

Predmet: ENERGETSKA ELEKTRONIKA
Predmetni nastavnik: Dr Nándor Burány
Asistent: Mr Szabolcs Divéki

5. semestar
Broj časova: 2+2

4. GLAVA

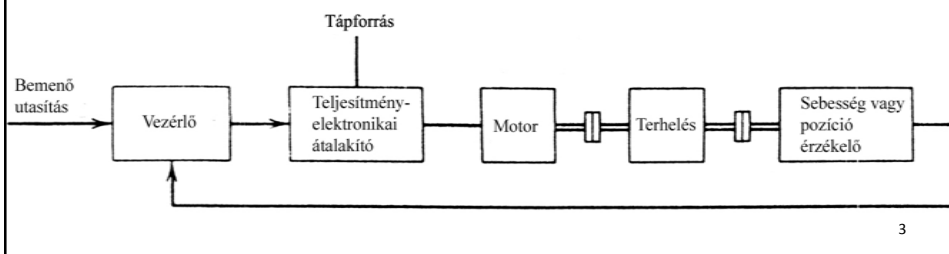
ELEKTROMOTORNI POGONI

- Široki opseg:
 - W...MW,
 - precizno pozicioniranje...gruba regulacija brzine.
- Vrste motora:
 - jednosmeni motori,
 - asinhroni motori,
 - sinhroni motori,
 - koračni motori.

2

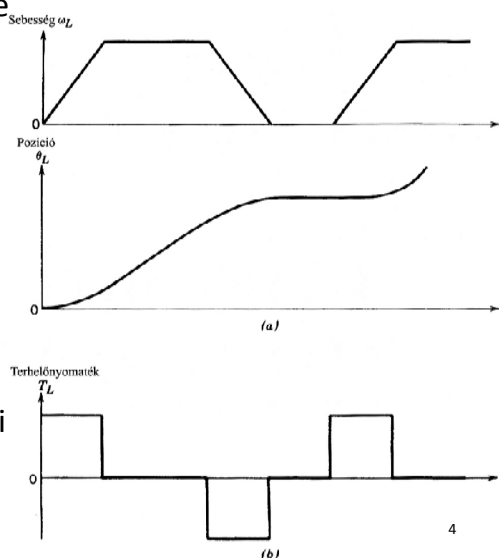
4.a ELEKTROMOTORNI POGONI - UVOD - BLOK ŠEMA

- Možemo regulisati brzinu ili poziciju.
- Nije obavezno koristiti detektor brzine/pozicije.
- Ulaznu komandu može da zadaje ručnovalac ili računar koji vodi proces.



4.b ELEKTROMOTORNI POGONI - UVOD - POLAZNE OSNOVE ZA PROJEKTOVANJE

- Treba upoznati opterećenje (inercija, smer rotacije, brzina, moment, dinamika, da li ima kočenja...).
- Na osnovu gornjih podataka može se odrediti koje su potrebe za obrtnim momentom.
- Na osnovu zahtevanog momenta mogu se odrediti struje motora.
- Na osnovu struja može se proceniti grejanje.



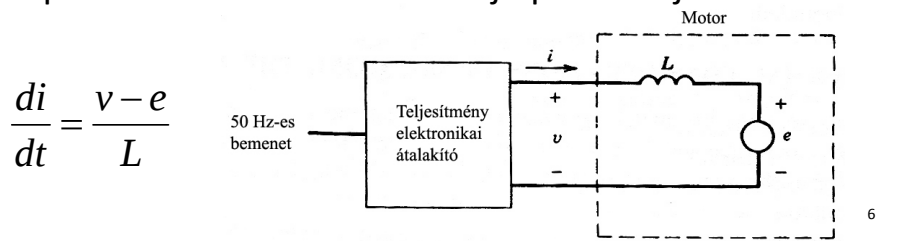
4.c ELEKTROMOTORNI POGONI - UVOD - DIMENZIONISANJE UREĐAJA ENERGETSKE ELEKTRONIKE

- Uređaj energetske elektronike je redovno sa naponskim izlazom.
- Model motora se sastoji od induktivnosti, otpornosti i indukovane elektromotorne sile.
- U zavisnosti od primenjenog napona, dolazi do porasta ili opadanja struje.
- Momenat je obično srazmeran sa strujom.
- Motor se obično greje sporije od uređaja energetske elektronike - zato treba da se dimenzioniše na vršnu struju motora.

5

4.d ELEKTROMOTORNI POGONI - UVOD - REGULACIJA STRUJE

- Za brzu regulaciju struje (servo pogoni) potrebno je dovesti na motor znatno veći napon od indukovane elektromotorne sile.
- Najbolje je da induktivnost namotaja bude što manja.
- Da ne bi dobili preveliku talasnost struje, potrebno je primeniti što veću frekvenciju prekidanja.



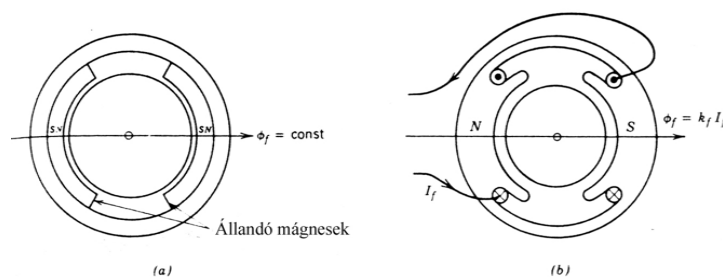
4.1. JEDNOSMERNI POGONI

- Prvo su konstruisani i primenjivani jednosmerni motori.
- I u regulisanim pogonima prvo su primenjivani jednosmerni motori.
- Imaju odlične pogonske karakteristike.
- Troškovi održavanja su veći nego kod drugih motora.

7

4.1.1.a KONSTRUKCIJA I MODELOVANJE JEDNOSMERNIH MOTORA - FLUKS I MOMENAT

- Stator formira statičko magnetno polje (Φ_f).
- Dva rešenja: pobuda sa stalnim magnetima ili sa pobudnim namotajem.
- Dobija se obrtni moment: $T_{em} = k_f \Phi_f i_a$



8

4.1.1.b KONSTRUKCIJA I MODELOVANJE JEDNOSMERNIH MOTORA - NAPON, STRUJA, SNAGA

- Rotor se okreće u polju statora i indukuje se napon (elektromotorna sila): $e_a = k_e \Phi_f \omega_m$
- Primljena električna snaga je:

$$P_e = e_a i_a = k_e \Phi_f \omega_m i_a$$

- Mehanička snaga je:

$$P_m = T_{em} \omega_m = k_f \Phi_f \omega_m i_a$$

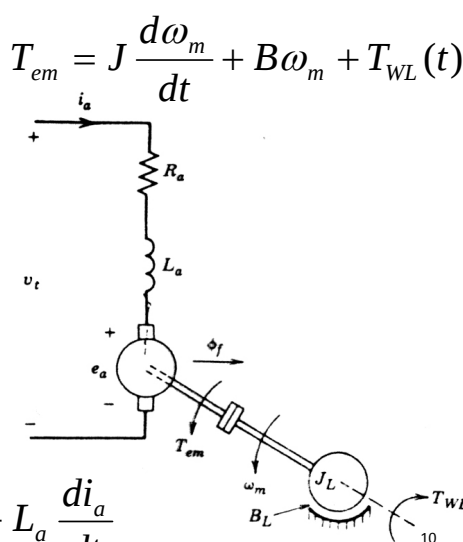
- Ako zanemarimo gubitke:

$$P_e = P_m \quad k_e = k_f$$

9

4.1.1.c KONSTRUKCIJA I MODELOVANJE JEDNOSMERNIH MOTORA - MEHANIČKI MODEL

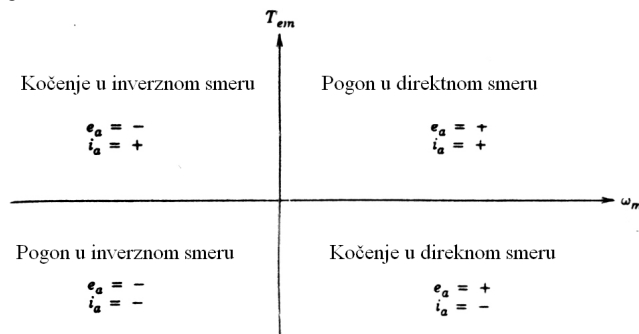
- Elektromagnetni obrtni momenat drži ravnotežu sa mehaničkim opterećenjem:
- Napon priključen na rotor (armaturu) drži ravnotežu sa induktivnim i otpornim padovima napona i sa indukovanom elektromotornom silom:



$$v_t = e_a + R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt}$$

4.1.1.d KONSTRUKCIJA I MODELOVANJE JEDNOSMERNIH MOTORA - REŽIMI RADA

- Promenom polariteta priključenog napona može se promeniti smer rotacije.
- Pri promeni smera struje obrne se smer momenta: dolazi do (generatorskog) kočenja. U takvim situacijama indukovani napon je veći od priključenog napona.



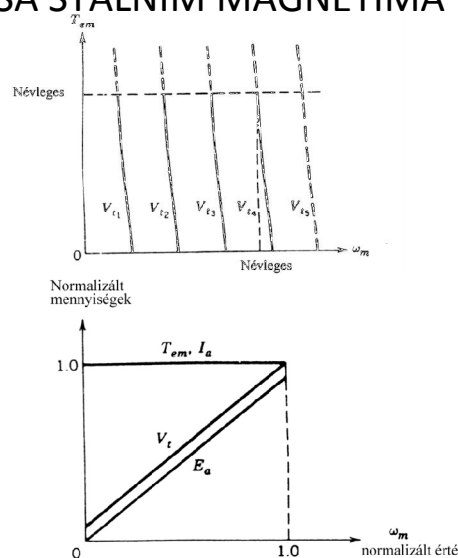
11

4.1.1.e KONSTRUKCIJA I MODELOVANJE JEDNOSMERNIH MOTORA - KARAKTERISTIKE MOTORA SA STALNIM MAGNETIMA

- Pri konstantnom priključenom naponu broj obrtaja motora je približno konstantan ali pomalo pada, srazmerno sa veličinom opterećenja:

$$\omega_m = \frac{1}{k_E} \left(V_t - \frac{R_a}{k_T} T_{em} \right)$$

- Jedinstveni normalizovani dijagram prikazuje zavisnost V_t i E_a od broja obrtaja, pri konstantnom momentu i konstantnoj struji rotora.

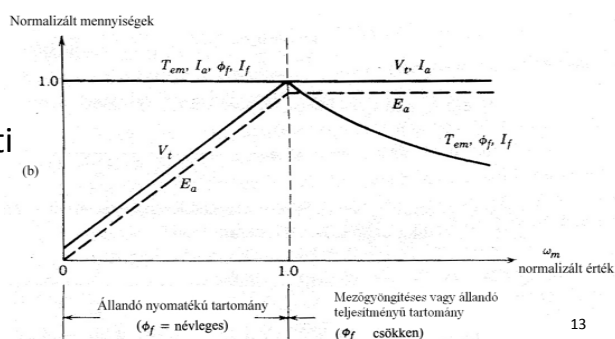


4.1.1.f KONSTRUKCIJA I MODELOVANJE JEDNOSMERNIH MOTORA - KARAKTERISTIKE MOTORA SA NEZAVISNOM POBUDOM

- Može se regulisati pobudna struja i time i fluks statora.
- Do nazivnog broja obrtaja redovno je fluks konstantan.
- Formula za broj obrtaja:
- U oblasti

$$\omega_m = \frac{1}{k_e \Phi_f} \left(V_t - \frac{R_a}{k_t \Phi_f} T_{em} \right)$$

slabljenja polja
smanjenjem
pobudne struje
može se povećati
broj obrtaja (uz
smanjenje
momenta.)



4.1.2. PRETVARAČI ZA POGON JEDNOSMERNIH MOTORA - OSNOVI

Zadaci su:

- rad u jednom, dva ili četiri kvadranta (potrebna je promena polariteta priključenog napona i/ili struje).
- potrebno je obezbediti regulaciju i ograničenje struje motora (redovno je potrebno obezbediti struju koja je nekoliko puta veća od nazivne struje motora),
- potrebno je ostvariti malu talasnost.

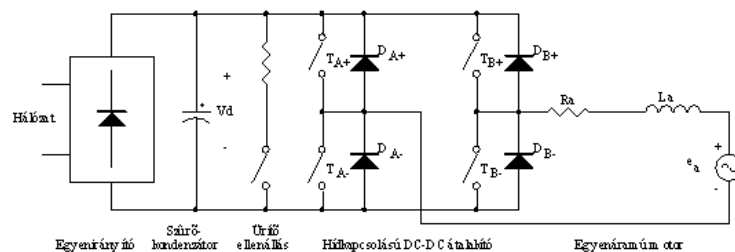
4.1.2.a PRETVARAČI ZA POGON JEDNOSMERNIH MOTORA - MOGUĆA REŠENJA

- Tiristorski usmerači: ima mogućnosti regulacije, dobar je stepen iskorišćenja, upravljanje je prosto, velika je talasnost.
- Buck pretvarač (obično bez LC filtra): ostvaruje jednokvadrantni pogon.
- Polumostni pretvarač: pogon i kočenje u jednom smeru.
- Mostni pretvarač: omogućava četvorokvadrantni rad.

15

4.1.2.b PRETVARAČI ZA POGON JEDNOSMERNIH MOTORA - MOSTNI PRETVARAČI - POGON ZA MOTORE SA STALNIM MAGNETIMA ILI SA NEZAVISNOM POBUDOM

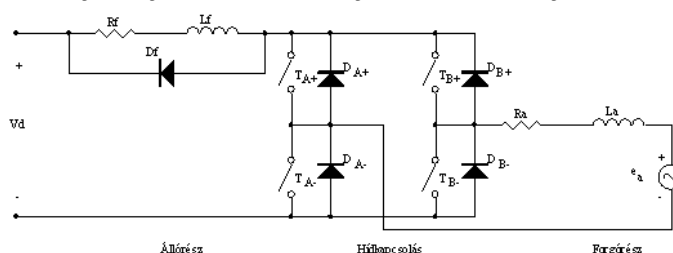
- Most se obično napaja iz **mrežnog usmerača**.
- **Peglanje izlazne struje** rešava induktivnost namotaja motora.
- Radi smanjenja talasnosti struje motora treba primeniti **unipolarni PWM** (talasnost povećava gubitke!).
- Usmerač u većini slučajeva nije u stanju da vraća energiju u mrežu - zato je potrebno primeniti **otpornik za kočenje**.



16

4.1.2.c PRETVARAČI ZA POGON JEDNOSMERNIH MOTORA - MOSTNI PRETVARAČ - POGON MOTORA SA REDNOM POBUDOM

- **Redni motor daje veliki momenat** pri startovanju - važna karakteristika za električnu vuču.
- **Promena polariteta priključenog napona ne menja smer rotacije** jer se istovremeno okrene i smer statorskog magnetnog polja - treba prekinuti rednu vezu statorskog i rotorskog namotaja i okrenuti samo smer struje u jednom od njih (korišćenjem mosta).



17

4.2. ASINHRONI POGONI

- Asinhroni motor je široko rasprostranjen u industriji zbog **proste konstrukcije i minimalne potrebe za održavanjem**.
- Kod mnogih motora nije potrebna **nikakva regulacija** (eventualno startovanje zvezda-trougao ili meko startovanje sa tiristorima).
- Prostiji slučaj regulisanog asinhronog pogona je kada se vrši **samo gruba regulacija brzine**.
- Primenom savremenih tehnika za upravljanje danas se i asinhroni motori mogu primeniti za **servo pogon (sa preciznim podešavanjem brzine i pozicije)**.

18

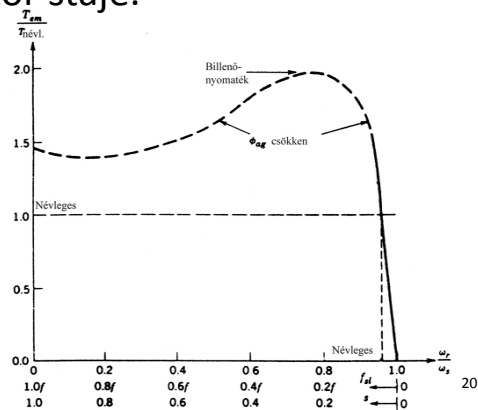
4.2.1. KONSTRUKCIJA I KARAKTERISTIKE ASINHRONIH MOTORA - UVOD

- **Stator** se sastoji od čeličnog jezgra i od namotaja u tom jezgru. Na statorske namotaje dovodimo trofazni napon/struju koja ostvaruje **obrotno magnetno polje** na sinhronoj brzini:
$$n_s = 60 \times \frac{\omega_s}{2\pi} = \frac{120}{p} f$$
- **Rotor** se obično sastoji od magnetnog jezgra i kratkospojenog namotaja (kavez).
- Pod uticajem obrtnog magnetnog polja statora u rotor se indukuju naponi koji formiraju struje u rotoru i novo (rotorsko) magnetno polje. **Magnetno polje rotora se okreće malo sporije** (za nekoliko procenata) od statorskog polja. Razlika brzina je **klizanje**: $\omega_{sl} = \omega_s - \omega_r$
- **Obrtni momenat** se javlja kao rezultat međusobnog uticaja obrtnog polja statora i rotorskih struja.

19

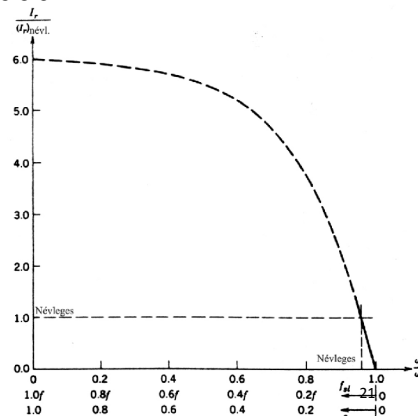
4.2.1.a KONSTRUKCIJA I KARAKTERISTIKE ASINHRONIH MOTORA - MOMENTNA KARAKTERISTIKA

- Pri napajanju sa nazivnim naponom i frekvencijom, **pri povećanju opterećenja raste klizanje**.
- Opterećenje se može povećavati **do maksimalnog momenta**, posle motor staje.
- Motor obično radi na **linearnom segmentu karakteristike** (malo ispod sinhronne brzine).



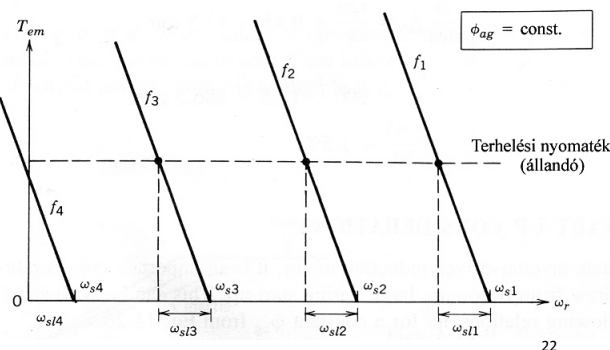
4.2.1.b KONSTRUKCIJA I KARAKTERISTIKE ASINHRONIH MOTORA - STRUJA MOTORA

- Počev od sinhronne brzine (oko praznog hoda) pa **do nazivnog opterećenja struja motora raste srazmerno.**
- Pri daljem povećanju opterećenja struja dalje raste** - to se ne može dozvoliti pri trajnom radu.
- Pri direktnom startovanju** motor uzima višestruku struju iz izvora (obično 5x...8x).
- Struja startovanja se može smanjiti** smanjivanjem napona napajanja (meko startovanje) ili istovremenim smanjivanjem napona i frekvencije.



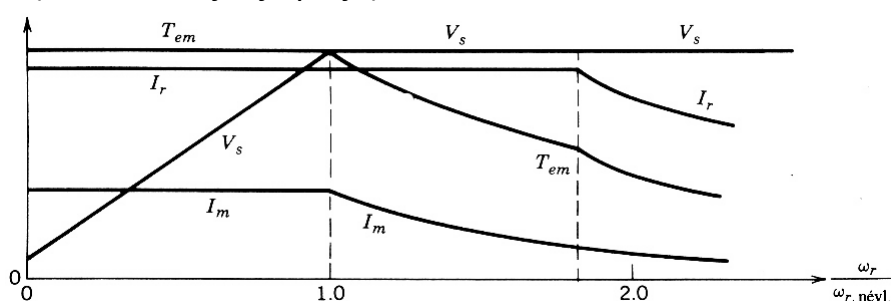
4.2.1.c KONSTRUKCIJA I KARAKTERISTIKE ASINHRONIH MOTORA - UPRAVLJIVOST

- Kod regulisanog pogona sa asinhronim motorom potreban naizmenični napon se formira **trofaznim inverterom.**
- Promenu broja obrtaja postizemo promenom frekvencije napajanja** - time se pomera i momentna karakteristika.
- Za obezbeđenje konstantnog momenta** potrebna je približno linearna promena napona sa frekvencijom ($U_s/f \approx \text{const.}$).



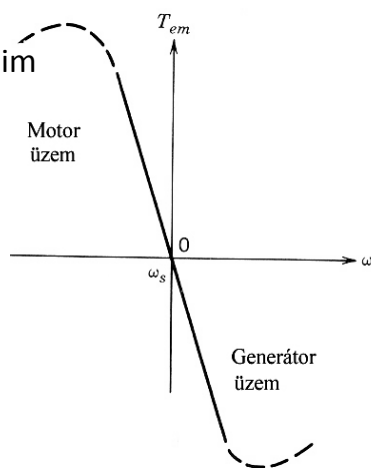
4.2.1.d KONSTRUKCIJA I KARAKTERISTIKE ASINHRONIH MOTORA-NORMALIZOVANI DIJAGRAMI

- **Od nule do nazivnog broja obrtaja**, napon doveden na stator treba da se diže linearno, tako će struja motora i formirani **momenat biti približno konstantni**.
- Motor obično može da radi i **preko nazivnog broja obrtaja**, ali se napon ne povećava dalje i **momenat pada** (oblast slabljenja polja).



4.2.1.d KONSTRUKCIJA I KARAKTERISTIKE ASINHRONIH MOTORA - KOČENJE I GENERATORSKI REŽIM

- Uz odgovarajuću kontrolu asinhroni motori mogu da rade u **četiri kvadranta**.
- **Smer rotacije** se menja (elektronskom) promenom **redosleda faza**.
- **Kočenje motora** se postiže postepenim smanjivanjem frekvencije napajanja.
- Smanjivanjem frekvencije postiže se **negativno klizanje**, što dovodi do promene smera obrtnog momenta (generatorski režim).
- U **generatorskom režimu** energija iz mehaničkog sistema se vraća u električni sistem.



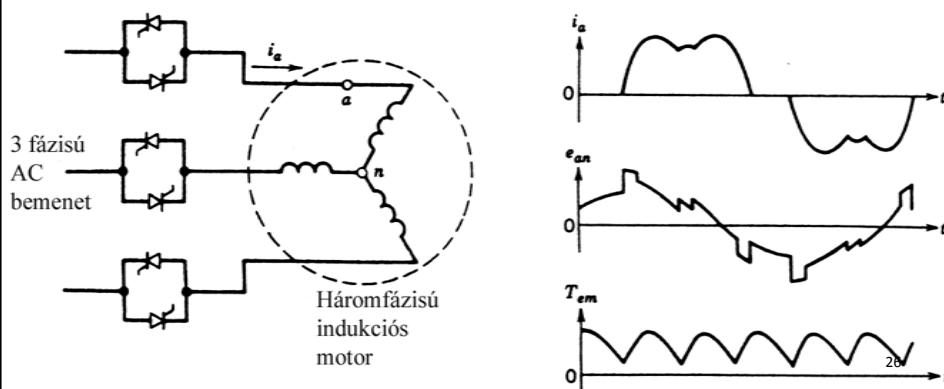
4.2.2. ASINHRONI POGONI NA BAZI PRETVARAČA FREKVENCije

- **Promenom frekvencije napajanja statora (f_s) menja se sinhrona brzina motora.** U većini slučajeva stvarna brzina motora je u blizini sinhronne brzine.
- Istovremeno i **približno srazmerno treba menjati i efektivnu vrednost statorskog napona (V_s)** da bi se rotorska struja i fluks u vazdušnom zazoru održao na istom nivou.
- Prema tome, za upravljanje asinhronim motorom, potreban je **trofazni sinusni napon promenljive frekvencije i amplitude.**
- Pogon se vrši **trofaznim invertorima.**
- Na vrlo velikim snagama se koriste **tiristorski ciklokonvertori.**
- Sve to **važi za trofazne motore.** Obično se **ne bave regulacijom broja obrtaja jednofaznih motora** (mada je to moguće).

25

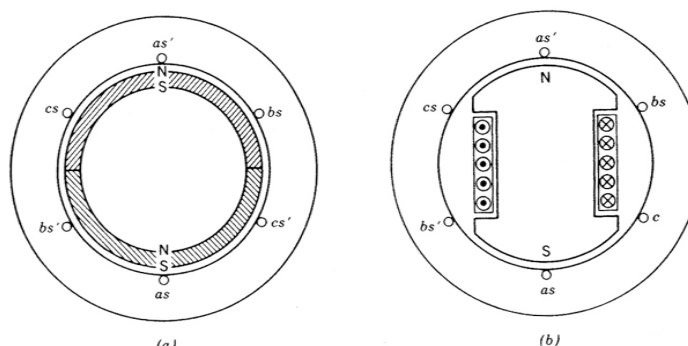
4.2.3 MEKO STARTOVANJE ASINHRONIH MOTORA

- Zbog **velike struje startovanja**, veliki asinhroni motori se obično ne pokreću direktnim spajanjem na mrežni napon.
- Mekim starterom se **diže napon motora postepeno od nule do nazivne vrednosti.**
- **Kod malih opterećenja** motora meki starter može ujedno da služi i kao rešenje za smanjenje gubitaka: smanjuje se napon motora nakon postizanja nazivnog broja obrtaja.



4.3. SINHRONI POGONI - OSNOVI

- Sinhroni motor se može konstruisati sa **rotorom sa stalnim magnetima** (BLDC - brushless DC motor) (a) i sa **motanim rotorom** (b).
- Motani rotor se napaja jednosmernom strujom - formira se elektromagnet.



27

4.3.1. KONSTRUKCIJA I KARAKTERISTIKE SINHRONOG MOTORA

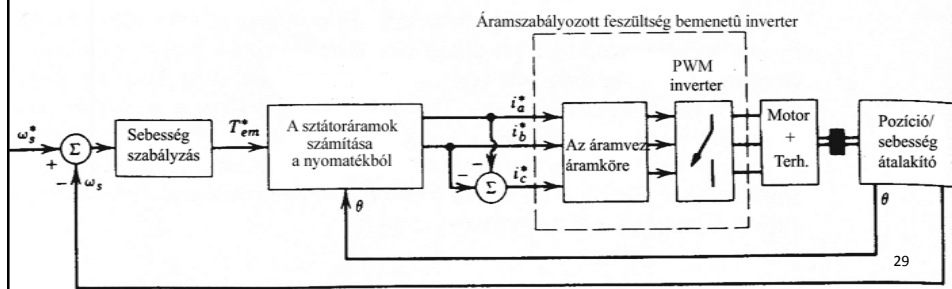
- Na statoru je **trofazni namotaj** koji se napaja trofaznom sinusnom strujom.
- Struje statora formiraju **obrtno magnetno polje** koje se okreće sinhronom brzinom.
- Zahvaljujući međusobnom uticaju statorskog i rotorskog magnetnog polja dobija se obrtni momenat.
- Kod sinhronog motora **rotor se obično okreće sinhronom brzinom**, ali postoji izvesna **ugaona razlika između smerova statorskog i rotorskog polja**. Dobijeni obrtni momenat je srazmeran sinusu tog ugla:

$$T_{em} = k_t \phi_f I_a \sin \delta$$

28

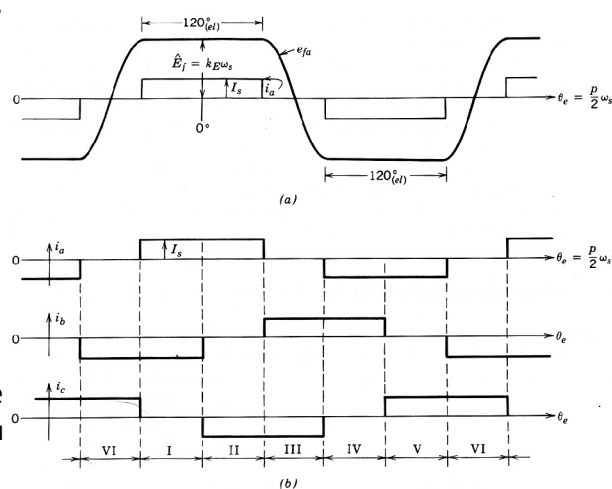
4.3.2. NAPAJANJE SINHRONOG MOTORA SINUSNIM STRUJAMA

- **Potrebno je meriti smer rotorskog magnetnog polja i pomoću statorskih struja treba formirati statorsko polje koje je okomito na rotorsko polje.**
- Na taj način motor ne izlazi iz sinhronizma i daje maksimalni momenat.
- Kontrolno kolo kontinualno proračunava trenutno važeće referentne vrednosti statorskih struja.
- PWM inverter ostvaruje zadate vrednosti struja.



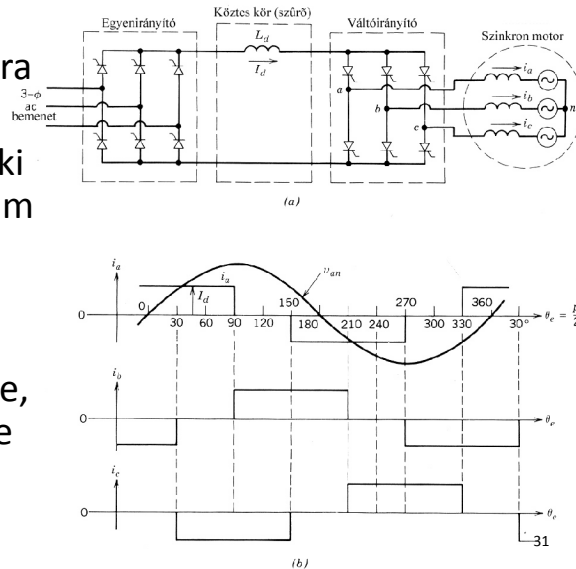
4.3.3. NAPAJANJE SINHRONOG MOTORA PRAVOUGAONIM STRUJAMA

- Važi na malim snagama, kod motora sa stalnim magnetima na rotoru.
- Indukovani napon je približno trapeznog oblika.
- Struje statora su pravougaonog oblika.
- Ugaonu poziciju rotora obično detektuju Hall-ovim senzorima - struje se uključuju/isključuju u skladu sa trenutnom pozicijom.



4.3.4. UPRAVLJANJE SINHRONIM MOTOROM KOMUTACIJOM SA STRANE OPTEREĆENJA

- Karakteristično rešenje kod motora snage reda MW.
- Koristi se tiristorski inverter sa strujnim ulazom.
- Ako struje statora prednjače u odnosu na napone, dolazi do prirodne komutacije tiristora.

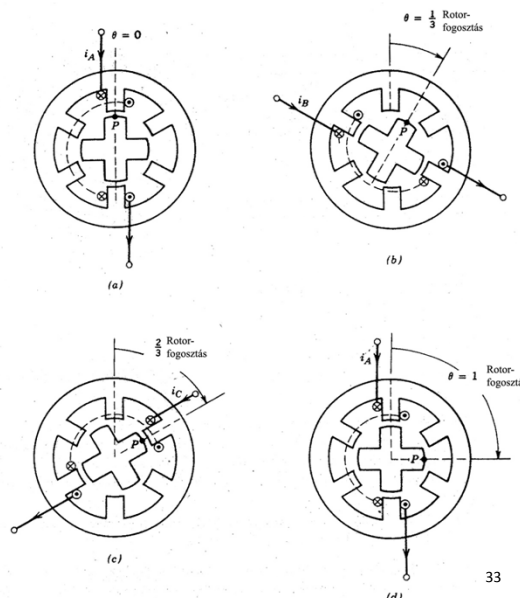


4.4. UPRAVLJANJE KORAČNIM MOTORIMA - UVOD

- Koračni motori se uglavnom koriste u računarskim periferijama i kancelarijskim mašinama.
- Postoje i industrijske primene.
- Velika prednost im je da mogu da ostvare precizno pozicioniranje bez detektora pozicije.
- Primenjajući jedan pobudni impuls, koračni motor se uvek okrene za izvestan ugao.
- Brojanjem pobudnih impulsa može se znati retzultantna ugaona pozicija rotora.

4.4.1.a KONSTRUKCIJA I KARAKTERISTIKE KORAČNIH MOTORA- RELUKTANTNI MOTOR

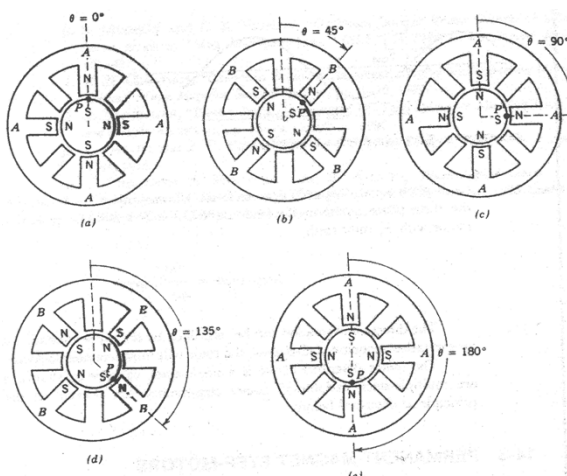
- Ima dva rešenja: reluktantni motori i motori sa stalnim magnetima.
- Kod reluktantnih motora magnetno polje statora okreće rotor tako da se dobije minimalna reluktancija (zub rotora se privuče aktivnom zubu statora).
- Slika prikazuje okretanje za 90° u tri koraka.



33

4.4.1.b KONSTRUKCIJA I KARAKTERISTIKE KORAČNIH MOTORA - MOTOR SA STALNIM MAGNETIMA

- Rotor je sa stalnim magnetima.
- Rotor se okrene tako da se poklopi smer magnetnog polja statora sa magnetnim poljem rotora.
- Dovođenjem struje u odgovarajući statorski namotaj rotor se okreće u željenu poziciju.



U prikazanom slučaju pri svakom koraku statorske struje se pomeraju za 45° . Motor u četiri koraka napravi pola obrtaja.

34

4.4.2. UPRAVLJAČKA KOLA ZA KORAČNE MOTORE

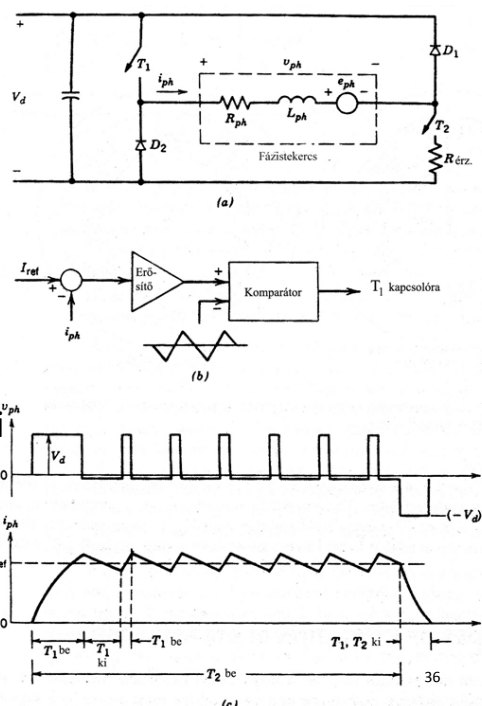
- Statorski namotaji se napajaju pravougaonim strujama.
- Kontrolno kolo treba da obezbedi što brži priraštaj i pad struje.

35

4.4.2.a UPRAVLJAČKA KOLA ZA KORAČNE MOTORE -

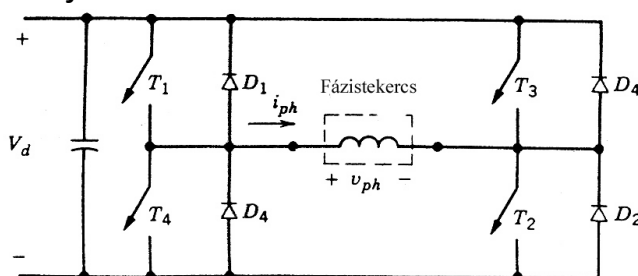
RELUKTANTNI MOTORI

- Dovoljno je obezbediti struje jednog smera.
- V_d treba da je znatno veći od srednje vrednosti faznog napona, ako želimo dobiti brzi priraštaj struje.
- Struja se obično reguliše PWM signalom konstantne frekvencije.



4.4.2.b UPRAVLJAČKA KOLA ZA KORAČNE MOTORE - MOTORI SA STALNIM MAGNETIMA

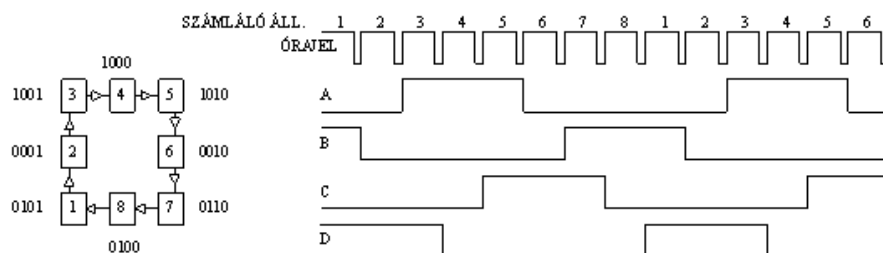
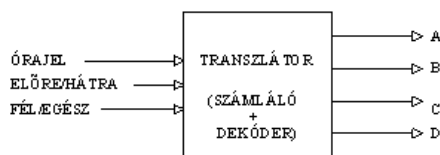
- Za dobijanje bipolarnih strujnih impulsa potrebno je za svaki fazni namotaj realizovati jedan tranzistorski most.
- Možemo koristiti unipolarnu ili bipolarnu modulaciju.



37

4.4.2.c UPRAVLJAČKA KOLA ZA KORAČNE MOTORE - FORMIRANJE UPRAVLJAČKIH IMPULSA

- Mikrokontroler obično formira samo sledeća tri signala: takt, smer, polukorak/pun korak.
- Od ovih signala se odgovarajućim logičkim automatom (translator) dobijaju komandni signali za pojedine faze.



Kraj 4. glave

(ELEKTROMOTORNI POGONI)