{rs}(\beta, \varepsilon, t) = \frac{kN_s\mu_0}{4h} (\underline{i}_s(t)e^{-j(\beta+\varepsilon)} + \underline{i}_s^*(t)e^{j(\beta+\varepsilon)}).$$

- Za računanje momenta koristi se **funkcija strujnih obloga**, odnosno struja po jedinici obodne dužine rotora, odnosno statora.



Pojednostavljeni model asihronog motora

- Induktivnost statora i rotora i njihova međuinuktivnost povezani su sa glavnim induktivnostima i koeficijentima rasipanja izrazima:

$$L_s = (1 + \sigma_s) L_{hs}, \quad L_r = (1 + \sigma_r) L_{hr}, \quad L_{sr} = \sqrt{L_{hs} + L_{hr}}.$$

- U slučaju ($N_s = N_r$) jednake su i glavne induktivnosti statora i rotora:

$$L_{hs} = L_{hr} = L_{sr} = L_h,$$

pa izrazi za induktivnosti statora i rotora glase:

$$\begin{aligned} L_s &= (1 + \sigma_s) L_h, \\ L_r &= (1 + \sigma_r) L_h. \end{aligned}$$



Pojednostavljeni model asihronog motora

- Pojednostavljeni opis asinhronog motora glasi:

$$R_s \underline{i}_s(t) + L_s \frac{d\underline{i}_s(t)}{dt} + L_h \frac{d}{dt} (\underline{i}_r(t) e^{j\varepsilon}) = \underline{u}_s(t),$$

$$R_r \underline{i}_r(t) + L_r \frac{d\underline{i}_r(t)}{dt} + L_h \frac{d}{dt} (\underline{i}_s e^{-j\varepsilon}) = 0,$$

$$\frac{2}{3} p_m L_h I_m \{ \underline{i}_s(t) [\underline{i}_r e^{j\varepsilon}]^* \} = M_t(\varepsilon, \Omega, t) + J_u \frac{d\Omega}{dt},$$

$$\omega = \frac{d\varepsilon}{dt}.$$

- Ovaj matematički model važi za proizvoljne oblike struja, napona i momenata tereta.
- Svakoj od vektorskih promenljivi u izrazima odgovaraju dve skalarne jednačine, jer su promenljive dvodimenzionalni vektori.



Pojednostavljeni model asihronog motora

- Trenutne vrednosti struja mogu se dobiti iz vektorskog prikaza uz $\gamma=120^\circ$:

$$\underline{i}_s(t) = \frac{3}{2} i_{s1}(t) + j \frac{\sqrt{3}}{2} [i_{s2}(t) - i_{s3}(t)].$$

- Iz ovog izraza sledi:

$$\begin{aligned} i_{s1}(t) &= \frac{2}{3} \operatorname{Re}\{\underline{i}_s(t)\}, \\ i_{s2}(t) &= \frac{2}{3} \operatorname{Re}\{\underline{i}_s(t) e^{j240^\circ}\}, \\ i_{s3}(t) &= \frac{2}{3} \operatorname{Re}\{\underline{i}_s(t) e^{j120^\circ}\}. \end{aligned}$$



Stacionarni režim rada motora

- Sistem jednačina asinhronog motora (naponske i momentne) predstavlja temeljne relacije za istraživanje dinamičkih pojava i stacionarnih stanja u motoru.
- Sinusni simetrični trofazni sistem napona napajanja kružne frekvencije ω_1 sa efektivnom vrednošću faznog napona U_s može se napisati

$$u_{s1}(t) = \sqrt{2}U_s[\cos(\omega_1 t + \varphi_1)] = \frac{\sqrt{2}}{2}U_s[e^{j(\omega_1 t + \varphi_1)} + e^{-j(\omega_1 t + \varphi_1)}]$$

$$= \frac{\sqrt{2}}{2}[U_s e^{j\omega_1 t} + U_s^* e^{-j\omega_1 t}],$$

$$u_{s2}(t) = \frac{\sqrt{2}}{2}[U_s e^{j(\omega_1 t - \gamma)} + U_s^* e^{-j(\omega_1 t - \gamma)}],$$

$$u_{s3}(t) = \frac{\sqrt{2}}{2}[U_s e^{j(\omega_1 t - 2\gamma)} + U_s^* e^{-j(\omega_1 t - 2\gamma)}], \quad \underline{U}_s = U_s e^{j\varphi_1}, \quad \underline{U}_s^* = U_s e^{-j\varphi_1}.$$



Regulacija brzine okretanja asinhronog motora

- Brzina okretanja asinhronog motora zavisi od frekvencije mreže koja određuje sinhronu brzinu okretanja. Za ovu brzinu važi izraz:

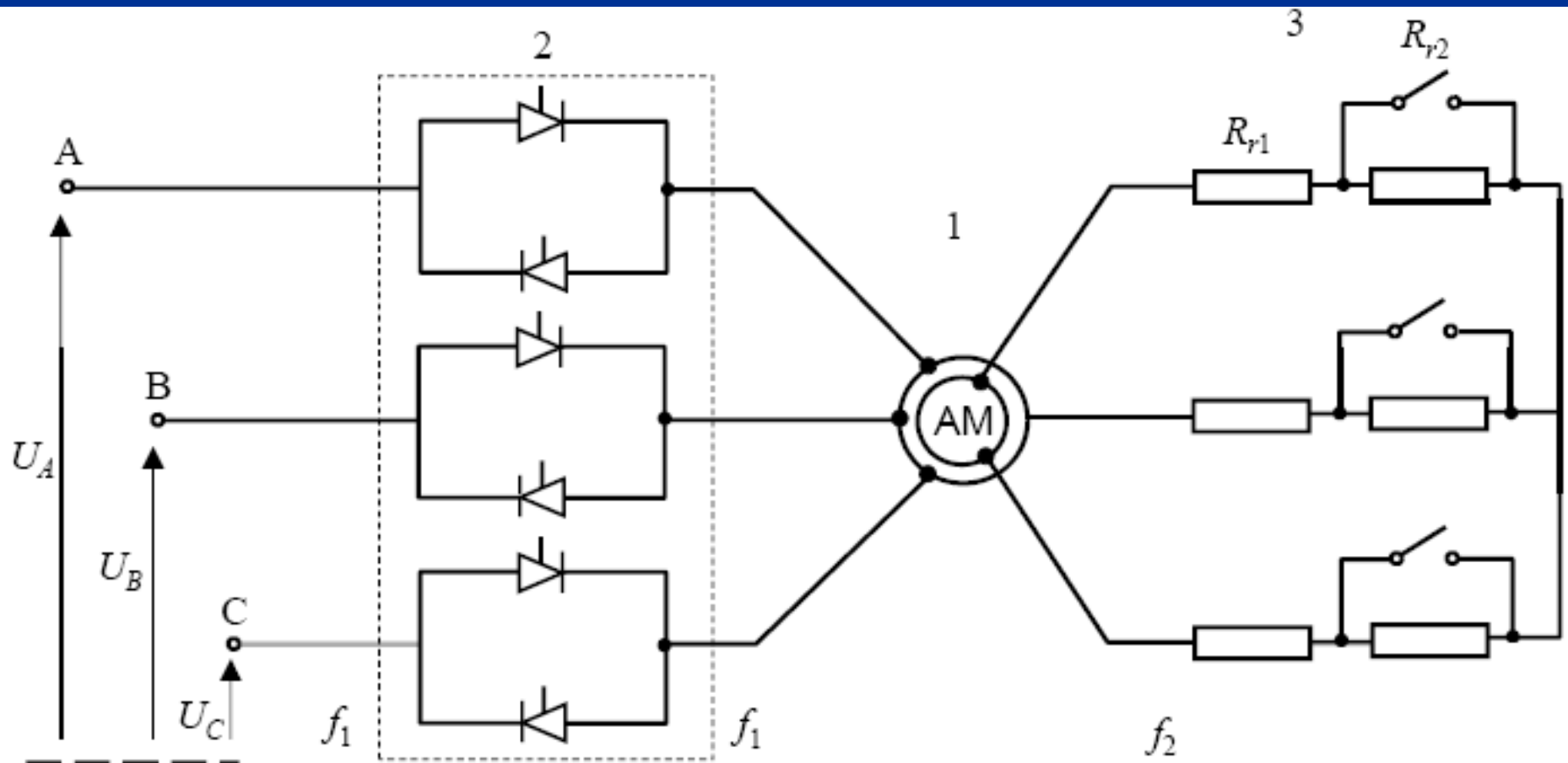
$$\Omega = \frac{\omega_1 - \omega_2}{p_m} = \frac{2\pi}{p_m} (f_1 - f_2) = \frac{2\pi}{p_m} f_1 (1 - S).$$

- gde su:
 - $f_2 = Sf_1$ – frekvencija klizanja, odnosno frekvencija struja u rotoru [Hz],
 - p_m – broj pari polova motora.
- Promena brzine okretanja promenom klizanja i frekvencije izvodi se na nekoliko različitih načina: promenom napona statora, impulsnom promenom rotorskog otpora, pretvaračem sa međukolima u rotorskom kolu, promenom frekvencije statorskog napona.



Regulacija brzine okretanja asinhronog motora

- Promenom napona statora U_s menja se prekretni moment M_p , a uz konstantni moment tereta i klizanje S , njime se menja i brzina okretanja asinhronog motora.





Regulacija brzine okretanja asinhronog motora

- Trofazni pretvarač napona 2, izveden pomoću antiparalelnog spoja tiristora, napaja stator asinhronog motora 1 naponom konstantne frekvencije f_1 , a promenjive efektivne vrednosti.
- Budući da je moment asinhronog motora proporcionalan kvadratu napona statora, a prekretno klizanje ne zavisi od napona statora, karakteristike imaju oblik prikazan na slici, uz normirane veličine napona, momenta i brzine vrtnje.
- Vidljivo je da za normirani napon $U_s/U_{sn}=0.6$, normirani prekretni moment iznosi $M/M = 0.36$.
- Zavisno od momentu tereta M_t mijenja se klizanje, a time i brzina okretanja Ω .
- U idealnom praznom hodu ($M=0$), nema nikakve promene brzine okretanja, pa se asinhroni motor vrti sinhronom brzinom.

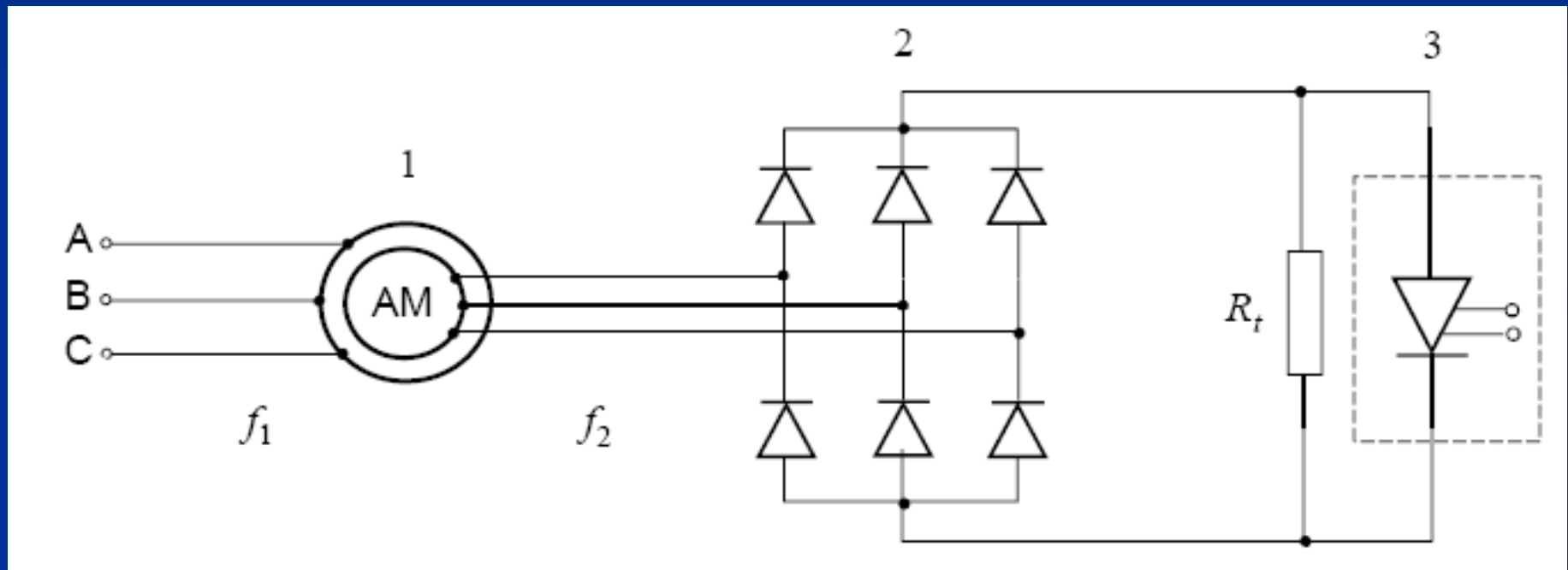


Regulacija brzine okretanja asinhronog motora

- Sa otporima R_{r1} i R_{r2} područje promene brzine okretanja je 2.6 puta veća nego sa otporom R_{r1} .
- Promena brzine okretanja promenom napona statora moguća je uz značajne gubitke, jer se energija velikim delom troši na rotorskim otporima.
- Zbog toga se ovakav spoj koristi samo za motore malih snaga, ili za motore većih snaga ako kratko vreme rade uz snižene brzine okretanja.

Regulacija brzine okretanja asinhronog motora

- Klizanje asinhronog motora moguće je također mijenjati promjenama rotorskog otpora uz konstantan napon statora.



1. Asinhroni stroj
2. Diodni ispravljač
3. Ispravljački pretvarač za impulsno uključenje otpora.

Primer: moderna električka lokomotiva

- Klizanje asinhronog motora moguće je menjati promenama rotorskog otpora uz konstantan napon statora.

