

# **ELEKTROMOTORNI POGON SA SINHRONIM MOTOROM SA PERMANENTNIM MAGNETIMA**

**Princip rada, kočenje i  
skalarno upravljanje**

# **ELEKTROMOTORNI POGONI SA** **SINHRONIM MOTOROM**

Sinhrona mašina se okreće sinhronom brzinom, koja je određena učestanošću napajanja.

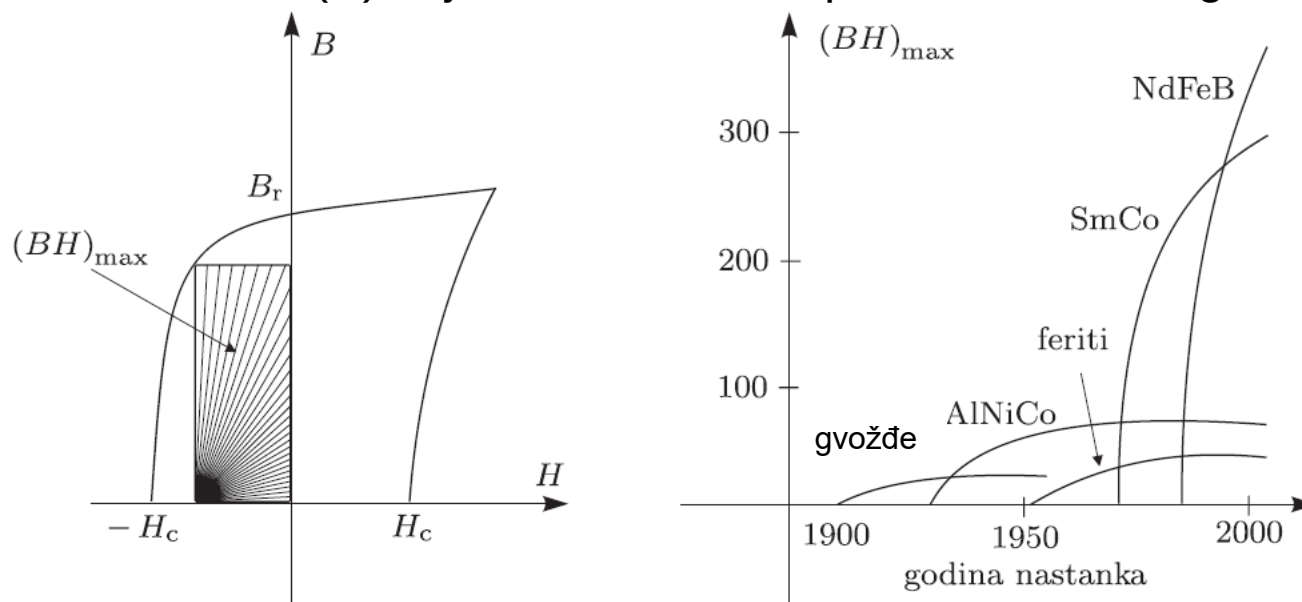
Podela sinhronih mašina:

- 1) SM sa namotanim rotorom (koriste se najčešće u pogonima velike snage od 1MW do 100 MW u kojima se zahteva konstantna brzina obrtanja )
- 2) SM sa permanentnim magnetima na rotoru (Predstavlja ozbiljnu konkurenciju asinhronom motoru u pogonima sa promenljivom brzinom).

## Sinhroni motori sa permanentnim magnetima na rotoru (PMSM)

- U elektromotornim pogonima manjih snaga (do nekoliko desetina kW) se umesto standardnih sinhronih motora sa pobudnim namotajem koriste sinhroni motori kod kojih su na rotor ugrađeni permanentni magneti.
- Ugradnja permanentnih magneta u rotor čini konstrukciju mašine jednostavnijom, a mašina je pouzdanija jer nema problema sa napajanjem rotorskog namotaja iz jednosmernog izvora.
- PMSM u poslednje vreme u mnogim aplikacijama regulisanih pogona zamenjuju manje efikasne asinhronne motore manjih i srednjih snaga.
- Način ugradnje permanentnih magneta na rotor ima veliki uticaj na parametre mašine, a na taj način dalje utiče na glavne karakteristike motora: talasni oblik magnetne indukcije u vazдушnom zazoru mašine, moment motora i brzinu obrtanja.

- Karakteristike  $B = f(H)$  najčešće korišćenih permanentnih magneta:



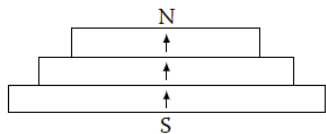
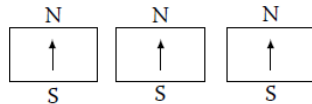
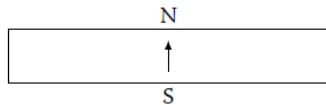
Karakteristike  $B = f(H)$  permanentnih magneta

-Materijali koji zadržavaju magnetizam poznati su kao materijali od stalnog magneta. Sposobnost zadržavanja trajnog magnetizma nalazi se u kobaltu, gvožđu i niklu, i oni se nazivaju feromagnetni materijali. Magnetni materijali se mogu podeliti na klasične i moderne. U klasične spadaju anlico (aluminijum–nikl–kobalt AlNiCo) i feriti, dok se u moderne svrstavaju i materijali poznati pod nazivom retke zemlje: samarijum–kobalt (SmCo) i neodimijum–gvožđe –bor (NdFeB).

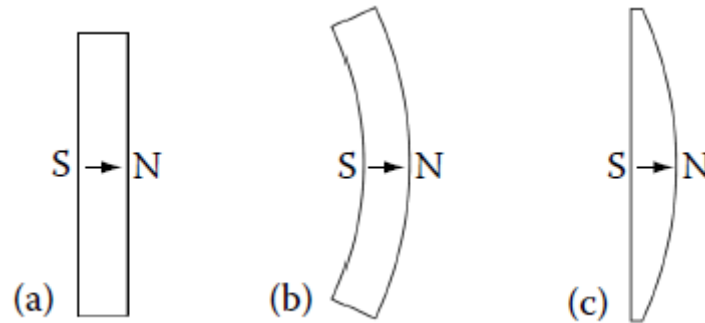
-Elektromagnetna indukcija (gustina fluksa) pri nultoj pobudi poznata je kao remanentna indukcija  $B_r$ , a unutrašnja koercetivna sila potrebna da remanentni magnetizam dovede na nulu je  $H_c$ .

# Oblici i primena permanentnih magneta

-Magneti se mogu pojedinačno izraditi u više oblika i veličina. Jedan od karakterističnih oblika je prsten, koji je najjednostavniji za instaliranje jer se mogu pomerati po obodu rotora od laminiranog gvožđa, za koji su na određeni način pričvršćeni. Segmenti prstena mogu da budu namagnetisani u različitim željenim smerovima.



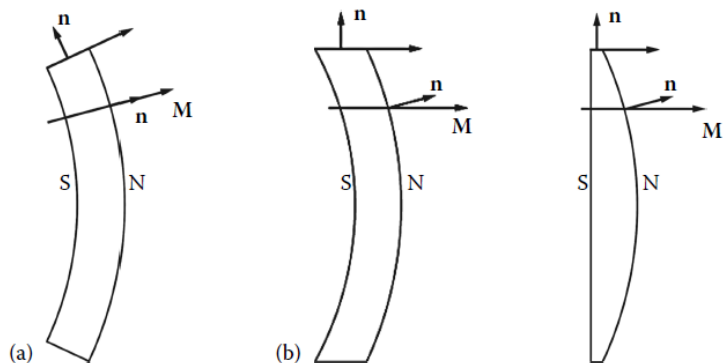
Multisegmentna  
struktura je  
neophodna kod  
mašina veće snage



Oblici PM-a: a) pravougaoni b) radijalni c) pogačasti  
Radijalni i pogačasti se primenjuju za površinsku montažu  
Surface Mounted Permanent Magnet Synchronous  
Machines (SM-PMSM), dok se pravougaoni ukopavaju u  
rotor i koriste kod Interior Mounted Permanent Magnet  
Synchronous Machines (IM-PMSM).

## Magnetizacija permanentnih magneta - klasifikacija

- Permanentni magneti mogu da budu namagnetisani u bilo kom željenom smeru, ali najčešće radijalno (a), ili paralelno (b). Na taj način se utiče na raspodelu magnetnog polja u zazoru, a samim tim i na ostale karakteristike motora.
- Radijalno namagnetisani motori proizvode pravougaonu raspodelu gustine fluksa u zazoru mašine, dok paralelno namagnetisani – sinusnu.

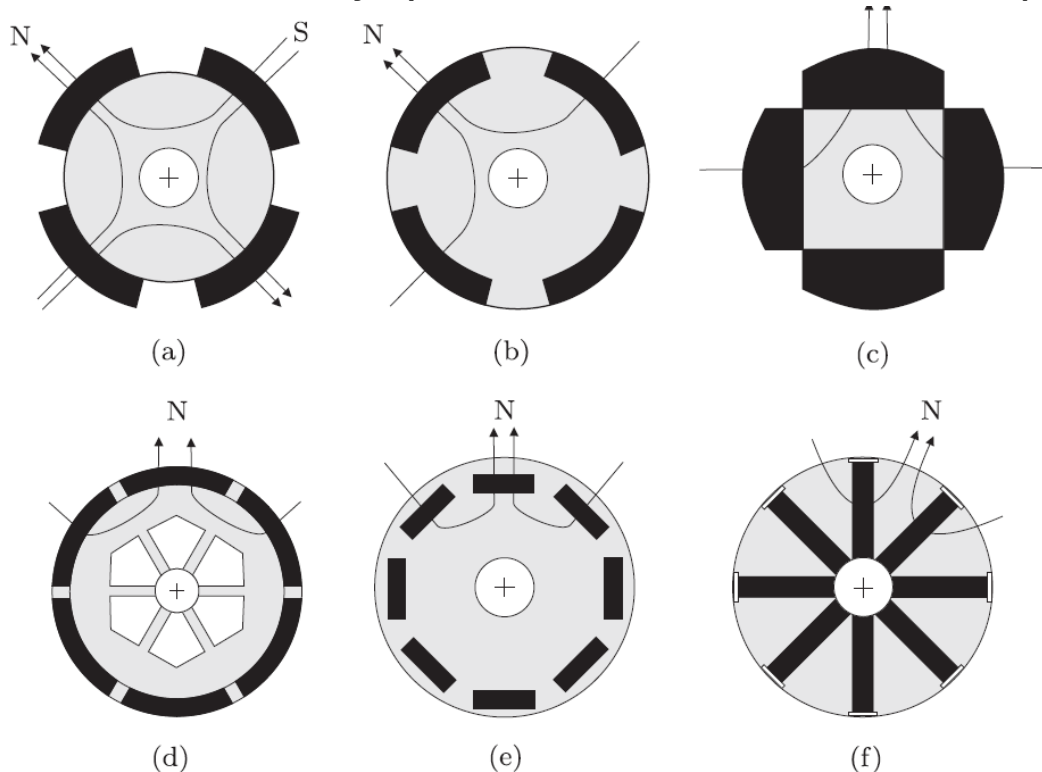


**- Pojava kvalitetnih permanentnih magneta dovela je do razvoja motora za jednosmernu struju sa permanentnim magnetima na statoru (pobuda), dok je razvoj energetske elektronike doveo do razvoja sinhronih motora sa permanentnim magnetima. U oba slučaja izbačeni su delovi mašine kao što su, mehanički komutator, klizni prstenovi i četkice.**

- Permeabilnost PM-a je skoro jednaka permeabilnosti vazduha, tako da montaža PM-a ima efekat produženog vazdušnog zazora.

# Sinhroni motori sa površinski postavljenim i ukupanim permanentnim magnetima na rotoru

- Permanentni magneti se mogu postaviti:
  - na telo rotora sa spoljašnje strane (slike a i c) – SM-PMSM
  - na telo rotora s unutrašnje strane (slike b i d) – SI-PMSM, (surface inset PM)
  - u unutrašnjost tela rotora (slika e) - IM-PMSM (Interior PMSM)
  - aksijalno, odnosno duž ose koja prolazi kroz osovinu mašine (slika f).



Rotor sinhronog motora sa permanentnim magnetima

- Za izradu stalnih magneta potrebno je koristiti materijale koji stvaraju veliku remanentnu indukciju i veliko koercitivno polje. Pored toga bitna je i specifična akumulirana magnetska energija kao i Kirijeva temperatura pri kojoj se gube osobine stalnog magneta.
- PMSM sa površinski postavljenim magnetima (SM-PMSM) imaju izotropan rotor, što znači da su induktivnosti po podužnoj ( $d$ ) i poprečnoj ( $q$ ) osi približno jednake ( $L_d \approx L_q$ ). Induktivnost statora SM-PMSM je mala, pa je moguća brza promena statorsche struje, a samim tim i momenta. Nisu namenjeni za aplikacije sa velikom brzinom (najviše do 3000o/min), zbog nemanja dovoljne robustnosti, osim u slučaju mašina sa vrlo malim prečnikom (do 50000o/min).
- Surface-Inset PMSM (SI-PMSM), obezbeđuju cilindričnu površinu rotora, mehanički robustniji ( $L_d \neq L_q$ )
- Pored ove konstrukcije postoje i sinhroni motori sa magnetima utisnutim (ukopanim) u rotor (IM-PMSM), čiji rotor usled kompleksne geometrije ima magnetnu anizotropiju koja donosi određene prednosti. Ovakvom konstrukcijom značajno se umanjuje količina gvožđa u  $d$  osi što čini da je induktivnost  $L_d$  mnogo manja od induktivnosti  $L_q$  ( $L_d < L_q$ ). Takođe, postoji značajna zavisnost induktivnosti statora od položaja (ugla) rotora koja dovodi do pojave reluktantnog momenta. Dodatna prednost IM-PMSM je da se mogu koristiti na velikim brzinama koristeći tehniku slabljenja polja (skupa proizvodnja).

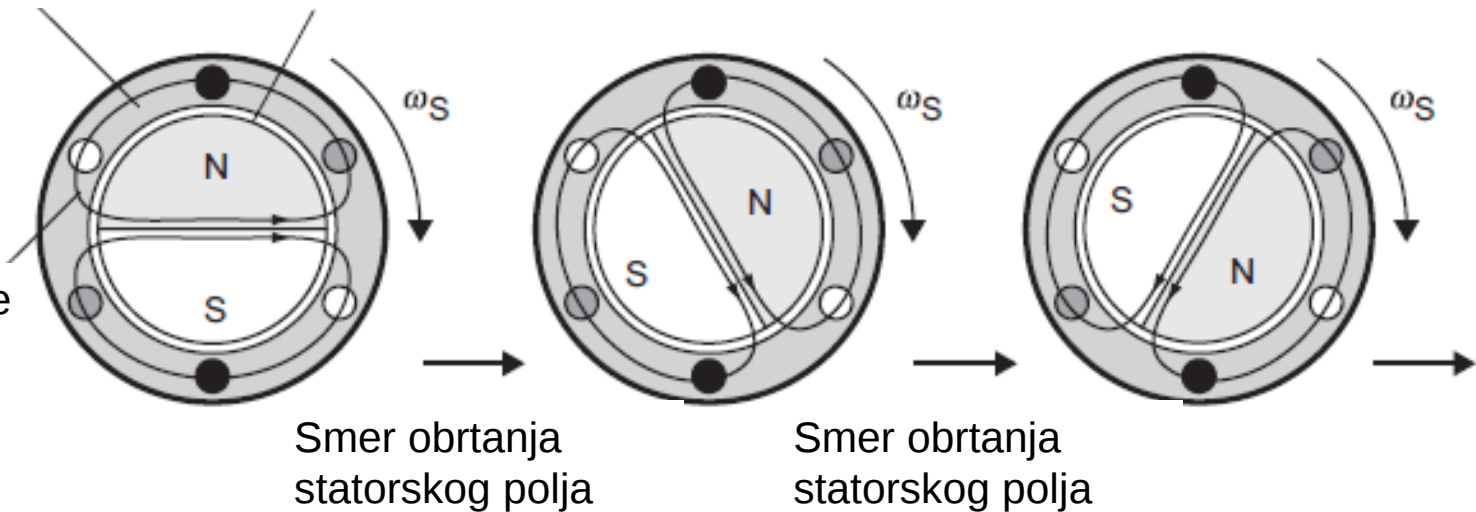
# Princip rada

Stator sa trofaznim namotajem

Rotor sa permanentnim magnetima

- Namotaj 1
- Namotaj 2
- Namotaj 3

Magnetno polje statora



- Princip rada PMSM:

- 1) Strujno kolo statora čini trofazni statorski namotaj, postavljen na svoje magnetno kolo u kućištu statora, na isti način kao i kod asinhronog motora. Princip stvaranja obrtnog polja je isti kao i u slučaju asinhronog motora.
- 2) Obrtno polje je opisano vektorom obrtne magnetopobudne sile statora  $\vec{F}_{ob}$ , čija brzina obrtanja zavisi od učestanosti struja statora  $f$  i broja pari polova  $P$ . Rotor sa PM ima isti broj pari polova kao i namotaj statora.
- 3) Na rotoru se nalaze permanentni magneti, koji su zajedno sa magnetnim kolom rotora pričvršćeni za vratilo.

## Princip rada

- 4) Obrtno polje statotora sa sobom “vuče” rotor koji se obrće u sinhronizmu sa njim (polja statora i rotora moraju biti jedno prema drugom nepomična da bi se stvorio konstantan momenat).
- 5) Dovođenjem momenta opterećenja na vratilo motora povećava se ugao između polja statora i polja rotora (ugao opterećenja). Opterećenje pokušava da uspori, ali kako se kontinualni momenat razvija samo u sinhronizmu, rotor ne može da promeni brzinu i zato polje rotora „zaostaje“ u odnosu na polje statora – povećava se ugao opterećenja.
- 6) Kako PMSM može da razvija konstantan moment samo pri sinhronoj brzini, pokretanje PMSM se mora odvijati kontrolisano postepenim povećanjem učestanosti, tj. brzine obrtnog polja statora, a takođe se mora voditi računa o uglu opterećenja u svim režimima rada.

# Princip rada

-Nedostaci pogona sa PMSM:

- 1) PMSM su projektovani za rad pri promenljivim brzinama obrtanja, ali se moraju napajati pomoću invertora i regulatora specijalno razvijenih kako bi PMSM mogao da se startuje i radi u sinhronizmu.
- 2) Nedostatak tačne informacije o poziciji rotora može negativno uticati na ostvarenje efikasnog rada pogona. Zato se koristi inkrementalni enkoder, što povećava ukupnu cenu pogona.
- 3) Postoji maksimalna vrednost momenta opterećenja koja se ne sme preći. To zavisi od ugla opterećenja (maksimalno  $90^\circ$ ) i od struje.
- 4) Postoji rizik od demagnetizacije rotora, tj. slabljenja magneta usled velikih struja pri kvaru invertora, prekoračenja momenta opterećenja, ili visokih temperatura.
- 5) Za održavanje motora su potrebni specijalni alati, jer izvlačenje rotora nije jednostavno zbog postajana jakih magnetnih sila, koje stvaraju stalni magneti i mogućnosti demagnetizacije, pa se rotor mora pažljivo uvlačiti u gvozdenu čauru da fluks PM-a ima gde da se zatvori.

- Poznato je da se elektromagnetni moment može napisati kao vektorski proizvod prostornih vektora statorskog i rotorskog magnetnog fluksa:

$$m_e = K |\Psi_f| |\Psi_s| \sin \angle(\Psi_f, \Psi_s)$$

gdje je  $K$  konstruktivna konstanta mašine.

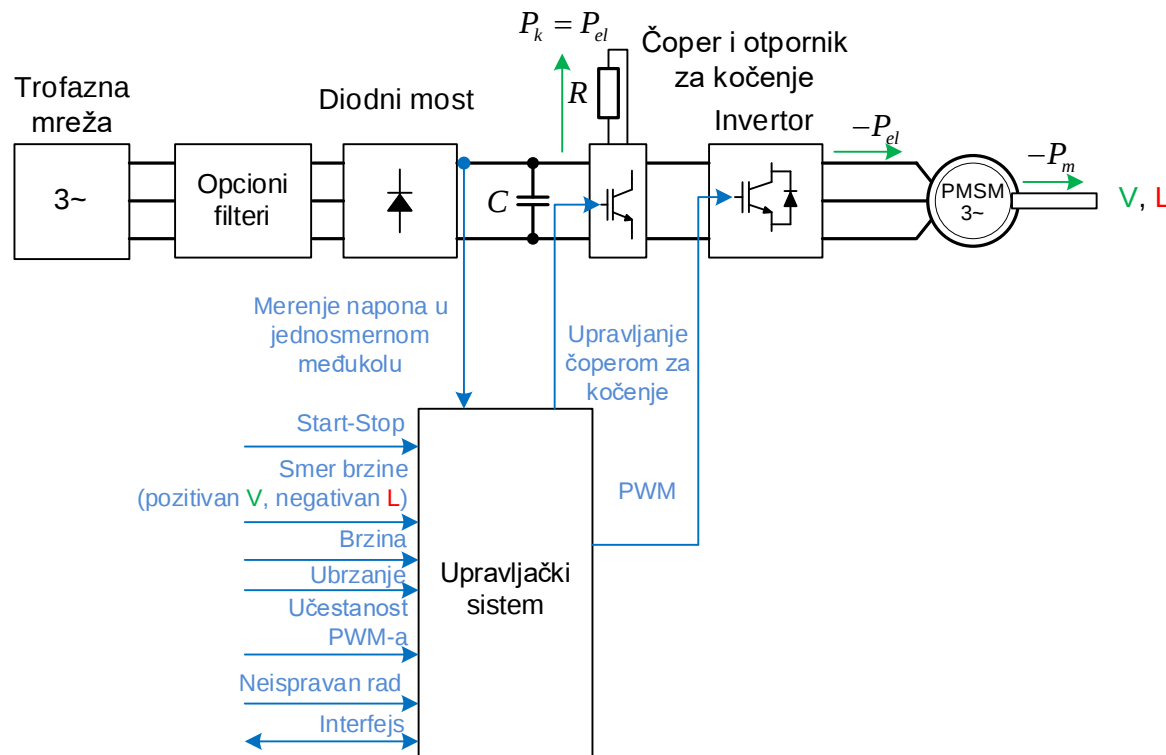
- Ako je poznat položaj rotora, odnosno osa delovanja permanentnih magneta na rotoru, moguće je postavljanjem prostornog vektora napona ili struja postići da magnetno polje stvoreno strujama koje teku kroz namotaje statora bude uvek pomaknuto za  $90^\circ$  električnih u odnosu na osu delovanja magnetnog polja permanentnih magneta. U tom slučaju moment motora će biti određen jačinom struje statora.

- Invertorom sa impulsno širinskom modulacijom proizvodi se talasni oblik napona koji će uzrokovati da struje kroz namotaje statora imaju približno sinusni talasni oblik, promenljive učestanosti usklađene sa brzinom obrtanja rotora.

- Invertor mora imati prekidačke elemente s visokom frekvencijom prekidanja, a za dobijanje informacije o položaju rotora koriste se precizni senzori za merenje ugla rotora.

# Kočenje pogona sa PMSM

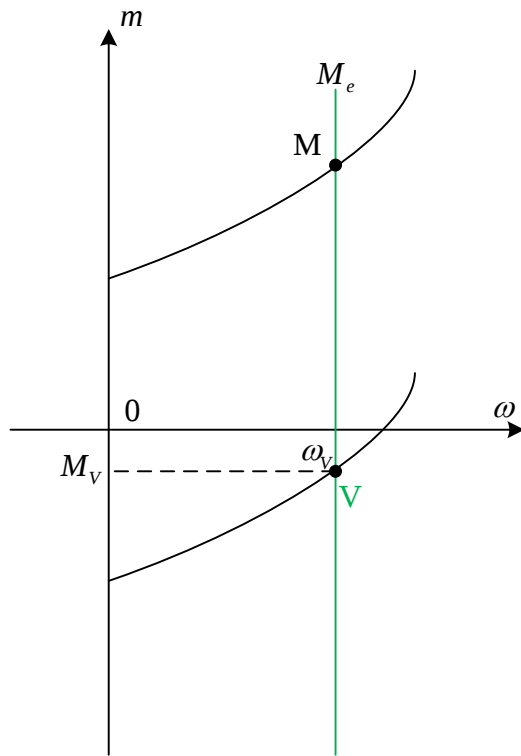
- U pogonima sa PMSM primenjuje se rekuperativno (generatorsko) i dinamičko kočenje. Analiziraćemo samo rekuperativno kočenje.
- Rekuperativno kočenje se vrši u II kvadrantu za pozitivan smer brzine i u IV kvadrantu za negativan smer brzine.



Rekuperativno kočenje PMSM: principijelna šema i mehaničke karakteristike

V – električno vozilo, L – lift

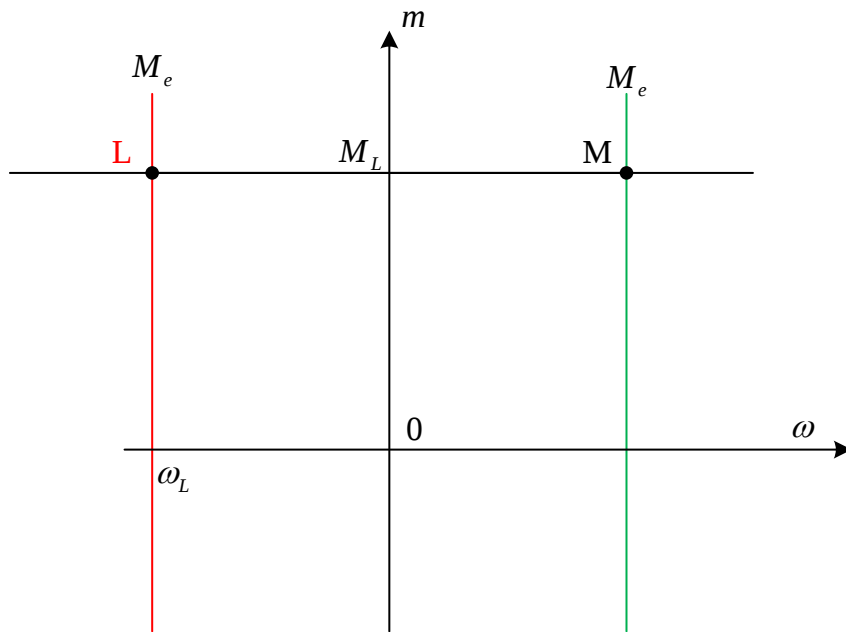
## Kočenje pogona sa PMSM



- a) Pogon sa PMSM radi u I kvadrantu, tj. PMSM pokreće električno vozilo na uzbrdici (radna tačka M); vozilo stigne na vrh uzbrdice i krene da se spušta niz nizbrdicu – smer obrtanja motora je isti, a radna tačka motora i opterećenja putuju zajedno od M do V, zato što se odvija mehanički prelazni proces. Iz I kvadranta (M) prelazi u II kvadrant (radna tačka V), koja se nalazi u preseku mehaničkih karakteristika motora i opterećenja.

- PMSM iz motornog prelazi u generatorski režim rada bez promene brzine. Mehanička snaga (snaga preuzeta iz mehaničkog dela pogona sa PMSM) pretvara u električnu u procesu kočenja ( $P_m$  i  $P_{el}$  menjaju znak u negativan) i frekventni pretvarač treba da preuzme energiju kočenja i da je prenese u mrežu kao snagu rekuperacije  $P_r$ , ukoliko to omogućava ispravljač, u suprotnom energija će se disipirati na dodatnom otporu za kočenje  $R_k$ . Na ovaj način se sprečava da napon na kondenzatoru u jednosmernom međukolu ne poraste iznad dozvoljene vrednosti, što bi moglo da izazove kvar frekventnog pretvarača.

## Kočenje pogona sa PMSM



b) Pogon sa PMSM radi u I kvadrantu, tj. PMSM pokreće lift naviše (radna tačka  $M$ ); lift stigne do zadatog sprata, usporava i stane. Aktiviraju se mehaničke kočnice, a struja i moment motora smanjuju vrednost do 0. Zatim lift dobije komandu da se spušta na niži sprat – smer obrtanja motora se menja, a radna tačka iz 0 prelazi u IV kvadrant (radna tačka  $L$ ), koja se nalazi u preseku mehaničkih karakteristika motora i opterećenja.

- U slučaju kretanja naniže PMSM radi u generatorskom režimu rada sa pozitivnim momentom i negativnom brzinom, tako da se mehanička snaga preuzeta od opterećenja (snaga preuzeta iz mehaničkog dela pogona sa PMSM) pretvara u električnu u procesu kočenja ( $P_m$  i  $P_{el}$  menjaju znak u negativan) i dalje se sve ponavlja kao u slučaju kočenja električnog vozila.

# Skalarno upravljanje pogona sa PMSM

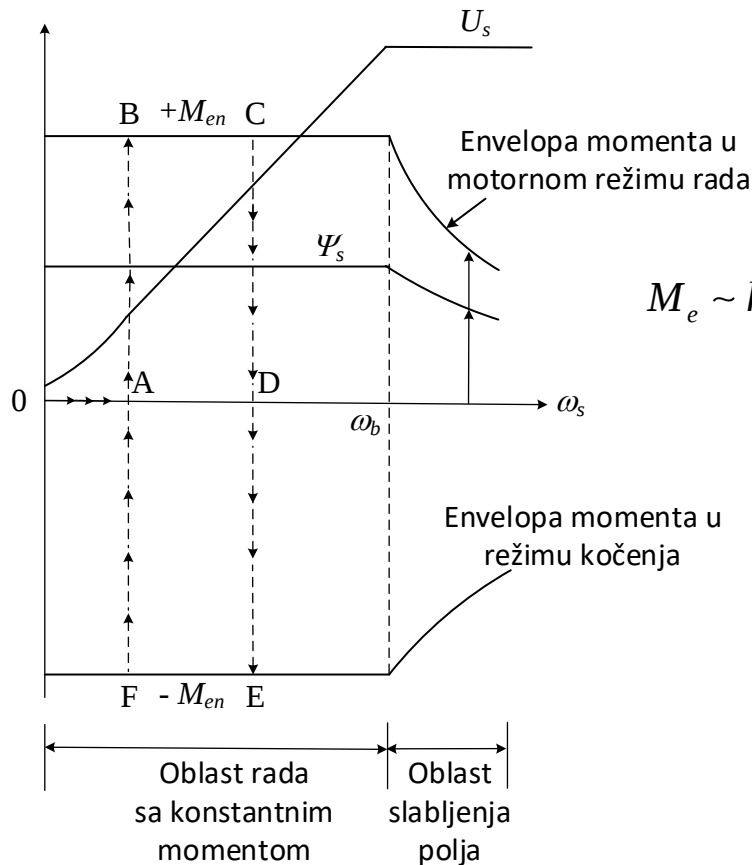
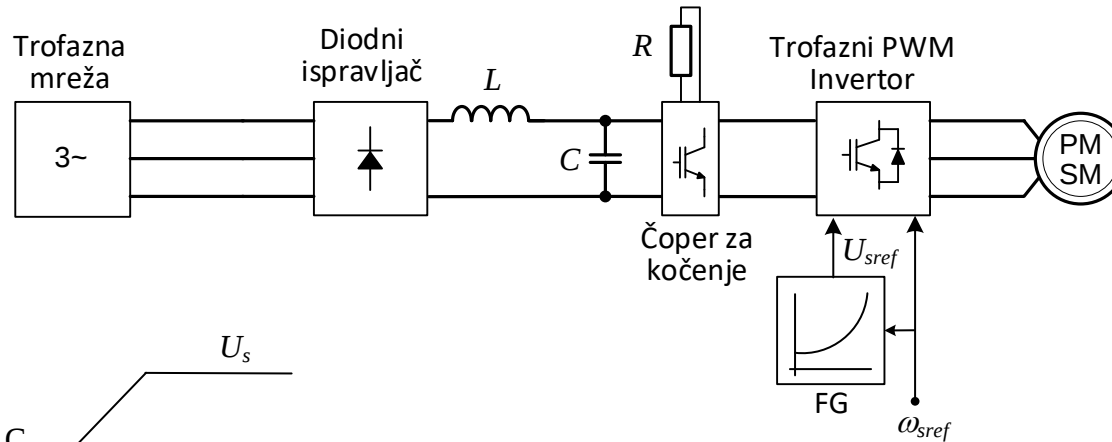
U osnovi postoje dva načina skalarnog upravljanja pogonima sa PMSM:

1. Upravljanje u otvorenoj sprezi (petlji, *open loop*), odnosno pravi režim rada sinhronne mašine, kod koga se brzina motora kontroliše nezavisnim upravljanjem učestanošću pretvarača;
2. Samoupravljanje (*self-control*), kod koga se upravljački impulsi pretvarača promenljive učestanosti generišu na osnovu merenja položaja rotora pomoću apsolutnog enkodera postavljenog na osovini mašine.

# Skalarno upravljanje pogona sa PMSM u otvorenoj sprezi

- Ovo je najjednostavnija skalarna metoda upravljanja sinhronom mašinom, ali se ostvaruje po cenu lošijih performansi u odnosu na druge metode upravljanja, kao što je vektorsko upravljanje.
- Slična je skalarnom upravljanju u pogonima sa AM
- Najčešće se primenjuje u pogonu sa više PMSM, u kojima je precizno praćenje brzine od suštinskog značaja za rad. U tom slučaju su sve mašine paralelno povezane na isti inverter, tako da se kreću sinhrono u skladu sa zadatom učestanošću  $\omega_{ref}$  na ulazu.
- Referentni fazni napon  $U_{sref}$  generiše se pomoću funkcijskog generatora (FG), pri čemu se napon održava proporcionalno sa učestanošću, tako da je fluks statora konstantan,  $\Psi_s = \Psi_{sn} = const.$
- Slično kao kod pogona asinhronog motora, pri malim učestanostima se vrši kompenzacija pada napona na otpornosti statora.
- Održavanje konstantnog i nominalnog statorskog fluksa omogućava skoro maksimalan raspoloživ moment po amperu statorske struje i brz dinamički odziv.
- Ulazni stepen naponskog PWM invertora napaja se iz elektroenergetske mreže preko diodnog ispravljača.

# Skalarno upravljanje pogona sa PMSM u otvorenoj sprezi



$$M_e \sim k_1 \Psi_s \Psi_f \sin \delta \approx k_2 \Psi_s I_s \cos \varphi, \text{ (zanemareni gubici u motoru)}$$

gde je  $\delta$  ugao momenta, a  $\varphi$  ugao između fazora napona i struje, tako da je  $I_s \cos \varphi$  komponenta struje statora u fazi sa naponom.

Pri konstantnom statorskom fluksu  $\Psi_s$ , ugao  $\delta$  i struja statora  $I_s$ , postepeno će se povećavati sve dok se u tački B ne dostigne nominalni moment  $M_n$ , pri čemu se prvo dostiže ili granična vrednost ugla  $\delta$  koja je  $\pi/2$ , ili nominalna vrednost struje statora  $I_s$ .

# Skalarno upravljanje pogona sa PMSM u otvorenoj sprezi

- Pretpostavlja se da je početni moment opterećenja na vratilu motora  $M_m = 0$ , da bi se lako mogao pokrenuti iz stanja mirovanja
- Motor se pokreće postepenim povećavanjem učestanosti od tačke 0 do A
- Od tačke A moment opterećenja se postepeno povećava. Radna tačka ustaljenog stanja ( $M_e = M_m$ ), pomeraće se duž prave AB u prvom kvadrantu u zavisnosti od promene opterećenja
- U tački B se dostiže nominalni moment, pa se radna tačka može pomerati dalje u tačku C postepenim povećavanjem učestanosti.
- Nakon toga, može se vratiti u tačku D postepenim smanjivanjem momenta opterećenja  $M_m$
- Pri baznoj brzini  $\omega_b$ , napon  $U_s$  dostiže nominalnu vrednost. Iznad ove tačke, mašina prelazi u režim slabljenja polja, pa se raspoloživi moment smanjuje po envelopi usled smanjenja fluksa  $\Psi_s$ , kao što je prikazano na slici sa prethodnog slajda.

# Skalarno upravljanje pogona sa PMSM u otvorenoj sprezi

- Kao i kod upravljanja asinhronim motorom, svaka nagla promena zadate električne ugaone brzine  $\omega_{s\ ref}$  dovešće do nestabilnosti sistema usled gubitka sinhronizma. Kod rada pogona sa promenljivom brzinom, brzina motora mora biti sposobna da prati zadatu učestanost bez gubitka sinhronizma, a ta promena je određena Njutnovom jednačinom:

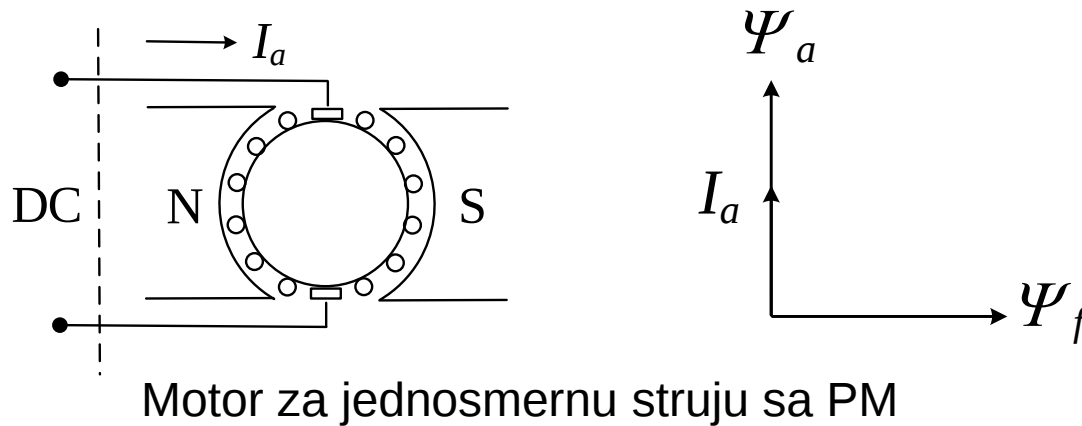
$$\text{Ubrzanje:} \quad \frac{d\omega_{s\ ref}}{dt} = +P \frac{M_e - M_m}{J}$$

$$\text{Usporenje:} \quad \frac{d\omega_{s\ ref}}{dt} = -P \frac{M_e + M_m}{J}$$

- U tački A, ako se  $\omega_{s\ ref}$  povećava po rampi, razvijeni elektromagnetni moment  $M_e$  skočiće u tačku B, a mašina će ubrzavati duž linije BC sve dok se u tački D ne uspostavi novo ustaljeno stanje  $M_m=0$ .
- Slično tome, tokom usporavanja radna tačka će se kretati duž putanje D–E–F–A. Električna energija generisana u toku usporavanja disipiraće se na otporniku za kočenje koji je vezan u jednosmernom međukolu.
- Promena smera obrtanja moguća je promenom redosleda faza

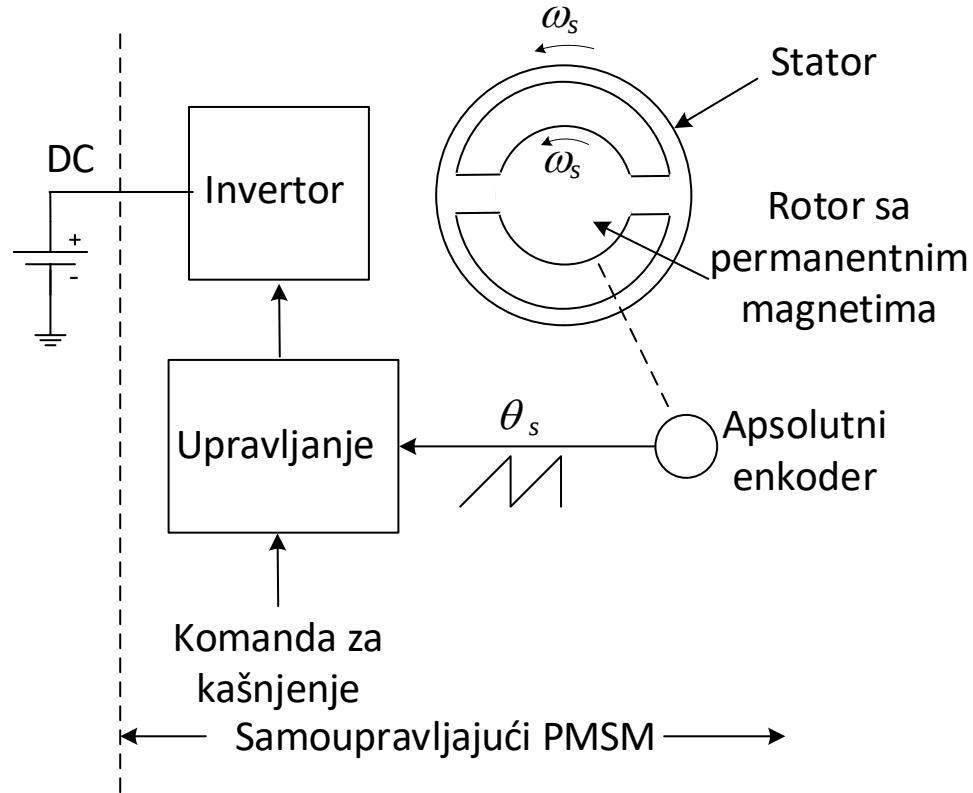
# Samoupravljanje (self-control) pogona sa PMSM

- PMSM sa samoupravljanjem ima blisku analogiju sa motorom za jednosmernu struju sa nezavisnom pobudom.



- Energija iz spoljnog jednosmernog kola dovodi se rotoru (armaturi) preko četkica i komutatora, a segmenti komutatora, pričvršćeni na rotor, menjaju položaj u zavisnosti od položaja rotora. U suštini, komutator i četkice pretvaraju ulazno jednosmerno napajanje u naizmenično, koje se dovodi na namotaj armature. Komutator i četkice se mogu posmatrati kao mehanički inverter osetljiv na apsolutni položaj rotora. Međutim, fluks pobude  $\Psi_f$  i fluks rotora (armature)  $\Psi_a$  ostaju nepokretni u prostoru i međusobno upravni.

# Samoupravljanje (self-control) pogona sa PMSM



PMSM sa samoupravljanjem

# Samoupravljanje (self-control) pogona sa PMSM

- PMSM sa samoupravljanjem može se smatrati analognom MJS sa nezavisnom pobudom, osim u sledećem:
  - za razliku od MJS, ovde se polje obrće, dok je armatura (stator) nepokretna (često se naziva „obrnuti“ MJS).
  - Za razliku od mehaničkog invertora osetljivog na položaj, u ovom slučaju koristi se elektronski inverter kojim upravlja apsolutni enkoder.
  - Za razliku od flukseva koji su nepokretni u prostoru kod MJS, ovde se fluksevi i fazorski dijagram obrću sinhronom brzinom.
  - Senzor apsolutnog položaja (apsolutni enkoder) daje položaj fluksa pobude  $\Psi_f$ , koji je vezan za rotor. Ako se PMSM napaja iz naponskog invertora sa strujnom regulacijom, fazni stav struje statora  $I_s$  može se kontrolisati u odnosu na  $\Psi_f$ , tako da se dobije maksimalni moment za datu struju.
- Ova analogija sa MJS dovela je do različitih naziva za PMSM sa samoupravljanjem, kao što je elektronski komutovani motor.

## Samoupravljanje (self-control) pogona sa PMSM

- Elektronski komutator zamenjuje mehanički komutator i četkice, čime se eliminišu nedostaci MJS, kao što su održavanje, varničenje, ograničenja u brzini i snazi, otežan rad u korozivnim i eksplozivnim sredinama, ograničenja nadmorske visine i problemi elektromagnetnih smetnji (EMI).
- Zahvaljujući samoupravljanju, mašina ne pokazuje probleme vezano za stabilnost.
- Dinamički odziv može biti sličan odzivu MJS.
- Ugao između struje  $I_s$  i fluksa  $\Psi_f$  može se kontrolisati po potrebi pomoću upravljanja kašnjenjem. Fluks reakcije indukta  $\Psi_a$  (u slučaju PMSM fluks satora  $\Psi_s$  više nije fiksiran na ugao  $\pi/2$  kao kod MJS).
- Upotrebom magneta velike gustine magnetne energije može se smanjiti inercija rotora, što predstavlja prednost kod servo-pogona, kod kojih se zahteva brzi odziv.

# Literatura:

- [1] Ramu Krishnan, "Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Drives", CRC Press, Sept 2009, ISBN 9780824753849
- [2] Darko Marčetić, Petar Matić, "Digitalno regulisani elektromotorni pogoni", ETF Banja Luka i Akademska misao Beograd, ISBN 978-99955-46-41-0, 2020.god
- [3] Bimal K. Bose, "Modern Power Electronics and AC Drives", Prentice Hall PTR, 2002, ISBN 0-13-016743-6