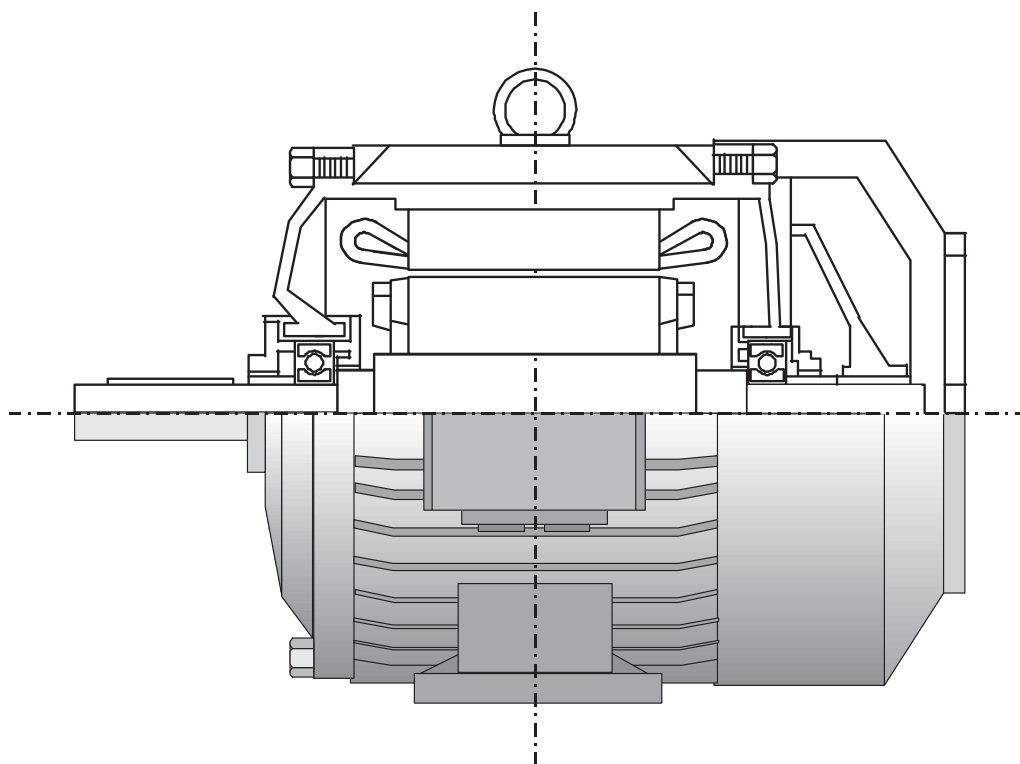


PRIRUČNICI TEHNIČKOG VELEUČILIŠTA U ZAGREBU
MANUALIA POLYTECHNICI STUDIORUM ZAGRABIENSIS

IVAN MANDIĆ
VESELKO TOMLJENOVIĆ
MILICA PUŽAR



SINKRONI I ASINKRONI ELEKTRIČNI STROJEVI

ZAGREB, 2012.



Nakladnik

Tehničko veleučilište u Zagrebu

Elektrotehnički odjel

Autori

prof.dr.sc. Ivan Mandić
mr.sc. Veselko Tomljenović, v.predavač
mr.sc. Milica Pužar, v.predavač

Recenzenti

prof.dr.sc. Ivan Gašparac
doc.dr.sc. Željko Hederić

Objavljivanje je odobrilo Stručno vijeće Tehničkog veleučilišta u
Zagrebu, odlukom broj: 1329-1/12 od 23.10.2012. godine.
Udžbenik

CIP zapis dostupan u računalnom katalogu
Nacionalne i sveučilišne knjižnice u Zagrebu pod brojem 823825

ISBN 978-953-7048-25-9



Predgovor

*Ovaj je udžbenik namijenjen studentima stručnog studija elektrotehnike i obuhvaća gradivo iz sinkronih i asinkronih strojeva za kolegij **Električni strojevi II**. Uvodni dio za ovaj kolegij predstavlja gradivo obuhvaćeno kolegijem **Električni strojevi I** koje je sadržano u knjizi **Wolf, R.: Osnove električnih strojeva** [1], pa stoga smatramo da je i dalje ta knjiga neophodna za električne strojeve. Ona sadrži i dio gradiva o sinkronim i asinkronim strojevima za kolegij **Električni strojevi II**, ali u ovom novom udžbeniku je prošireno gradivo o vrstama, karakteristikama i ispitivanju električnih strojeva. Pritom je teorijski pristup zadržan sličan kao u navedenoj knjizi prof. Wolfa. Oznake su većim dijelom usklađene s IEC preporukama.*

Autori

SADRŽAJ

1.	UVOD	1
1.1.	OSNOVNI POJMOVI	1
1.2.	VRSTE ELEKTRIČNIH STROJEVA	4
2.	SINKRONI STROJEVI	7
2.1.	OSNOVNA OBILJEŽJA	7
2.2.	VRSTE SINKRONIH STROJEVA	8
2.3.	IZVEDBE SINKRONIH STROJEVA	11
2.4.	UZBUDNI SUSTAVI	18
2.5.	OSNOVNI PODACI SINKRONIH STROJEVA	19
2.6.	NAČIN RADA	20
2.6.1.	Vektorsko-fazorski dijagram	23
2.6.2.	Prazni hod	28
2.6.3.	Opterećenje	30
2.6.4.	Kratki spoj	32
2.6.5.	Sinkrona reaktancija	35
2.6.6.	Nadomjesna shema	37
2.6.7.	Energetska ravnoteža	39
2.6.8.	Krivulja momenta	42
2.6.9.	Utjecaj istaknutih polova	44
2.6.10.	Utjecaj prigušnog kaveza	50
2.6.11.	Idealni i realni sinkroni stroj	50
2.6.12.	Regulacija napona i frekvencije	52
2.7.	RAD NA KRUTOJ MREŽI	53
2.7.1.	Ravnoteža protjecanja	55
2.7.2.	Ravnoteža frekvencija	57
2.7.3.	Utjecaj uzbude	57
2.7.4.	Utjecaj momenta na osovini	58
2.7.5.	Sinkroni motor	59
2.7.6.	Sinkronizacija generatora na mrežu	62
2.8.	ISPITIVANJA I KARAKTERISTIKE	65
2.8.1.	Ispitivanja pri gradnji	65
2.8.2.	Karakteristika praznog hoda	67
2.8.3.	Karakteristika kratkog spoja	69
2.8.4.	Krivulje regulacije	71
2.8.5.	V-krivulje	74
2.8.6.	Pogonska karta	76
2.8.7.	Udarni kratki spoj	79

3.	ASINKRONI STROJEVI	85
3.1.	OSNOVNA OBILJEŽJA	85
3.2.	IZVEDBE ASINKRONIH STROJEVA	86
3.3.	OSNOVNI PODACI ASINKRONIH STROJEVA	92
3.4.	NAČIN RADA	93
3.4.1.	Kliznokolutni motor s otvorenim rotorskim namotom	93
3.4.2.	Okretno protjecanje mirnog rotora	97
3.4.3.	Vrtnja rotora i klizanje	100
3.4.4.	Nadomjesna shema rotora	102
3.4.5.	Kružni dijagram rotorske struje i protjecanja	103
3.4.6.	Ravnoteža napona i protjecanja	107
3.4.7.	Energetska bilanca	111
3.4.8.	Nadomjesna shema	113
3.4.9.	Karakteristika struje	117
3.4.10.	Moment i karakteristika momenta	120
3.4.11.	Područja rada asinkronog stroja	125
3.4.12.	Utjecaj rotorske impedancije na moment	127
3.4.13.	Utjecaj viših harmonika	133
3.5.	ISPITIVANJA I KARAKTERISTIKE	136
3.5.1.	Ispitivanja tijekom proizvodnje	136
3.5.2.	Ispitivanje u praznom hodu	136
3.5.3.	Ispitivanje u kratkom spoju	141
3.5.4.	Karakteristike opterećenja	145
3.5.5.	Mjerenje klizanja	148
3.5.6.	Mjerenje momenta	149
3.5.7.	Karakteristika momenta	151
3.5.8.	Mjerenje zagrijavanja	154
3.6.	POKRETANJE I KOČENJE ASINKRONIH STROJEVA	155
3.6.1.	Pokretanje zvijezda-trokut	155
3.6.2.	Pokretanje kolutnih motora	156
3.6.3.	Kočenje asinkronim motorom	157
3.6.4.	Kočenje istosmjernom strujom	159
3.7.	UPRAVLJANJE BRZINOM VRTNJE	160
3.7.1.	Reverziranje	160
3.7.2.	Višebrzinski motori	161
3.7.3.	Upravljanje brzinom vrtnje promjenom otpora u rotorskom krugu	163
3.7.4.	Upravljanje brzinom vrtnje promjenom napona	164
3.7.5.	Upravljanje brzinom vrtnje promjenom frekvencije	166
3.8.	ASINKRONI GENERATOR	169
4.	POPIS OZNAKA	171
5.	LITERATURA	184
6.	KAZALO	185

1. UVOD

1.1. OSNOVNI POJMOVI

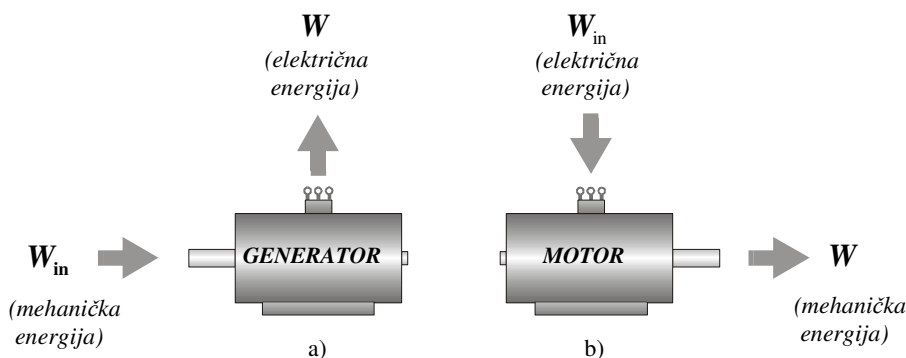
Električni strojevi su elektromehanički uređaji koji služe za pretvorbu energije. Prema smjeru pretvorbe energije dijele se na dvije vrste:

- generatori i
- motori.

Generatori su strojevi koji pretvaraju mehaničku energiju u električnu, dok motori pretvaraju električnu energiju u mehaničku.

Između električnih generatora i motora nema nikakve principijelne razlike. I jedni i drugi mogu pretvarati energiju u oba smjera: električnu u mehaničku i mehaničku u električnu. To znači da generatori mogu pretvarati električnu energiju u mehaničku, ali tada rade kao motori. Jednako tako i motori mogu pretvarati mehaničku energiju u električnu, ali tada rade kao generatori.

Da li će neki električni stroj raditi kao generator ili kao motor, ovisi o načinu uporabe. Ako stroju dovodimo mehaničku energiju preko osovine, on će raditi kao generator (slika 1.1.a)). Ako pak stroju dovodimo električnu energiju, radit će kao motor (slika 1.1.b)). Sama pretvorba se obavlja preko magnetskog polja.



Slika 1.1. Pretvorba energije u električnom stroju
a) generator,
b) motor.

Pri pretvorbi energije je važan odnos dovedene (primljene) i predane (korisne) energije. Predana energija W je uvijek manja od primljene W_{in} :

$$W < W_{in} \quad (1.1.)$$

Naime, kod svih strojeva se dio energije W_d troši u njima samima i pretvara u toplinu (toplinska energija), dakle uvijek postoji:

$$W_d > 0 \quad (1.2.)$$

Uslijed toga je korisna energija W , koja se dobije iz strojeva, uvijek manja od dovedene W_{in} upravo za iznos gubitka energije W_d :

$$W = W_{in} - W_d \quad (1.3.)$$

U prijelaznim režimima rada, pri promjeni elektromagnetskih i mehaničkih veličina, jedan dio energije W_{acc} se akumulira u stroju i može se vratiti. Međutim, u stacionarnom stanju, kad se uvjeti rada ne mijenjaju, nema akumulirane energije:

$$W_{acc} = 0 \quad (1.4.)$$

Prijelazni režimi rada su jako složeni [5], i dalje se razmatraju uglavnom stacionarna stanja.

U stacionarnom radu je umjesto energije prikladnije promatrati snagu. Jednako kao za energiju vrijedi da je predana snaga P uvijek manja od primljene P_{in} za iznos gubitaka P_d :

$$P = P_{in} - P_d \quad (1.5.)$$

Ekonomičnost stroja se izražava omjerom predane i primljene radne snage koji se naziva stupanj djelovanja ili korisnost stroja:

$$\eta = \frac{P}{P_{in}} = \frac{P}{P + P_d} \quad (1.6.)$$

Zbog postojanja gubitaka u svakom stroju je stupanj djelovanja uvijek:

$$\eta < 1 \quad (1.7.)$$

Rad svakog električnog stroja može se analizirati primjenom tri temeljna zakona elektrotehnike, a to su [1, 2, 3, 4]:

– opći zakon indukcije (Faradayev zakon)

$$e = - \frac{d\Phi(t)}{dt} \quad (1.8.)$$

– zakon protjecanja (Ampereov zakon protjecanja)

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \mathcal{O} \quad (1.9.)$$

- zakon sile u magnetskom polju (Ampereov zakon sile na vodič u magnetskom polju)

$$\vec{F} = I(\vec{l} \times \vec{B}) \quad (1.10.)$$

Za pretvorbu je u električnom stroju potrebno relativno gibanje vodiča, kojim protječe električna struja, prema magnetskom polju. Stoga stroj uvijek ima jedan pomični dio (rotor) koji se vrti i dio koji miruje (stator) [1].

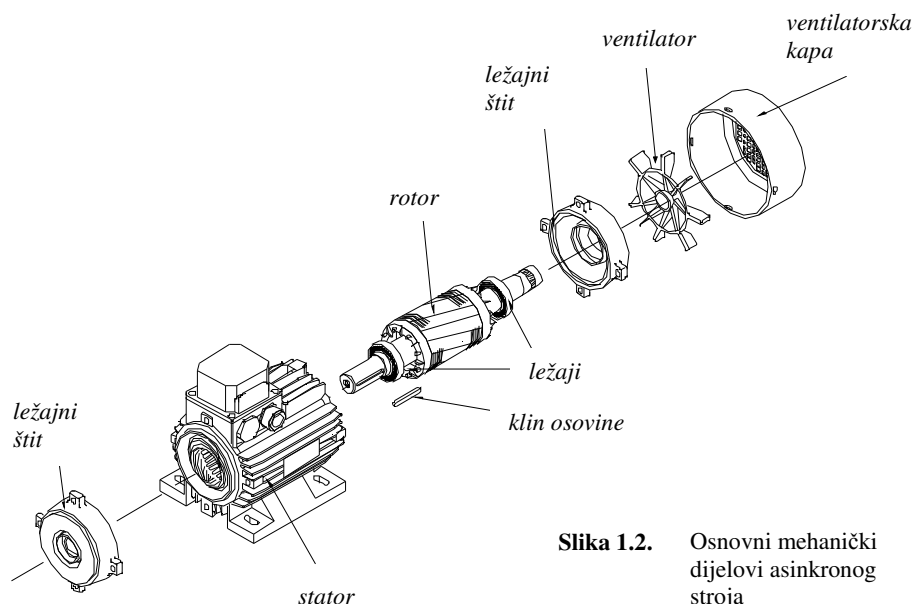
Stator čine željezna jezgra i namot, a smješten je u kućište radi mehaničkog učvršćenja. **Rotor** također čine željezna jezgra i namot, a smješten je na osovini. Veza između kućišta statora i rotirajućih dijelova stroja ostvaruje se pomoću ležajeva i ležajnih štitova. Prostor između statora i rotora je **zračni raspor**.

Namoti električnog stroja se upotrebljavaju za:

- stvaranje magnetskog toka (uzbudni namot) ili
- induciranje napona (armaturni namot).

Oni mogu biti smješteni na polovima ili u utorima željezne jezgre. Vodiči namota i cijeli namoti moraju biti izolirani međusobno i prema željezu. Namoti imaju krajeve (izvode) dovedene do priključne kutije radi priključka na električnu mrežu. Svrha vodiča je da provode električnu struju, pa se stoga izrađuju od materijala koji imaju dobru električnu vodljivost. To su prvenstveno bakar i aluminij, koji nisu najbolji vodiči, ali su ekonomski najisplativiji.

Kao primjer su na slici 1.2. prikazani osnovni mehanički dijelovi jednog manjeg asinkronog motora [13] .



Slika 1.2. Osnovni mehanički dijelovi asinkronog stroja

Jezgre rotora i statora, osim što mehanički drže namote, imaju zadatak provođenja magnetskog toka. Zato se izrađuju od feromagnetskih materijala koji imaju dobru magnetsku vodljivost, a i potrebnu mehaničku čvrstoću da putem osovine predaju (motori) ili primaju (generatori) mehaničku energiju. Trenje u ležajevima i trenje ventilatora (s rashladnim sredstvom) se suprotstavljaju vrtnji. Njih zovemo mehaničkim gubicima P_{dmec} , a dio su ukupnih gubitaka snage P_d . Najveći dio gubitaka čine električni gubici u aktivnim dijelovima:

- vodičima namota statora P_{ws} ,
- vodičima namota rotora P_{wr} i
- željeznoj jezgri statora P_{Fes} ili rotora P_{Fer} .

Dielektrični gubici u izolaciji stroja se obično zanemaruju.

Ukupni gubici u stroju P_d trebaju biti što manji uglavnom iz ekonomskih razloga. Preveliki gubici mogu prouzročiti prekomjerno zagrijanje koje može uništiti stroj.

Svi navedeni gubici koji nastaju u strojevima se pretvaraju u toplinu, uslijed čega se povisuje temperatura stroja. Budući da se dio snage koja ulazi u stroj kontinuirano pretvara u toplinu, stroj se mora kontinuirano hladiti. U tu svrhu se redovito na osovinu stavljaju ventilatori koji pojačavaju strujanje zraka kroz stroj čime se toplina djelotvornije odvodi. Kod većih strojeva je problem hlađenja veći, pa sustav hlađenja može biti složeniji (na primjer hlađenje vodom).

1.2. VRSTE ELEKTRIČNIH STROJEVA

Za rad na električnim mrežama izmjeničnog napona koriste se najviše sinkroni i asinkroni strojevi, dok se za rad na istosmjernom naponu pretežno koriste kolektorski strojevi.

Posebnu grupu čine mali električni strojevi koji se mogu svrstati u jednu od 3 navedene grupe ili rade na nekom drugom principu.

Bitna je karakteristika sinkronih strojeva da im je brzina vrtnje rotora n jednaka brzini vrtnje okretnog magnetskog polja što ga stvaraju statorske struje. Ta se brzina naziva sinkronom brzinom stroja n_s i određena je brojem pari polova stroja p i frekvencijom napona napajanja f prema relaciji:

$$n = n_s = \frac{60f}{p} \quad (1.11.)$$

Frekvencija napona napajanja f jednaka je frekvenciji napona mreže f_L , ako je stroj priključen direktno na mrežu, ili općenito, frekvenciji napona i struja u statoru f_s .

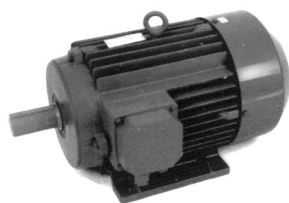
Kod asinkronih strojeva brzina vrtnje ovisi o opterećenju stroja i u stacionarnom pogonu je različita od sinkrone:

$$n \neq n_s \quad (1.12.)$$

Brzina kolektorskih istosmjernih strojeva također ovisi o opterećenju, ali i o elektromagnetskim prilikama u stroju koje se kod te vrste strojeva jednostavno reguliraju. Time se može postići bilo koja brzina vrtnje u širokom rasponu.

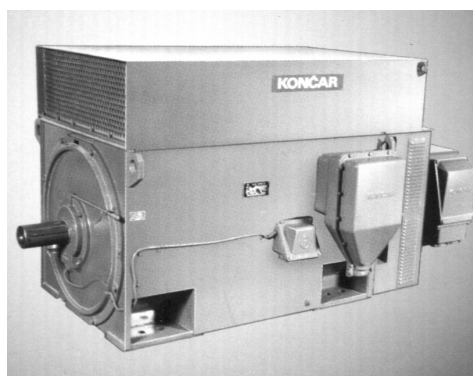
Sinkroni strojevi se najčešće koriste kao generatori. Asinkroni strojevi se najčešće rabe za motorski rad, kao i kolektorski strojevi.

Na slikama 1.3.–1.5. su prikazani tipični vanjski izgledi osnovnih vrsta električnih strojeva [11,12].

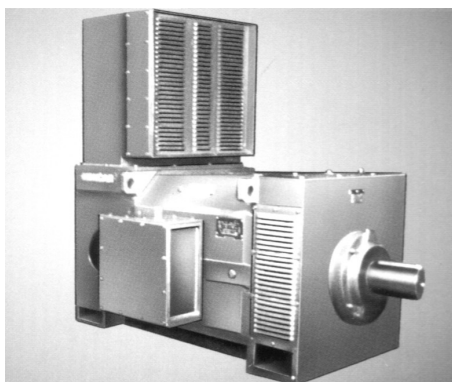


a)

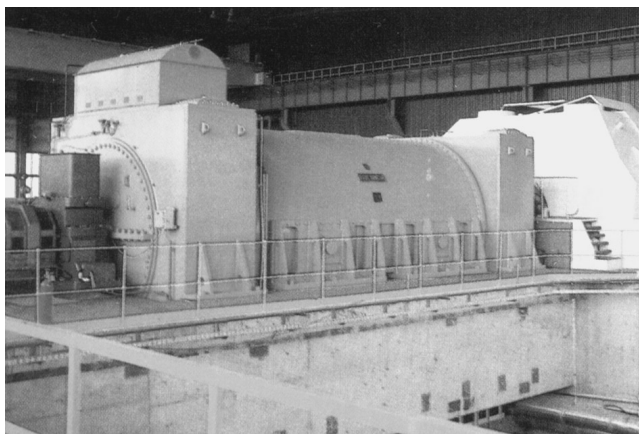
Slika 1.3. Vanjski izgled asinkronog stroja
a) niskonaponski motor,
b) visokonaponski motor.



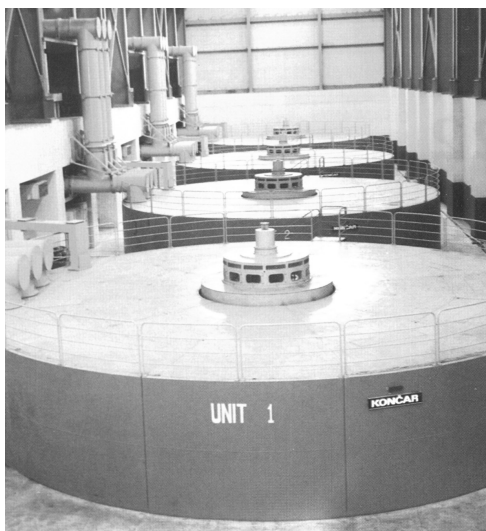
b)



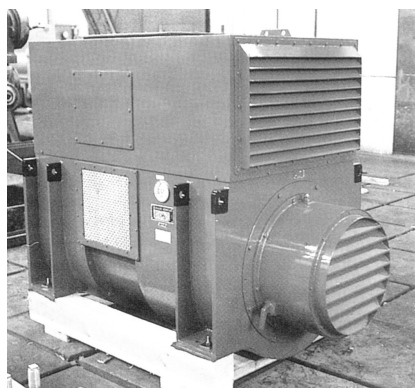
Slika 1.4. Vanjski izgled jednog kolektorskog stroja



a)



b)



c)

Slika 1.5. Vanjski izgled sinkronog stroja
a) turbogenerator,
b) 4 hidrogeneratora u elektrani,
c) dizelski generator.

2. SINKRONI STROJEVI

2.1. OSNOVNA OBILJEŽJA

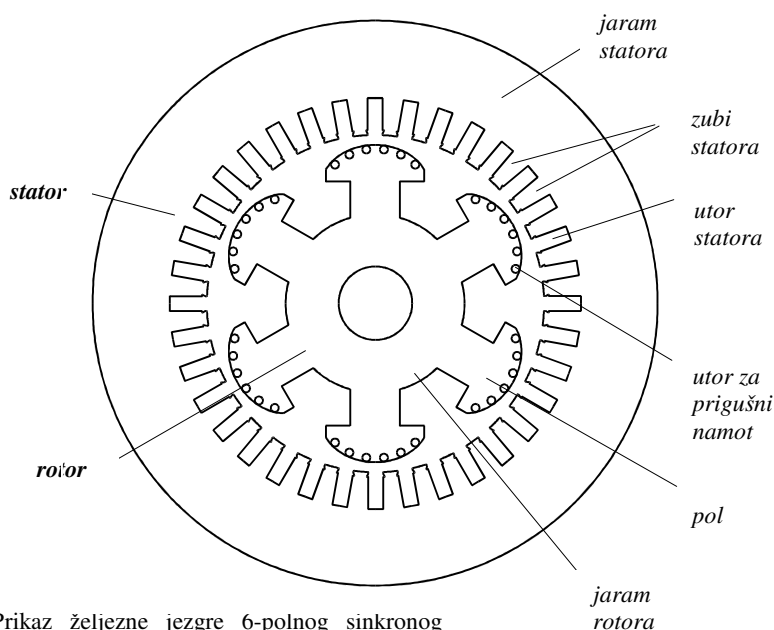
Odnos snaga najvećih i najmanjih izvedenih sinkronih strojeva je 10^{12} . Strojovi su izvedeni za snage od nekoliko mW do nekoliko GW. Najmanji strojevi se rade za različite instrumente. Najveći strojevi su napravljeni za potrebe velikih elektroenergetskih sustava (elektrane).

Na statoru sinkronog stroja je u većini slučajeva smješten armaturni namot (najčešće trofazni) koji je simetrično raspoređen u utorima po obodu stroja. Naziv *armaturni* označava dio stroja u kojem se pod utjecajem promjene magnetskog toka inducira napon.

Uzbudni namot je smješten na rotoru, na posebno oblikovanim istaknutim polovima, sl. 2.1., kod izvedbe za manje brzine, ili u utorima cilindričnog rotora sl. 2.2. za izvedbe strojeva visokih brzina. Uzbudnim namotom teče istosmjerna struja i stvara uzbudno protjecanje, odnosno magnetski tok. Moguće su i izvedbe sinkronih strojeva bez uzbudnog namota (točka 2.2.).

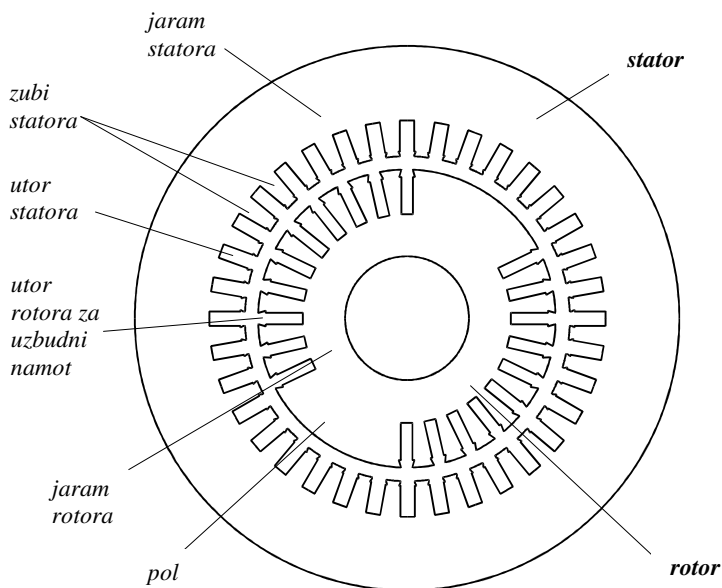
Sinkroni strojevi se rijetko izvode s uzbudom na statoru, a armaturom na rotoru.

Na slici 2.1. je prikazan poprečni presjek magnetskog kruga (bez namota) 6-polnog sinkronog stroja s istaknutim polovima.



Slika 2.1. Prikaz željezne jezgre 6-polnog sinkronog stroja s istaknutim polovima

Na slici 2.2. je prikazan poprečni presjek magnetskog kruga jednog 2-polnog sinkronog stroja s cilindričnim rotorom.



Slika 2.2. Prikaz željezne jezgre 2-polnog sinkronog stroja s cilindričnim rotorom

Magnetsko polje koje stvara uzbuda na rotoru vrti se uslijed mehaničke vrtnje rotora. U vodičima statorskog namota inducira se elektromotorna sila, i kad je stroj opterećen poteku struje. Struje u statorskom namotu stvore okretno protjecanje koje se vrti jednakom brzinom kao i rotor, dakle sinkrono s rotorom. Po tome je ova vrsta stroja i nazvana sinkroni stroj.

2.2. VRSTE SINKRONIH STROJEVA

Sinkroni strojevi se mogu razvrstati na više načina, i to prema:

- vrsti pogonskog stroja,
- konstrukciji rotora i
- brzini vrtnje.

Jako mali sinkroni strojevi se najčešće koriste za posebne namjene zbog specifične izvedbe, načina rada i primjene. Takvi strojevi često nemaju uzbudni

namot nego rade na drugim osnovama (na primjer induktorski, reluktantni, histerezni strojevi) i navedene podjele se na njih ne odnose [1].

Prema vrsti pogonskog stroja razlikuju se:

- turbogeneratori,
- hidrogeneratori,
- dizelski generatori,
- kompenzatori i
- motori.

Prema konstrukciji rotora se razlikuju se strojevi s:

- cilindričnim rotorom i
- istaknutim polovima.

Prema brzini vrtnje dijele se na:

- brzohodne,
- strojeve srednje brzine i
- sporohodne.

Najčešće se koristi podjela prema vrsti pogonskog stroja, a pokazuje se da ona sadrži u sebi i podjelu prema drugim obilježjima. Za teorijska razmatranja je bitna konstrukcijska izvedba stroja.

Turbogeneratori su brzohodni strojevi, izvedeni s cilindričnim rotorom. Pogone se parnim ili plinskim turbinama koje imaju veliku brzinu vrtnje. Izvode se isključivo s horizontalnom osovinom.

Zbog velikih centrifugalnih sila, koje ovise o kvadratu brzine vrtnje, rotor ne smije biti velikog promjera d_r . To se vidi iz izraza za centrifugalnu silu dF_c na djelić mase dm_{rc} na obodu rotora koja iznosi:

$$dF_c = \frac{dm_{rc} v_r^2}{\frac{d_r}{2}} \quad (2.1.)$$

Obodna brzina rotora v_r je jednaka:

$$v_r = \frac{d_r}{2} \cdot \frac{n\pi}{30} \quad (2.2.)$$

Velika brzina vrtnje, koju nameće turbina, uvjetuje malen broj polova i izvedbu s neistaknutim polovima (cilindrični rotor). Budući da generator mora imati barem dva pola, to za mrežu frekvencije 50 Hz iznosi maksimalna brzina 3000 o/min. Za parne turbine u Europi je najčešća brzina vrtnje upravo 3000

o/min. Za najveće turbogeneratore (1,5 – 2 GVA) koristi se i brzina od 1500 o/min. Stoga se turbogeneratori redovito grade kao dvopolni ili četveropolni.

Najveći promjer rotora turbogeneratora iznosi nešto više od 1m. Da bi se iz takvog stroja dobila velika snaga, radi malog promjera mora biti velika duljina rotora (vidi poglavlje 2.6), pa ona može iznositi i nekoliko metara.

Hidrogeneratori su najčešće sporohodni strojevi, izvedeni s istaknutim polovima. Pogoni ih vodna turbina, po čemu su i dobili naziv. Brzina vrtnje turbine jako ovisi o količini vode i pritisku (pad vode) i obično se kreće 50 – 1000 o/min. Generator treba biti prilagođen turbini, pa i on mora imati istu brzinu vrtnje.

Mala brzina vrtnje rotora n zahtijeva veliki broj pari polova p hidrogeneratora prema relaciji:

$$p = \frac{60f}{n} \quad (2.3.)$$

Tako za slučaj brzine vrtnje turbine $n = 50$ o/min i za frekvenciju $f = 50$ Hz potreban broj pari polova hidrogeneratora iznosi $p = 60$, odnosno broj polova je $2p = 120$.

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

Hidrogeneratori se izvode najčešće s vertikalnom osovinom. Postoje i izvedbe s horizontalnom osovinom, posebno kod cijevnih generatora koji su uronjeni u tok vode, a turbina je napravljena poput propelera.

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

Kompenzatori su posebna vrsta sinkronih strojeva koji ne služe za pretvorbu energije, nego samo opskrbljuju električnu mrežu jalovom energijom. Rade bez pogonskog stroja. To su veliki strojevi (10 do 200 MVA), izvedeni najčešće sa šest ili osam istaknutih polova. Danas se malo koriste.

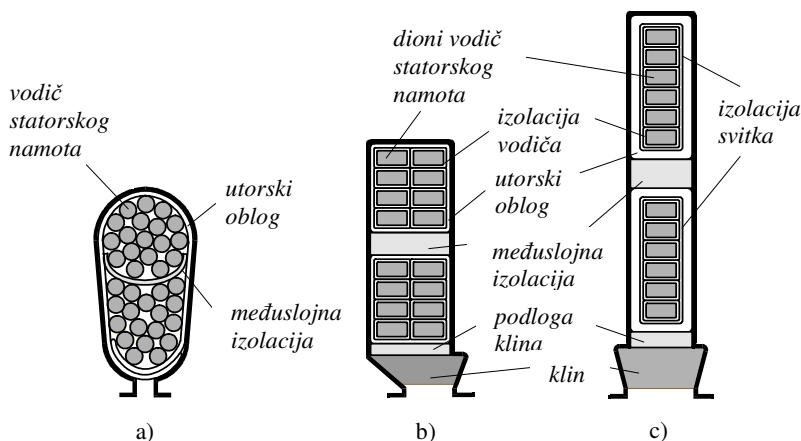
Sinkroni motori su se prije koristili samo za pogone s konstantnom brzinom vrtnje. Grade se za široki raspon snaga (od nekoliko mW do nekoliko stotina MW) i široki raspon brzina. Koriste se i u reverzibilnim hidroelektranama gdje rade kao generatori kad je potrebno proizvoditi električnu energiju, a u vrijeme kad postoji višak električne energije rade kao motori i pumpaju vodu u akumulacijsko jezero. U novije vrijeme se sinkroni motori sve više koriste u reguliranim pogonima.

2.3. IZVEDBE SINKRONIH STROJEVA

Stator sinkronog stroja je napravljen u obliku šupljeg valjka koji se naziva statorski paket. Sastavljen je od prstenastih, međusobno izoliranih magnetskih limova debljine 0,35, 0,5 ili 0,63 mm koji su složeni paralelno tako da tvore tzv. paket limova. S unutarnje strane prstenova, u limovima su izrezani utori. To su otvori odgovarajućih oblika koji su simetrično raspoređeni po presjeku lima. Slaganjem limova oblikuju utore uzduž statorskog paketa, u provrtu statora.

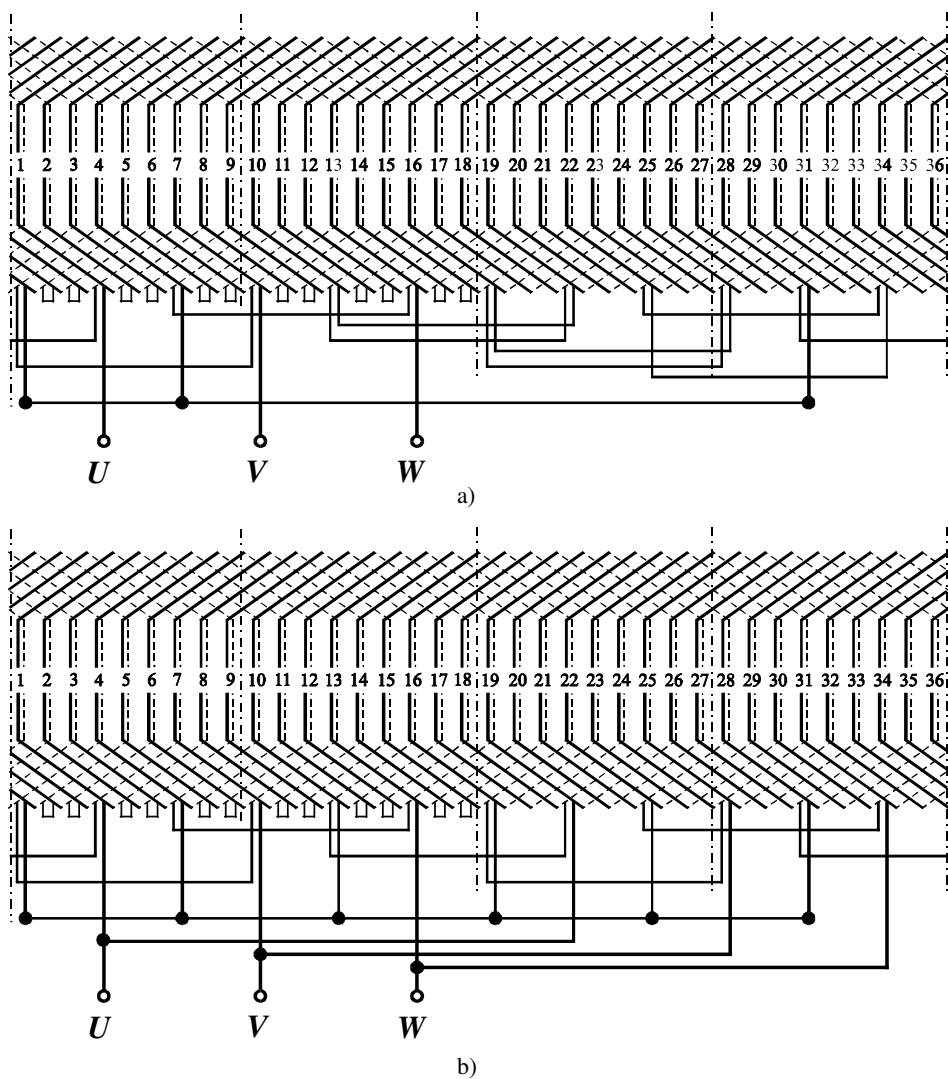
Kružni vijenac između utora i vanjskog promjera statorskog paketa se naziva jaram statora. Dijelovi limova između utora su zubi (slike 2.1. i 2.2.).

Slika 2.3. prikazuje tri karakteristična oblika statorskih utora kakvi se najčešće koriste za sinkrone strojeve. U utorima su nacrtani vodiči dvoslojnog namota i pripadna izolacija.



Slika 2.3. Najčešći oblici statorskih utora (s vodičima) sinkronih strojeva
a) poluzatvoreni, b) poluotvoreni, c) otvoreni.

U utore se smješta armaturni, višefazni, obično dvoslojni namot [1,3]. Pretežno se koristi trofazni namot u zvijezda spoju. Namot svake faze čine serijski vezani svici koji se sastoje od jednog ili više zavoja. Na slici 2.4. je prikazana razvijena shema statorskog namota jednog trofaznog 4-polnog stroja s 36 utora na statoru. Faze namota su spojene u zvijezdu. Prikazan je dvoslojni namot u dvjema izvedbama, bez i s paralelnim granama. Polni korak, mjeren brojem utora, iznosi 9. Namot je skraćen za dva utorska koraka, pa korak namota iznosi $y = 7$.



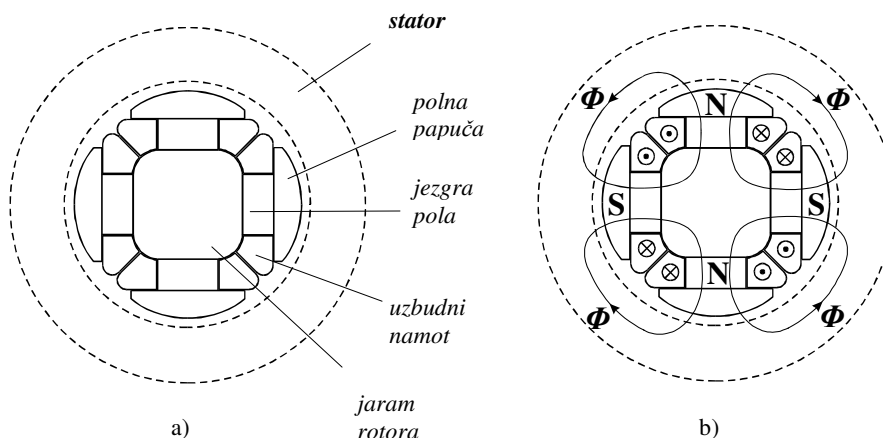
Slika 2.4. Razvijena shema trofaznog dvoslojnog statorskog namota četveropolnog sinkronog stroja s 36 utora, spojenog u zvijezdu
a) bez paralelnih grana, b) s dvije paralelne grane.

Vodiči u svicima mogu biti okruglog ili profilnog oblika. Statorski svici velikih strojeva imaju često samo jedan zavoj koji se sastoji od više dionih vodiča (slika 2.3.). Uzduž utora su dioni vodiči isprepleteni tako da međusobno razmjenjuju položaj po visini utora (Roebel štap). To se čini radi smanjenja potiskivanja struje kod vodiča velikog presjeka.

Rotor sinkronog stroja se sastoji od:

- osovine,
- jarma rotora i
- polova s uzbudnim namotom.

Presjek jednog 4-polnog rotora s istaknutim polovima je prikazan na slici 2.5. Na slici a) su označeni pojedini dijelovi rotora, a na slici b) su naznačeni smjerovi struja uzbudnog namota, dobiveni sjeverni (N) i južni (S) polovi i pripadne silnice glavnog magnetskog toka Φ .

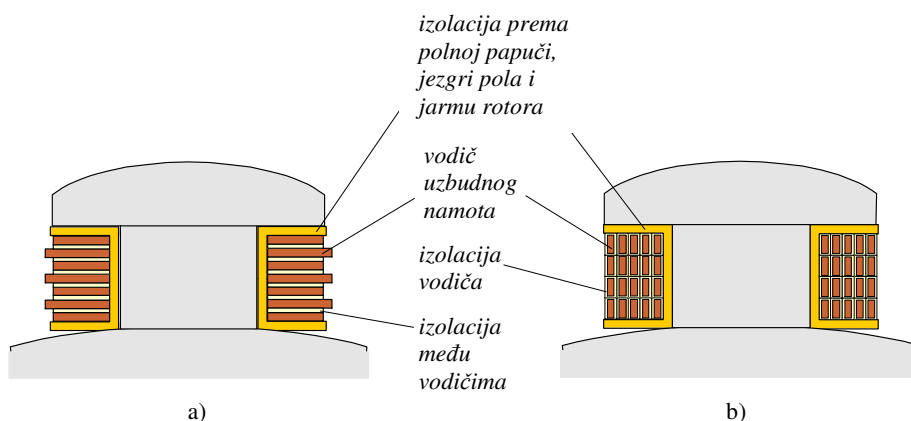


Slika 2.5. Četveropolni rotor s istaknutim polovima
a) dijelovi rotora, b) način spajanja uzbudnog namota.

Kod strojeva s istaknutim polovima svaki pol ima jezgru, uzbudni namot i polnu papuču. Uzbudni namot može biti napravljen od bakrenih vodiča okruglog ili profilnog oblika, složenih u jedan ili više slojeva.

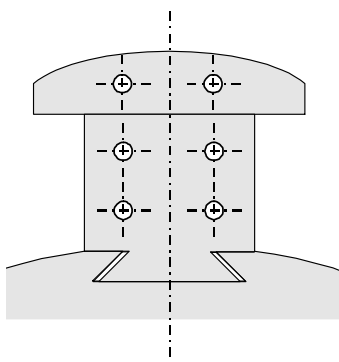
Uzбудni namot je tako spojen da se naizmjenično nalaze sjeverni i južni magnetski polovi (slika 2.5.b)). U rotoru je magnetski tok uzbuđen istosmjernom strujom, pa je i on istosmjernan. Stoga svi dijelovi na rotoru mogu biti od masivnog željeza. Međutim, često se izvode od limova zbog smanjenja dodatnih gubitaka, a i zbog konstrukcijskih razloga.

Presjek jednog pola s uzбудnim jednoslojnim namotom je dan na slici 2.6.a), a na slici 2.6.b) s višeslojnim namotom. U oba prikazana slučaja su vodiči uzbudnog namota profilni.



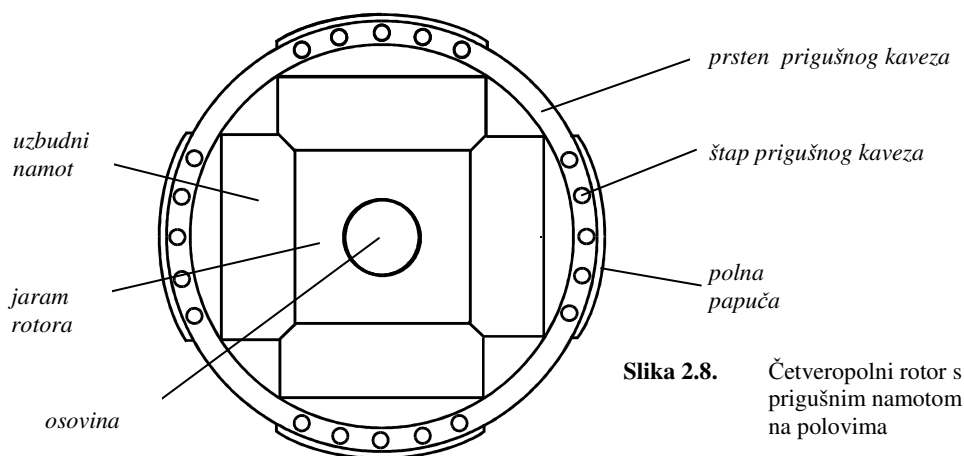
Slika 2.6. Presjek pola s uzbudnim namotom (s profilnim vodičima)
a) jednoslojni namot, b) višeslojni namot.

Rotor manjih strojeva (do oko 1 MVA) radi se od dinamo-limova. Lim rotorskog paketa izrezuje se u jednom komadu, pa su polovi i jaram napravljeni zajedno, kako je prikazano na slici 2.1. To osigurava veliku čvrstoću rotora. Kod strojeva većih snaga polovi se na jaram rotora mogu učvrstiti na više načina, a najčešće se koristi učvršćenje lastinim repom, prikazano na slici 2.7.



Slika 2.7. Pričvršćenje pola na rotor lastinim repom

Polna papuča oblikuje zračni raspor. U polnoj papučici se često izrađuju uzdužni utori u koje se stavljaju štapovi. Štapovi se s obje strane stroja kratko spoje prstenima. Time se dobije prigušni kavez (slika 2.8.) koji ima višestruku ulogu, o čemu će biti govora kasnije.



Jaram rotora mora biti magnetski i mehanički tako dimenzioniran da vodi potreban magnetski tok i da podnese centrifugalnu silu kojom je napregnut cijeli rotor pri vrtnji.

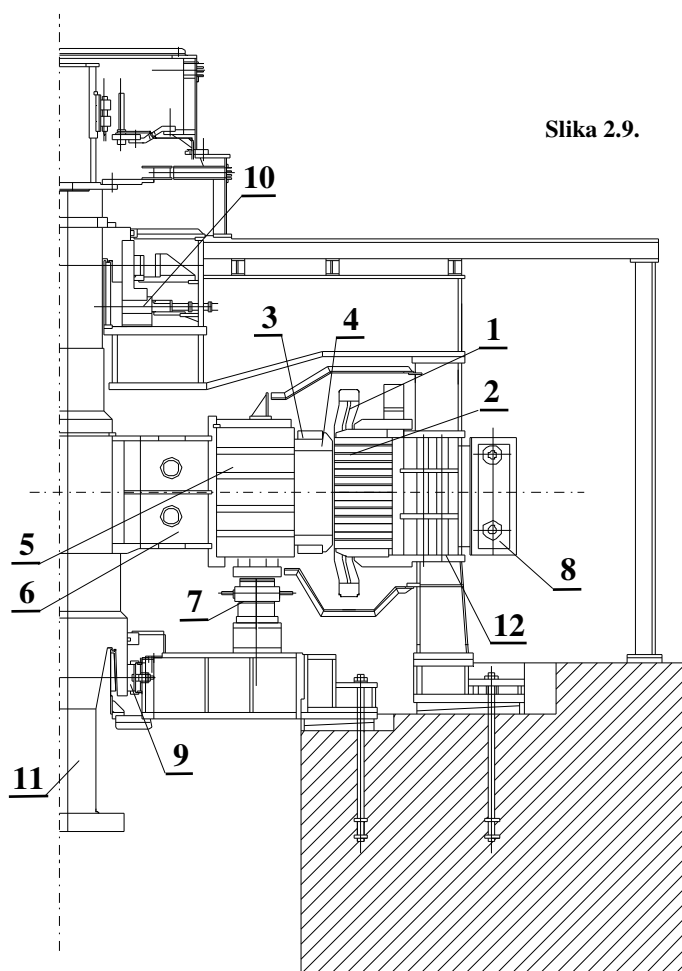
Kod velikih strojeva s istaknutim polovima je promjer rotora jako velik, pa je između jarma i osovine potrebno staviti glavinu (zvijezdu rotora), npr. pozicija 6 na sl. 2.9. Glavina rotora ne vodi magnetski tok, već služi samo za mehaničku vezu između jarma i osovine.

Osočina se vrti u ležajima, a može biti postavljena **horizontalno** ili **vertikalno**.

Vertikalne izvedbe se koriste uglavnom kod hidrogeneratora. Na slici 2.9. je prikazan uzdužni presjek jednog hidrogeneratora snage 9 MVA. Uočljivo je da je duljina paketa puno manja od promjera.

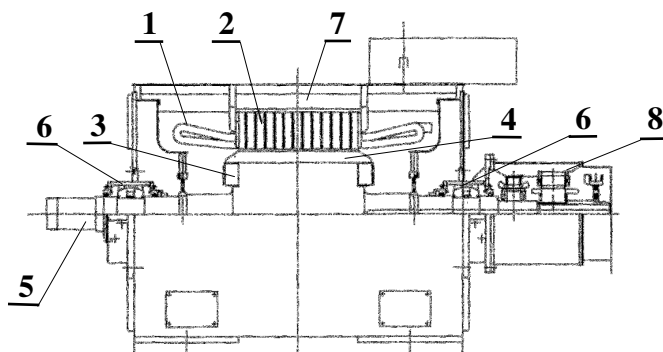
Dizelski i turbogeneratori su uvijek horizontalne izvedbe. Konstrukcija jednog dizelskog generatora manje snage je prikazana na slici 2.10., i to za slučaj kad su jaram rotora i jezgra pola izvedeni kao sastavni dio osovine.

Horizontalna izvedba se koristi i kod cijevnih generatora. To su generatori za protočne elektrane. Pri tome je cijeli generator u odgovarajućem kućištu uronjen u tijek vode, koja ga oplakuje sa svih strana.



Slika 2.9. Uzdužni presjek polovice hidrogeneratora

- 1 – statorski namot
- 2 – paket statora
- 3 – uzbudni namot
- 4 – pol
- 5 – jaram rotora
- 6 – glavina
- 7 – kočnica
- 8 – hladnjak
- 9 – donji ležaj
- 10 – gornji ležaj
- 11 – osovina
- 12 – kućište statora

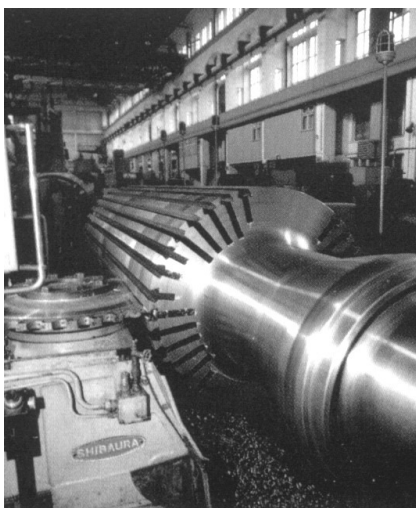


- 1 – statorski namot
- 2 – paket statora
- 3 – uzbudni namot
- 4 – polna papuča
- 5 – osovina
- 6 – ležaj
- 7 – kućište
- 8 – uzbudni sklop

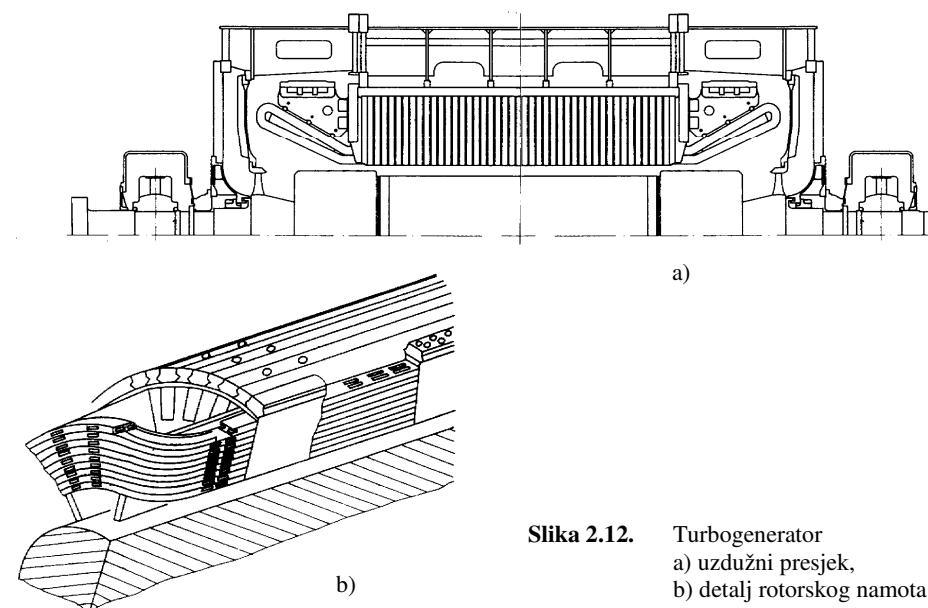
Slika 2.10. Uzdužni presjek dizelskog generatora

Rotor turbogeneratorsa se izrađuje iz jednog komada kovanog čelika koji mora imati jako dobra mehanička svojstva zbog velike brzine vrtnje stroja. Na takvom se rotoru izglodu utori u koje se uloži uzbudni namot. Na slici 2.11. se vidi rotor turbogeneratorsa bez uložnog namota. Slika 2.12. prikazuje uzdužni presjek cijelog turbogeneratorsa i detalj rotorskog namota.

Kućiste sinkronih strojeva se radi od čelika, a može biti različitih oblika. Služi kao zaštita paketa i namota i kao nosač čitavog stroja.



Slika 2.11. Rotor turbogeneratorsa u izradi



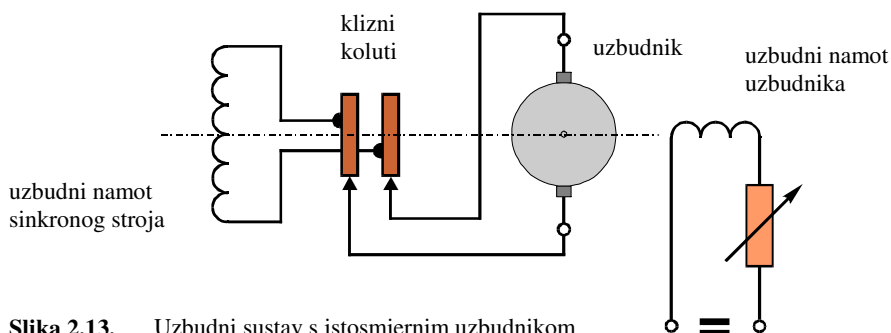
Slika 2.12. Turbogenerator
a) uzdužni presjek,
b) detalj rotorskog namota.

2.4. UZBUDNI SUSTAVI

Veći generatori grade se isključivo s uzbudom pomoću istosmjerne struje. Ta struja teče uzбудnim namotom i naziva se uzbudna struja. Kao izvori uzbudne struje koriste se u praksi tri osnovna rješenja:

- uzbuda s istosmjernim uzbudnikom,
- statička uzbuda i
- beskontaktna uzbuda.

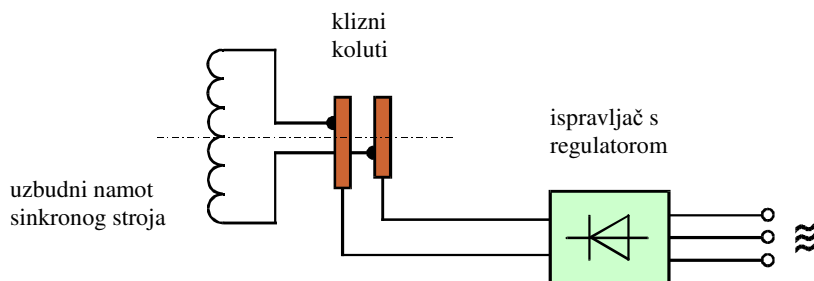
Uzbuda s istosmjernim uzbudnikom je najstarije rješenje koje se uglavnom više ne primjenjuje na novim strojevima. Na zajedničku osovinu je prigraden istosmjerni generator (uzbudnik) čije su izlazne stezaljke spojene s uzbudnim namotom generatora preko četkica i kliznih prstena (slika 2.13.).



Slika 2.13. Uzbudni sustav s istosmjernim uzbudnikom

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

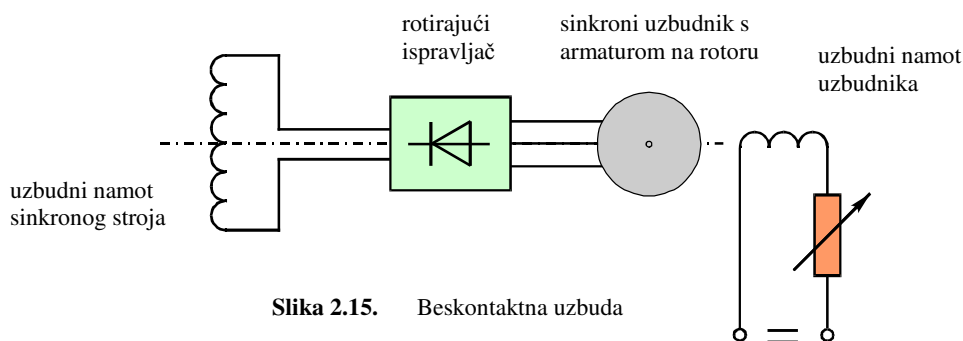
Drugo, danas često korišteno rješenje je statička uzbuda (slika 2.14.). Kod statičke uzbude je istosmjerni generator zamijenjen statičkim ispravljačem.



Slika 2.14. Statička uzbuda

Struja iz izmjeničnog izvora se ispravlja upravljivim tiristorskim ispravljačem na koji djeluje regulator uzbudne struje. Ovo je pouzdaniji sustav od istosmjernog uzbudnika, ali još uvijek ostaju klizni prsteni i četkice kao mogući izvor problema.

Treće moguće rješenje je beskontaktna uzbuda (slika 2.15.).



Slika 2.15. Beskontaktna uzbuda

Kao uzbudnik služi mali sinkroni generator koji ima uzbudu na statoru, a armaturni namot na rotoru. Taj uzbudnik je zajedno s ispravljačkim uređajem montiran na osovinu generatora i s njim se zajedno vrti. Armatura uzbudnika je preko ispravljačkog uređaja spojena s uzbudnim namotom sinkronog generatora.

Regulacija uzbudne struje se postiže regulacijom uzbude pomoćnog generatora. Prednost je ovakvog rješenja što ne zahtijeva ni kolektor ni klizne prstene pa traži manje održavanja. Koristi se jako često za uzbudu manjih generatora koji rade samostalno na vlastitoj mreži.

2.5. OSNOVNI PODACI SINKRONIH STROJEVA

Osnovne podatke o izvedenom stroju može se saznati s natpisne pločice. Svaki stroj mora imati natpisnu pločicu, osim ako se isporučuje već ugrađen u neki složeniji uređaj.

Natpisna pločica sadrži:

- osnovne podatke o proizvođaču,
- godinu proizvodnje,
- standarde po kojima je stroj izrađen i
- nazivne podatke za koje je stroj građen.

Nazivni podaci sinkronog stroja su:

- nazivna snaga S_n ,
- nazivni napon U_n (efektivna vrijednost linijskog napona),
- nazivna struja I_n (efektivna vrijednost linijske struje),
- nazivna frekvencija f_n ,
- nazivna brzina vrtnje n_n ,
- nazivni faktor snage $\cos \varphi_n$,
- nazivna uzbudna struja I_{fn} i
- nazivni uzbudni napon U_{fn} .

Kao nazivna snaga se za generator daje električna prividna snaga, određena radnim i jalovim opterećenjem, jer opterećenje generatora ne mora biti samo radnog karaktera. To je važno zbog zagrijavanja stroja za što su mjerodavni napon i ukupna struja, dakle prividna, a ne samo radna snaga.

Isto tako se i za sinkrone kompenzatore daje prividna snaga.

Za sinkrone motore se obično daje radna snaga na osovini, ali se u slučajevima kad on radi i kao kompenzator daje prividna električna snaga.

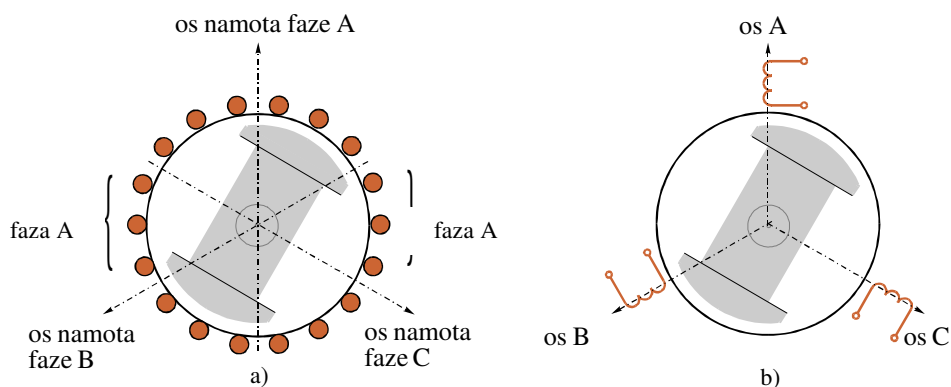
Ukoliko se držimo podataka s natpisne pločice, stroju se u pogonu neće ništa dogoditi. Ako ga opteretimo većom snagom ili narinemo viši napon, može doći do ozbiljnog kvara – na primjer izgaranja izolacije kao posljedice pregrijavanja.

2.6. NAČIN RADA

Već smo u uvodnom dijelu napomenuli da se sinkroni strojevi najčešće izvode kao trofazni generatori, s dva ili više polova. Za kvalitativna teorijska razmatranja dovoljno je promatrati samo dva pola, budući da je fizikalna slika (magnetsko polje, namot) identična za svaki par polova. Za kvantitativne račune treba, naravno, uzeti u obzir stvarni broj polova, broj faza, broj paralelnih grana, broj zavoja, oblik namota i ostale veličine.

Statorski je namot simetričan, jednoliko raspoređen po obodu i smješten u utorima. Na slici 2.16.a) je shematski prikazan raspored vodiča 3-faznog namota statora.

Os svakog namota je u njegovoj simetrali. Osi namota svih triju faza su razmaknute za 120° (električnih).



Slika 2.16. Shematski prikaz 3-faznog statorskog namota
a) smještaj vodiča, b) osi namota.

U pojednostavljenom prikazu se obično ne crta stvarni raspored vodiča, već se samo naznače osi pojedinih faza (slika 2.16.b)).

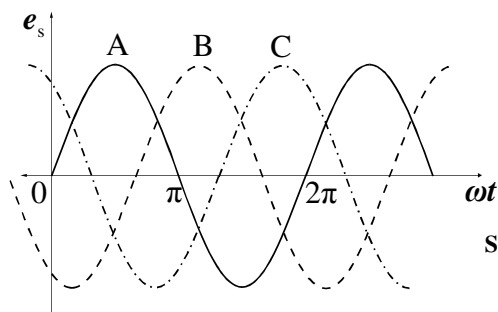
U provrtu statora je smješten rotor koji je uzbuđen istosmjernom strujom. Promatrat ćemo 2-polni rotor kako je prikazano na slici 2.16.a). Rotor se vrti konstantnom brzinom n , te njegovo magnetsko polje inducira u namotima pojedinih faza elektromotorne sile koje se vremenski mijenjaju frekvencijom:

$$f = f_s = \frac{np}{60} \quad (2.4.)$$

Tome odgovara kružna frekvencija ω :

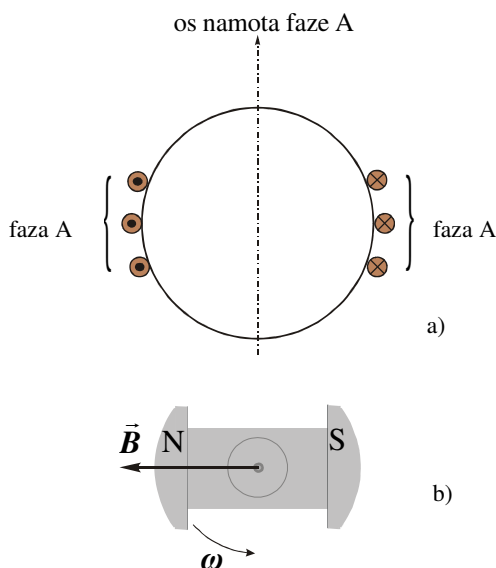
$$\omega = 2\pi f \quad (2.5.)$$

Zbog prostornog rasporeda namota su inducirane elektromotorne sile vremenski pomaknute za 120° el. ($2\pi/3$). Punom okretu rotora odgovara cijela perioda inducirane elektromotorne sile na statoru. Raspodjela magnetskog polja u zračnom rasporu obično nije čisto sinusna, ali ako promatramo samo osnovni harmonik, inducirane elektromotorne sile u pojedinim fazama će imati sinusni oblik (slika 2.17.).



Slika 2.17. Inducirane elektromotorne sile u pojedinim fazama (A, B, C) 3-faznog sinkronog stroja

Budući da su sve faze simetrične, možemo se zadovoljiti promatranjem samo jedne faze. U skladu sa slikom 2.17. izaberemo fazu A. Os namota faze A je vertikalna, kako je to naznačeno na slici 2.18.a). Indukcija $\vec{B}$ je u zračnom rasporu prostorno sinusno raspoređena, i možemo je predstaviti vektorom koji prema slici 2.18.b) gleda u lijevo. Vektor protjecanja uzbuđnog namota $\vec{\Theta}_f$ djeluje u simetrali pola (jer imamo koncentriranu uzbuđu [1]), kao i vektor indukcije $\vec{B}$.



Slika 2.18. Osi namota i rotora u trenutku induciranja maksimalne elektromotorne sile
a) os namota faze A,
b) os rotora.

U trenutku prikazanom na slici 2.18. imat ćemo maksimalnu induciranu elektromotornu silu u fazi A. Inducirana elektromotorna sila u fazi A će biti jednaka 0 V u trenutku kad se osi namota statora i rotora poklope. Uz lijevi smjer vrtnje rotora¹ (koji je prema standardima pozitivan (+) ako je pogonski stroj na strani s koje promatramo) i smjer magnetskog polja prema slici 2.18.b) inducirat će se u vodičima elektromotorna sila kao na slici 2.18.a). Ovu elektromotornu silu ćemo smatrati pozitivnom. Struja u tom smjeru je također pozitivna, i ona stvara pozitivno protjecanje statora u smjeru osi faze A. Maksimum statorskog protjecanja je u sredini namota, dakle poklapa se s osi namota.

Iz uvida u teoriju električnih strojeva [1] znamo da protjecanje jedne faze (protjecanje $\vec{\Theta}_A$ faze A) simetrično raspoređenog (armaturnog) namota iznosi:

¹ Lijevo vrtnje rotora je obrnuto od kazaljke na satu.

$$\Theta_A = \frac{2\sqrt{2}I_a}{\pi} \cdot \frac{N_a}{p} k_w \quad (2.6.)$$

Oznake su sljedeće:

I_a – struja u jednoj fazi armaturnog namota,

N_a – broj serijski vezanih zavoja jedne faze armaturnog namota,

k_w – faktor namota.

Broj serijski vezanih zavoja jedne faze armaturnog namota N_a jednak je broju zavoja jedne paralelne grane ako je namot izveden s paralelnim granama.

Ukupno armaturno protjecanje Θ_a (protjecanje svih faza) simetrično raspoređenog i simetrično napajanog namota ima samo direktnu komponentu koja za m -fazni namot iznosi:

$$\Theta_a = \frac{m}{2} \cdot \Theta_A \quad (2.7.)$$

2.6.1. Vektorsko-fazorski dijagram

Vremenski sinusoidalno promjenljive veličine konstantne frekvencije ω prikazujemo često u kompleksnoj ravnini kao fazore. Neka su trenutne vrijednosti napona u i struje i dane izrazima:

$$u = \sqrt{2} U \sin(\omega t + \varphi_u) \quad (2.8.)$$

$$i = \sqrt{2} I \sin(\omega t + \varphi_i) \quad (2.9.)$$

Možemo ih preslikati u kompleksnu ravninu ovako:

$$u = \sqrt{2} U \sin(\omega t + \varphi_u) \leftrightarrow \sqrt{2} U e^{j(\omega t + \varphi_u)} = \sqrt{2} \underline{U} e^{j\omega t} \quad (2.10.)$$

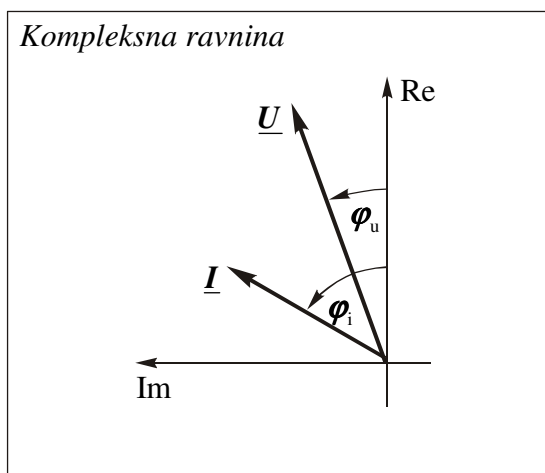
$$i = \sqrt{2} I \sin(\omega t + \varphi_i) \leftrightarrow \sqrt{2} I e^{j(\omega t + \varphi_i)} = \sqrt{2} \underline{I} e^{j\omega t} \quad (2.11.)$$

Veličine $\underline{U}$ i $\underline{I}$ nazivamo fazorima, i one iznose:

$$\underline{U} = U e^{j\varphi_u} \quad (2.12.)$$

$$\underline{I} = I e^{j\varphi_i} \quad (2.13.)$$

Pri određenoj kružnoj frekvenciji (električnoj kutnoj brzini) ω ove su veličine karakterizirane efektivnim vrijednostima U i I te fazama φ_u i φ_i u odnosu na realnu os Re (slika 2.19.).



Slika 2.19. Fazori napona i struje u kompleksnoj ravnini

U teoriji električnih strojeva uzimamo da se u trenutku $t = 0$, za koji i crtamo fazore, vremenska os nalazi u vertikalnom položaju. Ona se vrti udesno kutnom brzinom ω koja je jednaka kružnoj frekvenciji mreže. Također promatramo fazore efektivnih vrijednosti elektromotorne sile i struje.

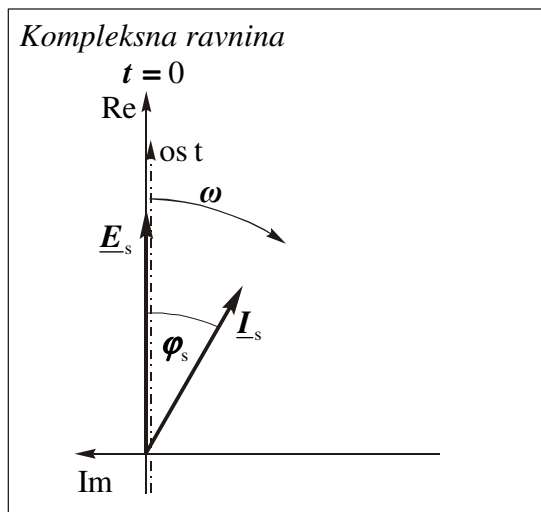
Fazor elektromotorne sile $\underline{E}_s$ postavljamo u realnu os, pa je on jednak:

$$\underline{E}_s = E_s e^{j0} = E_s \quad (2.14.)$$

Struja u fazi statorskog namota je u trenutku $t = 0$ općenito pomaknuta za kut φ_s u odnosu na elektromotornu silu, pa fazor te struje možemo prikazati za induktivni teret kao:

$$\underline{I}_s = I_s e^{j\varphi_s} \quad (2.15.)$$

Tome odgovara fazorski prikaz prema slici 2.20., gdje je $\varphi_s < 0$.



Slika 2.20. Fazorski prikaz elektromotorne sile i struje u fazi statorskog namota

U prethodnim izrazima su korištene ove oznake:

E_s – efektivna vrijednost elektromotorne sile u fazi statorskog namota,

I_s – efektivna vrijednost struje u fazi statorskog namota,

t – vrijeme,

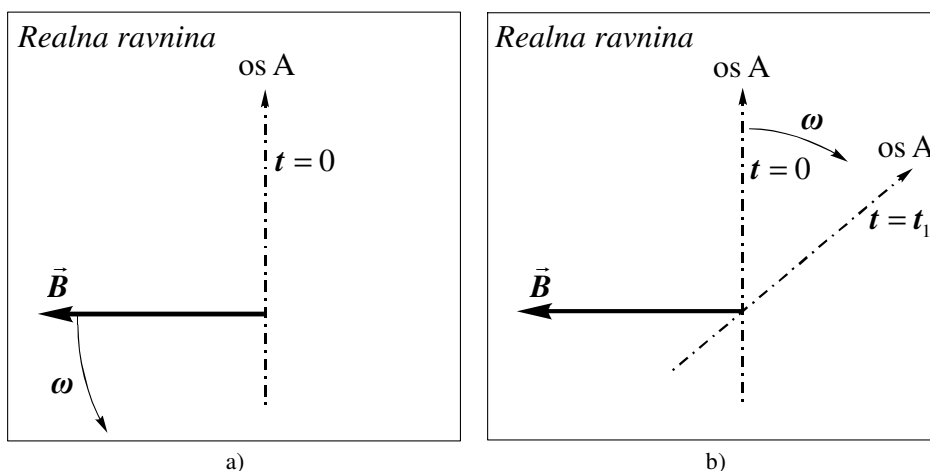
φ_s – fazni pomak između fazora elektromotorne sile i struje statora.

Projekcija fazora neke veličine na vremensku os (koja rotira) daje trenutnu vrijednost te veličine. Kako ovdje koristimo fazore efektivnih vrijednosti inducirane elektromotorne sile i struje, onda projekciju tih fazora na vremensku os trebamo pomnožiti s $\sqrt{2}$ da dobijemo njihove trenutne vrijednosti.

S druge strane u stroju imamo i prostorno sinusoidalno raspoređene veličine. To su: strujni oblog, protjecanje i indukcija. Slično kao što vremenski promjenljive veličine prikazujemo fazorima, prostorno sinusoidalno raspoređene veličine možemo predstaviti kvazi-vektorima koje ćemo u nastavku skraćeno zvati vektorima.

I dok fazore smještamo u kompleksnu ravninu, vektori se nalaze u realnoj ravnini. Pritom se položaj pojedinog vektora poklapa s maksimalnim iznosom pripadne sinusoidalno raspoređene veličine. Tako će na primjer položaj vektora magnetske indukcije biti istovjetan sa simetralom magnetskog polja u smjeru sjevernog pola.

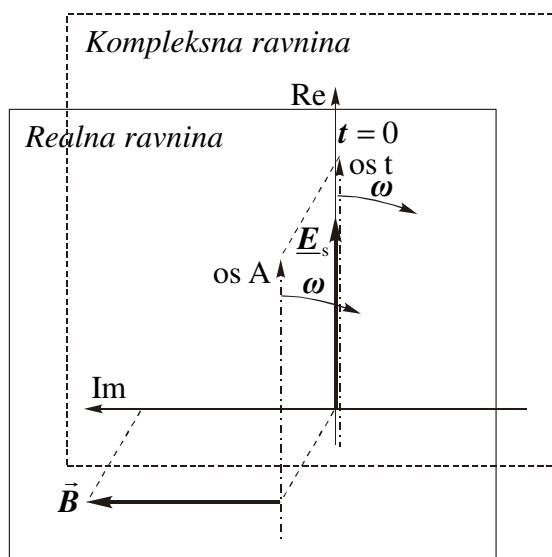
Pri lijevom smjeru vrtnje rotora mehanička kutna brzina rotora Ω_m (i navedenih vektora) za dvopolni stroj je jednaka kružnoj frekvenciji mreže ω . Na slici 2.21.a) je prikazan položaj vektora indukcije $\vec{B}$ u odnosu na os faze A u trenutku kad se u toj fazi inducira maksimalna elektromotorna sila.



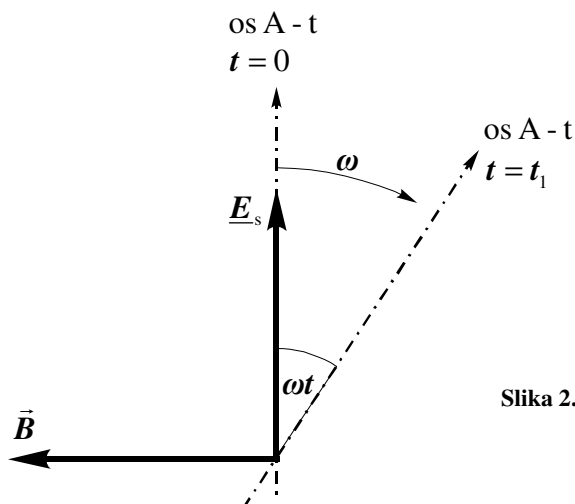
Slika 2.21. Prikaz vektora indukcije i referentne osi (os faze A)
a) vektor se vrti ulijevo (os A miruje), b) vektor miruje (os A se vrti udesno).

Umjesto da se vektori vrte ulijevo, možemo zamisliti da vektori i rotor miruju, a naša ravnina (i stator) se vrti na desnu stranu (slika 2.21.b)). Pritom kao referentnu realnu os uzimamo simetralu namota faze A statora. Ta se os vrti udesno istom brzinom kao i vremenska os u fazorskom dijagramu.

Ove dvije ravnine, kompleksnu s fazorima i realnu s vektorima, možemo preklopiti jednu preko druge (slika 2.22.) pa tako dobijemo zajednički vektorsko-fazorski dijagram (slika 2.23.). Na zajedničkom dijagramu i vektori i fazori miruju, a zajednička prostorno-vremenska os (A-t os) vrti se udesno električnom kutnom brzinom ω .



Slika 2.22. Preklop realne ravnine (s vektorom indukcije) preko kompleksne ravnine (s fazorom elektromotorne sile)



Slika 2.23. Zajednički vektorsko-fazorski dijagram indukcije i elektromotorne sile

U vektorsko-fazorskom dijagramu sve vektore i fazore crtamo u trenutku $t = 0$. Referentnu (zajedničku) os A-t postavljamo vertikalno, i ona se poklapa s osi faze A. Ako u tom trenutku imamo maksimalnu vrijednost elektromotorne sile u fazi A, fazor $\underline{E}_s$ se poklapa s referentnom osi. Da bi to bila istina, vektor indukcije $\vec{B}$ mora biti okomit na os faze A i zakrenut ulijevo.

Struja $\underline{I}_s$ u fazi A može biti vremenski pomaknuta u odnosu na napon, na primjer može kasniti za kut φ_s .

Analogno (2.7.) će ukupno protjecanje armaturnog statorskog namota sinkronog stroja iznositi:

$$\Theta_a = \frac{m_s}{2} \cdot \frac{2\sqrt{2}I_s}{\pi} \cdot \frac{N_s}{p} k_{ws} \quad (2.16.)$$

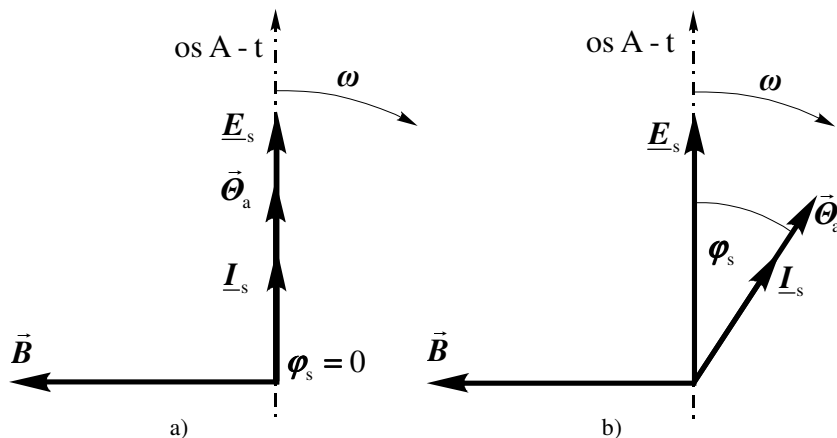
U prethodnom izrazu se upotrebljene veličine odnose na statorski namot:

m_s – broj faza statorskog namota,

N_s – broj serijski vezanih zavoja jedne faze statora,

k_{ws} – faktor namota statorskog namota.

Protjecanje armature Θ_a predstavlja maksimalnu vrijednost i za 3-fazni namot iznosi 150% protjecanja jedne faze, konstantnog je iznosa i vrti se sinkrono s rotorom. Ono će imati maksimum u smjeru osi faze A onda kad struja u fazi A bude maksimalna, odnosno kad se A-t os poklopi s fazorom struje $\underline{I}_s$. Na slici 2.24. su prikazani indukcija i inducirana elektromotorna sila, te struja i protjecanje armature statora.

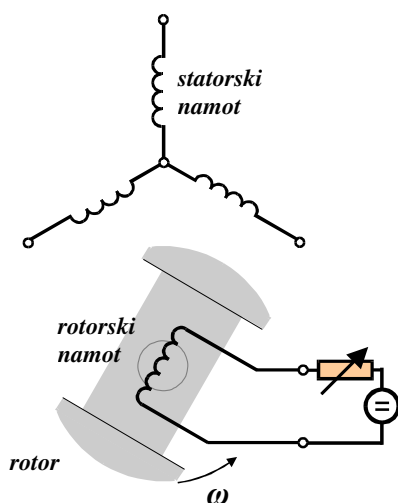


Slika 2.24. Zajednički vektorsko-fazorski dijagram indukcije, inducirane elektromotorne sile, armaturnog protjecanja i struje u fazi statora
a) struja u fazi s naponom ($\cos \varphi_s = 1$), b) struja zaostaje za naponom za kut φ_s .

U zajedničkom vektorsko-fazorskom dijagramu je smjer vektora armaturnog protjecanja $\vec{\Theta}_a$ jednak smjeru fazora struje $\underline{I}_s$ u fazi statorskog namota. Na slici 2.24.a) prikazan je slučaj kad je fazni pomak između inducirane elektromotorne sile i struje jednak nuli ($\varphi_s = 0$). Slučaj na slici 2.24.b) prikazuje vremensko kašnjenje struje u odnosu na napon za neki kut φ_s .

2.6.2. Prazni hod

Prazni hod je pogonsko stanje u kojem je stroj uzbuđen i pritom se vrti, pa se u armaturnom namotu induciraju elektromotorne sile, ali nije opterećen. U slučaju sinkronog generatora to znači da u armaturnom namotu ne teku struje. To je sigurno zadovoljeno ako su stezaljke generatora otvorene, kako to prikazuje slika 2.25.



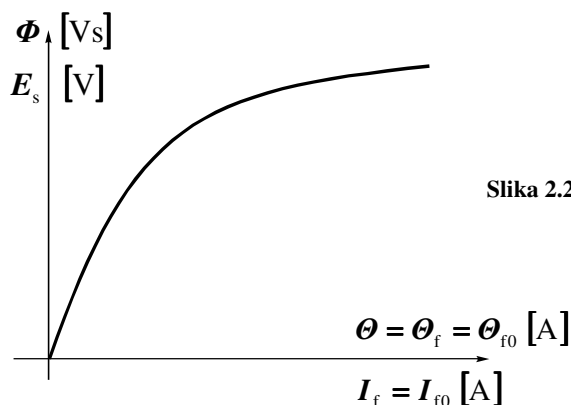
Slika 2.25. Shema spoja sinkronog generatora u praznom hodu

Inducirana elektromotorna sila po fazi ima efektivnu vrijednost:

$$E_s = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \Phi f_s N_s k_{ws} \quad (2.17.)$$

U gornjem izrazu je Φ magnetski tok po polu.

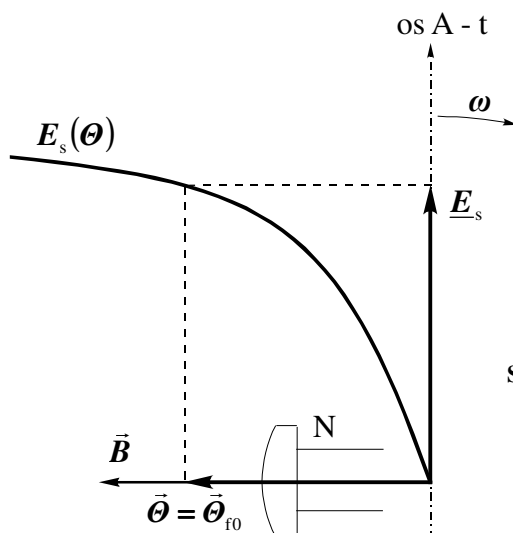
Magnetski tok ovisi o protjecanju $\Phi = f(\Theta)$ na način koji je određen magnetskom karakteristikom. Na slici 2.26. je prikazana magnetska karakteristika sinkronog generatora. Njena nelinearnost posljedica je BH karakteristike paketa limova, gdje pri porastu uzbude dolazi do zasićenja.



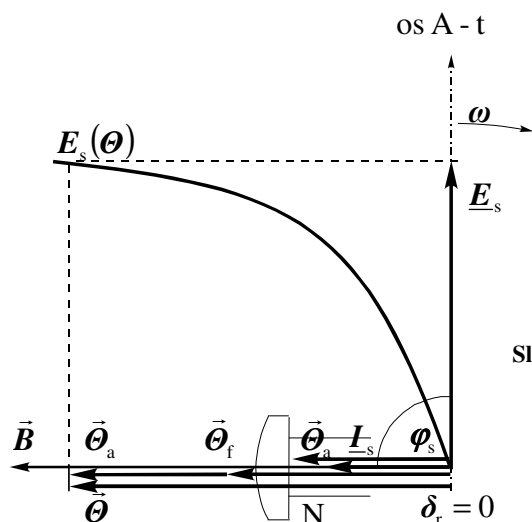
Slika 2.26. Magnetska karakteristika (karakteristika praznog hoda) sinkronog generatora.

Isti dijagram predstavlja i karakteristiku praznog hoda (ovisnost inducirane elektromotorne sile E_s o uzbudnoj struji I_f) budući da je ovisnost inducirano napona o toku linearna.

Ovu karakteristiku možemo ucrtati u vektorsko-fazorski dijagram i to kao funkciju protjecanja rotora θ_f pa dobijemo ovisnost $E_s = f(\theta_f) = f(\theta)$. Tako dobijemo dijagram prema slici 2.27.



Slika 2.27. Zajednički vektorsko-fazorski dijagram indukcije, inducirano napona i uzbudnog protjecanja neopterećenog sinkronog stroja (prazni hod)

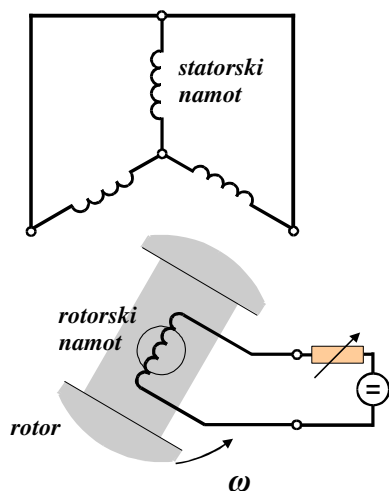


Slika 2.30. Vektorsko-fazorski dijagram sinkronog stroja za čisto kapacitivno opterećenje

2.6.4. Kratki spoj

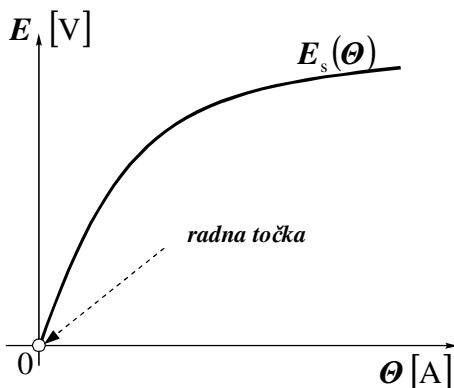
U pogonskom stanju praznog hoda nije bilo pretvorbe energije (mehaničke u električnu ili obrnuto). S energetskeg stajališta postoji još jedno takvo pogonsko stanje, a to je kratki spoj.

U kratkom spoju sinkronog generatora su stezaljke statorskog namota kratko spojene. Na slici 2.31. je prikazana shema trofaznog sinkronog generatora u kratkom spoju, sa statorskim namotom spojenim u zvijezdu. U idealnom slučaju, kakav razmatramo, su vanjski otpori spojeva stezaljki jednaki nuli, a također



Slika 2.31. Shema spoja sinkronog generatora u kratkom spoju

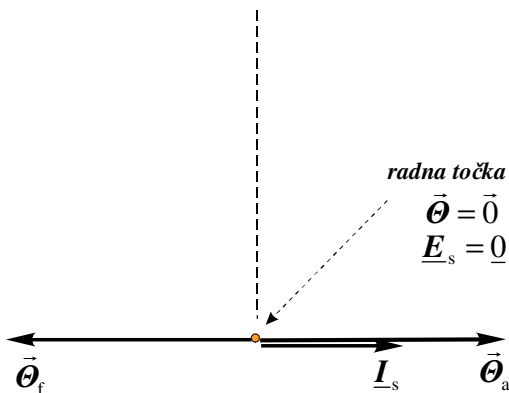
smatramo da stroj nema ni radnih otpora, ni gubitaka, kao niti rasipnih reaktancija. Napon U između stezaljki je jednak nuli ($U = 0$ V). Ako tako spojen stroj uzbudimo i rotor vrtimo, uspostaviti će se u stroju takvo magnetsko stanje (indukcija) da je inducirana elektromotorna sila $E_s = 0$ V. Prema karakteristici praznog hoda je radna točka u ishodištu (slika 2.32.)



Slika 2.32. Radna točka sinkronog generatora u kratkom spoju

To može biti samo ako je ukupno (rezultantno) protjecanje jednako nuli (slika 2.33.):

$$\theta = 0 \quad (2.19.)$$



Slika 2.33. Vektorsko-fazorski dijagram sinkronog generatora u kratkom spoju

To znači da vektorski zbroj uzbuđnog i armaturnog protjecanja mora biti jednak nul vektoru:

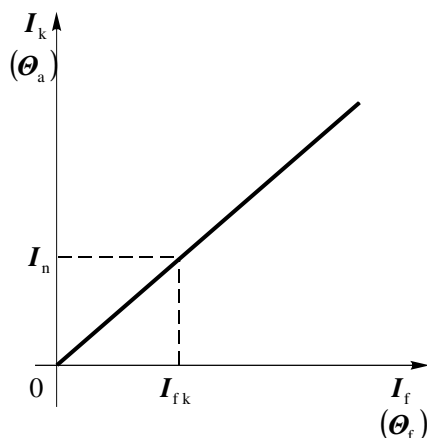
$$\vec{\theta}_f + \vec{\theta}_a = \vec{\theta} = \vec{0} \quad (2.20.)$$

Iz toga proizlazi da je:

$$\vec{\theta}_a = -\vec{\theta}_f \quad (2.21.)$$

Ako povećamo uzбудu, inducirana elektromotorna sila je i dalje jednaka nuli, ali će se povećati armaturna struja. Ukupni magnetski tok je jednak nuli, nema pojave zasićenja, pa je ovisnost armaturne struje o uzbudnoj struji $I_k = (I_f)$ linearna. Ta je ovisnost prikazana na slici 2.34. i predstavlja karakteristiku kratkog spoja sinkronog generatora.

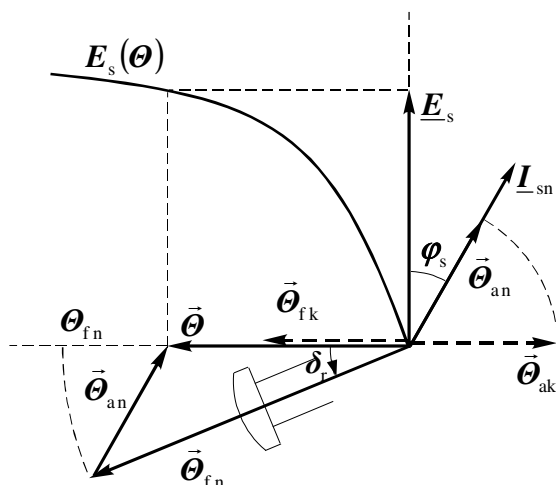
Slika 2.34. Karakteristika kratkog spoja sinkronog generatora



Teorijski je karakteristika kratkog spoja $I_k = (I_f)$ linearna za bilo koji iznos uzbudne struje. To je i ispunjeno pri mjerenju karakteristike kratkog spoja jer pri ispitivanju ne smijemo dopustiti struju armature znatno veću od nazivne. Naime, iznosi struje uzbuđene i struje armature su ograničeni zagrijavanjem stroja. Pri tome je uzbudna struja I_{fk} uvijek manja od nazivne uzbudne struje I_{fn} . To se vidi na slici 2.35. po iznosima uzbudnih protjecanja u nazivnom radu i u kratkom spoju. Na slici su korišteni indeksi "n" za nazivni rad i "k" za kratki spoj.

os A - t

Slika 2.35.
Vektorsko-fazorski dijagram
sinkronog generatora pod nazivnim
opterećenjem i u kratkom spoju



Vidimo da je uzbuđno protjecanje u kratkom spoju Θ_{fk} manje od uzbuđnog protjecanja u nazivnom radu Θ_{fn} , uz struju kratkog spoja I_k jednaku nazivnoj I_n :

$$\Theta_{fk} < \Theta_{fn} \quad (2.22.)$$

$$\Theta_{ak} = \Theta_{an} \quad (2.23.)$$

Iz toga slijedi i odnos uzbuđnih struja:

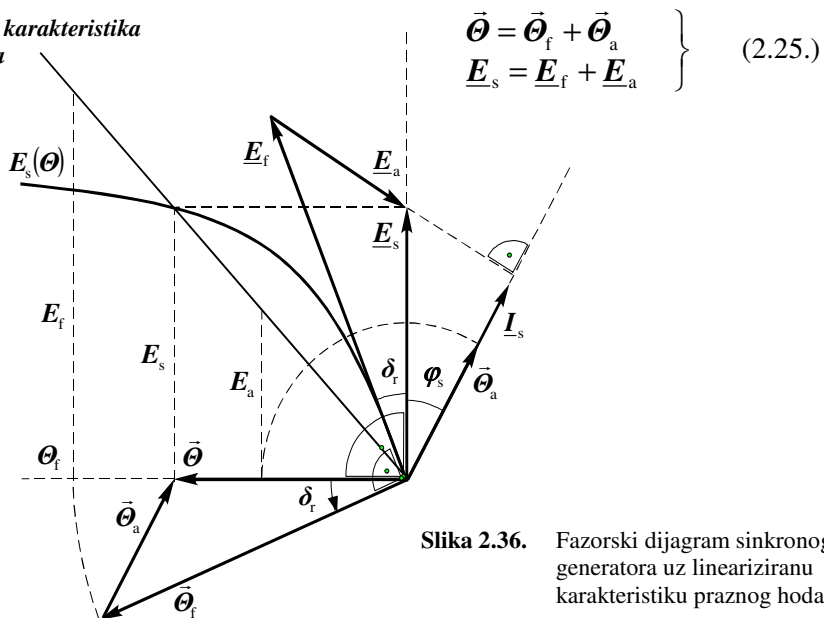
$$I_{fk} < I_{fn} \quad (2.24.)$$

Kod puno većih struja od nazivne bi došlo do zasićenja rasipnih magnetskih puteva, pa krivulja kratkog spoja više ne bi bila linearna.

2.6.5. Sinkrona reaktancija

Od različitih načina prikazivanja fizikalnih pojava u sinkronom stroju možda je najispravnija ona u kojoj se zbrajaju strujni oblozi (koje predstavljamo vektorski). Rezultantni strujni oblog uzrokuje protjecanje koje stvara magnetsko polje koje inducira napone. Sa stajališta konačnog rezultata je svejedno da li ćemo zbrajati strujne obloge ili protjecanja jer su ovdje odnosi linearni. To međutim ne smijemo učiniti s induciranim naponima zbog nelinearne karakteristike magnetiziranja. Međutim, radi lakšeg teorijskog razmatranja, karakteristiku magnetskog kruga lineariziramo pravcem od ishodišta do stvarne radne točke kao na slici 2.36. Sad možemo zbrajati i napone. Pri tome je trokut protjecanja sličan trokutu napona:

*linearizirana karakteristika
praznog hoda*



Slika 2.36. Fazorski dijagram sinkronog generatora uz lineariziranu karakteristiku praznog hoda

Prema slici 2.36. su fazori napona okomiti na slijedeće vektore protjecanja:

$$\left. \begin{array}{l} \underline{E}_s \perp \vec{\Theta} \\ \underline{E}_f \perp \vec{\Theta}_f \\ \underline{E}_a \perp \vec{\Theta}_a \end{array} \right\} \quad (2.26.)$$

Ovo omogućuje jedan drugačiji način prikazivanja. Napon $\underline{E}_a$ je proporcionalan struji, i možemo ga prikazati kao napon na nekoj fiktivnoj reaktanciji X_s :

$$\underline{E}_a = -jX_s \cdot \underline{I}_s \quad (2.27.)$$

Inducirana elektromotorna sila $\underline{E}_s$ je tada jednaka:

$$\underline{E}_s = \underline{E}_f - jX_s \underline{I}_s = \underline{E}_f + \underline{E}_a \quad (2.28.)$$

X_s se naziva sinkrona reaktancija. To nije neka reaktancija koju bismo mogli izmjeriti na stroju u mirovanju. Međutim, sve dok je inducirani napon konstantan, stroj će se ponašati kao izvor koji ima neku unutrašnju reaktanciju X_s . $\underline{E}_f$ je ona inducirana elektromotorna sila koja bi se inducirala u armaturnom namotu nakon rasterećenja generatora (dakle u praznom hodu) ako bi vrijedila linearna karakteristika praznog hoda. To je **fiktivna** inducirana elektromotorna sila.

Sve ovo vrijedi uz pretpostavku linearne karakteristike praznog hoda, uz konstantno ukupno protjecanje. Egzaktno, to vrijedi za dvije radne točke na karakteristici, koje se koriste za linearizaciju: nazivnu točku i točku kratkog spoja. Druga radna točka, na primjer na nižem naponu, dala bi drugi pravac linearizacije i drugi iznos sinkrone reaktancije.

Često se koriste pojmovi zasićena i nezasićena sinkrona reaktancija koje odgovaraju različitim lineariziranim karakteristikama, na zasićenom i nezasićenom dijelu karakteristike magnetiziranja.

Sinkrona reaktancija se iskazuje i u relativnoj vrijednosti X_{sr} . Dobije se pomoću X_s i nazivnih faznih vrijednosti napona U_{sn} i struje I_{sn} :

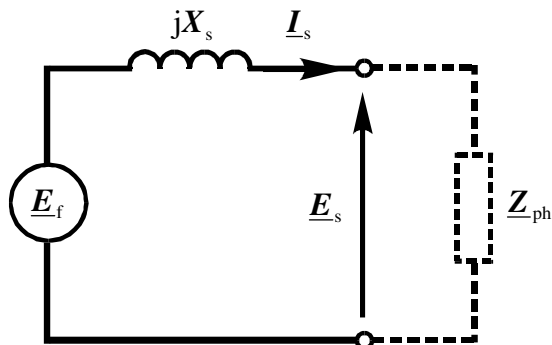
$$X_{sr} = X_s \frac{I_{sn}}{U_{sn}} \quad (2.29.)$$

Uobičajeno se koristi vrijednost sinkrone reaktancije izražene u postocima, a dobije se množenjem relativne vrijednosti X_{sr} sa 100.

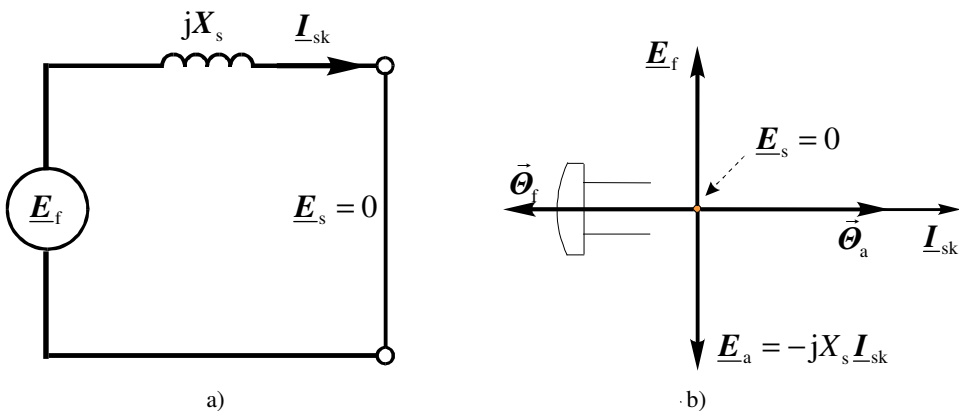
2.6.6. Nadomjesna shema

Pomoću X_s smo definirali unutarnju reaktanciju sinkronog stroja pa možemo nacrtati jednostavnu nadomjesnu shemu sinkronog stroja prema slici 2.37. Na slici je zanemaren radni otpor faze statorskog namota, a rasipna reaktancija je pribrojena sinkronoj reaktanciji [1].

Slika 2.37.
Nadomjesna shema
sinkronog generatora



Pomoću ove nadomjesne sheme možemo sada analizirati prilike u kratkom spoju. Na slici 2.38.a) je prikazana nadomjesna shema za slučaj kratkog spoja sinkronog stroja, a na slici 2.38.b) je vektorsko-fazorski dijagram za kratki spoj.



Slika 2.38. Kratki spoj sinkronog generatora
a) nadomjesna shema,
b) vektorsko fazorski dijagram.

U kratkom spoju je napon na stezaljkama $U_s = E_s$ jednak nuli, a u armaturi teče fazna struja kratkog spoja I_{sk} , pa je:

$$E_f = I_{sk} X_s \quad (2.30.)$$

Fiktivna inducirana elektromotorna sila E_f je proporcionalna uzbudnom protjecanju, pa i uzbuđnoj struji:

$$E_f = k_f I_f \quad (2.31.)$$

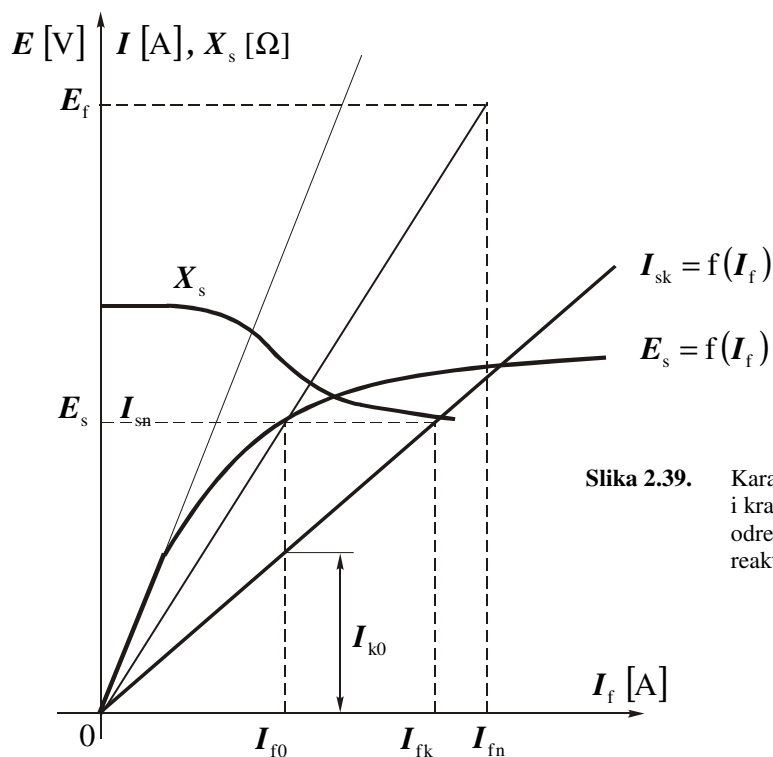
Izjednačenjem ova dva izraza slijedi da je:

$$I_{sk} X_s = k_f I_f \quad (2.32.)$$

Iz ovog se dobije sinkrona reaktancija:

$$X_s = \frac{E_f}{I_{sk}} = k_f \frac{I_f}{I_{sk}} \quad (2.33.)$$

Neka druga točka praznog hoda dala bi drugu vrijednost za k_f i za X_s . U praksi se uvijek koristi upravo nazivna točka za linearizaciju karakteristike praznog hoda. Sinkrona reaktancija se određuje iz karakteristika praznog hoda i kratkog spoja (slika 2.39.), s time da su te karakteristike nacrtane za fazne vrijednosti napona i struja.



Slika 2.39. Karakteristike praznog hoda i kratkog spoja za određivanje sinkrone reaktancije

Iz linearizirane karakteristike praznog hoda je jasno da za nazivni napon E_s i napon E_s uz uzбудnu struju I_{fn} kao u nazivnoj radnoj točki, vrijedi:

$$k_f = \frac{E_f}{I_{fn}} = \frac{E_s}{I_{f0}} \quad (2.34.)$$

Iz karakteristike kratkog spoja se vidi da je:

$$X_s = k_f \frac{I_f}{I_k} = k_f \frac{I_{f0}}{I_{k0}} \quad (2.35.)$$

Uvrštenjem konstante k_f u izraz za sinkronu reaktanciju se dobije:

$$X_s = \frac{E_s}{I_{k0}} \quad (2.36.)$$

I_{k0} je ona struja kratkog spoja koja teče u armaturnom namotu kad je uzbudna struja jednaka uzbudnoj struji praznog hoda uz koju se dobije nazivni napon praznog hoda.

Relativna vrijednost sinkrone reaktancije iznosi dakle:

$$X_{sr} = \frac{I_{fk}}{I_{f0}} \quad (2.37.)$$

2.6.7. Energetska ravnoteža

Ako je stroj opterećen, mehanička snaga P_{mec} koja se dovodi ili odvodi na osovini mora biti jednaka električnoj snazi P_{el} koju se odvodi sa ili dovodi na električne stezaljke stroja:

$$P_{mec} = P_{el} \quad (2.38.)$$

Mehanička snaga je određena momentom T_{mec} na osovini i mehaničkom kutnom brzinom Ω_m :

$$P_{mec} = T_{mec} \Omega_m \quad (2.39.)$$

Mehanička kutna brzina iznosi:

$$\Omega_m = \frac{\pi n}{30} \quad (2.40.)$$

Električna radna snaga za m_s -fazni stroj iznosi:

$$P_{el} = m_s E_s I_s \cos \varphi_s \quad (2.41.)$$

E_s i I_s su efektivne fazne vrijednosti inducirane elektromotorne sile i struje u statorskom namotu.

Da bi se predočila ovisnost mehaničke i električne snage, teorijsko razmatranje se započinje pretpostavkom njihove jednakosti (2.38), tj. da nema gubitaka u stroju ($P_d = 0$). Uvrštavanjem (2.39) i (2.41) u (2.38) slijedi:

$$T_{\text{mec}} \Omega_m = m_s E_s I_s \cos \varphi_s \quad (2.42.)$$

Inducirana elektromotorna sila u jednoj fazi, izražena pomoću maksimalne indukcije B pod polom, iznosi:

$$E_s = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} B \tau_p l_s f_s N_s k_{ws} \quad (2.43.)$$

Polni korak τ_p je jednak:

$$\tau_p = \frac{d_s \pi}{2p} \quad (2.44.)$$

U prethodnim izrazima l_s je duljina paketa željeza statora, N_s broj serijski vezanih zavoja po fazi statorskog namota, k_{ws} faktor statorskog namota i d_s promjer provrta statora.

Iz izraza (2.16.) za ukupno armaturno protjecanje se dobije fazna struja statora I_s :

$$I_s = \frac{\Theta_a}{m_s} \cdot \frac{\pi}{\sqrt{2}} \cdot \frac{p}{N_s k_{ws}} \quad (2.45.)$$

Kad se to uvrsti u izraz za električnu snagu, dobije se:

$$P_{\text{el}} = \Omega_m \frac{\pi}{\tau_p} V B \Theta_a \cos \varphi_s = K_T B \Theta_a \cos \varphi_s \quad (2.46.)$$

Dakle, električna snaga ovisi o veličinama koje se u radu mijenjaju (indukciji i protjecanju) i o konstanti K_T koja ovisi o dimenzijama stroja (volumenu V i polnom koraku τ_p) i radnoj frekvenciji (odnosno brzini vrtnje):

$$K_T = \Omega_m \frac{\pi}{\tau_p} V \quad (2.47.)$$

Da bi se dobio izraz za mehaničku snagu, treba odrediti moment. Elektromagnetski moment izmjeničnog stroja iznosi:

2.6.8. Krivulja momenta

Elektromagnetski moment stroja je određen izrazom (2.48.). Uz nepromjenjene iznose indukcije B i uzbuđnog protjecanja Θ_f kut opterećenja δ_r će se sam podesiti tako da razvijeni elektromagnetski moment T_e odgovara mehaničkom momentu na osovini T_{mec} .

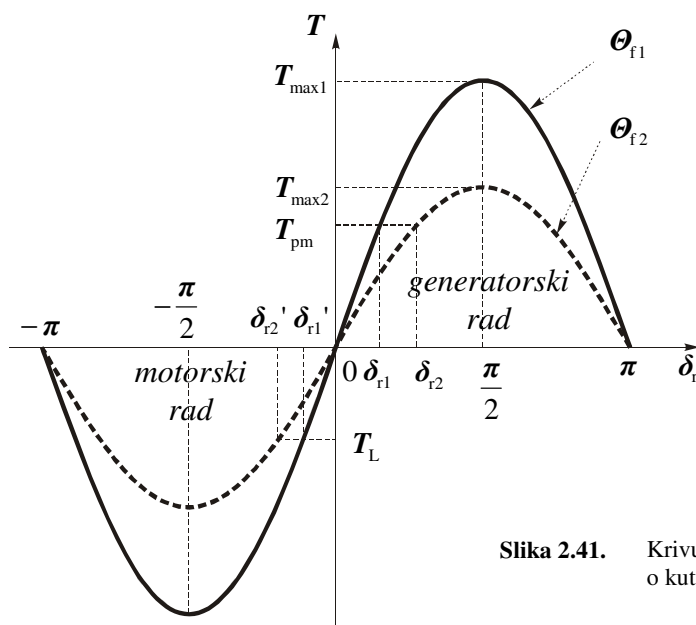
Ako se kut δ_r definira pozitivnim za generatorski rad, onda je prema (2.48.) i razvijeni elektromagnetski moment pozitivan, a područje stabilnog rada je za:

$$0 < \delta_r < \frac{\pi}{2} \quad (2.52.)$$

U motorskom režimu rada je kut δ_r negativan, pa je područje stabilnog rada za:

$$-\frac{\pi}{2} < \delta_r < 0 \quad (2.53.)$$

Moment je sinusna funkcija od δ_r , što je prikazano na slici 2.41.



Slika 2.41. Krivulja momenta u ovisnosti o kutu opterećenja

Izraz za moment može se napisati i kao:

$$T = T_{\max} \sin \delta_r \quad (2.54.)$$

Maksimalni moment iznosi:

$$T_{\max} = \frac{\pi}{\tau_p} V B \Theta_f \quad (2.55.)$$

Razvijeni elektromagnetski moment je jednak maksimalnom $T_e = T_{\max}$ kad je kut opterećenja:

$$\delta_r = \pm \frac{\pi}{2} \quad (2.56.)$$

Međutim, to je nestabilna statička radna točka jer bi i neznatno povećanje momenta izazvalo ispad iz sinkronizma.

Treba još naglasiti da maksimalni moment ovisi o indukciji B (dakle naponu) i uzbudnom protjecanju Θ_f . Ako je napon konstantan, onda je maksimalni moment proporcionalan uzbudnom protjecanju. To znači da će se u slučaju smanjenja protjecanja u jednakom omjeru smanjiti i maksimalni moment. Na slici 2.41. je to prikazano za $\Theta_{f2} < \Theta_{f1}$, pa je i maksimalni moment $T_{\max2} < T_{\max1}$, točnije:

$$T_{\max2} = T_{\max1} \frac{\Theta_{f2}}{\Theta_{f1}} \quad (2.57.)$$

Međutim, zbog smanjenja uzbuđbe se povećao kut opterećenja za isti pogonski moment T_{pm} , pa je $\delta_{r2} > \delta_{r1}$. Na taj način se sinkroni stroj sam prilagodi momentu na osovini.

Ako se poveća pogonski moment T_{pm} na osovini, rotor će se sam postaviti u takav položaj da razvije odgovarajući elektromagnetski moment T_e potreban da održi ravnotežu tom pogonskom momentu:

$$T_e = T_{pm} \quad (2.58.)$$

Taj položaj je zakret u smjeru vrtnje za kut δ_r . Stroj tada radi kao **generator**.

Nasuprot tome, ako se stroj električki napaja i mehanički optereti na osovini, rotor će zaostati za kut δ_r takav da je razvijeni elektromagnetski moment T_e jednak momentu tereta na osovini T_L :

$$T_e = T_L \quad (2.59.)$$

Stroj tada radi kao **motor**. Za iznose uzbudnih protjecanja Θ_{f2} i Θ_{f1} prema slici 2.41. su pripadni kutevi opterećenja u motorskom radu δ_{r2}' i δ_{r1}' .

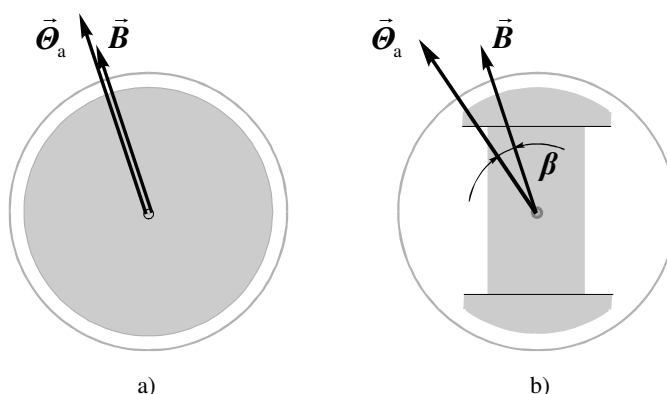
2.6.9. Utjecaj istaknutih polova

Jedna od značajki istaknutih polova je nejednoliki zračni raspored. Uslijed nejednolikog zračnog rasporeda su različiti magnetski otpori (reluktancije) u uzdužnoj i poprečnoj osi stroja [1]. Posljedica različitih magnetskih otpora je ta da se vektor ukupnog protjecanja i vektor indukcije ne moraju poklopiti po smjeru.

Razmotrit će se slučaj bez uzbude na rotoru. Dakle, pretpostavlja se da nema uzbuđenog protjecanja, nego postoji samo armaturno protjecanje $\vec{\Theta}_a$ koje je ujedno i ukupno protjecanje:

$$\left. \begin{array}{l} \vec{\Theta}_f = \vec{0} \\ \vec{\Theta} = \vec{\Theta}_a \end{array} \right\} \quad (2.60.)$$

Kod stroja sa cilindričnim rotorom se smjerovi vektora indukcije $\vec{B}$ i vektora armaturnog protjecanja $\vec{\Theta}_a$ poklapaju (kut opterećenja statora $\delta_s = 0$), pa je i moment jednak nuli. Na slici 2.42. su prikazani položaji vektora magnetske indukcije i protjecanja armature kod stroja s cilindričnim rotorom i kod stroja s istaknutim polovima.



Slika 2.42. Vektori indukcije i armaturnog protjecanja sinkronog stroja bez uzbude na rotoru
a) cilindrični rotor,
b) rotor s istaknutim polovima.

U slučaju stroja s istaknutim polovima je zbog manjeg magnetskog otpora u osi pola rotora (uzdužnoj osi) vektor indukcije $\vec{B}$ pomaknut u odnosu na vektor protjecanja $\vec{\Theta}_a$ za kut β u smjeru osi pola (slika 2.42.b)).

To znači da se zbog pomaka među vektorima javlja moment T_{rel} koji djeluje na stator stroja. Taj moment je proporcionalan sinusu kuta β između vektora indukcije i vektora armaturnog protjecanja i iznosi:

$$T_{\text{rel}} = \frac{\pi}{\tau_p} V B \Theta_a \sin \beta \quad (2.61.)$$

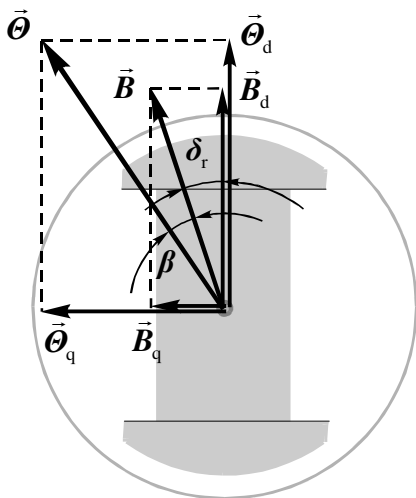
Dakle, pojavljuje se moment iako nema uzbuđenog protjecanja na rotoru. Taj moment je posljedica različitog magnetskog otpora – reluktancije u uzdužnoj $\mathbf{d}$ i poprečnoj $\mathbf{q}$ osi stroja (u simetrali međupolnog prostora), pa ga nazivamo reluktantnim momentom T_{rel} [1]. To isto će se dogoditi i pri uzbudi na rotoru. Prema tome može se općenito uzeti da je kod istaknutih polova vektor ukupnog protjecanja $\vec{\Theta}$ pomaknut u odnosu na vektor indukcije $\vec{B}$ za kut β . Vektor indukcije $\vec{B}$ je i dalje pomaknut u odnosu na uzbuđeno protjecanje $\vec{\Theta}_f$ (i uzdužnu os) za kut δ_r .

Prema pravilima o vektorima može se vektor protjecanja $\vec{\Theta}$ prikazati kao sumu vektora protjecanja u uzdužnoj osi $\vec{\Theta}_d$ i poprečnoj osi $\vec{\Theta}_q$:

$$\vec{\Theta} = \vec{\Theta}_d + \vec{\Theta}_q \quad (2.62.)$$

Zbog različitih magnetskih otpora u uzdužnoj i poprečnoj osi će ovim protjecanjima odgovarati različiti iznosi vektora indukcije $\vec{B}_d$ u uzdužnoj i $\vec{B}_q$ u poprečnoj osi (slika 2.43.). Vektor ukupne indukcije je jednak:

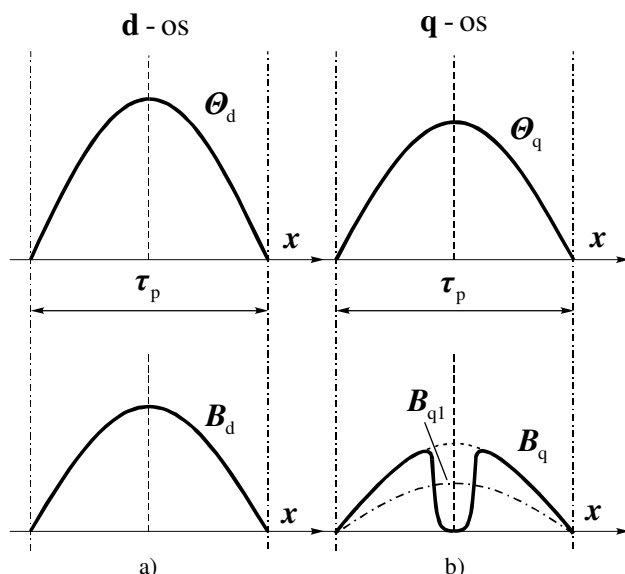
$$\vec{B} = \vec{B}_d + \vec{B}_q \quad (2.63.)$$



Slika 2.43.

Vektori indukcije i protjecanja u uzdužnoj i poprečnoj osi sinkronog stroja s istaknutim polovima

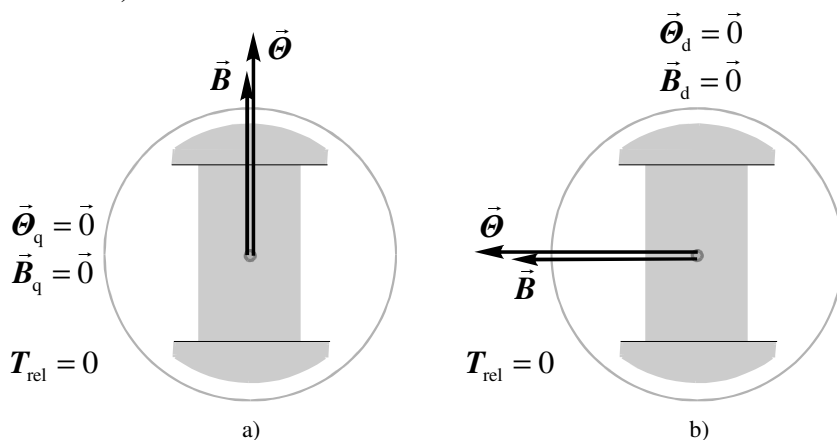
Stvarni raspored vala protjecanja i indukcije u uzdužnoj i poprečnoj osi je prikazan na slici 2.44. S B_{q1} je označen osnovni harmonik indukcije u q -osi.



Slika 2.44.

Prostorni raspored protjecanja i indukcije sinkronog stroja s istaknutim polovima
a) uzdužna os,
b) poprečna os.

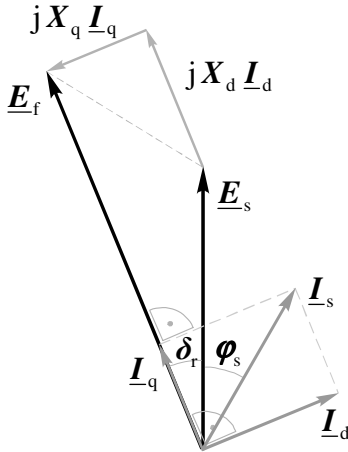
Iznos reluktantnog momenta ovisi o položaju protjecanja u odnosu na uzdužnu d -os stroja. Ako je protjecanje samo u uzdužnoj osi, momenta T_{rel} nema (slika 2.45.a)). Isto tako nema momenta T_{rel} ako je protjecanje samo u poprečnoj osi (slika 2.45.b)). Maksimum reluktantnog momenta nalazi se negdje između ta dva položaja. To znači da će se reluktantni moment T_{rel} dvostruko brže mijenjati u ovisnosti o kutu opterećenja δ_r u odnosu na osnovni moment T_f (moment uslijed uzbude).



Slika 2.45.

Protjecanje i indukcija samo u jednoj osi sinkronog stroja s istaknutim polovima
a) u uzdužnoj osi, b) u poprečnoj osi.

Iznos reluktantnog momenta može se najlakše izvesti pomoću električne snage i fazorskog dijagrama prema slici 2.46. Neka su poznati napon $\underline{E}_s$, struja $\underline{I}_s$ i fazni pomak φ_s , te uzdužna i poprečna sinkrona reaktancija X_d i X_q .



Slika 2.46. Fazorski dijagram sinkronog stroja s istaknutim polovima

Pretpostavi se neki kut opterećenja δ i fazor fiktivne inducirane elektromotorne sile $\underline{E}_f$ (točka 2.6.5.) čiji smjer je uvijek okomit na smjer $\vec{\Theta}_f$ pa se poklapa s poprečnom osi q . Struju $\underline{I}_s$ projicira se u uzdužnu i poprečnu os stroja i time je se rastavi na uzdužnu $\underline{I}_d$ i poprečnu $\underline{I}_q$ komponentu. Uzdužna komponenta $\underline{I}_d$ se tako poklopi sa smjerom vektora uzbudnog protjecanja $\vec{\Theta}_f$, pa je okomita na fazor $\underline{E}_f$ i iznosi:

$$I_d = I_s \sin(\delta_r + \varphi_s) \quad (2.64.)$$

Poprečna komponenta $\underline{I}_q$ se poklopi sa smjerom $\underline{E}_f$ i iznosi:

$$I_q = I_s \cos(\delta_r + \varphi_s) \quad (2.65.)$$

Iz slike 2.46. se vidi da je protunapon $X_q I_q$ na poprečnoj sinkronoj reaktanciji jednak:

$$X_q I_q = E_s \sin \delta_r \quad (2.66.)$$

Uvrštenjem izraza (2.65.) u (2.66.) dobije se kut opterećenja:

$$\operatorname{tg} \delta_r = \frac{X_q I_s \cos \varphi_s}{E_s + X_q I_s \sin \varphi_s} \quad (2.67.)$$

Iz slike 2.46. se vidi da je fiktivna inducirana elektromotorna sila jednaka:

$$\mathbf{E}_f = \mathbf{E}_s \cos \delta_r + \mathbf{X}_d \mathbf{I}_d \quad (2.68.)$$

Uvrštenjem (2.64.) u (2.68.) dobije se:

$$\mathbf{E}_f = \mathbf{E}_s \cos \delta_r + \mathbf{X}_d \mathbf{I}_s \sin(\delta_r + \varphi_s) \quad (2.69.)$$

Iz izraza (2.66.) slijedi poprečna komponenta struje $\mathbf{I}_q$:

$$\mathbf{I}_q = \frac{\mathbf{E}_s \sin \delta_r}{\mathbf{X}_q} \quad (2.70.)$$

Iz (2.68.) slijedi uzdužna komponenta struje $\mathbf{I}_d$:

$$\mathbf{I}_d = \frac{\mathbf{E}_f - \mathbf{E}_s \cos \delta_r}{\mathbf{X}_d} \quad (2.71.)$$

Električna radna snaga stroja je određena izrazom (2.41.). U tom izrazu se pojavljuje radna komponenta struje koja se može izraziti pomoću radnih komponenta uzdužne i poprečne struje:

$$\mathbf{I}_s \cos \varphi_s = \mathbf{I}_q \cos \delta_r + \mathbf{I}_d \sin \delta_r \quad (2.72.)$$

Uvrštenjem izraza (2.72.) u (2.41.), te korištenjem (2.70.) i (2.71.) dobije se izraz za električnu snagu:

$$\mathbf{P}_{el} = m_s \left[\frac{\mathbf{E}_f \mathbf{E}_s}{\mathbf{X}_d} \sin \delta_r + \frac{\mathbf{E}_s^2}{2} \left(\frac{1}{\mathbf{X}_q} - \frac{1}{\mathbf{X}_d} \right) \sin 2\delta_r \right] \quad (2.73.)$$

Izraz (2.73.) pokazuje da stroj s istaknutim polovima razvija snagu koja ima sinusni član ovisan o δ_r i sinusni član ovisan o $2\delta_r$. Prvi član predstavlja snagu $\mathbf{P}_f$ koja se razvija uslijed uzbude:

$$\mathbf{P}_f = m_s \frac{\mathbf{E}_f \mathbf{E}_s}{\mathbf{X}_d} \sin \delta_r \quad (2.74.)$$

Drugi dio je snaga uslijed istaknutih polova (reluktancije):

$$\mathbf{P}_{rel} = m_s \frac{\mathbf{E}_s^2}{2} \left(\frac{1}{\mathbf{X}_q} - \frac{1}{\mathbf{X}_d} \right) \sin 2\delta_r \quad (2.75.)$$

Razvijeni elektromagnetski moment $\mathbf{T}_e$ iznosi:

$$\mathbf{T}_e = \frac{\mathbf{P}_{el}}{\Omega_m} \quad (2.76.)$$

Analogno snazi P_{el} i moment T_e ima osnovni moment T_f koji se razvija uslijed uzbude i reluktantni moment T_{rel} uslijed reluktancije jer je:

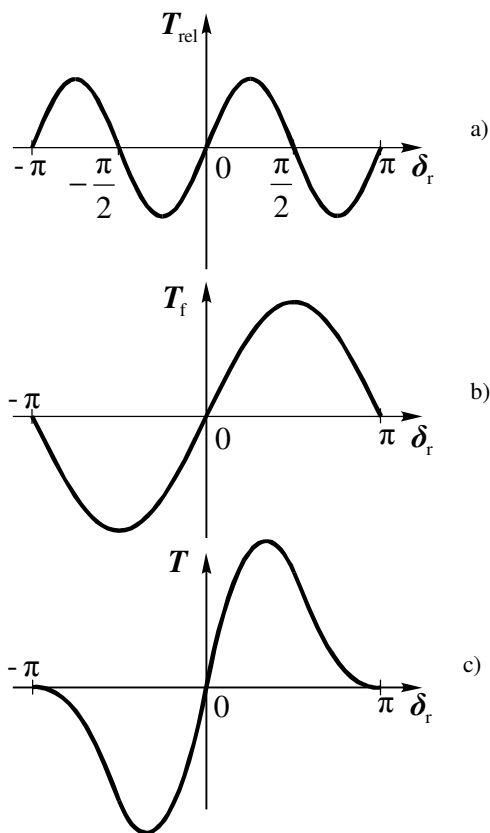
$$T_e = \frac{1}{\Omega_m} (P_f + P_{\text{rel}}) \quad (2.77.)$$

Uz zanemarenje gubitaka u stroju je ukupni moment na osovini T jednak razvijenom elektromagnetskom momentu T_e :

$$T = T_e \quad (2.78.)$$

Na slici 2.47. su dani reluktantni, osnovni i ukupni moment stroja s istaknutim polovima u ovisnosti o kutu opterećenja δ_r . Reluktantni moment T_{rel} se zbraja s momentom uslijed uzbude T_f . Ukupni moment T nije više sinusoidalan, ali mu je amplituda povećana.

Pojava reluktantnog momenta omogućuje izradu strojeva bez rotorskog namota. To su obično strojevi manjih snaga, češće motori, nego generatori. Njihova je izvedba znatno jednostavnija od strojeva s namotom na rotoru, ali im je maksimalni moment manji. Stoga je i snaga takvih strojeva (za isti volumen i brzinu vrtnje) manja.



Slika 2.47. Momenti sinkronog stroja s istaknutim polovima
 a) reluktantni,
 b) osnovni,
 c) ukupni.

2.6.10. Utjecaj prigušnog kaveza

Prigušni kavez, koji se ugrađuje u polove sinkronog stroja (slika 2.8.), ima višestruku namjenu:

- prigušenje inverznog protjecanja,
- prigušenje njihanja stroja i
- asinkroni zalet.

Ako se promatra samo simetrična statička opterećenja, stroj će se ponašati jednako kao i bez prigušnog namota. Štapovi prigušnog kaveza se vrte sinkrono s okretnim magnetskim poljem. Nalaze se stalno u polju jednake magnetske gustoće, i u njima se ne induciraju nikakvi naponi i ne teku nikakve struje.

Drukčije je ako je stroj nesimetrično opterećen (na primjer uslijed prekida jedne faze). U stroju će se pojaviti eliptičko magnetsko polje koje se može prikazati i analizirati kao zbroj direktnog i inverznog polja. Ta se polja vrte u suprotnim smjerovima. Direktno polje se vrti sinkrono s rotorom i ne inducira napone u štapovima kaveza. Inveržno polje vrti se u odnosu na rotor dvostrukom sinkronom brzinom i inducira napone u štapovima. Uslijed toga poteku struje koje po Lenzovom zakonu nastoje potisnuti polje koje ih izaziva. To nije moguće u potpunosti, ali se inveržno protjecanje u znatnoj mjeri ipak priguši. U tu svrhu se prigušni kavez koristi kod jednofaznih sinkronih strojeva.

Prigušni kavez ima značajni utjecaj i na prigušenje njihanja stroja. Naime, magnetsko se polje ponaša poput elastičnog pera i tvori s masama rotora titrajni sustav. Pri naglim promjenama opterećenja stroja taj sustav počinje titrati. Frekvenciju titranja određuju zamašne mase rotora i sile ovisne o kutu opterećenja δ_r . Pri njihanju dolazi do induciranja napona i pojave struja u prigušnom kavezu koje (opet prema Lenzovom zakonu) prigušuju titranje.

Treća je svrha prigušnog kaveza da pri pokretanju sinkronih motora omogući asinkroni zalet (točka 2.7.5. i poglavlje 3.).

2.6.11. Idealni i realni sinkroni stroj

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

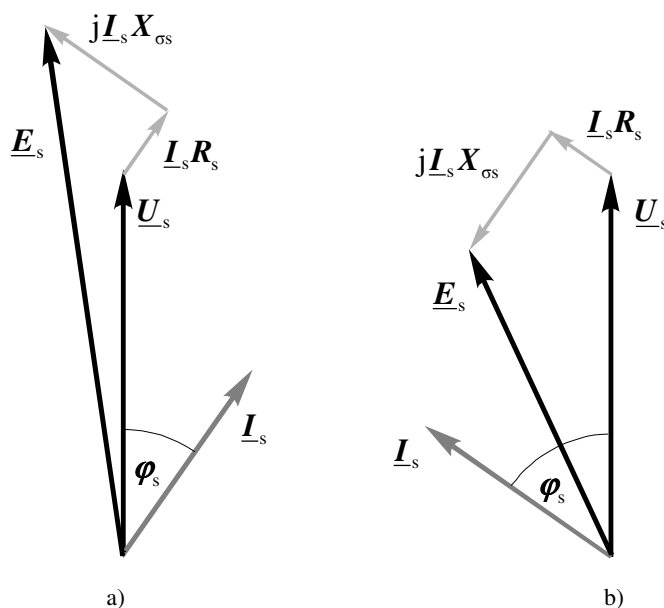
- radni otpori namota koji stvaraju protunapone i gubitke,
- rasipne reaktancije koje također stvaraju protunapone,
- gubici u željezu (uslijed histereze i vrtložnih struja) i
- gubici trenja u ležajevima i ventilacije.

Vanjski fazni napon $\underline{U}_s$ realnog generatora bit će:

$$\underline{U}_s = \underline{E}_s - \underline{I}_s (\underline{R}_s + j \underline{X}_{\sigma s}) \quad (2.79.)$$

Dakle, napon na stezaljkama generatora se razlikuje od inducirane elektromotorne sile u stroju za iznose protunapona na radnom otporu faze $\underline{R}_s$ i rasipnoj reaktanciji $\underline{X}_{\sigma s}$. Pripadni fazorski dijagrami se razlikuju za generatorski i motorski rad.

Na slici 2.48.a) je prikazan fazorski dijagram realnog generatora uz radno-induktivno opterećenje. Na slici 2.48.b) je prikazan fazorski dijagram realnog generatora u slučaju radno-kapacitivnog opterećenja.



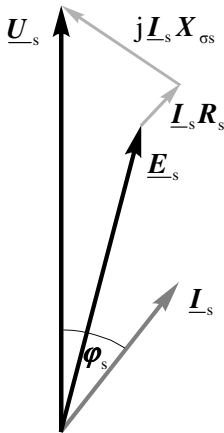
Slika 2.48.
Fazorski dijagram
realnog sinkronog
generatora
a) radno-induktivno
opterećenje,
b) radno-kapacitivno
opterećenje

U slučaju radno-kapacitivnog opterećenja napon na stezaljkama generatora može biti čak i veći od induciranog napona u stroju.

U motorskom radu je vanjski (narinuti) napon veći od unutarnjeg (inducirane elektromotorne sile):

$$\underline{U}_s = \underline{E}_s + \underline{I}_s (\underline{R}_s + j \underline{X}_{\sigma s}) \quad (2.80.)$$

Fazorski dijagram realnog sinkronog stroja u motorskom radu je prikazan na slici 2.49. I u motorskom radu stroj može davati u mrežu jalovu (induktivnu ili kapacitivnu) energiju, ili raditi uz faktor snage $\cos \varphi_s = 1$, što se postiže promjenom uzbudne struje (točka 2.7.5.).



Slika 2.49. Fazorski dijagram realnog sinkronog stroja u motornom radu

Gubici u stroju iznose obično nekoliko postotaka snage, a isto tako i protunaponi. U većini razmatranja će se i dalje zanemariti gubitke, rasipne reaktancije i radne otpore stroja. I dalje će se promatrati idealni stroj u kojem je izlazni fazni napon jednak induciranoj elektromotornoj sili:

$$\underline{U}_s = \underline{E}_s \quad (2.81.)$$

2.6.12. Regulacija napona i frekvencije

Iz analize prethodnih dijagrama jasno je da se pri opterećenju mijenja napon generatora. Najveća je promjena u slučajevima čisto induktivnog ili čisto kapacitivnog opterećenja.

Ako se treba zadržati isti iznos napona kao u praznom hodu, mora se promijeniti uzbudnu struju tako da ukupno protjecanje Θ ostane jednakog iznosa kao uzbudno protjecanje Θ_{f0} u praznom hodu:

$$\Theta = \left| \vec{\Theta}_f + \vec{\Theta}_a \right| = \Theta_{f0} \quad (2.82.)$$

U praksi to obavljaju automatski regulatori napona. Regulator napona povisuje uzbudnu struju ako se napon smanji, a smanjuje ako se napon povisi.

Osim potrebe za konstantnim naponom obično je postavljen i zahtjev za konstantnom frekvencijom. Taj je zahtjev jako izražen, pa je frekvencija velikih energetske mreže jako stabilna. Frekvenciju određuju broj polova i sinkrona brzina stroja prema (2.4.). Da bi frekvencija bila konstantna, stroj se treba vrtjeti konstantnom brzinom. Konstantnu brzinu održava regulator brzine vrtnje.

U tablicama 2.1. i 2.2. su dane sinkrone brzine za strojeve s 2 do 10 polova pri frekvencijama 50 Hz i 60 Hz.

Tablica 1. Sinkrone brzine vrtnje za razne polaritete stroja pri frekvenciji 50 Hz

2p	2	4	6	8	10
n [o/min]	3000	1500	1000	750	600

Tablica 2. Sinkrone brzine vrtnje za razne polaritete stroja pri frekvenciji 60 Hz

2p	2	4	6	8	10
n [o/min]	3600	1800	1200	900	720

2.7. RAD NA KRUTOJ MREŽI

Dva su osnovna načina na koje sinkroni generator može opskrbljivati svoje potrošače:

- vlastita mreža (otočni rad) i
- kruta mreža.

Primjeri otočnog rada su male mreže s jednim generatorom i više potrošača. To je na primjer brod, zatim rezervni generator u robnoj kući, poslovnoj zgradi, visokoj stambenoj zgradi i slično.

Kruta mreža u pravilu predstavlja veliku mrežu, s puno priključenih generatora, koja ima konstantan (čvrst) napon i frekvenciju. Pojedinačni generator koji se priključi praktički ne utječe na napon, niti na frekvenciju mreže, bez obzira na pogonsko stanje u kojem se nalazi. Primjer krute mreže je elektroenergetski sustav jedne zemlje.

Dva su osnovna uvjeta koja generator mora ispunjavati pri radu na krutu mrežu:

- linijski napon generatora $\underline{U}$ mora biti konstantan i jednak linijskom naponu mreže $\underline{U}_L$ (po veličini i po fazi):

$$\underline{U} = \underline{U}_L \quad (2.83.)$$

- frekvencija generatora f mora biti konstantna i jednaka frekvenciji mreže f_L :

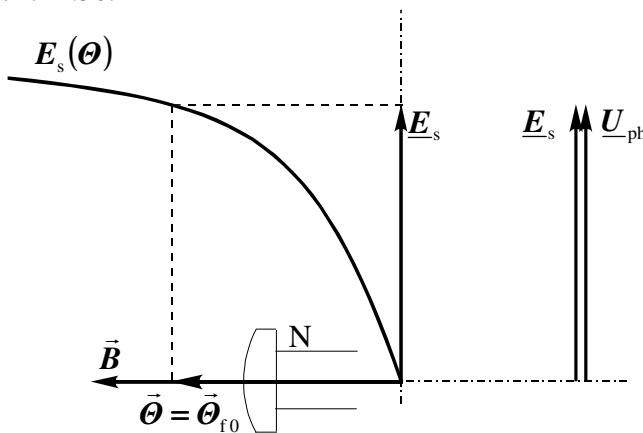
$$f = f_L \quad (2.84.)$$

Ako ova dva uvjeta nisu ispunjena, ako se napon i/ili frekvencija generatora samo neznatno razlikuju od napona i frekvencije mreže, sinkroni generator ne može trajno raditi spojen na mrežu. U takvom su slučaju moguća samo kratkotrajna dinamička stanja.

Iz ovih uvjeta proizlaze neke posljedice za stroj. Iz zahtjeva za konstantnom frekvencijom proizlazi da se stroj mora vrtjeti konstantnom, sinkronom brzinom n . Vezana uz frekvenciju mreže sinkrona brzina mora biti jednaka:

$$n = \frac{60 f_L}{p} \quad (2.85.)$$

Iz zahtjeva da napon bude konstantan po iznosu i po fazi proizlazi da stroj mora imati konstantno protjecanje $\vec{\Theta}$, kako je to prikazano za slučaj praznog hoda na slici 2.50.



Slika 2.50.
Neopterećeni generator u
radu na krutoj mreži

I dalje će se promatrati idealni slučaj prema (2.81.) za koji je izlazni fazni napon generatora $\underline{U}_s$ jednak induciranoj elektromotornoj sili $\underline{E}_s$, a ona mora biti jednaka faznom naponu mreže $\underline{U}_{ph}$. Dakle za prazni hod vrijedi:

$$\left. \begin{aligned} \underline{E}_s &= \underline{U}_{ph} \\ \vec{\Theta} &= \vec{\Theta}_{f0} \\ \vec{\Theta}_a &= \vec{0} \end{aligned} \right\} \quad (2.86.)$$

Protjecanja armature nema, pa je resultantno protjecanje jednako uzbudnom protjecanju.

2.7.1. Ravnoteža protjecanja

Prema ranije rečenom, napon generatora mora biti konstantan i određen je naponom mreže. Stoga resultantno protjecanje u stroju mora biti konstantno. Vektor indukcije, koji leži u istom smjeru kao i vektor protjecanja, također mora imati čvrst položaj i iznos. Međutim, vektor protjecanja $\vec{\Theta}$ je vektorska suma protjecanja uzbuđe $\vec{\Theta}_f$ i protjecanja armature $\vec{\Theta}_a$ prema (2.18.).

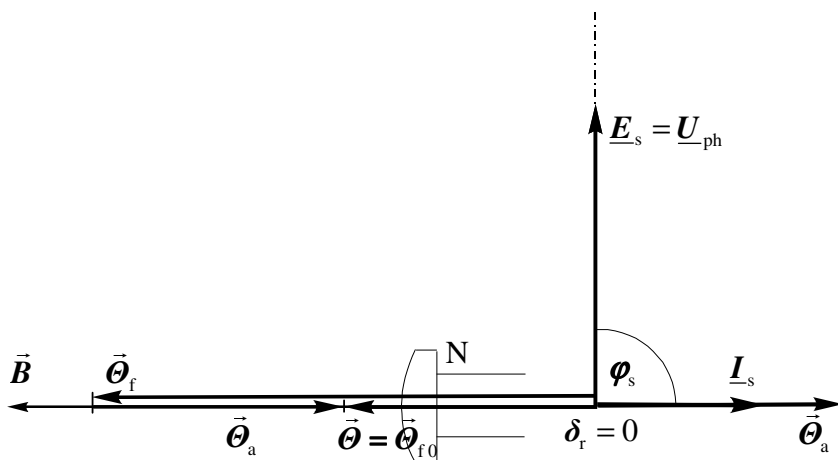
Na vektor protjecanja uzbuđe $\vec{\Theta}_f$ može se djelovati dvojako:

- promjenom uzbudne struje mijenja se veličinu uzbudnog protjecanja (modul vektora),
- promjenom momenta na osovini mijenja se položaj vektora uzbudnog protjecanja.

Budući da ukupno protjecanje mora ostati konstantno, bilo koja od ovih promjena će izazvati promjenu struje i protjecanja armature, i to tako da ukupno protjecanje $\vec{\Theta}$ ostane konstantno:

$$\vec{\Theta} = \vec{\Theta}_f + \vec{\Theta}_a = konst. \quad (2.87.)$$

Na slici 2.51. prikazan je slučaj ravnoteže protjecanja sinkronog generatora koji nastane ako se u praznom hodu poveća uzbudno protjecanje. Poteče takva struja armature koja održi ukupno protjecanje na konstantnom iznosu. Za prikazani slučaj ta struja ima induktivni karakter (stroj se ponaša kao kondenzator). Slučaj je analogan već prije prikazanom na slici 2.29. za čisto induktivno opterećenje generatora.

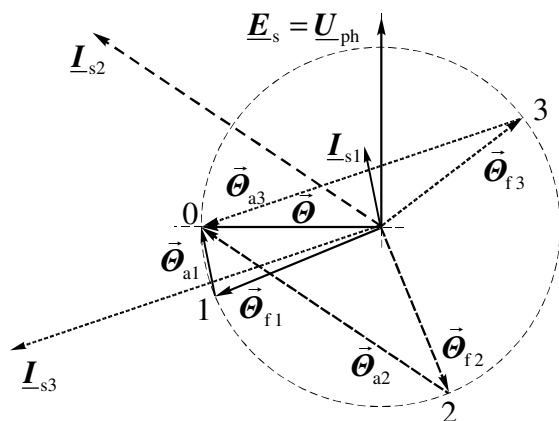


Slika 2.51. Ravnoteža protjecanja generatora pri povećanju uzbudne struje bez momenta na osovini

Na jednak način se mogu razmatrati i drugi slučajevi, pa i opterećivanje momentom, dakle u motorskom radu. Važno je primijetiti da se uspostava ravnoteže protjecanja odvija prirodno! Poteče takva struja armature da vektorski zbroj armaturnog i uzbudnog protjecanja ostane konstantan (prema 2.87.).

2.7.2. Ravnoteža frekvencija

Ravnoteža frekvencija napona mreže i generatora je apsolutno nužan uvjet za stabilan rad sinkronog stroja na krutoj mreži. Zamislamo da pogonskim strojem vrtimo rotor nešto brže od sinkronizma, počevši iz stanja praznog hoda, i da pritom ne mijenjamo uzбудnu struju. Vektor uzbudnog protjecanja bi se kretao po kružnici, kako je to naznačeno na slici 2.54.



Slika 2.54.

Rad generatora pri povećanju brzine vrtnje (točke 1, 2 i 3) u odnosu na prazni hod pri sinkronoj brzini (točka 0)

Ukupno protjecanje mora ostati konstantno. Potekla bi nestacionarna struja armature koja bi s odgovarajućim armaturnim protjecanjem održala ukupno protjecanje. Stroj bi prelazio iz generatorskog u motorski rad i natrag, uz promjenljive struje armature, i u takvom režimu ne bi mogao raditi. Došlo bi do ispadanja iz sinkronizma što bi se moralo riješiti isključenjem iz mreže. Očito je potrebno regulirati uzбудu tako da se izbjegne ispad iz sinkronizma.

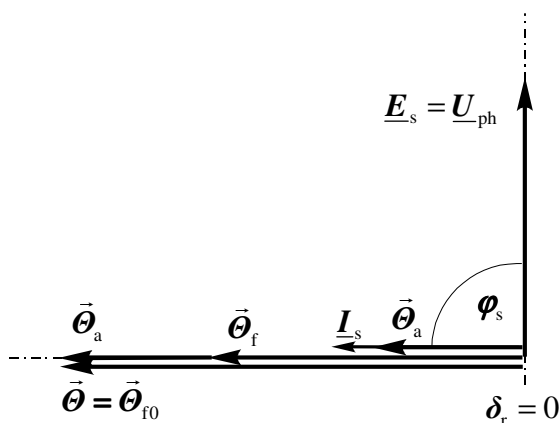
2.7.3. Utjecaj uzbuđe

Utjecaj uzbuđe već je djelomično razmotren kod analize ravnoteže protjecanja i ravnoteže frekvencija. Sada će se detaljnije razmotriti slučaj stroja na krutoj mreži u praznom hodu kojem se mijenja samo uzбудna struja, bez promjene momenta na osovini. Polazi se od stanja praznog hoda.

Ako se uzbuda poveća, pojavi se struja armature tako da ukupno protjecanje ostane nepromijenjeno. Takav je slučaj prikazan već prije na slici 2.51. U odnosu na mrežu se stroj ponaša kao kondenzator. Stroj daje u mrežu induktivnu jalovu snagu, odnosno, kao da uzima kapacitivnu. Pritom nema prijenosa radne snage. Takav stroj je **naduzbuđen** jer mu je uzbuda veća nego u praznom hodu.

Ako se uzbuda smanji, poteče u armaturi struja koja sa stanovišta mreže ima induktivni karakter. Stroj se ponaša kao prigušnica, on uzima iz mreže jalovu induktivnu snagu, a daje u mrežu kapacitivnu. Takav je slučaj prikazan na slici 2.55. Uzbuda je pritom manja nego u praznom hodu, pa je takav stroj **poduzbuđen**.

To isto vrijedi i kad stroj prenosi radnu snagu.



Slika 2.55.

Utjecaj smanjenja uzbude u praznom hodu generatora

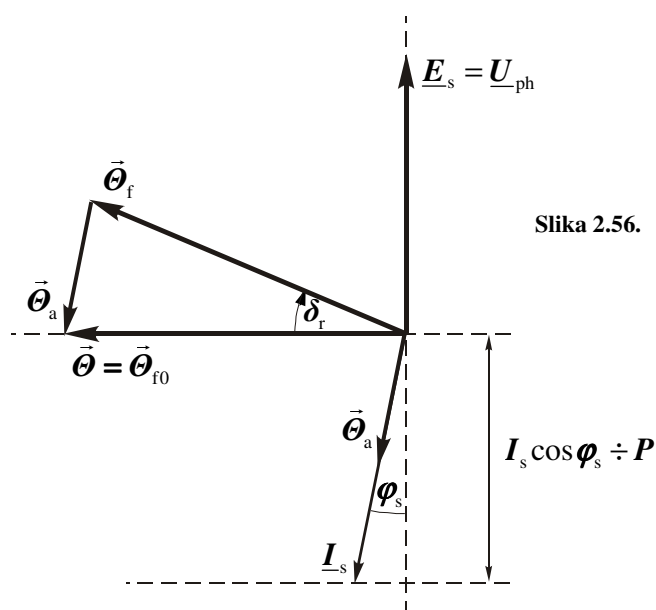
2.7.4. Utjecaj momenta na osovini

Prema zakonu o održanju energije momentom na osovini podešava se prijenos, odnosno pretvorba radne energije iz mehaničke u električnu (generator) ili električne u mehaničku (motor).

Ako se momentom djeluje u smjeru vrtnje, dovodi se mehaničku energiju, odnosno snagu prema (2.39). Poveća li se moment iz stanja praznog hoda i pritom se ne mijenja uzbuda, dobije se slučaj koji odgovara slici 2.52. Pojavi se struja armature radno-kapacitivnog karaktera. Rotor se pritom zakrene za kut δ_r u odnosu na vektor ukupnog protjecanja. Ukupno protjecanje mora ostati nepromijenjeno prema (2.87.). Stroj daje u mrežu radnu snagu prema (2.88.).

Ako se pak rotor koči, tj. djeluje se momentom suprotno smjeru vrtnje, položaj rotora i rotorskog protjecanja će zaostati za kut δ_r prema vektoru ukupnog protjecanja. U armaturi će poteći struja takvog iznosa i smjera koja će stvoriti armaturno protjecanje potrebno da održi nepromijenjeno ukupno protjecanje (slika 2.56.). Stroj radi kao **motor**. Uzima električnu snagu iz mreže i predaje na osovini mehaničku snagu:

$$P = T \Omega_m \quad (2.89.)$$



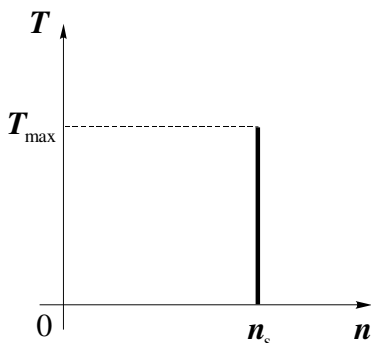
Slika 2.56. Sinkroni stroj u motorskom režimu rada

Ako se uz konstantan moment na osovini poveća uzbuda, stroj će uzimati iz mreže istu radnu snagu, ali će davati u mrežu induktivnu reaktivnu snagu. Stroj se pritom sam prilagođava novim uvjetima: mehaničkom momentu i uzbudi. Postavi se u položaj za kut δ_r potreban da se razvije elektromagnetski moment koji drži ravnotežu momentu na osovini. Detaljniji opis motorskog rada sinkronog stroja je dan u točki 2.7.5.

2.7.5. Sinkroni motor

Ako se sinkroni stroj spojen na krutu mrežu opteretiti momentom, umjesto da ga se tjera pogonskim strojem, on počinje raditi kao motor, što je već prije navedeno u točkama 2.6.8. i 2.7.4. Pritom će mu brzina n biti stalna i jednaka sinkronoj brzini prema (1.11.).

Rad motora često se prikazuje krivuljom momenta u ovisnosti o brzini vrtnje. Krivulja momenta sinkronog motora ima oblik prema slici 2.57. Motor može raditi samo na sinkronoj brzini vrtnje.



Slika 2.57.
Karakteristika momenta sinkronog motora

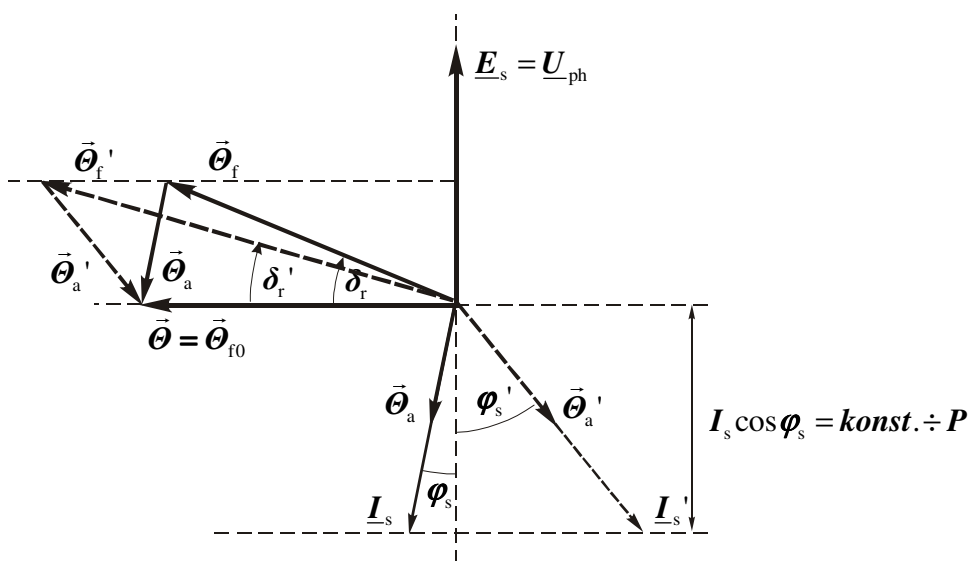
Ako bi se moment tereta povećao preko maksimalnog iznosa $T_{\max}$, motor bi ispao iz sinkronizma. Maksimalna vrijednost momenta već je prije određena prema izrazu (2.55.). Uz konstantan napon na motoru maksimalni moment ovisi o uzbudnom protjecanju Θ_f . Ovo protjecanje može se mijenjati promjenom uzbudne struje.

Prema slici 2.57. je jasno da sinkroni motor nema momenta pri brzini vrtnje $n = 0$, tj. u kratkom spoju (zakočen rotor). Sinkroni motor u kratkom spoju i nije sinkroni stroj!

Moment motora je jednak momentu tereta na osovini, pa je time određena radna snaga koju motor uzima iz mreže:

$$P_{\text{in}} = m_s E_s I_s \cos \varphi_s \quad (2.90.)$$

Uz nepromjenjen napon time je određena i radna komponenta struje statora. Vektor indukcije mora ostati čvrst jer je definiran naponom mreže. Promjenom uzbudne struje će se mijenjati kut opterećenja i jalova komponenta struje. Vektorsko-fazorski dijagram sinkronog motora pri promjeni uzbude uz konstantan moment tereta je prikazan na slici 2.58. Pri tome je korišten generatorski sustav prikazivanja [1, 3]. Na toj slici je $\Theta_f' > \Theta_f$. Dakle, uz jednak moment na osovini se pri promjeni uzbude mijenja jalova komponenta armaturne struje, dok radna komponenta te struje ostane ista. Tako sinkroni motori mogu promjenom uzbude raditi kao kompenzatori jalove energije (obično induktivne). Promjenom uzbude se može podesiti da stroj radi s faktorom snage $\cos \varphi_s = 1$, dakle kao čisti radni teret.



Slika 2.58. Vektorsko-fazorski dijagram sinkronog motora pri promjeni uzbude uz konstantni moment tereta

Vidjeli smo da sinkroni motor nema momenta kad se rotor ne vrti, dakle pri brzini vrtnje $n = 0$. Stoga se kod sinkronih motora javlja problem pokretanja. Postoji nekoliko mogućih rješenja:

- asinkroni zalet,
- sinkroni zalet i
- pomoćni motor.

Asinkroni zalet se izvodi pomoću prigušnog kaveza ugrađenog u polne papuče (točka (2.3.) i slika 2.8.). Sinkroni motor se bez uzbude priključi na mrežu i zaleti kao asinkroni kavezni motor do približno sinkrone brzine. Onda se uključi uzbuda, i motor uskoči u sinkronizam. To je ujedno i najjednostavniji način pokretanja, ali motor mora imati prigušni kavez, koji mora biti odgovarajuće dimenzioniran.

Sinkroni zalet se izvodi pomoću drugog generatora ili statičkog pretvarača. Sinkronom motoru, koji je prethodno uzbuđen, postepeno se podižu napon i frekvencija do punog napona i brzine vrtnje. Tada se priključi na mrežu.

Rješenje sa statičkim pretvaračem se koristi u reguliranim pogonima i u pogonima s više sinkronih motora koji se pokreću jednim pretvaračem.

Treće rješenje je **zalet s pomoćnim motorom** (“pony” motor) koji je mehanički spojen sa sinkronim motorom. Tim motorom se sinkroni motor zaleti do

sinkronizma i tada priključi na mrežu. Pomoćni motor služi samo za zalet (ako je asinkroni) ili se kasnije koristi kao uzбудnik (ako je istosmjerni stroj).

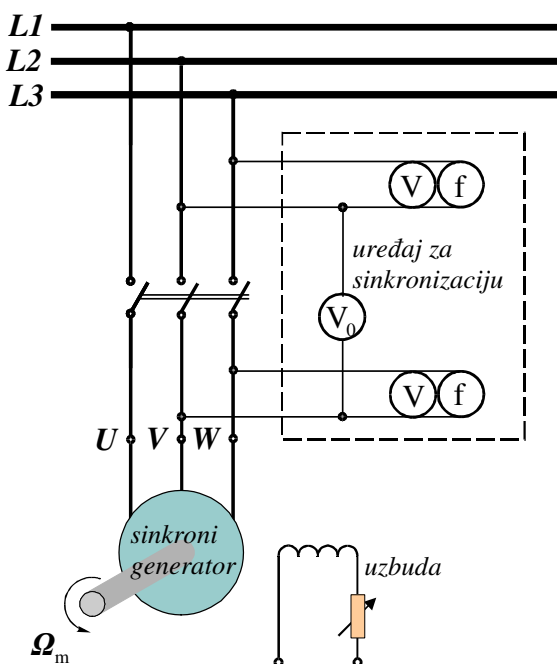
2.7.6. Sinkronizacija generatora na mrežu

Već je prije rečeno da sinkroni generator može raditi na krutoj mreži jedino ako su:

- frekvencije tog stroja i mreže jednake,
- naponi stroja i mreže jednaki po iznosu,
- redosljedi faza jednaki i
- fazni kutevi između napona pripadnih faza stroja i mreže jednaki nuli.

Ako stroj radi samostalno, i treba ga priključiti na mrežu, treba osigurati gornje uvjete. Ovaj postupak se zove sinkronizacija.

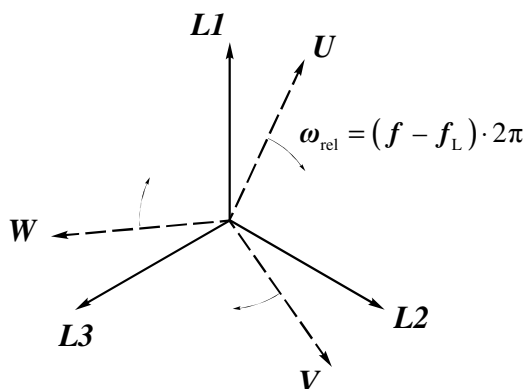
Prvo se priprema generator da ima odgovarajuću brzinu vrtnje i napon na stezaljkama. Ako je generator u nekoj elektrani i treba ga priključiti na mrežu, onda ga se pokrene pogonskim strojem (vodnom ili parnom turbinom ili dizelmotorom) do sinkronog broja okretaja. Uzbuda se podesi tako da se na stezaljkama dobije napon jednak naponu mreže. Generator tada radi u praznom hodu, kako to prikazuje slika 2.59.



Slika 2.59. Sinkronizacija

Prekidač za spoj s mrežom je pritom otvoren. Napone i frekvencije mreže i generatora mjeri se nezavisnim voltmetrima i frekvencimetrima. Kad se postigne jednake napone i frekvencije, još uvijek se ne smije uključiti prekidač, jer se naponi mogu razlikovati po fazi (slika 2.60.).

Slika 2.60.
Zvijezde napona mreže
(L1-L2-L3) i napona
generatora (U-V-W)
pri sinkronizaciji

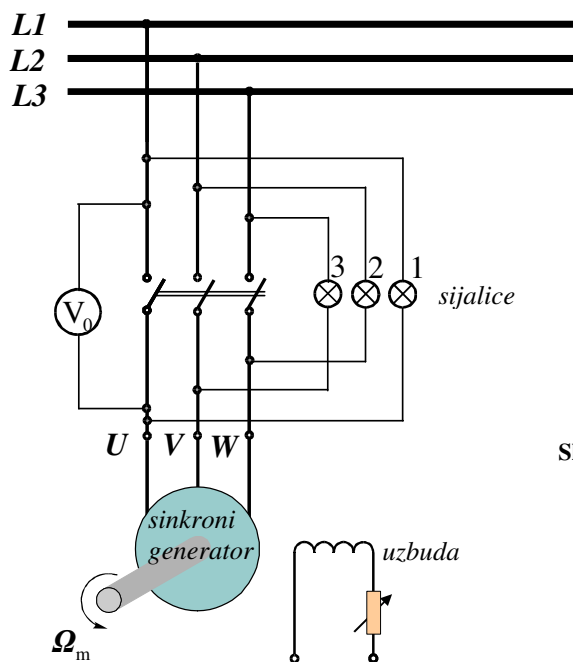


Ako frekvencija generatora nije točno jednaka frekvenciji mreže, onda se zvijezda napona generatora vrti u odnosu na zvijezdu mreže brzinom koja je proporcionalna razlici frekvencija. Zvijezdu napona generatora može se dovesti u istovjetan položaj sa zvijezdom napona mreže ako se neznatno ubrza ili uspori generator pomoću pogonskog stroja.

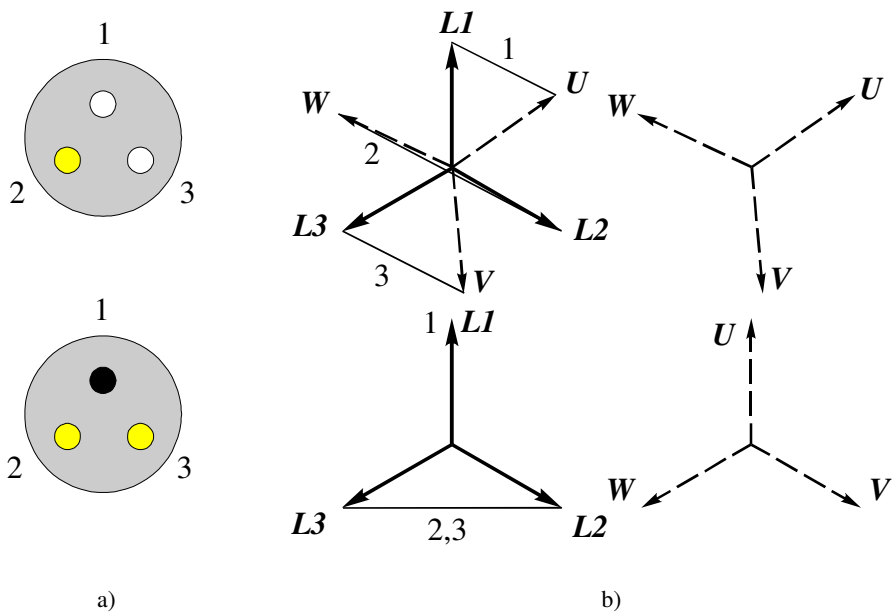
Napon između odgovarajućih faza (**L1-U**, **L2-V**, **L3-W**) može se mjeriti nul-voltmetrom (V_0), i kad je taj napon jednak nuli, uključi se sklopku. Sklop ovih instrumenata naziva se uređaj za sinkronizaciju ili sinkronoskop, i on je na slici 2.59. prikazan u elementarnom obliku.

Sklop za sinkronizaciju se može izvesti i na drugačiji način. Jedan od jednostavnih načina je sklop sijalica u svijetlom spoju (slika 2.61). Princip rada je prikazan na slici 2.62. U slučaju polaganog pomicanja jedne zvijezde napona u odnosu na drugu svjetla sijalica se vrte u krug frekvencijom razlike. Stroj treba uključiti na mrežu onda kad sijalice 2 i 3 svijetle jednakim intenzitetom, a 1 je ugašena.

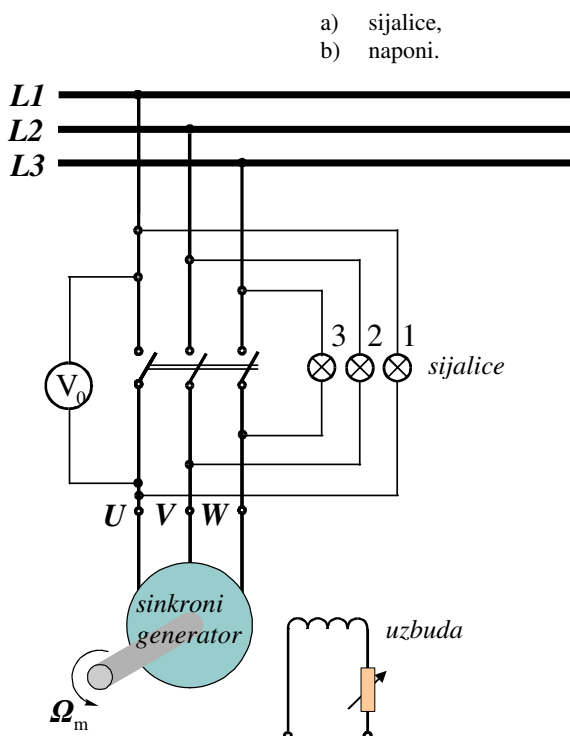
Koristi se i tamni spoj sijalica prema slici 2.63. Sijalice služe kao nul-voltmetar. Stroj treba uključiti kad su sve ugašene.



Slika 2.61. Svjetli spoj za sinkronizaciju



Slika 2.62. Sijalice u svjetlom spoju za sinkronizaciju



Slika 2.63. Tamni spoj za sinkronizaciju

Danas se većinom koriste poluautomatski ili automatski uređaji za sinkronizaciju. Prvi obavljaju sinkronizaciju djelomično automatizirano, dok drugi prate sinkronizaciju podešavajući napon i frekvenciju generatora potpuno automatizirano, te obavljaju ukopčanje na mrežu.

2.8. ISPITIVANJA I KARAKTERISTIKE

2.8.1. Ispitivanja pri gradnji

Pri gradnji sinkronih strojeva, osobito onih velike snage, provode se mnogobrojna ispitivanja. Većina je ovih provjera definirana standardima, i proizvođač ih je dužan provesti. U ugovoru o izradi se specificiraju načini kontrole. Može biti postavljen zahtjev da se određene provjere obavljaju uz prisustvo inspektora.

Ispitivanja pri gradnji možemo svrstati u dvije osnovne grupe, a to su:

- ulazna kontrola i
- provjera tehnoloških postupaka.

Ulazna kontrola obuhvaća ispitivanja kvalitete materijala koji se ugrađuju. To su:

- konstrukcijski materijali,
- magnetski materijali,
- bakar i
- izolacije.

Kod konstrukcijskih materijala se provjeravaju mehanička svojstva (čvrstoća) i struktura zbog velikih mehaničkih naprezanja.

Kod magnetskih materijala se provjeravaju električka, magnetska i mehanička svojstva:

- krivulja magnetiziranja,
- specifični gubici,
- površinska izolacija i
- deformiranost limova.

Bakar za vodiče je u većini slučajeva standardiziran, pa nisu potrebne posebne provjere. Ako se koriste posebne dimenzije bakra (po narudžbi), onda je potrebno provjeriti dimenzije i vodljivost čistog bakra i izolacije.

Kod izolacije se provjeravaju:

- mehanička svojstva,
- električka svojstva i
- dimenzije.

Kvaliteta ovisi o izolaciji na najslabijem mjestu.

Provjera tehnoloških postupaka obuhvaća:

- provjeru varova,
- provjeru paketa limova (statora),
- provjeru kvalitete izolacije statorskog namota i
- ispitivanje sklopova.

Od ispitivanja sklopova među najvažnijima su provjera simetričnosti rotora i pokus vitlanja. Ako postoji nesimetrija, treba izbalansirati rotor da se izbjegnu radialne centrifugalne sile zbog viška mase.

Pokus vitlanja predstavlja provjeru mehaničke čvrstoće rotora pri povećanoj brzini vrtnje. To je vrtnja rotora generatora maksimalnom mogućom brzinom koju rotor može doseći u najnepovoljnijim uvjetima. Ovisno o vrsti pogonskog stroja (dizelski motor, parna ili plinska ili vodna turbina), u slučaju nestanka

električnog opterećenja i zatajivanja svih regulacijskih i sigurnosnih mehanizama, pogonski stroj će ubrzati cijeli agregat do brzine koja iznosi 1,3 – 3,5 nazivne brzine. Najnepovoljniji su u tom pogledu neki tipovi vodnih turbina kad turbina ostane bez opterećenja s potpuno otvorenim privodom i počne ubrzavati generator. Pritom se uzimaju u obzir i najnepovoljniji uvjeti sa stanovišta pritiska vode, odnosno maksimalni mogući pad vode (puno akumulacijsko jezero).

Ponekad trajanje ovakve vrtnje može biti jako dugo – više sati (u elektranama bez posade). Ipak je više uobičajeno pokus provoditi u trajanju od nekoliko minuta. Obodna brzina rotora tijekom takvih pokusa može prijeći i 200 m/s.

Za rotore koji se u cijelosti izrađuju u tvornici (na primjer turbogeneratore) se i pokus vitlanja provodi u tvornici. Kod velikih hidrogenatora, koji mogu imati promjer rotora i veći od 10 m, se pokus vitlanja provodi na potpuno montiranom generatoru u elektrani.

Osim ispitivanja tijekom izrade i montaže, provode se i nakon montaže mnogobrojna ispitivanja. Pri tome se nekim ispitivanjima provjeravaju osnovne funkcije stroja, a druga imaju svrhu provjeriti pouzdanost i sigurnost rada stroja.

Od neelektričnih ispitivanja se ponekad provodi i detaljno ispitivanje sustava hlađenja. Obavezno se ispituje i zagrijavanje stroja.

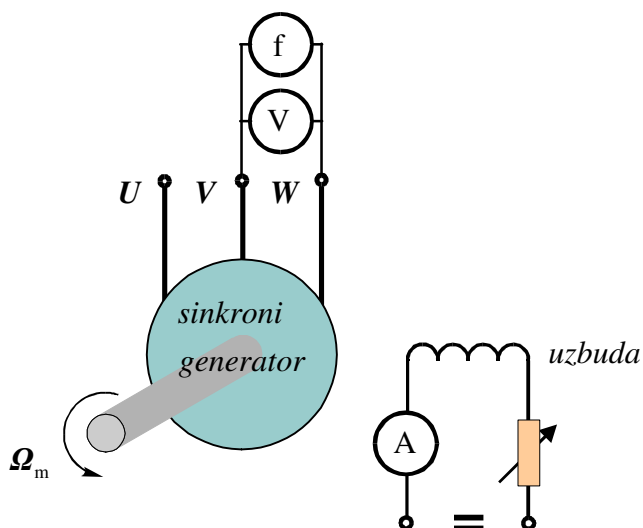
Na gotovom stroju se obavljaju i naponski pokusi za ispitivanje izolacije između namota i mase. Visina ispitnog napona i postupak ispitivanja su određeni propisima.

2.8.2. Karakteristika praznog hoda

Karakteristika praznog hoda predstavlja ovisnost napona na stezaljkama U o uzbudnoj struji generatora u praznom hodu $I_f = I_{f0}$, uz održavanje konstantne brzine vrtnje n :

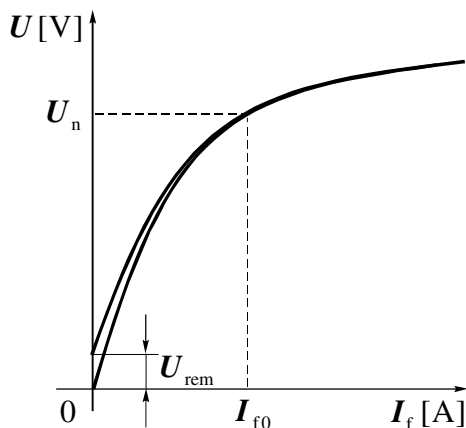
$$U = f(I_f), \quad n = konst. \quad (2.91.)$$

Za generator se kaže da je u praznom hodu ako se vrti konstantnom brzinom (obično nazivnom), uz neki iznos uzbudne struje i bez opterećenja na statoru (otvorene stezaljke). Shema spoja za ispitivanje ove karakteristike je dana na slici 2.64.



Slika 2.64.
Shema mjerenja
karakteristike
praznog hoda

Na slici 2.65. je prikazana karakteristika praznog hoda snimljena uz povećanje uzbudne struje od 0 A do neke vrijednosti koja daje napon veći od nazivnog i potom uz smanjenje uzbudne struje do nule. Pri sniženju uzbudne struje na nulu i dalje ostaje neki mali napon U_{rem} na stezaljkama statorskog namota. Taj se napon naziva napon remanencije ili remanentni napon. On je posljedica histereze magnetskog materijala od kojeg je napravljen rotor.

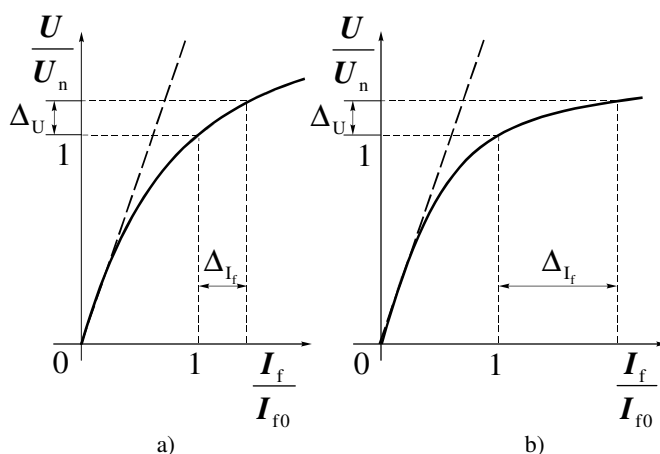


Slika 2.65.
Mjerena karakteristika praznog hoda

Radi usporedbe različitih strojeva karakteristika praznog hoda uglavnom se prikazuje u relativnim vrijednostima. To ne znači ništa drugo nego da se

vrijednosti izmjerenih napona i struje podijele s vrijednostima nazivnog napona, odnosno, uzbudne struje praznog hoda za nazivni napon.

S obzirom na oblik karakteristike uobičajeno je da se karakteristika naziva tvrdom ili mekanom. Tvrdna karakteristika zahtijeva velike promjene uzbudne struje ΔI_f za određenu promjenu napona ΔU . Mekana karakteristika zahtijeva male promjene uzbudne struje za jednaku promjenu napona. Obje karakteristike su prikazane na slici 2.66.



Slika 2.66.
Mjerene karakteristike
praznog hoda
a) mekana,
b) tvrda.

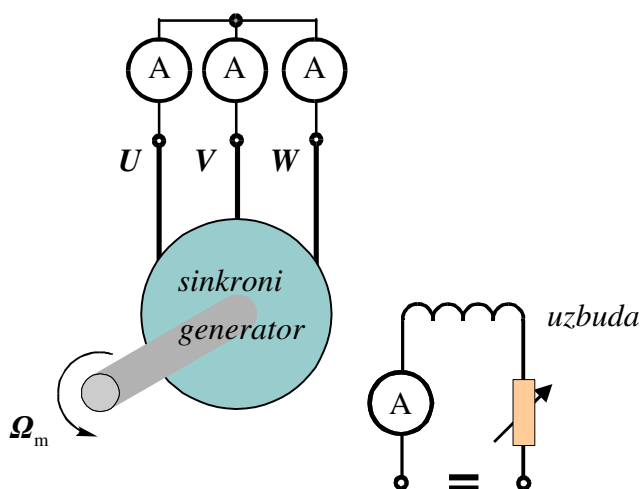
2.8.3. Karakteristika kratkog spoja

Za generator kažemo da je u kratkom spoju ako se vrti konstantnom brzinom (obično nazivnom), uz neki iznos uzbudne struje i uz kratko spojene stezaljke statorskog namota.

Karakteristika kratkog spoja predstavlja ovisnost struje $I = I_k$ kroz kratko spojene stezaljke generatora o uzbudnoj struji $I_f = I_{fk}$, uz održavanje konstantne brzine vrtnje rotora:

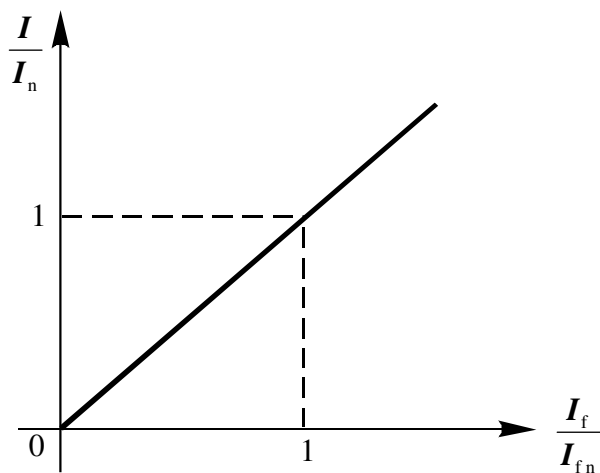
$$I_k = f(I_f), \quad n = \text{konst.} \quad (2.92.)$$

Već je iz teorijskih razmatranja zaključeno da je karakteristika kratkog spoja pravac. Ova karakteristika se dobije mjerenjem struje kratkog spoja i uzbudne struje. Shema spoja je jednostavna i prikazana na slici 2.67. Pri mjerenju se rotor stroja vrti konstantnom brzinom vrtnje, a uzbudna struja se povećava sve dok kroz statorski namot ne poteče nazivna struja. Mjerenje se zbog zagrijavanja obavlja od najveće struje prema nuli, smanjenjem uzbudne struje.



Slika 2.67.
Shema mjerenja
karakteristike
kratkog spoja

Karakteristika kratkog spoja se često prikazuje u relativnim vrijednostima radi usporedbe različitih strojeva. To znači da se izmjerene vrijednosti armaturne struje I podijele s vrijednošću nazivne struje I_n , a izmjerene vrijednosti uzbudne struje I_f se podijele s vrijednošću uzbudne struje I_{fn} za nazivni rad. Takva karakteristika kratkog spoja je prikazana na slici 2.68.



Slika 2.68.
Mjerena karakteristika
kratkog spoja

2.8.4. Krivulje regulacije

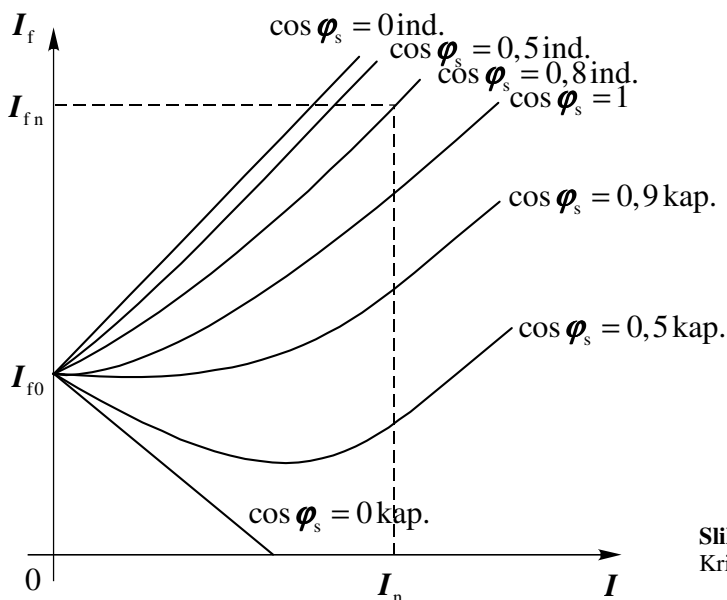
Jedan od važnih zahtjeva u eksploataciji sinkronih strojeva je poznavanje uzbudne struje za zadani teret i faktor snage. Podatak o tome dobiva se iz krivulja regulacije.

Svaka krivulja regulacije prikazuje ovisnost uzbudne struje I_f o opterećenju (statorskoj linijskoj struji I), uz isti faktor snage $\cos \varphi_s$:

$$\begin{aligned} I_f &= f(I), \cos \varphi_s = \text{konst.} \\ U &= U_n = \text{konst.} \\ n &= n_n = \text{konst.} \end{aligned} \quad (2.93.)$$

Krivulje regulacije predstavljaju porodicu ovih krivulja za različite faktore snage $\cos \varphi_s$.

Iz vektorsko-fazorskog dijagrama proizlazi da ta ovisnost općenito nije linearna jer se ukupno protjecanje dobiva vektorskim zbrajanjem protjecanja uzbude i armature. Pri projektiranju stroja se krivulje regulacije određuju rješavanjem magnetskog kruga za različita opterećenja. Primjer takvih krivulja je dan na slici 2.69. To je porodica krivulja, te se s dijagrama može odmah očitati potrebna uzbudna struja za zadano opterećenje i zadani $\cos \varphi_s$.

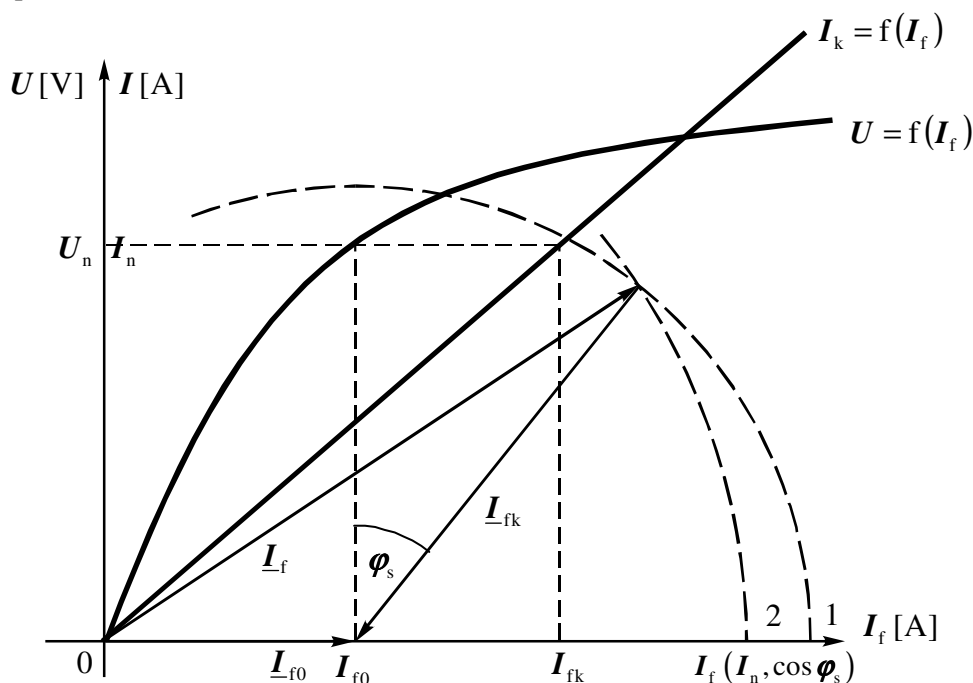


Slika 2.69.
Krivulje regulacije

Oblik i karakter ovih krivulja se moraju uzeti u obzir pri projektiranju regulatora za automatsku regulaciju napona.

Snimanje krivulja regulacije mjerenjem se za generatore manjih snaga obavlja u tvornici. Za generatore većih snaga je praktički nemoguće snimiti ove krivulje. U tvornici se to ne može napraviti jer se ne raspolaže s pogonskim strojem dovoljne snage. U elektrani se to također ne može provesti jer dispečerska služba ne može dopustiti mjerenje velikog broja radnih točaka generatora. To bi izazvalo nepovoljne efekte u energetske mreži. Zbog toga se, u takvim slučajevima, krivulje regulacije konstruiraju pomoću Švedskog dijagrama.

Umjesto vektorskog dijagrama protjecanja, koristi se fazorski dijagram struja, jer su protjecanja proporcionalna strujama, samo treba odrediti mjerilo. Pri tome je važno samo mjerilo za uzбудnu struju, a njega možemo dobiti iz zajedničke karakteristike praznog hoda i kratkog spoja. Švedski dijagram je principijelno prikazan na slici 2.70.



Slika 2.70. Principijelni prikaz Švedskog dijagrama

Ako se zamisli da se vektorski dijagram protjecanja zakrene za 180° , onda za slučaj praznog hoda protjecanju θ_{f0} odgovara struja I_{f0} . Uz zanemarenje radnih

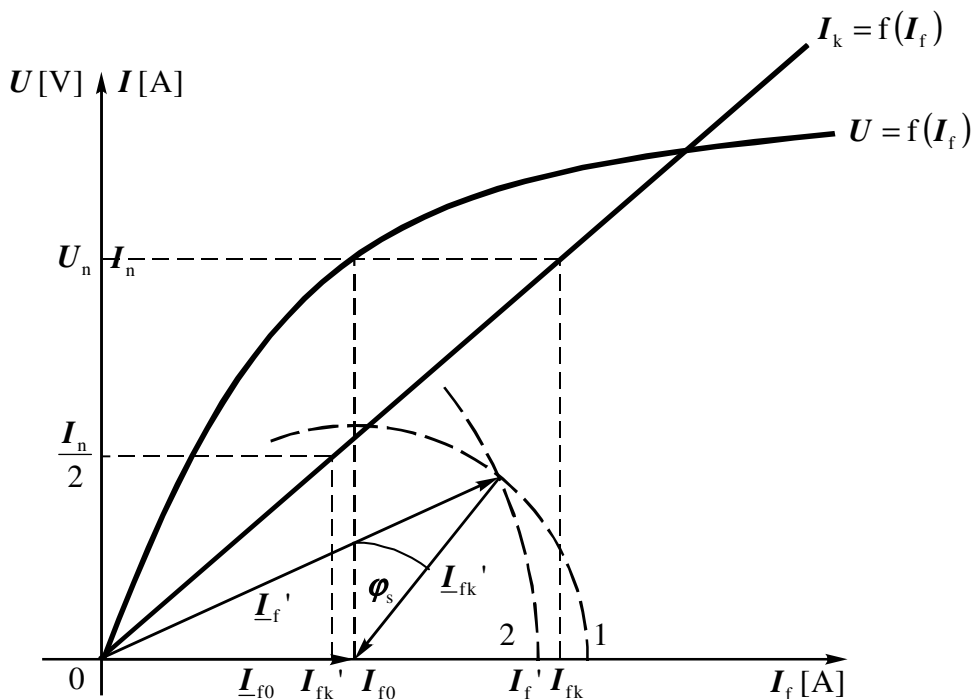
otpora i rasipnih reaktancija bi toj struji trebalo dodati iznos I_{fk} za slučaj čisto induktivnog opterećenja ($\cos \varphi_s = 0$ ind.) nazivnom strujom. Uzbudna struja za taj slučaj (točka 1) iznosi:

$$I_f = I_{f0} + I_{fk} \quad (2.94.)$$

Za neki drugi faktor snage $\cos \varphi_s$, uz nazivno opterećenje, uzbudna struja se dobije fazorskim zbrojem uzбудnih struja u praznom hodu i kratkom spoju:

$$\underline{I}_f = \underline{I}_{f0} + \underline{I}_{fk} \quad (2.95.)$$

Švedski dijagram za nazivno opterećenje dobije se tako da se nacrtaju kružnicu polumjera I_{fk} sa središtem u točki I_{f0} . Fazor $\underline{I}_{fk}$ se za određeni faktor snage $\cos \varphi_s$ nacrtava u točki I_{f0} pod kutem φ_s u odnosu na vertikalu u toj točki (I_{f0}). Pripadna uzbudna struja $\underline{I}_f$ je dužina koja spaja ishodište sa sjecištem fazora $\underline{I}_{fk}$ i kružnice (polumjera I_{fk}). Ovu dužinu se nanese na os uzbudne struje (točka 2) da se dobije pripadni iznos I_f ($I_n, \cos \varphi_s$). Kružnica sa središtem u I_{f0} se može nacrtati i s manjim promjerom koji odgovara nekoj proporcionalno manjoj struji statora. Na slici 2.71. je nacrtan Švedski dijagram za polovicu nazivnog opterećenja, uz isti $\cos \varphi_s$ kao na slici 2.70.



Slika 2.71. Švedski dijagram za polovicu nazivnog opterećenja

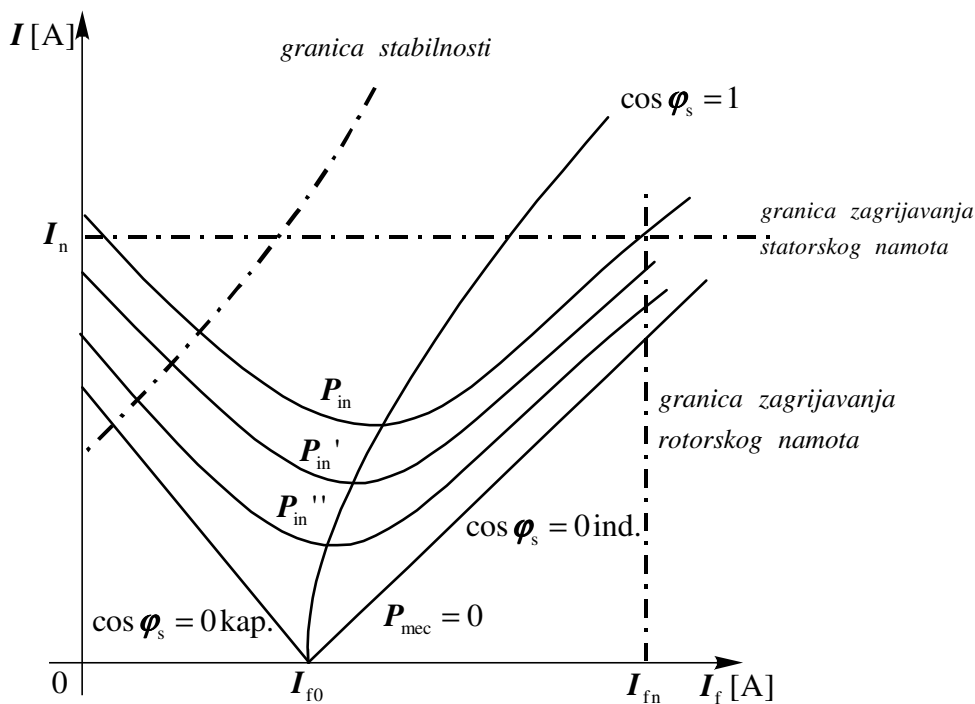
Pripadna vrijednost uzbudne struje kratkog spoja je označena s I_{fk}' , a uzbudna struja s I_f' . Točka 1 daje iznos uzbudne struje za polovicu nazivnog opterećenja, za čisti induktivni teret. Točkom 2 je označen iznos uzbudne struje za polovicu nazivnog opterećenja uz faktor snage $\cos \varphi_s$.

U praksi se Švedski dijagram crta nešto složenije jer se uzimaju u obzir padovi napona na rasipnim reaktancijama i radnim otporima, te zasićenje magnetskog kruga.

2.8.5. V-krivulje

Krivulje regulacije (slika 2.69.) daju ovisnost uzbudne struje o struji armature za različite faktore snage. Tom dijagramu može se zamijeniti osi pa na apscisu nanijeti vrijednosti uzbudne struje, a na ordinatu struju armature (odnosno statorsku struju).

Svakoj točki na svakoj regulacijskoj krivulji odgovara neka mehanička snaga ($P_{in} > P_{in}' > P_{in}''$). Ako se povežu točke koje predstavljaju iste iznose mehaničke snage, dobit će se V-krivulje (slika 2.72.).



Slika 2.72. V - krivulje sinkronog generatora

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

$$\begin{aligned} I &= f(I_f), \quad P_{in} = konst. \\ \cos \varphi_s &\neq konst. \\ U &= U_n = konst. \\ n &= n_n = konst. \end{aligned} \quad (2.96.)$$

Za svaki prividni teret postoji točka za koju je struja armature najmanja. Naravno, to je točka za koju je faktor snage $\cos \varphi_s = 1$. Dakle, minimumi V-krivulja leže svi na regulacijskoj krivulji za $\cos \varphi_s = 1$.

Ovo je vrlo čest način prikazivanja područja rada sinkronog stroja. U dijagram se obično unose i granice područja rada:

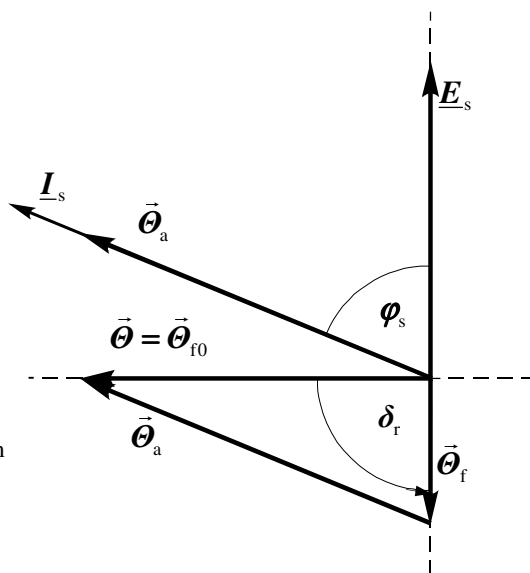
- granica zagrijavanja rotorskog namota,
- granica zagrijavanja statorskog namota i
- granica stabilnosti.

Granicu zagrijavanja rotorskog namota predstavlja maksimalna uzbudna struja uz koju se taj namot zagrije na dozvoljenu temperaturu klase izolacije. Granicu zagrijavanja statorskog namota predstavlja maksimalna armaturna struja uz koju se taj namot zagrije na dozvoljenu temperaturu klase izolacije.

Teorijski se granica stabilnosti generatora nalazi u točki maksimalnog momenta, za kut opterećenja:

$$\delta_r = \frac{\pi}{2} \quad (2.97.)$$

Takav slučaj je prikazan na slici 2.73.



Slika 2.73. Vektorsko-fazorski dijagram sinkronog generatora na granici nestabilnosti u kapacitivnom području rada

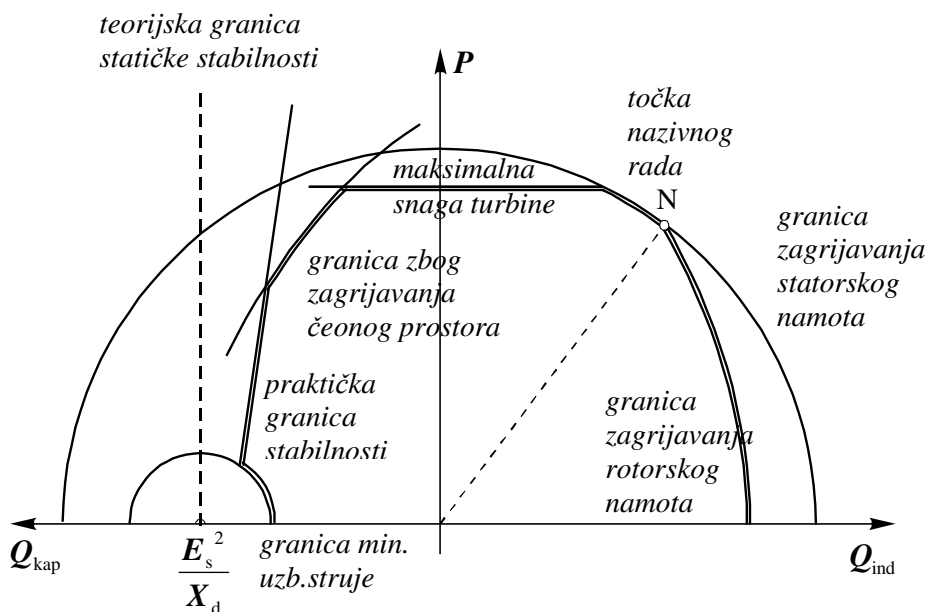
Za kapacitivno opterećenje potrebno protjecanje rotora može biti jako malo, a kod strojeva s istaknutim polovima čak negativno zbog reluktantnog momenta. Ako pritom želimo prenijeti i neku radnu snagu, kut opterećenja se može približiti 90° , što dovede do ispada iz sinkronizma. Ovaj se problem nikad ne pojavljuje u induktivnom radu!

2.8.6. Pogonska karta

Pogonska karta određuje moguće i dozvoljeno područje rada sinkronog stroja. Područje rada ograničavaju:

- zagrijavanje statorskog namota,
- zagrijavanje rotorskog namota,
- granica stabilnosti,
- minimum uzbudne struje,
- zagrijavanje čeonog prostora i
- maksimalna snaga turbine.

Primjer pogonske karte je dan na slici 2.74.



Slika 2.74. Pogonska karta sinkronog generatora s cilindričnim rotorom

Ako se na apscisu nanese jalovu snagu Q , a na ordinatu radnu snagu P , uz zadane uvjete hlađenja osnovno ograničenje predstavlja zagrijavanje statorskog namota. Ono je približno proporcionalno kvadratu armaturne struje i ne ovisi o

faktoru snage. Na pogonskoj karti je granica zagrijavanja statorskog namota predstavljena polukružnicom. Polumjer te polukružnice je određen strujom armature pri kojoj se statorski namot zagrije do maksimalno dozvoljene temperature.

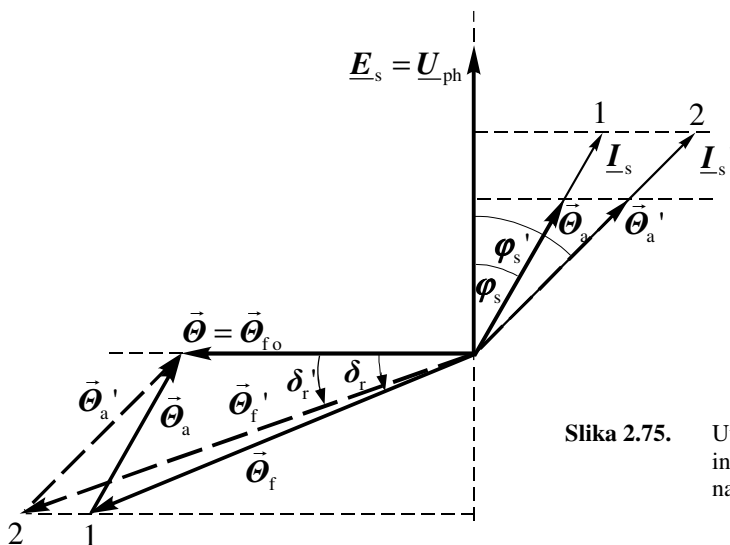
Sljedeće ograničenje je zagrijavanje rotorskog namota. Ono je proporcionalno kvadratu uzbudne struje koja ovisi i o prividnoj snazi i o faktoru snage. Naravno, namot rotora se projektira uvijek tako da može trajno raditi u nazivnoj točki. To je najčešće za vrijednosti faktora snage $\cos \varphi_s = 0,7 - 0,9$ ind. Povećanje induktivne reaktivne snage zahtijevalo bi povećanje rotorske struje. To nije dopušteno zbog zagrijavanja rotora. Granica zagrijavanja rotorskog namota je kružni luk sa središtem u točki E_s^2 / X_d na osi Q_{kap} (slika 2.74).

Na slici 2.75. je prikazan utjecaj povećanja induktivne reaktivne snage Q_{ind} (iz točke 1 u točku 2) na uzbudno protjecanje, odnosno na uzbudnu struju. U tim točkama je radna snaga jednaka i proporcionalna umnošku armaturne struje i faktora snage:

$$\begin{aligned} P' &= P \\ I_s' \cos \varphi_s' &= I_s \cos \varphi_s \end{aligned} \quad (2.98.)$$

S povećanjem induktivne reaktivne snage povećaju se armaturna struja i fazni pomak φ_s , a zbog toga i uzbudno protjecanje, odnosno uzbudna struja:

$$\begin{aligned} I_s' &> I_s \\ \varphi_s' &> \varphi_s \\ \Theta_f' > \Theta_f &\Rightarrow I_f' > I_f \end{aligned} \quad (2.99.)$$



Slika 2.75. Utjecaj povećanja induktivne snage na rotorsku struju

U kapacitivnom području rada se pojavljuju tri ograničenja.

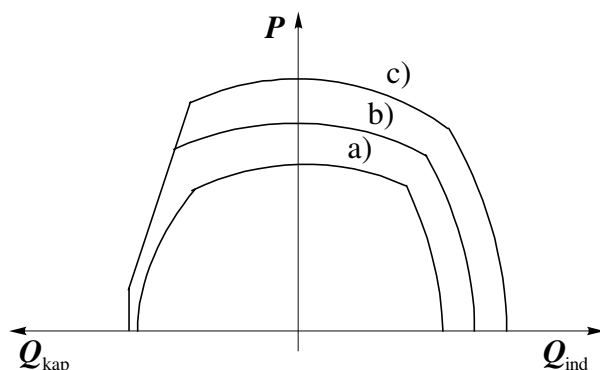
Jedno ograničenje je granica stabilnosti koja teorijski predstavlja vertikalnu liniju. Praktički se, međutim, ne smije dopustiti rad na samoj granici stabilnosti, pa se time još više sužava dopušteno područje rada. Stoga se na pogonsku kartu unosi i praktička granica stabilnosti.

Drugo ograničenje u kapacitivnom području rada se odnosi na uzbudnu struju. Uzbudna struja ima neki minimum, obično oko 10% nazivne uzbudne struje, ispod koje se vrijednosti ne može dovoljno dobro regulirati. Ova je granica polukružnog oblika. Granica minimalne uzbudne struje je polukružnica sa središtem u točki E_s^2 / X_d na osi Q_{kap} (slika 2.74).

Treće moguće ograničenje se odnosi na zagrijavanje čeonog prostora. Naime, u kapacitivnom području rada se protjecanja glava namota rotora i statora u čeonom prostoru zbrajaju pa uzrokuju relativno jako magnetsko polje. To polje izaziva vrtložne struje u statarskom paketu, pa može doći do jakog zagrijavanja čeonih dijelova stroja. Ovaj efekt je više izražen kod turbogeneratorsa, ali se nastoji eliminirati konstrukcijskim zahvatima.

U pogonsku se kartu često ucrtava i horizontalna crta koja predstavlja maksimalnu snagu turbine. To nije ograničenje generatora, nego pogonskog stroja.

Velik dio ograničenja na pogonskoj karti se odnosi na zagrijavanje pojedinih dijelova stroja. Poboljšanjem hlađenja se područje rada proširi. To je naročito izraženo kod velikih turbogeneratorsa koji se hlade uglavnom vodikom pod pritiskom. Povećanjem pritiska vodika se poboljšava hlađenje. U pogonsku kartu se onda unose krivulje koje označavaju područje rada za različite pritiske vodika. Na slici 2.76. je dana pogonska karta jednog turbogeneratorsa za različite pritiske rashladnog plina.



Slika 2.76.

Pogonska karta
turbogeneratorsa uz
različite intenzitete
hlađenja vodikom
a) tlak 10^5 Pa;
b) tlak $2 \cdot 10^5$ Pa;
c) tlak $4 \cdot 10^5$ Pa.

2.8.7. Udarni kratki spoj

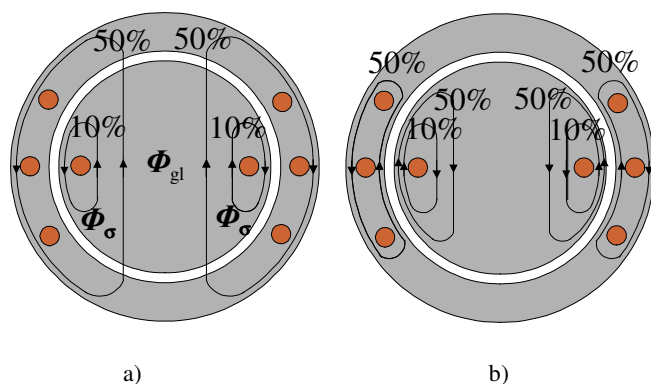
Pokus kratkog spoja generatora provodi se tako da se stezaljke armaturnog namota kratko spoje, rotor se vrti nazivnom brzinom, te se polako povećava uzbudna struja. Dobije se poznata linearna ovisnost struje armaturnog namota o uzbudnoj struji. Ukupno protjecanje, pa i magnetsko polje je jednako nuli, odnosno upravo je toliko da pokrije padove napona na rasipnim reaktancijama i radnim otporima armature.

Pokus udarnog kratkog spoja provodi se tako da se kratko spoji namot statora uzbuđenog stroja koji radi u praznom hodu. Ovaj se pokus često izvodi na generatorima u okviru prototipnog ispitivanja.

Udarni kratki spoj predstavlja veliko opterećenje za stroj, prvenstveno u mehaničkom pogledu. Naravno, stroj mora izdržati takav pokus bez oštećenja jer postoji realna mogućnost da se kratki spoj dogodi na generatoru u pogonu. Električna pojava koja prati ovaj proces je prilično složena. Ova pojava će se razmotriti na stroju koji nema radnih otpora.

Zamisli se pokus tako da je stroj u praznom hodu (nije spojen na mrežu) i da se odjednom kratko spoje stezaljke armaturnog namota. Promatra se jedna faza.

Prije trenutka kratkog spajanja u stroju je magnetski tok koji se sinkrono vrti s rotorom. U trenutku kad se os rotora i os promatrane faze poklapaju, magnetsko polje je raspodijeljeno kao na slici 2.77.a). Ovi se tokovi ne mogu promijeniti niti nakon kratkog spajanja jer pretpostavlja se da nema radnog otpora namota.



Slika 2.77.

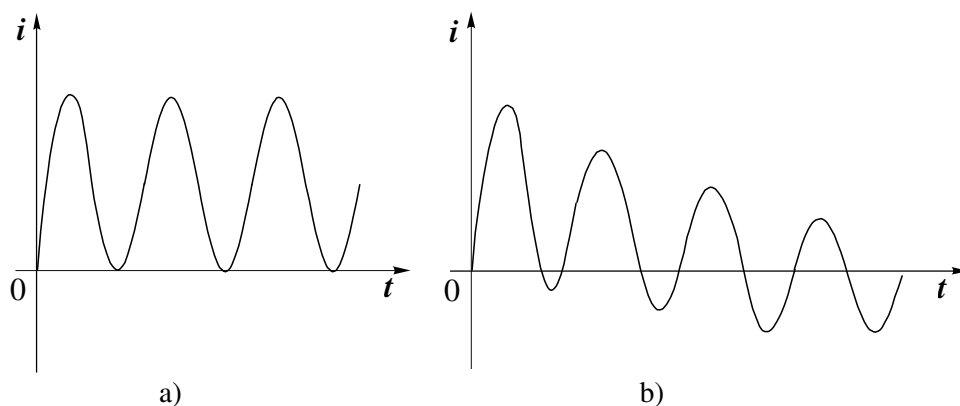
Magnetski tok pri udarnom kratkom spoju koji nastane u trenutku kad se os rotora i os namota statora poklope

- a) trenutak kratkog spajanja,
- b) nakon pola periode.

Nakon polovice periode rotor će se zakrenuti za 180° . Ni tok rotora ni tok statora se neće promijeniti, pa će magnetski tok poprimiti raspored prema slici 2.77.b). Magnetski se tok ne mijenja jer se pretpostavlja da je otpor namota jednak nuli, pa će u tom namotu teći takve struje da se taj tok održi. Vidi se da magnetski tok ide znatnim dijelom zračnim rasporom koji ima velik magnetski otpor. Budući da je magnetski otpor magnetskog kruga velik, struje koje moraju teći kroz namot su jako velike (10 i više puta veće od nazivne).

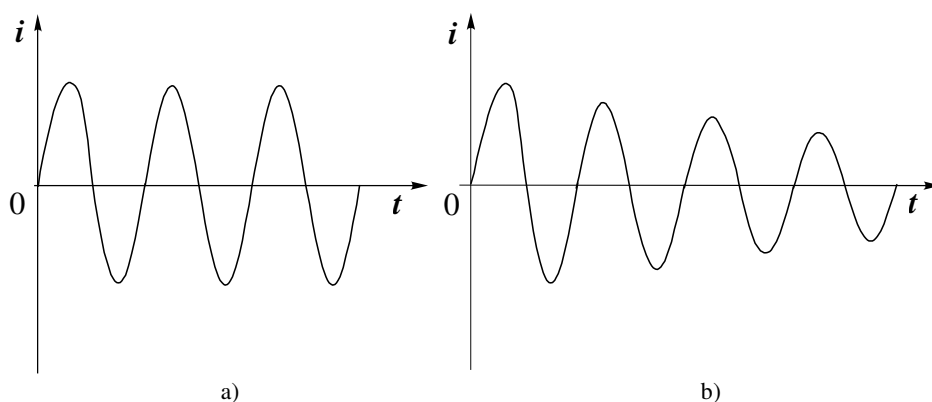
Kako se rotor i dalje vrti, nakon sljedeće poluperiode se ponovo nalazi u položaju prema slici 2.77.a). Struja u statorskom namotu pada na nulu (jer se pošlo iz praznog hoda!). Vremenska ovisnost struje statora bi izgledala kao na slici 2.78.a). Vidimo da struja ima istosmjernu komponentu.

Međutim, otpor armature ipak postoji, i izmjenična i istosmjerna komponenta struje se s vremenom smanjuju (slika 2.78.b)). Istosmjerna komponenta nestaje, a izmjenična teži prema struji trajnog kratkog spoja.



Slika 2.78. Struja armature pri udarnom kratkom spoju koji nastane u trenutku kad se os rotora i os namota statora poklope
 a) bez statorskog radnog otpora (idealno),
 b) sa statorskim radnim otporom (realno).

Drugačiji je slučaj ako se kratki spoj napravi u trenutku kad je os rotora okomita na os namota statora. Tada je ulančeni tok sa statorskim namotom jednak nuli pa takav mora i ostati. Stoga struja armature ima vremensku ovisnost kao na slici 2.79.a) za slučaj savršeno vodljivog namota, a prema slici 2.79.b) za slučaj realnog namota.



Slika 2.79. Struja armature pri udarnom kratkom spoju koji nastane u trenutku kad je os rotora okomita na os namota statora
 a) bez statorskog radnog otpora,
 b) sa statorskim radnim otporom.

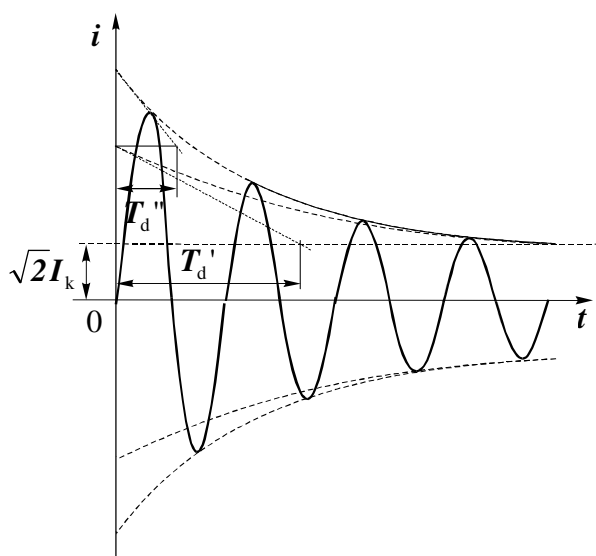
Slučajevi koji su dosad opisani idealizirani su čak i ako se uzme u obzir otpor armaturnog namota. Naime, uvijek se može smatrati da u realnom stroju ima još jedan namot. To je prigušni kavez. Čak i ako prigušni kavez nije ugrađen, u masivnom željezu polnih stopala kod hidrogeneratora i polovima turbogeneratora će se zatvarati vrtložne struje sa sličnim efektom kao u prigušnom kavezu.

Dakle, u prvom trenutku se sav magnetski tok statora zatvara kroz zračni raspor i uopće ne prodire u rotor. Kako je, međutim, otpor prigušnog kaveza relativno velik, struje se u njemu brzo priguše. Taj prvi period zovemo početno ili subtranzijentno stanje.

Nakon što magnetski tok prodre kroz kavez, dominantnu ulogu preuzima uzbudni namot. U njemu su u tom trenutku vremenski promjenljive struje. To stanje ima također privremeni karakter i naziva se prolazno ili tranzijentno stanje. Ono obično traje znatno dulje od početnog stanja.

Na kraju, kad se struje u uzbudnom namotu priguše, dolazimo do trajnog stanja, koje odgovara trajnom kratkom spoju.

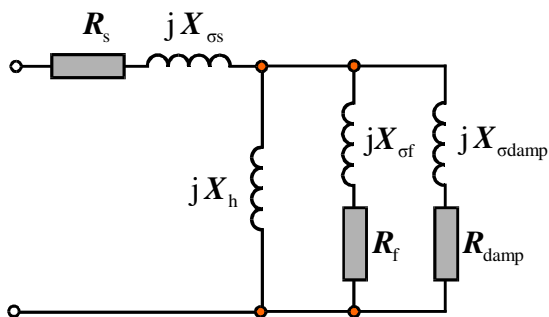
Situacija je slična u slučaju trofaznog udarnog kratkog spoja, koji se kao pokus obično izvodi. Naravno da se u početnom trenutku kratkog spoja svaka faza nalazi u drukčijem položaju u odnosu na rotor. Vremenski tok struje jedne faze s utjecajem prigušnog i uzbudnog namota je prikazan na slici 2.80.



Slika 2.80.
Struja jedne faze pri
udarnom kratkom spoju

Ovu pojavu može se prilično dobro prikazati nadomjesnom shemom prema slici 2.81. Osim statorskog radnog otpora R_s i rasipne reaktancije $X_{\sigma s}$ uzete su u obzir:

- reaktancija zbog djelovanja armature X_h (sinkrona reaktancija u užem smislu, bez $X_{\sigma s}$),
- rasipna reaktancija $X_{\sigma f}$ i radni otpor R_f uzbuđenog namota i
- rasipna reaktancija $X_{\sigma \text{damp}}$ i radni otpor R_{damp} prigušnog namota.



Slika 2.81.
Nadomjesna shema
generatora pri udarnom
kratkom spoju

U prvom trenutku početnu reaktanciju X_d'' određuju sve reaktancije prema slici 2.81. Struja se mijenja brzinom koju definira početna ili subtranzijentna vremenska konstanta T_d'' . Ta je vremenska konstanta mala, iznosi obično nekoliko milisekundi.

Nakon toga struju određuje prijelazna reaktancija X_d' koju se prema nadomjesnoj shemi dobije ako se uzme $X_{\sigma\text{damp}} = \infty$. Struja se smanjuje brzinom koju definira prijelazna ili tranzijentna vremenska konstanta T_d' . Ova vremenska konstanta može iznositi više sekundi.

Nakon približno tri vremenske konstante ostaju u nadomjesnoj shemi samo radni otpor armature R_s i sinkrona reaktancija X_s :

$$X_s = X_h + X_{\sigma s} \quad (2.100.)$$

Ovo je jako pojednostavljeni prikaz. Kod istaknutih polova se moraju uzeti u obzir različiti magnetski otpori u uzdužnoj i poprečnoj osi jer oni nisu jednaki. Tako se definiraju i reaktancije (početna, prijelazna i trajna) u uzdužnoj i poprečnoj osi. Sve ove vrijednosti utječu na vremensku promjenu i iznos struje pri udarnom kratkom spoju.

Analizom mjerenih vrijednosti struje iz oscilograma može se doći do vrijednosti početnih, prijelaznih i trajnih reaktancija. Ove reaktancije karakteriziraju generator pri dinamičkim pojavama. Pri gradnji generatora treba osigurati određene vrijednosti tih veličina.

3. ASINKRONI STROJEVI

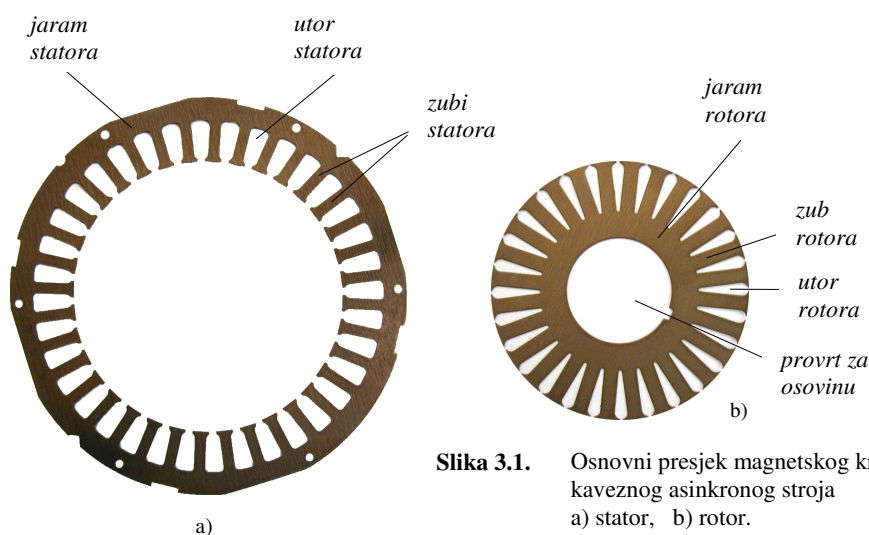
3.1. OSNOVNA OBILJEŽJA

Stator asinkronog stroja ima raspoređeni namot, najčešće trofazni. Kad se takav namot priključi na simetričan višefazni sustav napona, njime poteku struje koje stvore protjecanje konstantnog iznosa i konstantne brzine vrtnje. Izvodi se kao i stator sinkronog stroja približno jednake snage. Toliko je sličan da je samo potrebno zamijeniti rotor da bi se od sinkronog stroja dobio asinkroni.

Bitna je razlika na rotoru. Kod sinkronog stroja na rotoru su istaknuti polovi ili cilindrični rotor, s namotom koji se napaja iz vanjskog izvora istosmjernom strujom. Na taj način nastaje protjecanje rotora. Rotor asinkronog stroja izvodi se bez istaknutih polova, s raspoređenim namotom na obodu rotora. Taj se namot ne napaja iz vanjskog izvora. Naponi se u vodičima rotorskog namota induciraju okretnim magnetskim poljem statora, jer je $n \neq n_s$, i kad se stroj optereti poteku struje i u rotorskom namotu.

Rotorski namot izvodi se uvijek kao višefazni. Broj faza na rotoru ne mora biti jednak broju faza na statoru. U rotorski se krug, u svaku fazu, preko kliznih prstena može uključiti vanjski radni otpor, ili se rotorski krug kratko spaja na samom rotoru. U tom slučaju nisu potrebni ni klizni prsteni ni vanjski priključci.

Namot rotora može biti napravljen od svitaka na jednak način kao i statorski, ali može biti i drugačije izvedbe – kao kavez (uložni ili lijevani), po čemu se razlikuju vrste tih strojeva. Na slici 3.1. je prikazan osnovni presjek magnetskog kruga jednog kaveznog asinkronog stroja.



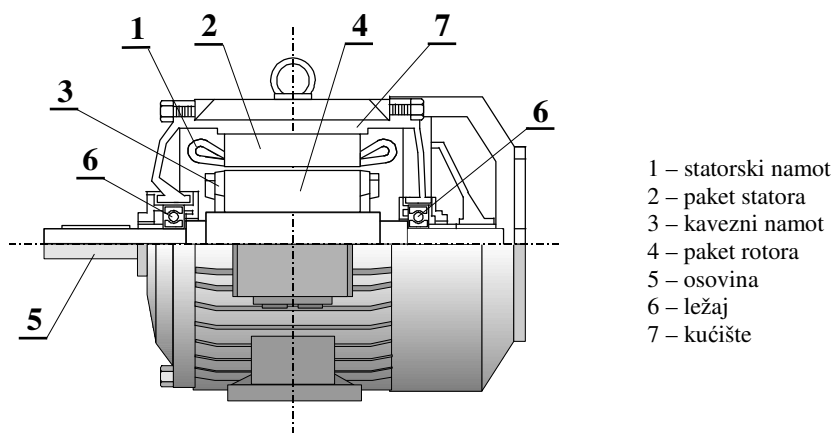
Slika 3.1. Osnovni presjek magnetskog kruga kaveznog asinkronog stroja
a) stator, b) rotor.

Zbog svoje jednostavnosti i pouzdanosti su asinkroni motori najrašireniji u uporabi. Najvećim dijelom se koriste kao motori. Sve većom primjenom u reguliranim pogonima još se više proširuje korištenje tih stojeva.

Za asinkrone strojeve je karakteristična proizvodnja u velikim serijama, što posebice vrijedi za male motore. Zbog toga su ovi motori i najjeftiniji.

3.2. IZVEDBE ASINKRONIH STROJEVA

Vanjski izgled i osnovni dijelovi asinkronog stroja su prikazani na slikama 1.2. i 1.3. Na slici 3.2. je dan uzdužni presjek jednog asinkronog kaveznog motora.



Slika 3.2. Uzdužni presjek gornjeg dijela asinkronog kaveznog motora

Stator asinkronog stroja se sastoji od:

- statorskog paketa,
- statorskog namota i
- kućišta.

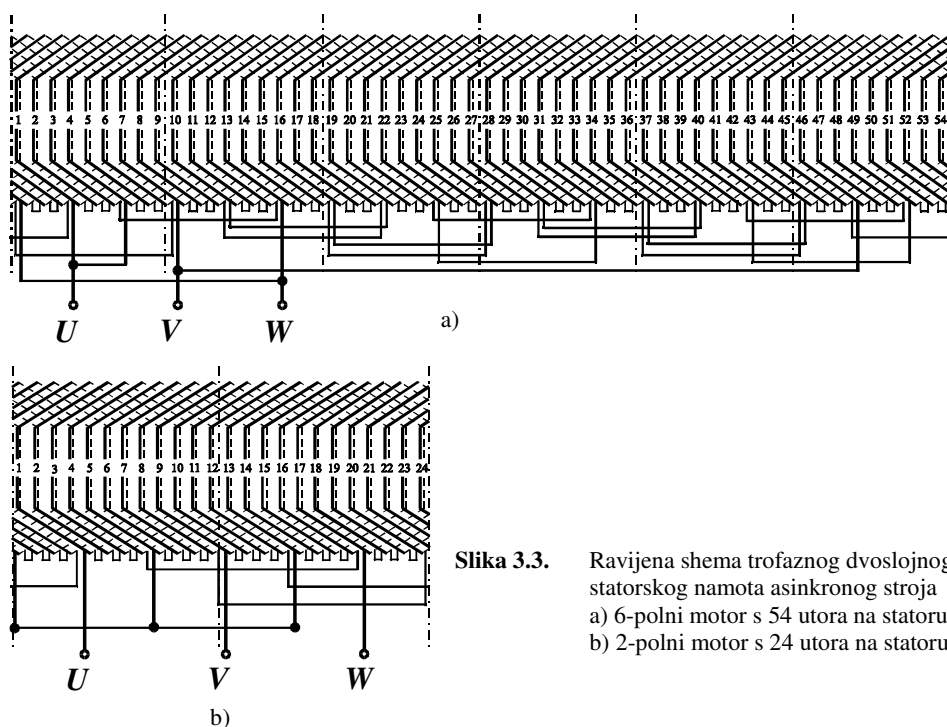
Statorski paket je napravljen u obliku šupljeg valjka. Sastavljen je od prstenastih, međusobno izoliranih magnetskih limova debljine 0,5 ili 0,63 mm. Uzduž statorskog paketa, u provrtu su utori u koje se stavlja armaturni namot, jednako kao kod sinkronog stroja. Za statorske uture asinkronih strojeva se najčešće koriste oblici prema slici 2.3. a) i 2.3.b).

Slika 3.1. ujedno prikazuje statorski i rotorski lim, s označenim utorima, zubima i jarmom, te otvorom za osovinu.

Statorski je namot višefazan simetrični, najčešće trofazni, spojen u trokut ili zvijezdu. Kod manjih strojeva je napravljen od okrugle žice (usipni namot) s velikim brojem zavoja. Kod većih strojeva statorski namot ima mali broj zavoja i napravljen je od profilnih vodiča.

Razvijena shema statorskog namota 6-polnog motora s 54 utora na statoru je prikazana na slici 3.3.a). Prikazani namot je dvoslojni, spojen u trokut. Izveden je bez paralelnih grana. Polni korak iznosi 9 utora. Namot je skraćen za dva utorska koraka, pa korak namota iznosi $y = 8$.

Na slici 3.3.b) je dan primjer statorskog namota 2-polnog asinkronog motora s 24 utora na statoru. Namot je dvoslojni, spojen u zvijezdu, a izveden je bez paralelnih grana. Polni korak, mjeren brojem utora, iznosi 12. Namot je skraćen za 4 utorska koraka, pa korak namota iznosi $y = 8$.



Slika 3.3. Razvijena shema trofaznog dvoslojnog statorskog namota asinkronog stroja
 a) 6-polni motor s 54 utora na statoru,
 b) 2-polni motor s 24 utora na statoru.

Postoje izvedbe s jednim ili više statorskih namota. Više namota se ugrađuje u motore za koje je potrebno više različitih brzina. To su višebrzinski motori. Namoti za svaku brzinu (polaritet) mogu biti smješteni u iste utore ili svaki u zasebne utore. Također se ponekad koristi samo jedan, prespojivi namot koji se prespaja na 2 ili više polariteta.

Kućište stroja služi kao nosač i zaštita željeznog paketa i namota stroja. Izrađuje se od lijevanog željeza, valjanog čelika ili silumina (legura aluminija). Ovisno o vrsti zaštite i hlađenja kućište može biti otvoreno (zaštićeno) ili zatvoreno što je definirano standardima. S vanjske strane kućište često ima rebra za povećanje površine hlađenja. Bočne strane kućišta su napravljene kao poklopci koji se nazivaju ležajnim štitovima. U srednjem dijelu ležajnih štitova su ležaji za osovinu na kojoj se nalazi rotor. Na kućištu motora se nalazi priključna kutija na kojoj su stezaljke vezane s krajevima statorskog namota.

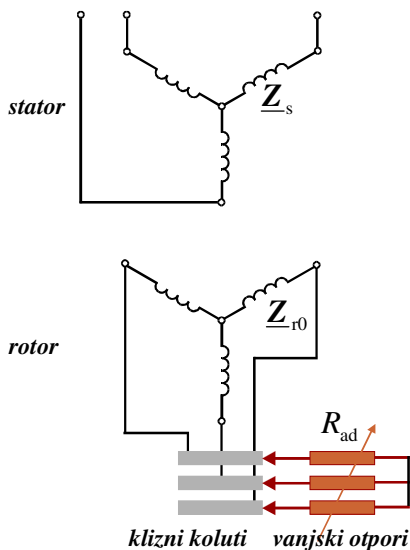
Rotor se sastoji od rotorskog paketa, namota i osovine. Rotorski paket je izveden u obliku valjka od međusobno izoliranih tankih magnetskih limova. Uzduž rotorskog paketa, na vanjskoj strani valjka, su utori za smještaj rotorskog namota (slika 3.1.b)). Oblici utora, kakvi se koriste za smještaj rotorskog namota, ovise o vrsti tog namota.

Rotorski namot može biti izveden kao i statorski (od svitaka) ili od štapova, po čemu se i razlikuju izvedbe asinkronih motora.

Asinkroni motori se dijele prema izvedbi (konstrukciji) rotora i to na:

- kolutne i
- kavezne.

Kolutni (klizno-kolutni) asinkroni motor ima na rotoru raspoređen višefazni namot, u pravilu trofazni. Počeci tog namota su najčešće spojeni u zvijezdu. Krajevi rotorskog namota su izvedeni do kliznih koluta. Pomoću sklopa klizni koluti-četkice može se u seriju sa svakom fazom rotora uključiti dodatni (vanjski) otpor. Na slici 3.4. je dan shematski prikaz trofaznog asinkronog motora s kolutnim rotorom.



Slika 3.4. Shematski prikaz trofaznog kolutnog asinkronog motora

Na slici su označene impedancije faze statora $\underline{Z}_s$ i faze rotora $\underline{Z}_{r0}$ te dodatni (vanjski) otpor R_{ad} u fazi rotora. Impedancije $\underline{Z}_s$ i $\underline{Z}_{r0}$ su određene radnim otporima i rasipnim induktivitetima tih faza:

$$\underline{Z}_s = R_s + j\omega_s L_{\sigma s} \quad (3.1.)$$

$$\underline{Z}_{r0} = R_{r0} + j\omega_r L_{\sigma r} \quad (3.2.)$$

U prethodnim izrazima su navedene sljedeće veličine:

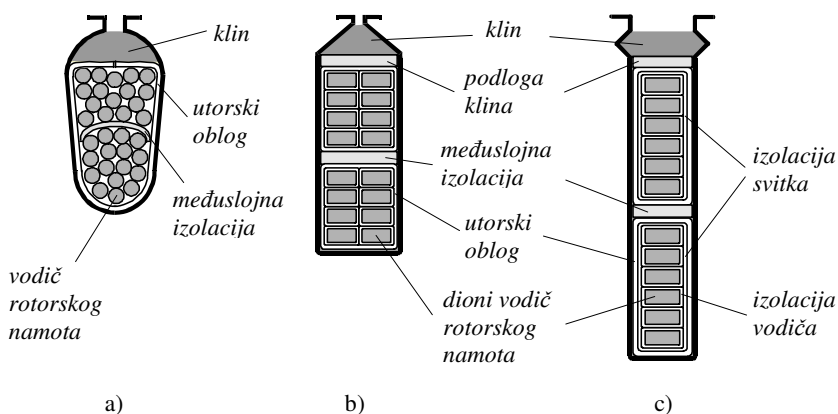
- radni otpor R_s faze statora,
- rasipni induktivitet $L_{\sigma s}$ faze statora,
- statorska kružna frekvencija ω_s ,
- radni otpor R_{r0} faze namota rotora,
- rasipni induktivitet $L_{\sigma r}$ faze rotora i
- rotorska kružna frekvencija ω_r .

Uključenjem i promjenama vanjskih otpora mijenjamo ukupni **radni** otpor u fazi rotora. Ukupni otpor jedne faze rotora R_r jednak je zbroju otpora faze namota R_{r0} i vanjskog otpora R_{ad} :

$$R_r = R_{r0} + R_{ad} \quad (3.3.)$$

Ovim dodatnim otporima utječemo na karakteristike momenta i struje asinkronog stroja.

Za smještaj rotorskog namota se kod kolutnih motora koriste oblici utora i vodiča prema slici 3.5.

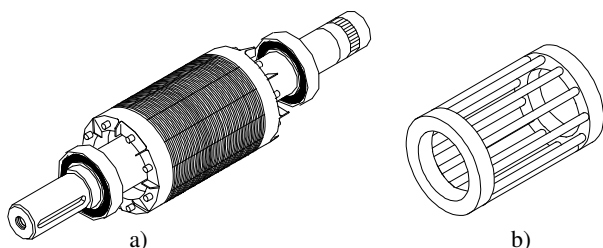


Slika 3.5. Najčešći oblici rotorskih utora (s vodičima) kolutnih asinkronih motora
a) poluzatvoren trapezni, b) poluzatvoren ravni, c) otvoreni.

Klizni koluti (prsteni) su smješteni na osovinu i međusobno su izolirani. Po njima klize četkice koje preko vanjskih otpornika spajaju rotorski namot. Otpornici su stepenasti, pa se po potrebi uključuju odgovarajući iznosi otpora. Kad dodatni otpori nisu potrebni, rotorski namot se kratko spoji na rotoru, a četkice podignu s koluta pomoću posebnog uređaja.

Kavezni motor je druga osnovna izvedba asinkronog motora. U svakom utoru rotora je po jedan vodič u obliku štapa. Štapovi su sa svake strane rotora kratko spojeni prstenovima i čine višefazni rotorski namot. Takav namot izgleda poput kaveza (ako se odstrani željezna jezgra), pa je po tome i ova izvedba motora dobila ime kavezni motor

Rotor i kavez kaveznog motora su prikazani na slici 3.6.



Slika 3.6. Kavezni rotor asinkronog motora
a) rotor, b) kavez.

Svaki štاپ predstavlja jednu fazu, pa je broj faza rotora m_r jednak broju rotorskih utora Q_r :

$$m_r = Q_r \quad (3.4.)$$

Jedan štاپ iznosi pola zavoja, pa je broj zavoja u namotu svake faze rotora N_r jednak:

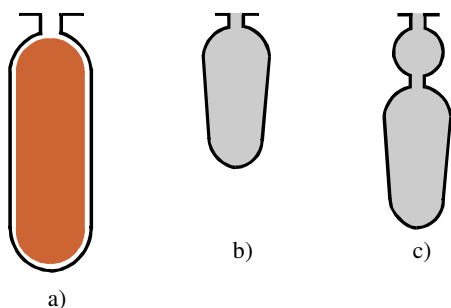
$$N_r = \frac{1}{2} \quad (3.5.)$$

Budući da su utori jednoliko raspoređeni po obodu i da su štاپovi međusobno jednaki, ovakav namot je simetričan. Sve dok je namot simetričan može imati proizvoljan broj faza. Ovakav namot će u okretnom polju stvoriti simetričan višefazni sustav induciranih napona i struja koje su nužan uvjet za stvaranje momenta.

Izrada kaveznog namota je vrlo jednostavna: nema namatanja i ne treba izolirati namot. Koriste se dvije izvedbe kaveznog namota:

- uložni,
- lijevani.

Na slici 3.7. su prikazani oblici utora koji se najčešće koriste za kavezne namote.

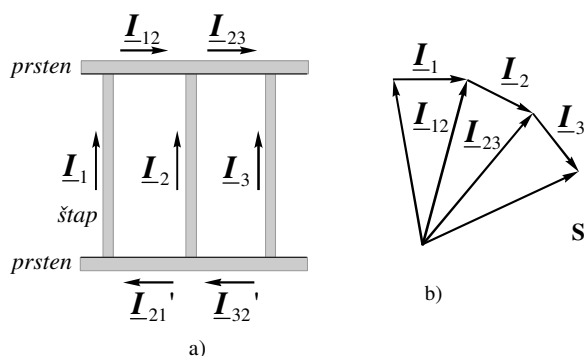


Slika 3.7. Oblici rotorskih utora i štapova kaveznih asinkronih rotora
a) uložni štap,
b) c) lijevani štap.

Uložni namot se radi od bakrenih štapova. Štapovi se provuku kroz utore i sa svake strane zavare na bakreni prsten. Ova se izvedba koristi kod motora srednjih i većih snaga.

Kod manjih motora se koristi **lijevani kavezni namot**. Lijevani kavez se izrađuje od aluminija ili silumina. Rotorski paket se zajedno s osovinom stavi u kalup za lijevanje. Potom se lijev pod tlakom ubrizga u taj kalup tako da ispuni utore rotora i prostor za kratkospojne prstene.

Izrada zvjezdišta u obliku prstena nosi neke osobitosti. Zvjezdište nije jedna točka. Budući da je broj utora relativno velik, naponi i struje u pojedinim štapovima samo će se malo razlikovati u fazi. Kako se u prstenima struje iz štapova zbrajaju, u prstenima mogu teći velike struje (slika 3.8.). Zato ih treba odgovarajuće dimenzionirati.



Slika 3.8. Struje u štapovima i prstenima kaveznog namota
a) struje u kavezu,
b) fazorski prikaz.

Kratkospojni prsteni imaju često na sebi krilca koja služe kao ventilator za hlađenje.

Postoje izvedbe s jednim, dva ili više kaveza. Odgovarajućim oblikom rotorskog utora i brojem kaveza mogu se dobiti različite karakteristike stroja.

3.3. OSNOVNI PODACI ASINKRONIH STROJEVA

Kao i kod sinkronog stroja osnovni podaci o asinkronom stroju dani su na natpisnoj pločici. Natpisna pločica sadrži:

- osnovne podatke o proizvođaču,
- godinu proizvodnje,
- tipnu oznaku,
- izvedbeni oblik,
- spoj statorskog namota,
- klasu izolacije i
- nazivne podatke za koje je stroj građen.

Tipna oznaka je različita kod različitih proizvođača. Obično sadrži:

- oznaku serije proizvodnje,
- oznaku vrste i zaštite motora,
- visinu osovine,
- duljinu kućišta i
- broj polova.

Vrsta zaštite motora je definirana standardima.

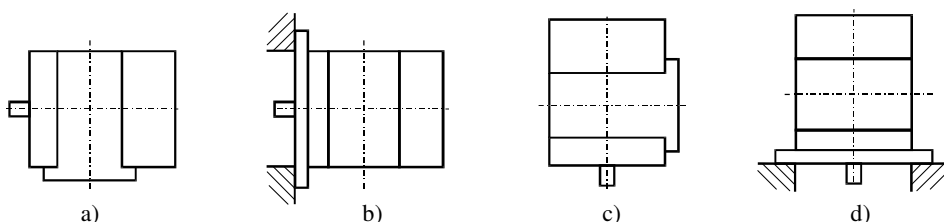
Izvedbeni oblik određuje način postavljanja i spajanja s radnim mehanizmom. Motor može biti izveden:

- s nogama ili s prirubnicom,
- s horizontalnom ili vertikalnom osovinom,
- s ležajnim štitovima ili s odvojenim ležajima ili
- za odvojeni priključak ili za direktnu ugradnju u radni mehanizam.

Izvedbeni oblici su sistematizirani i definirani standardima. Svakom izvedbenom obliku pripada određena oznaka po kojoj je on jednoznačno određen. Na slici 3.9. su prikazana 4 najčešće korištena izvedbena oblika (s oznakama prema IEC propisima):

- IM1001 (s nogama i ležajnim štitovima, s horizontalnom osovinom),
- IM3001 (s prirubnicom i ležajnim štitovima, s horizontalnom osovinom),
- IM1011 (s nogama i ležajnim štitovima, s vertikalnom osovinom i pogonom dolje),

- IM3011 (s prirubnicom i ležajnim štitovima, s vertikalnom osovinom i pogonom dolje).



Slika 3.9. Najčešći izvedbeni oblici asinkronog motora
a) IM1001, b) IM3001, c) IM1011, d) IM3011.

Nazivni podaci asinkronog motora su:

- nazivna snaga P_n ,
- nazivni napon U_n (efektivna vrijednost linijskog napona),
- nazivna struja I_n (efektivna vrijednost linijske struje),
- nazivna frekvencija f_n ,
- nazivna brzina vrtnje n_n i
- nazivni faktor snage $\cos \varphi_n$.

Nazivna snaga motora je mehanička snaga na osovini.

Važno je da se držimo podataka s natpisne pločice, pa se stroju u pogonu neće ništa dogoditi. Osnovno ograničenje na rad predstavlja zagrijavanje stroja, i ono ne smije prijeći dozvoljenu granicu.

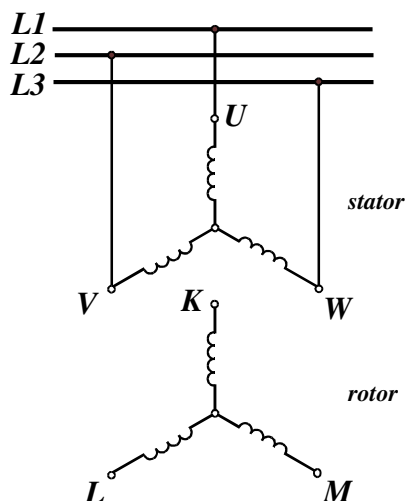
3.4. NAČIN RADA

3.4.1. Kliznokolutni motor s otvorenim rotorskim namotom

Ako se trofazni statorski namot spoji na mrežu čvrstog napona U_L i frekvencije f_L (kruta mreža), njime će poteći struje. Uslijed napajanja simetričnim sustavom napona (fazno pomaknutih za 120° el.) i sustav struja će biti simetričan. Ove će struje u simetričnom namotu (s prostornim pomaknutom faza za 120°) stvoriti okretno protjecanje konstantnog iznosa i brzine vrtnje.

U asinkronom stroju su dva protjecanja, protjecanje statorskog i protjecanje rotorskog namota, pa ih se sukladno tome označava s θ_s i θ_r .

Skica spoja trofaznog statorskog namota na krutu mrežu, uz otvoren rotorski namot, dana je na slici 3.10.



Slika 3.10. Priključak asinkronog motora na krutu mrežu uz otvoren rotorski namot

Rezultantno okretno statorsko protjecanje Θ_s ima samo direktnu komponentu i jednako je armaturnom (statorskom) protjecanju sinkronog stroja Θ_a prema (2.7.):

$$\Theta_s = \frac{m_s}{2} \cdot \frac{2\sqrt{2}I_s}{\pi} \cdot \frac{N_s}{p} k_{ws} \quad (3.6.)$$

Okretno magnetsko polje, stvoreno statorskim protjecanjem, je stalnog iznosa i brzine određene brojem pari polova p statorskog namota i frekvencijom napajanja f_L . Ono se vrti sinkronom brzinom n_s koja je jednaka:

$$n_s = \frac{60f_L}{p} \quad (3.7.)$$

To polje se zatvara i kroz rotor pa u namotu rotora inducira elektromotorne sile, ali samo uz uvjet da se rotor ne vrti istom brzinom kao okretno polje statora. Ako bi se rotor vrtio istom (sinkronom) brzinom kao okretno polje statora, ne bi bilo relativnog gibanja vodiča u odnosu na magnetsko polje, pa ne bi bilo inducirane elektromotorne sile.

Dakle, rotor se mora vrtjeti asinkrono, po čemu je ova vrsta stroja i dobila ime.

Dalje će se promatrati trofazni namot na statoru i rotoru prema slici 3.10. Fazni namoti statora su međusobno prostorno razmaknuti za 120° , i u njima se zbog magnetskog polja induciraju elektromotorne sile. Ove inducirane elektromotorne sile ($\underline{E}_A, \underline{E}_B, \underline{E}_C$) su upravo jednake faznim naponima mreže ($\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$). One moraju biti jednake po iznosu i po fazi, pa uvjet ravnoteže glasi:

$$\begin{aligned}\underline{E}_A &= \underline{U}_A \\ \underline{E}_B &= \underline{U}_B \\ \underline{E}_C &= \underline{U}_C\end{aligned}\tag{3.8.}$$

Ovo, naravno, vrijedi za slučaj zanemarenja napona na radnim otporima i rasipnim reaktancijama statorskog namota. Ovdje su indeksi **A**, **B** i **C** uzeti za oznake faza.

Općenito vrijedi za svaku fazu da fazni napon $\underline{U}_s$ mora biti jednaka narinutom faznom naponu mreže $\underline{U}_{ph}$:

$$\underline{U}_s = \underline{U}_{ph}\tag{3.9.}$$

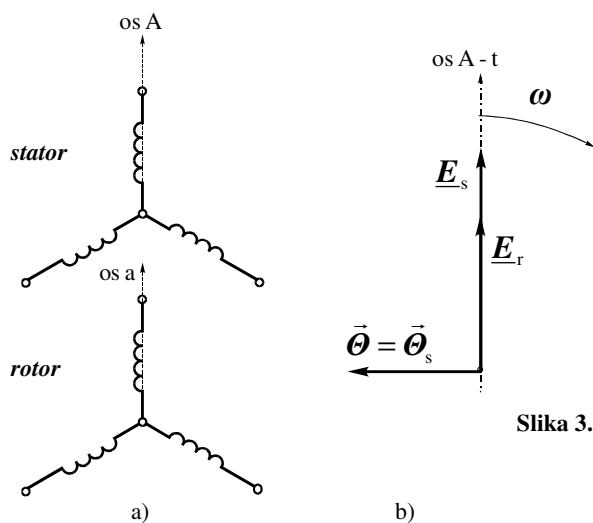
Ako se uzmu u obzir naponi na radnim otporima i rasipnim reaktancijama statorskog namota, uvjet ravnoteže inducirane elektromotorne sile i faznih napona za jednu fazu općenito glasi:

$$\underline{E}_s = \underline{U}_s - \underline{I}_s (R_s + jX_{\sigma s})\tag{3.10.}$$

Inducirana elektromotorna sila u motoru $\underline{E}_s$ se razlikuje od narinutog faznog napona $\underline{U}_s$ za padove napona koje stvara fazna struja $\underline{I}_s$ na radnom otporu faze R_s i rasipnoj reaktanciji $X_{\sigma s}$. Ovaj je uvjet jednak kao i kod realnog sinkronog motora prema (2.80.), ako je taj motor priključen na čvrstu mrežu pa je fazni napon motora $\underline{U}_s$ jednak faznom naponu mreže.

Dakle, kao i kod sinkronog motora mora i u asinkronom motoru postojati ravnoteža između unutarnjeg napona (inducirane elektromotorne sile) i napona mreže. Ta će ravnoteža određivati struje u namotima.

Sada će se razmotriti kakav mora biti rotor i što se u njemu događa. Za primjer će se pretpostaviti simetrično namotani trofazni rotor, postavljen tako da se os faze **a** rotorskog namota poklapa s osi faze **A** statorskog namota. Također pretpostavlja se da rotor miruje. Položaji faza oba namota i vektorsko-fazorski dijagram (jedne faze) su prikazani na slici 3.11.



Slika 3.11. Prikaz asinkronog motora s mirnim otvorenim rotorom
a) položaj namota,
b) vektorsko-fazorski prikaz.

Ako je rotorski namot otvoren i ako se rotor ne vrti, onda će se u fazi rotorskog namota inducirati elektromotorna sila $\underline{E}_r$ istog smjera kao i elektromotorna sila $\underline{E}_s$ u fazi statorskog namota. Veličina inducirane elektromotorne sile $\underline{E}_r$ bit će u odnosu na statorsku $\underline{E}_s$ (bez obzira na brojeve faza rotorskog i statorskog namota):

$$\frac{\underline{E}_r}{\underline{E}_s} = \frac{N_r k_{wr}}{N_s k_{ws}} \quad (3.11.)$$

U prethodnom izrazu su oznake slijedeće:

- N_r – broj serijski vezanih zavoja rotorskog namota po fazi,
- N_s – broj serijski vezanih zavoja statorskog namota po fazi,
- k_{wr} – faktor namota rotorskog namota i
- k_{ws} – faktor namota statorskog namota.

Frekvencija f_{r0} induciranog napona u fazi rotora koji miruje je jednaka frekvenciji u fazi statora f_s , odnosno frekvenciji mreže f_L :

$$f_{r0} = f_s = f_L \quad (3.12.)$$

Budući da je stroj spojen na krutu mrežu, iznos i položaj napona $\underline{E}_s$ je stalan (uz zanemarenje padova napona na statoru). Stoga je stalno i ukupno protjecanje u vektorsko-fazorskom dijagramu (slika 3.11.b)). Struje u rotoru nema, pa nema ni rotorskog protjecanja, te ne može biti ni momenta.

Ako bi se takav stroj sa zakočenim rotorom zatvorio u kutiju i iz njega izvelo samo izvode, ne bi se pri mjerenju napona moglo znati radi li se o motoru ili transformatoru! Ako se zakrene rotor za određeni kut, smanjit će se ulančani tok na rotoru pa će se smanjiti i napon. Time se zapravo dobilo regulacijski transformator (uz određena ograničenja).

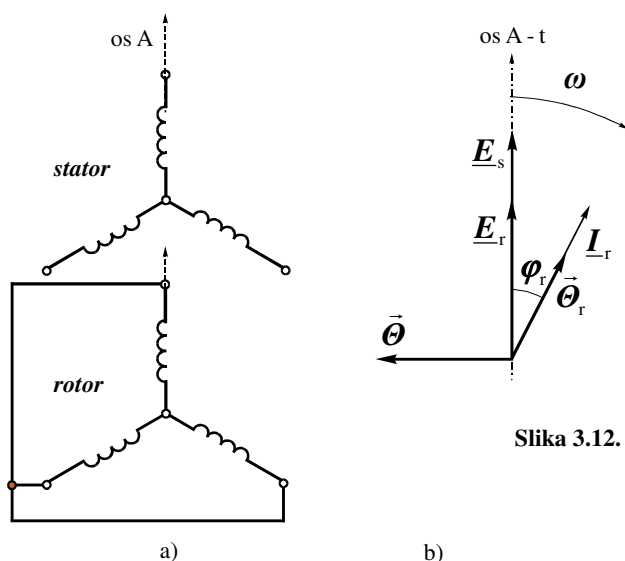
Da bi motor razvijao moment, moraju u rotorskom namotu teći struje koje će stvoriti protjecanje. Osim o iznosu rotorskog protjecanja moment će ovisiti i o kutu opterećenja, kao i kod sinkronog stroja. To je kut koji u vektorsko-fazorskom dijagramu vektor indukcije zatvara s vektorom protjecanja rotora.

Protjecanje rotora bi trebalo biti simetrično. Takvo protjecanje se dobije ako u simetričnom višefaznom namotu postoji simetrični višefazni sustav struja. Broj faza pritom nije važan, tako da rotorski namot može imati i više faza nego stator.

3.4.2. Okretno protjecanje mirnog rotora

U višefaznom simetričnom namotu rotora će okretno protjecanje statora inducirati simetričan sustav elektromotornih sila. Ako se rotorski namot kratko spoji ili ga se spoji preko jednakih impedancija, dobit će se simetričan sustav struja, konstantno protjecanje i moment.

Razmotrit će se kakvo protjecanje stvara simetričan sustav struja na rotoru. Promatrat će se opet slučaj kad rotor miruje (na osovini je zakočen). Također će se pretpostaviti trofazni namot na statoru i na rotoru, kao na slici 3.12.a).

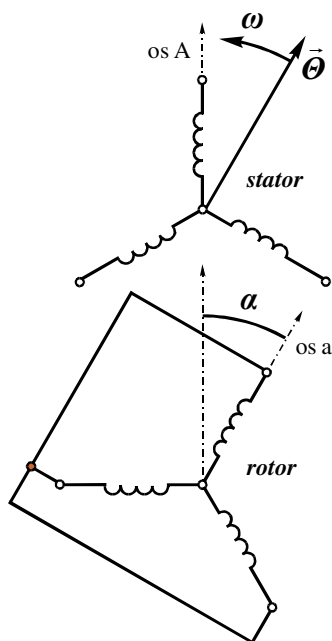


Slika 3.12. Prikaz asinkronog motora s mirnim rotorom kad se osi namota poklapaju
a) položaj namota,
b) vektorsko-fazorski prikaz.

Zbog impedancije rotora, koju čine radni otpor R_r i rasipna reaktancija $X_{\sigma r}$ jedne faze, struja u fazi rotora I_r će kasniti za naponom E_r za kut φ_r (slika 3.12.b)).

Nasuprot broju faza, broj polova rotora mora biti jednak broju polova statora. Elektromagnetska pretvorba energije može se u asinkronom motoru odvijati samo ako je broj polova rotora i statora jednak! Samo tada je srednja vrijednost zakretnog momenta različita od nule. Statorski namot kaveznog asinkronog motora određuje broj polova, a rotor se tome prilagodi. Kolutni motor se mora izvesti s jednakim brojem polova na statoru i rotoru.

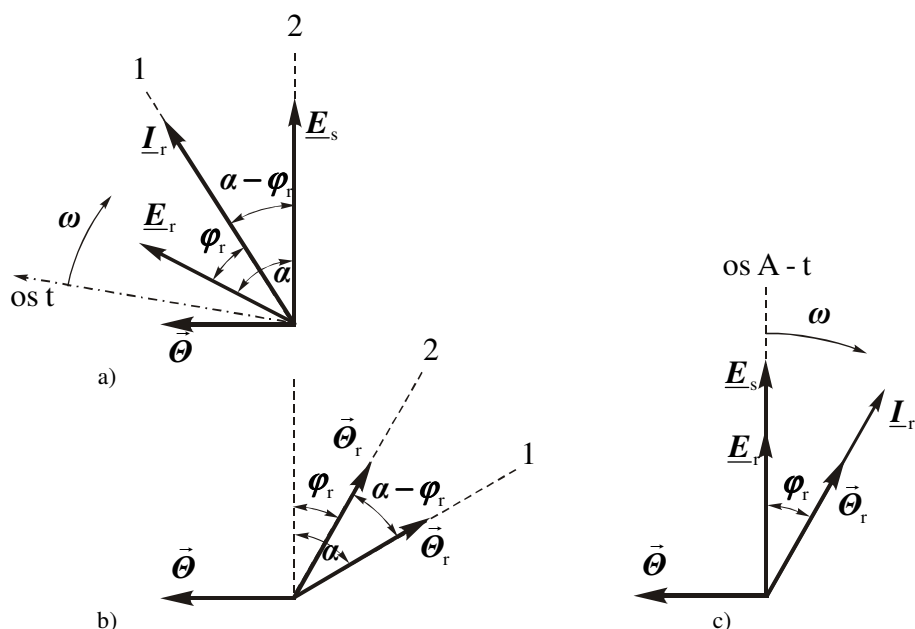
Postavlja se pitanje kakav će biti smjer protjecanja ako rotor zakrenemo za neki kut α u odnosu na stator [1], kao na slici 3.13.?



Slika 3.13. Shematski prikaz asinkronog motora s mirnim rotorom kad je os rotorskog namota pomaknuta u odnosu na stator

Neka je smjer vrtnje okretnog polja ulijevo. Maksimum inducirane elektromotorne sile u rotorskoj fazi **a** bit će prije nego u statorskoj fazi **A**, što je prikazano odgovarajućim položajima fazora na slici 3.14.a). Struja I_r u rotorskoj fazi **a** zaostaje za naponom E_r za kut φ_r (induktivni karakter rotorskog namota).

U fazorskom dijagramu smatra se da se vremenska os vrti udesno, pa će se u jednom času naći u smjeru faze **a** (položaj 1 na slici 3.14.). U tom trenutku je u rotoru u fazi **a** struja maksimalna. To znači da će se okretno protjecanje rotora Θ_r , odnosno vektor $\vec{\Theta}_r$ nalaziti upravo u tom smjeru, kako je to naznačeno na slici 3.14.b).



Slika 3.14. Fazorski i vektorski prikazi asinkronog motora s mirnim rotorom kad je os rotorskog namota pomaknuta u odnosu na stator
 a) fazorski prikaz, b) vektorski prikaz protjecanja,
 c) vektorsko-fazorski prikaz.

Kako vremenska os putuje udesno, vektor protjecanja rotora $\vec{\Theta}_r$ putuje ulijevo. Vremenska se os poklopi s fazorom $\underline{E}_s$ nakon što od trenutka 1 (položaj 1) do trenutka 2 (položaj 2) prevali kut $\alpha - \varphi_r$. U tom će vremenu vektor $\vec{\Theta}_r$ prevaliti isti put ulijevo, pa će se naći pomaknut za φ_r desno od osi faze **A**.

Ako se crta zajednički vektorsko-fazorski dijagram, onda je to položaj koji odgovara trenutku $t = 0$, za koji se crtaju i ostali vektori i fazori (slika 3.14.c)).

Dolazi se do važnog zaključka:

bez obzira na položaj rotora, u vektorsko-fazorskom dijagramu fazor struje $\underline{I}_r$ i vektor protjecanja rotora $\vec{\Theta}_r$ zaostaju za naponom $\underline{E}_r$ za kut φ_r .

Taj kut ovisi o otporu i rasipnom induktivitetu rotorskog strujnog kruga. Iz vektorsko-fazorskog dijagrama na slici 3.14.c) može se odmah vidjeti i koliki je kut opterećenja. Kut opterećenja asinkronog stroja iznosi:

$$\delta_r = \frac{\pi}{2} + \varphi_r \quad (3.13.)$$

Treba napomenuti da će, dok rotor miruje, frekvencija induciranog napona (i struja) u rotorskom namotu f_{r0} biti određena brzinom resultantnog okretnog protjecanja n_s :

$$f_{r0} = \frac{n_s p}{60} = f \quad (3.14.)$$

Dok rotor miruje, brzina okretnog polja rotora $n_{\Theta r0}$ iznosi:

$$n_{\Theta r0} = \frac{60 f_{r0}}{p} = n_s \quad (3.15.)$$

Dakle, frekvencija u rotoru je jednaka osnovnoj frekvenciji u stroju (frekvenciji napajanja). Brzina okretnog polja rotora jednaka je sinkronoj brzini n_s okretnog polja koje ga je proizvelo!

3.4.3. Vrtanja rotora i klizanje

Neka se rotor asinkronog motora vrti brzinom n koja je različita od sinkrone. Može se definirati relativnu brzinu rotora n_{rel} u odnosu na sinkronu brzinu n_s :

$$n_{rel} = n_s - n \quad (3.16.)$$

Omjer relativne brzine rotora n_{rel} i sinkrone brzine n_s naziva se klizanjem s . Prema definiciji klizanje iznosi:

$$s = \frac{n_{rel}}{n_s} = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (3.17.)$$

Klizanje se često izražava u postocima:

$$s [\%] = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100 \quad (3.18.)$$

Pri sinkronoj brzini ($n = n_s$) je klizanje jednako $s = 0$. Nasuprot tome, klizanje rotora u mirovanju iznosi $s = 1$ jer je $n = 0$.

Relativna brzina određuje frekvenciju u rotoru:

$$f_r = \frac{n_{rel} p}{60} = \frac{(n_s - n) p}{60} \quad (3.19.)$$

Sređivanjem ovog izraza se dobije:

$$f_r = s f_s \quad (3.20.)$$

Klizanje, prema tome, predstavlja omjer rotorske i statoske frekvencije.

$$s = \frac{f_r}{f_s} \quad (3.21.)$$

Budući da je frekvencija inducirane elektromotorne sile u rotoru direktno proporcionalna klizanju, u fazi rotora ona iznosi:

$$E_r = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \Phi f_r N_r k_{wr} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \Phi s f_s N_r k_{wr} \quad (3.22.)$$

Inducirana elektromotorna sila rotora u mirovanju E_{r0} je jednaka:

$$E_{r0} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \Phi f_{r0} N_r k_{wr} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \Phi f_s N_r k_{wr} \quad (3.23.)$$

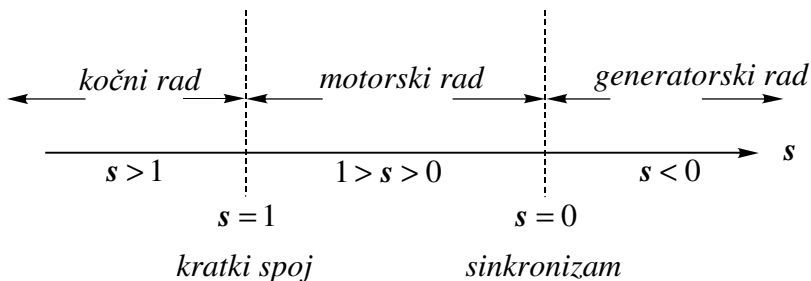
Vrijedi, dakle, da je inducirana elektromotorna sila u fazi rotora pri nekoj brzini vrtnje n , odnosno klizanju s , jednaka:

$$E_r = s E_{r0} \quad (3.24.)$$

Iznos i frekvencija inducirane elektromotorne sile u fazi rotora jako ovise o klizanju!

I druge značajne veličine stroja (rotorska impedancija, struje, moment) jako ovise o klizanju, pa se ono često uzima kao nezavisna veličina. Stoga se momenti i struje prikazuju u ovisnosti o klizanju.

Na slici 3.15. je prikazano područje rada asinkronog motora ovisno o klizanju. Za motor u kratkom spoju (zakočen rotor) je klizanje $s = 1$. Rotor u sinkronizmu ima klizanje $s = 0$, pa je i inducirana elektromotorna sila $E_r = 0$.



Slika 3.15. Područje rada asinkronog motora u ovisnosti o klizanju

U području između vrijednosti klizanja $1 > s > 0$ je **motorski režim rada**. Ako se vanjskim pogonskim momentom rotor vrti brže od sinkronizma, klizanje postane negativno ($s < 0$), i stroj priđe u **generatorski režim rada**. Ako se vrti na suprotnu stranu od smjera okretnog polja, klizanje poprima vrijednosti veće od 1 ($s > 1$), i stroj radi u kočnom režimu koji se još naziva **protustrujno kočenje**.

3.4.4. Nadomjesna shema rotora

U rotorskom krugu se nalazi nekakav radni otpor R_r i rasipna reaktancija X_{gr} . Ako u rotorski krug nisu uključeni dodatni (vanjski) otpori, onda je radni otpor faze rotora jednak radnom otporu namota jedne faze:

$$R_r = R_{r0} \quad (3.25.)$$

To uvijek vrijedi za kavezne strojeve!

Rasipnu reaktanciju rotora definira se za rotor u mirovanju (pomoću rasipnog induktiviteta rotora L_{gr} i rotorske frekvencije f_{r0}) kao:

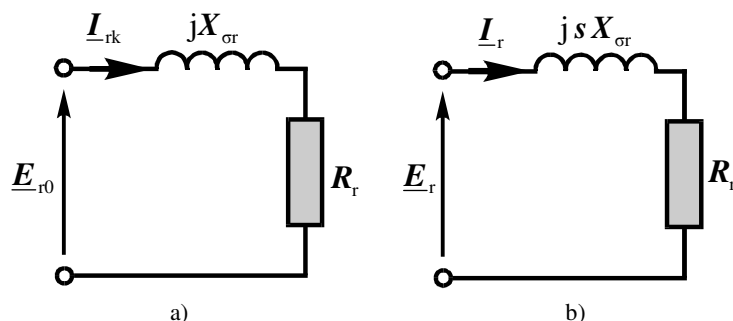
$$X_{gr} = 2\pi f_{r0} L_{gr} = 2\pi f_s L_{gr} \quad (3.26.)$$

Pri nekoj drugoj rotorskoj frekvenciji f_r je stvarna rasipna reaktancija X_{gr}^* ovisna o toj frekvenciji, odnosno klizanju. Stvarna rasipna reaktancija X_{gr}^* iznosi:

$$X_{gr}^* = 2\pi f_r L_{gr} = 2\pi s f_s L_{gr} = s X_{gr} \quad (3.27.)$$

Međutim, prikladnije je koristiti ovu reaktanciju u obliku sX_{gr} jer nam u nadomjesnoj mreži daje uvid u utjecaj frekvencije, odnosno klizanja rotora.

Pri razmatranju struje na rotoru, ako se promatra samo rotor, R_r i sX_{gr} su jedini otpori koje treba uzeti u obzir. Takav je rotorski krug prikazan na slici 3.16. za rotor u mirovanju (slika 3.16.a)) i pri vrtnji s klizanjem s (slika 3.16.b)). S I_{rk} je označena struja faze rotora u kratkom spoju, dok je I_r općenito struja u fazi rotora.



Slika 3.16. Nadomjesna shema rotora asinkronog motora

a) rotor u mirovanju (kratki spoj),

b) rotor pri vrtnji s klizanjem s .

Kako je već rečeno, reaktancija rotora ovisi o frekvenciji f_r u rotorskom krugu. Isto tako i inducirani napon rotora ovisi o frekvenciji f_r . Analogno izrazu (3.24.) za apsolutnu vrijednost inducirane elektromotorne sile u fazi rotora vrijedi i za fazor:

$$\underline{E}_r = s \underline{E}_{r0} \quad (3.28.)$$

3.4.5. Kružni dijagram rotorske struje i protjecanja

Za neko proizvoljno klizanje s će struja u fazi rotora (prema slici 3.16.b)) iznositi:

$$\underline{I}_r = \frac{\underline{E}_r}{R_r + js X_{\sigma r}} \quad (3.29.)$$

Uvrštenjem izraza (3.28.) u (3.29.) slijedi:

$$\underline{I}_r = \frac{s \underline{E}_{r0}}{R_r + js X_{\sigma r}} \quad (3.30.)$$

Dijeljenjem brojnika i nazivnika sa s se dobije malo drukčiji izraz za struju u fazi rotora:

$$\underline{I}_r = \frac{\underline{E}_{r0}}{\frac{R_r}{s} + j X_{\sigma r}} \quad (3.31.)$$

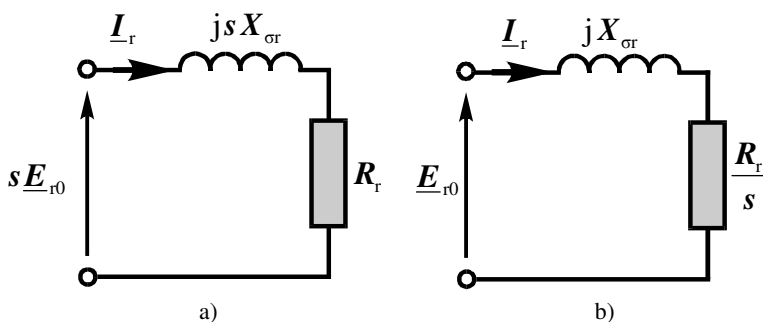
Izraz (3.30.) bolje opisuje pojavu na rotoru:

- napon se promijenio s puta zbog promjene frekvencije u rotoru (u odnosu na rotor u mirovanju),
- rasipna reaktancija se također promijenila s puta (zbog promjene frekvencije u rotoru).

Izraz (3.31.) bolje opisuje pojavu sa stajališta statora:

- frekvencija je jednaka frekvenciji mreže,
- inducirani napon je ostao isti (kao u mirovanju),
- rasipna reaktancija je ostala ista jer je frekvencija ista,
- pojavljuje se takva struja kao da se radni otpor promijenio $1/s$ puta.

Kad bi se mjerila struja na statoru, i kad se ne bi znalo da se radi o motoru (nego recimo o transformatoru), izgledalo bi kao da se promijenio otpor u sekundarnom krugu. U oba slučaja se vidi da je rotorska struja ovisna o klizanju rotora. Na slici 3.17. je prikazana nadomjesna shema rotora: gledana sa strane rotora a) i sa statorske strane b).



Slika 3.17. Nadomjesna shema rotora asinkronog motora
a) sa strane rotora, b) sa strane statora.

Za daljnje razmatranje je pogodniji izraz (3.31.) koji vodi do potpune nadomjesne sheme asinkronog motora i kružnog dijagrama.

Kružni dijagram predstavlja vektorsko-fazorski dijagram asinkronog stroja za različite režime rada. Množenjem prethodnog izraza (3.31.) za rotorsku struju s impedancijom rotora dobije se:

$$\underline{I}_r \left(\frac{R_r}{s} + j X_{\sigma r} \right) = \underline{E}_{r0} \quad (3.32.)$$

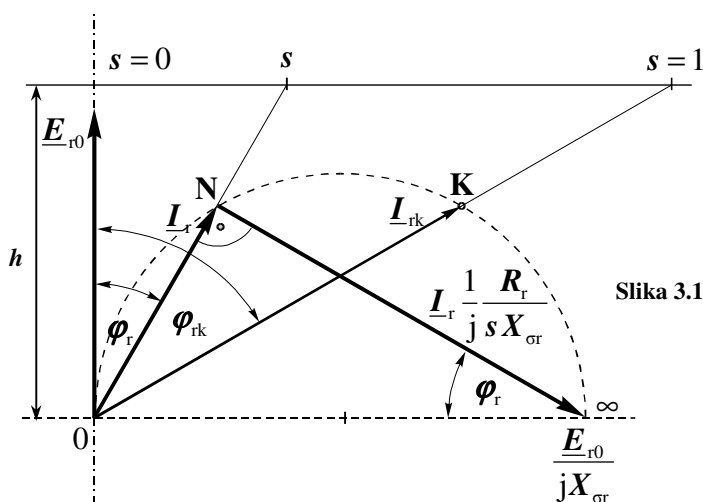
Dijeljenjem s $jX_{\sigma r}$ se dobije:

$$\underline{I}_r \left(\frac{1}{j} \cdot \frac{R_r}{s X_{\sigma r}} + 1 \right) = \frac{\underline{E}_{r0}}{j X_{\sigma r}} \quad (3.33.)$$

Daljnijm sređenjem (odvajanjem realnog od imaginarnog dijela faktora uz struju) slijedi:

$$\underline{I}_r + \underline{I}_r \frac{1}{j} \cdot \frac{R_r}{s X_{\sigma r}} = \frac{\underline{E}_{r0}}{j X_{\sigma r}} \quad (3.34.)$$

Član $\underline{E}_{r0} / jX_{\sigma r}$ (desna strana jednadžbe) ima konstantnu vrijednost i ne ovisi o klizanju. Lijeva strana jednadžbe je zbroj dvaju fazora koji imaju međusobni kut od 90° . Ako se nacrti fazor $\underline{E}_{r0}$ vertikalno kao dosad, onda $\underline{E}_{r0} / jX_{\sigma r}$ zaostaje za 90° . Navedeni odnosi ostaju jednaki, bez obzira na klizanje. Posljedica toga je da se vrh fazora struje $\underline{I}_r$ kreće po kružnici promjera $\underline{E}_{r0} / jX_{\sigma r}$ (obodni kut nad promjerom je uvijek 90°). Time se dobije prikaz rotorske struje u obliku kružnog dijagrama prema slici 3.18.



Slika 3.18. Kružni dijagram rotorske struje asinkronog motora

Na istom dijagramu može se lako nacrtati i skalu za klizanje s . Na proizvoljnoj visini h povuče se paralelu s apscisom koja predstavlja os klizanja. Iz trokuta $0N\infty$ na slici 3.18. proizlazi:

$$\operatorname{tg} \varphi_r = \frac{\underline{I}_r}{\underline{I}_r \frac{R_r}{s X_{\sigma r}}} = s \frac{X_{\sigma r}}{R_r} \quad (3.35.)$$

Budući da je omjer $X_{\sigma r} / R_r$ konstantan, klizanje će biti proporcionalno s $\tan \varphi_r$. Za $s = 1$ je kratki spoj, pa je:

$$\tan \varphi_{rk} = \frac{X_{\sigma r}}{R_r} \quad (3.36.)$$

$X_{\sigma r}$ i R_r su poznati, pa φ_{rk} možemo odrediti. Pripadnu točku na kružnom dijagramu označi se s **K**. U ishodištu je točka sinkronizma (rotorska struja je $I_r = 0$) koja je za idealni slučaj i točka praznog hoda.

Sjecište osi klizanja s vertikalom u ishodištu daje klizanje $s = 0$. Iz ishodišta povučemo pravac kroz točku kratkog spoja **K**, a sjecište tog pravca s osi klizanja daje $s = 1$.

Mjerilo za s na osi klizanja je linearno. To proizlazi iz slijedećih omjera:

$$\tan \varphi_r = \frac{s}{h} = s \frac{X_{\sigma r}}{R_r} \quad (3.37.)$$

Budući da je $X_{\sigma r} / R_r$ konstantnog iznosa k_φ , slijedi također:

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{h} &= \frac{X_{\sigma r}}{R_r} = k_\varphi \\ \tan \varphi_r &\div s \end{aligned} \right\} \quad (3.38.)$$

Već je prije pokazano da protjecanje rotora u mirovanju ima u vektorsko-fazorskom dijagramu uvijek isti položaj u odnosu na stator, bez obzira na položaj rotora. Treba odrediti kakvo je protjecanje rotora kad se on vrti.

Brzina rotora je:

$$n = (1 - s) n_s \quad (3.39.)$$

Relativna brzina okretnog polja u odnosu na rotor je:

$$n_{\text{rel}} = \frac{60 f_r}{p} = s n_s \quad (3.40)$$

Brzina okretnog polja rotora $n_{\Theta r}$ u odnosu na stator je jednaka zbroju ovih dviju brzina:

$$n_{\Theta r} = n + n_{\text{rel}} = (1 - s) n_s + s n_s = n_s \quad (3.41)$$

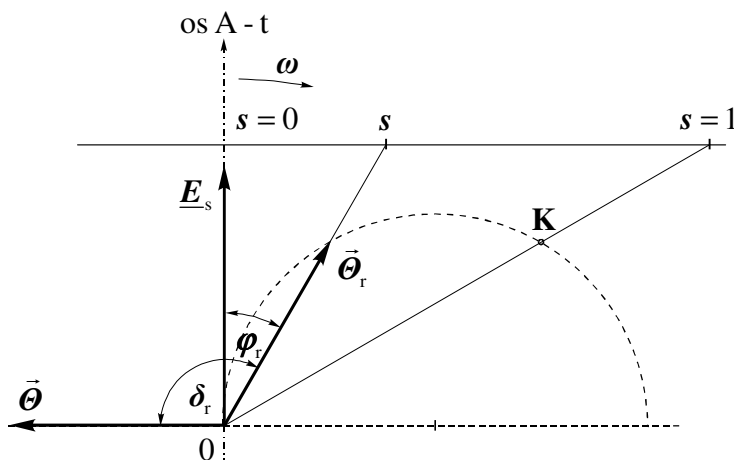
Dakle, **protjecanje rotora se vrti sinkronom brzinom u odnosu na stator.**

Smjer rotorskog protjecanja se u vektorsko-fazorskom dijagramu poklapa sa smjerom struje. Stoga i protjecanje zaostaje za induciranom elektromotornom silom $\underline{E}_r$ za kut φ_r . Isto toliko zaostaje za fazorom $\underline{E}_s$ jer $\underline{E}_s$ i $\underline{E}_r$ imaju isti smjer (slika 3.14.).

Kao i kod transformatora može se sekundarne veličine preračunati na primar. U slučaju asinkronog motora će se rotorske veličine preračunavati na statorsku stranu, pa će ravnotežu induciranom elektromotornoj sili u fazi statora $\underline{E}_s$ držati inducirana elektromotorna sila rotora preračunata na statorsku stranu $\underline{E}_{r0}'$. Stoga mora biti zadovoljena jednakost:

$$\underline{E}_s = \underline{E}_{r0}' \quad (3.42.)$$

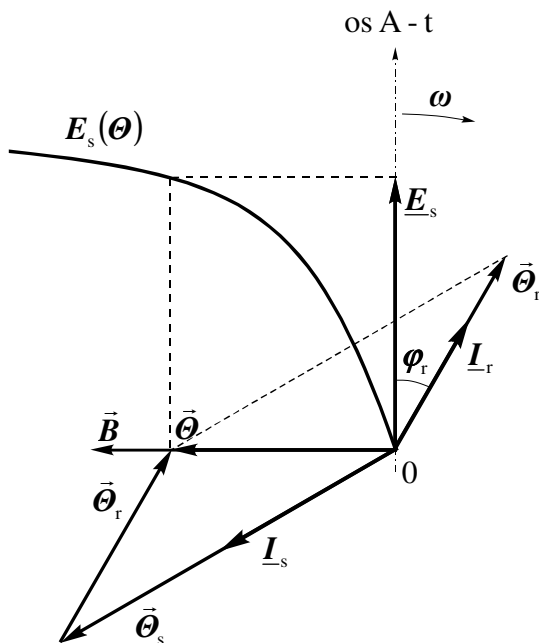
Iznos rotorskog protjecanja je proporcionalan struji rotora, pa vrh vektora protjecanja rotora slijedi kružnicu, iz čega proizlazi kružni dijagram protjecanja prema slici 3.19.



Slika 3.19. Kružni dijagram rotorskog protjecanja asinkronog motora

3.4.6. Ravnoteža napona i protjecanja

Dosad se nekoliko puta koristilo vektorsko-fazorski dijagram za prikaz napona, struja i protjecanja u asinkronom motoru. Uz zanemarenje padova napona na statorskom otporu i rasipnoj reaktanciji, inducirana elektromotorna sila će ovisiti o protjecanju. Može ju se prikazati prema slici 3.20., na sličan način kao i kod sinkronog stroja.



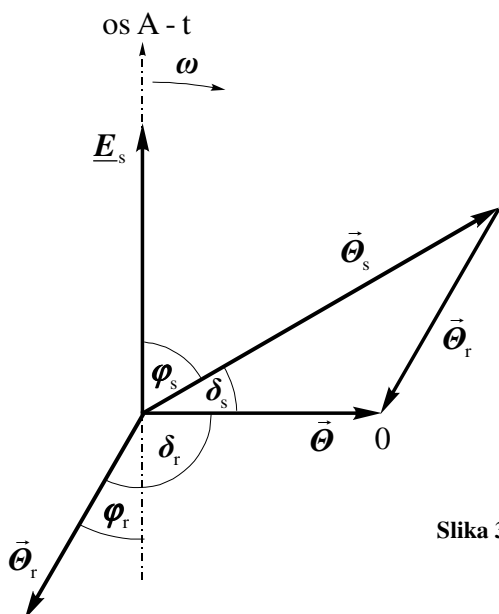
Slika 3.20. Ravnoteža protjecanja asinkronog motora

Vektori indukcije i ukupnog protjecanja su stalni jer je stroj priključen na krutu mrežu. Stoga je fazor $\underline{E}_s$ stalan. Fazor rotorske struje $\underline{I}_r$ zaostaje za naponom za kut φ_r , a vektor protjecanja $\vec{\theta}_r$ se poklapa s fazorom $\underline{I}_r$. Protjecanje primara (statora) $\vec{\theta}_s$ mora biti takvo da zbrojeno s $\vec{\theta}_r$ daje ukupno protjecanje $\vec{\theta}$:

$$\vec{\theta} = \vec{\theta}_s + \vec{\theta}_r \quad (3.43.)$$

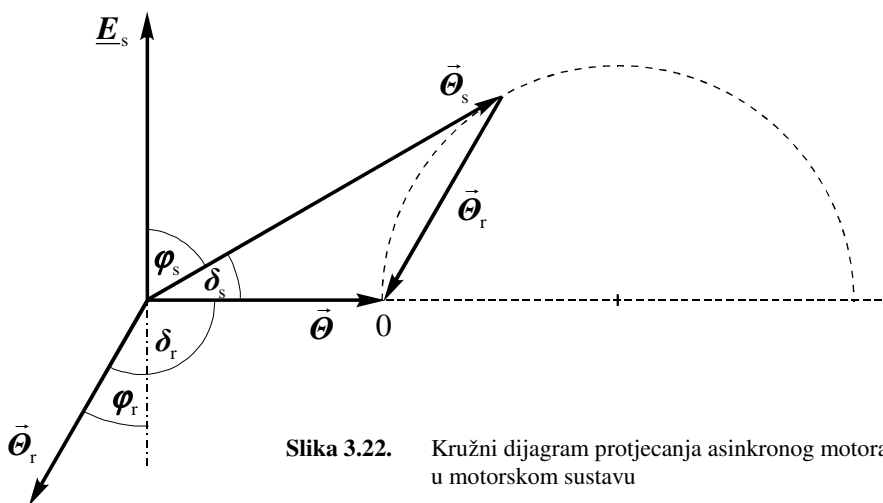
Budući da je staterska struja $\underline{I}_s$ proporcionalna staterskom protjecanju θ_s , pomoću vektora $\vec{\theta}_s$ može se odrediti veličinu i fazni položaj fazora staterske struje $\underline{I}_s$. Međutim, ovo je prikaz u generatorskom sustavu. Iako i ovako možemo dobiti dobar uvid u odnose napona, struja i protjecanja u asinkronom motoru, ipak je prikladniji prikaz u motornom sustavu.

Za razliku od generatorskog sustava prikazivanja, u motornom sustavu svi fazori struja i vektori protjecanja mijenjaju smjer za 180° . Ishodište vektorsko-fazorskog dijagrama premjesti se pritom ulijevo za iznos $\vec{\theta}$. Tako se dobije vektorski dijagram protjecanja u motornom sustavu prema slici 3.21.



Slika 3.21. Vektorski dijagram protjecanja asinkronog motora u motorskom sustavu

Sada se može i kružni dijagram rotorskog protjecanja sa slike 3.19. prikazati u motorskom sustavu prema slici 3.22.



Slika 3.22. Kružni dijagram protjecanja asinkronog motora u motorskom sustavu

Takav kružni dijagram protjecanja može se jednostavno pretvoriti u kružni dijagram struja. Pri tome treba struje svesti na primarnu (statorsku) stranu. Faktore za preračunavanje struja na statorsku stranu dobije se iz osnovnog izraza za višefazno protjecanje.

Općenito je protjecanje Θ u m -faznom simetričnom namotu (s p polova, N zavoja serijski vezanih po fazi i s faktorom namota k_w) što ga daje sustav simetričnih izmjeničnih struja I , analogno izrazima (2.6.) i (2.7.), određeno izrazom:

$$\Theta = \frac{m}{2} \cdot \frac{2\sqrt{2}I}{\pi} \cdot \frac{N}{p} k_w = k I \quad (3.44.)$$

Prema (3.6.) vrijedi i za statorsko protjecanje:

$$\Theta_s = k_s I_s \quad (3.45.)$$

Analogno vrijedi i za rotorsko protjecanje:

$$\Theta_r = k_r I_r \quad (3.46.)$$

Za ukupno protjecanje možemo uzeti da je proporcionalno nekoj struji statora I_0 pa iznosi:

$$\Theta = k_s I_0 \quad (3.47.)$$

I_0 je ona struja koja mora teći u statorskom namotu da se stvori protjecanje Θ . Ako je motor u praznom hodu (nije opterećen na osovini), statorskim namotom teče upravo ta struja koja najvećim dijelom predstavlja struju magnetiziranja (točka 3.4.8.). Rotorske struje nema, pa je struja I_0 jedina koja teče u motoru, i upravo ona stvara potrebno protjecanje Θ .

Protjecanje koje stvara rotorska struja svedena na stator I_r' mora biti jednako stvarnom protjecanju rotora:

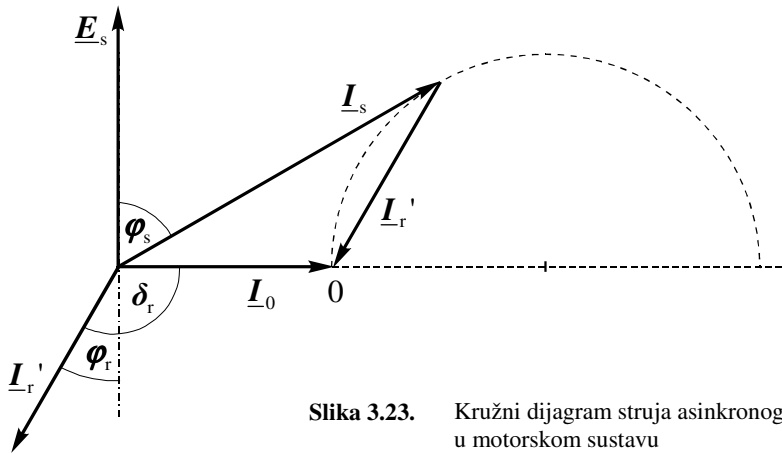
$$\Theta_r = k_s I_r' = k_r I_r \quad (3.48.)$$

Iz ove jednakosti slijedi da rotorska struja svedena na stator iznosi:

$$I_r' = I_r \frac{k_r}{k_s} = I_r \cdot \frac{m_r N_r k_{wr}}{m_s N_s k_{ws}} \quad (3.49.)$$

U prethodnom izrazu je m_r broj faza rotorskog namota, a m_s broj faza statorskog namota.

Na prethodni način su sve struje svedene na broj zavoja i faza statora. Stoga ih možemo prikazivati u odgovarajućem, istom mjerilu, pa kružni dijagram protjecanja postane kružni dijagram struja. Na slici 3.23. je prikazan kružni dijagram struja asinkronog stroja.



Slika 3.23. Kružni dijagram struja asinkronog motora u motorskom sustavu

3.4.7. Energetska bilanca

Prema nadomjesnoj shemi rotora na slici 3.17.b) na rotor se prenosi snaga P_δ :

$$P_\delta = m_r I_r^2 \frac{R_r}{s} \quad (3.50.)$$

R_r/s je fiktivni otpor koji nam dobro predstavlja strujno-naponske prilike, ali u rotorskom krugu imamo stvarno radni otpor R_r . Znači da su stvarni gubici u radnim otporima rotora:

$$P_{dr} = m_r R_r I_r^2 \quad (3.51.)$$

Razlika između snage koja prelazi zračni raspor P_δ i gubitaka u rotorskim radnim otporima P_{dr} predstavlja mehaničku snagu na rotoru P_{mec} :

$$P_{mec} = P_\delta - P_{dr} = m_r I_r^2 R_r \frac{1-s}{s} \quad (3.52.)$$

Gubici u radnim otporima rotorskog kruga se mogu izraziti pomoću snage P_{δ} koja prelazi na rotor:

$$P_{dr} = s P_{\delta} \quad (3.53.)$$

I mehanička snaga na rotoru P_{mec} se može izraziti pomoću snage P_{δ} koja prelazi na rotor:

$$P_{mec} = (1 - s) P_{\delta} \quad (3.54.)$$

Mehanička snaga predstavlja najvećim dijelom korisnu snagu na osovini P . Dakle, mehanička snaga je jednaka:

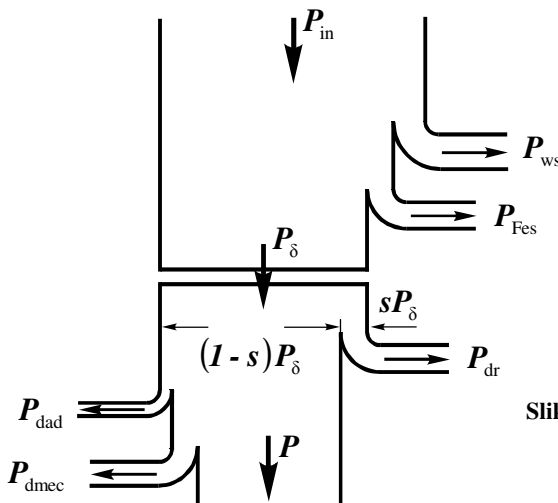
$$P_{mec} = P + P_{dmec} + P_{dad} \quad (3.55.)$$

Manji dio mehaničke snage se pretvara u gubitke. Jedan dio su gubici P_{dmec} koji nastaju uslijed trenja u ležajima i ventilacije. Drugi dio gubitaka, koji se pokriva mehaničkom snagom, su dodatni gubici uslijed viših harmonika magnetskog polja P_{dad} . U ovim razmatranjima će se zanemarivati te gubitke ($P_{dad} \approx 0$).

Budući da uvijek postoje gubici i u statoru, snaga koju motor uzima iz mreže je nešto veća. Na slici 3.24. je prikazan dijagram toka snage asinkronog motora.

Motor uzima iz mreže električnu snagu P_{in} . Dio te snage se troši na gubitke u statorskom namotu P_{ws} i gubitke u željezu statora P_{Fes} . Ostatak je snaga u zračnom rasporu P_{δ} koja se prenosi na rotor:

$$P_{\delta} = P_{in} - P_{ws} - P_{Fes} \quad (3.56.)$$



Slika 3.24.

Dijagram toka snage asinkronog motora u motorskom radu

Dio snage P_δ se troši na radnim otporima u rotorskom krugu i predstavlja električne gubitke P_{dr} . Ostatak je mehanička snaga u rotoru P_{mec} :

$$P_{mec} = P_\delta - P_{dr} \quad (3.57.)$$

Dio mehaničke snage pokriva gubitke trenja i ventilacije P_{dmec} , a dio dodatne gubitke uslijed viših harmonika magnetskog polja P_{dad} . Ostatak je korisna mehanička snaga na osovini P :

$$P = P_{mec} - P_{dmec} - P_{dad} \quad (3.58.)$$

Gubici u željezu rotora P_{Fer} su u pravilu zanemarivi zbog vrlo niske frekvencije magnetskog polja u rotoru.

Posebno treba napomenuti da su električki gubici P_{dr} u kaveznom rotoru samo gubici u rotorskom namotu P_{wr} :

$$P_{dr} = P_{wr} \quad (3.59.)$$

U kolutnom motoru nastaju i gubici P_{Rad} u vanjskim otporima, ako su uključeni u rotorski krug, pa ih treba pribrojiti gubicima u rotorskom namotu P_{wr} . Električni gubici u rotorskom krugu tada iznose:

$$P_{dr} = P_{wr} + P_{Rad} \quad (3.60.)$$

3.4.8. Nadomjesna shema

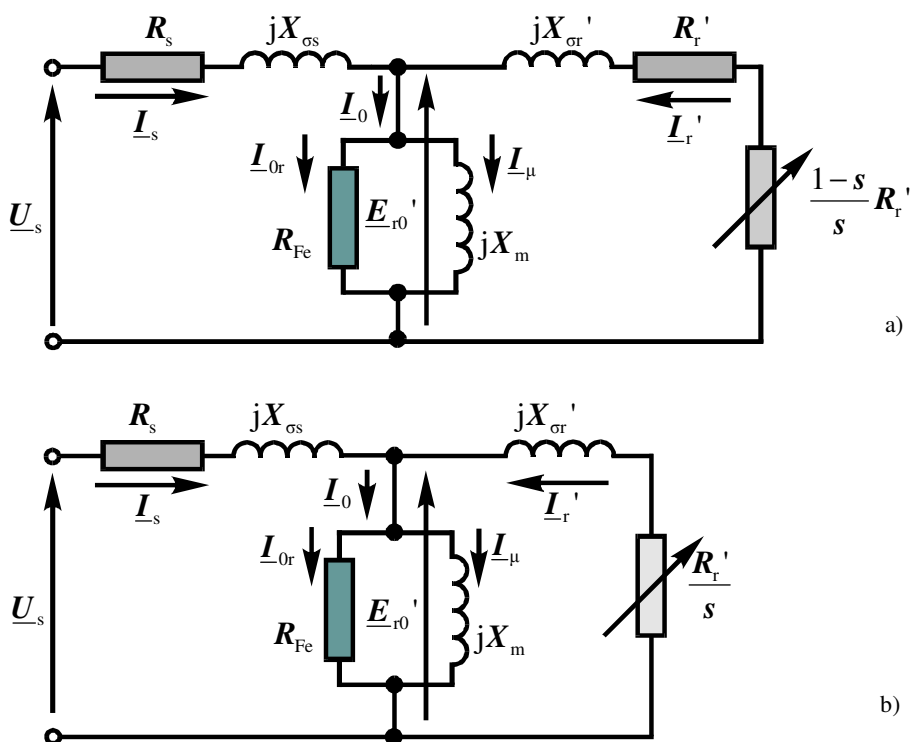
Nadomjesna shema rotora je već dana na slikama 3.16. i 3.17. Za točnija razmatranja mora se uzeti u obzir i radni otpor R_s i rasipnu reaktanciju X_{os} statorskog namota. Ako se uzme u obzir statorska impedancija, onda i rotorski krug treba uzeti onako kako ga vidi stator. U tu svrhu je prikladnija slika 3.17.b).

Potpuna nadomjesna shema asinkronog motora (slika 3.25.) je slična kao za transformator.

Rotorske veličine treba preračunati na statorsku stranu, slično kao kod transformatora. Elektromotornu silu $\underline{E}_{r0}$ i struju $\underline{I}_r$ rotora preračuna se na statorsku stranu ovako:

$$\underline{E}_{r0}' = \underline{E}_{r0} \frac{N_s k_{ws}}{N_r k_{wr}} = \underline{E}_s \quad (3.61.)$$

Struju rotora $\underline{I}_r$ preračuna se pomoću izraza (3.49.).



Slika 3.25. Jednofazna nadomjesna shema asinkronog motora
a) s odvojenim stvarnim radnim otporom u rotoru,
b) sa zajedničkim rotorskim otporom.

Radni otpor R_r i rasipna reaktancija $X_{\sigma r}$ faze rotora preračunaju se prema:

$$R_r' = R_r \frac{m_s}{m_r} \left(\frac{N_s}{N_r} \cdot \frac{k_{ws}}{k_{wr}} \right)^2 \quad (3.62.)$$

$$X_{\sigma r}' = X_{\sigma r} \frac{m_s}{m_r} \left(\frac{N_s}{N_r} \cdot \frac{k_{ws}}{k_{wr}} \right)^2 \quad (3.63.)$$

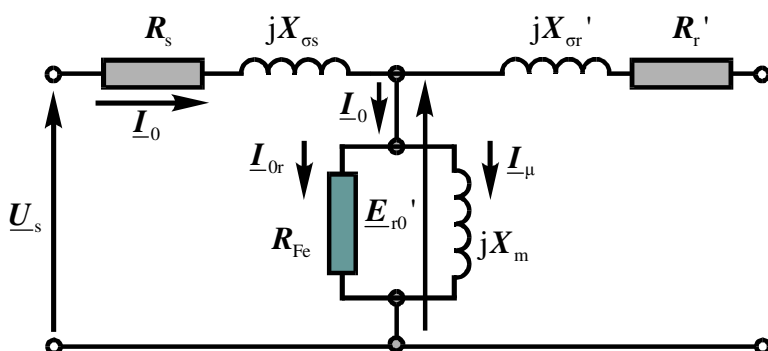
Kao i kod transformatora, X_m je glavna (međuinaktivna) reaktancija, a R_{Fe} je nadomjesni otpor za proračun gubitaka u željezu statora.

Za razliku od transformatora, u rotorskom krugu je stvarni radni otpor R_r' i nadomjesni otpor za mehaničku snagu u rotoru $R_r'(1-s)/s$ (slika 3.25.a)). Gledano sa statorske strane stroj se ponaša kao da u rotoru ima radni otpor R_r'/s (slika 3.25.b)).

Posebno treba razmotriti pogonska stanja praznog hoda i kratkog spoja asinkronog motora.

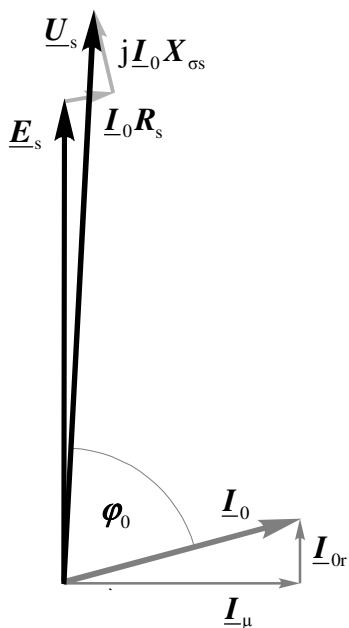
Kako je već prije napomenuto u točki 3.4.6., u praznom hodu je stroj priključen na napon napajanja, ali nije opterećen na osovini nego se slobodno vrti. Klizanje je praktično $s \approx 0$ pa otpor $\frac{R_r'}{s} \rightarrow \infty$. U stroju teče samo struja I_0 . Brzina

motora u praznom hodu je vrlo blizu sinkronoj brzini n_s . Nadomjesna shema motora u praznom hodu je prikazana na slici 3.26.



Slika 3.26. Nadomjesna shema asinkronog motora u praznom hodu

Fazorski prikaz napona i struja u praznom hodu je dan na slici 3.27.



Slika 3.27. Fazorski prikaz napona i struja u praznom hodu asinkronog motora

Struja $\underline{I}_0$ ima radnu komponentu $\underline{I}_{0r}$ (za pokrivanje gubitaka vrtložnih struja i histereze u željezu) i jalovu $\underline{I}_\mu$ (čistu struju magnetiziranja):

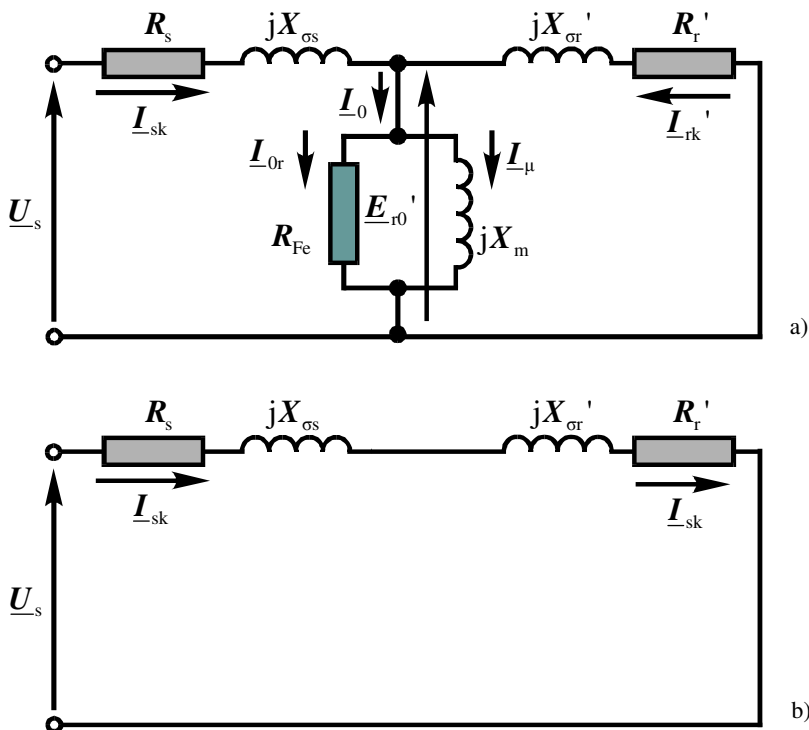
$$\underline{I}_0 = \underline{I}_{0r} + \underline{I}_\mu \quad (3.64.)$$

Fazni pomak između fazora napona $\underline{U}_s$ i elektromotorne sile $\underline{E}_s$ je u praznom hodu malen, pa je struja magnetiziranja približno:

$$\underline{I}_\mu \approx \underline{I}_0 \sin \varphi_0 \quad (3.65.)$$

U kružnom dijagramu je radna komponenta struje praznog hoda $\underline{I}_{0r}$ zanemarena. Mjerenjem struje $\underline{I}_0$ i snage praznog hoda P_0 možemo odrediti elemente X_m i R_{Fe} nadomjesne sheme (točka 3.5.2.).

Drugo važno pogonsko stanje asinkronog motora je kratki spoj. Motor je u kratkom spoju ako je priključen na napon napajanja, a rotor mu je zakočen (ne vrti se). Klizanje je jednako $s = 1$, pa je nadomjesni otpor za mehaničku snagu u rotoru $R_r'(1 - s)/s$ jednak nuli. Nadomjesna shema motora u kratkom spoju je prikazana na slici 3.28.



Slika 3.28. Nadomjesna shema asinkronog motora u kratkom spoju
a) potpuna, b) pojednostavljena.

Na slici 3.28.a) je prikazana potpuna nadomjesna shema na kojoj je struja kratkog spoja statora označena s $\underline{I}_{sk}$, a struja rotora s $\underline{I}_{rk}'$. Smjer $\underline{I}_{rk}'$ je u skladu s kružnim dijagramom na slici 3.23. Uzme li se u obzir da su rasipni induktiviteti puno manji od međuinuktiviteta (što je kod asinkronih motora uvijek ispunjeno), može se zanemariti poprečnu granu, pa se dobije pojednostavljenu nadomjesnu shemu prema slici 3.28.b). Očito je da sada vrijedi za struju kratkog spoja:

$$\underline{I}_{sk} = -\underline{I}_{rk}' \quad (3.66.)$$

Impedancija $\underline{Z}_k$ motora u kratkom spoju u tom slučaju iznosi:

$$\underline{Z}_k = (\underline{R}_s + \underline{R}_r') + j(X_{\sigma s} + X_{\sigma r}') = \underline{R}_k + jX_k \quad (3.67.)$$

Mjerenjem struje i snage kratkog spoja može se približno odrediti ostale elemente nadomjesne sheme (točka 3.5.3.).

3.4.9. Karakteristika struje

Struja rotora je funkcija klizanja prema (3.31). Nazivnik tog izraza je rotorska impedancija $\underline{Z}_r$:

$$\underline{Z}_r = \frac{\underline{R}_r}{s} + jX_{\sigma r} \quad (3.68.)$$

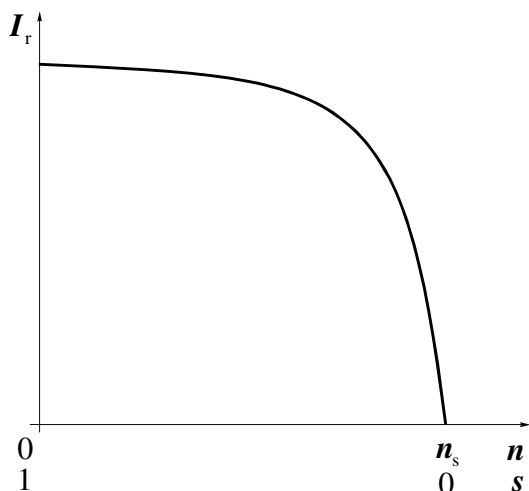
Modul ove impedancije iznosi:

$$Z_r = \sqrt{\left(\frac{R_r}{s}\right)^2 + X_{\sigma r}^2} \quad (3.69.)$$

Sada se može izraziti struju rotora $\underline{I}_r$ (apsolutnu vrijednost):

$$\underline{I}_r = \frac{\underline{E}_{r0}}{\underline{Z}_r} = \frac{\underline{E}_{r0}}{X_{\sigma r}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{R_r}{s} \cdot \frac{1}{X_{\sigma r}}\right)^2}} \quad (3.70.)$$

Ova karakteristika je prikazana na slici 3.29.



Slika 3.29.
Karakteristika struje rotora
asinkronog motora

Iznos struje je proporcionalan naponu i jako ovisi o klizanju. Pri pokretanju ($s = 1$) vrijednost struje I_r je maksimalna. Pri sinkronoj brzini ($s = 0$) nema elektromotorne sile u rotoru, pa je i struja I_r jednaka nuli. To je u skladu s osnovnim razmatranjima o asinkronom stroju.

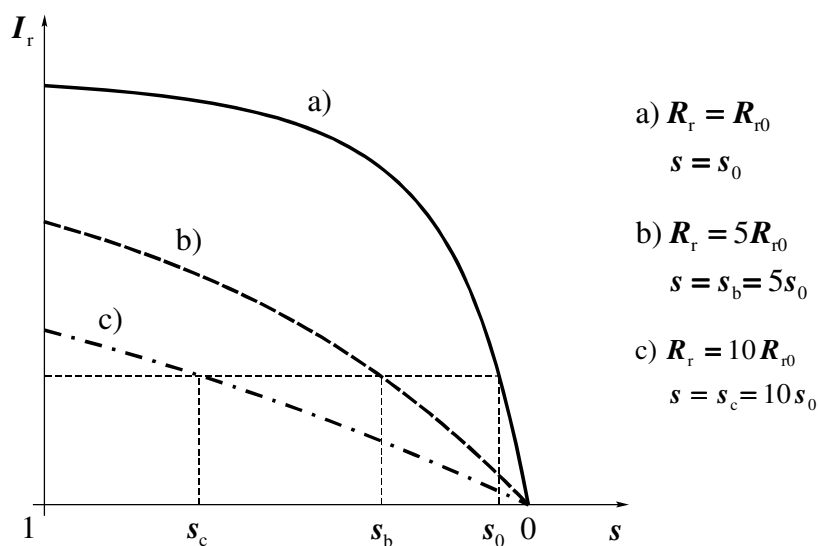
I statorka struja ima sličan oblik, samo što u sinkronizmu ima malu vrijednost struje magnetiziranja, odnosno praznog hoda.

Iz izraza za struju rotora vidimo da se ta struja neće promijeniti ako se istovremeno poveća s jednakim faktorom i radni otpor rotora i klizanje. To znači da će za istu struju (odnosno opterećenje) uz n -puta veći otpor R_r i klizanje motora porasti n -puta. Prema tome za istu struju mora biti ispunjeno:

$$\frac{R_r}{s} = \frac{R_{r0}}{s_0} \quad (3.71.)$$

Pritom je sa s_0 označeno klizanje uz radni otpor R_{r0} , a s je klizanje uz radni otpor R_r . Ako se mijenja R_r (dodavanjem vanjskog otpora ili nekako drukčije), a ne mijenja se $X_{\sigma r}$ (jer rasipanje rotora ostane isto), onda se za istu vrijednost klizanja dobije drukčiju vrijednost struje.

Ako se otpor poveća 10 puta, struja će biti jednaka kao da se smanjilo klizanje 10 puta, a nije se promijenio otpor. Slika 3.30. prikazuje utjecaj povećanja rotorskog otpora na karakteristiku struje.



Slika 3.30. Utjecaj povećanja radnog otpora u rotorskom krugu na karakteristiku struje rotora asinkronog motora

Utjecaj promjene radnog otpora u rotorskom krugu je takav da se s povećanjem tog otpora cijela karakteristika struje rasteže ulijevo. Pritom se rotorska struja kratkog spoja smanjuje. Dakle, povećanjem otpora u rotorskom krugu može se znatno smanjiti rotorsku struju. Naravno, time se znatno smanji i statorska struja, posebno potezna. To je naročito važno pri uključivanju asinkronog motora na mrežu. Naime, struja kratkog spoja motora bez dodatnog otpora u rotorskom krugu je višestruko veća od nazivne. Povećanjem radnog otpora rotora može se znatno smanjiti struju kratkog spoja, a time i strujni udarac na mrežu.

Dodavanje dodatnih otpora u rotorski krug je moguće kod kolutnih asinkronih motora. Kod kaveznih motora se sličan efekt smanjenja struje pokretanja postigne:

- posebnom izvedbom kaveza i
- prespajanjem statorskog namota iz spoja zvijezde u trokut pri pokretanju.

Oba ova utjecaja će biti obrađena kasnije.

Utjecaj promjene napona na karakteristiku struje je takav, da se u svakoj točki klizanja struja promijeni u jednakom omjeru kao i napon. To vrijedi uz zanemarenje zasićenja magnetskog kruga.

3.4.10. Moment i karakteristika momenta

Elektromagnetski moment asinkronog stroja odredi se kao moment izmjeničnog stroja, prema izrazu (2.48.). Takav izraz treba dobiti izražen pomoću napona, struje i faktora snage.

Kut opterećenja je kod asinkronog stroja uvijek određen rotorskom impedancijom prema (3.13.), odnosno s φ_r . Polni korak τ_p može se izraziti pomoću (2.44.). Volumen V stroja duljine l iznosi:

$$V = \frac{d_s^2 \pi}{4} l \quad (3.72.)$$

Nadalje može se indukciju B izraziti pomoću E_s :

$$B = \frac{\sqrt{2}}{2\pi} \cdot \frac{1}{\tau_p l_s f_s N_s k_{ws}} E_s \quad (3.73.)$$

Umjesto frekvencije f_s uvrsti se:

$$f_s = \frac{\omega_s}{2\pi} = \frac{\Omega_m p}{2\pi} \quad (3.74.)$$

Protjecanje rotora odredi se prema:

$$\Theta_r = \frac{m_r}{2} \cdot \frac{2\sqrt{2}I_r}{\pi p} N_r k_{wr} \quad (3.75.)$$

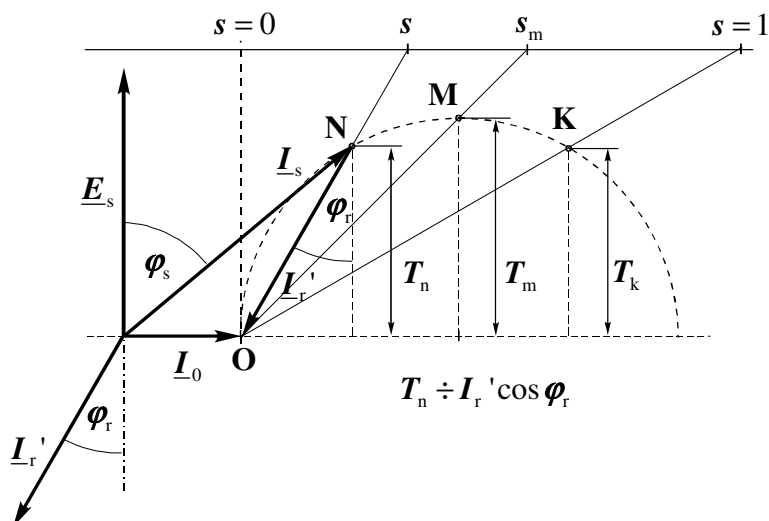
Rotorsku struju I_r izrazi se pomoću struje preračunate na stator I_r' :

$$I_r = \frac{m_s N_s k_{ws}}{m_r N_r k_{wr}} \cdot I_r' \quad (3.76.)$$

Kad se sve ovo uvrsti u izraz za moment i sredi, dobije se:

$$T_e = \frac{m_s}{\Omega_m} E_s I_r' \cos \varphi_r = k_{Ts} E_s I_r' \cos \varphi_r \quad (3.77.)$$

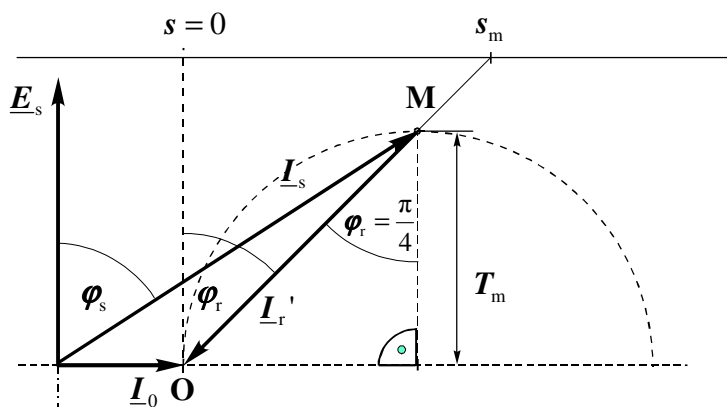
Veličine k_{Ts} i E_s su konstante, pa $I_r' \cos \varphi_r$ predstavlja u nekom mjerilu veličinu momenta. To je na kružnom dijagramu udaljenost između promatrane radne točke na kružnici (na primjer N) i apscise (slika 3.31.).



Slika 3.31. Moment u kružnom dijagramu asinkronog motora

Iz ovakvog se prikaza dobro vidi ovisnost momenta o klizanju s . Na klizanju $s = 1$ u točki **K** je potezni moment T_k (moment kratkog spoja). Smanjenjem klizanja moment raste do prekretnog momenta T_m na klizanju $s = s_m$. U toj točki (točka **M**) je moment maksimalan. S daljnjim smanjenjem klizanja moment opada i iščezava kod $s = 0$ (točka **O**). Nazivni rad motora je u području klizanja između $s = 0$ i $s = s_m$ (točka **N**). Nazivni moment motora je označen s T_n .

Izvedeni izraz za moment vrijedi uz pretpostavku zanemarenja statorske impedancije, a i kružni dijagram je crtan samo za rotorsku struju. Iz takvog prikaza proizlazi da je maksimalni moment T_m pri $\varphi_r = \pi/4$, odnosno $\tan \varphi_r = 1$. To se vidi na kružnom dijagramu na slici 3.32.



Slika 3.32. Maksimalni moment u kružnom dijagramu asinkronog motora

Kut φ_r je određen omjerom rasipne reaktancije rotora i radnog otpora prema (3.35.). Za $\tan \varphi_r = 1$ dobije se prekretno klizanje s_m :

$$\tan \varphi_r = \frac{X_{\sigma r}}{\frac{R_r}{s}} = 1 \Rightarrow s = s_m = \frac{R_r}{X_{\sigma r}} \quad (3.78.)$$

Međutim, detaljnija analiza pokazuje da se, kod uobičajenih izvedbi asinkronih strojeva, radni otpor R_s i rasipnu reaktanciju $X_{\sigma s}$ statora ne smije zanemariti, jer je njihov utjecaj znatan.

Točniji račun daje prekretno klizanje:

$$s_m^* = \frac{R_r'}{\sqrt{R_s^2 + (X_{\sigma s} + X_{\sigma r}')^2}} \quad (3.79.)$$

Moment motora iz (3.77.) može se izraziti i pomoću nepreračunatih vrijednosti rotorskih veličina. Umjesto napona E_s treba staviti:

$$\underline{E}_s = \underline{E}_{r0} \frac{N_s k_{ws}}{N_r k_{wr}} \quad (3.80.)$$

a umjesto I_r' koristiti izraz (3.49).

Nakon uvrštenja i sređenja dobije se za moment:

$$T_e = \frac{m_r}{\Omega_m} E_{r0} I_r \cos \varphi_r = k_{Tr} E_{r0} I_r \cos \varphi_r \quad (3.81.)$$

Struju I_r odredi se iz rotorskog napona i impedancije prema slici 3.17.b) i izraza (3.70.). Ona iznosi:

$$I_r = \frac{E_{r0}}{Z_r} = \frac{E_{r0}}{\sqrt{\left(\frac{R_r}{s}\right)^2 + X_{\sigma r}^2}} \quad (3.82.)$$

I $\cos \varphi_r$ odredi se pomoću rotorske impedancije:

$$\cos \varphi_r = \frac{R_r}{s} \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{R_r}{s}\right)^2 + X_{\sigma r}^2}} \quad (3.83.)$$

Nakon uvrštenja u izraz za moment dobije se:

$$T_e = k_{Tr} \frac{E_{r0}^2}{2X_{\sigma r}} \cdot \frac{2}{\frac{R_r}{sX_{\sigma r}} + \frac{sX_{\sigma r}}{R_r}} \quad (3.84.)$$

Za klizanje $s = s_m$ je moment maksimalan T_m :

$$T_m = k_{Tr} \frac{E_{r0}^2}{2X_{\sigma r}} \quad (3.85.)$$

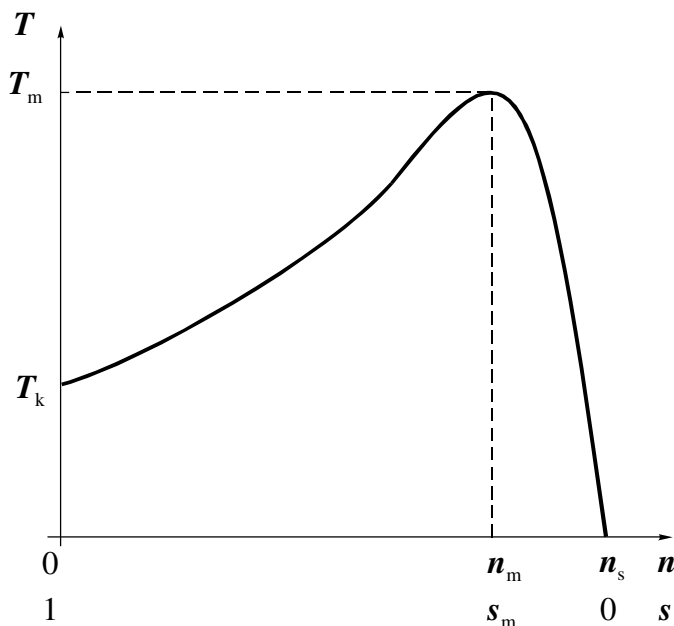
Uz zanemarenje gubitaka u stroju je elektromagnetski moment T_e jednak mehaničkom momentu na osovini T_{mec} , odnosno izlaznom momentu T , pa se može pisati:

$$T = T_e = T_{mec} \quad (3.86.)$$

Korištenjem izraza (3.78.) za prekretno klizanje s_m dobije se jednadžbu za moment asinkronog stroja (iz literature poznata kao Klossova jednadžba):

$$T = T_m \frac{2}{\frac{s_m}{s} + \frac{s}{s_m}} \quad (3.87.)$$

Na slici 3.33. je dan kvalitativni prikaz karakteristike momenta T u ovisnosti o brzini vrtnje n , $T = f(n)$, i istovremeno o klizanju s , $T = f(s)$.



Slika 3.33.
Karakteristika momenta
asinkronog motora

Za klizanje $s = 1$ (kratki spoj, motor stoji) motor ima neki moment T_k . To je potezni moment. S povećanjem brzine moment raste do maksimalnog ili prekretnog momenta T_m . Nakon toga se smanjuje prema nuli u sinkronizmu. To je već pokazano i na kružnom dijagramu.

Normalno radno područje asinkronog motora je između prekretnog klizanja $s = s_m$ i sinkronizma $s = 0$, što je također već rečeno kod kružnog dijagrama.

Prethodni izrazi za moment su izvedeni uz zanemarenje statorskog radnog otpora i rasipanja. Ako se uzme u obzir radni otpor R_s i rasipnu reaktanciju $X_{\sigma s}$ faze statora, dobije se točniji izraz za moment motora:

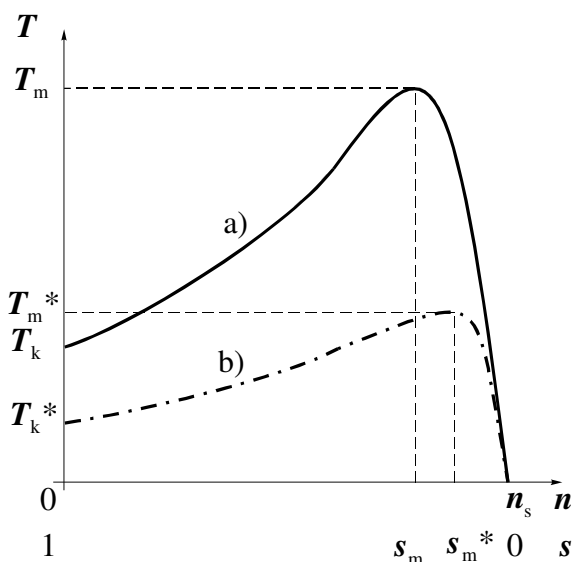
$$T^* = k_{Ts} \frac{U_s^2}{X_{\sigma s}'} \cdot \frac{s_m^*}{s_m} \cdot \frac{1}{\frac{(s_m^*)^2}{s \cdot s_m} + \frac{s \cdot s_m}{(s_m^*)^2} + \frac{s R_s}{X_{\sigma s}'} \left(\frac{s_m^*}{s_m} \right)^2} \quad (3.88.)$$

I točniji izraz za prekretni moment je kompliciraniji:

$$T_m^* = k_{Ts} \frac{U_s^2}{2X_{\sigma s}'} \cdot \frac{s_m^*}{s_m} \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_s}{X_{\sigma s}'} \left(\frac{s_m^*}{s_m} \right)^2} \quad (3.89.)$$

Ako bi se za neki realni motor nacrtalo na istom dijagramu karakteristike momenta uz zanemarenje statorskog radnog otpora i rasipanja, te bez zanemarenja, dobile bi se krivulje prema slici 3.34.

Slika 3.34.
Karakteristike momenta
asinkronog motora
a) $R_s = 0, X_{\sigma s} = 0$,
b) $R_s > 0, X_{\sigma s} > 0$.



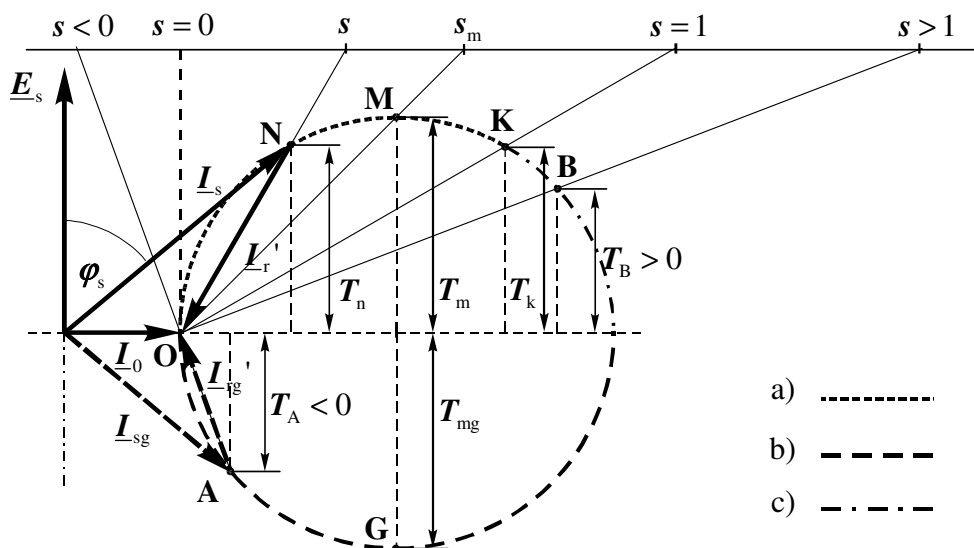
Vidi se da su moment kratkog spoja T_k i prekretni moment T_m znatno veći ako se zanemari radne otpore i rasipanja statora ($R_s = 0$ i $X_{\sigma s} = 0$) nego momenti T_k^* i T_m^* ako se te veličine uzme u obzir ($R_s > 0$ i $X_{\sigma s} > 0$). Zanemarenjem bi se u računima napravilo veliku grešku.

3.4.11. Područja rada asinkronog stroja

Dosad je većinom promatran motorski režim rada asinkronog stroja, a samo je naznačeno područje rada s obzirom na iznose klizanja. Razlikujemo:

- motorski rad (od $s = 0$ do $s = 1$),
- generatorski rad ($s < 0$) i
- protustrujno kočenje ($s > 1$).

Ponašanje stroja u svim ovim režimima se najbolje vidi pomoću kružnog dijagrama (slika 3.35.).



Slika 3.35. Potpuni kružni dijagram asinkronog motora

a) motorski rad, b) generatorski rad, c) protustrujno kočenje.

Ako se iz točke **O** pomiče prema točki **N**, stroj radi u motorskom području, sve do točke **K**. I točka prekretnog momenta **M** je u motorskom području.

Točka **K** je točka kratkog spoja. Rotor je zaustavljen. U kratkom spoju nema pretvorbe električne energije u mehaničku. Stroj uzima snagu iz mreže, ali se ona u cijelosti troši na gubitke u radnim otporima.

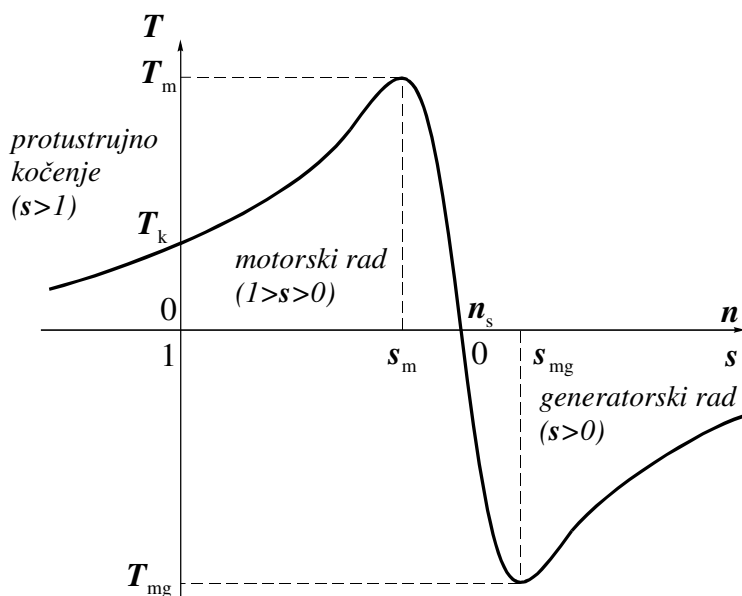
U gornjem području kružnog dijagrama je moment stroja pozitivan. Ako se stroj počne vrtjeti u suprotnu stranu, moment je i dalje pozitivan, ali djeluje suprotno vrtnji rotora. Stroj uzima električnu snagu iz mreže i mehaničku snagu na osovini. Obje se snage pretvaraju u gubitke u stroju. Stroj radi u režimu protustrujnog kočenja (točka **B** na slici 3.35.). Teorijski ga se može vanjskim momentom vrtjeti sve brže, pri čemu moment stroja pada prema nuli. Praktički je maksimalna brzina ograničena centrifugalnim silama.

Ako se pak vanjskim momentom počne vrtjeti motor iz točke praznog hoda u istom smjeru, ali brže od sinkrone brzine, moment postane negativan. Negativno je i klizanje (točka **A** na slici 3.35.). Stroj radi kao generator (statorska i rotorska struja su označene s $\underline{I}_s$ i $\underline{I}_g$). Stroj daje radnu snagu u mrežu, ali i dalje uzima jalovu snagu iz mreže za uspostavu magnetskog polja (ponaša se kao prigušnica). Takvom generatoru ne može se regulirati jalovu energiju, kako se to moglo promjenom uzbudne struje kod sinkronih strojeva.

Daljnijim povećanjem brzine vrtnje negativni moment raste do prekretnog momenta u generatorskom radu T_{mg} (točka **G** na slici 3.35.) i nakon toga opada.

Stroj može raditi kao motor ili generator, pri čemu se sam prilagođava teretu, i to promjenom brzine vrtnje. Ne treba zaboraviti da mu u generatorskom radu i dalje treba osigurati jalovu energiju iz mreže (ili iz kondenzatora).

Karakteristika momenta u cijelom području rada je prikazana na slici 3.36.



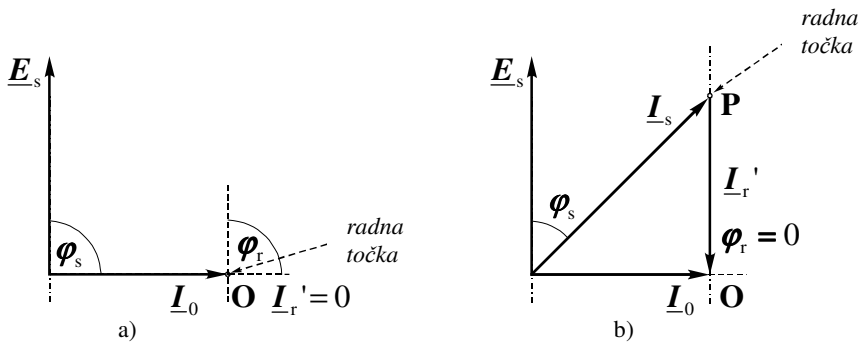
Slika 3.36. Karakteristika momenta asinkronog motora u cijelom području rada

3.4.12. Utjecaj rotorske impedancije na moment

Pri analizi sinkronog stroja mogli se bez velike greške zanemariti i radni otpor i rasipnu reaktanciju sekundara (statora). Međutim, kod asinkronih motora takav idealni sekundar ne bi funkcionirao. To se može vidjeti iz kružnog dijagrama.

Kod rotora bez radnog otpora, $R_r = 0$, kut φ_r bi iznosio 90° . Kružni dijagram bi degenirao u kružnicu promjera 0 (tj. točku) prema slici 3.37.a). Radna točka bi bila u točki **O**. Kad bi se zaista napravilo rotorski namot od supravodljivog materijala ($R_r = 0$), magnetsko polje statora ne bi uopće moglo prodrijeti u rotor. U rotorskom namotu se ne bi inducirala elektromotorna sila, ne bi bilo rotorske struje, niti razvijenog momenta:

$$T \div I_r' \cos \varphi_r = 0 \quad (3.90.)$$



Slika 3.37. Kružni dijagrami asinkronog motora bez radnog otpora i rasipne reaktancije rotora
a) bez radnog otpora u rotorskom krugu,
b) bez rasipne rotorske reaktancije.

Nasuprot tome rotor bez rasipne reaktancije, $X_{\sigma r} = 0$, bi funkcionirao. Kružni dijagram bi degenirirao u kružnicu beskonačnog promjera, kao na slici 3.37.b). Struja rotora bi bila određena iznosom R_r/s , razvijeni moment bi bio veći od nule:

$$\left. \begin{aligned} \cos \varphi_r &= 1 \\ T \div I_r' \cos \varphi_r &> 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.91.)$$

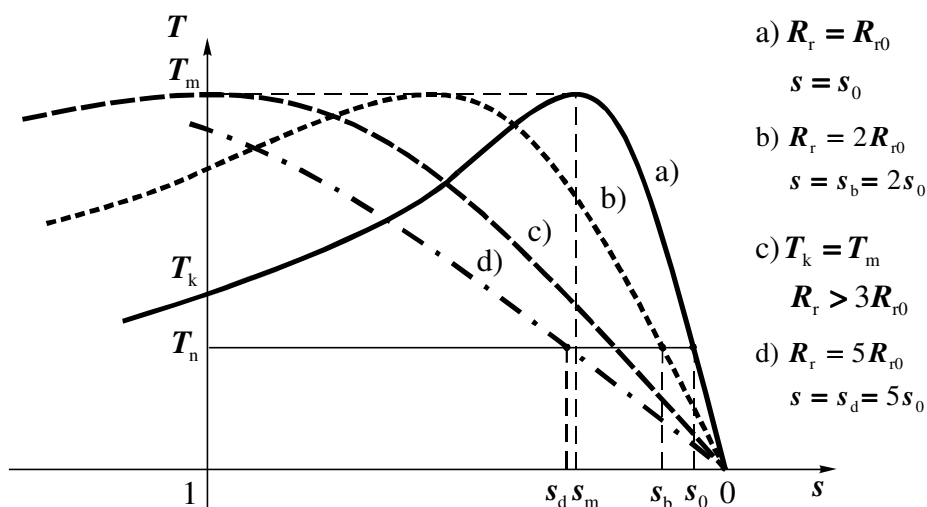
Međutim, takav se motor ne može realizirati jer nije moguće izvesti namot bez rasipne reaktancije. Prema tome može se zaključiti da asinkroni motor bez radnog otpora u rotoru ne bi mogao razviti moment. Iako rotorski radni otpori i rasipanja uzrokuju protunapone i gubitke, pa su stoga nepoželjni, oni moraju

postojati. Jasno je da te veličine moramo uzeti u obzir pri proračunima karakteristika asinkronih strojeva.

Prema jednadžbi (3.84.) moment motora će ostati isti ako je isti omjer R_r/s . Uzme li se u obzir izraz (3.86.), može se pisati:

$$T = k_{Tr} \frac{E_{r0}^2}{X_{\sigma r}} \cdot \frac{1}{\left(\frac{R_r}{s X_{\sigma r}} + \frac{s X_{\sigma r}}{R_r} \right)} \quad (3.92.)$$

To znači da će n -puta veći otpor u rotorskom krugu dati isti moment kod n -puta većeg klizanja. To je u karakteristici momenta ekvivalentno rastezanju grafa uzduž apscisne osi (slika 3.38.).



Slika 3.38. Utjecaj povećanja otpora u rotorskom krugu na karakteristiku momenta asinkronog motora

Na slici 3.38. vidi se da se s povećanjem otpora u rotorskom krugu 5 puta u odnosu na radni otpor namota R_{r0} za isti moment i klizanje poveća 5 puta. Pritom se iznos maksimalnog momenta ne mijenja.

Za isti moment motora vrijedi odnos:

$$\frac{R_r}{R_{r0}} = \frac{s}{s_0} \quad (3.93.)$$

Obično je poznato kojom se brzinom treba vrtjeti motor uz zadani teret, pa je time zadano i klizanje s . Iz ove se relacije odredi potreban otpor u rotorskom krugu:

$$R_r = \frac{s}{s_0} R_{r0} \quad (3.94.)$$

U rotorski krug treba tada dodati otpor:

$$R_{ad} = R_r - R_{r0} \quad (3.95.)$$

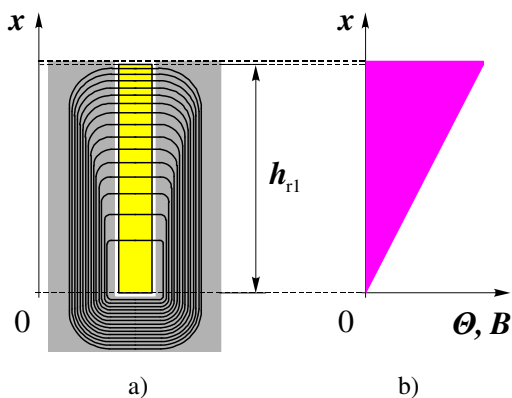
S povećanjem rotorskog otpora se povećava i potezni moment motora. Odgovarajućim povećanjem otpora u rotorskom krugu može se maksimalni moment dobiti i u kratkom spoju (slika 3.38.c)).

To je jednostavno izvedivo kod klizno-kolutnih motora (slika 3.4.). U tom smislu ovakva izvedba ima prednost pred kaveznim motorom. Dodavanjem vanjskog otpora pri pokretanju klizno-kolutnih motora se:

- povećava potezni moment i
- smanjuje potezna struja.

Sličan efekt se kod kaveznih motora postiže izborom oblika presjeka štapa kaveznog namota, pri čemu tehnologija izrade namota ostaje ista. Pojava koja se pritom koristi je potiskivanje struje ili skin-efekt.

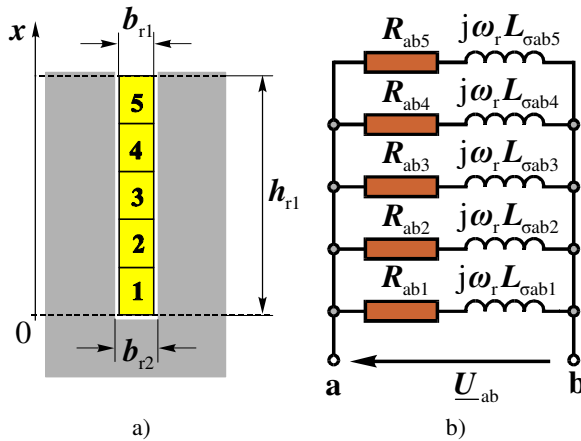
Razmotrimo duboki utor i u njemu štap visine h_{r1} prema slici 3.39.a). Rasipno magnetsko polje zatvara se poprečno kroz utor. Specifični magnetski otpor željeza je višestruko (više stotina puta) manji od magnetskog otpora zraka. Ako vodičem teče istosmjerna struja, raspodjelu struje u štapi određuje isključivo električna specifična vodljivost štapa. Ona je konstantna po cijelom presjeku štapa, te je i gustoća struje po presjeku štapa konstantna. Uzbuda linearno raste prema otvoru utora, pa i poprečna gustoća magnetskog polja u utoru praktički linearno raste (slika 3.39.b)).



Slika 3.39.

Magnetsko polje istosmjerne struje u štapi u dubokom utoru
a) raspored silnica,
b) protjecanje i magnetska indukcija.

Potpuno je drukčija situacija ako štapom teče izmjenična struja. Da bi se lakše razumjelo fizikalnu pojavu u tom slučaju, treba zamisliti da je štap po visini utora razdijeljen na više dionih vodiča jednake visine, recimo da ih je za potrebe ovog razmatranja 5 (slika 3.40.a).



Slika 3.40.

Podjela štapa u dubokom utoru na 5 dionih vodiča
a) presjek štapa,
b) nadomjesna shema štapa u dubokom utoru.

Svi dioni vodiči su jednake širine b_{r1} u utoru širine b_{r2} . Oni su svi paralelno spojeni i nisu međusobno izolirani (iako to za ovo naše razmatranje nema nikakvog utjecaja). Da bi se odredilo struju kroz pojedine dione vodiče, treba uzeti u obzir ukupnu impedanciju pojedinog dionog vodiča, koja se sastoji od radnog otpora i reaktancije zbog rasipnog magnetskog toka. Napon $\underline{U}_{ab}$ je na svim dionim vodičima jednak, jer ga inducira glavni magnetski tok, a svaki od dionih vodiča ulančuje isti glavni magnetski tok. Raspodjelu struje u štapu može se analizirati prema električnoj nadomjesnoj shemi na slici 3.40.b).

Radni otpori R_{ab1} – R_{ab5} dionih vodiča 1–5 su jednaki. Stvarne rasipne reaktancije $X_{\sigma ab1}^*$ – $X_{\sigma ab5}^*$ dionih vodiča 1–5 se znatno razlikuju, jer ovise o rasipnim induktivitetima pojedinih dionih vodiča (analogno ukupnoj rasipnoj reaktanciji $X_{\sigma r}^*$ prema (3.27.)):

$$\left. \begin{array}{l} X_{\sigma ab1}^* = \omega_r L_{\sigma ab1} \\ \vdots \\ X_{\sigma ab5}^* = \omega_r L_{\sigma ab5} \end{array} \right\} \quad (3.96.)$$

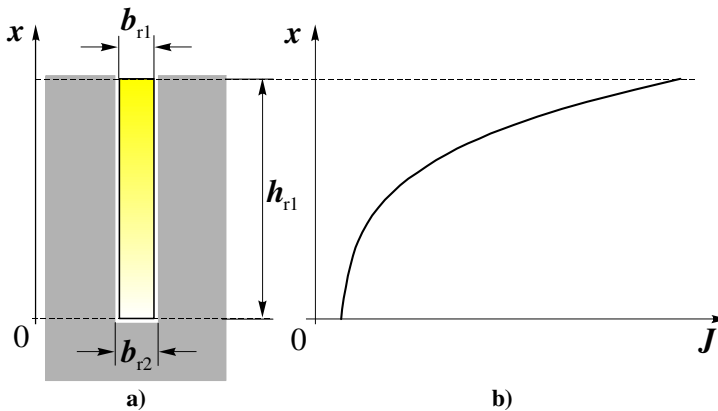
Rasipni induktivitet dionog vodiča 1 (u dnu utora) je veći od rasipnog induktiviteta dionog vodiča 2 itd., pa se i pripadne reaktancije isto tako razlikuju. Slijedi:

$$X_{\sigma ab1}^* > X_{\sigma ab2}^* \dots > X_{\sigma ab5}^* \quad (3.97.)$$

Budući da rasipna reaktancija predstavlja znatan dio ukupne impedancije dionog vodiča, struja u dionom vodiču na dnu utora je znatno manja od struje u dionom vodiču pri otvoru utora. Dolazi do **potiskivanja struje prema otvoru utora**. Potiskivanje je to veće, što je frekvencija induciranog napona veća, a ona je direktno proporcionalna klizanju s . Ono će također biti to veće što je veći omjer između visine i širine štapa.

Razmatrajući ukupnu impedanciju štapa (svih dionih vodiča vezanih paralelno), to jest omjer napona i struje između točaka **a** i **b** (slika 3.40.b)), može se zaključiti da porast frekvencije uzrokuje porast radnog otpora i smanjenje rasipnog induktiviteta. To je posljedica veće gustoće struje pri otvoru utora u odnosu na gustoću struje na dnu utora.

Naravno, štap se ne sastoji od pet dionih vodiča, nego od beskonačno mnogo infinitezimalno tankih dionih vodiča. Otpori i rasipni induktiviteti tih “dionih vodiča” kontinuirano se mijenjaju u ovisnosti o položaju po dubini utora. Tako detaljnija analiza pokazuje da se raspodjela gustoće struje J po dubini utora h_{r1} mijenja prema slici 3.41. Točan karakter te krivulje ovisi o dimenzijama štapa i utora i o frekvenciji ω .



Slika 3.41. Raspodjela gustoće struje štapa u dubokom utoru rotora

Efektivni otpor $R_{ab\sim}$ i rasipni induktivitet $L_{\sigma ab\sim}$ štapa s potiskivanjem struje može se izračunati prema [5]:

$$R_{ab\sim} = R_{ab0} \xi \frac{\text{sh} 2\xi + \sin 2\xi}{\text{ch} 2\xi - \cos 2\xi} \quad (3.98.)$$

$$L_{\sigma ab\sim} = L_{\sigma ab0} \frac{3}{2\xi} \cdot \frac{\text{sh} 2\xi - \sin 2\xi}{\text{ch} 2\xi - \cos 2\xi} \quad (3.99.)$$

gdje je:

$$\xi = h_{r1} \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \omega_r \mu_0 \kappa \cdot \frac{b_{r1}}{b_{r2}}} \quad (3.100.)$$

U prethodnim izrazima su korištene sljedeće oznake:

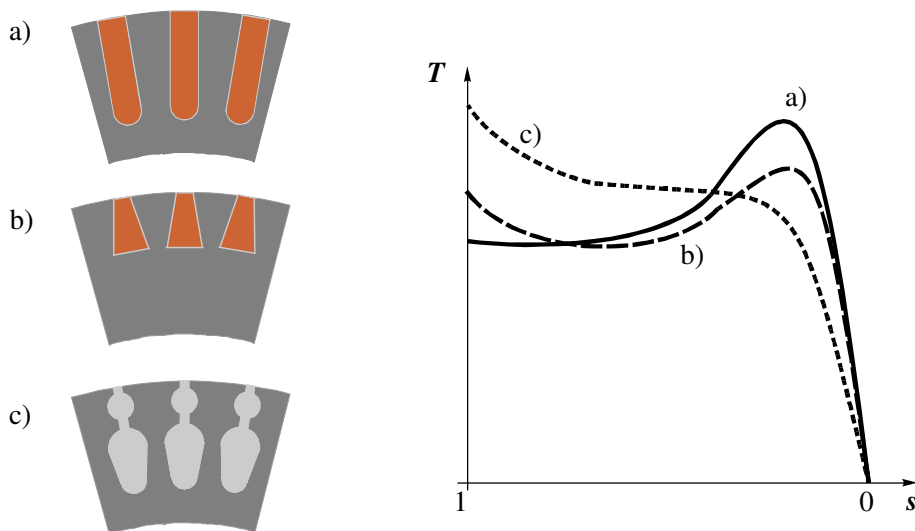
R_{ab0} – radni otpor štapa bez potiskivanja struje,

$L_{\sigma ab0}$ – rasipni induktivitet štapa bez potiskivanja struje,

μ_0 – permeabilnost zraka,

κ – električna vodljivost materijala štapa.

Kao što je već spomenuto, s porastom frekvencije raste radni otpor štapa, a induktivitet se smanjuje. Budući da rotorska struja, moment i statorka struja motora jako ovise o ukupnoj impedanciji rotora, a ona ovisi o klizanju, karakteristike momenta i struje će se kod motora s dubokim utorima rotora znatno razlikovati od karakteristika motora kod kojih potiskivanje struje nije jako izraženo. Izborom oblika utora može se postići čak i takva karakteristika, kod koje imamo maksimalni moment upravo u kratkom spoju. Sličan efekt se može postići izradom dva (ili čak tri) odvojena kavezna namota. Neke od izvedbi oblika utora i pripadne karakteristike momenta tzv. motora s potiskivanjem struje prikazani su na slici 3.42.



Slika 3.42. Izvedbe rotorskih utora i odgovarajuće karakteristike momenta

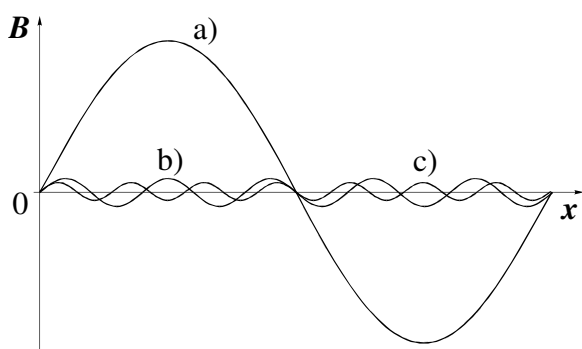
Iz prethodnog razmatranja također proizlazi da kružni dijagram struja ne vrijedi za strojeve s potiskivanjem struje i višekavezne strojeve, jer je on izveden uz

pretpostavku konstantnog otpora i rasipnog induktiviteta rotora, a to kod ovih strojeva nije slučaj.

Ovaj efekt, potiskivanje struje, je to veći što je frekvencija veća. Znamo da frekvencija f_r rotorske struje ovisi o klizanju prema (3.20.). To znači da će taj efekt biti jako izražen u kratkom spoju, na primjer pri pokretanju. Uobičajena radna točka asinkronog stroja je pri malim klizanjima, pa je tada potiskivanje struje malo.

3.4.13. Utjecaj viših harmonika

Zbog nejednolikog zračnog rasporeda i nejednolike rasporedene uzbude se kod asinkronog motora pojavljuju viši prostorni harmonički članovi indukcije u zračnom rasporu. Ovi harmonici mogu biti jako izraženi. Pri tome ν -ti harmonički član ima ν puta više polova od osnovnog harmonika, kako se to vidi na slici 3.43. za peti i sedmi harmonik ($\nu = 5$, $\nu = 7$). To znači da će se polje ν -tog harmonika okretati ν puta sporije.



Slika 3.43.

Prostorni harmonici magnetske indukcije
a) osnovni harmonik,
b) peti harmonik,
c) sedmi harmonik.

Samo će neki harmonici stvarati okretno polje. Općenito su to harmonici reda:

$$\nu = 1 \pm 2mk; \quad k = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (3.101.)$$

Za trofazni statorski namot ($m = m_s = 3$) su to harmonici čiji red nije djeljiv s 3. Budući da zbog simetričnosti imamo samo neparne harmonike, teškoće mogu stvarati peti, sedmi, jedanaesti itd. harmonik.

Pri tome peti, jedanaesti, sedamnaesti itd. harmonik stvaraju rotacijsko magnetsko polje suprotnog smjera od magnetskog polja osnovnog harmonika. To su inverzni harmonici.

Nasuprot tome sedmi, trinaesti, devetnaesti itd. harmonik stvaraju polje istog smjera kao osnovni harmonik. To su direktni harmonici.

Viši harmonici indukcije uzrokuju više harmonike elektromotorne sile i struje u asinkronom motoru. Posljedice toga su višestruke. Pojavljuju se:

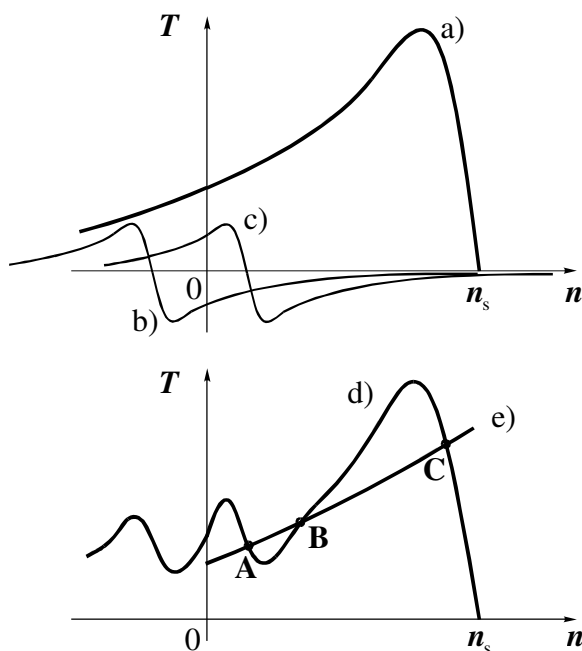
- asinkroni momenti,
- sinkroni momenti,
- vibracije i buka te
- dodatni gubici.

Asinkroni momenti su dodatni momenti uslijed okretnog magnetskog polja ν -tog reda, a javljaju se u krivulji momenta uz moment osnovnog harmonika. ν -ti harmonik ima na moment stroja isti utjecaj kao da smo na osovinu montirali još jedan motor, manje snage, s νp pari polova.

Momentna karakteristika motora s izraženim petim i sedmim harmonikom će izgledati kao na slici 3.44.

Slika 3.44.

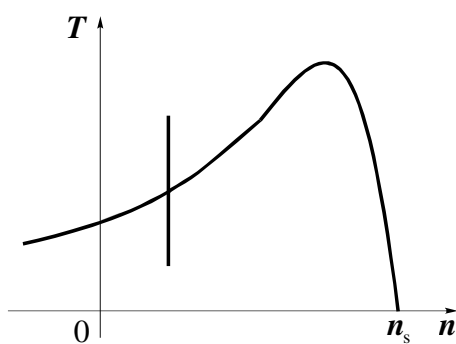
Karakteristika momenta asinkronog motora s izraženim petim i sedmim harmonikom polja
 a) osnovni harmonik,
 b) peti harmonik,
 c) sedmi harmonik,
 d) rezultatna karakteristika motora,
 e) karakteristika tereta.



Teškoće pri zaletu mogu nastati ako karakteristika tereta ima takav oblik da siječe karakteristiku momenta motora u stabilnoj radnoj točki na sedlu od višeg harmonika. Kad bilo kakva smetnja naruši jednakost momenta motora i momenta tereta, pa se brzina vrtnje promijeni, stabilni će se pogon nakon nestanka smetnje vratiti u prvobitno stanje (u brzinu vrtnje prije smetnje). Uvjet

stabilnosti je da derivacija karakteristike momenta u radnoj točki bude manja od derivacije karakteristike momenta tereta (vidi i sliku 3.56.). Na slici 3.44.d) su točke **A** i **C** stabilne, a točka **B** je nestabilna.

Sinkroni momenti se također pojavljuju kao posljedica viših harmonika magnetskog polja. Oni djeluju samo pri sinkronoj brzini harmonika. Na karakteristici momenta se sinkroni momenti pojavljuju kao nagli vertikalni skokovi u momentu, i to kao povećanje i smanjenje momenta (slika 3.45.).



Slika 3.45. Sinkroni moment u karakteristici momenta asinkronog motora

Ako je sinkroni moment jako izražen, može se dogoditi da motor pri zaletu “zapne” na tom sinkronom momentu. Međutim, ako je zalet dovoljno brz, onda će motor možda i “preskočiti” tu točku. Motor može prijeći preko sinkrone brzine nekog harmonika tako da je “izvan koraka”, pa se sinkroni moment neće niti pojaviti.

Sinkroni moment se može pojaviti i u točki kratkog spoja. Ako motor miruje i ako je moment tereta veći od resultantnog momenta motora, tada neće moći ni krenuti.

Uz asinkrone i sinkrone momente viši harmonici izazivaju još neke neželjene pojave.

Vibracije se mogu pojaviti u slučaju neizbalansiranih sila na rotor. To je slučaj ako imamo rotacijska polja bliskih frekvencija, od kojih se jedno vrti na jednu, a drugo na drugu stranu. Kao posljedica vibracija se pojavljuje **buka**. Zanimljivo je da se frekvencijskom analizom buke može ustanoviti red harmonika koji je izaziva.

Viši harmonici izazivaju i **dodatne gubitke**, koji nastaju i u željezu i u namotima. To je lako razumjeti. Viši harmonici magnetskog polja stvaraju gubitke vrtložnih struja i gubitke histereze u željezu. Struje viših harmonika u

namotima stvaraju također gubitke. Zbog dodatnih gubitaka se stroj i dodatno zagrijava.

Dakle, viši harmonici su nepoželjni i nastojimo ih eliminirati. To se pri projektiranju stroja postiže pažljivim izborom broja utora statora i rotora, kao i spoja i rasporeda namota.

3.5. ISPITIVANJA I KARAKTERISTIKE

3.5.1. Ispitivanja tijekom proizvodnje

I kod asinkronih strojeva se tijekom proizvodnje provode razne provjere i ispitivanja. Ovdje se često radi o masovnoj proizvodnji, pa su ispitivanja tako organizirana da praktički predstavljaju dio tehnološkog procesa proizvodnje. Kod velikih strojeva, koji se proizvode komadno, u ispitnoj stanici se detaljno ispituje svaki proizvedeni stroj.

Pri masovnoj proizvodnji se detaljno ispituje samo određeni postotak, na primjer svaki deseti motor. Kod svakog gotovog stroja se ispituje:

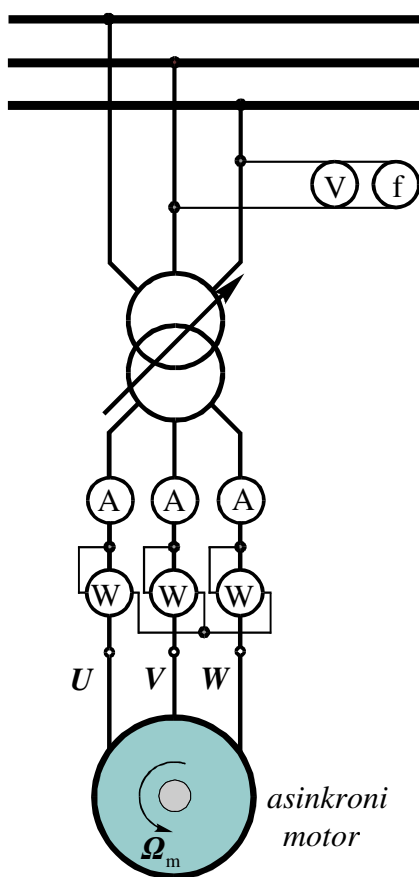
- ispravnost spoja namota,
- ispravnost izolacije namota i
- ispravnost mehaničkog rada.

Ispravnost izolacije namota provjerava se ispitnim naponom između namota i mase. Visina ispitnog napona i postupak ispitivanja su određeni propisima.

Ispravnost mehaničkog rada provjerava se tako da se stroj vrti u praznom hodu neko vrijeme. Stroj ne smije bučiti, niti se pregrijavati i tome slično.

3.5.2. Ispitivanje u praznom hodu

Pokus praznog hoda je relativno lako izvesti jer pritom ne teretimo stroj mehanički. Zato je to pokus koji se u pravilu provodi nakon kontrole namota i naponskih pokusa. Uz promjenu napona na motoru U mjerimo struju I_0 i snagu P_0 koju motor uzima iz mreže. Principijelna shema mjerenja je prikazana na slici 3.46.



Slika 3.46. Shema mjerenja karakteristika praznog hoda trofaznog asinkronog motora

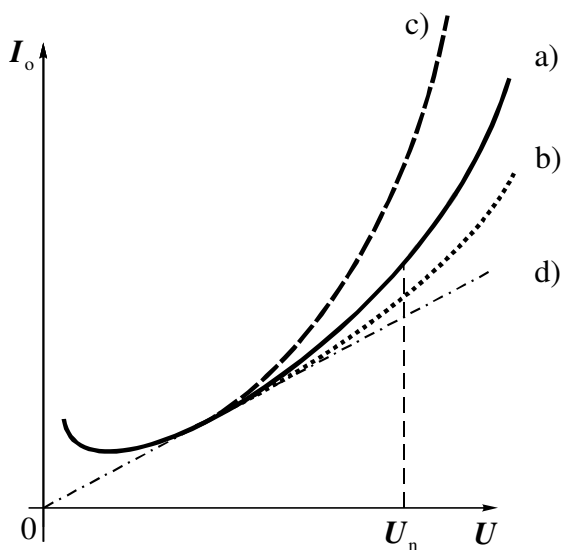
Jedna od mjerenih karakteristika je karakteristika zasićenja. **Karakteristika zasićenja** je funkcijska ovisnost struje praznog hoda I_0 o narinutom naponu U :

$$I_0 = f(U) \quad (3.102.)$$

Ona ima oblik kao na slici 3.47. Gornji dio karakteristike savinut je poput parabole. Kad ne bi bilo zasićenja magnetskog kruga, taj bi dio bio pravac kako je to naznačeno na slici 3.47.d). Pravac d) određuje struju magnetiziranja zračnog rasporeda na sinkronoj brzini vrtnje.

Slika 3.47.

Karakteristika zasićenja
asinkronog motora
a) uobičajeno zasićenje,
b) manje zasićenje,
c) veće zasićenje,
d) bez zasićenja na sinkronoj brzini.



Donji dio krivulje svinut je zbog porasta radne komponente struje praznog hoda. Naime, iako se ne tereti motor vanjskim momentom, motor mora razviti moment za pokrivanje gubitaka trenja i ventilacije. Gubici trenja i ventilacije P_{dmec} su praktički konstantni, jer se u praznom hodu brzina vrtnje tek neznatno mijenja s naponom. Stoga vrijedi:

$$P_{dmec} = \sqrt{3} U I_{dmec} = konst. \quad (3.103.)$$

Kako se smanjuje napon U , struja I_{dmec} za pokrivanje ovih gubitaka mora rasti. Uz to se povećava i klizanje, pa to uzrokuje i povećanje gubitaka u rotoru.

Karakteristika faktora snage praznog hoda je funkcijska ovisnost $\cos \varphi_0$ o narinutom naponu U :

$$\cos \varphi_0 = f(U) \quad (3.104.)$$

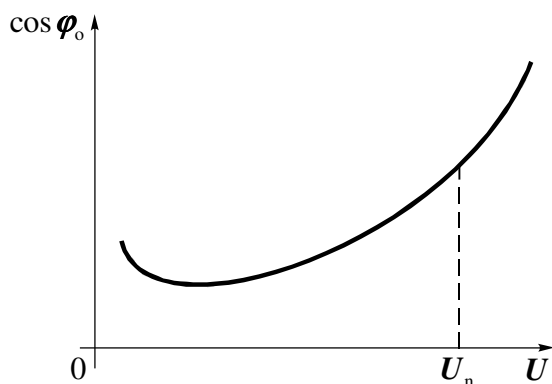
Faktor snage $\cos \varphi_0$ se odredi za svaku mjerenu točku pomoću izmjerenih vrijednosti napona U , struje I_0 i snage P_0 :

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} U I_0} \quad (3.105.)$$

Karakterističan je oblik prikazan na slici 3.48. Faktor snage je u praznom hodu vrlo nizak. Pri sniženju napona $\cos \varphi_0$ raste zbog povećanja radne komponente struje (P_{dmec} , P_{dr}). Pri povišenju napona raste zbog povećanja gubitaka u željezu.

Slika 3.48.

Faktor snage u praznom hodu u ovisnosti o naponu

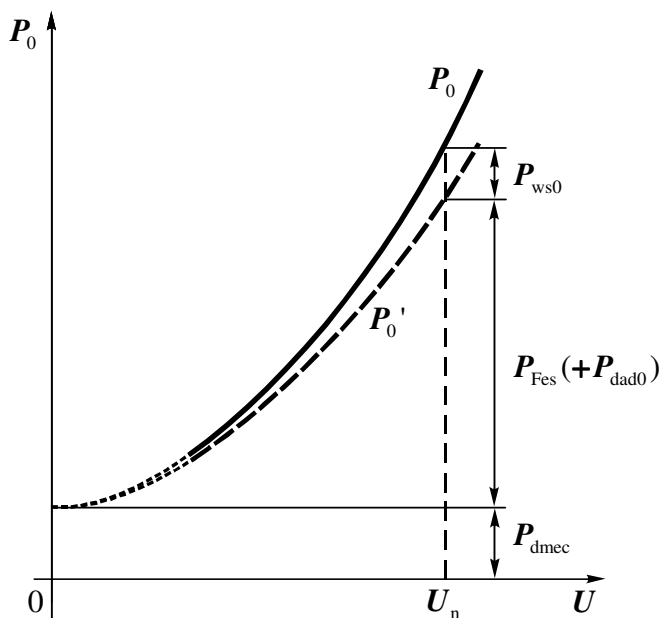


U praznom hodu se mjeri i snaga P_0 koju stroj uzima iz mreže za pokrivanje gubitaka praznog hoda:

$$P_0 = f(U) \quad (3.106.)$$

Mjereni **gubici u praznom hodu** u ovisnosti o naponu imaju približno kvadratičnu ovisnost prema slici 3.49. Ovi gubici se dijele na:

- gubitke u statorskom namotu u praznom hodu P_{ws0} ,
- gubitke u željezu statora P_{Fes} (zajedno s dodatnim gubicima praznog hoda P_{dad0}) i
- gubitke trenja i ventilacije P_{dmec} .

**Slika 3.49.**

Gubici u praznom hodu u ovisnosti o naponu

Gubitke u statorskom namotu P_{ws0} izračuna se iz mjerene struje praznog hoda I_0 i izmjerenog otpora stezaljki namota statora R_{Ls} . Za trofazni motor P_{ws0} iznose:

$$P_{ws0} = 1,5 R_{Ls} I_0^2 \quad (3.107.)$$

Od izmjerenih gubitaka u praznom hodu P_0 oduzme se gubitke u statorskom namotu P_{ws0} . Preostanu “**uži gubici praznog hoda**” P_0' :

$$P_0' = P_0 - P_{ws0} \quad (3.108.)$$

Ovi gubici se sastoje iz gubitaka u željezu P_{Fes} , dodatnih gubitaka u praznom hodu P_{dad0} i gubitaka trenja i ventilacije P_{dmec} .

Budući da je brzina praktički konstantna, **gubici trenja i ventilacije** su praktički konstantni. Ove gubitke dobije se ekstrapolacijom krivulje ukupnih gubitaka do točke $U = 0$, prema slici 3.49.

Obično se **gubici u željezu i dodatni gubici u praznom hodu** zajedno označuju s P_{Fe} :

$$P_{Fe} = P_{Fes} + P_{dad0} \quad (3.109.)$$

pa oni iznose:

$$P_{Fe} = P_0' - P_{dmec} \quad (3.110.)$$

Iz pokusa praznog hoda može se odrediti nadomjesni otpor za gubike u željezu R_{Fe} i glavnu (međuinaktivnu) reaktanciju X_m . Polazi se od fazorskog dijagrama za prazni hod prema slici 3.27. Vidi se da elektromotorna sila $\underline{E}_s$ iznosi:

$$\underline{E}_s = \underline{U}_s - \underline{I}_0 (R_s + jX_{\sigma s}) \quad (3.111.)$$

U ovom izrazu može se zanemariti protunapon na radnom otporu statora jer je φ_0 vrlo velik ($\approx 90^\circ$), slika 3.27. Uz tu pretpostavku može se uzeti da se elektromotorna sila $\underline{E}_s$ razlikuje od narinutog napona samo za iznos protunapona na rasipnoj reaktanciji statorskog namota:

$$\underline{E}_s \approx \underline{U}_s - \underline{I}_0 X_{\sigma s} \quad (3.112.)$$

Prema nadomjesnoj shemi za prazni hod na slici 3.26. jasno je da međuinaktivna reaktancija iznosi:

$$X_m = \frac{E_s}{I_\mu} \quad (3.113.)$$

Struju magnetiziranja I_μ odredi se prema (3.65.), koristeći pritom i izraz (3.105.) za izračun faznog pomaka φ_0 .

S poznatim iznosom gubitaka u željezu P_{Fe} odredi se R_{Fe} prema:

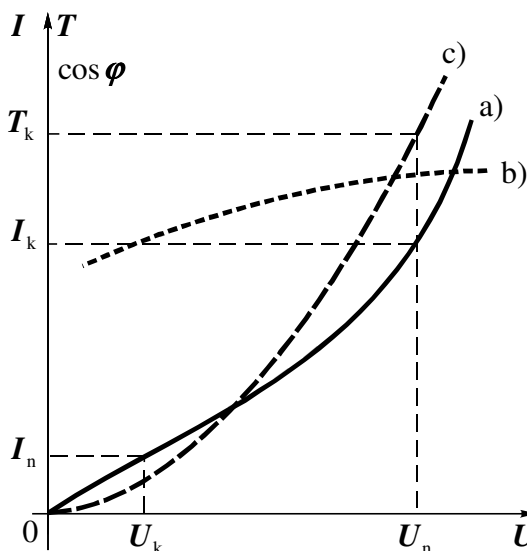
$$R_{Fe} = m_s \frac{E_s^2}{P_{Fe}} \quad (3.114.)$$

3.5.3. Ispitivanje u kratkom spoju

Ako se rotor asinkronog motora zakoči, a stator spoji na izvor napona, taj slučaj je s elektroenergetskog stanovišta ekvivalentan kratkom spoju transformatora. Pokus se stoga i naziva pokusom kratkog spoja. Uz mjerenje ulazne električne snage P_k , napona U i struje I_k u pokusu kratkog spoja mjeri se još i moment na osovini T_k . To se može izvesti mehaničkom kočnicom uz mjerenje sile ili dinamo-vagom. Kao i kod praznog hoda snima se sve veličine uz različite iznose napona na stezaljkama. Električki dio sheme mjerenja za pokus kratkog spoja asinkronog motora je jednak kao i za mjerenje praznog hoda (slika 3.46.), uz napomenu da se rotor ne vrti, pa je $\Omega_m = 0$.

Budući da struje mogu biti jako velike, veliki su i gubici, pa se stroj brzo zagrijava. Zbog toga se mora pri analizi mjerenja posebno obratiti pozornost na temperaturu namota. Mjerenje se najčešće provodi snižavanjem napona od maksimalne vrijednosti prema nuli, kako bi se smanjili problemi sa zagrijavanjem.

Mjerene karakteristike kratkog spoja su kvalitativno prikazane na slici 3.50.

**Slika 3.50.**

Mjerene karakteristike kratkog spoja

a) struja,

b) faktor snage,

c) moment.

Jedna od mjerenih karakteristika je karakteristika struje. **Karakteristika struje kratkog spoja** je funkcijska ovisnost struje I_k o narinutom naponu U :

$$I_k = f(U) \quad (3.115.)$$

Ona ima oblik kao na slici 3.50.a). Budući da je magnetsko polje malo, struja kratkog spoja bi trebala ovisiti linearno o naponu. To, međutim, ipak nije tako. Naime, za veće vrijednosti napona zbog velikih struja dolazi do zasićenja rasipnih magnetskih puteva, pa tada struja počne naglo rasti s povećanjem napona.

Karakteristika faktora snage kratkog spoja je funkcijska ovisnost $\cos \varphi_k$ o narinutom naponu U :

$$\cos \varphi_k = f(U) \quad (3.116.)$$

Faktor snage $\cos \varphi_k$ se odredi za svaku mjerenu točku pomoću izmjerenih vrijednosti napona U , struje I_k i snage P_k :

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{\sqrt{3} U I_k} \quad (3.117.)$$

Karakteristika faktora snage kratkog spoja bi bila funkcija neovisna o naponu (dakle konstanta) kad bi radni otpori i reaktancije kratkog spoja bili konstantni. To, naravno, nije ispunjeno, pa ona ima oblik kao na slici 3.50.b).

Karakteristika poteznog momenta je funkcijska ovisnost T_k o narinutom naponu U :

$$T_k = f(U) \quad (3.118.)$$

Moment je približno proporcionalan kvadratu napona (slika 3.50.c)). Ako se moment ne mjeri direktno, može ga se izračunati pomoću snage koja prelazi zračni raspor $P_{\delta k}$ i mehaničke kutne brzine okretnog polja koja je jednaka sinkronoj Ω_{ms} :

$$T_k = \frac{P_{\delta k}}{\Omega_{ms}} = \frac{30}{n_s \pi} P_{\delta k} \quad (3.119.)$$

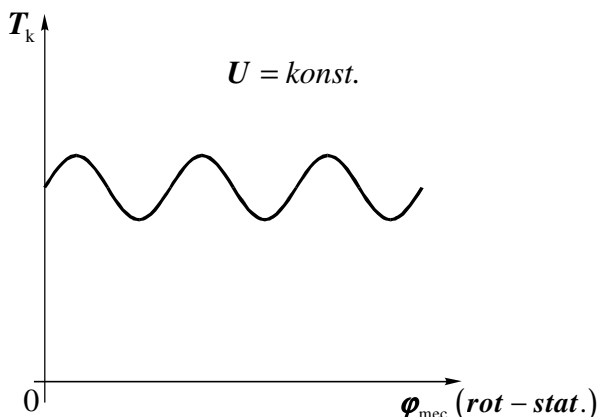
Snagu $P_{\delta k}$ treba odrediti za svaku mjerenu točku pomoću izmjerenih vrijednosti napona U , struje I_k , snage P_k i izmjerenog otpora stezaljki namota statora R_{Ls} . Prema pojednostavljenoj nadomjesnoj shemi za kratki spoj (slika 3.28.b)) vidi se da se u kratkom spoju sva snaga P_k , koju motor uzima iz mreže pretvara u gubitke u namotima stroja (gubici u željezu se mogu zanemariti). Ako se od mjerene snage P_k oduzme gubitke u statorskom namotu P_{wsk} , dobije se snaga koja prelazi sa statora na rotor $P_{\delta k}$. Gubici u statorskom namotu iznose za trofazni motor:

$$P_{wsk} = 1,5 R_{Ls} I_k^2 \quad (3.120.)$$

Sada se može odrediti i snaga $P_{\delta k}$, koja za trofazni namot iznosi:

$$P_{\delta k} = P_k - P_{wsk} \quad (3.121.)$$

Potezni moment T_k može jako ovisiti o položaju rotora u odnosu na stator. Kod detaljnih je ispitivanja potrebno izmjeriti i tu ovisnost, uz konstantan napon na stezaljkama. Na slici 3.51. je prikazana ovisnost poteznog momenta o međusobnom položaju rotora i statora.



Slika 3.51.
Ovisnost poteznog momenta
asinkronog motora o
međusobnom položaju rotora i
statora

Pokus praznog hoda omogućuje da se odrede elementi nadomjesne mreže X_m i R_{Fe} prema izrazima (3.113.) i (3.114.). Ostale elemente se može odrediti približno iz pokusa kratkog spoja, koristeći pritom pojednostavljenu nadomjesnu mrežu za kratki spoj prema slici 3.28.b).

Snaga $P_{\delta k}$ koja prelazi sa statora na rotor se troši na gubitke u rotorskom namotu P_{wrk} :

$$P_{wrk} = P_{\delta k} = m_s I_k^2 R_r' \quad (3.122.)$$

Iz ove jednakosti slijedi radni otpor faze rotorskog namota R_r' :

$$R_r' = \frac{P_{\delta k}}{m_s I_k^2} \quad (3.123.)$$

Radni otpor faze statorskog namota R_s odredi se pomoću izmjerenog otpora R_{Ls} na stezaljkama stroja, ovisno o spoju statorskog namota. Ako je namot trofazni i spojen u zvijezdu, R_s je jednak:

$$R_s = \frac{R_{Ls}}{2} \quad (3.124.)$$

Za trofazni namot spojen u trokut R_s iznosi:

$$R_s = \frac{3}{2} R_{Ls} \quad (3.125.)$$

Rasipne reaktancije faze statora i rotora ne može se razdvojiti, ali su one kod asinkronog motora približno jednake. Stoga se uzima da svaka od njih iznosi polovicu reaktancije kratkog spoja X_k . Koristeći izraz (3.67.) za impedanciju kratkog spoja Z_k može se izraziti modul Z_k :

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2} \quad (3.126.)$$

Vrijednost impedancije kratkog spoja Z_k (apsolutnu vrijednost) odredi se pomoću izmjerenih vrijednosti napona i struje, što za trofazni motor s namotom spojenim u zvijezdu iznosi:

$$Z_k = \frac{U}{\sqrt{3} I_k} \quad (3.127.)$$

a ako je namot spojen u trokut, impedancija Z_k je jednaka:

$$Z_k = \frac{\sqrt{3} U}{I_k} \quad (3.128.)$$

Iz (3.126.) slijedi X_k :

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} \quad (3.129.)$$

Rasipne reaktancije iznose približno:

$$X_{\sigma s} = X_{\sigma r}' = \frac{X_k}{2} \quad (3.130.)$$

3.5.4. Karakteristike opterećenja

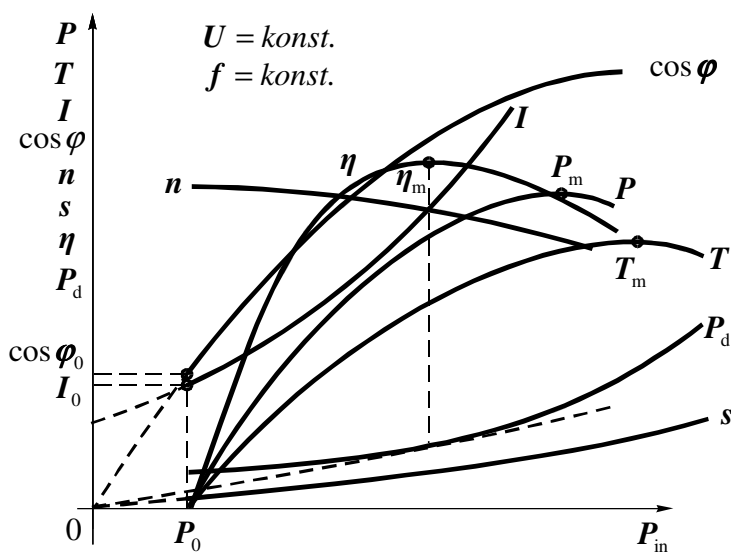
Većina asinkronih strojeva radi kao motori na mreži konstantnog napona i frekvencije. Zbog toga su i ispitivanja pri nazivnom naponu dosta važna. Kao nezavisna varijabla služi pritom električna snaga P_{in} koju motor uzima iz mreže, uz različita opterećenja na osovini T , a uz konstantan napon napajanja U . U svakoj točki opterećenja se također mjeri ili iz mjerenja izračuna niz drugih veličina. To su: snaga na osovini P , moment na osovini T , struja I , faktor snage $\cos \varphi$, brzina vrtnje n , klizanje s , stupanj djelovanja η i gubici P_d . Električki dio sheme mjerenja je jednak kao i za prazni hod (slika 3.46.).

Mjerenje električnih veličina provodi se uobičajenim instrumentima: A-metrima, V-metrima, W-metrima i f-metrom. Od neelektričnih veličina su važni moment i klizanje. Dok se s momentom susreće i kod ostalih vrsta strojeva, klizanje je svojstveno samo asinkronim strojevima. Mjerenje klizanja i momenta će se posebno obraditi u točkama 3.5.5. i 3.5.6.

Karakteristike opterećenja su sljedeće:

$$\left. \begin{aligned} P &= f(P_{in}), \\ T &= f(P_{in}), \\ I &= f(P_{in}), \\ \cos \varphi &= f(P_{in}), \\ n &= f(P_{in}), \\ s &= f(P_{in}), \\ \eta &= f(P_{in}), \\ P_d &= f(P_{in}), \end{aligned} \right\} U = konst., f = konst. \quad (3.131.)$$

Ove karakteristike imaju oblik kao na slici 3.52.



Slika 3.52. Karakteristike opterećenja asinkronog motora

Na slici 3.52. su posebno označene snaga P_0 , struja I_0 i faktor snage $\cos \varphi_0$ praznog hoda, te točke u kojima su maksimalni: stupanj djelovanja η_m , snaga P_m i moment T_m .

Treba uočiti da je maksimalni stupanj djelovanja η_m uvijek za snagu koja je manja od maksimalne izlazne snage P_m . Maksimalni moment T_m nastupa za još veću ulaznu, a manju izlaznu snagu od maksimalne. Naravno, u normalnom pogonu motor ne može raditi u točki maksimalnog (prekretnog) momenta.

Faktor snage $\cos \varphi$, gubitke P_d i stupanj djelovanja treba odrediti za svaku mjerenu točku pomoću izmjerenih vrijednosti napona U , struje I , snage P_{in} , klizanja s , otpora stezaljki namota statora R_{Ls} , te poznatih gubitaka P_{Fe} i P_{dmec} (iz pokusa praznog hoda).

Faktor snage $\cos \varphi$ se računa iz mjerene radne snage P_{in} i prividne snage S :

$$\cos \varphi = \frac{P_{in}}{S} \quad (3.132.)$$

Za trofazni motor on iznosi:

$$\cos \varphi = \frac{P_{in}}{\sqrt{3} U I} \quad (3.133.)$$

Gubitke se računa sukladno propisima. Prema dijagramu toka snage na slici 3.24. gubitke u motoru predstavljaju P_{ws} , P_{Fes} , P_{dr} , P_{dmec} i P_{dad} :

$$P_d = P_{ws} + P_{Fes} + P_{dr} + P_{dmec} + P_{dad} \quad (3.134.)$$

Mjerenje karakteristika opterećenja se provodi bez dodatnih otpora u rotorskom krugu, stoga od električnih gubitaka P_{dr} postoje samo gubici u rotorskom namotu P_{wr} , pa vrijedi izraz (3.59.). Osim toga, ako se uzme u obzir samo dodatne gubitke mjerene u praznom hodu zajedno s gubicima u željezu prema (3.109.), a zanemari se dodatne gubitke pod opterećenjem, ukupni gubici P_d iznose:

$$P_d = P_{ws} + P_{Fe} + P_{wr} + P_{dmec} \quad (3.135.)$$

Gubitke u statorskom namotu P_{ws} izračuna se analogno izrazima (3.107.) i (3.120.):

$$P_{ws} = 1,5 R_{Ls} I^2 \quad (3.136.)$$

Gubitke P_{Fe} i P_{dmec} treba odrediti pokusom praznog hoda (točka 3.5.2.). Ostaje još samo problem gubitaka u rotorskom namotu P_{wr} . Njih se odredi pomoću snage P_δ i mjerenog klizanja s . Snagu P_δ izračuna se tako da se od ulazne snage oduzme gubitke u statoru:

$$P_\delta = P_{in} - P_{ws} - P_{Fe} \quad (3.137.)$$

U rotorskom krugu nema dodatnih otpora, pa su gubici P_{wr} analogno izrazu (3.53.) jednaki:

$$P_{wr} = s P_\delta \quad (3.138.)$$

Sada se može izračunati i izlaznu snagu P :

$$P = P_{in} - P_d \quad (3.139.)$$

Ova snaga se može odrediti i pomoću izmjenjenog momenta T i brzine vrtnje n , prema izrazima (2.39.) i (2.40):

$$P = T \frac{n\pi}{30} \quad (3.140.)$$

Za izračun stupnja djelovanja η se obično koristi izraz:

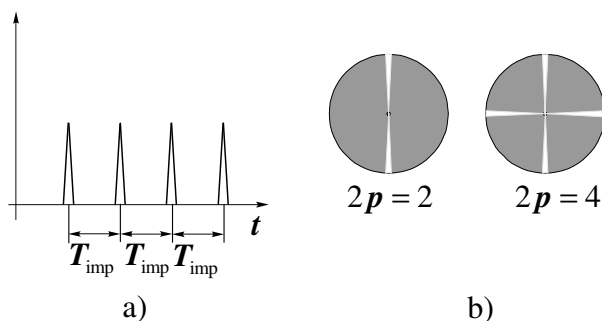
$$\eta = 1 - \frac{P_d}{P_{in}} \quad (3.141.)$$

3.5.5. Mjerenje klizanja

Klizanje je definirano pomoću sinkrone i stvarne brzine motora prema (3.17.), pa ga se u principu može odrediti mjerenjem tih dviju veličina. Za male iznose klizanja to međutim nije dovoljno točno, pa je potrebno mjeriti klizanje direktno. Jedan od načina je mjerenje klizanja stroboskopom.

Stroboskop je uređaj koji daje kratke impulse svjetla u točno definiranim vremenskim razmacima T_{imp} . Na osovini motora se povuče vertikalna crta i osvijetli iz stroboskopa frekvencijom koja je dvostruko veća od frekvencije mreže. Ako se osovina vrti sinkronom brzinom, tada će se na osovini vidjeti zvijezdu s onoliko krakova, koliko stroj ima polova (slika 3.53.).

svjetlosni tok Φ



Slika 3.53.
Mjerenje klizanja
stroboskopom
a) stroboskopski
svjetlosni
impulsi,
b) zvijezde pri
mjeranju.

Ako je brzina vrtnje manja od sinkrone, zvijezda će se polako kretati u smjeru koji je suprotan od stvarnog smjera vrtnje rotora. Ovu brzinu se može mjeriti (brojati). Treba mjeriti vrijeme T u kojem zvijezda napravi N okretaja. Frekvencija klizanja (rotora) je jednaka:

$$f_r = \frac{N}{T} 2p = s f_s \quad (3.142.)$$

Iz toga se odredi klizanje:

$$s = \frac{2p N}{T f_s} \quad (3.143.)$$

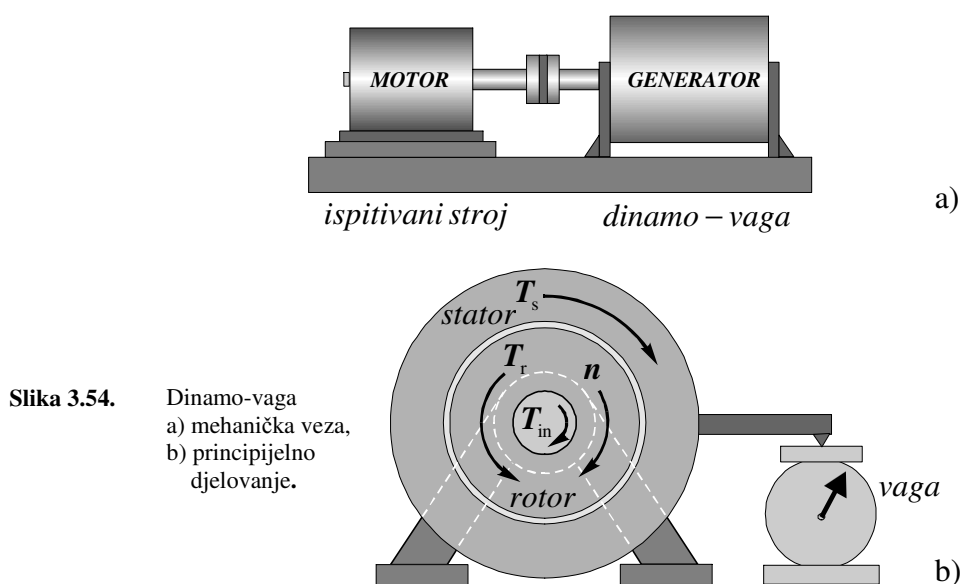
Danas postoje i dovoljno precizni digitalni frekvencmetri pomoću kojih se klizanje može mjeriti indirektno. Za mala klizanja je potrebna ekstremna točnost takvih instrumenata (reda veličine 10^{-6}).

3.5.6. Mjerenje momenta

Do momenta se može doći indirektno tako da se mjeri ulaznu električnu snagu, od nje odbije sve gubitke i odredi snagu na osovini prema (3.139.), koristeći izraze (3.135.) do (3.138.), kako je to opisano u točki 3.5.4. Moment na osovini je tada:

$$T = \frac{30}{\pi n_s} \cdot \frac{P}{1-s} \quad (3.144.)$$

Točniji moment dobije se direktnim mjerenjem. To se radi pomoću dinamo-vage. Dinamo-vaga (slika 3.54.) je električni generator čije je kućište montirano na ležaje tako da se slobodno može pomicati oko svoje uzdužne osi.



Ispitivani stroj razvija na osovini moment T , koji je ujedno pogonski moment dinamo-vagi T_{in} :

$$T_{in} = T \quad (3.145.)$$

Za ravnotežu dinamo-vage mora na rotoru razviti moment T_r koji je jednak momentu na osovini T_{in} , ali suprotnog smjera:

$$T_r = -T_{in} \quad (3.146.)$$

Rad dinamo-vage se zasniva na međusobnom djelovanju statora i rotora: stator djeluje na rotor jednakim momentom T_s kao što rotor djeluje na stator, ali suprotnog smjera, pa vrijedi:

$$T_s = -T_r \quad (3.147.)$$

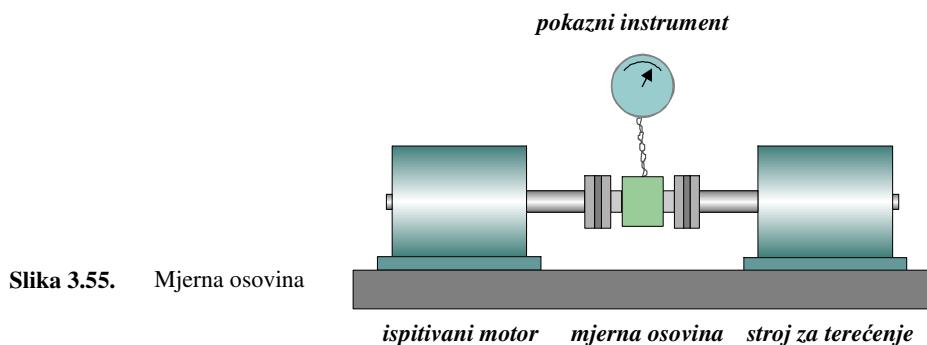
Snagu iz dinamo-vage (generatora) odvodi se na otpornike, a moment na kućište T_s kompenzira se silom F na poznatom kraku na kućištu l . Silu se mjeri običnom vagom. Mjereni moment iznosi:

$$T = T_s = F \cdot l \quad (3.148.)$$

Pomoću dinamo-vage mjeri se direktno moment na osovini T , a uz poznatu (mjerenu) brzinu vrtnje n dobije se snagu na osovini P prema izrazu (3.140.).

Dinamo-vaga se obično radi tako da može služiti i za ispitivanje generatora. Laboratorijska dinamo-vaga je složen i skup uređaj, s postoljem za montažu ispitivanog stroja, te uređajima za upravljanje same dinamo-vage. Često nije moguće dovesti stroj u laboratorij na ispitivanje. Alternativa mjerenju momenta pomoću dinamo-vage je mjerna osovina.

Mjerna osovina je uređaj koji se umeće između ispitivanog stroja i tereta i direktno mjeri moment (slika 3.55.).



Slika 3.55. Mjerna osovina

Sam davač momenta može se zasnivati na različitim principima kao što su:

- piezo-električni,
- magnetostriksijski,
- induktivni,

- kapacitivni,
- tenzometrijski i slično.

Umjesto ugradnje mjerne osovine može se na osovinu direktno nalijepiti tenzometarske trake, i uz poznata elastična svojstva osovine odrediti moment. Ovi uređaji su pogodni za statička snimanja, a neki od njih i za dinamička. Kod dinamičkih snimanja treba cijeli sustav pažljivo koncipirati jer torzijske vibracije mogu jako utjecati na rezultat.

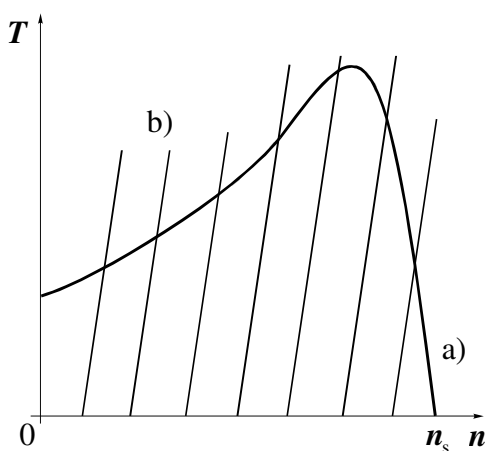
Mjerenje momenta se obavlja za određivanje karakteristika kratkog spoja, opterećenja i momenta.

3.5.7. Karakteristika momenta

Karakteristika momenta je vanjska karakteristika motora (slika 3.33.). Predstavlja ovisnost momenta na osovini o brzini vrtnje, odnosno klizanju:

$$\left. \begin{array}{l} T = f(n), \\ T = f(s), \end{array} \right\} U = konst., f = konst. \quad (3.149.)$$

Ona se često snima na izvedenim strojevima. Uobičajeni način snimanja je točku po točku pomoću dinamo-vage. Dinamo-vaga mora pritom imati takvu karakteristiku da može stabilno raditi u bilo kojoj točki karakteristike, kako je to naznačeno na slici 3.56. To se postiže izborom odgovarajućeg režima rada dinamovage.



Slika 3.56.
Snimanje karakteristike momenta
a) karakteristika motora,
b) karakteristike dinamo-vage.

Umjesto snimanja karakteristike momenta dinamo-vagom (ili mjernom osovinom) snimanje cijele karakteristike može se izvesti derivatorom. Princip

ove mjerne metode se zasniva na saznanju da je moment T , koji ubrzava neki moment inercije J , proporcionalan kutnom ubrzanju prema relaciji:

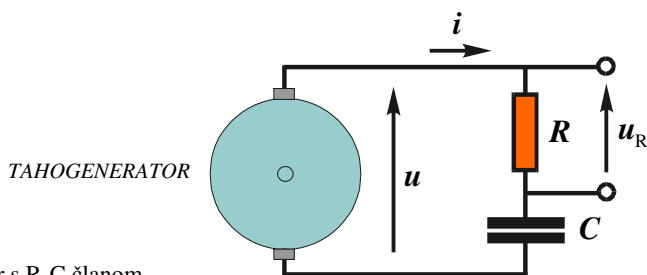
$$T = J \frac{d\Omega_m}{dt} = J \frac{2\pi}{60} \cdot \frac{dn}{dt} \quad (3.150.)$$

Dakle, moment je proporcionalan derivaciji brzine vrtnje po vremenu. Ako je poznat moment inercije J , a može ga se izmjeriti njihalom na osovini [6], iz mjerenja brzine može se deriviranjem doći do momenta, bez terećenja na osovini. Brzinu se mora mjeriti dovoljno točno da bi se deriviranjem dobilo ispravne rezultate. Još je spretnije ako se signali iz derivatora prikažu u x-y koordinatnom sustavu, i to tako da na x osi bude signal proporcionalan brzini vrtnje, a na drugoj osi derivacija tog signala. Tako se dobije odmah grafički prikaz karakteristike momenta.

Brzina se obično mjeri tahogeneratorom. Tahogenerator je mali istosmjerni stroj koji na stezaljkama daje napon u proporcionalan brzini vrtnje n :

$$u = k_{TG} n \quad (3.151.)$$

Faktor proporcionalnosti je konstanta k_{TG} koju daje proizvođač tahogeneratora. Deriviranje tog napona može se provesti pomoću R-C člana prema slici 3.57.



Slika 3.57. Derivator s R-C članom

Neka u krugu prema slici 3.57. teče struja i i neka je na kondenzatoru C naboj iznosa q . Napon u je jednak zbroju napona na kondenzatoru C i otporniku R :

$$u = \frac{q}{C} + i \cdot R \quad (3.152.)$$

Deriviranjem prethodnog izraza dobije se:

$$\frac{du}{dt} = \frac{dq}{dt} \cdot \frac{1}{C} + R \frac{di}{dt} = \frac{i}{C} + R \frac{di}{dt} \quad (3.153.)$$

Deriviranjem izraza za napon tahogeneratora (3.151) dobije se:

$$\frac{d\mathbf{u}}{dt} = k_{TG} \frac{d\mathbf{n}}{dt} \quad (3.154.)$$

Izjednači se izraze za derivaciju napona:

$$k_{TG} \frac{d\mathbf{n}}{dt} = \frac{\mathbf{i}}{C} + R \frac{d\mathbf{i}}{dt} \quad (3.155.)$$

Iz toga slijedi derivacija brzine:

$$\frac{d\mathbf{n}}{dt} = \frac{1}{k_{TG}} \left(\frac{\mathbf{i}}{C} + R \frac{d\mathbf{i}}{dt} \right) \quad (3.156.)$$

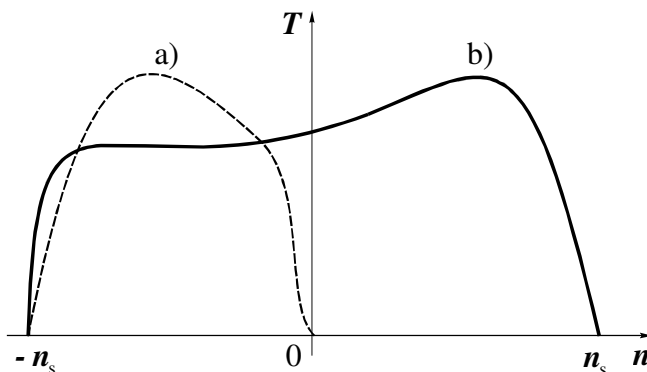
Ako je otpor R malen, može ga se zanemariti. Derivacija brzine je tada:

$$\frac{d\mathbf{n}}{dt} = \frac{1}{k_{TG}} \cdot \frac{\mathbf{i}}{C} \quad (3.157.)$$

Dobila se derivacija brzine proporcionalna struji. Signal, koji je proporcionalan struji $\mathbf{i}$, je pad napona $\mathbf{u}_R$ na otporniku R . Dakle, napon $\mathbf{u}$ iz tahogeneratora je proporcionalan brzini, a pad napona na otporniku $\mathbf{u}_R$ je proporcionalan derivaciji brzine, dakle momentu.

Pri ovakvom snimanju mora se osigurati da zalet traje dovoljno dugo da bi se mjerena karakteristika mogla smatrati statičkom. Krivulja momenta se može smatrati statičkom ako zalet motora traje znatno dulje od elektromagnetske vremenske konstante motora koja je određena radnim otporima i rasipnim reaktancijama motora. Produljenje zaleta motora se postigne dodatnim momentom inercije na osovini.

Da se izbjegne prijelazna pojava pri uključanju motora, mjerenje momenta iz zaleta se obavlja od klizanja $s = 2$. Motor se priključkom na izvor napona zaleti do točke praznog hoda vrtnjom u jednom smjeru. Potom mu promijenimo smjer vrtnje. U tom momentu prijeđe u režim protustrujnog kočenja te koči od klizanja $s = 2$ do praznog hoda u tom smjeru (slika 3.58.), što se snimi derivatorom.



Slika 3.58. Provedba mjerenja momenta motora iz zaleta
 a) zalet do praznog hoda s jednim smjerom vrtnje,
 b) mjerena karakteristika nakon reverziranja.

3.5.8. Mjerenje zagrijavanja

Asinkroni motori se najčešće grade za trajne pogone. Pri tome je jedan od osnovnih kriterija da se stroj pri nazivnom opterećenju ne smije zagrijavati iznad granice dopuštene za korištenu klasu izolacije i temperaturu okoline od 40°C.

Provjera zagrijavanja se provodi tako da se stroj optereti nazivnom snagom dovoljno dugo tako da temperatura u svim dijelovima stroja stagnira. Za male strojeve to može biti relativno kratko vrijeme, dok je za veće strojeve to obično više sati. Frekvencija, napon i snaga se cijelo vrijeme moraju održavati na konstantnoj vrijednosti. Nakon što je temperatura stagnirala, zagrijavanje se odredi indirektno iz izmjerenih vrijednosti otpora statorskog namota prije i nakon pokusa zagrijavanja:

$$R_{\vartheta} = R_{\vartheta a} (1 + \alpha_{Cu} \Delta \vartheta) \quad (3.158.)$$

Dakle, potrebno je izmjeriti otpore stezaljki prije i nakon pokusa zagrijavanja. U navedenoj relaciji su oznake sljedeće:

$R_{\vartheta a}$ – otpor stezaljki izmjeren prije pokusa zagrijavanja
 (na temperaturi okoline),

R_{ϑ} – otpor stezaljki nakon pokusa zagrijavanja,

α_{Cu} – temperaturni koeficijent materijala namota (bakra) i

$\Delta \vartheta$ – povišenje temperature namota u odnosu na temperaturu okoline.

Povišenje temperature namota iznosi tada:

$$\Delta \vartheta = \frac{1}{\alpha_{\text{Cu}}} \left(\frac{R_{\vartheta}}{R_{\vartheta a}} - 1 \right) \quad (3.159.)$$

Pri izradi prototipova se u stroj obično ugrađuju termoelementi, pa se zagrijavanje u pojedinim dijelovima stroja mjeri direktno. Termoelementi se mogu staviti u glavu namota i nakon što je stroj napravljen pa služe za praćenje povećanja, odnosno stagnacije temperature.

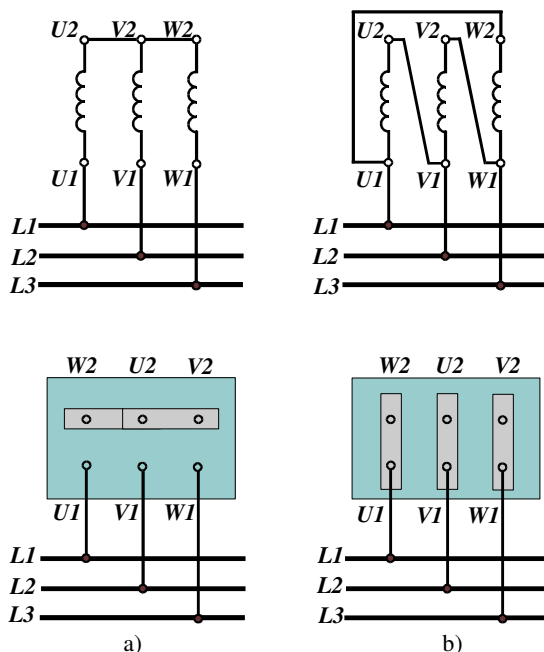
3.6. POKRETANJE I KOČENJE ASINKRONIH STROJEVA

3.6.1. Pokretanje zvijezda-trokut

Pri pokretanju asinkronih motora nema principijelnih problema kao kod sinkronih motora. Ako je moment tereta manji od poteznog momenta motora, priključkom na mrežu će motor krenuti i ubrzati do brzine koja odgovara ravnoteži momenata.

Pokretanje može ipak stvarati teškoće zbog velike potezne struje. Potezna struja može biti višestruko veća od nazivne, pa ukopčanja motora mogu uzrokovati nedopustive strujne udarce na mrežu. Jedan od načina, da se udarci na mrežu smanje, je pokretanje zvijezda-trokut.

Trofazni statordi namot može biti spojen u zvijezdu ili trokut. Spoj namota i stezaljki je za oba ova spoja prikazan na slici 3.59.



Slika 3.59.

Spoj namota i stezaljki asinkronog motora
 a) zvijezda spoj,
 b) trokut spoj.

Ako je motor građen tako da radi trajno s namotima na linijskom naponu (namot je spojen u trokut), onda ga se može privremeno, za vrijeme pokretanja spojiti u zvijezdu. Naponi na namotima pojedinih faza su onda $\sqrt{3}$ puta manji, pa će fazna struja biti puta $\sqrt{3}$ manja i jednaka linijskoj struji.

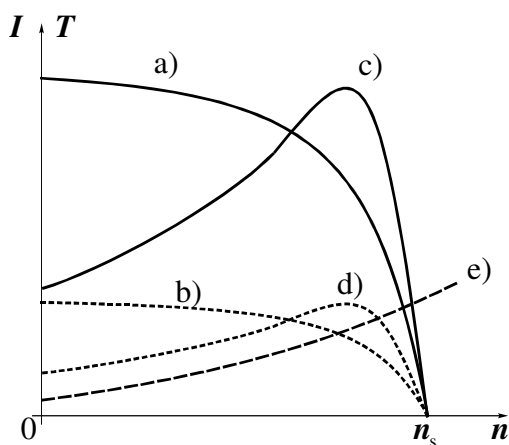
Kod spoja u trokut je linijska struja $\sqrt{3}$ puta veća od fazne u spoju trokut, odnosno 3 puta veća od fazne (i linijske) u zvijezda spoju.

Dakle, privremenim spajanjem statorskog namota u zvijezdu može se smanjiti poteznu (linijsku) struju 3 puta! Naravno, i moment će se pritom smanjiti i to s kvadratom faznog napona, dakle također tri puta! Ako je tada moment motora još uvijek veći od momenta tereta, može se izvesti pokretanje u spoju zvijezda i kasnije prespojiti u trokut (slika 3.60.). To se izvodi posebnim preklopkama na koje se dovodi svih 6 izvoda trofaznog namota.

Slika 3.60.

Karakteristike asinkronog motora pri zvijezda-trokut pokretanju

- a) struja u trokut spoju,
- b) struja u zvijezda spoju,
- c) moment u trokut spoju,
- d) moment u zvijezda spoju,
- e) moment tereta.



Treba još naglasiti da je u spoju zvijezda smanjena i snaga koju motor može dati! Stoga taj spoj smijemo koristiti samo kratkotrajno, za pokretanje. Naravno, ovo vrijedi samo za motor koji je projektiran za trajni rad s namotom u spoju trokut!

3.6.2. Pokretanje kolutnih motora

O pokretanju kolutnih motora je već bilo govora prilikom analize utjecaja otpora rotora na karakteristiku motora. Pokretanje se provodi pomoću upuštača – promjenljivog otpornika spojenog preko kliznih prstena na rotorski namot (slika 3.4.).

Karakteristike struje i momenta se dodavanjem otpora rastežu ulijevo (slike 3.30. i 3.38.). S dodatnim otporom u rotorskom krugu se smanji potezna struja, a istovremeno se poveća potezni moment. Kako se motor ubrzava, postupno se smanjuje vanjski dodatni otpor i na kraju rotorski namot kratko spoji.

Kratko spajanje može izvesti na rotoru poseban uređaj koji radi na osnovi centrifugalne sile. Nakon toga mogu se podići četkice s kliznih koluta pomoću podizača četkica. Stroj tada radi samo s otporom rotorskog namota.

3.6.3. Kočenje asinkronim motorom

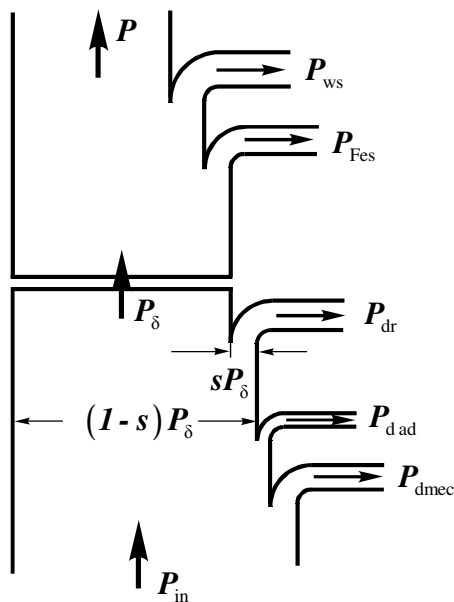
U elektromotornim pogonima je zahtjev za kočenjem vrlo čest. Tipični takvi pogoni su pogoni dizalice i dizala. Pri dizanju tereta je potrebno ulagati električnu energiju, dok pri spuštanju tereta treba mehaničku energiju na osovini pretvoriti u električnu i nekako utrošiti.

Asinkroni stroj ima dva područja gdje može raditi kao kočnica:

- protustrujno kočenje i
- generatorski rad.

To se vidi na kružnom dijagramu (slika 3.35.) i na karakteristici momenta (slika 3.36.). U oba slučaja kočnog rada asinkroni stroj prima mehaničku energiju preko osovine.

Generatorsko (nadsinkrono, rekuperativno) kočenje je ekonomično s energetskog stanovišta. Dijagram toka snage za generatorsko kočenje je prikazan na slici 3.61.

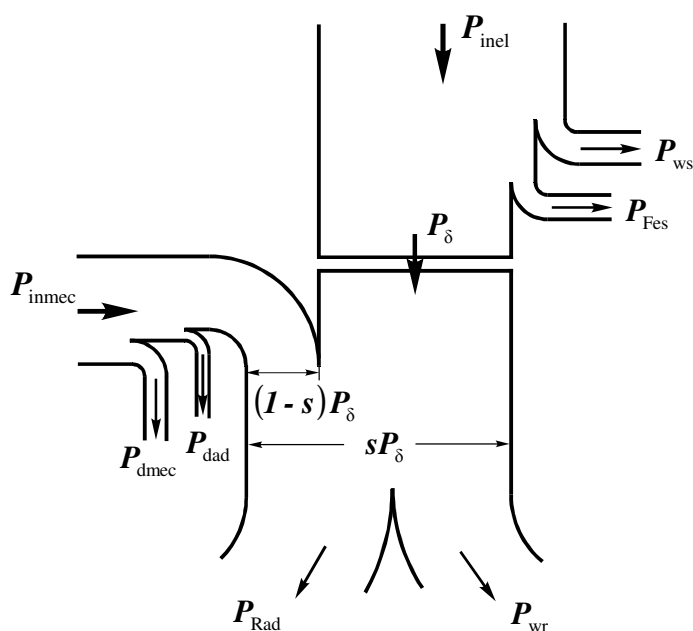


Slika 3.61.
Dijagram toka snage
asinkronog stroja u
generatorskom radu

Znatan dio mehaničke energije se vraća u mrežu pretvoren u električnu energiju. Stroj radi kao generator. Pritom se vrti nadsinkrono brzinom nešto većom od sinkrone. To je jedna od nezgodnih strana generatorskog kočenja.

Kod višebrzinskih motora (motora s namotima za različite brojeve polova) može se kočiti tako da se motor prespoji na namot s većim brojem polova. Takvo kočenje se koristi kod klasičnih pogona dizala s asinkronim motorom.

Protustrujno kočenje je s energetskog stanovišta znatno nepovoljnije od generatorskog kočenja. Dijagram toka snage je prikazan na slici 3.62.



Slika 3.62. Dijagram toka snage asinkronog stroja kod protustrujnog kočenja

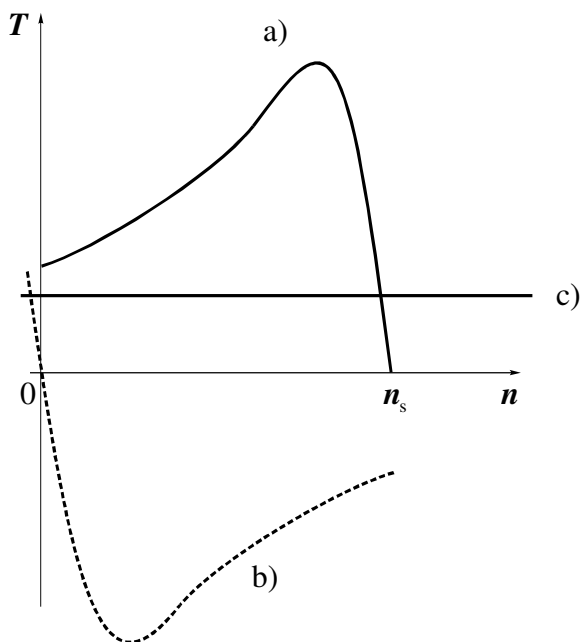
Pri protustrujnom kočenju stroj uzima iz mreže električnu snagu P_{inel} i preko osovine mehaničku P_{inmec} . Sva se ta snaga pretvara u gubitke, odnosno u toplinu, i to najviše u rotorskom krugu zbog gubitaka u rotorskom namotu P_{wr} i na dodatnim otporima P_{Rad} .

Dakle, protustrujno kočenje je nepovoljno ne samo zbog velikih gubitaka, nego i zbog zagrijavanja stroja, posebno rotora.

3.6.4. Kočenje istosmjernom strujom

Ako se fazu statorskog namota pri mirujućem rotoru spoji na izvor istosmjernog napona takvog iznosa da kroz namot teče struja jednaka maksimalnoj vrijednosti struje magnetiziranja, stvorit će se mirujuće magnetsko polje. Rotor se neće zakrenuti.

Ako se počne rotor vrtjeti momentom na osovini, onda će se u rotoru inducirati struje koje će kočiti okretanje rotora. Taj kočni moment djeluje pri bilo kojoj brzini i uz konstantan magnetski tok imat će približno karakteristiku koja je slična karakteristici momenta pri zaletu (slika 3.63.). Da se razvije dovoljan kočni moment, mora istosmjerna struja u statoru uspostaviti takvo magnetsko polje kakvo bi stvorila izmjenična struja u simetričnom spoju.



Slika 3.63.

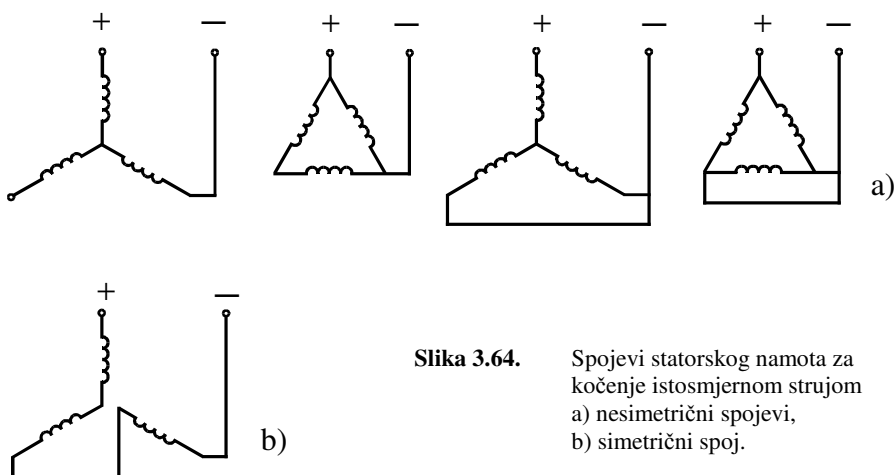
Karakteristike momenta asinkronog stroja
a) u motorskom radu uz 3-fazno napajanje,
b) pri kočenju istosmjernom strujom,
c) moment tereta.

Teorijski se ne može istosmjernim kočenjem zadržati stroj u mirovanju, već ga se može samo dovesti u blizinu točke mirovanja. Kad se brzina dovoljno približi nuli, konačno zaustavljanje obavi mehanička kočnica.

U praksi je ovo vrlo efikasan način kočenja i koristi se u reguliranim pogonima dizala. Za kočenje istosmjernom strujom motor se isključi s 3-faznog izmjeničnog napajanja i na njegov namot se narine istosmjerni napon. Motor tada radi kao sinkroni generator s neizraženim polovima, uz promjenljivu brzinu

vrtnje. Statorski namot je uzбудni, i njegova uzbuđda inducira u rotorskom namotu izmjenični napon.

Za kočenje istosmjernom strujom se koristi više spojeva statorskog namota prema slici 3.64. Obično se koristi jedan od nesimetričnih spojeva. Simetrični spoj je neprikladan jer za svaku fazu moraju biti dostupna oba kraja namota.

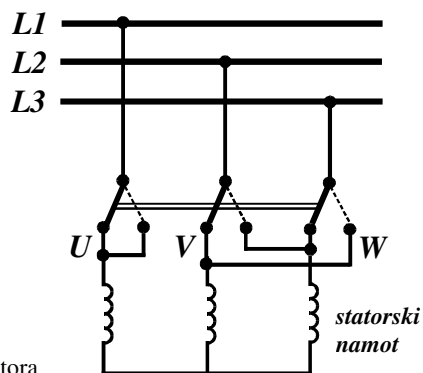


Slika 3.64. Spojevi statorskog namota za kočenje istosmjernom strujom
a) nesimetrični spojevi,
b) simetrični spoj.

3.7. UPRAVLJANJE BRZINOM VRTNJE

3.7.1. Reverziranje

Osim pokretanja i kočenja, promjena smjera vrtnje (reverziranje) je najjednostavniji zahtjev za upravljanjem. Za promjenu smjera vrtnje motora treba promijeniti smjer okretnog magnetskog polja. Kod trofaznog motora se to postigne zamjenom redoslijeda dviju faza statorskog namota (slika 3.65.).



Slika 3.65.
Reverziranje trofaznog asinkronog motora

3.7.2. Višebrzinski motori

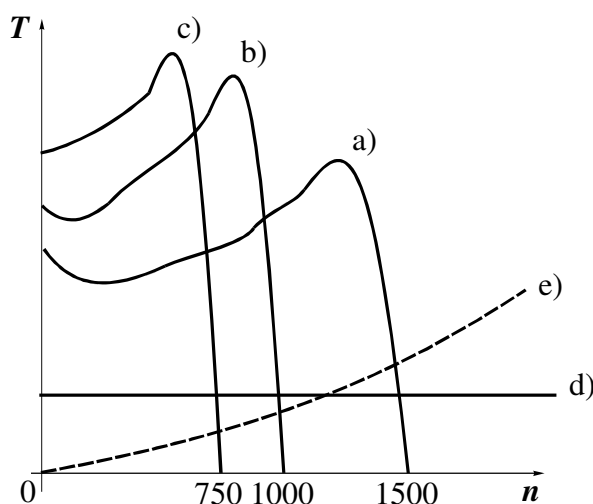
Relativno je čest zahtjev za pogonom koji ima više diskretnih brzina. Najjednostavniji primjeri takvih pogona su:

- stroj za pranje rublja,
- klasična dizala i
- ventilatori.

Takvi se pogoni rješavaju višebrzinskim motorima.

Višebrzinski motori se izvede obično s više namota na statoru. Ovi namoti mogu biti smješteni u iste utore ili u posebne utore za svaki namot. Kod višebrzinskih motora je rotorski namot uvijek kavezni. Takav se rotor sam prilagođava proizvoljnom broju polova, jer broj polova rotora i statora mora uvijek biti jednak.

Vanjska karakteristika jednog trobrzinskog motora je prikazana na slici 3.66.

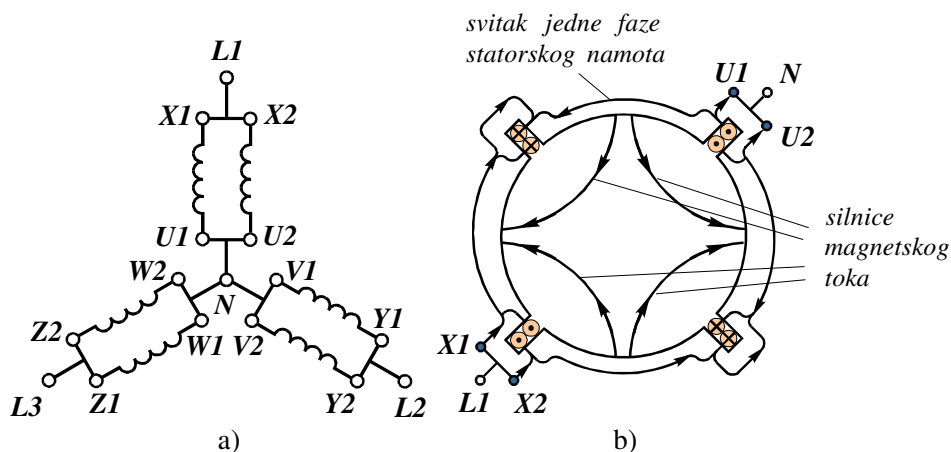


Slika 3.66. Karakteristike momenta trobrzinskog asinkronog motora (uz $f=50\text{Hz}$)
a) 4-polni namot,
b) 6-polni namot,
c) 8-polni namot,
d) konstantni moment tereta,
e) ventilacijski moment tereta.

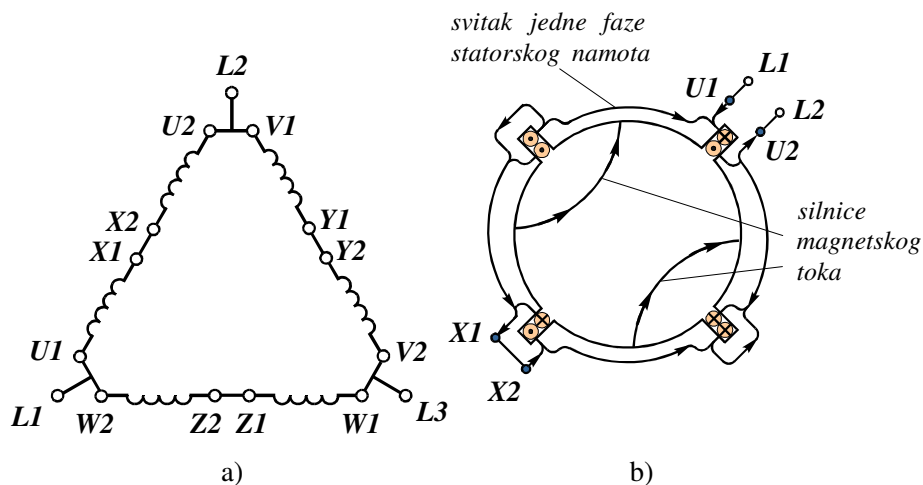
Uz jednaku gustoću magnetskog polja u zračnom rasporu bi nazivni momenti takvih motora trebali biti jednaki. Stoga bi snage za različite brzine trebale biti proporcionalne broju okretaja. To je međutim teško postići zbog ograničenog prostora za smještaj namota pa se rade kompromisi. Stroj se projektira tako da se za svaki polaritet dobiju zadovoljavajuće karakteristike, koje ne moraju nužno biti i najpovoljnije.

Druga je mogućnost izvedbe višebrzinskih motora s prespojivim namotom. Najpoznatiji je Dahlanderov spoj kod kojeg se namot može prespojiti u omjeru

broja polova 1:2. Namot svake faze se sastoji od dvije grane. Za četveropolni motor ove grane trebaju biti spojene paralelno (slika 3.67.). U drugom slučaju, kad motor treba biti dvopolni, grane svake faze se spoje u seriju (slika 3.68.).



Slika 3.67. Dahlanderov spoj za 4-polni namot
a) spoj namota,
b) shematski prikaz jedne faze namota i magnetskog polja.



Slika 3.68. Dahlanderov spoj za 2-polni namot
a) spoj namota,
b) shematski prikaz jedne faze namota i magnetskog polja.

3.7.3. Upravljanje brzinom vrtnje promjenom otpora u rotorskom krugu

Već je više puta naglašeno da se dodavanjem otpora u rotorskom krugu kolutnih motora mijenja karakteristika momenta (slika 3.38.), a time i brzina vrtnje za određeni teret. Iako je ovakvo upravljanje jako jednostavno, ima dva velika nedostatka:

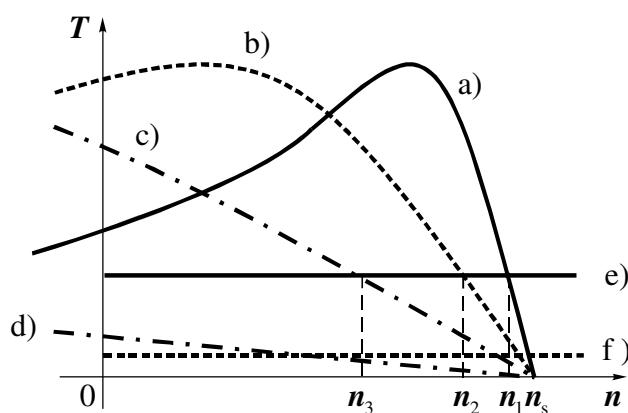
- neekonomičnost i
- nestabilnost radne točke pri malim teretima.

Uzrok neekonomičnosti je u tome što se s povećanjem otpora povećava i klizanje motora. Pri povećanom klizanju su povećani električni gubici u rotorskom krugu u omjeru:

$$P_{dr} = \frac{s}{1-s} \cdot P_{mec} \quad (3.160.)$$

Tako na primjer pri klizanju $s = 0,5$ gubici u rotorskom otporu iznose koliko i razvijena mehanička snaga (koja je približno jednaka snazi na osovini)!

Drugi je nedostatak što se za male terete upravljanje ne može precizno provoditi. Na slici 3.69. vidi se da se s određenim dodatnim otporima za veliki moment tereta (krivulja e)) može dobiti relativno velika promjena brzine vrtnje (od n_1 do n_3). S istim dodatnim otporima se za mali moment tereta (krivulja f)) dobije jako mala promjena brzine vrtnje. U tom slučaju je za veliku promjenu brzine potreban veliki dodatni otpor, ali radna točka tada nije strogo određena (sjecište krivulja d) i f)).



Slika 3.69. Regulacija brzine vrtnje dodavanjem otpora u rotorski krug
a) b) c) d) momenti motora,
e) f) momenti tereta.

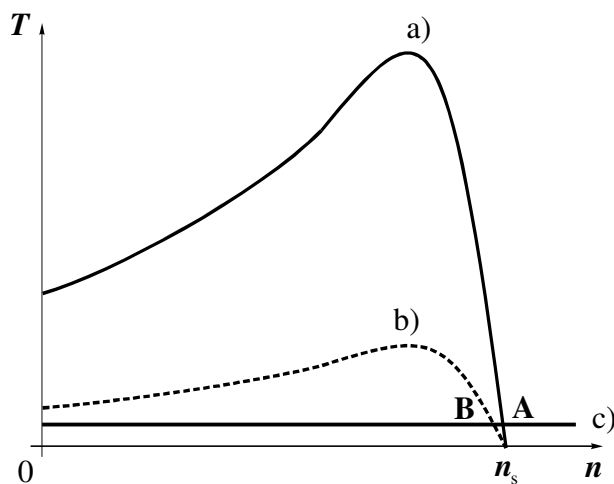
3.7.4. Upravljanje brzinom vrtnje promjenom napona

Iznos momenta asinkronog motora ovisi o kvadratu napona, pa se u tom omjeru mijenja i oblik karakteristike momenta. Ako je poznat moment T uz napon U , onda moment T' uz novi napon U' iznosi:

$$T' = \left(\frac{U'}{U} \right)^2 T \quad (3.161.)$$

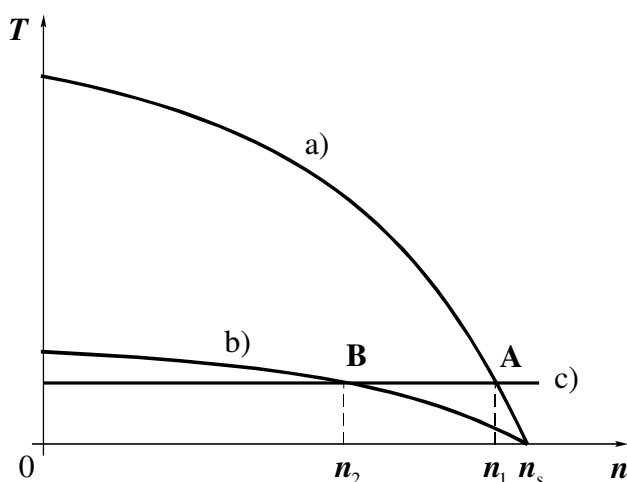
U svakoj točki karakteristike, dakle na svakoj brzini vrtnje, moment se promijeni proporcionalno kvadratu promjene napona.

Na slici 3.70. su prikazane karakteristike momenta motora pri napajanju s nazivnim naponom i sa sniženim naponom, jednakim polovici nazivnog. Pri punom naponu je radna točka u točki **A**. Uz upola manji napon se radna točka preseli u točku **B**. Moment motora je četiri puta manji, pa je i dozvoljeni moment tereta oko četiri puta manji od nazivnog.



Slika 3.70. Karakteristika momenta asinkronog motora pri promjeni napona
 a) moment motora uz nazivni napon,
 b) moment motora uz sniženi napon,
 c) moment tereta.

Ako je moment tereta konstantan ili ne ovisi jako o brzini vrtnje, uz karakteristiku motora kao na slici 3.70. ne može se postići znatnija promjena brzine promjenom napona. Drukčije je ako karakteristika momenta izgleda kao na slici 3.71.a).



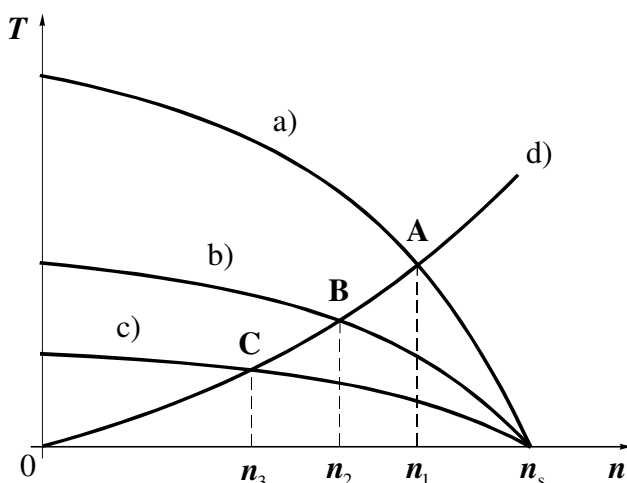
Slika 3.71. Karakteristika momenta asinkronog motora pogodna za regulaciju promjenom napona

- a) moment motora uz nazivni napon,
- b) moment motora uz sniženi napon,
- c) moment tereta.

Takvu karakteristiku može se dobiti kod kaveznih motora odgovarajućim izborom oblika i dimenzija rotorskog kaveza. Uz nazivni napon je radna točka u točki **A**.

Snižanjem napona se radna točka premjesti iz **A** u **B**, pri čemu se poveća klizanje motora. Ne smije se zaboraviti da s povećanjem klizanja rastu električni gubici u rotorskom krugu. Jednako kao kod kolutnog motora i kod kaveznog će gubici u rotorskom namotu pri klizanju $s = 0,5$ biti jednaki mehaničkoj snazi (prema izrazu (3.160.)). Kako kod kaveznog motora nema vanjskih otpora, svi ovi gubici se stvaraju na rotoru i direktno zagrijavaju stroj, pa ih treba s rotora i odvesti što predstavlja teškoću. Uz to se sa smanjenjem brzine pogoršava hlađenje motora jer se motor hladi u pravilu ventilatorima na istoj osovinu. Zbog povećanog zagrijavanja, a uz jednako hlađenje, se sa sniženjem napona smanjuje dozvoljeno opterećenje motora.

Ipak je za mnoge pogone ovakav način upravljanja pogodan. To je na primjer pogon ventilatora koji predstavlja približno kvadratičnu karakteristiku momenta tereta i prikazan je na slici 3.72.



Slika 3.72. Regulacija brzine promjenom napona u pogonu ventilatora
 a) moment motora uz nazivni napon,
 b) moment motora uz 30% sniženi napon,
 c) moment motora uz 50% sniženi napon,
 d) moment tereta.

Pri nazivnom naponu je radna točka u točki **A**. Uz sniženje napona za 30% dobije se radna točka **B**, a za upola manji napon je radna točka **C**. Snižanjem napona se radna točka seli iz točke **A** u **C**, pa se može postići velika promjena brzine vrtnje, od n_1 do n_3 . Pritom se i moment tereta smanji, što je povoljno zbog zagrijavanja motora.

3.7.5. Upravljanje brzinom vrtnje promjenom frekvencije

Svaki od dosad opisanih načina upravljanja brzinom vrtnje je imao neki nedostatak. Upravljanje promjenom frekvencije napajanja statorskog namota nema gotovo ni jedan nedostatak, osim cijene.

Snaga motora limitirana je zagrijanjem namota i željeza, pa zagrijanje mora ostati jednako i pri promjeni frekvencije. Uz pretpostavku jednako dobrog hlađenja može se u stroju zadržati isti magnetski tok i istu gustoću struje ako se frekvenciju i napon mijenja istovremeno. Iz izraza za inducirani napon E_s uz frekvenciju napajanja f_s proizlazi magnetski tok koji mora ostati konstantan:

$$\Phi = \frac{\sqrt{2}E_s}{2\pi f_s N_s k_{ws}} = konst. \quad (3.162.)$$

Pri promijenjenoj frekvenciji f_s' magnetski tok treba ostati jednak:

$$\Phi = \frac{\sqrt{2}E_s'}{2\pi f_s' N_s k_{ws}} = konst. \quad (3.163.)$$

Izjednačenjem prethodna dva izraza za magnetski tok proizlazi da se s promjenom frekvencije mora i napon mijenjati u omjeru:

$$\frac{E_s}{f_s} = \frac{E_s'}{f_s'} \quad (3.164.)$$

Dakle, pri promjeni frekvencije treba održavati:

$$\frac{E_s}{f_s} = konst. \quad (3.165.)$$

U tom slučaju će stroj zadržati približno jednaki moment. Snaga na osovini će se mijenjati proporcionalno brzini vrtnje (izrazi (2.89.) i (3.140.)), odnosno frekvenciji. Kružni dijagram ostaje u biti nepromijenjen, osim što se na tom dijagramu točka kratkog spoja kod manje frekvencije pomiče ulijevo. Detaljnija analiza ipak pokazuje da se karakteristika momenta nešto mijenja, kako se to vidi na slici 3.73.

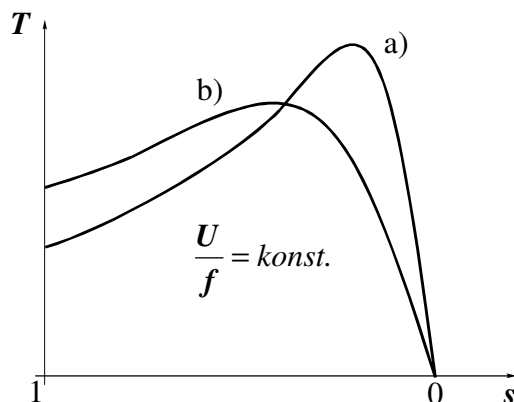
Na slici 3.73. su prikazane karakteristike momenta uz napon U_1 i frekvenciju f_1 , te pri sniženom naponu U_2 i frekvenciji f_2 . Pritom je zadržan odnos:

$$\frac{U}{f} = konst. \quad (3.166.)$$

Slika 3.73.

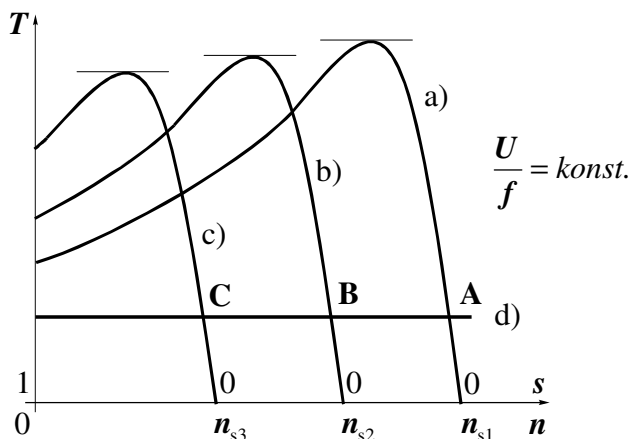
Karakteristike momenta asinkronog motora u ovisnosti o klizanju pri promjeni frekvencije

- a) moment motora uz napon U_1 i frekvenciju f_1 ,
- b) moment motora uz sniženi napon U_2 i frekvenciju f_2 .



Sa smanjenjem frekvencije maksimalni moment opada, a potezni raste. Razlog tome je utjecaj padova napona na statorskim radnim i induktivnim otporima.

Na slici 3.74. su prikazane karakteristike momenta motora u ovisnosti o brzini vrtnje uz različite frekvencije napajanja.



Slika 3.74.

Karakteristike momenta asinkronog motora pri promjeni frekvencije

- a) moment motora uz napon U_1 i frekvenciju f_1 ,
- b) moment motora uz napon $U_2 < U_1$ i frekvenciju $f_2 < f_1$,
- c) moment motora uz napon $U_3 < U_2$ i frekvenciju $f_3 < f_2$,
- d) moment tereta.

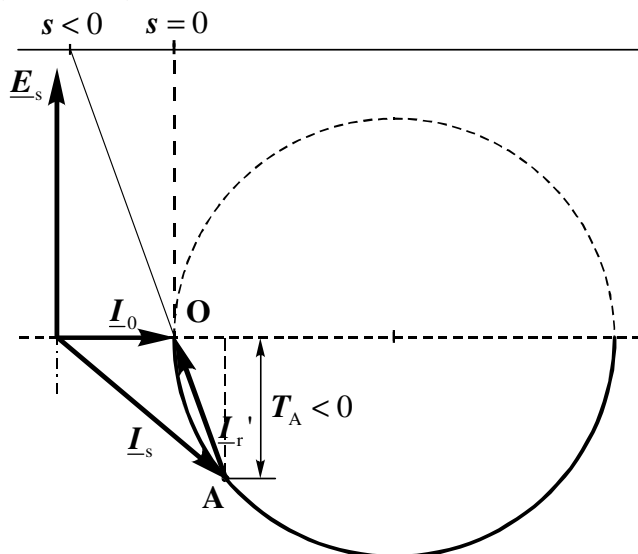
Uz nazivni napon i frekvenciju je radna točka u točki **A**. Smanjenjem napona i frekvencije uz konstantan moment tereta se radna točka pomiče prema točki **C**, a daljnjim smanjenjem još više ulijevo. Motor pritom ostaje raditi s malim klizanjima što je velika prednost upravljanja frekvencijom. Dakle, motor radi u svom optimalnom režimu rada, pa nema povećanih gubitaka u rotorskom namotu. Jasno je da se za ovakvo upravljanje mora imati odgovarajući uređaj, odnosno izvor napajanja s promjenljivom frekvencijom i naponom. To je danas bez iznimke tiristorski pretvarač.

Kod jednostavnijih izvedbi pretvarača je oblik izlaznog napona nesinusoidalni. Ako napon iz pretvarača nije sinusoidalni, pojavljuju se viši harmonici napajanja koji uzrokuju povećanje gubitaka u motoru. Zbog toga se nastoji da oblik napona iz pretvarača bude što bliži sinusoidi.

Cijene takvih izvora napajanja su još nedavno bile visoke. Međutim, kako cijena elektroničkih elemenata naglo opada, danas je cijena asinkronog kaveznog motora s pretvaračem pristupačna, a pogotovo je ovakvo rješenje za upravljanje brzinom vrtnje prihvatljivo sa stajališta potrošnje električne energije i održavanja. Stoga asinkroni kavezni motor sve više istiskuje kolutne asinkrone i istosmjerne kolektorske motore iz reguliranih pogona.

3.8. ASINKRONI GENERATOR

Ako se asinkroni stroj spoji na krutu mrežu i vrti ga se vanjskim momentom, radit će nadsinkrono i predavati električnu energiju u mrežu. Na kružnom dijagramu se radna točka (na primjer točka **A**) nalazi na donjoj polovici kružnice (slika 3.75.).



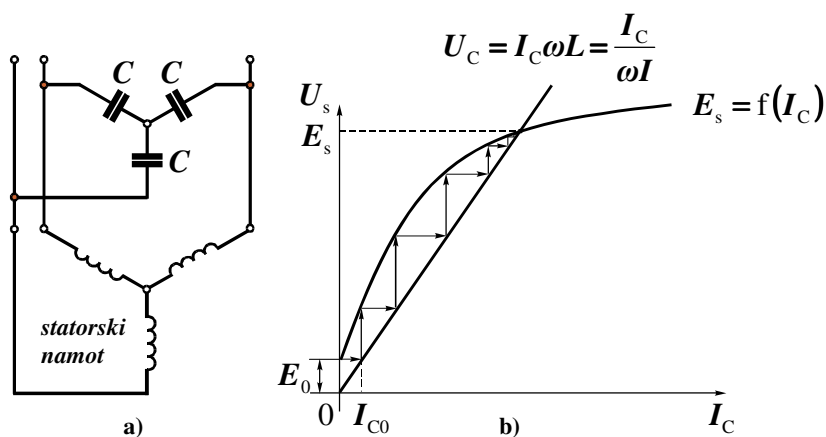
Slika 3.75.
Radna točka asinkronog generatora

Na slici se vidi da stroj i dalje uzima induktivnu energiju iz mreže (ponaša se kao prigušnica). Kod asinkronog generatora nema mogućnosti da se uzbuđom mijenja reaktivna snaga kako se to može kod sinkronog generatora. Budući da je ta struja potrebna da bi se stvorilo magnetsko polje u stroju, asinkroni stroj bez mreže ne može raditi kao generator, osim ako potrebnu induktivnu struju ne dobije iz kondenzatora. Na tom principu radi samouzbuđni asinkroni generator.

Rad samouzbuđnog asinkronog generatora je prikazan na slici 3.76.

Na namot statora su spojeni kondenzatori (u zvijezdu ili trokut). Remanentni magnetizam će izazvati napon E_0 koji će kroz kondenzatore i namot statora potjerati struju I_{C0} . Ova struja će uzrokovati veći napon itd., sve dok se napon ne ustali na vrijednosti E_s . Uz poznati induktivitet stroja L potreban se kapacitet dobije iz ravnotežne točke:

$$I_C \omega L = \frac{I_C}{\omega C} \quad (3.167.)$$



Slika 3.76. Samouzbudni asinkroni generator
a) priključak kondenzatora na statorski namot,
b) princip samouzbuđe.

Slijedi da mora biti ispunjeno:

$$LC = \frac{1}{\omega^2} \quad (3.168.)$$

Za frekvenciju $f = 50$ Hz proizlazi da je $LC \approx 10^{-5} \text{ s}^2$. Za iole značajniju snagu generatora potrebni su kondenzatori velikog kapaciteta koji su jako skupi.

Nakon što se generator uzbudi, može ga se teretiti. Pri induktivnom opterećenju će napon naglo padati, a pri kapacitivnom rasti. Uz konstantnu brzinu vrtnje stroja, pri opterećenju će se frekvencija također nešto mijenjati.

4. POPIS OZNAKA

A

- A** – oznaka faze statorskog namota
- oznaka ampermetra
- A** – radna točka u području generatorskog rada asinkronog motora
- a** – oznaka faze rotorskog namota

B

- B** – oznaka faze statorskog namota
- B** – radna točka u području protustrujnog kočenja asinkronog motora
- B** – magnetska indukcija [T]
- $\vec{B}$ – vektor magnetske indukcije, maksimalna vrijednost [T]
- B_d – magnetska indukcija u uzdužnoj osi stroja [T]
- $\vec{B}_d$ – vektor magnetske indukcije u uzdužnoj osi stroja [T]
- B_q – magnetska indukcija u poprečnoj osi stroja [T]
- $\vec{B}_q$ – vektor magnetske indukcije u poprečnoj osi stroja [T]
- B_{q1} – osnovni harmonik magnetske indukcije u poprečnoj osi stroja [T]
- b** – magnetska indukcija, trenutna vrijednost [T]
- b_{r1} – širina dionog vodiča u rotorskom utoru [m]
- b_{r2} – širina rotorskog utora [m]

C

- C** – oznaka faze statorskog namota
- C** – kapacitet kondenzatora [F]
- $\cos \varphi$ – faktor snage
- $\cos \varphi_0$ – faktor snage praznog hoda
- $\cos \varphi_k$ – faktor snage kratkog spoja
- $\cos \varphi_n$ – nazivni faktor snage

D

- d** – uzdužna os stroja
- d_r – vanjski promjer rotora [m]
- d_s – unutarnji promjer (provrt) statora [m]

E

- E_0 – početni, remanentni napon, efektivna vrijednost [V]
- E_A, E_B, E_C – inducirane elektromotorne sile u fazama trofaznog namota [V]

- $\underline{E}_A, \underline{E}_B, \underline{E}_C$ – fazori induciranih elektromotornih sila u fazama trofaznog namota [V]
 E_a – napon na sinkronoj reaktanciji, efektivna vrijednost [V]
 $\underline{E}_a$ – fazor napona na sinkronoj reaktanciji, efektivna vrijednost [V]
 E_f – fiktivna inducirana elektromotorna sila, fazna, efektivna vrijednost [V]
 $\underline{E}_f$ – fazor fiktivne inducirane elektromotorne sile, fazna, efektivna vrijednost [V]
 E_r – inducirana elektromotorna sila u fazi rotorskog namota, efektivna vrijednost [V]
 $\underline{E}_r$ – fazor inducirane elektromotorne sile u fazi rotorskog namota, efektivna vrijednost [V]
 E_r' – inducirana elektromotorna sila u fazi rotorskog namota, preračunata na statorsku stranu, efektivna vrijednost [V]
 $\underline{E}_r'$ – fazor inducirane elektromotorne sile u fazi rotorskog namota, sveden na statorsku stranu, efektivna vrijednost [V]
 E_{r0} – inducirana elektromotorna sila u fazi rotora u mirovanju, efektivna vrijednost [V]
 $\underline{E}_{r0}$ – fazor inducirane elektromotorne sile u fazi rotora u mirovanju, efektivna vrijednost [V]
 $\underline{E}_{r0}'$ – fazor inducirane elektromotorne sile u fazi rotora u mirovanju, sveden na statorsku stranu, efektivna vrijednost [V]
 E_s – inducirana elektromotorna sila u fazi statorskog namota, efektivna vrijednost [V]
 $\underline{E}_s$ – fazor inducirane elektromotorne sile u fazi statorskog namota, efektivna vrijednost [V]
 E_{smax} – inducirana elektromotorna sila u fazi statorskog namota, maksimalna vrijednost [V]
 e – inducirana elektromotorna sila, trenutna vrijednost [V]
 e_r – inducirana elektromotorna sila u fazi rotorskog namota, trenutna vrijednost [V]
 e_s – inducirana elektromotorna sila u fazi statorskog namota, trenutna vrijednost [V]

F

- $\vec{F}$ – vektor sile na vodič [N]
 F – sila [N]
 F_c – centrifugalna sila [N]
 f – oznaka frekvencmetra
 f – osnovna frekvencija u stroju [Hz]
 f_L – frekvencija napona mreže [Hz]
 f_n – nazivna frekvencija u stroju [Hz]
 f_r – frekvencija napona i struja u rotoru [Hz]

- f_{r0} – frekvencija napona i struja u rotoru koji miruje [Hz]
 f_s – frekvencija napona i struja u statoru [Hz]

G

- G** – točka prekretnog momenta u području generatorskog rada asinkronog motora

H

- H** – jakost magnetskog polja [A/m]
 $\vec{H}$ – vektor jakosti magnetskog polja [A/m]
 h – visina [m]
 h_{r1} – visina rotorskog utora [m]

I

- I** – struja, efektivna vrijednost [A]
I – struja statora, linijska, efektivna vrijednost [A]
 $\underline{I}_1, \underline{I}_2, \underline{I}_3$ – fazori struja u štapovima rotora, efektivna vrijednost [A]
 $\underline{I}_{12}, \underline{I}_{23}, \underline{I}_{21}', \underline{I}_{32}'$ – fazori struja u prstenima rotora, efektivna vrijednost [A]
 $\underline{I}_{0r}$ – fazor radne komponente struje u praznom hodu [A]
 I_a – struja u jednoj fazi armaturnog namota, efektivna vrijednost [A]
 I_C – struja kroz kondenzatore, efektivna vrijednost [A]
 I_{C0} – početna struja kroz kondenzatore, efektivna vrijednost [A]
 I_d – uzdužna komponenta fazne struje statora, efektivna vrijednost [A]
 $\underline{I}_d$ – fazor uzdužne komponente struje statora, efektivna vrijednost [A]
 I_f – uzbudna struja [A]
 I_{fn} – nazivna uzbudna struja [A]
 I_{f0} – uzbudna struja u praznom hodu [A]
 I_{fk} – uzbudna struja u kratkom spoju (uz statorsku struju jednaku nazivnoj) [A]
 I_k – struja kratkog spoja, linijska, efektivna vrijednost [A]
 I_{k0} – armaturna struja kratkog spoja uz uzbudnu struju praznog hoda i nazivni napon, efektivna vrijednost [A]
Im – imaginarna os u kompleksnoj ravnini
 I_n – nazivna struja, linijska, efektivna vrijednost [A]
 I_q – poprečna komponenta fazne struje statora, efektivna vrijednost [A]
 $\underline{I}_q$ – fazor poprečne komponente struje statora, efektivna vrijednost [A]
 I_r – fazna struja rotora, efektivna vrijednost [A]
 $\underline{I}_r$ – fazor fazne struje rotora, efektivna vrijednost [A]
 $\underline{I}_r'$ – fazor fazne struje rotora, svedene na statorsku stranu, efektivna vrijednost [A]
 $\underline{I}_{rg}'$ – fazor fazne struje rotora u generatorskom području rada, svedene na

- statorsku stranu, efektivna vrijednost [A]
 $\underline{I}_{rk}'$ – fazor struje faze rotora u kratkom spoju, svedene na statorsku stranu, efektivna vrijednost [A]
 $\underline{I}_{rk}$ – fazor struje faze rotora u kratkom spoju [A]
 I_s – fazna struja statora, efektivna vrijednost [A]
 $\underline{I}_s$ – fazor fazne struje statora, efektivna vrijednost [A]
 $\underline{I}_{sg}$ – fazor fazne struje statora u generatorskom području rada, efektivna vrijednost [A]
 I_{sk} – fazna struja statora u kratkom spoju, efektivna vrijednost [A]
 $\underline{I}_{sk}$ – fazor fazne struje statora u kratkom spoju, efektivna vrijednost [A]
 I_{smax} – fazna struja statora, maksimalna vrijednost [A]
 I_{sn} – fazna struja statora u nazivnom radu, efektivna vrijednost [A]
 I_μ – fazna struja magnetiziranja, efektivna vrijednost [A]
 $\underline{I}_\mu$ – fazor fazne struje magnetiziranja, efektivna vrijednost [A]
 i – struja, trenutna vrijednost [A]
 i_s – struja u fazi statorskog namota, trenutna vrijednost [A]
 i_μ – struja magnetiziranja, trenutna vrijednost [A]

J

- J – gustoća struje [A/m²],
 – moment inercije [kgm²]

K

- K – točka kratkog spoja
 K – oznaka stezaljke rotorskog namota
 K_T – konstanta stroja [m² min⁻¹]
 k_r – umnožak broja faza, broja utora, faktora namota rotora i konstante
 k_s – umnožak broja faza, broja utora, faktora namota statora i konstante
 k_{TG} – konstanta tahogeneratora [Vmin]
 k_{Ts} – konstanta momenta za stator [min]
 k_w – faktor namota
 k_{wr} – faktor namota rotora
 k_{ws} – faktor namota statora
 k_φ – omjer rasipne reaktancije i radnog otpora faze rotora

L

- L – oznaka stezaljke rotorskog namota,
 – induktivitet [H]
 $L1, L2, L3$ – oznake sabirnica električne mreže
 $L_{\sigma ab0}$ – rasipni induktivitet štapa bez potiskivanja struje [H]
 $L_{\sigma ab1...} L_{\sigma ab5}$ – rasipni induktiviteti dionih vodiča u rotorskom utoru [H]
 $L_{\sigma ab-}$ – rasipni induktivitet štapa s potiskivanjem struje [H]

- L_{or} – rasipni induktivitet faze rotora [H]
 L_{os} – rasipni induktivitet faze statora [H]
 $\vec{l}$ – vektor duljine magnetske silnice [m],
 – vektor duljine vodiča [m]
 l – duljina stroja [m],
 – duljina magnetske silnice [m]
 – krak sile [m]
 l_r – duljina paketa rotora [m]
 l_s – duljina paketa statora [m]

M

- M** – točka prekretnog momenta

 M – oznaka stezaljke rotorskog namota
 m – broj faza mreže,
 – broj faza namota
 m_r – broj faza rotorskog namota
 m_{rtc} – masa koja rotira [kg]
 m_s – broj faza statorskog namota

N

- N – oznaka sjevernog magnetskog pola stroja
 $\mathbf{N}$ – radna točka stroja (obično nazivna)
 N – broj okretaja zvijezde pri mjerenju klizanja
 N_a – broj serijski vezanih zavoja jedne faze armaturnog namota
 N_r – broj serijski vezanih zavoja jedne faze rotorskog namota
 N_s – broj serijski vezanih zavoja jedne faze statorskog namota
 n – indeks za nazivni rad
 n – brzina vrtnje [o/min]
 n_m – prekretna brzina vrtnje [o/min]
 n_n – nazivna brzina vrtnje [o/min]
 n_{or} – brzina okretnog polja rotora [o/min]
 n_{or0} – brzina okretnog polja rotora koji miruje [o/min]
 n_{rel} – relativna brzina vrtnje rotora u odnosu na sinkronu brzinu [o/min]
 n_s – sinkrona brzina vrtnje [o/min]
 – brzina resultantnog okretnog protjecanja [o/min]

O

- O** – točka praznog hoda stroja

P

- P – izlazna radna snaga (koju stroj daje u mrežu kao generator ili preko osovine radnom mehanizmu kao motor) [W]
 P_0 – snaga praznog hoda [W]
 P_0' – uži gubici praznog hoda [W]
 P_d – ukupni gubici u stroju [W]
 P_{dad} – gubici uslijed viših harmonika magnetskog polja [W]
 P_{dad0} – gubici uslijed viših harmonika magnetskog polja u praznom hodu [W]
 P_{dmec} – mehanički gubici uslijed ventilacije i trenja u ležajevima [W]
 P_{dr} – gubici u radnim otporima u rotorskom krugu [W]
 P_{el} – električna snaga stroja [W]
 P_{Fe} – gubici u željezu [W]
 P_{Fer} – gubici u željezu rotora [W]
 P_{Fes} – gubici u željezu statora [W]
 P_{in} – radna snaga koju stroj uzima iz mreže (motor) ili preko osovine (generator) [W]
 P_{inel} – električna radna snaga koju stroj uzima iz mreže [W]
 P_{inmec} – mehanička snaga koju stroj uzima preko osovine [W]
 P_k – snaga kratkog spoja [W]
 P_m – maksimalna snaga asinkronog motora [W]
 P_{mec} – mehanička snaga na osovini stroja [W]
 P_n – nazivna snaga motora [W]
 P_{Rad} – gubici snage u vanjskim otporima uključenima u rotorski krug [W]
 P_{wr} – gubici snage u rotorskom namotu [W]
 P_{wrk} – gubici snage u rotorskom namotu u kratkom spoju [W]
 P_{ws} – gubici snage u statorskom namotu [W]
 P_{ws0} – gubici snage u statorskom namotu u praznom hodu [W]
 P_{wsk} – gubici snage u statorskom namotu u kratkom spoju [W]
 P_{δ} – snaga u zračnom rasporu stroja [W]
 $P_{\delta k}$ – snaga u zračnom rasporu stroja u kratkom spoju [W]
 p – broj pari polova

Q

- Q – jalova snaga [var]
 Q_{cap} – kapacitivna jalova (reaktivna) snaga [var]
 Q_{ind} – induktivna jalova (reaktivna) snaga [var]
 Q_r – broj utora rotora
 q – poprečna os stroja
 q – naboj [C]

R

- R – radni otpor otpornika [Ω]

- R_{ab0} – radni otpor rotorskog štapa bez potiskivanja struje $[\Omega]$
 $R_{ab1...} R_{ab5}$ – radni otpori dionih vodiča u rotorskom utoru $[\Omega]$
 $R_{ab\sim}$ – radni otpor rotorskog štapa s potiskivanjem struje $[\Omega]$
 R_{ad} – dodatni (vanjski) radni otpor u fazi rotora $[\Omega]$
 R_{damp} – radni otpor prigušnog namota po fazi $[\Omega]$
 R_e – realna os u kompleksnoj ravnini
 R_f – radni otpor uzbuđnog namota po fazi $[\Omega]$
 R_{Fe} – nadomjesni otpor jedne faze za proračun gubitaka u željezu statora $[\Omega]$
 R_k – radni otpor po fazi asinkronog motora u kratkom spoju $[\Omega]$
 R_{Ls} – radni otpor stezaljki statorskog namota $[\Omega]$
 R_r – ukupni radni otpor jedne faze rotora $[\Omega]$
 R_r' – ukupni radni otpor jedne faze rotora, sveden na statorsku stranu $[\Omega]$
 R_{r0} – radni otpor faze namota rotora $[\Omega]$
 R_s – radni otpor faze statorskog namota $[\Omega]$
 R_{ϑ} – otpor stezaljki namota nakon pokusa zagrijavanja $[\Omega]$
 $R_{\vartheta a}$ – otpor stezaljki namota izmjeren prije pokusa zagrijavanja (na temperaturi okoline) $[\Omega]$

S

- S – oznaka južnog magnetskog pola stroja
 S – prividna snaga koju stroj daje u mrežu $[VA]$,
 S_{in} – prividna snaga koju stroj uzima iz mreže $[VA]$
 S_n – nazivna snaga sinkronog generatora $[VA]$
 s – klizanje
 s_0 – klizanje za radnu točku bez dodatnog otpora u rotorskom krugu
 s_a, s_b, s_c – klizanja za radne točke s dodatnim otporima u rotorskom krugu
 s_m^* – prekretno klizanje s uračunatom impedancijom statorskog namota
 s_m – prekretno klizanje

T

- T – moment stroja $[Nm]$,
 – mjereno vrijeme $[s]$
 T_A – moment asinkronog stroja u području generatorskog rada $[Nm]$
 T_B – moment asinkronog stroja u području protustrujnog kočenja $[Nm]$
 T_d' – prijelazna ili tranzijentna vremenska konstanta $[s]$
 T_d'' – početna ili subtranzijentna vremenska konstanta $[s]$
 T_e – elektromagnetski moment stroja $[Nm]$
 T_f – elektromagnetski moment stroja uslijed uzbude $[Nm]$
 T_{imp} – trajanje svjetlosnog impulsa stroboskopa $[s]$
 T_{in} – pogonski moment dinamo-vage $[Nm]$
 T_k – moment u kratkom spoju motora $[Nm]$

- T_k^* – moment u kratkom spoju motora s uračunatom impedancijom statorskog namota [Nm]
 T_L – moment tereta motora [Nm]
 T_m – prekretni moment asinkronog motora [Nm]
 T_m^* – prekretni moment asinkronog motora s uračunatom impedancijom statorskog namota [Nm]
 T_{max} – maksimalni moment sinkronog stroja [Nm]
 T_{mec} – moment na osovini [Nm]
 T_{mg} – prekretni moment asinkronog stroja u području generatorskog rada [Nm]
 T_n – nazivni moment motora [Nm]
 T_{pm} – pogonski (prime mover) moment generatora [Nm]
 T_r – moment koji stroj razvija na rotoru [Nm]
 T_{rel} – reluktantni moment sinkronog stroja [Nm]
 T_s – moment koji stroj razvija na statoru [Nm]
 t – vrijeme [s]

U

- U – oznaka stezaljke stroja
 U – statorski napon, linijski, efektivna vrijednost [V]
 $\underline{U}$ – fazor statorskog napona, linijski, efektivna vrijednost [V]
 U_A, U_B, U_C – fazni naponi mreže [V]
 $\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$ – fazori faznih napona mreže [V]
 $\underline{U}_{ab}$ – fazor napona na dionim vodičima u rotorskom utoru [V]
 U_C – napon na kondenzatoru [V]
 U_f – uzbudni napon [V]
 U_{fn} – nazivni uzbudni napon [V]
 U_k – napon kratkog spoja, linijski, efektivna vrijednost [V]
 U_L – napon napajanja (mreže), linijski, efektivna vrijednost [V]
 $\underline{U}_L$ – fazor napona napajanja (mreže), linijski, efektivna vrijednost [V]
 U_n – nazivni napon, linijski, efektivna vrijednost [V]
 U_{ph} – napon napajanja (mreže), fazni, efektivna vrijednost [V]
 $\underline{U}_{ph}$ – fazor napona napajanja (mreže), fazni, efektivna vrijednost [V]
 U_r – rotorski napon, fazni, efektivna vrijednost [V]
 $\underline{U}_r$ – fazor rotorskog napona, efektivna (fazna) vrijednost [V]
 U_s – statorski napon, fazni, efektivna vrijednost [V]
 $\underline{U}_s$ – fazor statorskog napona, efektivna (fazna) vrijednost [V]
 U_{sn} – statorski napon u nazivnom radu, fazni, efektivna vrijednost [V]
 u – statorski napon, linijski, trenutna vrijednost [V],
 – napon tahogeneratora, trenutna vrijednost [V],
 u_R – napon na otporniku, trenutna vrijednost [V]
 u_r – rotorski napon, fazni, trenutna vrijednost [V]
 u_s – statorski napon, fazni, trenutna vrijednost [V]

V

- V – oznaka voltmetra
 V_0 – oznaka nul-voltmetra
 V – oznaka stezaljke stroja,
 – volumen stroja [m^3]
 v_r – obodna brzina rotora [m/s]

W

- W – oznaka vatmetra
 W – predana (izlazna) energija [Ws],
 – oznaka stezaljke stroja,
 W_{acc} – akumulirana energija [Ws]
 W_d – toplotna energija usljed gubitaka snage u stroju [Ws]
 W_{in} – primljena (ulazna) energija [Ws]

X

- X_d – uzdužna sinkrona reaktancija [Ω]
 X_d' – prijelazna reaktancija [Ω]
 X_d'' – početna reaktancija [Ω]
 X_h – sinkrona reaktancija u užem smislu (bez rasipne reaktancije statora),
 fazna vrijednost [Ω]
 X_k – reaktancija po fazi asinkronog motora u kratkom spoju [Ω]
 X_m – glavna (međuinduktivna) reaktancija po fazi [Ω]
 X_q – poprečna sinkrona reaktancija [Ω]
 X_s – sinkrona reaktancija, fazna vrijednost [Ω]
 X_{sr} – relativna sinkrona reaktancija [Ω]
 $X_{\sigma ab1}^* \dots X_{\sigma ab5}^*$ – stvarne rasipne reaktancije dionih vodiča u rotorskom utoru
 [Ω]
 $X_{\sigma damp}$ – rasipna reaktancija prigušnog namota po fazi [Ω]
 $X_{\sigma f}$ – rasipna reaktancija uzbuđenog namota po fazi [Ω]
 $X_{\sigma r}$ – rasipna reaktancija (induktivni otpor) faze rotorskog namota, određena za
 nazivnu frekvenciju [Ω]
 $X_{\sigma r}'$ – rasipna reaktancija (induktivni otpor) faze rotorskog namota, svedena na
 statorsku stranu [Ω]
 $X_{\sigma r}^*$ – stvarna rasipna reaktancija (induktivni otpor) faze rotorskog namota [Ω]
 $X_{\sigma s}$ – rasipna reaktancija (induktivni otpor) faze statorskog namota, određena
 za nazivnu frekvenciju [Ω]

Y

- y – korak namota

Z

- Z_k – impedancija faze asinkronog motora u kratkom spoju, modul $[\Omega]$
 $\underline{Z}_k$ – impedancija faze asinkronog motora u kratkom spoju, kompleksna vrijednost $[\Omega]$
 Z_r – impedancija faze rotorskog kruga, modul $[\Omega]$
 $\underline{Z}_r$ – impedancija faze rotorskog kruga, kompleksna vrijednost $[\Omega]$
 $\underline{Z}_{r0}$ – impedancija faze rotorskog namota, kompleksna vrijednost $[\Omega]$
 $\underline{Z}_s$ – impedancija faze statora, kompleksna vrijednost $[\Omega]$

A

- α – kut zakreta osi faze rotorskog namota prema osi faze statorskog namota, električki $[\text{rad}]$
 α_{Cu} – temperaturni koeficijent materijala namota $[\text{K}^{-1}]$

B

- β – kut između vektora indukcije i armaturnog protjecanja (bez uzbude na rotoru), električki $[\text{rad}]$

 Δ

- ΔU – promjena napona $[\text{V}]$
 ΔI_f – promjena uzbudne struje $[\text{A}]$
 $\Delta \vartheta$ – povišenje temperature namota u odnosu na temperaturu okoline $[\text{°C}]$
 δ_r – kut opterećenja rotora, električki $[\text{°}]$
 δ_s – kut opterećenja statora, električki $[\text{°}]$

E

- η – stupanj djelovanja (omjer predane i primljene radne snage) stroja
 η_m – maksimalni stupanj djelovanja asinkronog motora

 Θ

- θ – protjecanje, ukupno (rezultantno) $[\text{A}]$
 $\vec{\theta}$ – vektor ukupnog (rezultantnog) protjecanja $[\text{A}]$
 θ_A – protjecanje jedne faze (faze A) $[\text{A}]$
 θ_a – ukupno protjecanje armature $[\text{A}]$
 $\vec{\theta}_a$ – vektor protjecanja armature $[\text{A}]$
 $\vec{\theta}_{an}$ – vektor protjecanja armature u nazivnom radu $[\text{A}]$
 $\vec{\theta}_{ak}$ – vektor protjecanja armature u kratkom spoju $[\text{A}]$

- $\vec{\Theta}_d$ – vektor komponente ukupnog protjecanja u uzdužnoj osi stroja [A]
 Θ_d – komponenta ukupnog protjecanja u uzdužnoj osi stroja [A]
 Θ_f – uzbudno protjecanje [A]
 $\vec{\Theta}_f$ – vektor uzbudnog protjecanja [A]
 Θ_{f0} – uzbudno protjecanje u praznom hodu [A]
 $\vec{\Theta}_{f0}$ – vektor uzbudnog protjecanja u praznom hodu [A]
 Θ_{fk} – uzbudno protjecanje u kratkom spoju [A]
 $\vec{\Theta}_{fk}$ – vektor uzbudnog protjecanja u kratkom spoju [A]
 Θ_{fn} – uzbudno protjecanje u nazivnom radu [A]
 $\vec{\Theta}_{fn}$ – vektor uzbudnog protjecanja u nazivnom radu [A]
 Θ_q – komponenta ukupnog protjecanja u poprečnoj osi stroja [A]
 $\vec{\Theta}_q$ – vektor komponente ukupnog protjecanja u poprečnoj osi stroja [A]
 Θ_r – protjecanje rotorskog namota asinkronog stroja [A]
 $\vec{\Theta}_r$ – vektor protjecanja rotorskog namota asinkronog stroja [A]
 Θ_s – protjecanje statorskog namota asinkronog stroja [A]
 $\vec{\Theta}_s$ – vektor protjecanja statorskog namota asinkronog stroja [A]

K

- κ – električna vodljivost materijala [S]

M

- μ_0 – permeabilitet zraka [Vs/A/m]

Ξ

- ξ – veličina za račun potiskivanja struje

T

- τ_p – polni korak [m]

Φ

- Φ – magnetski tok po polu, maksimalna vrijednost [Wb]
 $\Phi(t)$ – magnetski tok, vremenski ovisan [Wb]
 Φ_{gl} – glavni magnetski tok [Wb]
 $\underline{\Phi}_m$ – fazor maksimalne vrijednosti magnetskog toka po polu [Wb]
 Φ_t – trenutna vrijednost magnetskog toka po polu [Wb]
 Φ_σ – rasipni magnetski tok [Wb]

- φ_0 – fazni pomak između fazora statorskog napona i struje u praznom hodu [rad]
 φ_n – fazni pomak između fazora statorskog napona i struje u nazivnom radu [rad]
 φ_r – fazni pomak između fazora rotorskog napona i struje [rad]
 φ_{rk} – fazni pomak između fazora rotorskog napona i struje u kratkom spoju [rad]
 φ_s – fazni pomak između fazora statorskog napona i struje [rad]
- Ω
- Ω_m – mehanička kutna brzina [s^{-1}]
 Ω_{ms} – mehanička sinkrona kutna brzina [s^{-1}]
 ω – električna kutna brzina (kružna frekvencija) [s^{-1}]
 ω_r – rotorska kružna frekvencija [s^{-1}]
 ω_s – statorska kružna frekvencija [s^{-1}]

Indeksi

- $\sim$ – izmjenični
 0 – prazni hod
 0 – u mirovanju
 1 – 1. harmonički član
 a – armatura
 acc – akumulirani
 ad – dodatni
 c – centrifugalni
 C – kondenzator
 cap – kapacitivno
 Cu – bakar
 d – uzdužna os stroja
 d – gubitak, rasipanje
 d – dinamički
 damp – prigušno
 e – elektromagnetski
 el – električni
 f – fiktivni
 f – uzbudni
 Fe – željezo
 g – generatorski
 gl – glavni
 h – glavni

imp	– impuls
in	– ulazni
ind	– induktivni
k	– kratki spoj, kratkospojni
L	– napajanje (mreža)
L	– opterećenje
m	– prekretni
m	– maksimalni
m	– međusobni, zajednički
m	– mehanički
max	– maksimalni
mec	– mehanički
n	– nazivni
p	– polni
ph	– fazni
pm	– pogonski (prime mover)
q	– poprečna os stroja
r	– rotor
r	– radna komponenta
r	– relativni
R	– otpor
rel	– relativni
rel	– reluktantni
rtc	– rotirajući
s	– stator
s	– sinkroni
T	– moment
t	– trenutni
TG	– tahogeneratorski
w	– namotni
δ	– zračni raspor u magnetskom krugu
μ	– magnetiziranja
σ	– rasipni
ϑ	– termički

5. LITERATURA

- [1] R. Wolf, Osnove električnih strojeva, Školska knjiga, Zagreb, 1995.
- [2] L. M. Piotrovskij, Električki strojevi, Tehnička knjiga, Zagreb, 1967.
- [3] Z. Sirotić, Z. Maljković, Sinkroni strojevi, Element, Zagreb, 1996.
- [4] B. Jurković, Z. Smolčić, Kolektorski strojevi, Školska knjiga, Zagreb, 1991.
- [5] B. Frančić, M. Jadrić, Dinamika električnih strojeva, Graphis, Zagreb, 1997.
- [6] R. Wolf, Ispitivanje električnih strojeva II i III, skripta, Sveučilište u Zagrebu, Elektrotehnički fakultet, Zagreb, 1971.
- [7] I. Bašić, Električni strojevi – Upute za laboratorijske vježbe, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Elektrotehnički fakultet, Osijek, 2000.
- [8] S. Štefanko, M. Pužar, Mjerenje krivulje momenta asinkronih motora iz zaleta, Automatika, Zagreb, 1992., 1-2, 41-45.
- [9] B. Jurković, Elektromotorni pogoni, Školska knjiga, Zagreb, 1978.
- [10] P. L. Alger, Induction machines, Their Behavior and Uses, Gordon and Breach Science Publishers, New York, 1970.
- [11] G. R. Slemon, A. Straughen, Electric Machines, Addison-Wesley Publishing Company, USA, 1980.
- [12] Končar-GIM katalog
- [13] Končar-MES katalog
- [14] IEC 60034 standardi

6. KAZALO

A

Ampereov zakon protjecanja 2
asinkroni generator 168
asinkroni momenti 133
asinkroni stroj 84
asinkroni zalet 61

B

beskontaktna uzbuda 19

D

Dahlanderov spoj 161
dijagram toka snage 111
dizelski generator 10

E

električna snaga sinkronog stroja 48
elektromagnetski moment 40
energetska bilanca 110
energetska ravnoteža 39

F

Faradayev zakon 2
fiktivna inducirana EMS 36

G

generator 1
generatorski sustav prikazivanja 60
generatorsko kočenje asinkronim motorom 156
granica minimalne uzbudne struje 76
granica stabilnosti 74
granica zagrijanja čeonog prostora 76
granica zagrijanja rotorskog namota 74, 76
granica zagrijanja statorskog namota 74, 76
gubici u praznom hodu 138

gubici u statorskom namotu 139

H

hidrogenerator 10

I

inducirana EMS po fazi 28
inducirana EMS rotora u mirovanju 100
ispitivanja sinkronih strojeva pri gradnji 65
ispitivanje asinkronih strojeva tijekom proizvodnje 135
izvedbeni oblici 92

J

jednofazna nadomjesna shema asinkronog motora 113

K

karakteristika faktora snage kratkog spoja 141
karakteristika faktora snage praznog hoda 137
karakteristika kratkog spoja sinkronog generatora 34, 69
karakteristika momenta asinkronog stroja 119, 122, 125, 150
karakteristika poteznog momenta 142
karakteristika praznog hoda 67
karakteristika struje 116
karakteristika struje kratkog spoja 141
karakteristika zasićenja 136
karakteristike opterećenja asinkronog motora 144
kavezni rotor 89
klizanje 99
kočenje asinkronim motorom 156

kočenje istosmjernom strujom 158
kolutni asinkroni motor 87
kompenzator 10
kratki spoj 32
krivulja momenta 42
krivulje regulacije 71
kruta mreža 53
kružni dijagram 102
kut opterećenja 31, 41

L

lijevi smjer vrtnje 22
linearizirana karakteristika praznog
hoda 35

M

magnetska karakteristika sinkronog
generatora 29
maksimalna snaga turbine 76
mehanička snaga 41
mehanički gubici 4
mjerenje klizanja 147
mjerenje momenta 148
mjerenje zagrijavanja 153
motor 1

N

nadomjesna shema asinkronog
motora u kratkom spoju 115
nadomjesna shema generatora pri
udarnom kratkom spoju 82
nadomjesna shema rotora 101
nadomjesna shema sinkronog stroja
37

O

oblici rotorskih utora 88
oblici statorskih utora 11
okretno protjecanje mirnog rotora
96
opterećenje 30
osi namota i rotora 22

P

područje rada asinkronog stroja
100, 124
pogonska karta 76
pokretanje kolutnih motora 155
pokretanje zvijezda-trokut 154
pokus udarnog kratkog spoja 79
potiskivanje struje 128
prazni hod 28
predana snaga 2
preračunavanje na statorsku stranu
109, 112
presjek pola s uzбудnim namotom
14
pričvršćenje polova na rotor 14
prigušni kavez 14
primljena snaga 2
protjecanje jedne faze 22
protustrujno kočenje asinkronim
motorom 157
provjera tehnoloških postupaka 66

R

ravnoteža protjecanja 55
razvijena shema namota 12
regulacija brzine vrtnje promjenom
frekvencije 165
regulacija brzine vrtnje promjenom
napona 163
regulacija brzine vrtnje promjenom
otpota u rotorskom krugu 162
relativna vrijednost sinkrone
reaktancije 36, 39
reluktantni moment 46
reverziranje 159
rotor 3
rotorska struja svedena na stator
109

S

shematski prikaz namota 21
sinkrona brzina vrtnje 4

sinkrona reaktancija 35, 38
sinkroni momenti 134
sinkroni motor 11, 59
sinkroni stroj s cilindričnim rotorom 8
sinkroni stroj s istaknutim polovima 7

sinkroni zalet 61
sinkronizacija 62
statička stabilnost 133
statička uzbuda 18
stator 3
stupanj djelovanja 2
svijetli spoj za sinkronizaciju 64

Š

Švedski dijagram 72

T

tamni spoj za sinkronizaciju 65
turbogenerator 9

U

udarni kratki spoj 79
ulazna kontrola 66
utjecaj istaknutih polova 44
utjecaj prigušnog kaveza 50
utjecaj rotorske impedancije na moment 126
uzbudni namot 13
uzbudni sustav s istosmjernim uzбудnikom 18

V

vektorsko-fazorski dijagram 23
vibracije 134
višebrzinski motori 160
viši harmonici 132
V-krivulje 74

Z

zalet s pomoćnim motorom 61
zračni raspor 3