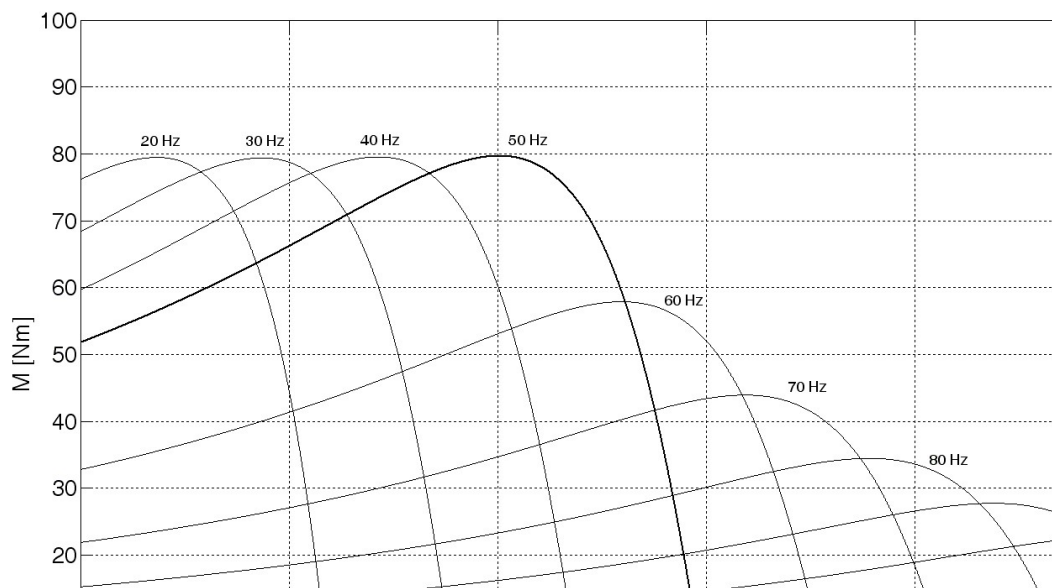


ASINHRONA MAŠINA



GOJKO JOKSIMOVIĆ
(predavanja, skripta)

februar 2015.

SADRŽAJ

UVOD

1. PRINCIP RADA ASINHRONOG MOTORA

2. EKVIVALENTNA ŠEMA

- 2.1. OTVOREN ROTORSKI NAMOTAJ
- 2.2. KRATKOSPOJEN ROTORSKI NAMOTAJ
- 2.3. REŽIM PRAZNOG HODA
- 2.4. REŽIM KRATKOG SPOJA

3. ELEKTROMAGNETSKI MOMENT

- 3.1. KLOSS-OV OBRAZAC

4. ZAVISNOST STRUJE STATORA I ROTORA OD KLIZANJA

5. UPUŠTANJE MOTORA U RAD

- 5.1. UPUŠTANJE MOTORA SA NAMOTANIM ROTOROM
- 5.2. UPUŠTANJE MOTORA SA KAVEZNIM ROTOROM

6. REGULACIJA BRZINE ASINHRONOG MOTORA

7. ASINHRONI GENERATOR

- 7.1. KAVEZNI ASINHRONI GENERATOR
- 7.2. DVOSTRANO NAPAJANI ASINHRONI GENERATOR

8. DOPRINOS ASINHRONOG MOTORA STRUJI KRATKOG SPOJA

9. ANALITIČKI MODEL ASINHRONE MAŠINE

UVOD

Asinhrona mašina je najčešće korišćena električna mašina u praksi. Riječ je o električnoj mašini naizmjenične struje koja se može naći u ulozi motora, generatora a u prelaznim režimima se može naći i u ulozi tzv. elektrodinamičke kočnice. Ipak, ona se najčešće koristi kao motor, kako trofazni tako i monofazni.

U nastavku će biti razmatrana trofazna asinhrona mašina.

Asinhronu mašinu čini cilindrični rotor kao i stator cilindričnog provrta što za posledicu ima uniformni vazdušni procjep duž obima mašine.

Namotaj na statoru je simetrični trofazni namotaj izveden u skladu sa dobro poznatim pravilima koja trebaju biti ispunjena u cilju formiranja obrtnog magnetskog polja. To znači da su tri fazna namotaja duž oboda statora postavljena prostorno pomjerena za po $2\pi/3$ električnih radijana ($2\pi/3p$ mehaničkih radijana). Na njih se dovodi trofazni simetrični sistem napona što za posledicu ima struje u faznim namotajima koje su vremenski (fazno) pomjerene za $2\pi/3$ rad. Kao rezultat prethodnog, duž oboda mašine formira se obrtno magnetsko polje koje rotira sinhronom brzinom, koja, pored broja pari polova, zavisi i od učestanosti napona napajanja:

$$n_s = \frac{60f}{p} \left[\frac{\text{obr}}{\text{min}} \right] \quad \text{ili} \quad \omega_s = \frac{2\pi f}{p} \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right] \quad (1)$$

Tri fazna namotaja statora se sprežu ili u zvijezdu (Y) ili u trougao (D ili Δ), pri čemu su na priključnoj kutiji motora obično izvedeni krajevi (klemne) sva tri fazna namotaja, njih ukupno šest, koji se u samoj priključnoj kutiji prevezuju u zvijezdu ili u trougao.

Kada je riječ o motorima manje snage predviđene za niski napon, najčešća sprega je sprega zvijezda. Međutim, ukoliko se radi o motorima većih snaga koji rade na niskom naponu (400V), tada je u upotrebi sprega trougao – tada je struja kroz fazni namotaj manja za $\sqrt{3}$ od linijske struje.

Sa aspekta konstrukcije namotaja na rotoru (namotaj armature ili samo armatura), razlikuju se dva rešenja.

Jedno od njih je da se u žljebove rotora postavi namotaj sličan onom na statoru: simetričan trofazni namotaj, prostorno raspodijeljen, sa istim brojem pari polova kao i na statoru. Tri kraja faznih namotaja se interno spajaju u jednu tačku čime se dobija sprega zvijezda dok se tri preostala izvoda faznih namotaja izvode na klizne prstenove montirane na osovinu rotora. U normalnom radnom režimu prstenovi na osovinu rotora su kratkospojeni, preko četkica. Prilikom puštanja motora u rad u kolo rotora se preko četkica mogu ubacivati dodatni otpornici. U specijalnom slučaju tzv. dvostranog napajanja mašine, preko opisanih prstenova je u kolo rotora moguće ubacivati napon odgovarajuće efektivne vrijednosti, faznog stava i učestanosti. Asinhrona mašine opisane konstrukcije namotaja rotora poznate su kao mašine sa namotanim rotorom (*wound rotor induction machine*) ili klizno-kolutne asinhrona mašine.

Drugo rešenje je poznato kao kavezni namotaj na rotoru ili kraće, kavezni rotor (*squirrel cage* ili samo *cage rotor induction machine*). Namotaj kaveznog rotora čine provodni štapovi koji su kratkospojeni prstenovima sa čeonih strana rotora posmatranog aksijalno. Ova vrsta namotaja ne omogućava električni pristup u smislu u kom je to moguće kod namotanog rotora – nemaju prstenova, nemaju četkica. Iz tog razloga su motori ovog tipa najrobusnija (rijetki su kvarovi ovog namotaja, nema potrebe za održavanjem itd.) ali i najjeftinija pa samim tim i najčešće korišćena vrsta električnih motora naizmjenične struje.

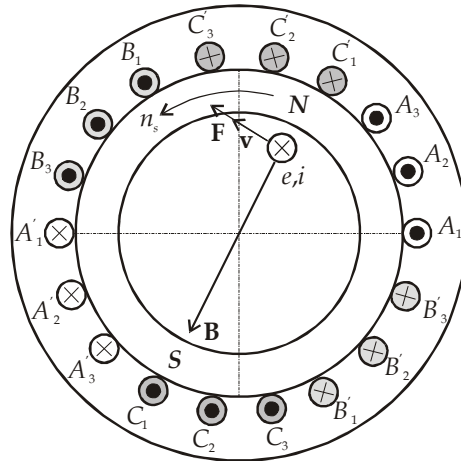
Što se magnetskog kola asinhrona mašine tiče, i stator i rotor se formiraju slaganjem paketa dinamo limova čime se gubici u magnetskom kolu svode na najmanju moguću mjeru.

1. PRINCIP RADA ASINHRONOG MOTORA

Princip rada asinhronog motora je naoko prost ali istovremeno i genijalan.

Priključenjem namotaja statora na trofazni sistem naizmjeničih napona, kroz prostorno pomjerene fazne namotaje protekne vremenski promjenljiva struja. Time se u mašini formira obrtno

magnetsko polje koje rotira sinhronom brzinom. Broj pari polova tog magnetskog polja a samim tim i brzinu obrtanja obrtnog magnetskog polja, određuje način na koji je namotaj statora izveden. Obrtno magnetsko polje je na slici 1. prikazano kao dvopolno. U jednom trenutku je položaj magnetskih polova kao na slici, tako da je vektor magnetske indukcije \mathbf{B} usmjeren od sjevernog ka južnom magnetskom polu, kroz rotor, kroz oba vazдушna procjepa i nazad kroz magnetsko kolo statora.



Slika 1. Smjer indukovane ems, aktivne komponente struje i magnetske sile na jedan štap rotora

U nepokretnim provodnicima na rotoru, obrtno magnetsko polje indukuje ems. U jednom provodniku (štapu) rotora, obrtni talas magnetske indukcije indukuje ems prema poznatoj zakonitosti:

$$e = - \int_l (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} \quad (2)$$

Intenzitet indukovane ems (2) se u obrtnim električnim mašinama, kod kojih su vektori brzine i magnetske indukcije normalni jedan na drugi a njihov vektorski proizvod je usmjeren duž ose mašine, svodi na prost izraz:

$$e = Blv \quad (3)$$

Treba obratiti pažnju na sledeće: smjer indukovane ems određen vektorskim proizvodom,

$$\vec{v} \times \vec{B} \quad (4)$$

je ispravan onda kada se provodnik kreće brzinom v u nepokretnom magnetskom polju indukcije B . Međutim, ovdje je slučaj inverzan: ne kreće se provodnik u polju već se polje kreće u odnosu na nepokretni provodnik pa je smjer indukovane ems suprotan smjeru kog određuje prethodni vektorski proizvod - iz tog razloga se u izrazu (2) javlja znak minus.

Indukovana ems u provodniku uzrokuje tok struje jer je taj provodnik u kratkom spoju sa svim ostalim provodnicima na rotoru (nису prikazani slikom). Aktivna komponenta te struje je u fazi sa indukovanom ems - istog su smjera. Na provodnik sa strujom u magnetskom polju djeluje sila,

$$\mathbf{F} = I \int_l d\vec{l} \times \vec{B} \quad (5)$$

intenziteta,

$$F = BII \quad (6)$$

a smjera takvog da provodnik sa strujom teži da zarotira u smjeru obrtanja obrtnog magnetskog polja, slika 1.

Sila djeluje na svaki od provodnika ili štapova rotora što za rezultat ima elektromagnetski moment koji dovodi do rotacije rotora.

Rotor asinhronog motora se na opisani način zalijeće i u ustaljenom režimu rotira brzinom koja je nešto manja od sinhronne brzine.

Rotor asinhronog motora ne može rotirati sinhronom brzinom jer bi u tom slučaju brzina rotora i brzina obrtnog magnetskog polja bile iste: tim se ne bi više imala indukovana ems u namotajima rotora, samim tim ni struja a samim tim ni elektromagnetski momenat.

U ustaljenom stanju, pri konstantnom otpornom momentu na vratilu asinhronog motora, brzina rotora je konstantna i uvijek za par procenata manja od sinhronne brzine.

Otuda i ime ovom motoru: asinhroni motor, mada se u stranoj literaturi često sreće i naziv indukcionim motor ili indukciona mašina.

Bitan parametar kojim se opisuje radni režim asinhronne mašine jeste klizanje s (*slip*). Klizanje je bezdimenzioni parametar koji se definiše kao odnos razlike brzine obrtanja obrtnog magnetskog polja i brzine rotora, i sinhronne brzine:

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (7)$$

U slučaju nepokretnog rotora, $n_r=0$, klizanje je maksimalno i jednako jedinici (100%). U slučaju rotacije rotora sinhronom brzinom, $n_r=n_s$, što je moguće postići samo korišćenjem pomoćne mašine, klizanje je jednako nuli. U normalnom radnom režimu, nominalno opterećenog motora, klizanje iznosi par procenata.

Primjer 1. Na slici p.1.1. je data nazivna pločica (*nameplate*) asinhronog motora sa njegovim nominalnim podacima. Komentarisati te podatke i izvući iz njih dodatne informacije o motoru.

SIEMENS		3~Mot.		1LG0183-2AA70-	
LMH		/		Q/321081KYA04-	
IP55	180M	IMB3	165kg	BRG DE 6211 C3	BRG NDE 6211 C
50HZ		380/660V		Δ/Y	60HZ 440V Δ
22kW		41.3/23.8A			24.5kW 39.7A
EFF.91.2%		COS φ 0.89	2940r/min	EFF.90%	COS φ 0.90
360-400/630-690V Δ/Y				420-460V Δ	
39 1.43 5/22 7-24 8A				39 0.41 6A	

Slika p1.1.

Iz podataka sa pločice se može zaključiti sledeće:

a) Motor može raditi i na električnoj mreži učestanosti 50Hz i na mreži učestanosti 60Hz, pri različitim naponima pri čemu razvija različite snage na svojoj osovine i rotira različitim brzinama. O napajanju motora različitim učestanostima biće riječi kasnije. U nastavku će se analizirati podaci o radu motora na 50Hz;

b) Nominalna snaga motora je 22kW pri nominalnoj brzini 2940 obr/min ($r/min = revolution/min$). Ovaj podatak govori o izlaznoj, korisnoj snazi - mehaničkoj snazi na vratilu motora. Električna snaga koju on pri tom uzima iz mreže je nešto veća i određena je koeficijentom

korisnog dejstva ili stepenom iskorišćenja. Sa pločice se vidi da je stepen iskorišćenja $\eta=91.2\%$ (EFF=Efficiency);

c) Iz podatka o nominalnoj snazi i brzini dolazi se do nominalnog momenta na osovini motora: snaga je proizvod brzine i momenta, pa je nominalni momenat,

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_r} = \frac{P_n}{n_r \cdot \frac{2\pi}{60}} = \frac{60P_n}{2\pi n_r} = 9.55 \frac{P_n}{n_r}$$

$$M_n = 9.55 \frac{P_n}{n_r} = 9.55 \frac{22000}{2940} = 71.46 Nm$$

pri čemu treba voditi računa o jedinicama: obr/min nije jedinica SI sistema već je to rad/s.

d) Kako je nominalna brzina motora 2940 obr/min, jasno je da se radi o dvopolnom motoru - motoru sa jednim parom polova, $p=1$, jer je brzina od 2940 obr/min nešto ispod sinhronne brzine od 3000 obr/min koja se za 50Hz dobija za $p=1$:

$$n_s = \frac{60f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{1} = 3000 \frac{obr}{min}$$

Za slučaj napajanja motora naponom učestanosti 60Hz nominalna brzina motora je 3540 obr/min a sinhrona brzina je 3600 obr/min.

e) Nominalno klizanje motora je,

$$s_n = \frac{n_s - n_n}{n_s} = \frac{3000 - 2940}{3000} = 0.02$$

ili 2% dok je u slučaju napajanja motora naponima učestanosti 60Hz,

$$s_n = \frac{3600 - 3540}{3600} = 0.016$$

ili 1.6%.

f) Motor može raditi na mreži linijskog napona 380V ili 660V. Odnos između ove dvije vrijednosti je korijen iz tri. U prvom slučaju, namotaji statora moraju biti spregnuti u trougao dok u drugom slučaju njihova sprega mora da bude zvijezda. U obje sprege, napon na faznom namotaju statora mora biti isti, niži napon od 380V;

g) Linijska struja koju motor vuče iz mreže u slučaju linijskog napona 380V (sprega trougao) je,

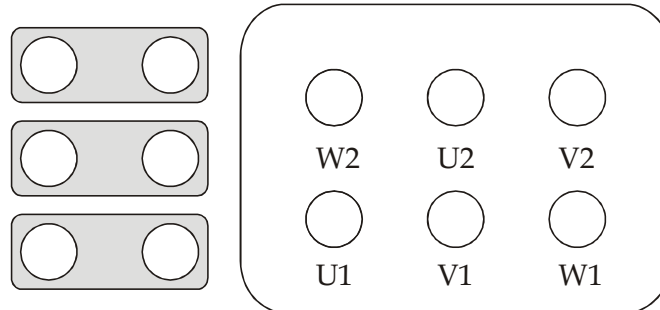
$$I_{Ln} = \frac{P_{el}}{\sqrt{3}U_l \cos \varphi} = \frac{P_{mech}}{\sqrt{3}U_l \eta \cos \varphi} = \frac{22000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0.912 \cdot 0.89} = 41.2 A$$

dok je u slučaju mreže linijskog napona 660V (sprega zvijezda), ta struja za korijen iz tri puta manja (jer je napon za korijen iz tri veći pa je snaga ista):

$$I_{Ln} = I_{Fn} = \frac{P_{el}}{\sqrt{3}U_l \cos \varphi} = \frac{P_{mech}}{\sqrt{3}U_l \eta \cos \varphi} = \frac{22000}{\sqrt{3} \cdot 660 \cdot 0.912 \cdot 0.89} = 23.7 A$$

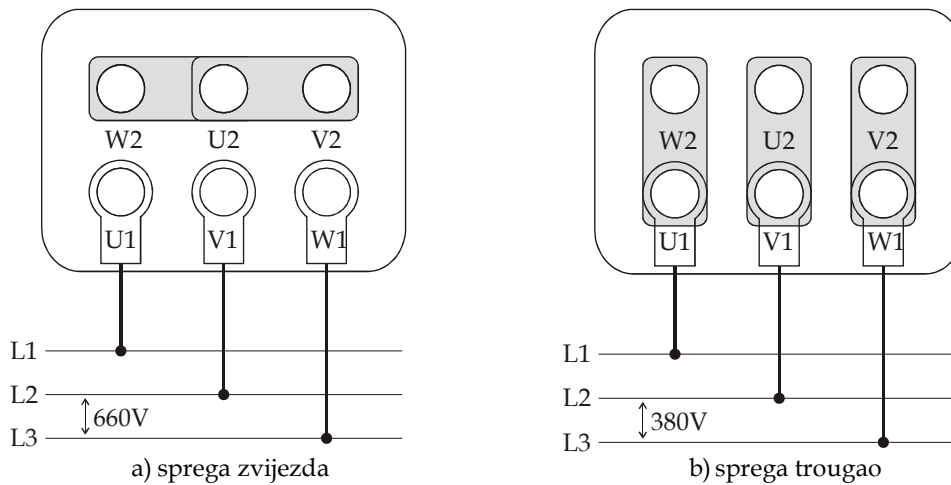
Ona je u zadnjem slučaju istovremeno i fazna struja kroz namotaje statora. Izračunate struje su u skladu sa onim koje su već date na natpisnoj pločici motora. U prethodnim relacijama se javlja i stepen iskorišćenja i faktor snage koji se kao bitan podatak uvijek daje na natpisnoj pločici motora za slučaj nominalnog opterećenja. Sa date pločice se očitava $\cos\varphi=0.89$ pri čemu se posebno ne naglašava karakter faktora snage jer je on kod asinhronog motora uvijek induktivan.

Prespajanje namotaja statora motora u spregu zvijezda ili trougao vrši se u priključnoj kutiji motora. Počeci i krajevi sva tri fazna namotaja statora, ukupno šest izvoda, izvedeni su u priključnu kutiju motora na način prikazan slikom p1.2. Pri tom se sa U_1 i U_2 označava početak i kraj namotaja faze U , slično i za faze V i W . U priključnoj kutiji su i tri bakarne pločice prikazane slikom p1.2.



Slika p1.2. Prednji izgled priključne kutije i bakarne pločice za prespajanje izvoda

Slika p1.3. i p1.4. prikazuju način montiranja bakarnih pločica u cilju ostvarivanja dvije različite spregu (na slici p1.3. su upotrijebljene samo dvije od tri pločice).



Slika p1.3.



Slika p1.4. Sprega trofaznog namotaja statora u trougao

2. EKVIVALENTNA ŠEMA

U nastavku će biti analiziran trofazni asinhroni motor sa namotanim rotorom. Zaključci do kojih će se doći važe i za motor sa kaveznom rotorom.

2.1. OTVOREN ROTORSKI NAMOTAJ

Neka su namotaji rotora otvoreni.

Dovođenjem napona na namotaje statora u mašini se formira obrtno magnetsko polje. Obrtno magnetsko polje indukuje u namotajima statora ems samoindukcije, koja drži ravnotežu primijenjenom naponu. Efektivna vrijednost ove ems po jednoj fazi data je dobro poznatim izrazom,

$$E_1 = 4.44 f_1 N_{1eff} \Phi \quad (8)$$

koji se od izraza za slučaj transformatora u tome što u zadnjem izrazu učestvuje efektivni broj navojaka faznog namotaja statora – stvarni broj redno vezanih navojaka po fazi množen pojasnim i tetivnim navojnim sačinioem, jer je, za razliku od transformatora, namotaj statora prostorno distribuiran po obodu mašine a najčešće je izveden i sa skraćenim navojnim korakom. U izrazu (8) Φ je fluks po polu.

Obrtni magnetski fluks se obuhvata i sa namotajima rotora, tako da u njima indukuje ems međusobne indukcije. U simetričnoj trofaznoj mašini ove ems su iste efektivne vrijednosti, fazno pomjerene za po 120° . Kako je namotaj rotora otvoren, rotor ostaje nepokretan (ukočen). Efektivna vrijednost indukovane, fazne ems međusobne indukcije:

$$E_2 = 4.44 f_1 N_{2eff} \Phi = U_2 \quad (9)$$

Odnos ove dvije fazne ems je prenosni odnos, sličan onom u slučaju transformatora (N_1 i N_2 predstavljaju broj redno vezanih navojaka faznog namotaja statora i rotora):

$$n_{12} = \frac{N_{1eff}}{N_{2eff}} = \frac{k_{1p} k_{1t} N_1}{k_{2p} k_{2t} N_2} = \frac{k_1 N_1}{k_2 N_2} \quad (10)$$

Razmatrani slučaj otvorenog namotaja rotora je veoma sličan radnom režimu transformatora u praznom hodu. Osnovne razlike u odnosu na transformator su:

a) u magnetskom kolu transformatora je postojalo vremenski promjenljivo tzv. pulsaciono magnetsko polje dok je kod asinhronog motora to obrtno magnetsko polje, koje je funkcija i vremena i prostorne, ugaone koordinate;

b) magnetsko kolo transformatora je bez vazdušnog procjeka dok je kod asinhronne mašine postojanje vazdušnog procjeka uslov rotacije rotora. Kao posledica postojanja vazdušnog procjeka, za magnećenje magnetskog kola mašine potrebna je značajno veća struja (struja magnećenja) u odnosu na transformator. Kako bi se struja magnećenja svela na što je moguće manju mjeru, jer se na taj način poboljšava faktor snage motora, uvijek se nastoji da širina vazdušnog procjeka bude što je moguće manja, diktirana uglavnom mehaničkim razlozima. Zavisnost širine vazdušnog procjeka od snage mašine, koja radi na 50Hz, data je sledećim empirijskim izrazom,

$$\delta[mm] = \begin{cases} 0.2 + 0.01 \cdot P[W]^{0.4}, & \text{za } p = 1 \\ 0.18 + 0.006 \cdot P[W]^{0.4}, & \text{za } p > 1 \end{cases} \quad (11)$$

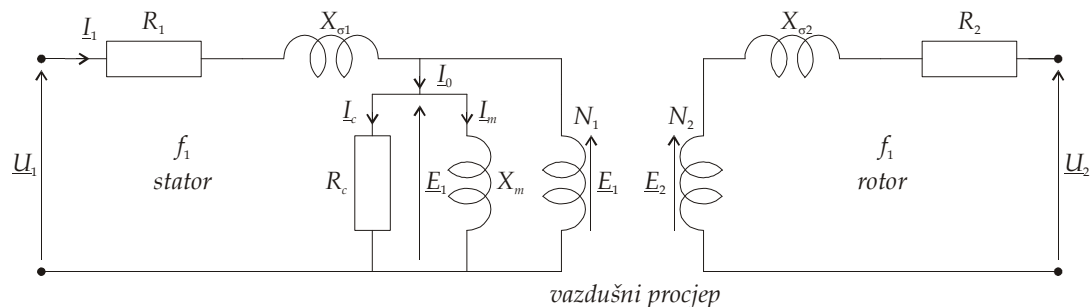
pri čemu je tehnički ostvariv minimum vrijednost od oko 0.2mm, [1].

c) namotaji transformatora su koncentrični, motani oko stuba magnetskog jezgra dok su namotaji asinhronne mašine distribuirani u prostoru i pri tom najčešće izvedeni sa skraćenim navojnim korakom.

Iz razloga sličnosti sa transformatorom u režimu praznog hoda, ekvivalentna šema asinhronog motora u analiziranom režimu rada se može opisati identičnom ekvivalentnom šemom koja važi i za transformator u režimu praznog hoda, slika 2.

Treba uočiti da, kako je rotor nepokretan, obrtno magnetsko polje i preko namotaja statora i preko namotaja rotora prelazi istom brzinom, tako da su indukovane ems i u namotajima statora i u namotajima rotora iste, mrežne učestanosti f_1 .

Ekvivalentna šema sa slike 2. prikazuje odnose u jednoj fazi asinhronog motora. Napon na ulazu motora, napon statora U_1 je fazni napon a struja I_1 je fazna struja. Situacija u ostalim dvijema fazama je identična: struje, naponi i ems su istih efektivnih vrijednosti ali fazno pomjerene za $\pm 120^\circ$.



Slika 2. Ekvivalentno kolo jedne faze asinhronog motora sa otvorenim namotajima rotora

2.2. KRATKOSPOJEN ROTORSKI NAMOTAJ

Kada su namotaji rotora kratkospojeni, što jeste normalno stanje za asinhroni motor, indukovana ems u namotajima rotora dovodi do toka struje a samim tim i do pojave elektromagnetskog momenta koji dovodi do zalijetanja rotora.

Osnovna razlika u odnosu na prethodno analizirano stanje jeste u činjenici da se indukovana ems međusobne indukcije, u namotajima rotora mijenja i po veličini (efektivnoj vrijednosti) i po

učestanosti, jer pri rotaciji rotora, obrtno magnetsko polje preko namotaja rotora prelazi brzinom koja je razlika sinhronne brzine i brzine rotacije rotora,

$$E_{2-f_2} = 4.44 f_2 N_{2eff} \Phi \quad (12)$$

gdje je učestanost rotorskih električnih veličina:

$$f_2 = s f_1 \quad (13)$$

Dakle,

$$E_{2-f_2} = 4.44 f_2 N_{2eff} \Phi = 4.44 s f_1 N_{2eff} \Phi = s E_2 \quad (14)$$

gdje je E_2 ems indukovana u namotajima ukočenog rotora, (9). Kako je učestanost indukovane ems a samim tim i struje u kolu rotirajućeg rotora $f_2 = s f_1$, to se i rasipna reaktansa u kolu rotora mijenja po veličini u odnosu na stanje ukočenog rotora:

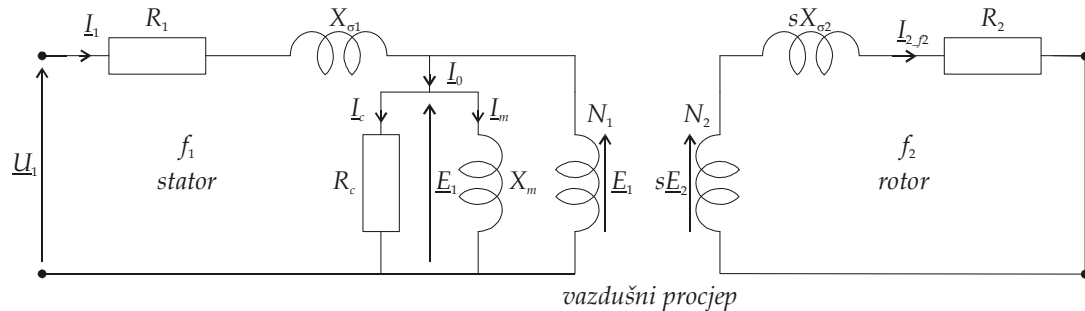
$$X_{\sigma 2-f_2} = \omega L_{\sigma 2} = 2\pi f_2 L_{\sigma 2} = 2\pi s f_1 L_{\sigma 2} = s X_{\sigma 2} \quad (15)$$

Efektivna vrijednost struje faznog namotaja rotora je,

$$I_{2-f_2} = \frac{E_{2-f_2}}{\sqrt{R_2^2 + X_{\sigma 2-f_2}^2}} = \frac{s E_2}{\sqrt{R_2^2 + (s X_{\sigma 2})^2}} \quad (16)$$

i učestanosti je f_2 .

Stanje u ovom radnom režimu prikazuje ekvivalentno kolo sa slike 3.

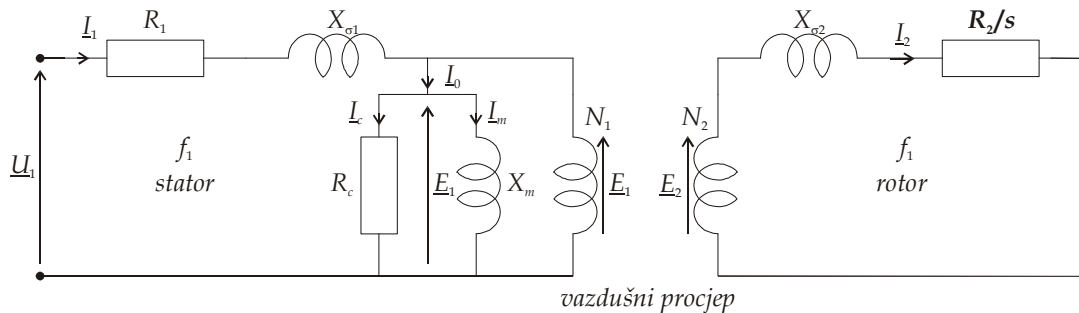


Slika 3. Ekvivalentno kolo jedne faze asinhronog motora sa kratkospojenim namotajima rotora

Dijeljenjem brojioca i imenioca desne strane izraza (16) klizanjem s , za faznu struju rotora se dobija,

$$I_2 = \frac{s E_2}{\sqrt{R_2^2 + (s X_{\sigma 2})^2}} = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{\sigma 2}^2}} \quad (17)$$

čime se efektivna vrijednost struje nije promijenila ali je izvršena frekventna transformacija: sada sa desne strane izraza (17) figurišu samo veličine ukočenog rotora, učestanosti f_1 !!! Sa druge strane, primjenom opisane transformacije, otpornost faznog namotaja rotora se virtuelno mijenja sa učestanošću tj. klizanjem. Opisanu situaciju prikazuje ekvivalentna šema sa slike 4.

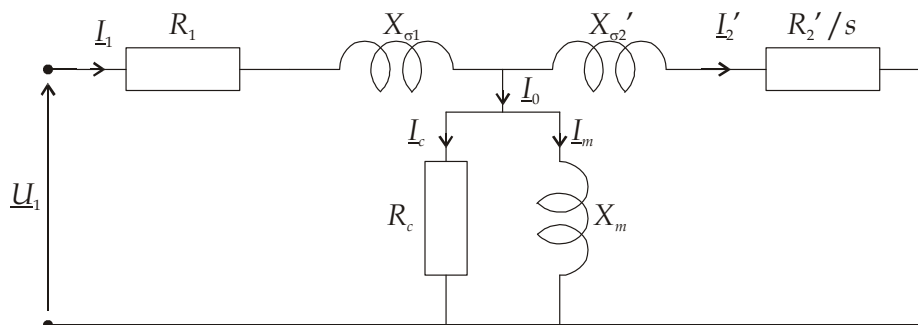


Slika 4. Ekvivalentno kolo jedne faze asinhronog motora sa kratkospojenim namotajima rotora nakon „frekventne transformacije“

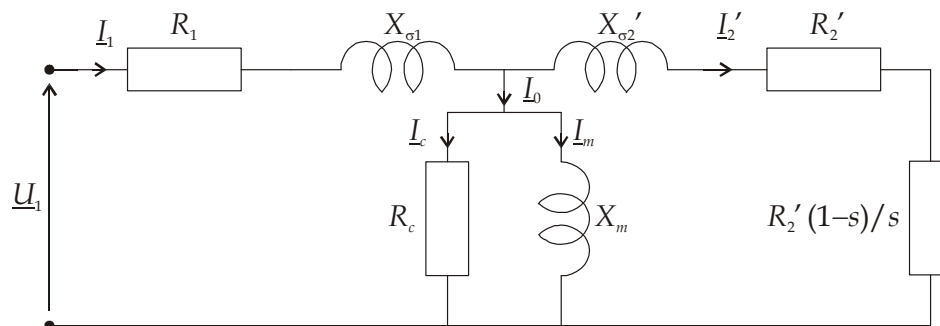
Kako su sada sve električne veličine i sa strane statora i sa strane rotora, iste, mrežne učestanosti f_1 , moguće je sekundarnu stranu (rotor) svesti na stranu primara, statora, na identičan način kao kod transformatora, korišćenjem prenosnog odnosa (10) čime se dobija ekvivalentna šema sa slike 5. Razlažući član R_2'/s na sledeći način,

$$\frac{R_2'}{s} = R_2' + \frac{1-s}{s} R_2' \quad (18)$$

dolazi se i do ekvivalentne šeme sa slike 6.



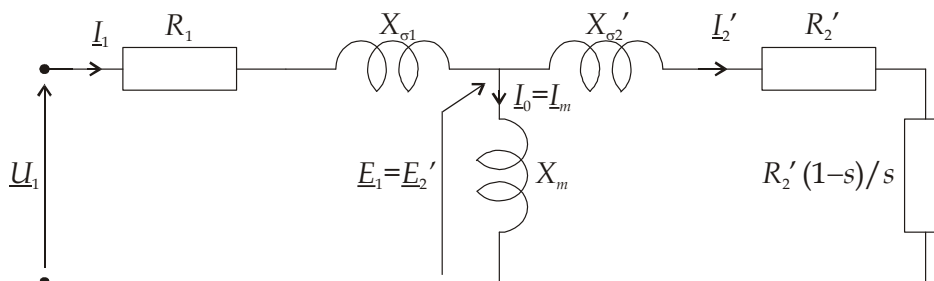
Slika 5. Ekvivalentno kolo jedne faze asinhronog motora svedeno na primarnu stranu



Slika 6. Ekvivalentno kolo jedne faze asinhronog motora svedeno na primarnu stranu sa razloženom otpornošću u kolu rotora

Osnovna razlika ekvivalentne šeme sa slike 6. u odnosu na ekvivalentnu šemu transformatora je u tome što je sekundarni namotaj kratkospojen i što se u njemu nalazi jedan dodatni član koji nije postojao kod transformatora, zavisen od klizanja, $R_2'(1-s)/s$.

Prethodna ekvivalentna šema se dodatno pojednostavljuje zanemarivanjem otočne grane koja modelira gubitke u gvožđu, kako preporučuje odgovarajući IEEE standard. Ti gubici, stalni pri stalnom naponu statora, se prema ovom standardu dodaju gubicima usled trenja i ventilacije pri izračunavanju stepena iskorišćenja mašine.



Slika 7. IEEE preporučeno ekvivalentno kolo jedne faze asinhronog motora

Parametri prezentiranih ekvivalentnih šema se jednostavno određuju iz standardnih eksperimenata na već gotovoj mašini: ogleda praznog hoda i ogleda kratkog spoja. Naravno, u toku procesa projektovanja mašine, ovi parametri se određuju računski. Primjera radi, reaktansa magnećenja se može računski odrediti iz već odranije poznatog izraza:

$$X_m = \frac{6\mu_0 f N_{eff}^2 D l}{p^2 \delta} [\Omega] \quad (19)$$

Ono što je interesantno primijetiti u prethodnom izrazu jeste inverzna zavisnost reaktanse magnećenja od kvadrata broja pari polova mašine i širine vazdušnog procjepa. Kako je uvijek cilj imati mašinu sa što je moguće boljim faktorom snage i stepenom iskorišćenja, kako je to ranije diskutovano, potrebno je imati što je moguće manju vrijednost struje praznog hoda koja je bliska po vrijednosti struji magnećenja. To znači da je poželjno imati što je moguće veću reaktansu magnećenja.

Kod mašina sa većim brojem pari polova, iz (19) je jasno da reaktansa magnećenja naglo pada a tim raste struja magnećenja i pada vrijednost faktora snage mašine. Iz tog razloga najčešći u proizvodnji i upotrebi su asinhroni motori sa $p=1$ i $p=2$ para polova. Naravno da postoje i motori sa većim brojem pari polova ali su oni slabijih karakteristika u skladu sa rečenim (prije svega se misli na faktor snage). Iz istog izraza je jasno zašto je poželjno imati što je moguće manju širinu vazdušnog procjepa.

Kao ilustracija, u Tabeli I su dati podaci o četiri asinhrona motora iste snage ali različitog broja pari polova.

Tabela I: Osnovni podaci o Brook Crompton motorima različitog broja pari polova

P_n (kW)	p	n_n (obr/ min)	M_n (Nm)	U_n (V)	I_n (A)	η_n	$\cos\phi_n$
11	1	2926	35.9	400	19.8	0.892	0.9
11	2	1450	72.4	400	21.1	0.884	0.85
11	3	965	109	400	23.5	0.876	0.77
11	4	716	147	400	24	0.869	0.76

Iz tabele se vidi da sa porastom broja pari polova, tj. smanjenjem sinhronne brzine, stepen iskorišćenja i faktor snage opadaju, pri čemu je to posebno izraženo za faktor snage.

Tabela II prikazuje, za iste motore, kako se faktor snage mijenja u zavisnosti od opterećenja motora. Slabo opterećen motor, što je najčešće posledica neadekvatnog izbora motora karakteristikama opterećenja na njegovoj osovini, ima manji faktor snage u odnosu na nominalno opterećenje.

Tabela II: Promjena faktora snage u funkciji opterećenja motora: podaci dati za nominalno opterećenje, tri četvrtine i jednu polovinu nominalnog opterećenja

P_n (kW)	p	$\cos\phi_n$	$\cos\phi_{0.75}$	$\cos\phi_{0.5}$
11	1	0.9	0.87	0.81
11	2	0.85	0.81	0.72

11	3	0.77	0.73	0.64
11	4	0.76	0.71	0.59

2.3. REŽIM PRAZNOG HODA

Pod *idealnim praznim hodom* asinhronog motora smatra se onaj radni režim u kome je struja rotora jednaka nuli. To je slučaj koji odgovara klizanju koje je jednako nuli, $s=0$: rotor rotira sinhronom brzinom, nema presijecanja magnetskog fluksa sa provodnicima rotora pa u njima nema indukovane ems a tim i struje. To se vidi i iz ekvivalentne šeme, slika 5: pri klizanju $s=0$ rotorska grana je prekinuta – otpornik zavisao od klizanja R_2'/s ima beskonačno veliku vrijednost. Tada je i struja statora minimalna i jednaka struji praznog hoda. Ovaj slučaj, slučaj kada rotor rotira sinhronom brzinom, moguće je ostvariti samo korišćenjem pomoćne mašine koja će rotor rotirati sinhronom brzinom.

Realni režim praznog hoda je režim kada je na stator doveden nominalni napon a rotor se okreće slobodno, neopterećen: vratilo motora ne pokreće radnu mašinu. U tom radnom režimu rotor se okreće brzinom koja je skoro jednaka sinhronoj brzini ali ipak nešto manja od nje, čime je klizanje približno jednako nuli,

$$n_r \cong n_s \Rightarrow s \cong 0$$

čime je i struja rotora približno jednaka nuli (rotor i obrtno magnetsko polje su skoro nepokretni jedno u odnosu na drugo).

Iz ovog ogleada moguće je na osnovu mjerenja primarnog napona, primarne struje i snage koju motor uzima iz mreže u ovom radnom režimu, odrediti parametre otočne grane ekvivalentne šeme. Snaga koju motor vuče iz električne mreže u ovom radnom režimu se troši na savladavanje otpornih momenata usled trenja u ležajevima motora, ventilacije, gubitaka u gvožđu statora i gubitaka u bakru statora. Gubici u gvožđu i bakru rotora su u ovom radnom režimu zanemarivo mali.

2.4. REŽIM KRATKOG SPOJA

Režim kratkog spoja je onaj radni režim asinhronog motora u kom je struja u kratkospojenim namotajima rotora maksimalna. Kako je tada i reakcija armature (namotaja rotora) maksimalna, jasno je da će motor u tom radnom režimu vući i maksimalnu struju iz mreže, sa strane statora. Jasno je da je to režim u kom je rotor nepokretan, tačnije ukočen, kada je brzina obrtnog magnetskog polja u odnosu na rotor maksimalna, pa je tim maksimalno klizanjem, indukovana ems i struja:

$$n_r = 0 \Rightarrow s = 1$$

Ovaj ogled se izvodi pri smanjenom naponu na statoru i mehanički ukočenom rotoru. Napon na statoru se postepeno podiže do one vrijednosti kojoj odgovara nominalna struja statora. Taj napon je značajno niži od nominalnog napona statora. To znači da je i indukovana ems prilično mala, tako da se u zamjenskoj šemi otočna grana može zanemariti. Sa druge strane, član R_2'/s u ovom radnom režimu postaje jednak R_2' . Iz ovog ogleada se određuju rasipne reaktanse namotaja statora i rotora kao i fazna vrijednost otpornosti namotaja rotora svedena na stator.

Primjer 2. Na trofaznom asinhronom motoru nominalnih podataka 4kW, 220/380V, DY, 15/8.6A, $\cos\varphi=0.83$, 1435 obr/min, izveden je ogled praznog hoda i kratkog spoja pri čemu su mjereni linijski napon, linijska struja i ukupna, trofazna snaga, koju mašina uzima iz mreže:

PH: 380V, 4.25A, 330W

KS: 73V, 8.6A, 576W

Pored toga, izmjerena je otpornost faznog namotaja statora koja iznosi $R_1=1.2\Omega$. Odrediti ostale parametre ekvivalentne šeme ovog motora.

Rešenje:

Kako je u ogledu praznog hoda na namotaje statora je dovođen nominalni linijski napon od 380V, to znači da je namotaj statora spregnut u zvijezdu.

Iz ogleda kratkog spoja određuje se impedansa redne grane po fazi:

$$Z_{ks} = \frac{U_{ks}}{I_{ks}} = \frac{73/\sqrt{3}}{8.6} = 4.9\Omega$$

Aktivna otpornost redne grane se određuje iz podatka o snazi u ogledu KS,

$$R_{ks} = R_1 + R_2' = \frac{P_{ks_fazno}}{I_{ks}^2} = \frac{P_{ks3}/3}{I_{ks}^2} = \frac{576/3}{8.6^2} = \frac{192}{74} = 2.6\Omega$$

tako da je:

$$R_2' = 2.6\Omega - R_1 = 2.6\Omega - 1.2\Omega = 1.4\Omega$$

Iz impedanse i aktivne otpornosti redne grane određuje se i reaktansa KS,

$$X_{ks} = X_{\sigma 1} + X_{\sigma 2}' = \sqrt{Z_{ks}^2 - R_{ks}^2} = \sqrt{4.9^2 - 2.6^2} = 4.15\Omega$$

pa je, uz ustaljenu pretpostavku o ravnopravnom učešću rasipnih reaktansi u reaktansi KS:

$$X_{\sigma 1} = X_{\sigma 2}' = 0.5X_{ks} = 2.075\Omega$$

Iako za ovaj proračun nije potreban, može se doći i do podatka o faktoru snage u režimu kratkog spoja:

$$\cos \varphi_{ks} = \frac{P_{ks}}{\sqrt{3}U_l I_l} = \frac{576}{\sqrt{3} \cdot 73 \cdot 8.6} = 0.53 \Rightarrow \varphi_{ks} = 58^\circ$$

Struja koja je izmjerena u režimu praznog hoda od 4.25A je fazna a to je istovremeno i linijska struja u sprezi zvijezda. Znajući već impedansu primarnog namotaja, ulazni napon, struju i snagu mogu se, redom odrediti, faktor snage u praznom hodu, koji je jako nizak,

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3}U_l I_l} = \frac{330}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 4.25} = 0.118 \Rightarrow \varphi_0 = 83.22^\circ$$

ems indukovana u faznom namotaju statora,

$$\underline{E}_1 = \underline{U}_f - (R_1 + jX_{\sigma 1})\underline{I}_1 = 220 - (1.2 + j2.075) \cdot 4.25 \angle -83.22^\circ$$

$$\underline{E}_1 = 210.64 + j4.02$$

$$E_1 = 210.68V$$

otpornost R_c kojom se modeliraju gubici u gvožđu,

$$R_c = \frac{E_1^2}{P_{0_fuzno}} = \frac{210.68^2}{330/3} = \frac{210.68^2}{110} = 403.5\Omega$$

struja kroz ovaj otpornik,

$$I_c = \frac{E_1}{R_c} = \frac{210.68}{403.5} = 0.522A$$

struja kroz reaktansu magnećenja,

$$I_m = \sqrt{I_0^2 - I_c^2} = \sqrt{4.25^2 - 0.522^2} = 4.218A$$

pa konačno i sama reaktansa magnećenja,

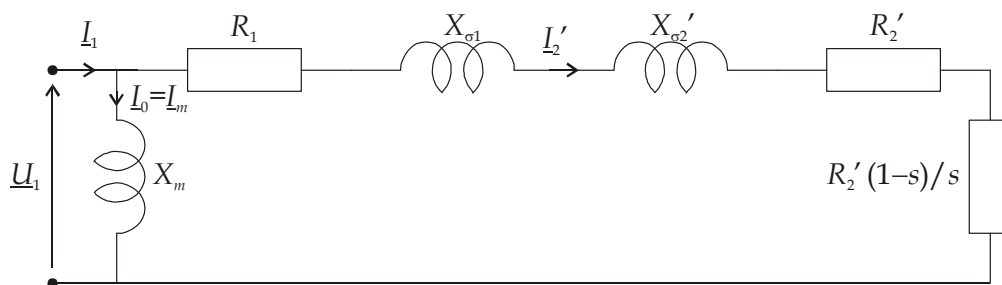
$$X_m = \frac{E_1}{I_m} = \frac{210.68}{4.218} = 50\Omega$$

Traženi parametri su:

$$R_1 = 1.2\Omega \quad R_2' = 1.4\Omega \quad R_c = 403.5\Omega \quad X_{\sigma 1} = 2.075\Omega \quad X_{\sigma 2}' = 2.075\Omega \quad X_m = 50\Omega$$

Treba obratiti pažnju na vrijednost struje praznog hoda u ovom primjeru. Ona iznosi 4.25A dok je nominalna struja 8.6A. Očigledno je struja praznog hoda konkretnog motora 50% nominalne struje što je značajno više u odnosu na transformatore gdje je taj odnos svega par procenata. Razlog tome je postojanje vazdušnog procjepa kod asinhronne mašine. Kod savremenih asinhronih motora taj odnos nije tako velik ali svakako iznosi od 20 do 50% procenata nominalne struje, u zavisnosti od broja pari polova♣

Ekvivalentna šema sa slike 7. se može još pojednostaviti na jedan od sledeća dva načina: u slučaju malih struja magnećenja, otočna grana se može izmjestiti tako da bude na primarnom naponu, slika 8. Ukoliko je struja magnećenja velika, tada se ne može zanemariti pad napona na primarnoj impedansi tako da u tom slučaju ekvivalentna šema sa slike 8. daje rezultate koji dosta odstupaju od tačnih.



Slika 8. Aproximativna zamjenska šema validna u slučaju malih vrijednosti struje magnećenja
 Druga mogućnost jeste da se ekvivalentno kolo sa slike 7. zamijeni ekvivalentnim naponskim generatorom, Teveninovim generatorom, u odnosu na kolo rotora kao opterećenje. Uklanjajući rotorsko kolo sa slike 7, Teveninov napon se dobija iz naponskog djelitelja kog čini reaktansa magnećenja i primarna impedansa,

$$\underline{U}_T = \frac{jX_m}{R_1 + jX_{\sigma 1} + jX_m} \underline{U}_1 \cong \frac{jX_m}{jX_{\sigma 1} + jX_m} \underline{U}_1 = \frac{X_m}{X_{\sigma 1} + X_m} \underline{U}_1 = K_T \underline{U}_1 \quad (20)$$

dok je ekvivalentna impedansa, posmatrana sa strane uklonjenog rotorskog kola, nakon kratkog spajanja ulaznog naponskog izvora:

$$\underline{Z}_T = jX_m \parallel (R_1 + jX_{\sigma 1}) = \frac{jX_m(R_1 + jX_{\sigma 1})}{R_1 + jX_{\sigma 1} + jX_m} = \frac{jX_m R_1 - X_{\sigma 1} X_m}{R_1 + j(X_{\sigma 1} + X_m)} = \frac{(jX_m R_1 - X_{\sigma 1} X_m)(R_1 - j(X_{\sigma 1} + X_m))}{R_1^2 + (X_{\sigma 1} + X_m)^2} \quad (21)$$

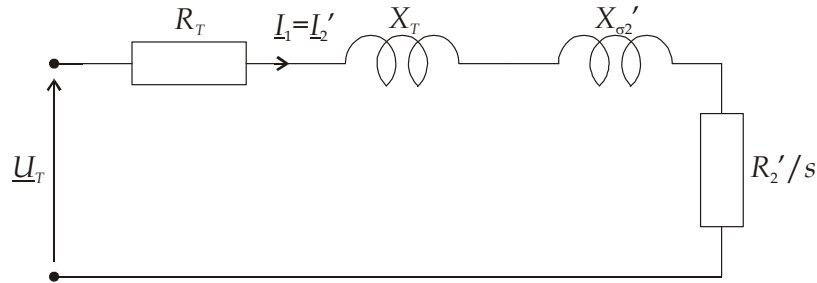
$$\underline{Z}_T = \frac{X_m R_1 (X_{\sigma 1} + X_m) - R_1 X_{\sigma 1} X_m}{R_1^2 + (X_{\sigma 1} + X_m)^2} + j \frac{X_m R_1^2 + X_{\sigma 1} X_m (X_{\sigma 1} + X_m)}{R_1^2 + (X_{\sigma 1} + X_m)^2} \quad (22)$$

$$\underline{Z}_T = \frac{R_1 X_m^2}{R_1^2 + (X_{\sigma 1} + X_m)^2} + j \frac{X_m R_1^2 + X_{\sigma 1}^2 X_m + X_{\sigma 1} X_m^2}{R_1^2 + (X_{\sigma 1} + X_m)^2} \quad (23)$$

Zanemarivanjem kvadrata člana R_1 gornji izraz se aproksimira sledećim,

$$\underline{Z}_T \cong \left(\frac{X_m}{X_{\sigma 1} + X_m} \right)^2 R_1 + j \frac{X_m}{X_{\sigma 1} + X_m} X_{\sigma 1} = K_T^2 R_1 + jK_T X_{\sigma 1} \quad (24)$$

čime se dolazi do ekvivalentne šeme sa slike 9,



Slika 9. Aproksimativna zamjenska šema zasnovana na Teveninovom generatoru

u kojoj su:

$$K_T = \frac{X_m}{X_{\sigma 1} + X_m} \quad (25)$$

$$U_T = K_T U_1 \quad (26)$$

$$R_T = K_T^2 R_1 \quad (27)$$

$$X_T = K_T X_{\sigma 1} \quad (28)$$

Treba uočiti da se prethodnom transformacijom izgubio podatak o grani magnećenja čime se za struju statora u režimu praznog hoda ($s=0$) dobija nulta vrijednost, što ne odgovara realnosti. Iz IEEE preporučene ekvivalentne šeme struja statora u ovom slučaju ima minimalnu vrijednost i poznata je kao struja praznog hoda, koja iznosi:

$$I_1 = I_0 = \frac{U_1}{\sqrt{R_1^2 + (X_{\sigma 1} + X_m)^2}} \approx \frac{U_1}{X_m} \quad (29)$$

3. ELEKTROMAGNETSKI MOMENT

Ulazna snaga u asinhroni motor je električna snaga:

$$P_d = 3U_f I_f \cos \varphi = \sqrt{3} U_1 I_1 \cos \varphi \quad (30)$$

Jedan dio ove snage se troši na Džulove gubitke u namotajima statora a jedan dio na gubitke u gvožđu statora. Ostatak je poznat kao snaga obrtnog magnetskog polja, obrtna snaga ili snaga u vazдушnom procjepu (*air gap power*):

$$P_{obr} = \sqrt{3} U_1 I_1 \cos \varphi - 3R_1 I_1^2 - 3 \frac{E_1^2}{R_c} \quad (31)$$

Snaga gubitaka u gvožđu rotora se, usled male učestanosti magnećenja magnetskog kola rotora ($f_2 = s f_1$) zanemaruje.

Snaga obrtnog magnetskog polja se dalje prenosi u rotor gdje se, nakon oduzimanja Džulovih gubitaka u namotajima rotora prenosi na osovinu kao mehanička snaga. Sa druge strane, posmatrajući ekvivalentnu šemu, ova snaga se troši na gubitke u otpornostima u kolu rotora, R_2' i $R_2'(1-s)/s$:

$$P_{obr} = P_{Cu2} + P_{meh} = 3R_2' I_2^2 + 3R_2' \frac{1-s}{s} I_2^2 \quad (32)$$

Iz gornje jednakosti se vidi da se mehanička snaga na osovini rotora u zamjenskoj šemi asinhronog motora modelira Džulovim gubicima u otpornosti $R_2'(1-s)/s$ (!!!):

$$P_{meh} = 3R_2' \frac{1-s}{s} I_2^2 \quad (33)$$

Korisna snaga na osovini je manja od ove razvijene snage za snagu gubitaka usled frikcije (trenja u kotrljajućim ležajevima motora) i ventilacije (na rotoru je redovno montiran ventilator za hlađenje motora). U brzim, prostim računicama i analizama, ovi gubici se često zanemaruju.

Iz (32) se dolazi i do veze između snage obrtnog magnetskog polja i gubitaka u rotoru,

$$P_{obr} = \frac{P_{Cu2}}{s} \quad (34)$$

i sledećeg odnosa,

$$\boxed{P_{obr} : P_{Cu2} : P_{meh} = 1 : s : 1-s} \quad (35)$$

Mehanička snaga na osovini je proizvod elektromagnetskog momenta i brzine obrtanja rotora,

$$P_{meh} = 3R_2' \frac{1-s}{s} I_2^2 = M \omega_r = M \omega_s (1-s) = M \frac{2\pi f_1}{p} (1-s) \quad (36)$$

pa je razvijeni elektromagnetski momenat

$$M = \frac{3p}{2\pi f_1} \frac{R_2'}{s} I_2^2 \quad (37)$$

ili, preko sinhronne brzine izražene u radijanima u sekundi:

$$M = \frac{3}{\omega_s} \frac{R_2'}{s} I_2'^2 \quad (38)$$

Kako je struja rotora svedena na stator, iz Teveninove zamjenske šeme, slika 9,

$$I_2' = \frac{U_T}{\sqrt{\left(R_T + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_T + X_{\sigma 2}')^2}} \quad (39)$$

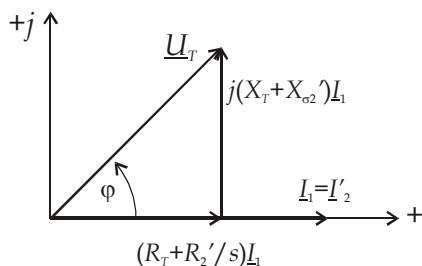
slijedi da je razvijeni elektromagnetski momenat, u funkciji primijenjenog napona, parametara mašine i klizanja:

$$M = \frac{3}{\omega_s} \frac{U_T^2}{\left(R_T + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_T + X_{\sigma 2}')^2} \frac{R_2'}{s} \quad (40)$$

Izraz za razvijeni elektromagnetski momenat (40) se može prikazati i na sledeći način,

$$M = \frac{3}{\omega_s} U_T \left(\frac{U_T}{\sqrt{\left(R_T + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_T + X_{\sigma 2}')^2}} \right) \left(\frac{\frac{R_2'}{s}}{\sqrt{\left(R_T + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_T + X_{\sigma 2}')^2}} \right) \quad (41)$$

pri čemu je član u prvoj zagradi fazna struja statora a drugi član, imajući na umu fazorski dijagram sa slike 10. koji odgovara Teveninovoj ekvivalentnoj šemi asinhronog motora, ima oblik koji je sličan izrazu za faktor snage,



Slika 10. Fazorski dijagram koji odgovara ekvivalentnoj šemi sa slike 9.

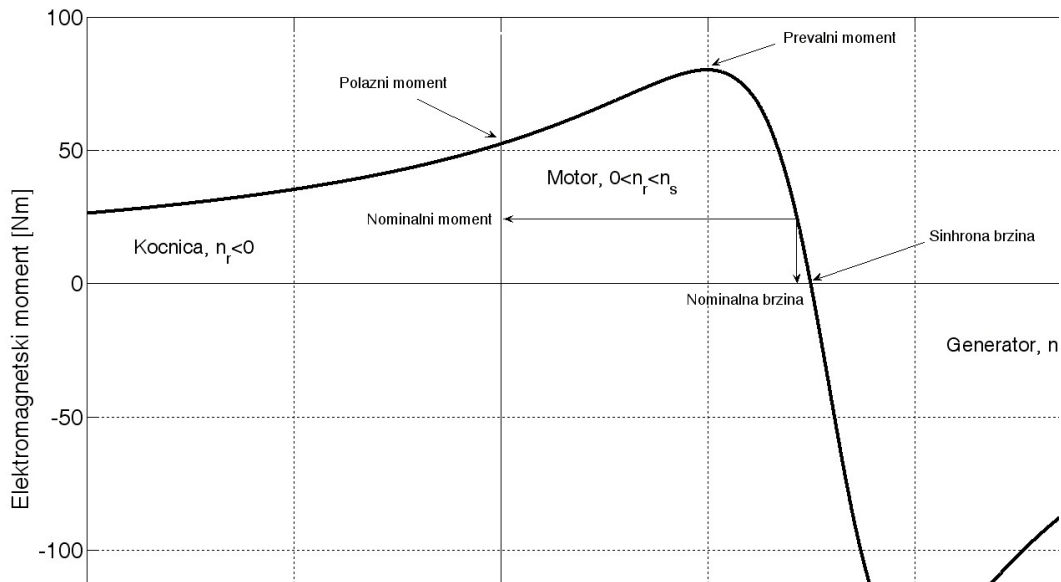
jer je faktor snage, sa fazorskog dijagrama,

$$\cos \varphi = \frac{R_T + \frac{R_2'}{s}}{\sqrt{\left(R_T + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_T + X_{\sigma 2}')^2}} \quad (42)$$

pa je, zanemarujući gubitke u gvožđu, (31):

$$M = \frac{3}{\omega_s} U_T I_1 \left(\cos \varphi - \frac{R_T}{U_T} I_1 \right) = \frac{3}{\omega_s} (U_T I_1 \cos \varphi - R_T I_1^2) = \frac{P_{obr}}{\omega_s} \quad (43)$$

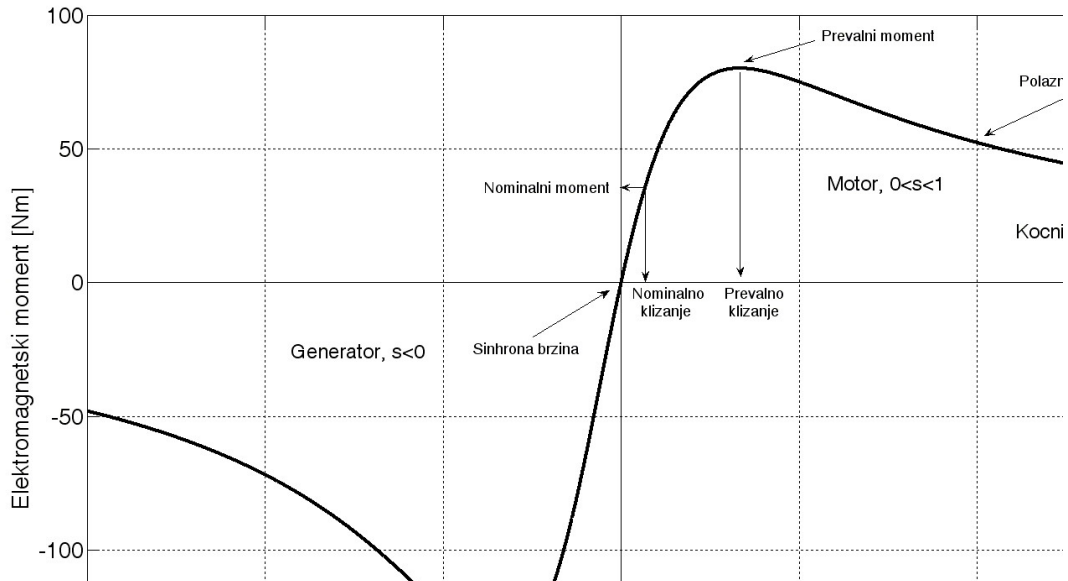
Slika 11. prikazuje grafički oblik gornje zavisnosti momenta u funkciji brzine rotora, tzv. momentnu karakteristiku motora, (40), za parametre motora iz Primjera 2. Slika 12. prikazuje istu karakteristiku crtanu u funkciji klizanja. Između brzine rotora i klizanja važi sledeća veza: $n_r = (1-s)n_s$.



Slika 11. Momentna karakteristika motora čiji su parametri određeni u Primjeru 2, prikazana u funkciji brzine rotora

Sa slika 11 i 12, se uočavaju sledeće karakteristične oblasti:

- oblast brzina rotora između nulte brzine (mirujući rotor, klizanje $s=1$) i sinhronne brzine (klizanje $s=0$) koja odgovara *motornom režimu rada*;
- oblast brzina rotora iznad sinhronne brzine - slučaj koji se može ostvariti onda kada strana pogonska mašina vezana na vratilo asinhronne mašine pogoni rotor u smeru obrtnog magnetskog polja brzinom većom od sinhronne (negativno klizanje, $s < 0$) - *generatorski režim rada*;
- oblast negativnih brzina rotora tj. slučaj kada se rotor okreće u suprotnu stranu u odnosu na obrtno magnetsko polje (klizanje veće od jedinice, $s > 1$) - *režim elektrodinamičke kočnice (tzv. plugging)*. Ovaj radni režim se ostvaruje reverzijom rotacije obrtnog magnetskog polja u toku motornog režima rada zamjenom redosleda priključka dva fazna namotaja statora na mrežni napon ili u slučaju kada je otporni moment na osovini motora veći od pogonskog momenta motora, npr. kod dizalica, kada usled gravitacije teret počne da okreće rotor u suprotnom smeru od smjera obrtanja magnetskog polja.



Slika 12. Momentna karakteristika motora čiji su parametri određeni u Primjeru 2, prikazana u funkciji klizanja

Sa slika 11. i 12. se uočavaju i sledeće karakteristične tačke:

- *polazni moment* motora - tačka sa krive moment-brzina koja odgovara mirujućem rotoru ($n_r=0, s=1$);
- *nominalni moment* motora - tačka sa krive moment-brzina koja odgovara nominalnoj brzini motora tj. nominalnom klizanju ($n_r=n_n, s=s_n$);
- maksimalni ili *prevalni moment* u motornom režimu rada kom odgovara pozitivna vrijednost prevalnog klizanja;
- maksimalni ili *prevalni moment* u generatorskom režimu rada kom odgovara identično po vrijednosti ali po znaku negativno prevalno klizanje u odnosu na motor. Ovaj prevalni moment ima veću vrijednost u odnosu na motorni režim rada;

Do brojne vrijednosti polaznog momenta se dolazi iz relacije (40) za vrijednost klizanja $s=1$. Za brojne podatke iz Primjera 2, slijedi:

$$K_T = \frac{X_m}{X_{\sigma 1} + X_m} = 0.96 \quad U_T = K_T U_1 = 0.96 \cdot U_1 \quad R_T = K_T^2 R_1 = 0.92 \cdot R_1$$

$$X_T = K_T X_{\sigma 1} = 0.96 \cdot X_{\sigma 1}$$

$$M_{pol} = \frac{3}{\omega_s} \frac{U_T^2}{\left(R_T + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_T + X_{\sigma 2}')^2} \frac{R_2'}{s} \xrightarrow{s=1, p=2, \omega_s=157} 52.3 Nm$$

Kako je nominalna vrijednost momenta posmatranog motora,

$$M_n = 9.55 \cdot \frac{P_n}{n_n} = 9.55 \cdot \frac{4000}{1435} = 26.6 Nm$$

to je:

$$M_{pol} \approx 2M_n$$

U cilju nalaženja prevalnog klizanja traži se izvod izraza (40) po klizanju i izjednačava se sa nulom. Iz tog uslova se dolazi do dvije vrijednosti prevalnog klizanja tj. klizanja pri kojem nastupa prevalni momenat:

$$s_{pr} = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_T^2 + (X_T + X_{\sigma 2}')^2}} \quad (44)$$

Zanemarujući član R_T^2 u odnosu na kvadrat zbira reaktansi, dolazi se do približnog izraza:

$$s_{pr} \cong \pm \frac{R_2'}{X_T + X_{\sigma 2}'} \quad (45)$$

Za analizirani motor prevalno klizanje ima vrijednost,

$$s_{pr} = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_T^2 + (X_T + X_{\sigma 2}')^2}} = \pm \frac{1.4}{\sqrt{(0.92 \cdot 1.2)^2 + (0.96 \cdot 2.075 + 2.075)^2}} = \pm 0.33$$

čemu odgovaraju brzine rotora:

$$n_{m} = (1 - s_{pr}) n_s = (1 - 0.33) \cdot 1500 = 1005 \frac{\text{obr}}{\text{min}}$$

$$n_{g} = (1 + s_{pr}) n_s = (1 + 0.33) \cdot 1500 = 1995 \frac{\text{obr}}{\text{min}}$$

Zamjenom vrijednosti za prevalno klizanje u (40) dobijaju se vrijednosti prevalnog momenta u motornom,

$$M_{prm} = \frac{3}{\omega_s} \frac{U_T^2}{\left(R_T + \frac{R_2'}{0.33}\right)^2 + (X_T + X_{\sigma 2}')^2} \frac{R_2'}{0.33} = 80 \text{Nm} \approx 1.5 M_{pol} \approx 3 M_n$$

i generatorskom režimu rada:

$$M_{prg} = -\frac{3}{\omega_s} \frac{U_T^2}{\left(R_T - \frac{R_2'}{0.33}\right)^2 + (X_T + X_{\sigma 2}')^2} \frac{R_2'}{0.33} = -137 \text{Nm} \approx 1.7 \cdot |M_{prm}| \approx 5.1 M_n$$

Očigledan razlog većeg prevalnog momenta u generatorskom režimu rada jeste manja vrijednost imenioca u odnosu na motorni režim rada a usled negativne vrijednosti prevalnog klizanja.

Opšti izraz za prevalni moment se dobija zamjenom aproksimativnog izraza za prevalno klizanje (45) u (40):

$$M_{pr} = \pm \frac{3}{\omega_s} \frac{U_T^2 (X_T + X_{\sigma 2}')}{\left(R_T \pm (X_T + X_{\sigma 2}')\right)^2 + (X_T + X_{\sigma 2}')^2} \quad (46)$$

Ono što je interesantno uočiti iz zadnjeg izraza jeste da vrijednost prevalnog momenta ne zavisi od otpornosti faznog namotaja rotora iako je klizanje pri kom nastupa prevalni moment, prevalno klizanje, direktno proporcionalno toj otpornosti, (44), (45).

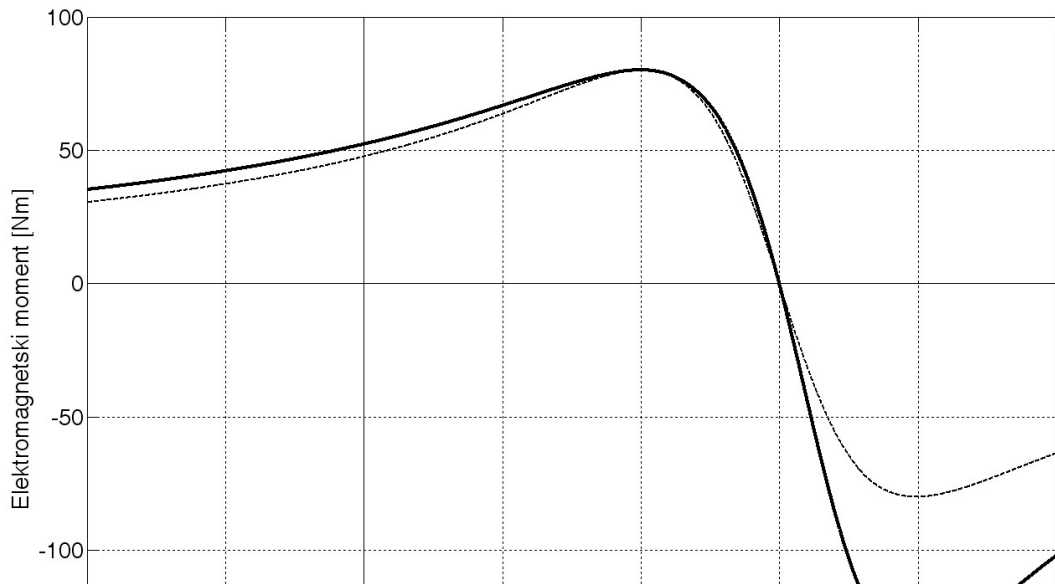
3.1. KLOSS-OV OBRAZAC

Prostom manipulacijom opštim izrazom za moment (40) i izrazom za prevalni moment (46), odnosno njihovim dijeljenjem i zamjenom člana $(X_T + X_{\sigma 2}')$ sa R_2'/s_{pr} iz (45), i zanemarivanjem otpornosti R_T , dolazi se do kompaktnog izraza koji je u literaturi poznat kao Kloss-ov obrazac,

$$\frac{M}{M_{pr}} = \frac{2}{\frac{s}{s_{pr}} + \frac{s_{pr}}{s}} \quad (47)$$

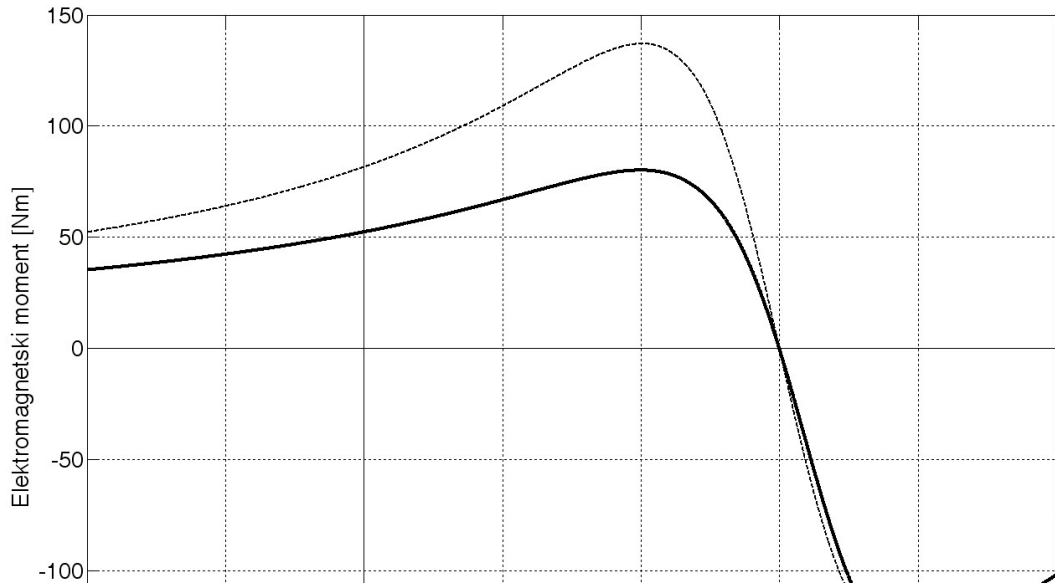
a koji daje zavisnost momenta u funkciji klizanja za poznate vrijednosti prevalnog momenta i njemu odgovarajućeg prevalnog klizanja.

Pritom, zamjenom u (47) vrijednosti za prevalni momenat i prevalno klizanje koji važe za motorni režim rada dobija se prilično tačan rezultat za taj radni režim, pogotovo u oblasti malih klizanja, dok se javljaju značajna odstupanja u generatorskom režimu rada, slika 13.



Slika 13. Poređenje momentne karakteristike dobijene iz Klossovog obrasca (crtkana linija) i izraza (40) (puna linija) u motornom režimu rada

Slično, zamjenom u (47) vrijednosti za prevalni momenat i prevalno klizanje koji važe za generatorski režim rada dobija se prilično tačan rezultat za taj radni režim, dok se javljaju značajna odstupanja u motornom režimu rada, slika 14.



Slika 14. Poređenje momentne karakteristike dobijene iz Klossovog obrazca (crtkana linija) i izraza (40) (puna linija) u generatorskom režimu rada

4. ZAVISNOST STRUJE STATORA I ROTORA OD KLIZANJA

Za određivanje zavisnosti struje statora i rotora kao funkcije brzine rotora ili klizanja, potrebno je vratiti se na IEEE preporučeno ekvivalentno kolo sa otočnom granom magnećenja, slika 7. Kompleksna ulazna impedansa ovog kola je data sledećim izrazom:

$$\underline{Z}_{ul} = \underline{Z}_1 + \frac{\underline{Z}_m \underline{Z}_2}{\underline{Z}_m + \underline{Z}_2} \quad (48)$$

gdje su,

$$\underline{Z}_1 = R_1 + jX_{\sigma 1} \quad (49)$$

$$\underline{Z}_2 = \frac{R'_2}{s} + jX'_{\sigma 2} \quad (50)$$

$$\underline{Z}_m = jX_m \quad (51)$$

ili,

$$\underline{Z}_m = \frac{jR_c X_m}{R_c + jX_m} \quad (52)$$

ukoliko se u obzir uzme otpornost R_c u otočnoj grani. Ona će i dalje biti zanemarivana u nastavku izlaganja.

Kompleksna ulazna struja, fazna struja statora, je odnos faznog napona i ulazne impedanse po fazi,

$$I_1 = \frac{U_1}{Z_{in}} \quad (53)$$

a kompleksna struja rotora svedena na stator se dobija iz strujnog djelitelja:

$$I_2' = \frac{Z_m}{Z_m + Z_2} I_1 \quad (54)$$

Efektivne vrijednosti ovih struja u funkciji brzine rotora, za već analizirani motor, imaju oblik kao na slici 15.

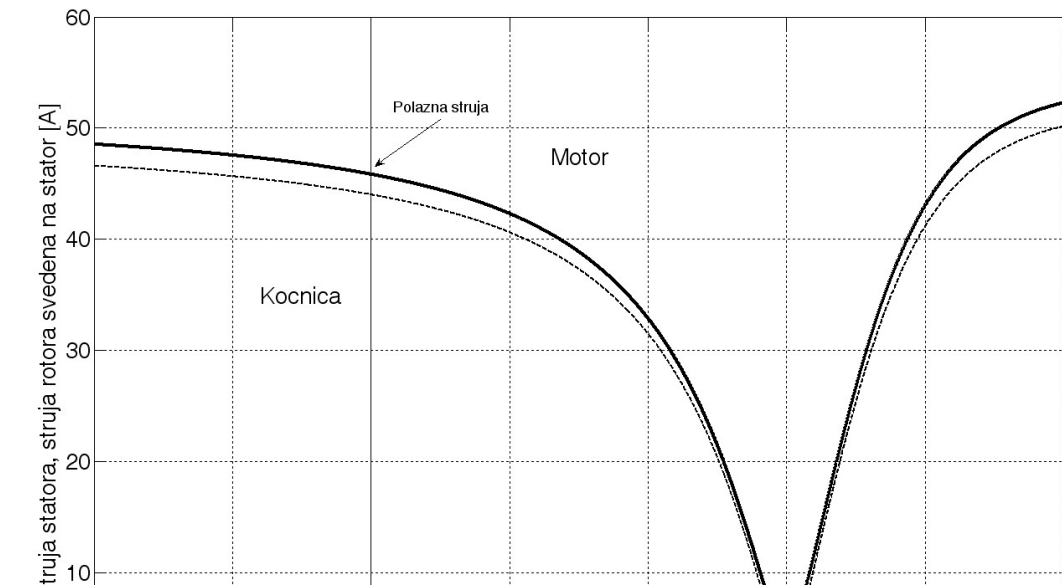
Sa slike 15. se vidi da u motornom režimu rada obje struje imaju maksimalnu vrijednost u slučaju pokretanja motora, za $n_r=0$ ili $s=1$.

Polazna struja, struja statora, iznosi oko 46A što je preko pet puta veća vrijednost od nominalne struje!

Zalijetanjem motora struje padaju i to tako da u idealnom praznom hodu struja rotora izčezava dok struja statora ima minimalnu vrijednost koja je jednaka struji praznog hoda – određena vrijednošću reaktanse magnećenja.

Prelaskom u generatorski režim rada obje struje ponovo rastu.

Isti je slučaj i sa režimom elektrodinamičke kočnice.



Slika 15. Zavisnost struje statora (puna linija) i struje rotora svedene na stator (crtkana linija) od klizanja za analizirani motor

Primjer 3. Trofazni asinhroni kavezni motor je priključen na mrežu linijskog napona 400V, 50Hz. Motor razvija na svojoj osovini momenat $M=109\text{Nm}$ pri brzini 965 obr/min, uz stepen iskorišćenja $\eta=0.876$. Sprega namotaja statora motora je trougao. Struja koju u ovom radnom režimu motor vuče iz mreže iznosi 23.5A. Odrediti: a) broj pari polova, klizanje i prevalni momenat ako je prevalno klizanje $s_{pr}=25\%$; b) snagu na osovini motora i ukupne gubitke u motoru; c) prividnu, aktivnu i reaktivnu snagu koju motor vuče iz mreže kao i faktor snage motora; d) kapacitivnost baterije kondenzatora spregnute u zvijezdu u cilju popravke faktora snage na 0.95.

Rešenje:

a) Kako je učestanost napona napajanja 50Hz a brzina motora je 965 obr/min, sinhrona brzina je prva veća brzina a to je 1000 obr/min što znači da je motor sa tri para polova, $p=3$.

b) Snaga na osovini motora, mehanička snaga, je proizvod momenta i brzine, u odgovarajućim jedinicama:

$$P_{meh} = M \cdot \omega_r = \frac{M \cdot n_r}{9.55} = \frac{109 \cdot 965}{9.55} = 11kW$$

Ulazna, uložena električna snaga je veća od izlazne, korisne mehaničke snage za snagu gubitaka, a njihova veza je data preko datog podatka o stepenu iskorišćenja:

$$\eta = \frac{P_{korisno}}{P_{ulozeno}} = \frac{P_{korisno}}{P_{korisno} + P_{gubitaka}} = \frac{P_{mehanicno}}{P_{mehanicno} + P_{gubitaka}} \Rightarrow 1 + \frac{P_{gubitaka}}{P_{mehanicno}} = \frac{1}{\eta}$$

$$P_{gubitaka} = \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right) P_{mehanicno}$$

$$P_{gubitaka} = \left(\frac{1}{0.876} - 1 \right) \cdot 11 = 1.56kW$$

c) Na osnovu izračunate snage gubitaka i mehaničke snage na osovini, dolazi se do podatka o ulaznoj električnoj snazi, aktivnoj snazi, a preko nje, posredno, i do faktora snage motora:

$$P_{el} = P_{meh} + P_{gubitaka} = 12.56kW$$

$$P_{el} = 12.56kW = \sqrt{3}U_l I_l \cos \varphi$$

$$\cos \varphi = \frac{P_{el}}{\sqrt{3}U_l I_l} = \frac{12.56kW}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 23.5} = 0.77$$

Prividna snaga je,

$$S = \sqrt{3}U_l I_l = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 23.5 = 16.28kVA$$

a reaktivna:

$$Q = \sqrt{3}U_l I_l \sin \varphi = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{16.28^2 - 11^2} = 12kVAR$$

d) U cilju poravke faktora snage paralelno motoru se ugrađuje trofazna baterija kondenzatora, po uslovu zadatka, spregnuta u zvijezdu. Kapacitivnost kondenzatora treba tako izabrati da cio potrošač kog sada čini trofazni motor i trofazna baterija kondenzatora, iz mreže vuče snagu pri faktoru snage $\cos \varphi = 0.95$, pri nepromijenjenoj aktivnoj snazi motora. U tom cilju, jedinstveni potrošač iz mreže treba da vuče reaktivnu snagu:

$$Q = P \tan \varphi = P \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi} = P \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi}}{\cos \varphi} = 11 \cdot \frac{\sqrt{1 - 0.95^2}}{0.95} = 3.62kVAR$$

Razliku do pune reaktivne snage koju troši motor treba da nadoknadi trofazna baterija kondenzatora,

$$Q_{3C} = 12kVAR - 3.62kVAR = 8.38kVAR$$

tj. jedan od kondenzatora treba da nadoknadi trećinu gornje snage:

$$Q_c = \frac{Q_{3c}}{3} = 2.79 \text{ kVAR}$$

Kako su kondenzatori spregnuti u zvijezdu, po uslovu zadatka, na jednom od njih je fazni napon, pa je potrebna kapacitivna reaktansa,

$$Q_c = \frac{U_f^2}{X_c} = \frac{(U_i/\sqrt{3})^2}{X_c} = \frac{U_i^2}{3X_c} \Rightarrow X_c = \frac{U_i^2}{3Q_c} = \frac{400^2}{3 \cdot 2.790} = 19.116 \Omega$$

Odnosno, kondenzator kapacitivnosti,

$$X_c = 19.116 \Omega = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$$

$$C = \frac{1}{2\pi f X_c} = \frac{1}{2 \cdot 3.14 \cdot 50 \cdot 19.116} = 167 \mu\text{F} \clubsuit$$

5. UPUŠTANJE MOTORA U RAD

Iz prethodnog izlaganja slijedi da je polazna struja asinhronog motora prilično velika i za većinu motora se može smatrati šest do sedam puta većom od nominalne struje. O tome slikovito govori sledeća tabela, u kojoj su dati neki od osnovnih podataka za nekoliko motora različitih snaga i broja pari polova proizvođača Brook Crompton (interaktivni katalog na web stranici <http://www.electric-motors.co.uk/>). Pored odnosa polazne i nominalne struje dati su i odnos polaznog i nominalnog momenta kao i odnos prevalnog i nominalnog momenta.

Tabela III: Brook Crompton motori različite snage i različitog broja pari polova

P_n (kW)	p	n_n (obr/min)	M_n (Nm)	U_n (V)	I_n (A)	η_n	$\cos\varphi_n$	I_{pol}/I_n	M_{pol}/M_n	M_{pr}/M_n
7.5	2	1445	49.6	400	14.6	0.871	0.85	7.1	2.4	3.0
15	3	971	148	400	30	0.888	0.81	6.1	2.2	2.7
22	1	2954	71.1	400	38	0.905	0.93	7.3	2.5	3.3
30	2	1470	195	400	54	0.914	0.88	6.5	2.2	2.8

U slučaju priključenja motora malih snaga, ta udarna, polazna struja ne predstavlja veći problem. Međutim, za motore većih snaga, pogotovo motore koji rade na niskom naponu, čija je nominalna struja već prilično velika, udarna, polazna struja može da predstavlja problem kako samom pogonu čiji je motor dio, tako i mreži. Pogonu, jer velika polazna struja znači i značajan pad napona a razvijeni elektromagnetski moment motora zavisi od kvadrata primijenjenog napona, tako da se može desiti da motor ne može pokrenuti opterećenje na svojoj osovini. Problem može da se javi i kod drugih potrošača na mreži koji su motoru paralelno priključeni tako da pad napona može izazvati problem u funkcionisanju tih uređaja. Primjera radi, motor snage 30kW iz prethodne tabele vuče polaznu struju od $6.5 \times 54 = 351\text{A}$, istina u relativno kratkom vremenu zalijetanja motora. Načini upuštanja motora u rad tj. ograničavanje polazne struje se razlikuju kod motora sa namotanim rotorom i kaveznom motora tako da će biti posebno analizirani.

5.1. UPUŠTANJE MOTORA SA NAMOTANIM ROTOROM

Ova vrsta motora ima dostupan namotaj rotora preko kliznih prstenova. Osnovna ideja upuštanja ovog motora u rad i ograničavanja polazne struje jeste ubacivanje dodatnih otpornika u kolo rotora, preko kliznih prstenova, tokom zaleta. Na taj način se ograničava struja rotora pri samom startu motora ali se na taj način, indirektno, ograničava i polazna struja statora jer je reakcija rotora na stator, reakcija armature, manja.

Pritom se, što je posebno interesantno, polazni momenat povećava!

Razlog povećanja polaznog momenta je dvostruk: sa jedne strane, ubacivanjem otpornika u kolo rotora, struja rotora a samim tim i struja statora se smanjuje, ali se istovremeno poboljšava faktor snage čime proizvod $I_1 \cos \varphi$ postaje veći ubacivanjem otpornika u kolo rotora; sa druge strane, smanjivanjem struje Džulovi gubici u namotajima statora postaju manji, čime veći dio ulazne snage prelazi u vazdušni procjep. Posmatrajmo već analizirani motor: faktor snage tog, kao i bilo kog drugog asinhronog motora pri startu ($s=1$), prilično je loš,

$$\cos \varphi = \frac{R_r + R_2'}{\sqrt{(R_r + R_2')^2 + (X_r + X_{\sigma 2}')^2}} = \frac{0.92 \cdot 1.2 + 1.4}{\sqrt{(0.92 \cdot 1.2 + 1.4)^2 + (0.96 \cdot 2.075 + 2.075)^2}} = 0.5243$$

polazna struja je prilično velika,

$$I_{1pol} = \frac{U_r}{\sqrt{(R_r + R_2')^2 + (X_r + X_{\sigma 2}')^2}} = \frac{0.96 \cdot 220}{\sqrt{(0.92 \cdot 1.2 + 1.4)^2 + (0.96 \cdot 2.075 + 2.075)^2}} = 44.22 A$$

a polazni moment iznosi:

$$M = \frac{3}{\omega_s} (U_r I_1 \cos \varphi - R_r I_1^2) = \frac{3}{157} (0.96 \cdot 220 \cdot 44.22 \cdot 0.5243 - 0.92 \cdot 1.2 \cdot 44.22^2) = 52.3 Nm$$

Dodavanjem otpornika u kolo rotora, čija otpornost po fazi, svedena na stator, iznosi 3Ω , dobija se značajno bolji faktor snage,

$$\cos \varphi = \frac{R_r + R_2' + R_d'}{\sqrt{(R_r + R_2' + R_d')^2 + (X_r + X_{\sigma 2}')^2}} = \frac{0.92 \cdot 1.2 + 1.4 + 3}{\sqrt{(0.92 \cdot 1.2 + 1.4 + 3)^2 + (0.96 \cdot 2.075 + 2.075)^2}} = 0.8$$

manja polazna struja,

$$I_{1pol} = \frac{U_r}{\sqrt{(R_r + R_2' + R_d')^2 + (X_r + X_{\sigma 2}')^2}} = \frac{0.96 \cdot 220}{\sqrt{(0.92 \cdot 1.2 + 1.4 + 3)^2 + (0.96 \cdot 2.075 + 2.075)^2}} = 30.86 A$$

ali veći polazni momenat (!!!):

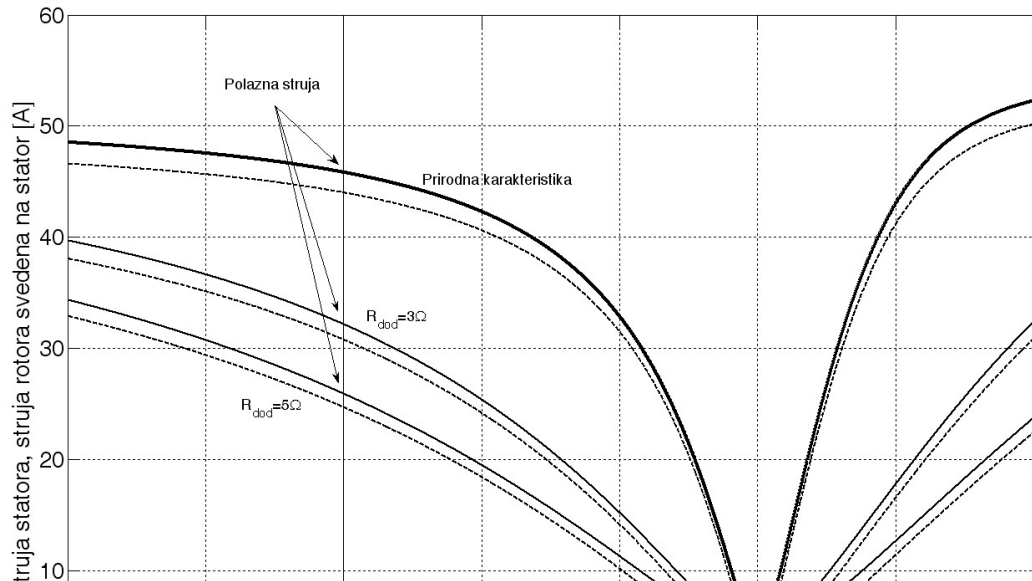
$$M = \frac{3}{\omega_s} (U_r I_1 \cos \varphi - R_r I_1^2) = \frac{3}{157} (0.96 \cdot 220 \cdot 30.86 \cdot 0.8 - 0.92 \cdot 1.2 \cdot 30.86^2) = 79.54 Nm$$

Gornji rezultat se može objasniti i na sledeći način: vrijednost prevalnog (maksimalnog) momenta asinhronog motora ne zavisi od otpornosti namotaja rotora, pa time ni od vrijednosti otpornosti dodatnih otpornika u kolu rotora, (46). Međutim, klizanje pri kom se prevalni momenat javlja, prevalno klizanje, zavisi od otpornosti namotaja rotora pa i od vrijednosti otpornosti dodatnih otpornika u kolu rotora, (44), (45).

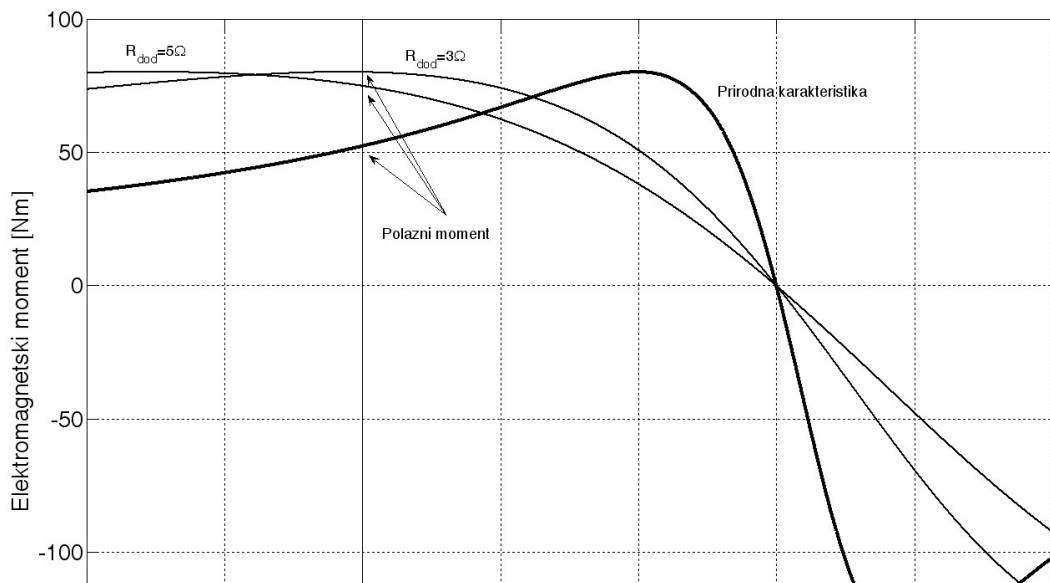
Iz tog razloga, pored toga što je jedan od zadataka ograničavanje polazne struje, može se postaviti i zadatak sledećeg tipa: naći odgovarajuću vrijednost otpornosti koje treba dodati u rotorsko kolo kako bi maksimalni moment asinhronog motora bio na prevalnom klizanju koje je jednako jedinici.

Time se ograničava struja pri polasku motora ali se istovremeno postiže da polazni momenat bude jednak maksimalno mogućem momentu za taj motor, prevalnom momentu.

Slike 16. i 17. prikazuju uticaj dodatnih otpornika različitih vrijednosti na struju motora i na momentne karakteristike motora. Jedna od ovih karakteristika koja se dobija u slučaju da nema dodatnih otpornika u kolu rotora poznata je kao prirodna karakteristika. Struja statora je u slučaju dodatnih otpornika u kolu rotora manja na cijelom opsegu klizanja sem u režimu praznog hoda kada dodatni otpornik nema nikakvog uticaja na struju statora. Slično važi i za struju rotora s tim što je ona u režimu praznog hoda jednaka nuli.



Slika 16. Uticaj dodavanja otpornosti u kolo rotora na struju statora (pune linije) i struju rotora svedenu na stator (crtkane linije)



Slika 17. Uticaj dodatne otpornosti u kolu rotora na momentnu karakteristiku

Sa slike 17. se vidi da se dodavanjem otpornika u kolo rotora vrijednosti $R_2'=3\Omega$ (vrijednost svedena na stator) postiže to da pri samom startu motora polazni momenat bude približno jednak prevalnom momentu motora. Do te činjenice se može doći i računski: u približni izraz za prevalno

klizanje se prevalno klizanje postavlja na vrijednost klizanja koja odgovara mirovanju rotora, $s_{pr}=1$, i iz tog uslova se dobija vrijednost dodatne otpornosti, svedene na stator:

$$s_{pr} \cong \frac{R'_2 + R'_{dod}}{X_T + X'_{\sigma 2}} = 1 \Rightarrow R'_{dod} = X_T + X'_{\sigma 2} - R'_2 = 0.96 \cdot 2.075 + 2.075 - 1.4$$

$$R'_{dod} = 2.667 \Omega$$

Da bi se došlo da stvarne vrijednosti dodatnog otpornika potrebno je poznavati prenosni odnos faznog napona na statoru i napona tj. indukovane fazne ems otvorenog namotaja rotora, (10):

$$R_{dod} = \frac{R'_{dod}}{n_{12}^2} = \frac{R'_{dod}}{(N_{1eff}/N_{2eff})^2} \cong \frac{R'_{dod}}{(U_1/E_2)^2}$$

Nakon zalijetanja motora na opisani način, dodatni otpornici u kolu rotora se kratkospajaju kratkim spajanjem kliznih prstenova rotora čime mašina nastavi da radi na prirodnoj karakteristici. U kolu rotora može postojati dodatni otpornik kog čine nekoliko segmenata otpornosti koji se sukcesivno kratkospajaju sve dok i zadnji segment ne bude van funkcije.

Zbog opisane osobine asinhronog motora sa namotanim rotorom, mašine ove vrste se koriste za tzv. teška pokretanja (slučaj kada radna mašina zahtijeva veliki polazni momenat) kao to je to slučaj kod različitih tipova dizalica.

5.2. UPUŠTANJE MOTORA SA KAVEZNI M MOTOROM

Kod motora sa kavezni rotorom problem upuštanja je složeniji. Cilj je, kao i prije, pri puštanju motora u rad smanjiti polaznu struju.

Ovdje su moguća tri pristupa: prvo, spuštanje vrijednosti napona na namotajima statora (uz konstantnu učestanost napona) pri polasku na jedan od mnogobrojnih načina. Međutim, smanjenje vrijednosti primarnog napona ima lošu stranu što nepovoljno utiče na polazni momenat motora – moment je funkcija kvadrata primijenjenog napona, (40).

Drugi pristup jeste u primjeni određenih rešenja pri samom procesu projektovanja kavezni asinhronih motora sa ciljem povećavanja vrijednosti njihovog polaznog momenta uz istovremeno smanjenje vrijednosti polazne struje.

Treći pristup podrazumijeva korišćenje frekventni pretvarača, invertora, kojima se omogućava promjena napona na namotajima statora kako po veličini tako i po učestanosti. O invertorima će kasnije biti više riječi.

SNIŽENI NAPON NA STATORU PRI STARTOVANJU MAŠINE

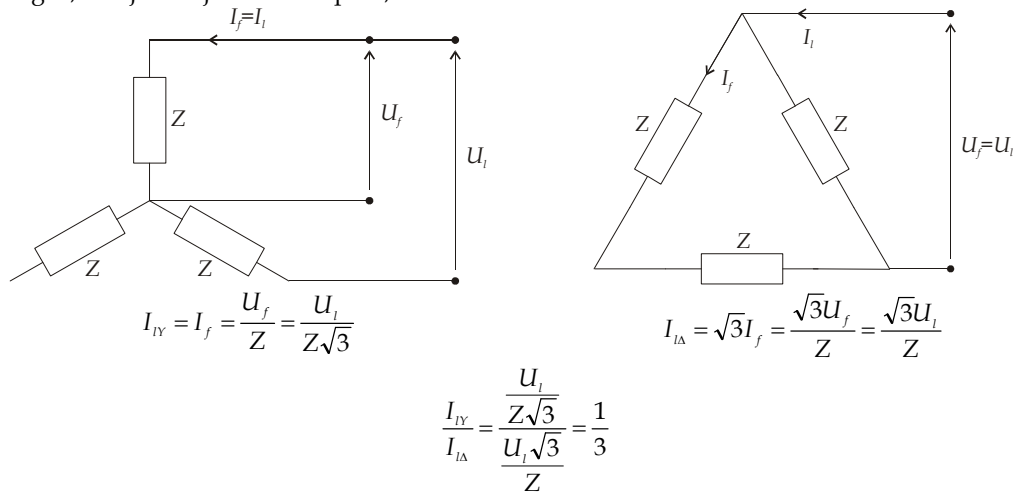
Efektivna vrijednost napona na namotajima statora, pri upuštanju kavezni asinhronog motora, može se sniziti na različite načine.

Jedan od osnovni načina jeste korišćenje prebacača zvijezda-trougao. Na ovaj način se namotaji statora motora koji startuje vezuju u spregu zvijezda pri startovanju, čime se na fazni namotajima javlja $\sqrt{3}$ puta manji napon. Zatim se, kad se motor zaleti, izvrši prespajanje namotaja statora u spregu trougao, čime se na fazne namotaje dovodi puni napon.

Na ovaj način se u rad puštaju motori koji su inače predviđeni za rad u spregu trougao na nominalnom naponu mreže.

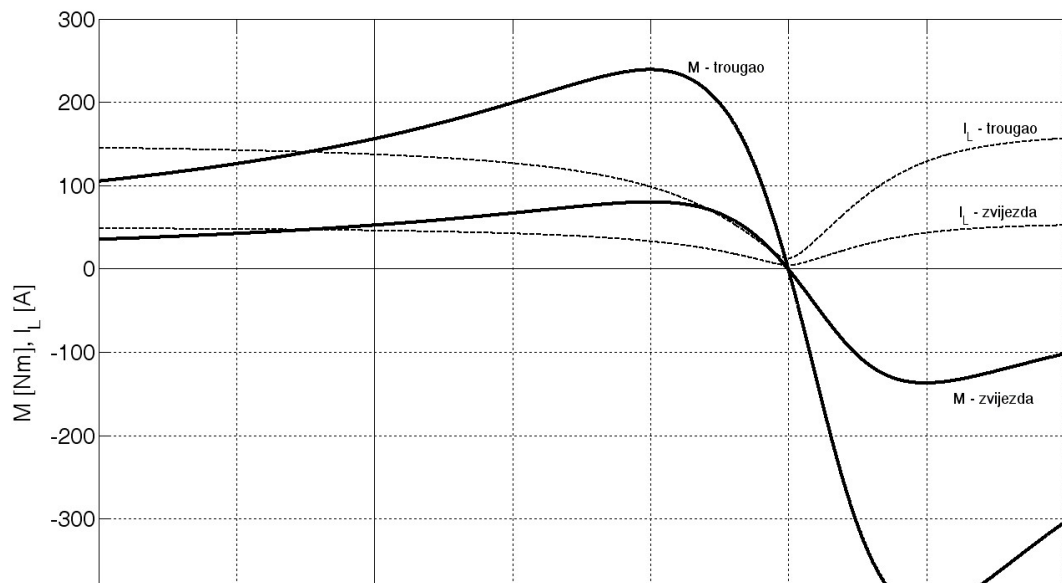
Kako se na opisani način fazni napon namotaja smanji za $\sqrt{3}$ to se polazni momenat smanji tri puta u odnosu na direktan start pri punom naponu, tako da se na ovaj način mogu upuštati samo motori koji su pri startu malo opterećeni. Što se tiče polazne struje, ona se u fazni namotajima

manjuje u odnosu koji važi za napone, za $\sqrt{3}$, ali posmatrano u odnosu na linijsku struju u sprezi trougao, ona je manja $\sqrt{3} \cdot \sqrt{3} = 3$ puta, slika 18.



Slika 18. Odnos linijske struje u sprezi zvijezda i sprezi trougao

Slika 19. pokazuje momentnu karakteristiku i zavisnost linijske struje statora od klizanja, u sprezi zvijezda i sprezi trougao za motor poznatih parametara.



Slika 19. Elektromagnetski momenat i linijska struja motora u sprezi zvijezda (fazni napon 220V) i trougao (fazni napon 380V) za prethodno analizirani motor

Pored smanjenja polaznog momenta, što je, istina, slučaj i sa svim ostalim metodama upuštanja kaveznog asinhronog motora snižavanjem napona, glavni nedostatak upuštača zvijezda-trougao jeste „udar“ koji se javlja u trenutku prebacivanja sa sprege zvijezda na spregu trougao: u tom trenutku se javlja snažan mehanički udar usled prelaska sa jedne na drugu momentnu karakteristiku kao i „strujni udar“ usled nagle promjene struje, a sve kao posledica nagle promjene napona. Taj „strujni udar“ je posebno izražen na višim naponskim nivoima (6kV, 11kV) kod tzv. visokonaponskih motora tako da se tamo izbjegava korišćenje upuštača zvijezda-trougao.

Primjer 4. Poznato je da polazni moment asinhronog motora u sprezi zvijezda pri linijskom naponu 300V iznosi 15Nm. Odrediti polazni moment motora u sprezi trougao pri linijskom naponu 380V.

Rešenje:

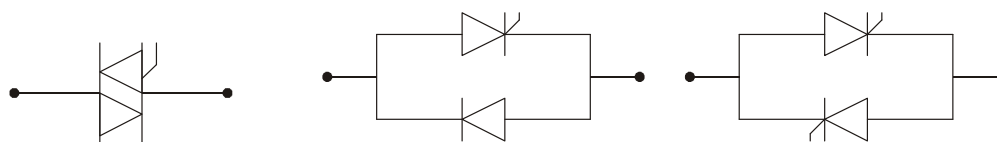
Polazni moment u sprezi trougao je tri puta veći od onog u sprezi zvijezda. Prema tome, polazni moment u sprezi trougao pri linijskom naponu 300V iznosi 45Nm. Pri linijskom naponu od 380V taj moment je za $(380/300)^2$ puta veći i iznosi: $(380/300)^2 \times 45 = 1.6 \times 45 = 72.2 \text{ Nm}$ ♣

Jedan od mogućih načina ograničavanja polazne struje pri upuštanju motora jeste ubacivanje na red sa priključnim provodnicima motora otpornika ili kalemova – reaktora ili prigušnica. Ovo su zastareli načini pogotovo sa dodavanjem otpornika zbog velike disipacije električne energije u njima. Reaktori se, sa druge strane, mogu naći i danas u upotrebi posebno kod motora velikih snaga i na višim naponskim nivoima gdje prebacač zvijezda-trougao, pri prebacivanju iz zvijezde u trougao izaziva jak strujni udar, koji je nekada reda veličine same polazne struje. Na reaktorima se pri puštanju motora u rad javlja pad napona koji za rezultat ima smanjen napon na motoru a samim tim i manju polaznu struju ali i polazni momenat. Pri postizanju ustaljene brzine oni se kratkospajaju čime se na motoru uspostavlja puni napon. Napon na motoru, dok su reaktori uključeni, je snižen ali nije stalan zbog promjenljive veličine pada napona na reaktorima kao posledica različite vrijednosti struje tokom zaleta a nekada i kao posledica promjenljive induktivnosti reaktora ako je on sa magnetskim jezgrom (različit nivo zasićenja magnetskog jezgra).

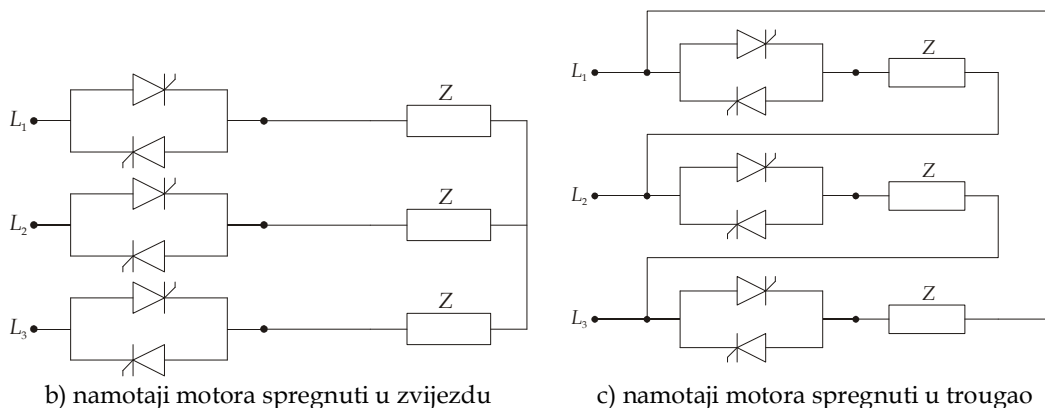
Treći način, koji je takođe rijetko u upotrebi jeste upotreba autotransformatora koji omogućava konstantnu vrijednost redukovano napona na namotaju statora tokom zalijetanja motora, da bi se nakon toga isključio. Radi se o skupom i glomaznom rešenju koje ima svoje opravdanje samo za motore velikih snaga i na višim naponskim nivoima koji se primjenjuju u industriji (6kV, 11kV).

Savremeni načini upuštanja asinhronih kaveznih motora u rad zasnivaju se na korišćenju statičkih konvertora – pretvarača energetske elektronike. Ukoliko je cilj samo upuštanje motora u rad koriste se tzv. soft-starteri. Ukoliko je pored upuštanja motora u rad potrebno u normalnom radnom režimu mijenjati i njegovu brzinu, u upotrebi su invertori.

Osnovu soft-startera čine triak ili dva antiparalelno vezana poluprovodnička ventila (tiristor i dioda ili dva tiristora), slika 20.a koji se uključuju na red sa faznim namotajem statora, slika 20.b i c.



a) Različiti elementi (moduli) koji mogu činiti soft-starter

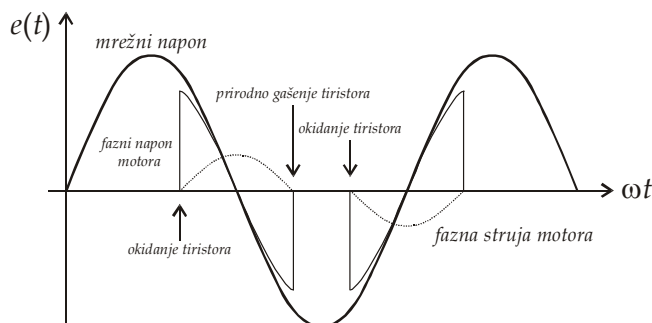


b) namotaji motora spregnuti u zvijezdu

c) namotaji motora spregnuti u trougao

Slika 20. Principijelna šema soft-startera

Kontrolisanim okidanjem upravljivih poluprovodničkih ventila, na osnovu odgovarajućeg algoritma, na fazne namotaje statora se dovodi napon čija se efektivna vrijednost može kontinualno mijenjati, slika 21. U suštini se radi o kontinualnom podizanju napona do nominalne vrijednosti čime se omogućava lagan, bestrzajan start motora i ravnomjerno ubrzavanje a sve pri ograničenim vrijednostima struja. Pri tom učestanost napona napajanja motora ostaje stalna, jednaka mrežnoj učestanosti.



Slika 21. Talasni oblici mrežnog napona, napona na faznom namotaju motora i fazne struje motora

Ukoliko je u pogonu potrebno imati motor promjenljive brzine tada su u upotrebi invertori koji istovremeno omogućavaju upuštanje motora na način sličan kako to čine soft-starteri.

Principijelna razlika je u tome što invertori ne regulišu samo nivo efektivne vrijednosti napona već i njegovu učestanost.

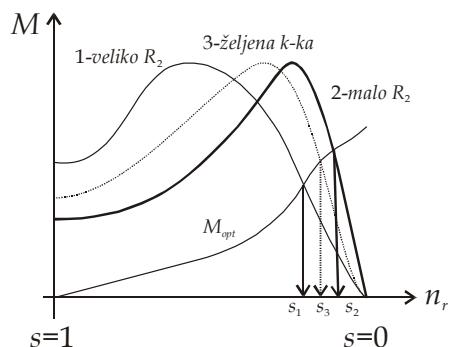
KONSTRUKTIVNE MJERE

Treba se kratko osvrnuti na sledeće, kontradiktorne zahtjeve, pri projektovanju asinhronog motora: iz primjera motora sa namotanim rotorom slijedi da je u cilju postizanja velikog polaznog momenta i male polazne struje potrebno imati namotaj rotora velike otpornosti, kriva 1 sa slike 22.

Sa aspekta nominalnog režima rada, međutim, velika otpornost rotora znači i veliko klizanje, s_1 , što za sobom povlači značajne Džulove gubitke u namotaju rotora, $P_{Cu2}=sP_{obr}$.

Mala otpornost kola rotora znači veliku polaznu struju i mali polazni momenat, kriva 2 sa slike 22. U normalnom režimu rada, sa druge strane, ovim rešenjem se postiže malo klizanje, s_2 , a samim tim i mali gubici u namotajima rotora. Drugim riječima, sa aspekta postizanja visokog stepena iskorišćenja u nominalnom režimu rada potrebno je da namotaj rotora ima što je moguće manju otpornost ili, što je isto, da vrijednost prevalnog klizanja bude što bliža nuli.

Između ova dva kontradiktorna zahtjeva treba naći kompromis i ostvariti neku srednju, željenu karakteristiku, kriva 3 sa slike 22, koja bi davala i visoku vrijednost polaznog momenta i malu polaznu struju ali i malo klizanje pri nominalno opterećenom motoru.



Slika 22. Različiti oblici momentnih karakteristika u zavisnosti od otpornosti namotaja rotora
 U cilju postizanja željene karakteristike kaveznog asinhronog motora primjenjuju se neke konstruktivne mjere pri samom projektovanju i proizvodnji motora. Prije svega tu se radi o oblikovanju kaveznog namotaja rotora odnosno njegovih štapova. U tom cilju se izvode kavezni namotaji sa dva kaveza (*double cage rotor*) kao i kavezni namotaj sa dubokim žljebovima, odnosno visokim štapovima (*deep bar cage rotor*).

Ideja je genijalna, a zasniva se na činjenici da učestanost električnih veličina u namotaju rotora zavisi od klizanja i najveća je pri startovanju motora, 50Hz, da bi u nominalnom režimu rada pala na vrijednost od 2-3 Hz.

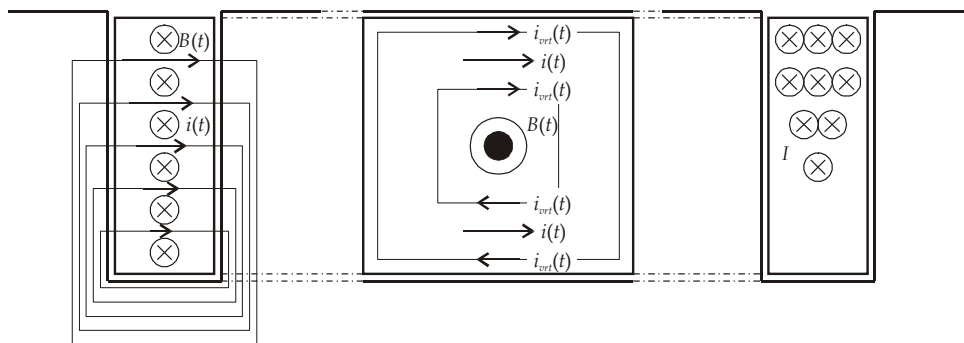
Slika 23. prikazuje osnovnu ideju, koja se zasniva na poznatom površinskom ili skin efektu. Proticanjem naizmjenične struje kroz štap rotora, (usvojeni referentni smjer toka struje je od posmatrača) stvara se poprečno, rasipno magnetsko polje, koje se obuhvata samo sa štapom. To rasipno magnetsko polje, prolazeći kroz žljeb rotora, prodire kroz štap rotora bočno, na lijevoj slici, s lijeva u desno, u skladu sa pravilom desne ruke.

Na srednjoj slici, koja predstavlja bočni pogled na štap rotora, referentni smjer vektora magnetske indukcije je ka posmatraču a smjer osnovne struje je udesno.

Po Faradejevom zakonu elektromagnetske indukcije, naizmjenično magnetsko polje u svojoj okolini stvara vrtložno električno polje, koje u štapu rotora, koji je provodnik, izaziva isto takve, vrtložne struje.

Smjer vrtložnih struja je određen Lencovim pravilom i prikazan je na srednjoj slici. Smjer vrtložnih struja je takav da se slaže sa tokom osnovne struje u gornjem dijelu štapa dok su u donjem dijelu štapa ove struje suprotnih smjerova. Kao krajnji rezultat, gustina struje po poprečnom presjeku štapa postaje neravnomjerna – glavina struje je u gornjem dijelu štapa, pri otvoru žljeba.

Opisani efekat je utoliko izraženiji ukoliko je učestanost osnovne struje veća, ukoliko je materijal od koga je štap napravljen bolji provodnik i ukoliko je visina štapa veća.



Slika 23. Ilustracija efekta potiskivanja struje u štapu rotora pri startovanju asinhronog motora

Kako sada ukupna struja, kao posledica skin efekta, protiče kroz manji dio ukupnog poprečnog presjeka provodnika, krajnji rezultat je povećana otpornost štapa i to upravo onda kada to treba, pri samom startu, kada je učestanost struja rotora maksimalna (50Hz)!

Nakon zalijetanja motora, kada učestanost struje rotora postaje veoma mala, reda veličine 2-3Hz, opisani efekat nestaje, struja se po poprečnom presjeku provodnika raspodjeljuje ravnomjerno čime

otpornost štapa pada, što je poželjno jer će motor u nominalnom radnom režimu raditi sa manjim klizanjem i manjim gubicima u kolu rotora.

U skladu sa oblikom momentne karakteristike asinhronog motora, američka asocijacija *NEMA* (*National Electrical Manufacturers Association*) svrstava asinhronne motore u četiri klase označene kao A, B, C i D klasa, Tabela IV.

TABELA IV - NEMA KLASIFIKACIJA KAVEZNIH ASINHRONIH MOTORA MALE I SREDNJE SNAGE ZA PRIKLJUČIVANJE NA MREŽU STALNE UČESTANOSTI

Karakteristike	M_{pol}/M_n (%)	M_{pr}/M_n (%)	I_{pol}/I_n (%)	s_n (%)	Tipične primjene	Stepen iskorišćenja
Dizajn A Visok polazni moment i velika polazna struja	70÷275*	175÷300*	/	0.5÷5	Primjene tipične po malim zahtjevima za polaznim momentom - ventilatori, centrifugalne pumpe i kompresori, motor-generator grupe	Srednji ili visok
Dizajn B Normalni polazni moment i normalna polazna struja	70÷275*	175÷300*	600÷700	0.5÷5	Primjene tipične po malim zahtjevima za polaznim momentom - ventilatori, centrifugalne pumpe i kompresori, motor-generator grupe	Srednji ili visok
Dizajn C Visok polazni moment i normalna polazna struja	200÷285*	190÷225*	600÷700	1÷5	Transportne trake, drobilice, mješalice, klipne pumpe i kompresori - tamo gdje je neophodan start motora pri opterećenju	Srednji
Dizajn D Visok polazni moment i veliko nominalno klizanje	275	275	600÷700	5÷8	Velika trenutna opterećenja sa ili bez zamajca kao probojne prese, makaze, liftovi, ekstruderi, vitla, dizalice itd.	Nizak

* - veće vrijednosti se odnose na motore manjih nominalnih snaga

6. REGULACIJA BRZINE ASINHRONOG MOTORA

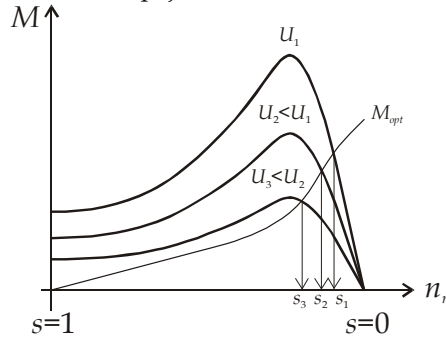
Priključenjem na električnu mrežu stalne efektivne vrijednosti napona i stalne učestanosti, brzina obrtnog magnetskog polja je stalna. Brzina rotora se, u zavisnosti od opterećenja, mijenja u vrlo uskim granicama, tako da se za asinhroni motor može reći da je on suštinski motor stalne brzine.

Kod motora sa namotanim rotorom na brzinu opterećenog motora je moguće uticati dodavanjem otpornika u kolo rotora što je neekonomično rešenje zbog gubitaka koji se javljaju u dodatnim otpornicima.

Na brzinu opterećenog motora, onog sa namotanim rotorom ili kaveznog, moguće je djelovati i smanjenjem napona na namotajima statora, pri stalnoj učestanosti korišćenjem pretvarača energetske elektronike kao što je to objašnjeno u slučaju soft-startera. Tada se oblik momentne karakteristike mijenja kao na slici 24. sa koje se vidi da na taj način dolazi do smanjenja brzine odnosno povećanja klizanja. Povećano klizanje ima za posledicu i povećane gubitke u namotaju rotora što i ovo rešenje čini neekonomičnim.

Kako sinhrona brzina zavisi od broja pari polova, brzina motora se može mijenjati promjenom broja pari polova. To se može ostvariti na način da se na stator postave dva ili više električno nezavisnih namotaja, svaki od njih izveden za različit broj pari polova. Priključenjem jednog od namotaja ostvaruje se jedna sinhrona brzina a samim tim i brzina motora. Drugi namotaj daje drugu sinhronu brzinu itd. Pri tom je rotor obično kaveznog tipa jer se on prilagođava različitom broju pari polova sa strane statora.

Druga mogućnost jeste izvođenje jedinstvenog namotaja na statoru na način koji omogućava da se njegovim prevezivanjem ostvare dva različita broja pari polova, obično u odnosu 1:2. Ovaj namotaj je poznat kao namotaj u Dalanderov-om spoju.



Slika 24. Uticaj promjene napona na brzinu opterećenog motora

Bilo kako bilo, promjena broja pari polova dovodi do skokovite promjene brzine sa recimo 3000 na 1500 obr/min ili sa 1500 na 750 obr/min što se nikako ne može podvesti pod pojam regulacija brzine - pojam koji označava mogućnost ostvarivanja kontinualne regulacije na određenom opsegu brzina.

Jedini način koji omogućava kontinualnu regulaciju brzine asinhronog motora jeste promjena učestanosti napona napajanja, kako se to vidi iz izraza za sinhronu brzinu. Rani pokušaji u tom smjeru su se zasnivali na upotrebi složenih i glomaznih elektromehaničkih pretvarača poznatih pod zajedničkim imenom „kaskade“. Razvojem energetske elektronike promjena efektivne vrijednosti napona i njegove učestanosti je postala svakodnevnica korišćenjem statičkih uređaja energetske elektronike - invertora.

Osnovna ideja je sledeća: mrežni napon, konstantne efektivne vrijednosti i učestanosti se prvo ispravlja, korišćenjem ispravljača, i na taj se način dobija jednosmjerni napon. Zatim se taj jednosmjerni napon, korišćenjem invertora „sječka“ na način da se na izlazu invertora dobijaju četvrtke jednosmjernog napona različitog polariteta čime se „simulira“ naizmjenični napon različitih efektivnih vrijednosti i različite učestanosti. Priključivanjem asinhronog motora na izlaz invertora omogućava se ostvarivanje različitih brzina od nulte do sinhrona ali i iznad sinhrona brzine.

Kako se asinhroni motori projektuju za konstantan napon i učestanost, to znači da je magnetski fluks u vazдушnom procjepu stalne vrijednosti. Iz osnovnog izraza za efektivnu vrijednost indukovane fazne ems, koja je po vrijednosti približno jednaka faznom naponu,

$$U_1 \cong E_1 = 4.44 f_1 N_{1\text{eff}} \Phi \quad (55)$$

vidi se da smanjenjem učestanosti, pri stalnoj efektivnoj vrijednosti napona, mašina ulazi u zasićenje - vrijednost magnetskog fluksa raste:

$$\Phi \cong \frac{U_1}{4.44 f_1 N_{1\text{eff}}} \quad (56)$$

Kako bi se takva situacija izbjegla, u opsegu brzina ispod sinhrona, učestanost i efektivna vrijednost napona se moraju mijenjati proporcionalno:

$$\Phi \propto \frac{U}{f} = \text{const} \quad (57)$$

Ovakav način kontrole brzine motora je poznat kao U/f kontrola.

Međutim, gornja konstatacija je samo djelimično tačna. Naime, da bi fluks ostao nepromijenjen, indukovana ems a ne napon, treba da se mijenja proporcionalno učestanosti. Za učestanosti manje od osnovne, mrežne učestanosti, rasipna reaktansa namotaja statora pada proporcionalno učestanosti tako da je sve veći uticaj otpornosti namotaja statora na pad napona. Dakle, aproksimacija $U_1 \approx E_1$ ne važi za male učestanosti.

Ovu situaciju jasno pokazuje slika 25, na kojoj su prikazane momentne karakteristike za slučaj da se napon i učestanost mijenjaju proporcionalno jedno drugom. Vidi se da što je manja učestanost sve je manji prevalni moment motora ili opteretivost motora - manji je fluks u vazдушnom procjepu.

U cilju da prevalni moment ostane nepromijenjen pri učestanostima manjim od osnovne učestanosti, napon treba „forsirati“ tj. mijenjati na osnovu zakonitosti koja se dobija na sledeći način: izjednačavajući izraz za prevalni moment pri osnovnoj učestanosti f_s i učestanosti f_1 ,

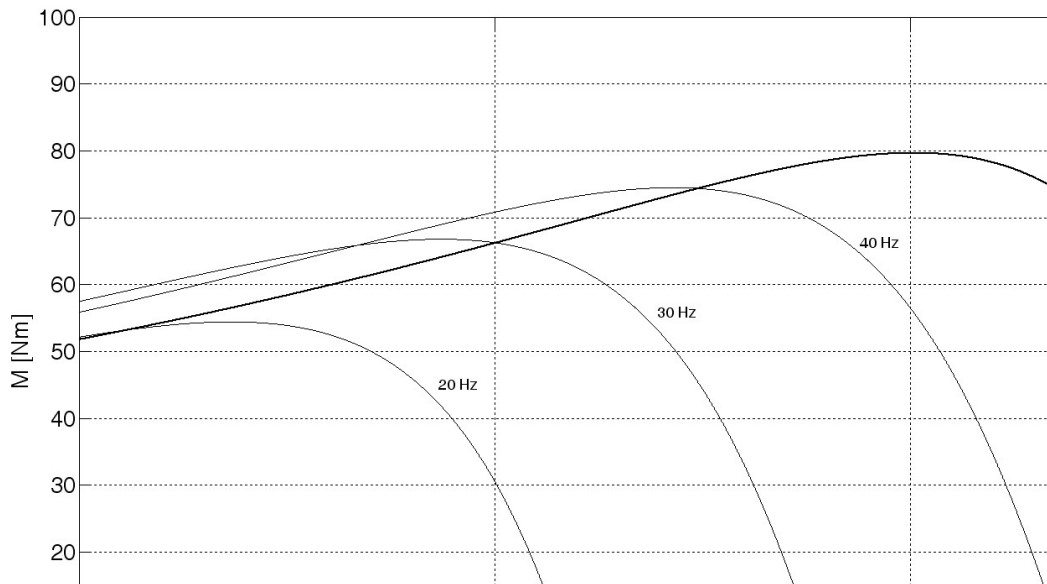
$$\frac{1}{f_s} \frac{U_{T1}^2 (X_T + X'_{\sigma 2})}{(R_T + (X_T + X'_{\sigma 2}))^2 + (X_T + X'_{\sigma 2})^2} = \frac{1}{f_1} \frac{U_{T2}^2 \frac{f_1}{f_s} (X_T + X'_{\sigma 2})}{\left(R_T + \frac{f_1}{f_s} (X_T + X'_{\sigma 2})\right)^2 + \left(\frac{f_1}{f_s}\right)^2 (X_T + X'_{\sigma 2})^2} \quad (58)$$

pri čemu su sve reaktanse vrijednosti koja odgovara osnovnoj učestanosti f_s , dobija se sledeća zavisnost po kojoj treba mijenjati napon u funkciji učestanosti, slika 26:

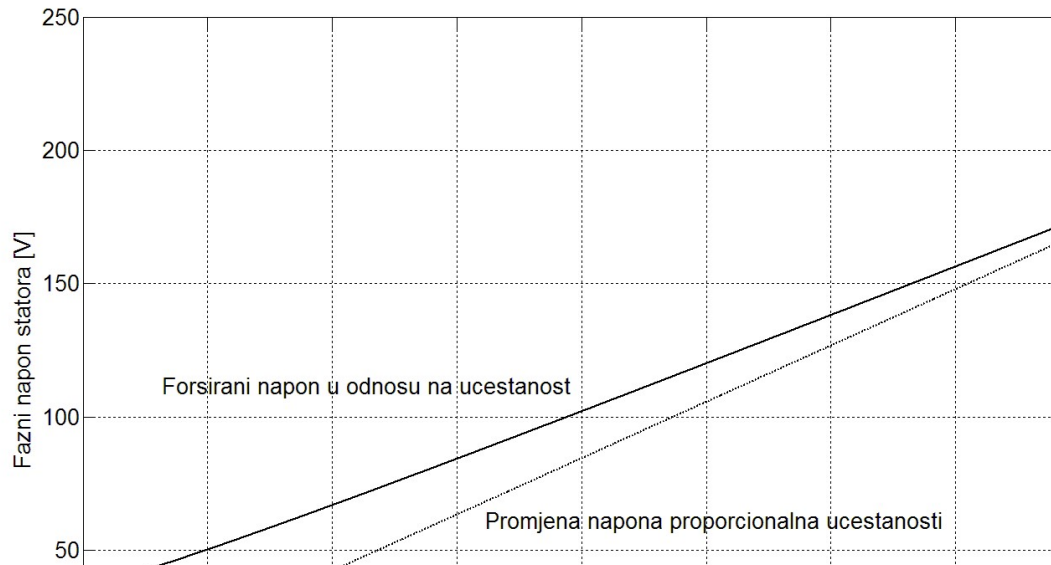
$$U_{T2} = \frac{U_{T1}}{f_s} \sqrt{\frac{(f_s R_T + f_1 (X_T + X'_{\sigma 2}))^2 + f_1^2 (X_T + X'_{\sigma 2})^2}{[(R_T + (X_T + X'_{\sigma 2}))^2 + (X_T + X'_{\sigma 2})^2]}} \quad (59)$$

Iz dobijene zakonitosti se uočava da se zanemarivanjem otpornosti R_T , tj. otpornosti faznog namotaja statora, dobija:

$$U_{T2} = \frac{f_1}{f_s} U_{T1} \quad (60)$$

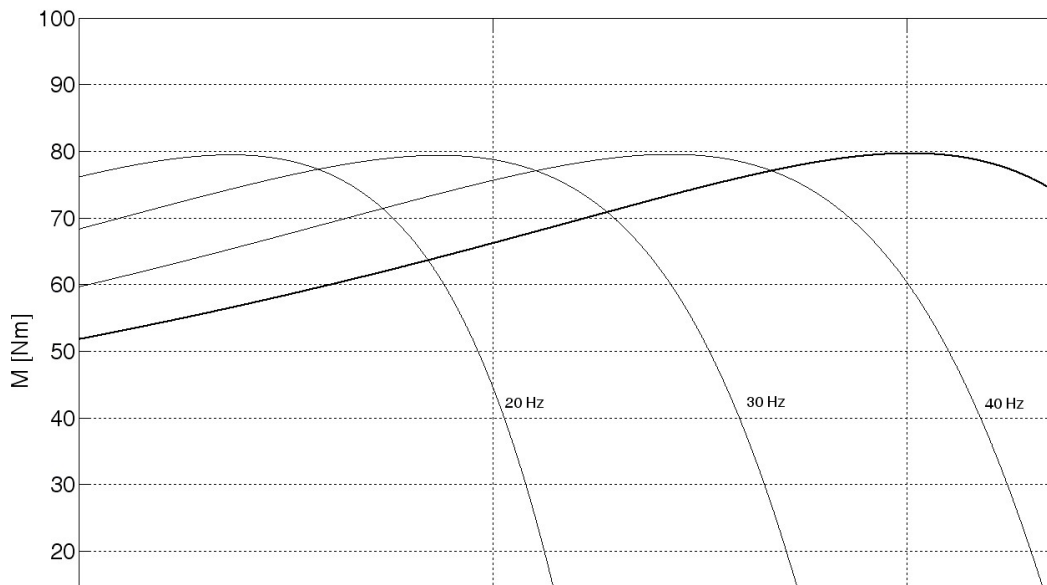


Slika 25. Momentne k-ke u motornom režimu za slučaj napajanja naponima različite efektivne vrijednosti i učestanosti - promjena napona i učestanosti je proporcionalna



Slika 26. Zavisnost forsiranja napona u funkciji učestanosti, izraz (59) u poređenju sa karakteristikom napona koji se mijenja proporcionalno učestanosti, izraz (60)

Mijenjanjem napona prema nađenoj zavisnosti (59) dobijaju se momentne karakteristike sa slike 27. sa kojih je jasno da je na ovaj način preoperativost motora potpuno očuvana.



Slika 27. Momentne k-ke u motornom režimu za slučaj napajanja naponima različite efektivne vrijednosti i učestanosti - napon se forsira u odnosu na učestanost (uporediti sa slikom 25)

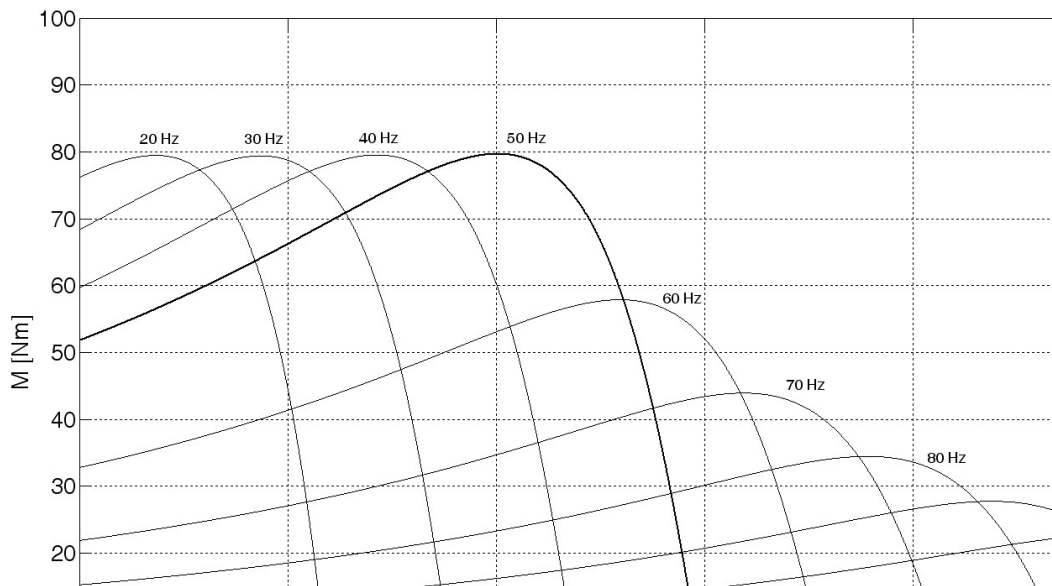
Ukoliko se motoru treba povećati brzina iznad sinhrone brzine odnosno ići na učestanosti veće od osnovne učestanosti, napon se više ne smije mijenjati - podizati proporcionalno učestanosti. Maksimalni dozvoljeni napon na namotajima motora je nominalni napon, tako da se rastom učestanosti iznad osnovne neminovno smanjuje vrijednost magnetskog fluksa kao i vrijednosti prevalnog momenta pri čemu se prevalni moment, zanemarujući otpornost faznog namotaja statora, mijenja obrnuto proporcionalno kvadratu učestanosti (sinhrone brzine, brzine rotora):

$$\frac{M_{prmf_2}}{M_{prmf_1}} = \frac{\left(\frac{U_T}{f_2}\right)^2}{\left(\frac{U_T}{f_1}\right)^2} = \left(\frac{f_1}{f_2}\right)^2 \Rightarrow M_{prmf_2} = \left(\frac{f_1}{f_2}\right)^2 M_{prmf_1} \quad (61)$$

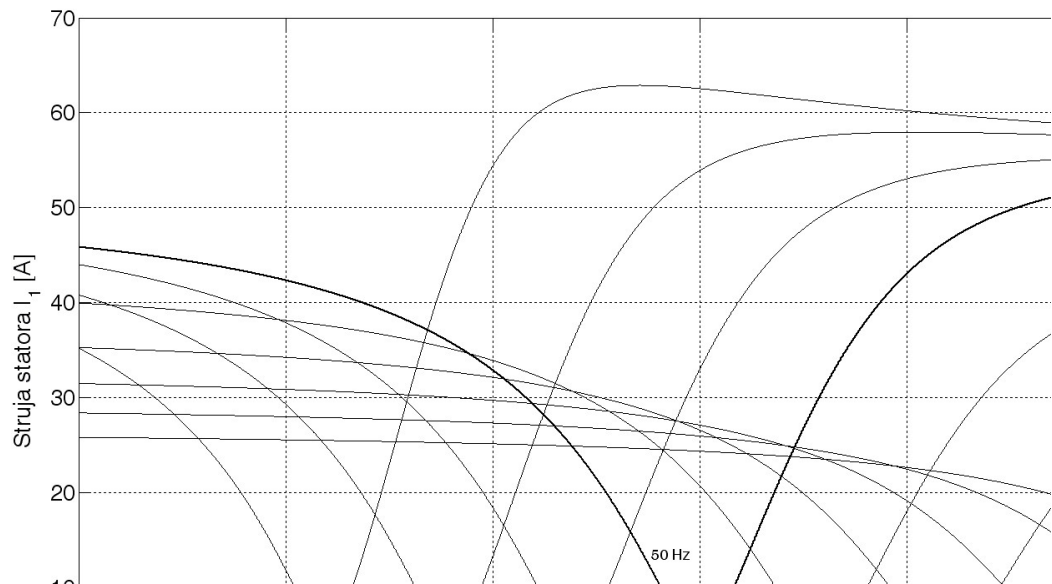
Ova zavisnost se može uočiti, za analizirani motor, sa slike 28.

Za učestanosti ispod 50Hz prevalni moment ostaje nepromijenjen – napon i učestanost se mijenjaju na ranije opisani način, „forsiranjem napona“ u odnosu na učestanost. Ovaj opseg učestanosti ili brzina je poznat kao opseg stalnog momenta ili opseg konstantnog fluksa.

Za učestanosti iznad 50Hz, prevalni moment opada. Recimo, za učestanost od 100Hz prevalni moment iznosi oko ¼ od prevalnog momenta u regionu stalnog momenta tj. oko 20Nm. Opseg učestanosti iznad osnovne je poznat i kao opseg oslabljenog fluksa (*field weakening region*) ili opseg stalne snage – rastom učestanosti raste brzina ali se smanjuje moment tako da njihov proizvod, snaga, ostaje konstantan.



Slika 28. Uticaj promjene učestanosti i efektivne vrijednosti napona napajanja na momentne karakteristike asinhronog motora na dijapazonu brzina od nulte do dvostruke sinhronne brzine



Slika 29. Uticaj promjene učestanosti i efektivne vrijednosti napona napajanja na struju statora asinhronog motora na dijapazonu brzina od nulte do dvostruke sinhronne brzine

Primjer 5. (FTN Novi Sad) Trofazni asinhroni motor s kaveznim rotorom pokreće dizalicu čiji je moment opterećenja stalan i iznosi 80% nominalnog momenta motora. U cilju podešavanja brzine moguća je kontinualna promena učestanosti uz uslov $U/f = \text{const}$. Odrediti brzinu rotora ako je frekvencija napona napajanja 35Hz. Podaci motora: 4kW, 380V, 50Hz, 9A, 1440 obr/min.

Rešenje:

Nominalno klizanje motora je, na 50Hz:

$$s_{n50} = \frac{n_{s50} - n_n}{n_{s50}} = \frac{1500 - 1440}{1500} = 0.04$$

Pri učestanosti od 35Hz, sinhrona brzina je:

$$n_{s35} = \frac{60f}{p} = \frac{60 \cdot 35}{2} = 1050 \frac{\text{obr}}{\text{min}}$$

Kako su karakteristike pri 50 i 35Hz paralelne, slika 27, slika p5.1, važi sledeći odnos:

$$\frac{M_n}{1500 - 1440} = \frac{M_n}{1050 - n_{n35}} \Rightarrow n_{n35} = 1050 - 1500 + 1440$$

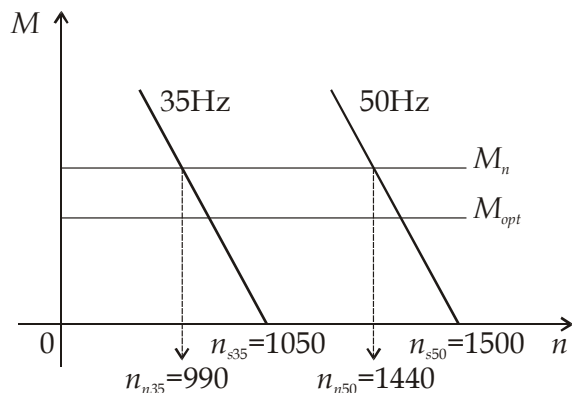
$$n_{n35} = 990 \frac{\text{obr}}{\text{min}}$$

$$s_{n35} = \frac{1050 - 990}{1050} = 0.057$$

Iz istih razloga se može postaviti sledeći odnos (argument sličnosti trouglova i aproksimacija linearne zavisnosti momenta u funkciji klizanja koja važi za male vrijednosti klizanja),

$$\frac{M_n}{s_{n35}} = \frac{M_{opt}}{s_{35}} \Rightarrow s_{35} = \frac{M_{opt}}{M_n} s_{n35} = \frac{0.8M_n}{M_n} s_{n35} = 0.8 \cdot s_{n35}$$

$$s_{35} = 0.0456$$



Slika p5.1.

pa je brzina rotora pri opterećenju $0.8M_n$ i učestanosti 35Hz:

$$n_{35} = (1 - s_{35}) \cdot n_{s35} = (1 - 0.0456) \cdot 1050$$

$$n_{35} = 1002 \frac{\text{obr}}{\text{min}} \clubsuit$$

7. ASINHRONI GENERATOR

Iako je osnovno područje primjene klasičnih, trofaznih asinhronih mašina, industrija, gdje ih uglavnom nalazimo u motornom režimu rada, danas se one sve češće koriste kao generatori u malim hidroelektranama kao i u sklopu vjetroagregata.

I ovdje su u upotrebi kavezni asinhroni generatori (*SCIG – squirrel cage induction generator*) kao i oni sa namotanim rotorom. Asinhroni generatori sa namotanim rotorom se mogu naći uglavnom kod vjetroagregata gdje se koriste kao dvostrano napajani asinhroni generatori (*DFIG – double fed induction generator*).

7.1. KAVEZNI ASINHRONI GENERATOR

Asinhroni generator ima jednu zgodnu osobinu koja ga preporučuje za primjenu u malim hidroelektranama i vjetroagregatima. Ukoliko je asinhrona mašina priključena na mrežni napon, tj. na električnu mrežu, dovoljan uslov da ona radi kao generator jeste da pogonska turbina pogoni rotor brzinom većom od sinhronne brzine, koju definiše učestanost napona mreže i broj pari polova mašine. Tada, bez obzira na to kolika je ta brzina, koja se, istina, može mijenjati u vrlo uskim granicama koje su definisane sinhronom brzinom i onom brzinom kojoj odgovara prevalni generatorski moment, generator predaje mreži aktivnu snagu uvijek iste učestanosti (učestanost mreže) pri istom naponu (napon mreže).

Ukoliko bi snaga na vratilu generatora bila toliko velika da vratilo generatora počne da rotira brzinom većom od brzine kojoj odgovara prevalno generatorsko klizanje, rotor bi nastavio da se nekontrolisano ubrzava – rad generatora postaje nestabilan.

Generatorskom radnom režimu odgovara negativna vrijednost klizanja. Aktivna komponenta struje rotora a tim i statora, u ovom radnom režimu mijenja svoj smjer u odnosu na motorni režim. Kao rezultat tog procesa, tok aktivne snage se mijenja u odnosu na motorni režim rada tako da se ona sada predaje mreži. Što se reaktivne snage tiče, ona se i u ovom radnom režimu preuzima iz mreže kao neophodan uslov magnećenja magnetskog kola mašine.

Ukoliko kavezni asinhroni generator treba da radi autonomno, ne paralelno sa mrežom, tada je za magnećenje magnetskog kola potrebno ostvariti uslove samopobuđivanja, na način donekle sličan samopobudnom, otočnom generatoru jednosmjerne struje. To se, kod generatora koji su prethodno makar jednom bili magnećeni, ostvaruje priključivanjem baterije kondenzatora paralelno generatoru. U ovom slučaju, autonomnog ili ostrvskog režima rada, učestanost generisanog napona kao i njegova efektivna vrijednost zavise od mnogo faktora kao što su brzina rotora, veličina opterećenja, karakter tj. faktor snage opterećenja itd. Detaljnija analiza ostrvskog radnog režima prevazilazi okvire ovog kursa.

Primjer 6. Trofazna asinhrona mašina iz primjera 2, nominalnih podataka 4kW, 380V, Y, 8.6A, $\cos\varphi=0.83$, 1435 obr/min, ima sledeće parametre IEEE preporučene ekvivalentne šeme:

$$R_1 = 1.2\Omega \quad R_2' = 1.4\Omega \quad X_{\sigma 1} = 2.075\Omega \quad X_{\sigma 2}' = 2.075\Omega \quad X_m = 50\Omega$$

Mašina radi u generatorskom režimu, pri čemu je brzina rotora 1550 obr/min. a) Izračunati aktivnu i reaktivnu snagu koju generator predaje/uzima iz mreže; b) Izračunati stepen iskorišćenja generatora u ovom radnom režimu.

Rešenje:

a) Klizanje u ovom radnom režimu je:

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{1500 - 1550}{1500} = -0.0333$$

Ulazna impedansa mašine, posmatrana sa strane statora je,

$$\underline{Z}_{ul} = \underline{Z}_1 + \frac{\underline{Z}_m \underline{Z}_2}{\underline{Z}_m + \underline{Z}_2}$$

gdje su,

$$\underline{Z}_1 = R_1 + jX_{\sigma 1}$$

$$\underline{Z}_2 = \frac{R_2'}{s} + jX_{\sigma 2}'$$

$$\underline{Z}_m = jX_m$$

Za date brojne podatke, brojna vrijednost ulazne impedanse po fazi, je:

$$\underline{Z}_{ul} = \underline{Z}_1 + \frac{\underline{Z}_m \underline{Z}_2}{\underline{Z}_m + \underline{Z}_2} = (-22.26 + j23)\Omega$$

Kompleksna ulazna struja, fazna struja statora, je odnos faznog napona i ulazne impedanse po fazi:

$$I_1 = \frac{U_1}{\underline{Z}_{ul}} = \frac{220 \angle 0^\circ}{-22.26 + j23} = (-4.78 - j4.94)A = 6.874 \angle -134^\circ A$$

pa je ukupna, trofazna kompleksna snaga:

$$\underline{S} = 3\underline{U}_1 I_1' = 3 \cdot 220 \cdot (-4.78 + j4.94) = (-3155 + j3260)VA$$

Iz dobijene kompleksne snage jasno je da je aktivna snaga,

$$P = 3.15kW$$

snaga koja se predaje mreži jer je sa negativnim znakom – usvojeni smjer struje u ekvivalentnoj šemi odgovara motornom režimu rada. Reaktivna snaga,

$$Q = 3.26kVAr$$

je snaga koju generator preuzima iz mreže a potrebna mu je za magnećenje magnetskog kola

b) Struja u kolu rotora je,

$$I_2' = \frac{Z_m}{Z_m + Z_2} I_1 = (-5.097 - j0.628)A = 5.1354 \angle -172.97^\circ A$$

pa je ulazna mehanička snaga na osovini generatora:

$$P_{ul_mech} = 3R_2' \frac{1-s}{s} I_2'^2 = 3 \cdot 1.4 \frac{1+0.0333}{-0.0333} 5.1354^2 = -3444W$$

Stepen iskorišćenja generatora u ovom radnom režimu je:

$$\eta = \frac{P_{izlazno}}{P_{ulazno}} = \frac{3150}{3444} = 0.915 \clubsuit$$

Primjer 7. Za trofaznu asinhronu mašinu su poznati sledeći podaci: 90kW, 400V, 50Hz, sprega D, 985 obr/min, 872Nm, $I_n=164A$, $\eta_n=94.5\%$, $\cos\phi_n=0.84$, $M_{pol}/M_n=3$, $I_{pol}/I_n=7$, $M_{pr}/M_n=2.6$. Mašina je priključena na mrežu nominalnog napona, nominalne učestanosti. Vratilo mašine se rotira brzinom od 1010 obr/min u smjeru obrtanja obrtnog magnetskog polja. Odrediti aktivnu i reaktivnu snagu mašine u ovom radnom režimu. Otočna grana magnećenja, gubici u gvožđu kao i mehanički gubici se mogu zanemariti.

Rešenje:

Iz datih podataka se vidi da asinhrona mašina radi u generatorskom režimu rada pri klizanju:

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{1000 - 1010}{1000} = -0.01$$

Nominalno klizanje motora je,

$$s_n = \frac{n_s - n_n}{n_s} = \frac{1000 - 985}{1000} = 0.015$$

a nominalni moment je dat tekstem zadatka, $M_n=872Nm$. Iz kvadratne jednačine koja slijedi iz Klosovog obrasca, za prevalno klizanje motora se dobija jedna vrijednost koja ima smisla, ona koja je veća od nominalnog klizanja:

$$\frac{M_n}{M_{pr}} = \frac{2}{\frac{s_n}{s_{pr}} + \frac{s_{pr}}{s_n}} \Rightarrow \frac{M_n}{M_{pr}} = \frac{2s_n s_{pr}}{s_n^2 + s_{pr}^2} = \frac{1}{2.6} \Rightarrow s_{pr}^2 - 5.2s_n s_{pr} + s_n^2 = 0$$

$$s_{prm} = 0.075$$

Pri nominalnom klizanju, u motornom režimu rada, važe sledeći odnosi,

$$M_n = \frac{P_n}{(1-s_n)\omega_s} = \frac{P_{obr}}{\omega_s} = \frac{P_{Cu2}}{s_n \omega_s} = \frac{3R_2' I_2'^2}{s_n \omega_s} = \frac{3R_2' I_{1n}^2}{s_n \omega_s} \Rightarrow R_2' = \frac{M_n s_n \omega_s}{3I_{1n}^2}$$

pa je otpornost faznog namotaja rotora, svedena na stator:

$$R_2' = \frac{M_n s_n \omega_s}{3I_{1n}^2} = \frac{872 \cdot 0.015 \cdot 104.67}{3 \cdot (164/\sqrt{3})^2} = 0.051\Omega$$

U pretposljednem izrazu je usvojeno da je fazna struja statora jednaka faznoj struji rotora svedenoj na stator, tj. zanemarena je otočna grana magnećenja. Iz aproksimativne relacije za prevalno klizanje sledi,

$$s_{prm} = 0.075 = \frac{R_2'}{X_T + X_{\sigma 2}'} = \frac{0.051}{X_T + X_{\sigma 2}'}$$

pa je zbir reaktansi u rednoj grani ekvivalentne šeme:

$$X_T + X_{\sigma 2}' = \frac{0.051}{0.075} = 0.68\Omega$$

Aproksimirajući momentnu karakteristiku u okolini sinhronne brzine linearnom zavisnošću,

$$M = M_n + \frac{M_n}{s_n}(s - s_n)$$

za $s = -0.01$, $M_n = 872 \text{ Nm}$ i $s_n = 0.015$ sledi:

$$M = 872 + \frac{872}{0.015}(-0.01 - 0.015) = -581.33 \text{ Nm}$$

Mehanička snaga na osovini generatora je:

$$P_{vratila} = \frac{M \cdot n}{9.55} = -\frac{581.33 \cdot 1010}{9.55} = -61.48 \text{ kW}$$

Mehanička snaga na osovini motora, zanemarujući gubitke usled frikcije i ventilacije, kao što je to već poznato, u ekvivalentnoj šemi asinhronog motora se ekvivalentira Džulovim gubicima u otporniku zavisnom od klizanja, $R_2'(1-s)/s$. U slučaju generatora, mehanička snaga na osovini je negativna u odnosu na motorni režim rada. I ona se na isti način može ekvivalentirati Džulovim gubicima u istom otporniku čija je vrijednost takođe negativna. Drugim riječima, energija disipacije u tom otporniku je mehanička snaga na osovini generisana pogonskom turbinom. Iz te energije disipacije se može doći do struje rotora svedene na stator a tim i do struje statora:

$$P_{vratila} = 3R_2' \frac{1-s}{s} I_2'^2 \Rightarrow I_2' = I_1 = \sqrt{\frac{P_{vratila} s}{3R_2'(1-s)}}$$

$$I_1 = \sqrt{\frac{61480 \cdot 0.01}{3 \cdot 0.051 \cdot (1 - 0.01)}} = 63.71 \text{ A}$$

Snaga koja se šalje u električnu mrežu, dobija se kada se od snage na vratilu, u apsolutnom iznosu, oduzmu snage Džulovih gubitaka u namotajima statora i rotora, aproksimirajući $R_T = R_2'$,

$$P = P_{vratila} - 3R_2' I_2'^2 - 3R_T I_1^2 = P_{vratila} - 3(R_2' + R_T) I_1^2 \cong P_{vratila} - 6R_2' I_1^2 = 61480 - 6 \cdot 0.051 \cdot 63.71^2$$

$$P \cong 60 \text{ kW}$$

$$Q = 3(X_T + X_2') I_1^2 = 3 \cdot 0.68 \cdot 63.71^2 = 8.28 \text{ kVar}$$

Izračunata aktivna snaga P se predaje električnoj mreži dok se iz nje istovremeno preuzima reaktivna snaga Q ♣

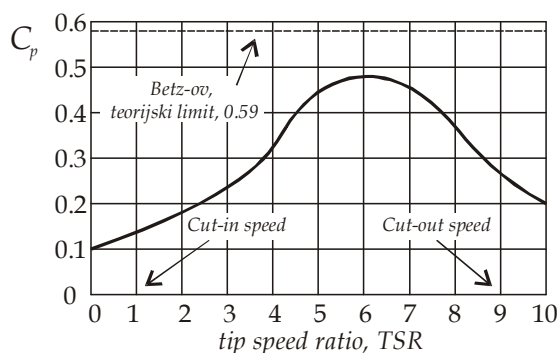
7.2. DVOSTRANO NAPAJANI ASINHRONI GENERATOR

Što se tiče dvostrano napajano asinhronog generatora, njegova osnovna primjena jeste kod vjetroagregata.

Vjetroturbina ima jednu interesantnu osobinu: količina energije koja može biti „izvučena“ iz energije vjetra zavisi, između ostalog, od tzv. *tip speed ratio*. *Tip speed ratio* je bezdimenzioni koeficijent koji se dobija kao odnos linijske brzine vrha elise (m/s) i brzine vjetra (m/s):

$$TSR = \frac{\text{brzina vrha kraka elise}}{\text{brzina vjetra}} \quad (62)$$

Svaka vjetroturbina se opisuje zavisnošću koeficijenta snage C_p u funkciji TSR -a, slika 30. Pri različitim brzinama vjetra, u cilju „hvatanja“ što veće količine energije iz energije vjetra, brzinu turbine a samim tim i generatora kog ta turbina pogoni treba regulisati tako da radi pri onom TSR -u pri kom je količina „uhvaćene“ energije maksimalna – ostvariti maksimalan koeficijent snage C_p .

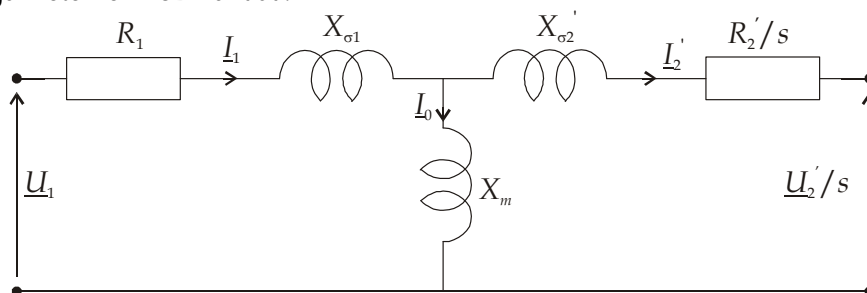


Slika 30. Koeficijent snage C_p u funkciji TSR -a za rotor sa dva kraka

Upravo tu mogućnost regulacije brzine daje dvostrano napajani asinhroni generator.

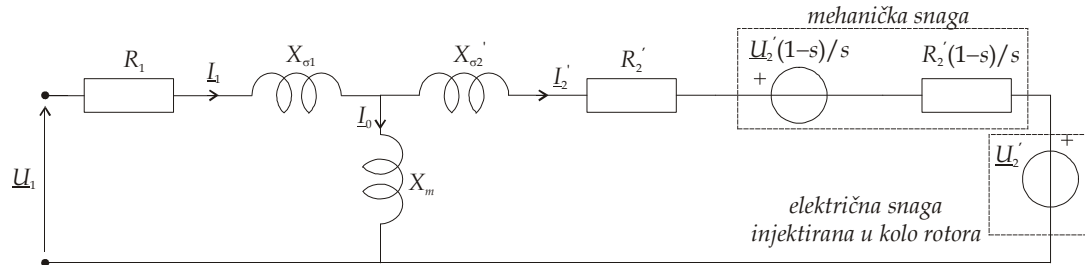
Ideja je sledeća: ubacivanjem napona u rotorsko kolo, odgovarajuće učestanosti i faznog stava u odnosu na indukovanu ems u namotajima rotora, moguće je uticati na veličinu i smjer toka aktivne i reaktivne snage kako rotorskog tako i statorskog kola. Na opisani način je moguće ostvariti generatorski režim rada mašine čak i pri brzinama koje su manje od sinhronne (generatorski podsinhroni režim !!!) kao što je moguće, a što ovdje nije od interesa, omogućiti i motorni režim rada mašine iznad sinhronne brzine (motorni nadsinhroni režim !!!).

Opisana konfiguracija ima dosta prednosti ali i nedostataka. Osnovni problem jeste potreba za ubacivanjem napona u kolo rotora koji su malih učestanosti, učestanosti klizanja, dakle, potreba za frekventnim pretvaračem sa strane rotora, komplikovana upravljačka struktura, visoka cijena itd. Zamjenska šema jedne faze simetričnog, trofaznog, dvostrano napajano asinhronog generatora, svedena na primarnu stranu, prikazana je slikom 31. Smjerovi struja na slici su izabrani tako da odgovaraju motornom režimu rada.



Slika 31. Ekvivalentno kolo dvostrano napajano asinhronog generatora svedeno na stranu statora

Modifikovana ekvivalentna šema dvostrano napajanog asinhronog generatora data je slikom 32, [2]. U ovoj šemi su radvojeni elementi u kojima se troši ili generiše električna i troši ili generiše mehanička snaga.



Slika 32. Modifikovano ekvivalentno kolo dvostrano napajanog asinhronog generatora svedeno na stranu statora

Prilikom primjene ekvivalentne šeme sa slike 32. treba biti oprezan jer je mehanička snaga na vratilu mašine, zanemarujući gubitke usled frikcije i ventilacije ne zbir već razlika snaga u uokvirenom elementu,

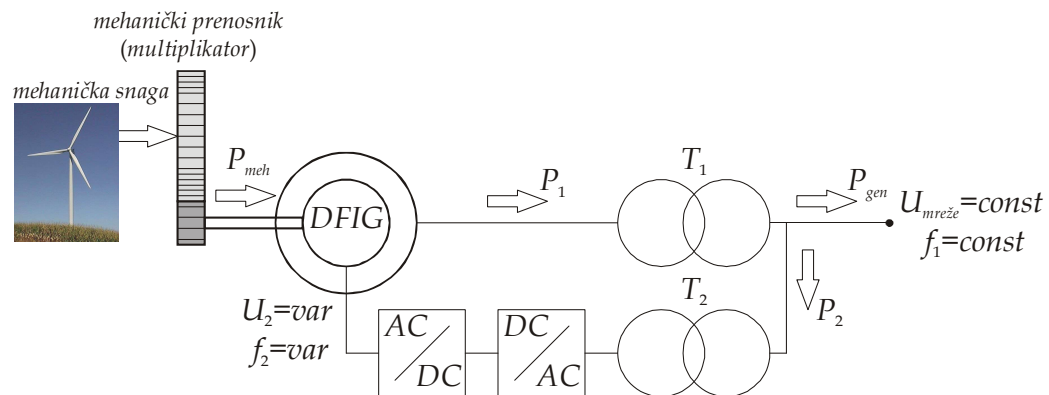
$$P_{meh} = 3 \cdot \frac{1-s}{s} \cdot (\Re\{\underline{U}_2' \underline{I}_2'^*\} - R_2' I_2'^2) = \frac{1-s}{s} \cdot (P_{d12} - P_{Cu2}) \quad (63)$$

pa je moment na vratilu mašine:

$$M = \frac{P_{meh}}{\omega_r} = \frac{P_{meh}}{\omega_s(1-s)} = \frac{P_{d12} - P_{Cu2}}{s\omega_s} \quad (64)$$

Slika 33. prikazuje tipičnu strukturu vjetroelektrane sa dvostrano napajanim asinhronim generatorom. Usled male ugaone brzine turbine a u cilju korišćenja asinhronih mašina sa malim brojem pari polova, potrebno je postojanje posrednika između elise i generatora tzv. multiplikator, mehanički prenosnik koji povećava brzinu i smanjuje momenat tako da, zanemarujući gubitke u samom prenosniku, prenešena snaga ostaje ista.

Generisana električna snaga vjetrogeneratora se u mrežu stalnog napona prenosi preko transformatora T_1 . Istovremeno je na mrežu vezan transformator T_2 , koji napon mreže spušta na odgovarajući nivo. Taj napon stalne efektivne vrijednosti i učestanosti mreže se prvo ispravlja a zatim ponovo pretvara u naizmjenični, putem invertora, promjenljive i efektivne vrijednosti i učestanosti i „ubacuje“ u rotorsko kolo. Iako na slici prikazani odvojeno, dva transformatora T_1 i T_2 se obično nalaze na istom magnetskom jezgru i čine jedinstven tronamotajni transformator. Tok snage u kolu rotora sa slike je prikazan za tzv. podsinhroni režim. U nadsinhronom režimu je smjer toka snage u kolu rotora invertovan: sada i električna snaga iz rotora ide u mrežu.

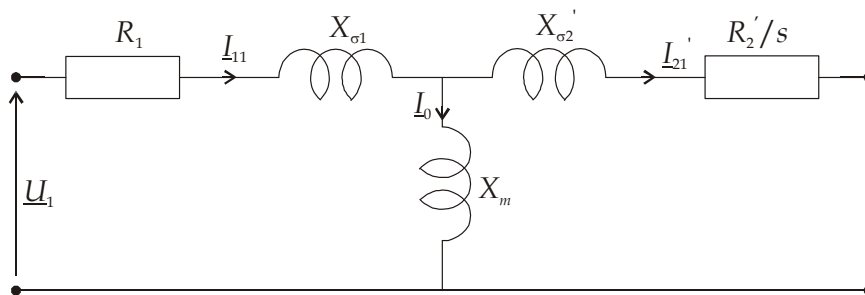


Slika 33. Tok aktivne snage dvostrano napajanog asinhronog generatora: P_2 je približno jednako sP_1 , pa je P_{gen} približno jednako $(1-s)P_1$

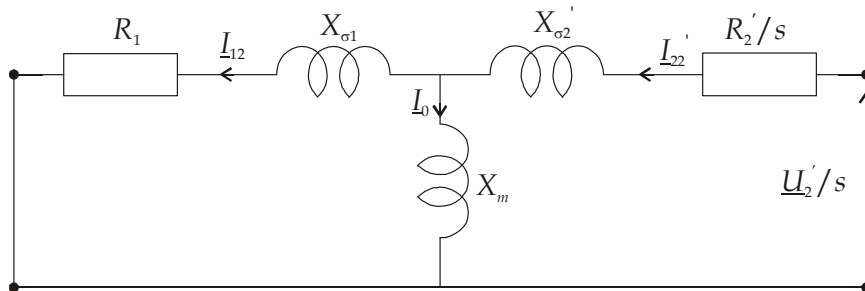
Primjer 8. Poznati su parametri ekvivalentne šeme trofazne asinhronne mašine sa namotanim rotorom: $R_1=R_2'=0.5\Omega$, $X_1=X_2'=1.5\Omega$, $X_m=60\Omega$. Fazni napon namotaja statora je 230V a mašina je sa dva para polova. a) Odrediti intenzitet i fazni stav napona kog treba ubaciti u namotaj rotora kako bi ova mašina iz motornog u generatorski režim rada prešla na 80% sinhronne brzine; b) Pri određenoj vrijednosti napona mašina radi kao generator na brzini od 1300 obr/min. Napraviti bilans snaga za ovaj slučaj.

Rešenje:

Standardna, IEEE preporučena zamjenska šema asinhronne mašine sa namotanim rotorom će se analizirati primjenom metode superpozicije - razlaganjem na dva kola u kojima djeluje samo po jedan naponski izvor dok je drugi kratkospojen.



Slika p8.1. Ekvivalentno kolo dvostrano napajanog asinhronog generatora u kom djeluje samo mrežni napon



Slika p8.2. Ekvivalentno kolo dvostrano napajanog asinhronog generatora u kom djeluje samo napon sa strane rotora

a) Po uslovu zadatka, u kolo rotora je potrebno ubaciti napon tako da mašina iz motornog u generatorski režim rada pređe ne pri sinhronoj brzini, kako je to „normalno“ već pri 80% sinhronne brzine. Drugim riječima, treba ubaciti takav napon u kolo rotora da struja u kolu rotora bude jednaka nuli ne pri sinhronoj brzini (kako je „normalno“) već pri 80% sinhronne brzine tj. pri brzini $n_r=0.8 \cdot 1500=1200$ obr/min, odnosno pri klizanju $s=(1500-1200)/1500=0.2$.

Iz prvog kola se dobija struja I_{21}' :

$$I_{21}' = \frac{Z_m}{Z_m + Z_2} \frac{U_1}{Z_{u11}} = \frac{Z_m}{Z_m + Z_2} \frac{U_1}{Z_1 + \frac{Z_m Z_2}{Z_m + Z_2}} = \frac{Z_m}{Z_m + Z_2} \frac{U_1 (Z_m + Z_2)}{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_m + Z_2 Z_m} = \frac{Z_m}{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_m + Z_2 Z_m} U_1$$

Iz drugog kola se dobija struja I_{22}' :

$$I'_{22} = \frac{U'_2}{sZ_{u12}} = -\frac{U'_2}{s\left(Z_2 + \frac{Z_m Z_1}{Z_m + Z_1}\right)} = \frac{Z_1 + Z_m}{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_m + Z_2 Z_m} \frac{U'_2}{s}$$

Po uslovu zadatka struja u rotorskom kolu pri klizanju $s=0.2$ treba da bude jednaka nuli:

$$I'_2 = I'_{21} - I'_{22} = \frac{1}{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_m + Z_2 Z_m} \left(Z_m U_1 - (Z_1 + Z_m) \frac{U'_2}{s} \right) = 0$$

$$Z_m U_1 - (Z_1 + Z_m) \frac{U'_2}{s} = 0$$

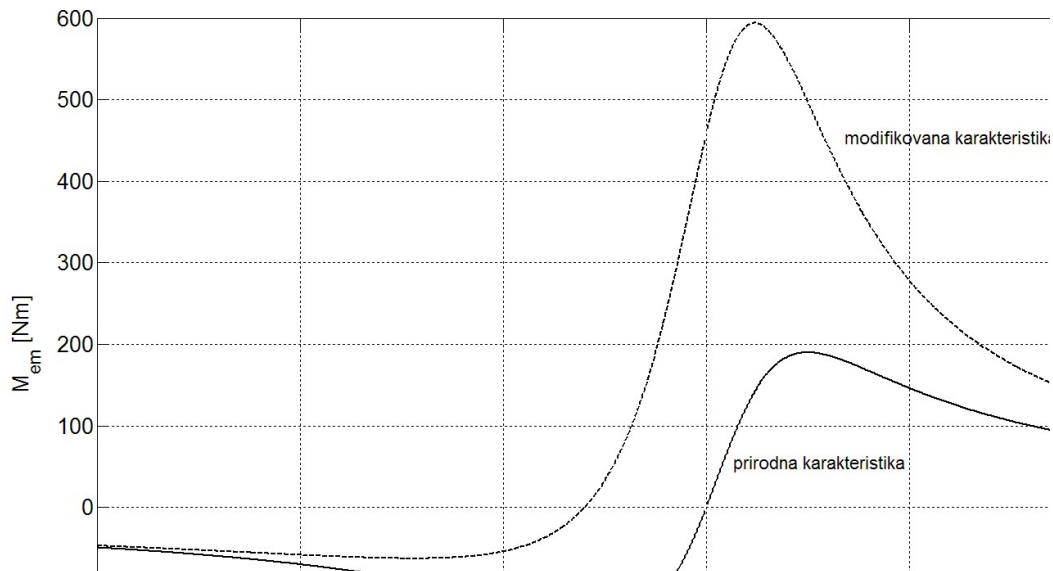
$$U'_2 = \frac{sZ_m}{Z_1 + Z_m} U_1 = 0.2 \frac{jX_m}{R_1 + j(X_1 + X_m)} \cdot 230 = \frac{60 \angle 90^\circ}{0.5 + j(1.5 + 60)} \cdot 46$$

$$U'_2 = \frac{60 \angle 90^\circ}{61.5 \angle 89.53^\circ} \cdot 46 = (44.87 + j0.365)V$$

$$\boxed{U'_2 \approx 45 \angle 0^\circ V}$$

Dakle, u kolo rotora treba ubaciti napon čija je vrijednost, svedena na stator, približno 45V pri čemu je on u fazi sa naponom statora.

Slika p8.3. prikazuje zavisnost momenta u funkciji brzine rotora za nađenu vrijednost napona u kolu rotora kao i prirodnu karakteristiku.



Slika p8.3. Prirodna i modifikovana momentna karakteristika

Sa slike je očigledno da je nova „sinhrona brzina“ 1200 obr/min i da mašina radi kao generator pri svim brzinama većim od nje. Time je ostvaren *podsinhroni generatorski režim rada* na račun izvesne količine električne energije koja se ubacuje sa strane rotora.

Sa slike se vidi da dodati napon skoro da nema nikakvog uticaja na momentnu karakteristiku za mala i velika klizanja (za brzine bliske nuli i visoke brzine) jer je taj napon zanemariv u odnosu na indukovanu ems u kolu rotora pri tim brzinama. Međutim, u okolini sinhronne brzine, gdje je

indukovana ems mala po vrijednosti, struju u kolu rotora uglavnom diktira „ubačeni“ napon i značajno modelira momentnu karakteristiku.

Slika p8.4. prikazuje zavisnost struja statora i rotora u funkciji brzine rotora za nađenu vrijednost napona u kolu rotora kao i prirodnu karakteristiku. Struja rotora na 1200 obr/min pada na nultu vrijednost čime je ostvarena „nova“ sinhrona brzina. Istovremeno, na toj brzini struja statora ima minimum, jednak struji praznog hoda mašine.

b) Na brzini 1300 obr/min mašina radi u generatorskom režimu rada zahvaljujući ubačenom naponu u kolu rotora. Brojni podaci koji opisuju generator u ovom radnom režimu su:

$$\underline{U}_1 = 230 \angle 0^\circ V$$

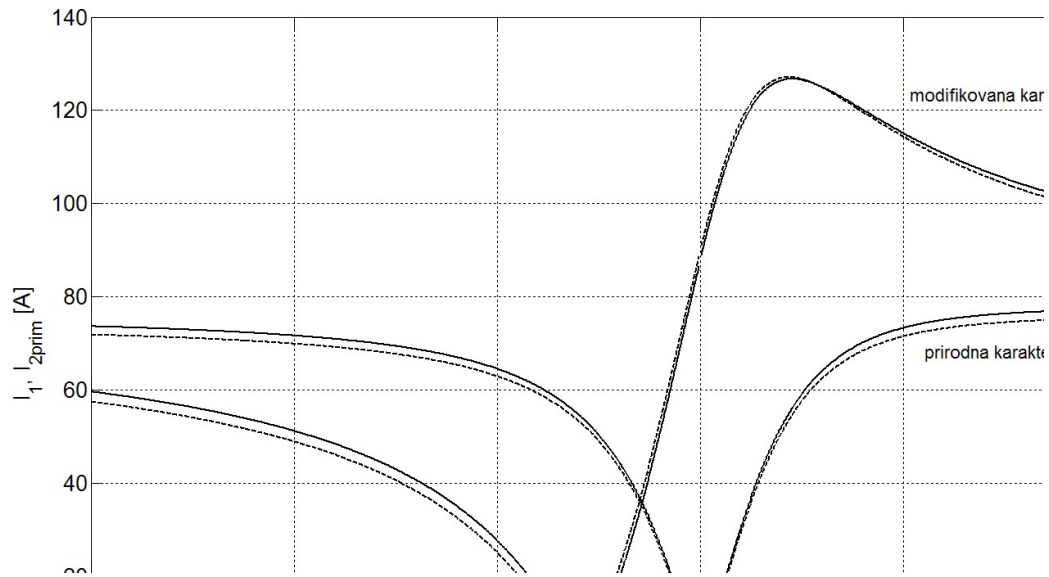
$$\underline{U}_2 = 45 \angle 0^\circ V$$

$$M = -80.49 Nm$$

$$n_r = 1300 \frac{\text{obr}}{\text{min}}$$

$$\underline{I}_1 = 19.32 \angle -24.97^\circ A$$

$$\underline{I}_2 = 21.73 \angle -34.61^\circ A$$



Slika p8.4. Prirodna i modifikovana strujna karakteristika

Vrijednost prethodne dvije struje se dobija iz ekvivalentne šeme za nađenu vrijednost ubačenog napona u kolo rotora i odgovarajuće klizanje.

Sa strane rotora u mašinu ulazi električna snaga:

$$P_2 = 3 \cdot \Re \{ \underline{U}_2 \underline{I}_2^* \} = 2394 W$$

Ulazna mehanička snaga je:

$$P_{mech} = 10958 W$$

Snaga gubitaka u kolu statora i rotora je:

$$P_{Cu1} = 3 \cdot R_1 \cdot I_1^2 = 559W$$

$$P_{Cu2} = 3 \cdot R_2 \cdot I_2^2 = 708W$$

Snaga na statoru je:

$$P_1 = 3 \cdot \Re\{\underline{U}_1 \underline{I}_1^*\} = 12084W$$

i njen znak, u skladu sa izabranim referentnim smjerom napona i struje u ekvivalentnom kolu pokazuje da se ta snaga predaje električnoj mreži. Dakle, na ulazu u mašinu imamo mehaničku i električnu snagu sa strane rotora:

$$P_{ulazno} = P_{meh} + P_2 = 13352W$$

Snaga na izlazu se može dobiti i na sledeći način:

$$P_1 = P_{ulazno} - P_{Cu1} - P_{Cu2} = 12084W$$

Stepen iskorišćenja generatora u ovom radnom režimu je:

$$\eta = \frac{P_{izlazno}}{P_{ulazno}} = \frac{12084}{13352} = 0.905 \clubsuit$$

8. DOPRINOS ASINHRONOG MOTORA STRUJI KRATKOG SPOJA

Kada se negdje u električnoj mreži, sa koje se napaja asinhroni motor, dogodi kratak spoj, pri čemu će ovdje biti posmatran simetričan, troljni kratak spoj kao najjednostavniji za analizu, na prvi pogled se ne dešava ništa posebno sa aspekta asinhronog motora. Naime, on ostaje bez napona i zavisno od vrijednosti momenta inercije rotora i opterećenja na vratilu, motor će se, brže ili sporije, zaustaviti.

Međutim, stvari nijesu baš tako jednostavne. Usled krakog spoja, u jednom prilično kratkom vremenskom intervalu nakon nastanka kratkog spoja asinhroni motor dobija ulogu generatora, koji pretvara energiju akumulisanu u rotirajućim masama u električnu energiju, napajajući mjesto kratkog spoja. Iz tog razloga je bitno, posebno u slučaju asinhronih motora većih snaga, znati izračunati doprinos asinhronog motora struji kratkog spoja a u cilju ispravnog dimenzionisanja zaštitne rasklopne opreme u razvodnim postrojenjima.

Postoji nekoliko različitih pristupa u računanju ove struje, [3]. Međunarodni standard IEC 60909, *Short-circuit currents in three-phase a.c. systems*, opisuje način računanja ove struje u slučaju asinhronih motora na sledeći način: prvo se određuje impedansa motora u slučaju kratkog spoja:

$$Z_M = \frac{1}{I_{pol}/I_n} \frac{U_n}{\sqrt{3}I_n} = \frac{1}{I_{pol}/I_n} \frac{U_n^2}{S_n} \quad (65)$$

Efektivna vrijednost početne simetrične struje kratkog spoja se računa na osnovu sledećeg izraza,

$$I_{k3}^* = \frac{1.1 \cdot U_n}{\sqrt{3}Z_M} \quad (66)$$

a udarna struja kratkog spoja je,

$$i_{p3M} = \kappa_m \sqrt{2} \cdot I_{k3}^* \quad (67)$$

gdje faktor κ_m ima vrijednost:

$\kappa_m=1.75$ za visokonaponske motora čija je snaga po paru polova veća ili jednaka od 1 MW

$\kappa_m=1.65$ za visokonaponske motora čija je snaga po paru polova manja od 1 MW

$\kappa_m=1.30$ za niskonaponske motore

Primjer 9. Izračunati udarnu struju trolejnog kratkog spoja trofaznog asinhronog motora sledećih podataka: 200kW, 1487 obr/min, 400V, 343A, $\eta=95.5\%$, $\cos\varphi=0.88$, $I_{pol}/I_n=6$, $M_{pol}/M_n=2.1$, $M_{pr}/M_n=2.7$, $J=4.49\text{kgm}^2$.

Rešenje:

Impedansa kratkog spoja je:

$$Z_M = \frac{1}{I_{pol}/I_n} \frac{U_n}{\sqrt{3}I_n} = \frac{1}{6} \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 343} = 0.1122\Omega$$

Efektivna vrijednost početne simetrične struje kratkog spoja je,

$$I_{k3}^* = \frac{1.1 \cdot U_n}{\sqrt{3}Z_M} = \frac{1.1 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot 0.1122} = 2264 A$$

a udarna struja kratkog spoja je,

$$i_{p3M} = \kappa_m \sqrt{2} \cdot I_{k3}^* = 1.3 \cdot \sqrt{2} \cdot 2264 = 4156 A$$

i dvanaest puta je veća od nominalne struje motora ♣