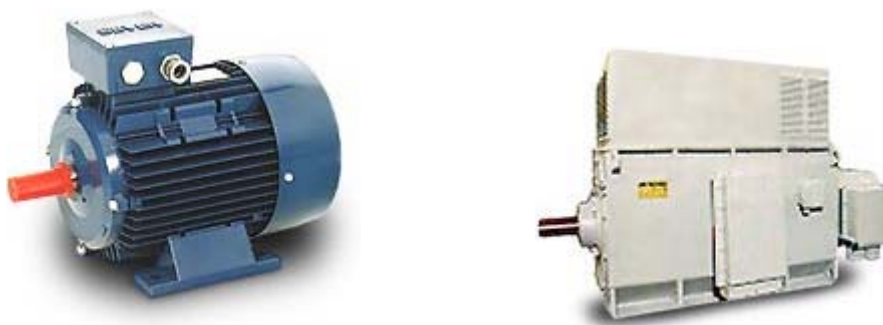


ASINHRONE MAŠINE

1 ASINHRONE MAŠINE

Asinhrona mašina se u primeni najčešće susreće kao motor, i to trofazni. Tipični je predstavnik električne mašine male snage koja se obično pravi u velikim serijama. Prednosti asinhronih mašina, u odnosu na ostale vrste električnih mašina, su prvenstveno manja cena, jednostavnost konstrukcije, manji momenat inercije, robusnost, pouzdanost i sigurnost u radu, lako održavanje, dok su nedostaci vezani uglavnom za uslove pokretanja i mogućnost regulisanja brzine obrtanja u širokim granicama. Primena mikroprocesora i energetske elektronike omogućila je ekonomično upravljanje motorima za naizmjeničnu struju i time konkurentnost i u području pogona sa promenljivom brzinom.



Slika 1-1 a) niskonaponski motor b) visokonaponski motor

Pre nego što se detaljnije upoznamo sa radom asinhronne mašine, biće dat osnovni opis namotaja mašina za naizmjeničnu struju.

1.1 Namotaji mašina za naizmjeničnu struju

Električne mašine za naizmjeničnu struju obično imaju dva namotaja, induktor i indukt (Tabela 1-1).

Induktor (pobuda, primar u analogiji sa transformatorom) – namotaj kroz koji prolazi električna struja i stvara magnetsko polje koje magneti čitavo magnetsko kolo mašine.

Indukt (sekundar u analogiji sa transformatorom) – namotaj u kome se pod uticajem promena magnetskog fluksa induktora indukuju elektromotorne sile (*ems*), a ako je električno kolo namotaja zatvoreno, i struje.

Namotaji mogu biti namotani na istaknute polove ili smešteni u žlebove koji su aksijalno postavljeni po obimu induktora ili indukta. Namotaji za naizmjeničnu struju su uvek raspoređeni u žlebove.

Tabela 1-1 Namotaji mašina za naizmjeničnu struju

Mašina / namotaj	<i>Induktor</i> (smeštaj, oblik struje)	<i>Indukt</i> (smeštaj, oblik struje)
<i>asinhrona</i>	stator, naizmjenični	rotor, naizmjenični
<i>sinhrona</i>	rotor, jednosmerni	stator, naizmjenični

Za predstavljanje namotaja upotrebljavaju se razvijene i kružne šeme. Razvijena šema se dobija kada se cilindrična površina statora i rotora, gledano sa strane žlebova, preseče po jednoj izvodnici i razvije u jednu ravan. Kružne šeme prikazuju ili izgled namotaja statora ili rotora sa bočne strane, ili njihov radijalni presek.

Standardne oznake krajeva namotaja trofaznih naizmjeničnih mašina su:

Tabela 1-2 Oznake krajeva namotaja trofaznih naizmjeničnih mašina

namotaj	nova oznaka	stara oznaka
statora	U1, U2	U, X
	V1, V2	V, Y
	W1, W2	W, Z
rotora asinhrona mašina	K1, K2	u, x
	L1, L2	v, y
	M1, M2	w, z
rotora (pobudni) sinhrona mašina	P1, P2	I, K

Namotaj pobude (induktora) asinhronne mašine smešten je u otvorene ili poluzatvorene žlebove statora. Namotaj indukta je smešten na rotoru. S obzirom na način izvođenja namotaja rotora (indukta), razlikujemo dva osnovna tipa asinhronih mašina:

- sa namotanim rotorom (klizno-kolutne) i
- kratkospojenim rotorom (kavezne).

1.3.1 Naizmenično polje

Kad se pobuđivanje vrši naizmeničnom strujom, talasi su pulsacioni. Sa pobudom naizmenične struje sinusnog oblika, visina krivih iznad nulte linije menja se sinusoidno sa vremenom. Ako sa F_m označimo maksimalnu vrednost *mps* u osi namotaja, za osnovni harmonik mps imaćemo:

$$F_v = F_m \cos \omega t ,$$

odnosno

$$F = F_m \cos \theta \cos \omega t$$

ako se vreme računa od trenutka (t) kada je *mps* maksimalna. U daljem tekstu ćemo pravac u kojem osnovni talas ima maksimalnu vrednost polja nazivati *osa polja*. U posmatranom slučaju jedne faze osa magnetskog polja koja se menja u vremenu ima stalni pravac koji se u prostoru poklapa sa osom namotaja. Ovakvo magnetsko polje naziva se naizmenično ili *pulsaciono polje*.

1.3.2 Obrtno polje

Obrtno magnetsko polje može se dobiti pomoću trofaznog sistema kada se na stator postave tri namotaja čije se ose jedna u odnosu na drugu pomerene za električni ugao od 120° i kada se oni priključe na sinusoidne napone koji obrazuju trofazni naizmenični sistem.

Neka su namotaji a , b i c priključeni na faze trofaznog izvora čiji je redosled L1, L2 i L3:

$$a(L1)$$

$$c(L3) \quad b(L2)$$

Svaki od ova tri namotaja ima svoje naizmenično polje:

$$F_a = F_m \cos\theta \cos\omega t,$$

$$F_b = F_m \cos(\theta - 120^\circ) \cos(\omega t - 120^\circ),$$

$$F_c = F_m \cos(\theta - 240^\circ) \cos(\omega t - 240^\circ).$$

Ugao po obimu računa se od ose namotaja faze a a vreme od trenutka kada je mps (struja) u fazi a maksimalna.

Rezultantna mps F_θ u tački θ i trenutku t biće:

$$\begin{aligned} F_\theta &= F_a + F_b + F_c = \\ &= F_m \cos\theta \cos\omega t + F_m \cos(\theta - 120^\circ) \cos(\omega t - 120^\circ) + F_m \cos(\theta - 240^\circ) \cos(\omega t - 240^\circ). \end{aligned}$$

Na osnovu relacije:

$$\cos\alpha \cos\beta = \frac{1}{2} \cos(\alpha + \beta) + \frac{1}{2} \cos(\alpha - \beta)$$

dobija se:

$$\begin{aligned} F_\theta &= \frac{F_m}{2} \cos(\theta + \omega t) + \frac{F_m}{2} \cos(\theta - \omega t) + \frac{F_m}{2} \cos(\theta + \omega t - 240^\circ) + \frac{F_m}{2} \cos(\theta - \omega t) + \\ &+ \frac{F_m}{2} \cos(\theta + \omega t - 480^\circ) + \frac{F_m}{2} \cos(\theta - \omega t). \end{aligned}$$

Pošto je zbir prvog, trećeg i petog člana jednak nuli, za trofazni sistem imamo:

$$F_\theta = \frac{3}{2} F_m \cos(\theta - \omega t).$$

Analogno trofaznom sistemu, za q fazni sistem imamo:

$$F_\theta = \frac{q}{2} F_m \cos(\theta - \omega t).$$

Amplituda polja je $F_A = \frac{q}{2} F_m$

Za $t = 0$ maksimum polja se nalazi u osi faze a , za $\omega t = 120^\circ$ maksimum polja će biti u osi faze b i za $\omega t = 240^\circ$ maksimum polja će biti u osi faze c . Ako bi namotaje a , b i c priključili na faze trofaznog izvora drugim redom, npr. čiji je redosled L1, L3 i L2:

$$\begin{aligned} &a(L1) \\ &c(L2) \quad b(L3) \end{aligned}$$

tada bi se za $t = 0$ maksimum polja nalazio u osi faze a , za $\omega t = 120^\circ$ maksimum polja će biti u osi faze c i za $\omega t = 240^\circ$ maksimum polja će biti u osi faze b . To znači da će smer obrtanja polja biti izmenjen a njegov izraz će tada biti:

$$F_\theta = \frac{3}{2} F_m \cos(\theta + \omega t).$$

1.4.1 Trofazni motor sa namotanim rotorom

Namotaj statora je trofazan, kao kod sinhronih motora. Namotaj rotora je takođe trofazan (motani), kod mašina manjih snaga je spregnut u zvezdu, dok je kod mašina većih snaga, da bi se smanjio napon u stanju mirovanja, spegnut u trougao, a slobodni krajevi su mu spojeni na tri metalna klizna koluta (prstena), izolovana međusobno i od vratila. Po tri klizna koluta (za svaku fazu po jedan) klize dirke (četkice) koje su fiksirane za stator i čiji su priključci izvedeni na stator. Na ovaj način je moguć električni pristup rotorskom namotaju, odnosno dovođenje i odvođenje električne energije. U svrhu boljeg pokretanja ili regulisanja brzine obrtanja, rotorskom kolu se dodaje odgovarajući trofazni rotorski otpornik. Uloga kao i dimenzionisanje rotorskih otpornika može biti dvojaka- oni mogu da služe za pokretanje (startovanje, puštanje u rad), odnosno regulisanje brzine obrtanja. Ako služe samo za pokretanje, da bi se smanjilo habanje dirki kao i gubici usled trenja dirki o klizne prstenove, većina motora je snabdevena naročitim uređajem koji po puštanju motora u rad podiže dirke i klizne prstenove dovodi u kratki spoj. Motor tada radi kao asinhrona mašina sa kratkospojenim rotorom

Asinhrona mašine sa namotanim rotorom, u odnosu na one sa kratkospojenim rotorom, imaju komplikovaniju izvedbu, skuplje su, imaju manju pouzdanost u radu, podložnije su kvarovima a za pokretanje im je ponekad potreban dodatni uređaj u vidu otpornika za puštanje u rad. Osnovna prednost im je vezana za bolje karakteristike pri puštanju u rad, što je naročito važno kod pogona sa teškim uslovima pokretanja kada se zahtevaju veliki polazni momenti.

1.4.2 Trofazni motor sa kratkospojenim rotorom

Namotaj statora se, u principu, ne razlikuje od namotaja statora trofaznih asinhronih mašina sa namotanim rotorom. Međutim, namotaj rotora je značajno različit – podseća na kavez; kod motora manjih i srednjih snaga izliven je od aluminijuma, a kod motora većih snaga izrađen je od neizolovanih bakrenih štapnih provodnika, koji se na bočnim stranama kratko spajaju sa po jednim prstenom. U oba slučaja kratkospojeni rotor nema mogućnost spoljnog električnog pristupa, vrlo je robustan i može da izdrži visoka mehanička i termička naprezanja. Ovako formiran namotaj u suštini predstavlja n -fazni namotaj, gde je n broj štapnih provodnika. U analizama se ovaj namotaj ekvivalentira trofaznim.

Osnovni problem vezan za primenu ove vrste asinhronih mašina su loše polazne karakteristike (karakteristike pri puštanju u rad).

1.5 Osnovni princip rada

Posmatrajmo asinhronu mašinu sa trofaznim namotajem na statoru i ekvivalentnim trofaznim kratkospojenim namotajem na rotoru. Neka je namotaj statora priključen na sistem naizmjeničnih trofaznih napona. U namotaju statora javlja se kontra elektromotorna sila \underline{E}_1 koja drži ravnotežu priključenom naponu statora \underline{U}_1 i čiji se modul razlikuje od napona za pad napona na omskoj otpornosti i reaktansi rasipanja (što iznosi nekoliko procenata). Kroz namotaj statora protičaće naizmjenične trofazne struje koje stvaraju *Teslino obrtno magnetsko polje*. Obrtno polje rotira u zazoru tzv. sinhronom brzinom, n_s :

$$n_s = \frac{60 f}{p}$$

gde je f učestanost (frekvencija) mreže, a p broj pari polova.

Pri tome obrtno polje preseca provodnike statora i rotora i u njima indukuje odgovarajuće *elektromotorne sile* (*ems*). Pošto je električno kolo rotora zatvoreno, usled ove *ems* se u provodnicima namotaja rotora stvara struja, I_2 , čija je aktivna komponenta istog smera kao i *ems*. Pošto se provodnik sa strujom nalazi u magnetskom polju indukcije \vec{B} na njega će delovati elektromagnetska sila:

$$\vec{F} = I_2 (\vec{l} \times \vec{B}),$$

Ova sila obrće rotor u smeru obrtnog magnetskog polja. To se dešava sa svim provodnicima po obimu rotora, a zbir svih proizvoda sile i poluprečnika predstavlja obrtni momenat elektromagnetskih sila motora. Obrtni momenat motora je proporcionalan proizvodu struje rotora, fluksa i ugla između njih, φ_2 :

$$M = k I_2 \Phi \cos \varphi_2$$

Prema tome, kada se stator asinhronne mašine priključi na mrežu, obrtni momenat motora obrće rotor u smeru obrtanja obrtnog polja. Pri tome su struje u rotoru izazvane elektromagnetskom indukcijom. Prenos energije sa statora na rotor vrši se isključivo elektromagnetskom indukcijom, pa ove mašine često nazivamo *indukcionim mašinama*.

Uslov za obrtanje rotora je različita brzina obrtnog magnetskog polja, n_s , i brzine obrtanja rotora, n , odnosno postojanje relativnog kretanja između obrtnog magnetskog polja i rotora, jer jedino tada se pri presecanju provodnika rotora od strane obrtnog magnetskog polja može indukovati *ems* u rotoru, odnosno stvoriti struja u namotaju rotora.

Relativnim klizanjem s , nazivamo veličinu koja je određena sledećim izrazom:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s},$$

čija se vrednost pri naznačenom opterećenju kreće kod motora manjih snaga od 3 do 8%, a kod motora većih snaga od 1 do 3%. Učestanost električnih i magnetskih veličina rotora, f_2 , dobija se kada se primarna učestanost (učestanost mreže) pomnoži sa klizanjem s ($f_2 = s f_1$).

Samo u trenutku puštanja u rad ili kad rotor usled preopterećenja stane (kratki spoj), učestanost u rotoru je jednaka statorskoj učestanosti, odnosno klizanje je jednako jedinici. Označimo indukovanu elektromotornu silu rotora u mirovanju sa E_{20} . Induktivni otpor rotora se menja sa učestanošću:

$$X_{2\sigma,s} = 2\pi f_2 L_{2\sigma} = 2\pi s f_1 L_{2\sigma} = s X_{2\sigma},$$

gde je $X_{2\sigma}$ induktivni otpor rotora u mirovanju.

Za struju u rotoru imamo:

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_{2\sigma,s}^2}} = \frac{s E_{20}}{\sqrt{R_2^2 + (s X_{2\sigma})^2}}.$$

Ako brojilac i imenilac podelimo sa klizanjem s dobijamo sledeći izraz za struju rotora:

$$I_2 = \frac{E_{20}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{2\sigma}^2}}.$$

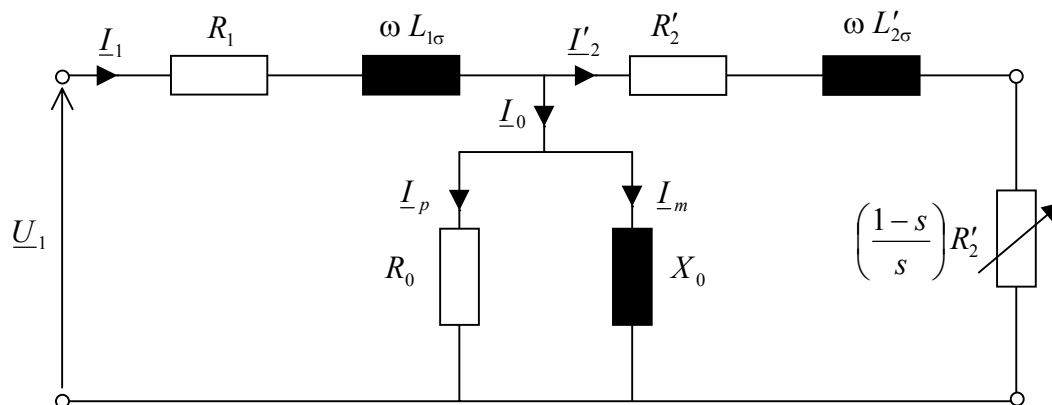
Prikažimo sada ekvivalentnu promeljivu otpornost rotora R_2/s u obliku zbira stvarnog otpora rotorskog namotaja R_2 i fiktivnog otpora R_{2d} :

$$\frac{R_2}{s} = R_2 + R_{2d} = R_2 + R_2 \left(\frac{1-s}{s}\right).$$

1.6 Ekvivalentna šema asinhronne mašine

Pošto je zakočena asinhronna mašina u biti transformator, analogno transformatoru i koristeći prethodne izraze za ekvivalentnu struju i ekvivalentni promenljivi rotorski otpor, imamo sledeću ekvivalentnu šemu (Slika 1-7). Fiktivni otpor R_{2d} je analogan prijemniku impedanse Z_2 koji je priključen na sekundar transformatora.

Analogno transformatoru, sve veličine rotora svedene su na statorsku stranu, što je označeno indeksom crtica.



Slika 1-7 Ekvivalentna šema asinhronne mašine

Pri svođenju se mora voditi računa i o ukupnom navojnom sačiniocu, $k = k_p k_t$, na primer:

$$R'_2 = R_2 \left(\frac{k_1 N_1}{k_2 N_2}\right)^2,$$

gdje su N_1 i N_2 brojevi navojaka statora i rotora, respektivno.

1.7 Bilans aktivne snage

Motor uzima iz mreže aktivnu snagu: $P_1 = q_1 U_{1f} I_{1f} \cos\varphi_1$.

Rad asinhronog mašine je praćen sledećim gubicima (izraženim preko snage gubitaka):

- gubicima u namotajima statora (gubici u bakru statora), $P_{Cu1} = q_1 R_{1f} I_{1f}^2$,
- gubicima zbog magnećenja magnetskog kola statora (gubici u gvožđu statora), $P_{Fe} = q_1 R_0 I_p^2$,
- električnim gubicima u rotoru, P_{el2} , koji sadrže gubitke u bakru namotaja rotora, P_{Cu2} , i eventualno, kod mašina sa namotanim rotorom, gubitke u dodatnim električnim kolima, spojenim na kolo rotora, i
- mehaničkim gubicima usled trenja (frikcije) i ventilacije, P_f .

Snaga obrtnog elektromagnetskog polja, P_{em} , koja se kroz međugvožđe prenosi sa statora na rotor, jednaka je razlici dovedene (utrošene) snage P_1 , koju motor uzima iz mreže i ukupnih gubitaka u statoru, odnosno zbiru ukupne mehaničke snage rotora i električnih gubitaka u rotoru:

$$P_{em} = P_1 - P_{Cu1} - P_{Fe} = P_{meh} + P_{el2} ,$$

gde je P_{meh} ukupna mehanička snaga rotora.

Ukupna mehanička snaga jednaka je razlici dovedene snage P_1 i snage ukupnih gubitaka u gvožđu statora i namotajima statora i rotora, koji su u ekvivalentnoj šemi predstavljeni toplotom koja se razvija na otporima R_0 , R_1 i R_2 . Preostali, fiktivni otpor u ekvivalentnoj šemi $R_{2d} = R_2(1-s)/s$ upravo odgovara ukupnoj mehaničkoj snazi, iz čega sledi da je odnos ukupne mehaničke snage i električnih gubitaka u rotoru:

$$\frac{P_{meh}}{P_{el2}} = \frac{1-s}{s} .$$

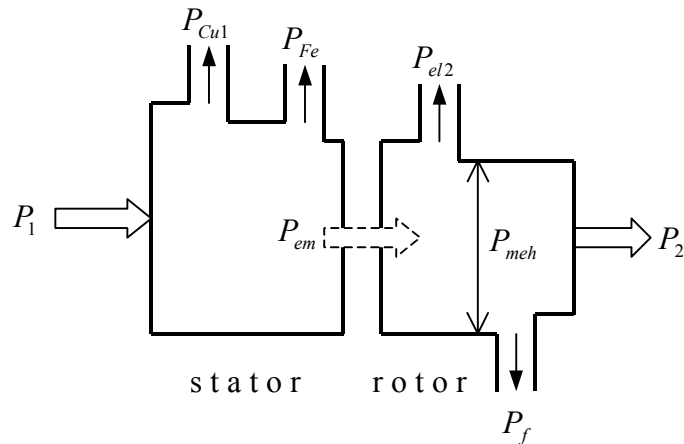
Korisna (mehanička) snaga na vratilu mašine jednaka je razlici ukupne mehaničke snage i mehaničkih gubitaka usled trenja i ventilacije:

$$P_2 = P_{meh} - P_f .$$

Važno je uočiti da, kada se govori o *snazi motora*, podrazumeva se *korisna mehanička snaga na vratilu motora*.

Korisni mehanički momenat se dobija iz jednačine:

$$M_2 = \frac{P_2}{\omega} = \frac{60}{2\pi} \frac{P_2}{n} = 9,55 \frac{P_2}{n} .$$



Slika 1-8 Bilans aktivne snage asinhronog motora

1.8 Karakteristika momenta asinhronog motora

Kod motornih pogona karakteristika opterećenja je gotovo uvek data karakteristikom momenta opterećenja (kočnog momenta) u zavisnosti od brzine obrtanja:

$$M_K = f(n).$$

Za određivanje stacionarne radne je vrlo važno da se i razvijeni momenat motora takođe prikaže u zavisnosti od brzine obrtanja, odnosno klizanja:

$$M = f(n) = g(s).$$

Iz mehanike je poznato:

$$M = \frac{P_{meh}}{\omega}$$

Pošto je $\omega = (1-s)\omega_s$ i $P_{meh} = (1-s)P_{em}$, dobijamo sledeći izraz za momenat asinhronone mašine u zavisnosti od obrtne snage i sinhronne brzine obrtanja magnetskog polja:

$$M = \frac{(1-s)P_{em}}{(1-s)\omega_s} = \frac{P_{em}}{\omega_s}.$$

Kako je $P_{em} = \frac{P_{Cu2}}{s}$ i $P_{Cu2} = q R_2 I_2^2$ dobijamo za momenat trofazne mašine ($q = 3$):

$$M = \frac{3 R_2 I_2^2}{s \omega_s}.$$

U prethodni izraz uvrstimo ranije izvedeni izraz za struju rotora:

$$I_2 = \frac{E_{20}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{2\sigma}^2}}$$

sada dobijamo:

$$M = \frac{3 R_2}{s \omega_s} \frac{E_{20}^2}{\frac{R_2^2}{s^2} + X_{2\sigma}^2} = \frac{3 R_2 E_{20}^2}{\omega_s \left(\frac{R_2^2}{s} + s X_{2\sigma}^2\right)} = 9,55 \frac{3 R_2 E_{20}^2}{n_s \left(\frac{R_2^2}{s} + s X_{2\sigma}^2\right)}$$

U prethodnim razmatranjima zanemarili smo pad napona u statoru i pretpostavili da je indukovani napon u rotoru E_{20} konstantna veličina. Kod normalnih motora pogreška koju tako činimo je zanemariva, a prednosti zbog jednostavnosti su toliko velike da ćemo i u daljnjim razmatranjima zadržati ovo pojednostavljenje.

U osnovi, momenat je srazmeran sa kvadratom razlike napona koji je priključen na stator i aktivnih i reaktivnih padova napona u statorskom namotaju, što je zbog malih padova napona približno srazmerno kvadratu napona koji je priključen na stator.

Pogledajmo prvo koliki je momenat u pojedinim karakterističnim radnim stanjima.

Za *polazni* (potezni, startni) *momenat*, kada je $n=0 \Rightarrow s=1$, imamo sledeći izraz:

$$M_{pol} = 9,55 \frac{3 R_2 E_{20}^2}{n_s (R_2^2 + X_{2\sigma}^2)}$$

Za momenat u *sinhronizmu*, kada je $n=n_s \Rightarrow s=0$, vredi $M_s=0$, što nam potvrđuje fizičku predstavu funkcionisanja asinhronog motora.

Prevalni (prekretni, kritični, maksimalni) *momenat* je maksimalna vrednost momenta koju motor razvija. Maksimalni momenat ćemo imati kada je imenioc u izrazu za momenat minimalan, tj. kada je sledeći izraz minimalan:

$$N(s) = \frac{R_2^2}{s} + s X_{2\sigma}^2$$

Prevalno klizanje s_{pr} dobijamo kada prvi izvod funkcije $N(s)$ izjednačimo sa nulom:

$$\frac{dN(s)}{ds} = -R_2^2 s^{-2} + X_{2\sigma}^2 = 0$$

$$s_{pr} = \pm \frac{R_2}{X_{2\sigma}}$$

gde se pozitivan predznak odnosi na motorski, a negativan na generatorski režim rada.

Ako ovako dobijeni izraz za prevalno klizanje uvrstimo u jednačinu momenta, dobijamo sledeći izraz za prevalni momenat:

$$M_{pr} \cong 9,55 \frac{3 E_{20}^2}{n_s 2 X_{2\sigma}}$$

Važno je uočiti da vrednost prevalnog momenta ne zavisi od radnog otpora rotorskog namotaja R_2 , ali da zato prevalno klizanje, to jest položaj na prevalnog momenta na krivi $M = f(s)$ zavisi od R_2 .

Ako želimo da postignemo veliki prevalni momenat i time veliku preopteretivost motora, moramo da napravimo motor tako, da ima što manje rasipanje, odnosno da ima otvorene žlebove.

Ako podelimo jednačinu za momenat jednačinom za prevalni momenat, dobijamo:

$$\frac{M}{M_{pr}} = \frac{2 X_{2\sigma}}{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{2\sigma}^2} \frac{R_2}{s}$$

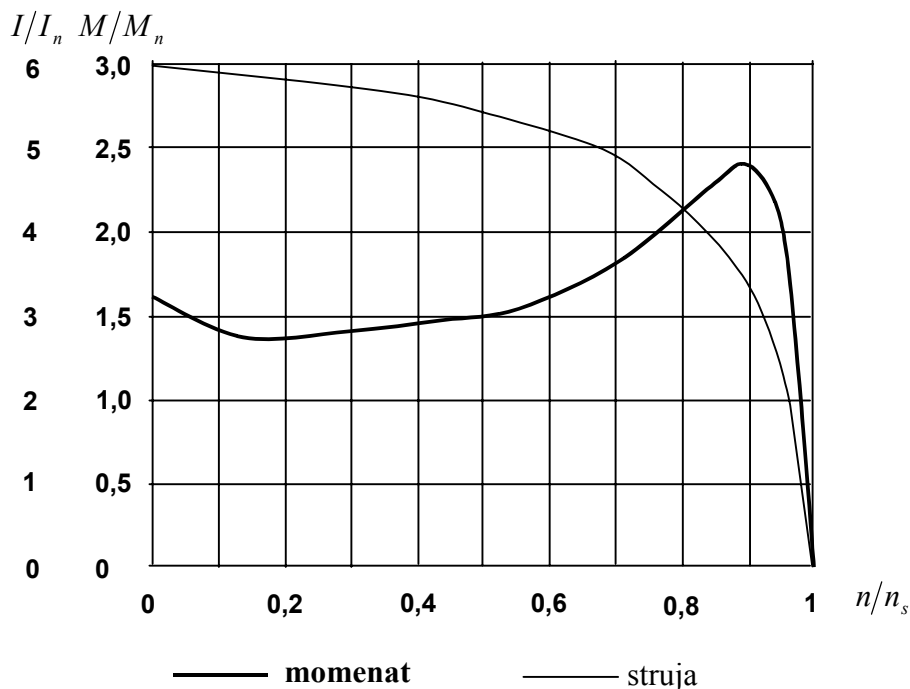
Pomoću jednačine za prevalno klizanje dolazimo do sledećeg oblika ove jednačine:

$$\frac{M}{M_{pr}} \cong \frac{2}{\frac{s}{s_{pr}} + \frac{s_{pr}}{s}}$$

što predstavlja pojednostavljeni oblik poznate *Klosove jednačine*.

Pomoću Klosove jednačine možemo da nacrtamo karakteristiku (graf) asinhronne mašine (spoljnu karakteristiku asinhronog motora).

Za naznačeno klizanje, radi ilustracije, uzećemo 2%, dok ćemo za prevalno klizanje uzeti 10%.



Slika 1-9 Statičke karakteristike momenta i struje statora motora sa kratkospojenim rotorom