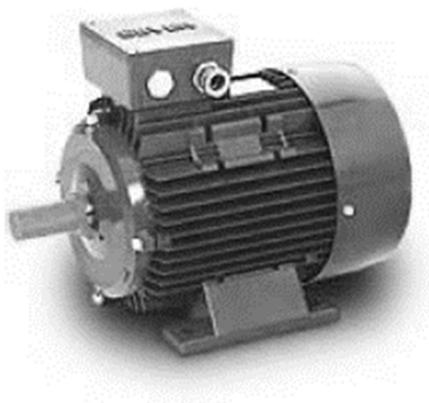


ASINHRONE MAŠINE

➤ ULOGA I ZNAČAJ

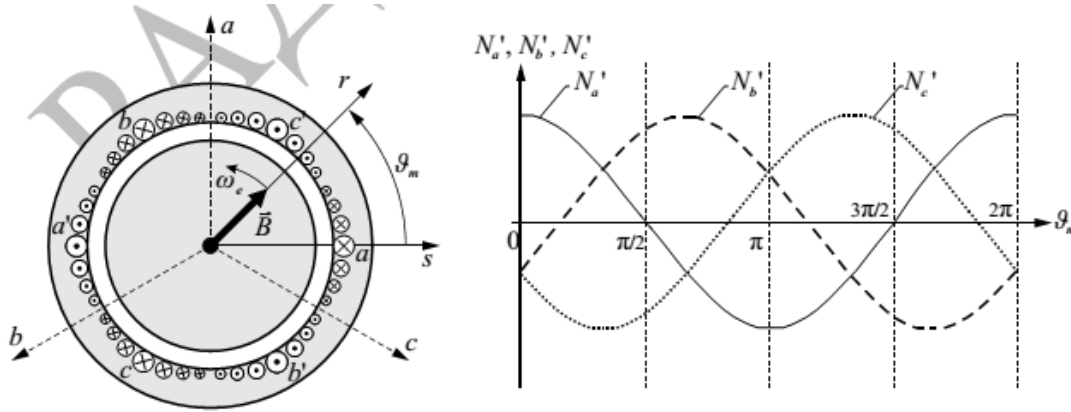
Asinhrona mašina se u primeni najčešće susreće kao motor, i to trofazni. Tipični je predstavnik električne mašine male snage koja se obično pravi u velikim serijama. Prednosti asinhronih mašina, u odnosu na ostale vrste električnih mašina, su prvenstveno manja cena, jednostavnost konstrukcije, manji 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 naizmeničnu struju i time konkurentnost i u području pogona sa promenljivom brzinom.



Izgled trofaznog asinhronog kaveznog motora

➤ OBRTNO POLJE

Obrtno magnetsko polje može se dobiti pomoću trofaznog sistema ($n = 3$) kada se na stator postave tri namotaja čije su magnetne ose jedna u odnosu na drugu pomerene za električni ugao od $2\pi/n = 120^\circ$ i kada se oni priključe na sinusoidne napone koji obrazuju trofazni naizmenični sistem.



Teslino obrtno polje nastalo postojanjem trofaznih struja kroz trofazni sinusno raspodeljeni namotaj i gustina raspodele namotaja

Gustine raspodele namotaja faza a , b i c su redom analitički izražene u funkciji prostorne koordinate ugla rotora ϑ_m :

$$\begin{aligned} N'_a(\vartheta_m) &= N \cdot \cos(\vartheta_m) \\ N'_b(\vartheta_m) &= N \cdot \cos(\vartheta_m - 2\pi/3) \\ N'_c(\vartheta_m) &= N \cdot \cos(\vartheta_m - 4\pi/3) \end{aligned}$$

Kada se kroz namotaje propuste tri trofazne simetrične struje (prostoperiodične struje istih amplituda i učestanosti a koje su fazno pomerene za po $2\pi/n = 120^\circ$):

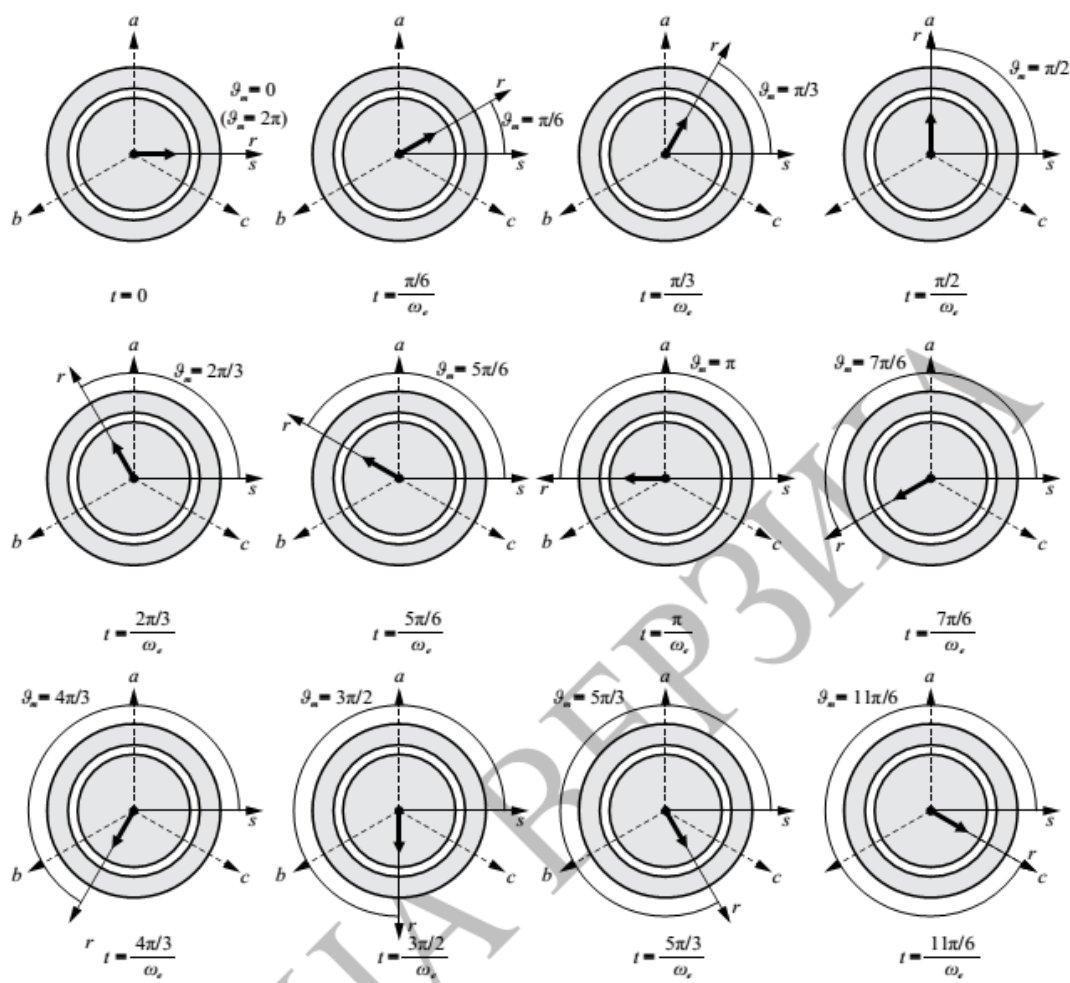
$$\begin{aligned} i_a(t) &= I_m \cdot \sin(\omega_e \cdot t) \\ i_b(t) &= I_m \cdot \sin(\omega_e \cdot t - 2\pi/3) \\ i_c(t) &= I_m \cdot \sin(\omega_e \cdot t - 4\pi/3) \end{aligned}$$

nastaće tri magnetopobudne sile čije su trenutne vrednosti funkcija prostorne koordinate:

$$\begin{aligned} F_a(\vartheta_m, t) &= \int_0^{\vartheta_m} N'_a(\vartheta_m) \cdot i_a(t) \cdot d\vartheta_m = N \cdot \sin(\vartheta_m) \cdot I_m \cdot \sin(\omega_e \cdot t) \\ F_b(\vartheta_m, t) &= \int_0^{\vartheta_m} N'_b(\vartheta_m) \cdot i_b(t) \cdot d\vartheta_m = N \cdot \sin(\vartheta_m - 2\pi/3) \cdot I_m \cdot \sin(\omega_e \cdot t - 2\pi/3) \\ F_c(\vartheta_m, t) &= \int_0^{\vartheta_m} N'_c(\vartheta_m) \cdot i_c(t) \cdot d\vartheta_m = N \cdot \sin(\vartheta_m - 4\pi/3) \cdot I_m \cdot \sin(\omega_e \cdot t - 4\pi/3) \end{aligned}$$

Magnetopobudne sile pojedinih faza $F_a(\vartheta_m, t)$, $F_b(\vartheta_m, t)$ i $F_c(\vartheta_m, t)$ se vektorski sabiraju u mašini a resultantna magnetopobudna sila je obrtne prirode

$$F_r(\vartheta_m, t) = F_a(\vartheta_m, t) + F_b(\vartheta_m, t) + F_c(\vartheta_m, t) = \frac{3}{2} \cdot N \cdot I_m \cdot \cos(\vartheta_m - \omega_e \cdot t)$$



Vektor obrtne magnetopobudne sile u karakterističnim trenucima

➤ PRINCIP RADA

Posmatrajmo asinhronu mašinu sa trofaznim namotajem na statoru i ekvivalentnim trofaznim kratko spojenim namotajem na rotoru. Neka je namotaj statora priključen na sistem naizmeničnih trofaznih napona. U namotaju statora javlja se kontra elektromotorna sila E koja drži ravnotežu priključenom naponu statora U_f i čiji se modul razlikuje od napona za pad napona na omskoj i induktivnoj otpornosti (što iznosi nekoliko procenata i nadalje će se zanemariti).

$$U_f \approx E$$

Kroz namotaj statora protičaće naizmenične trofazne struje koje stvaraju Teslino obrtno polje vektora indukcije $\vec{B}(\vartheta_m, t)$. Magnetski fluks obrtnog vektora \vec{B} kroz ekvivalentnu površinu S opisuje obrtno magnetsko polje i aproksimativno računa na sledeći način:

$$\Psi_s = \frac{E}{\omega_e} = \vec{B} \cdot \vec{S} = F_r(\vartheta_m, t) / \mathcal{R}_m$$

gde je \mathcal{R}_m magnetska otpornost celokupnog puta obrtnog fluksa!

Obrtno polje rotira u zazoru tzv. *sinhronom brzinom*, n_s :

$$n_s = \frac{60 \cdot f_e}{p}$$

gde je $f_e = \omega_e / 2\pi$ učestanost (frekvencija) mreže (50 Hz u zemljama van Sjedinjenih Američkih Država), a p broj pari polova.

Broj pari polova p	Broj magnetskih polova $2p$	Sinhrona brzina n_s [o/min]
1	2	3000
2	4	1500
3	6	1000
4	8	750

Tabela: Sinhrona brzina mašina u zavisnosti od broja pari polova mašine

Pri tome obrtno polje preseca provodnike statora i rotora i u njima indukuje odgovarajuće elektromotorne sile. Pošto je električno kolo rotora zatvoreno (konstrukcija kaveza), usled ove EMS se u provodnicima namotaja rotora dužine aktivne stranice l stvara struja I_r . Pošto se provodnik sa strujom nalazi u magnetskom polju indukcije \vec{B} na njega će delovati elektromagnetska sila:

$$\vec{F} = I_r \cdot (\vec{l} \times \vec{B})$$

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, resultantnog fluksa statora i električnog ugla φ između njih:

$$M_e = k \cdot \Psi_s \cdot I_r \cdot \cos \varphi$$

gde je k konstrukciona konstanta mašine!

Prema tome, kada se stator asinhrona mašine priključi na mrežu, obrtni momenat motora M_e 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 elektromagnetnom indukcijom a ne mehaničkim komutovanjem (koje je praćeno iskrenjem), pa ove mašine često nazivamo indukcionim mašinama.

Uslov za obrtanje rotora je različita brzina obrtnog magnetnog polja, n_s , od brzine obrtanja rotora, n , odnosno postojanje relativnog kretanja između obrtnog

magnetnog 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 I_r . Relativnim klizanjem s , nazivamo procentualnu veličinu koja je određena sledećim izrazom:

$$s[\%] = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100\%$$

čija se vrednost pri naznačenom opterećenju kreće kod motora manjih snaga 3 – 8%, a kod motora većih snaga 1 – 3%.

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, $s = 1$.

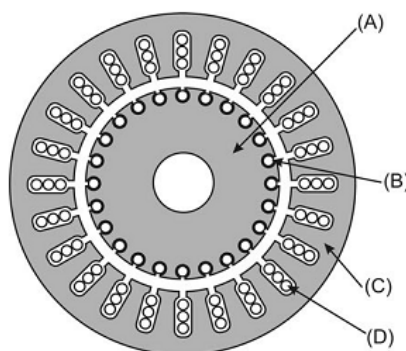
➤ **PODELA AM**

Podela je izvršena prema konstruktivnoj izvedbi rotora na:

- *asinhronne mašine sa kaveznim (kratkospojenim) rotorom;*
- *asinhronne mašine sa namotanim rotorom.*

➤ **ELEMENTI KONSTRUKCIJE KAVEZNE AM**

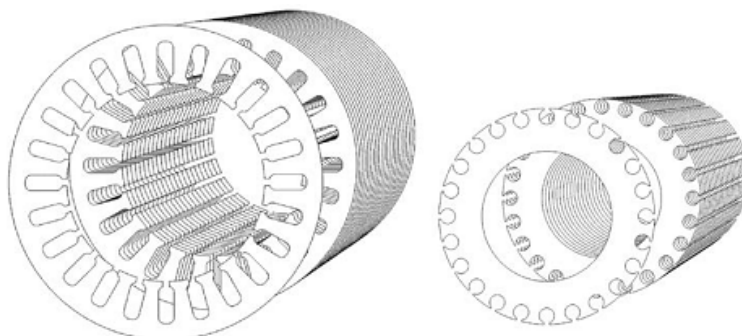
Prvi asinhroni motor patentirao je Nikola Tesla 1888. Motor se sastoji od statora, rotora, i kućišta sa ležajnim štitovima i ventilatorom.



Presek asinhronne mašine: (A) Magnetsko kolo rotora; (B) Električno kolo rotora; (C) Magnetsko kolo statora; (D) Električno kolo statora

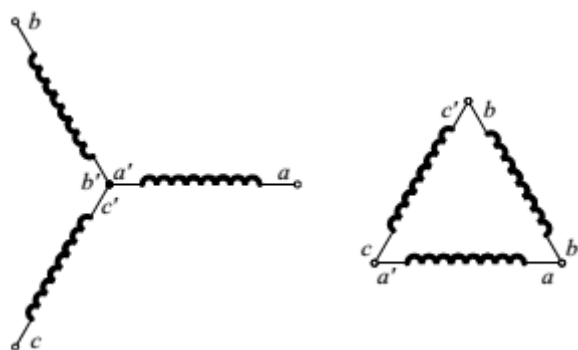
- *Stator:* Namotaj statora je trofazan raspodeljen u žlebove po unutrašnjem obimu statora.
 - *Magnetsko kolo:* Služi kao medijum za magnetsko polje. Izrađuje se od mekih feromagnetnih limova koji su međusobno izolovani radi

smanjenja gubitaka usled obrtnog (dakle promenljivog) magnetskog polja. Magnetsko kolo je cilindrično (žlebovi za smeštaj namotaja se ne smatraju isturenošću).



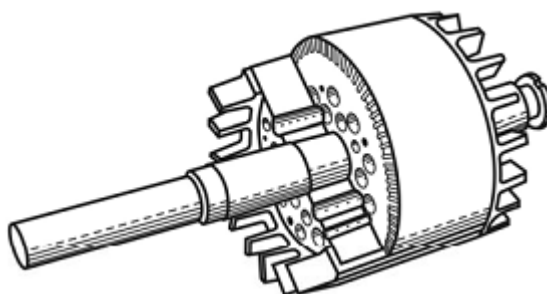
Oblik lamelirane strukture magnetskog kola statora (levo) i rotora (desno) AM

- *Namotaj*: tri odvojena namotaja od bakra, identična po konstrukciji, pomerena u prostoru za trećinu kruga ($2\pi/3$). Formiraju ukupno $3 \times 2 = 6$ krajeva (oznake na slici a, a', b, b', c, c') koji su dovedeni u priključnu kutiju. Njihovim povezivanjem (najčešće u priključnoj kutiji) se ostvaruje sprega zvezda ili trougao.



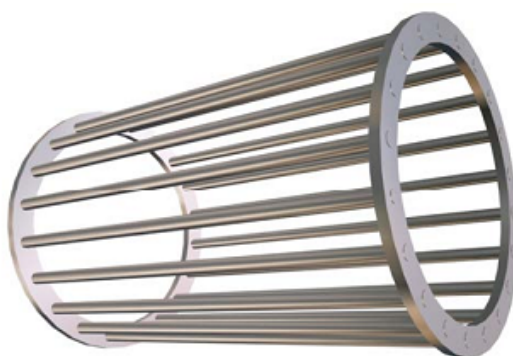
Sprege statorskog namotaja AM: zvezda (levo) i trougao (desno)

- *Rotor*: Namotaj rotora je kavezni!



Izgled rotora kavezne asinhronne mašine

- *Magnetsko kolo*: Važi isto rečeno za magnetsko kolo statora, *vidi sliku gore desno*.
- *Namotaj*: Namotaj rotora podseća na kavez; kod motora manjih i srednjih snaga izliven je od aluminijuma (izrađuje se livenjem pod pritiskom, što znači da nema izolacije), 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 kratko spojeni 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).



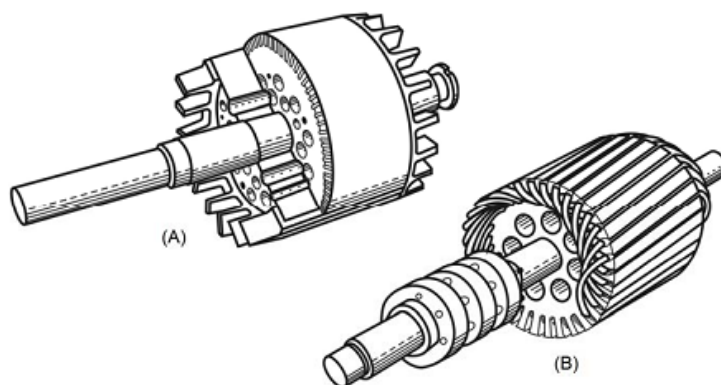
Izgled kaveznog namotaja na rotoru

- *Vratilo*: služi kao mehanički prolaz, materijal čelik:
- *Kućište*: Štiti od spoljnih uticaja, za njega su pričvršćeni ležajni štitovi na koje se oslanja rotor. Omogućava pričvršćivanje za podlogu (pomoću stopa ili prirubnice), nosi priključnu kutiju.

➤ **ALTERNATIVNA KONSTRUKCIJA ROTORA AM – KLIZNOKOLUTNI MOTOR**

Namotaj statora je trofazan, identičan namotaju kavezne asinhronne mašine. Razlika između kaveznih asinhronih mašina i asinhronih mašina sa namotanim rotorom ogleda se u konstrukciji rotora.

Namotaj rotora kliznokolutnih asinhronih mašina je trofazan (motani), kod mašina manjih snaga je spregnut u zvezdu, dok je kod mašina većih snaga, da bi se smanjio napon u stanju mirovanja, spregnut 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 dovodenje i odvođenje električne energije. U svrhu boljeg pokretanja ili regulisanja brzine obrtanja, rotorskom kolu se dodaje odgovarajući trofazni rotorski otpornik. Uloga a s tim 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 (trošenje četkica) 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. Ako služe za regulaciju brzine obrtanja rotora tada se konstruišu spram trajne struje u rotorskom kolu tj. energije koja se na rotorskom otporniku disipira na toplotu.



Izgled namotaja rotora asinhronne mašine: (A) konstrukcija u obliku kaveza; (B) konstrukcija namotanog rotora sa kliznim kolutovima

Asinhronne 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 puštanja u rad, što je naročito važno kod pogona sa teškim uslovima pokretanja kada se zahtevaju veliki polazni momenti.

➤ ENERGETSKI BILANS

Motor uzima iz mreže aktivnu električnu snagu:

$$P_1 = 3 \cdot U_{sf} \cdot I_{sf} \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot U_s \cdot I_s \cdot \cos \varphi$$

gde su sa supskriptom f označene fazne vrednosti napona i struje.

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

- *gubici u trofaznom namotaju statora (gubici u bakru statora):* usled proticanja naizmenične struje (Džulovi gubici u statoru) $P_{Cu1} = 3 \cdot R_s \cdot I_s^2$;
- *gubici u magnetskom kolu statora:* usled postojanja obrtnog magnetskog polja P_{Fe} , efekti histerezisa i vrtložnih struja!
- *gubici u ekvivalentnom trofaznom namotaju rotora (gubici u bakru rotora):* usled proticanja naizmenične struje (Džulovi gubici u rotoru) $P_{el2} = 3 \cdot R_r \cdot I_r^2$;
- *mehanički gubici:* usled trenja (frikcije) o vazduh i ventilacije (strujanja vazduha kojim se odvodi toplota sa mašine kod samoventilirajućih mašina), 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:

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

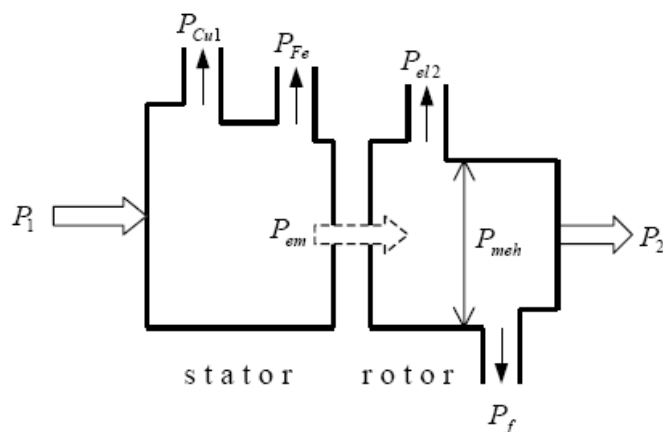
gde je P_{meh} ukupna mehanička snaga na vratilu rotora.

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:

$$M_2 = \frac{P_2}{\omega} = \frac{P_2}{\frac{2\pi \cdot n}{60}} = 9.55 \cdot \frac{P_2}{n}$$

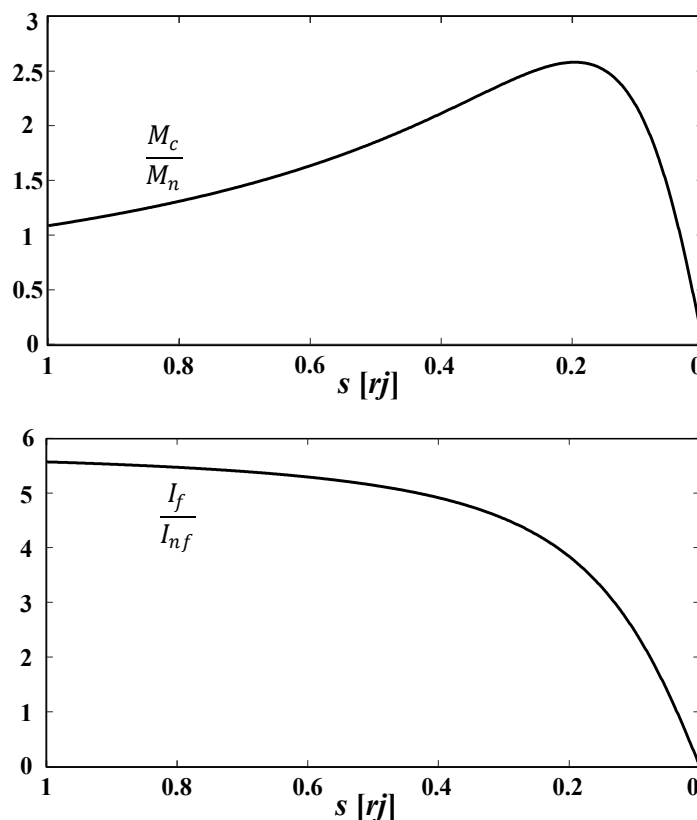


Tok snage kroz asinhroni motor

Prema principu reverzibilnosti električnih mašina, svaka električna mašina može da radi u motorskom i generatorskom režimu bez potrebe za bilo kakvim konstruktivnim promenama na njoj. Prema tome to važi i za asinhronu mašinu. U slučaju da se rotor, gonjen pogonskom mašinom, kreće brže od obrtnog magnetnog polja (tj. brže od sinhronne brzine) indukovaće se takve struje u rotoru da će na rotor delovati kočioni moment. To je u skladu s pomenutim principom rada asinhronne mašine – *rotor teži da postigne sinhronu brzinu jer tada ne vidi promenu magnetnog polja*. Na taj način se mehanička energija pretvara u električnu. Iako se ne može reći da ne postoje, asinhroni generatori su mogu sresti retko. Mana je što značajan deo struje odlazi na stvaranje magnetnog polja - potrošnja reaktivne energije. S druge strane kratkotrajan rad u generatorskom režimu asinhronog motora je uobičajena pojava.

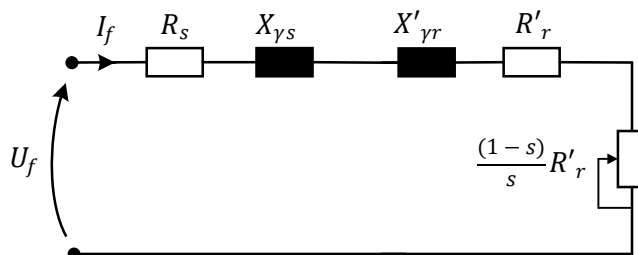
➤ MOMENTNA KARAKTERISTIKA I EKVIVALENTNA ŠEMA AM

Kada se motor optereti više, brzina mu opadne. Sledi zaključak da se sa povećanjem opterećenja klizanje povećava. Na slici ispod je prikazan i najveći momenat koji motor može razviti – prevalni momenat M_p [Nm]. Ako se motor optereti većim momentom od M_p rotor će se postepeno zaustaviti a struje će biti velike i zaštita će isključiti motor.



Momentna karakteristika asinhronne mašine i zavisnost struje od klizanja

Momentna karakteristika AM je izvedena iz uprošćene ekvivalentne električne pofazne šeme, prikazane na slici ispod! Ova ekvivalentna šema zanemaruje poprečnu granu magnećenja AM , a dobijena je iz energetskog bilansa AM pri zanemarenim gubicima gvožđu statora!



Pojednostavljena ekvivalentna pofazna električna šema asinhronne mašine

Napomena: Detaljno objašnjenje ove šeme je dato u literaturi „Zbirka zadataka iz električnih mašina“ za studijski program Mehatronika.

Analitička zavisnost momenta M_e od klizanja s , se dobija polazeći od izraza za obrtni momenat AM :

$$M_e = k \cdot \Psi_s \cdot I_r \cdot \cos \varphi$$

gde važe sledeće relacije:

- $k = 3 \cdot p$

- $\Psi_s = E/\omega_e \approx U_f/\omega_e$
- $I_r = U_f/\sqrt{(R_s + R'_r/s)^2 + (X_{\gamma s} + X'_{\gamma r})^2}$
- $\cos \varphi = (R'_r/s)/\sqrt{(R_s + R'_r/s)^2 + (X_{\gamma s} + X'_{\gamma r})^2}$

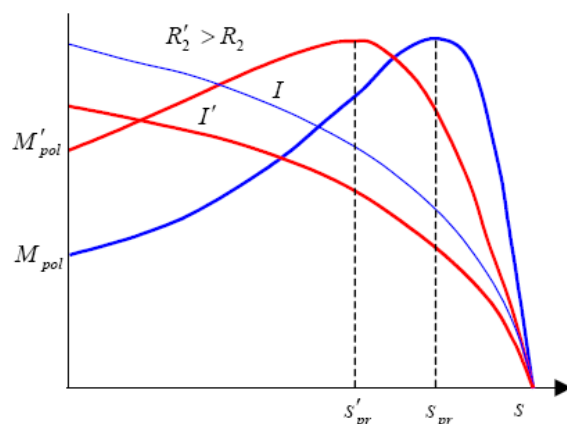
Uvrštavanjem ovih relacija u izraz za rezultatni obrtni momenat AM , uvažavajući pri tom $\omega_e = 2\pi \cdot f_e$, dobija se:

$$M_e = \frac{3 \cdot p \cdot U_f^2}{2 \cdot \pi \cdot f_e} \cdot \frac{\frac{R'_r}{s}}{\left(R_s + \frac{R'_r}{s}\right)^2 + (X_{\gamma s} + X'_{\gamma r})^2}$$

➤ PUŠTANJE U RAD

Puštanje u rad motora je proces koji započinje u trenutku u kojem je rotor u stanju mirovanja, a završava se onda kada se, pri odgovarajućoj brzini obrtanja, izjednače razvijeni momenat motora i otporni momenat radnog mehanizma. Polazne karakteristike određuju vrednosti polazne struje i momenta, sigurnost puštanja u rad, brzina i postepenost prelaska iz stanja mirovanja u stanje jednolikog obrtanja sa naznačenom brzinom kao i ekonomičnost, koja zavisi od cene potrebne opreme i gubitaka za vreme puštanja. Brzina i postepeni prelazak su posebno bitni kod elektromotornih pogona koji moraju da se periodički često pokreću. Vrednost polaznog momenta i struje su osnovna pitanja pri pokretanju (startovanju) asinhronne mašine. U trenutku kada se motor priključuje na mrežu, njegov rotor je mehanički nepokretan, a u električnom smislu je u kratkom spoju (bez obzira na tip asinhronne mašine), a uz maksimalnu indukovanu elektromotornu silu u namotaju rotora (obrotno polje preseca provodnike sinhronom brzinom), to stanje je praćeno pojavom velikih struja. Ove struje mogu izazvati visoka zagrevanja namotaja samog motora kao i velike padove napona napojne mreže što može negativno da utiče na druge prijemnike u mreži. Da bi rotor motora pri puštanju u rad mogao preći u obrtno kretanje, polazni momenat koji razvija motor mora biti veći od otpornog momenta koji na vratilu proizvodi radna mašina koju treba pokrenuti. Asinhronne mašine sa *namotanim rotorom* imaju dobre karakteristike s obzirom na pokretanje. Pomoću dodatnog otpora (*otpornik za puštanje u rad*) priključenog u rotorsko kolo omogućeno je razvijanje velikih polaznih momenata pri

manjim polaznim strujama. Sa povećanjem brzine otpornici se postepeno isključuju, da bi se nakon zaletanja potpuno isključili, a prstenovi kratko spojili.



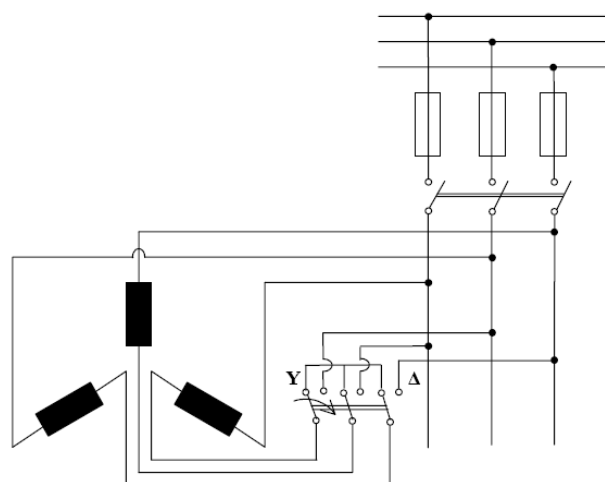
Momentne karakteristike motora sa namotanim rotorom u situaciji promene (dodavanja) rotorske otpornosti

Kod asinhronih mašina sa kratko spojenim rotorom nemamo neposrednu mogućnost uticaja na rotorsko strujno kolo, pa se kod pokretanja koriste sledeće metode:

- *direktno uključivanje u mrežu*: povezano sa manjim ili većim strujnim udarima. U zavisnosti od kvaliteta i snage svoje mreže, elektrodistribucije propisuju najveće snage asinhronih mašina sa kratko spojenim rotorom koje se mogu na ovaj način puštati u rad. Primenjuje se kod motora manjih snaga (do 3 kW).
- *primena dodatnih uređaja koji se priključuju u strujno kolo statora (na red između mreže i priključaka namotaja statora)*: Kod kaveznih elektromotora većih snaga pokretanje može biti problem s obzirom na mrežu. Tako distributeri električne energije postavljaju uslove za tzv. *mekanije* pokretanje, što znači da se ono mora provoditi uz ograničenu struju pokretanja kako bi se smanjio strujni udar prema mreži iz koje se napaja. Uobičajene distributivne mreže imaju snagu nekoliko desetina kW, dok kod snažnih industrijskih mreža snaga prelazi i 100 kW. Ako se pojavi problem pokretanja kaveznih motora velikih snaga, on se u osnovi rešava smanjenjem napona napajanja ili primenom dodatnih uređaja koji se priključuju u strujno kolo statora (na red između mreže i priključaka namotaja statora). Međutim, mora se voditi računa o tome da je polazni momenat srazmeran sa kvadratom veličine priključenog napona, tako da način pokretanja koji podrazumeva smanjenje napona statora dolazi u obzir

kada se ne zahteva veliki polazni momenat u samom početku radnog ciklusa. Uređaji koji se koriste su prigušnice, autotransformator, blok transformatori ili uređaji energetske elektronike.

- *Uključivanje pomoću preklopke zvezda-trougao:* kod motora iznad približno 3 kW. Motor je građen za viši napon, jer je u trajnom radu spregnut u trougao ($U_f = 400\text{ V}$ za spregu u trougao), pa je prema tome skuplji. Dodatno je potrebna i preklapka, prikazana na slici ispod.



Prebacač zvezda – trougao

Pomoću prebacača, namotaj statora se priključi najpre u zvezdu. Polazna linijska struja pri sprezi u zvezdu je tri puta manja od polazne linijske struje pri sprezi u trougao i u tome se sastoji dobra osobina prebacača zvezda – trougao. Međutim, nedostatak ovog načina pokretanja motora u rad je što je momenat u sprezi u zvezdu tri puta manji od momenta koji se ima kada je namotaj spregnut u trougao. Zato se prebacač zvezda – trougao ne može upotrebiti za one uređaje koji pri puštanju u rad zahtevaju veliki polazni momenat kao na primer, dizalice, kranovi, transportne trake...

- *Prigušnice:* Prigušnice se priključuju na red sa namotajem statora i snižavaju primarni napon na vrednost 60–70 % naznačenog napona. Snižavanjem primarnog napona postiže se smanjenje polazne struje uz znatno smanjenje kretnog (polaznog) momenta i ovo predstavlja glavni nedostatak ovakvog načina puštanja u rad. Ovakav način je primenljiv u slučajevima gde se ne zahteva veliki polazni momenat u samom početku

radnog ciklusa. Obično se induktivni otpor prigušnice bira tako da se odnos polazne struje prema nominalnoj kreće u rasponu 2 – 2.5.

- *Autotransformatori*: U odnosu na pokretanje sa prigušnicom, ovde je proces sporiji, jer je tokom zaletanja napon konstantan, dok se kod prigušnice napon povećava, jer se opadanjem struje pokretanja smanjuje pad napona na prigušnici. Prigušnice i autotransformator se nakon pokretanja kratko spajaju.
- *primena specijalne izvedbe rotora i njegovih namotaja*: sastoji se u konstrukciji rotora sa dubokim i dvostrukim žlebovima. Ovakvom konstrukcijom se poboljšavaju polazne karakteristike, jer se postiže povećanje omskog otpora i smanjenje faznog pomeraja između ems i struje prilikom pokretanja. Međutim, ovakva konstrukcija ima za posledicu izvesno pogoršanje radnih karakteristika u odnosu na standardne motore sa kratko spojenim rotorom.

Pri težim uslovima pokretanja normalni kratko spojeni asinhroni motor može da ne razvije dovoljan polazni momenat čak i pri direktnom puštanju sa naznačenim naponom. U takvim slučajevima je potrebno primeniti asinhronu mašine sa namotanim rotorom ili kratko spojeni rotor u specijalnom izvođenju kao dvo kavezni ili sa dubokim žlebovima.

➤ SPECIFIČNA POGONSKA STANJA ASINHRONE MAŠINE

- *Prazan hod asinhronog motora*

Stanje motora u kome mu je vratilo neopterećeno (slobodno) naziva se prazan hod motora. U praznom hodu struja motora iznosi oko 20 – 80 % nazivne struje (ona je procentualno manja kod većih motora), i stoga se, osobito za veće motore, ne može zanemariti. Mali deo ove struje pokriva gubitke u motoru, dok glavnim delom predstavlja struju koja stvara magnetno polje u motoru (tzv. struja magnećenja). Razlog ovako velike struje u praznom hodu (uporediti sa motorima za jednosmernu struju) leži u činjenici da rotor nema svoje napajanje, već se magnetno polje prenosi sa statora kroz vazduh koji je vrlo loš medijum. Kako je magnetno polje u motoru neophodno za rad motora ova komponenta struje postoji uvek, što znači da je asinhroni motor značajan potrošač reaktivne energije, te zahteva kompenzaciju.

- *Kratak spoj asinhronog motora*

Stanje motora u kome je vratilo motora blokirano (onemogućeno mu je obrtanje) naziva se kratak spoj motora. Pri tome se podrazumeva da je motor napojen nominalnim naponom. U kratkom spoju struja motora je jednaka od $4 \cdot I_n - 8 \cdot I_n$, (manja vrednost odgovara motorima veće snage). Struja je limitovana samo impedansom namotaja (nema rotacije, nema kontra elektromotorne sile koja bi uravnotežila veći deo napona statora). Veći deo snage se troši na električne gubitke u namotajima statora i rotora. Naravno, ukoliko ovakvo stanje nastane potrebno ga je što pre ukloniti kako ne bi došlo do oštećenja mašine.

- *Promena smer obrtanja*

Smer obrtanja trofaznog asinhronog motora se na veoma jednostavan način može promeniti zamenom mesta priključaka dveju faza napajanja. Na taj način se menja smer obrtanja obrtnog magnetnog polja, a time i rotora jer on uvek teži da svojim kretanjem "*stigne*" obrtno magnetno polje.

- *Gubitak jedne faze*

Prilikom rada trofaznog asinhronog motora može doći do gubitka napajanja na jednom faznom napojnom provodniku motora – tzv. "*gubitak faze*". Do ove neželjene pojave u praksi često dolazi usled pregorevanja topljivog umetka osigurača. Ako se prekid jedne faze javi u toku rada motora on nastavlja sa obrtanjem uz snažne vibracije i buku, a struje motora se povećavaju, što znači da je ovaj režim nepovoljan. Ako je do navedenog prekida došlo prilikom starta motora (tj. rotor je mirovao), ili se motor usled zahteva pogona zaustavio, on ne može ponovo da krene nakon uključenja kontaktora jer motor tada radi na monofaznom napajanju (teče samo jedna struja kroz namotaje) i stoga više ne postoji obrtno magnetno polje već samo pulsirajuće. U takvoj situaciji javljaju se vrlo velike vrednosti struje pošto rotor miruje. To dovodi do reagovanja zaštite i isključenja motora.

➤ **REGULACIJA BRZINE OBRTANJA**

Veličine pomoću kojih može da se reguliše brzina obrtanja asinhronog motora najlakše se vide iz osnovne jednačine koja opisuje brzinu obrtanja:

$$n = n_s \cdot (1 - s) = \frac{60 \cdot f_e}{p} \cdot (1 - s)$$

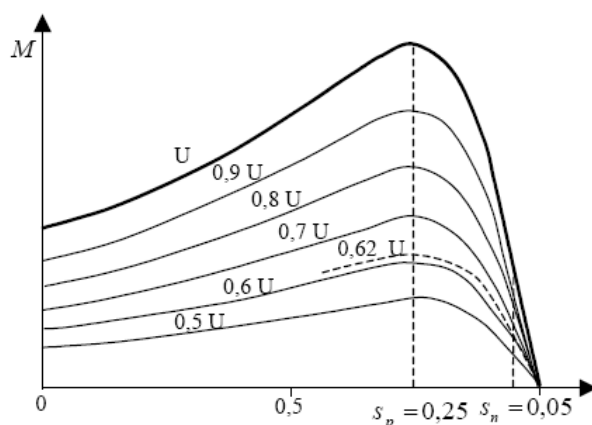
Dakle, regulisanje brzine obrtanja možemo izvršiti:

- *promenom klizanja;*
- *promenom broja pari polova;*
- *promenom frekvencije mreže (izvora).*

Promena klizanja se vrši indirektno, promenom napona napajanja statora kod kaveznih i promenom otpora u kolu rotora za mašine sa namotanim rotorom.

- *promena klizanja kod AM sa kratkospojenim rotorom*

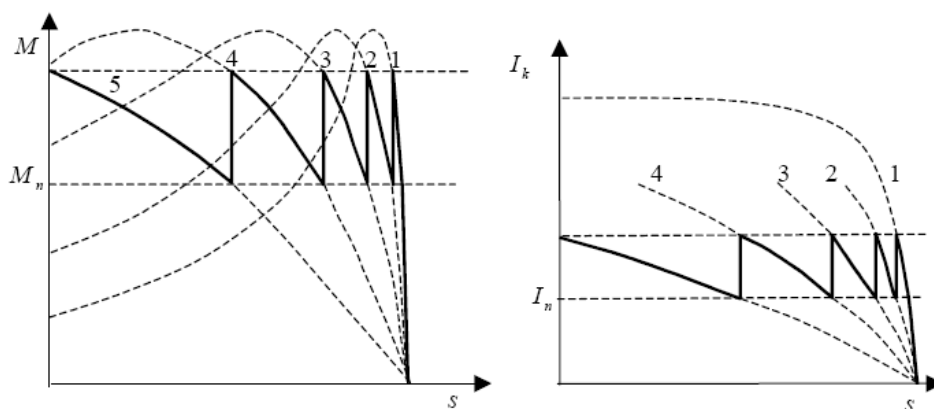
Regulisanje brzine promenom napona napajanja vrši se smanjenjem napona, pomoću regulacionog transformatora ili uređaja energetske elektronike. Prednost ovog načina regulisanja je, pre svega, u proširenju područja radnih brzina, dok su nedostaci usko područje regulacije, 10%, povećani gubici u rotoru, a i stator se više zagreva. Maksimalni momenat se smanjuje, pošto je on srazmeran sa kvadratom napona napajanja. Zato se ovaj način regulacije retko upotrebljava i to samo za elektromotore malih snaga, gde stepen iskorišćenja nije bitan.



Regulisanje brzine promenom napona napajanja statora kavezne AM (ilustracija promene klizanja rotora)

- *promena klizanja kod AM sa namotanim rotorom*

Kod asinhronih mašina sa namotanim rotorom koristi se regulisanje brzine *promenom otpora u kolu rotora*. Uključenjem rotorskog otpornika u strujno kolo rotora povećava se, pri nepromenjenom prevalnom momentu, prevalno klizanje i time smanjuje radna brzina motora, odnosno povećava područje stabilnog rada. Međutim, takva regulacija je vezana s gubicima energije i kao takva ne može biti osnova za trajni pogon, već samo za kratkotrajna prelazna stanja, npr. pokretanje ili zaustavljanje nekog pogona, ali ne velike snage.



Regulisanje brzine dodavanjem otpora u kolo rotora klizno–kolutne AM (ilustracija promene klizanja rotora)

▪ *promena broja pari polova AM*

Regulisanje brzine promenom broja pari polova ne može da obezbedi kontinualnu promenu brzine, već diskretnu, i to dve, najviše tri različite brzine. Realizuje se na dva načina: stavljanjem nekoliko nezavisnih namotaja statora sa različitim brojem pari polova, ili postavljanjem jednog namotaja čiji se odvojci izvode do prebacača. Ovaj način regulisanja može da se primeni samo kod motora sa kratko spojenim rotorom, jer se kratko spojeni rotor prilagođava svakom broju polova namotaja statora. U slučaju namotanog rotora bilo bi neophodno, sa promenom pari polova na statoru, izvršiti istu operaciju na rotorskom namotaju, što usložnjava konstrukciju, a time i cenu izrade takvog namotaja. Dalje, treba imati u vidu da se promenom broja pari polova menjaju i sve karakteristike motora. Promena broja pari polova se može ostvariti na sledeće načine:

- stavljanjem dva ili više (ne više od 3) odvojena (nezavisna) namotaja na statoru, svaki dimenzionisan za drugi broj polova. Uključivanjem jednog statorskog namotaja rotor se vrti brzinom koja je odgovara broju polova tog namotaja. Kada prekopčamo na drugi statorski namotaj rotor se vrti brzinom koja odgovara tom drugom namotaju.
- stavljanjem jednog statorskog namotaja čiji se mnogobrojni odvojci izvode do jednog prebacača pomoću kojeg se namotaj spreže tako da dobijemo drugačiji redosled navojnih delova (različite polaritete). Od ovakvih načina prespajanja, najpoznatija je tzv. *Dalanderova sprega*, jedna od sprega koja omogućuje prespajanje polova (promenu brzina) u odnosu 1:2. Dalanderove sprege su poseban slučaj tzv. polno

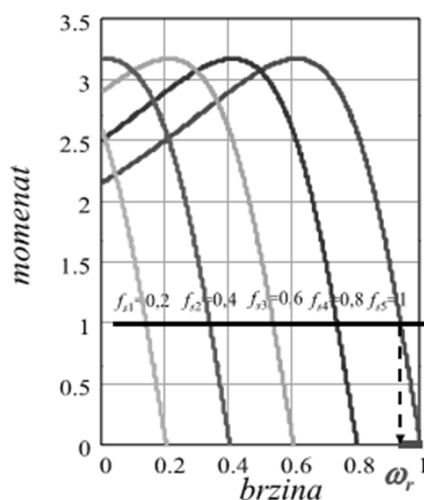
amplitudne modulacije, kod koje se promenom smera struje navojnog dela vrši promena smisla magnetćenja ispod pojedinog pola.

Prednost prvog načina je u tome što se snage i momenti kod pojedinih polariteta mogu nezavisno odrediti, pa se lako prilagođuje raznim pogonskim zahtevima. Nedostatak je i u višoj ceni zbog veće potrošnje bakra i prostora za taj bakar jer su i ostali delovi statora nešto povećani. Moguća je, dakako, i kombinacija prvog i drugog načina kad se želi više brzina (od dve). Najčešće se asinhronne mašine prave za dve brzine, ali se grade i oni s tri ili četiri brzine, posebno u dizaličnoj tehnici, a za teške centrifuge u šećerana mašinsluže čak i 5-brzinski motori.

Iako se brzina obrtanja prespajanjem polova vrlo grubo podešava, ipak je česta u jednostavnijim elektromotornim pogonima, posebno dizaličnim i sličnim, gde se uz njihovu primenu smanjuju dinamički gubici.

▪ *promena frekvencije (učestanosti) napajanja AM*

Regulacija brzine promenom učestanosti je, sa razvojem energetske elektronike, postala najznačajnija, pri čemu se, kako se ne bi promenilo magnetsko zasićenje mašine, često izvodi sa istovremenom promenom napona napajanja (tzv. U/f regulacija, skalarno upravljanje). Prednosti ovog načina regulisanja brzine sadržane su u veoma dobrim tehničkim osobinama: zadržava se vrednost maksimalnog momenta, promena brzine je kontinualna i u širokom opsegu, koristi se standardni motor sa kratkospojenim rotorom. Međutim, potreban je dodatni uređaj za obezbeđenje promenljive učestanosti i napona napajanja (*inverter*).

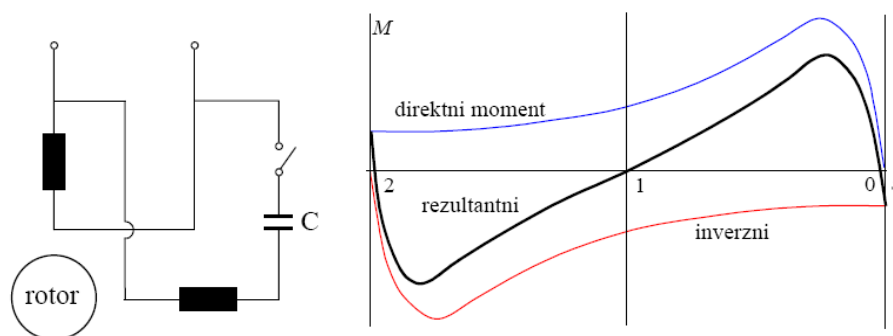


Regulisanje brzine promenom učestanosti napajanja po skalarnom zakonu upravljanja

➤ JEDNOFAZNI ASINHRONI MOTOR

Jednofazni asinhroni motori se primenjuju u jednofaznim mrežama, što je veoma značajno s obzirom na činjenicu da trofazna mreža, pogotovo u udaljenim područjima, ne mora biti na raspolaganju. Izrađuju se za male snage, obično do par kW, jer je to ekonomičnije rešenje u odnosu na izgradnju trofaznih asinhronih motora iste snage. Osnovni nedostaci, u odnosu na trofazne motore, su nedostatak polaznog momenta, manja snaga za isto magnetsko kolo, lošiji faktor snage i promenljiva snaga i momenat. Rad jednofaznog asinhronog motora može se posmatrati i kao specijalni slučaj rada trofaznog asinhronog motora. Naime, jednofazni asinhroni motor je najlakše dobiti iz trofaznog ako bi se napajanje jednog statorskog namotaja prekinulo. Tim prekidanjem preostala dva namotaja bi bila vezana redno i priključena na monofazno napajanje (linijski napon iz trofaznog sistema). Posledica nesimetričnog režima jeste loš stepen iskorišćenja (povećani gubici) i pogoršanje momentnih osobina.

Kod asinhronih motora koji su konstruisani za jednofazni rad, namotaj rotora je kavezni (isti kao kod trofazne mašine). Namotaj statora se sastoji iz dva dela - glavne faze smeštene u $2/3$ ukupnog broja žlebova i pomoćne faze smeštene u preostale $1/3$ žlebova, koja je u odnosu na glavnu fazu prostorno pomerena za 90° . Pošto je za stvaranje obrtnog magnetskog polja, pored prostornog pomeraja, potreban i vremenski pomeraj struja, obično se na red sa pomoćnom fazom priključuje kondenzator. Ovakvi motori se nazivaju kondenzatorski. Pomoćna faza može da bude uključena samo za vreme zaletanja, kada motor radi kao dvofazni, ili trajno, pri čemu se u prvom slučaju primenjuje zaletni kondenzator, dok se u drugom slučaju primenjuje pogonski kondenzator, ili opciono odvojeni pogonski i zaletni kondenzator. Kada rotor postigne određenu brzinu, obično 70 – 80% sinhronne brzine, centrifugalni prekidač isključi namotaj pomoćne faze.



Jednofazni asinhroni motor sa zaletnim kondenzatorom i njegova momenta kka