

ELEKTROMOTORNI POGON SA SINHRONIM MOTOROM SA PERMANENTNIM MAGNETIMA

Princip rada i kočenje

ELEKTROMOTORNI POGONI SA **SINHRONIM MOTOROM**

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

Predstavlja ozbiljnu konkurenciju asinhronom motoru u pogonima sa promenljivom brzinom.

Podela sinhronih mašina:

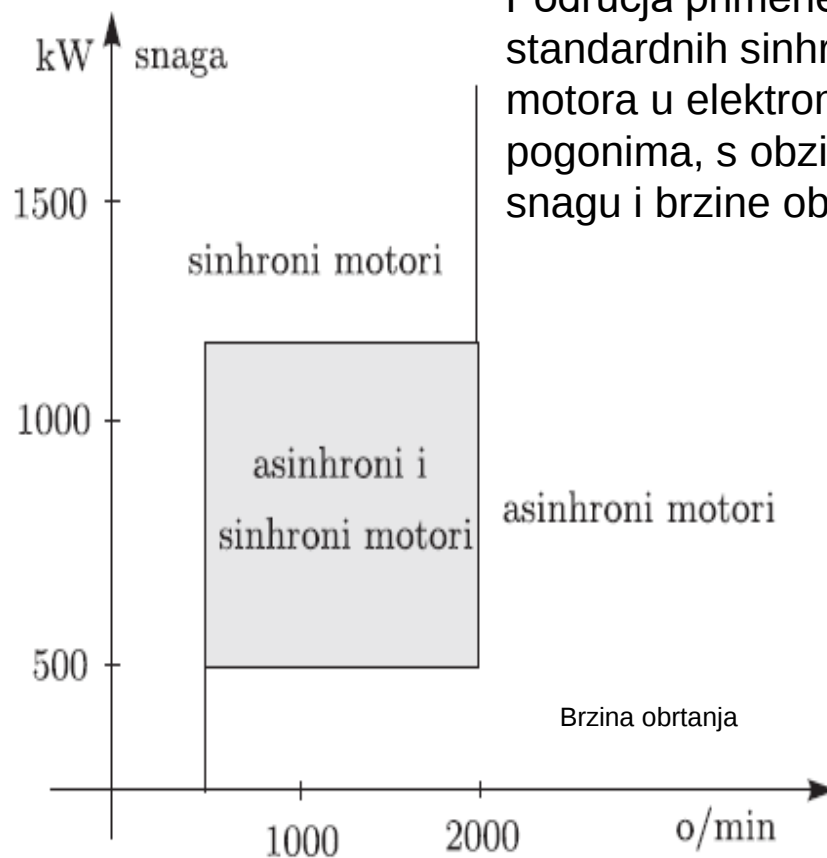
- 1) SM sa namotanim rotorom
- 2) SM sa permanentnim magnetima na rotoru

SINHRONI MOTOR SA NAMOTANIM ROTOROM

- Sinhroni motori s pobudnim namotajem (standardni sinhroni motori) najčešće se koriste u elektromotornim pogonima u opsegu snaga od 1 MW do 100 MW i zahtevaju konstantnu brzinu obrtanja. Motor se napaja direktno iz trofazne mreže konstantnog napona i frekvencije.

- Elektromotorni pogoni sa standardnim sinhronim motorom su:

- valjački stanovi u metalnoj industriji
- rudničke dizalice
- vazdušni kompresori
- mlinovi i pumpe u cementarama i termoelektranama
- reverzibilne hidroelektrane u kojima sinhroni mašina radi kao motor i kao generator.



Područja primene standardnih sinhronih motora u elektromotornim pogonima, s obzirom na snagu i brzine obrtanja.

SINHRONI MOTOR SA NAMOTANIM ROTOROM

- Prednosti standardnih sinhronih motora napajanih direktno iz mreže u odnosu na asinhronne motore su:

- bolji faktor iskorišćenja (92%- 98%)
- brzina obrtanja ne zavisi od opterećenja
- mogućnost kompenzacije reaktivne energije promenom pobudne struje, bez uticaja na tok aktivne snage
- veća stabilnost u radu (kod naglog sniženja napona mreže sinhroni motor ostaje duže u pogonu).

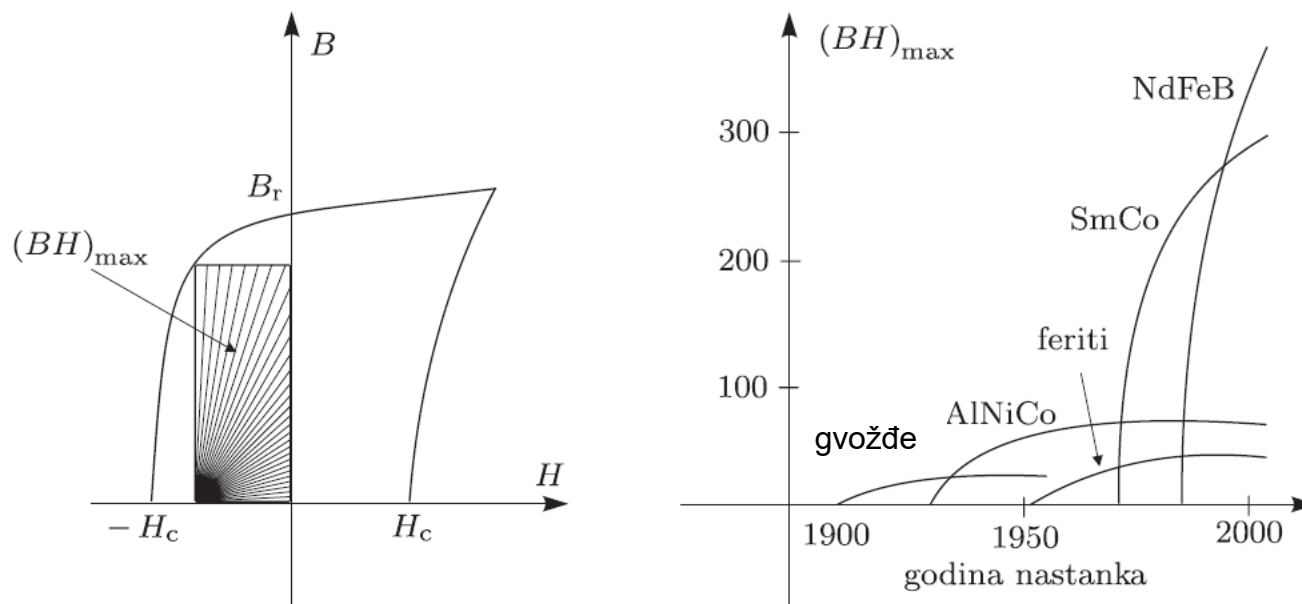
-Nedostaci standardnih sinhronih motora su:

- viša cena
- teškoće kod pokretanja (rešava se napajanjem iz frekventnog pretvarača ili ugradnjom dodatnog kaveznog namotaja pored već postojećeg pobudnog namotaja na rotoru)
- potreba za izvorom jednosmernog napona za pobudu
- nemogućnost podešavanja brzine obrtanja kod direktnog priključenja na električnu mrežu.

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 vazdušnom zazoru mašine, moment motora i brzinu obrtanja.

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



Karakteristike $B = f(H)$ permanentnih magneta

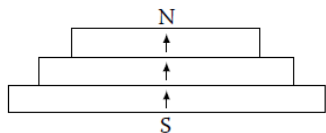
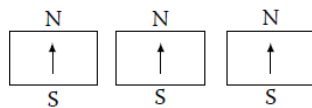
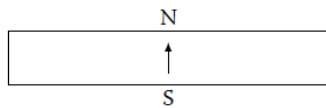
-Materijali koji zadržavaju magnetizam poznati su kao materijali od stalnog magneta. Sposobnost zadržavanja trajnog magnetizma nalazi se u kobaltu, gvožđu i niklu, i oni se nazivaju feromagnetni materijali. Razni materijali kao što su alnico-5, samarijum-kobalt i drugi su poznati kao permanentni magneti (PM) za upotrebu u mašinama. Najpopularniji u praksi su samarijum kobalt i neodimijumski magneti.

-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 .

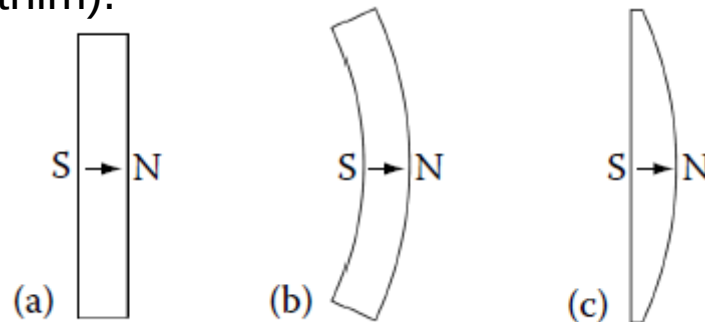
Oblici i primena permanentnih magneta

-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.

- Nedostatak im je veća cena u odnosu na pojedinačne magnete (više prstenastih segmenata zamenjenih jednim kompaktnim).



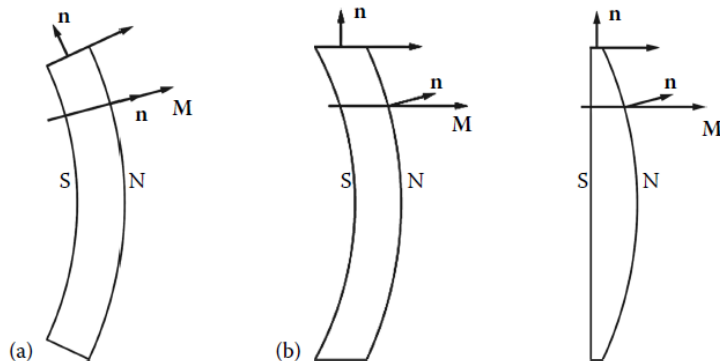
Multisegmentna struktura je neophodna kod mašina veće snage



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). Segmenta struktura se koristi u aplikacijama gde je potreban rad u oblasti slabljenja polja.

Magnetizacija permanentnih magneta - klasifikacija

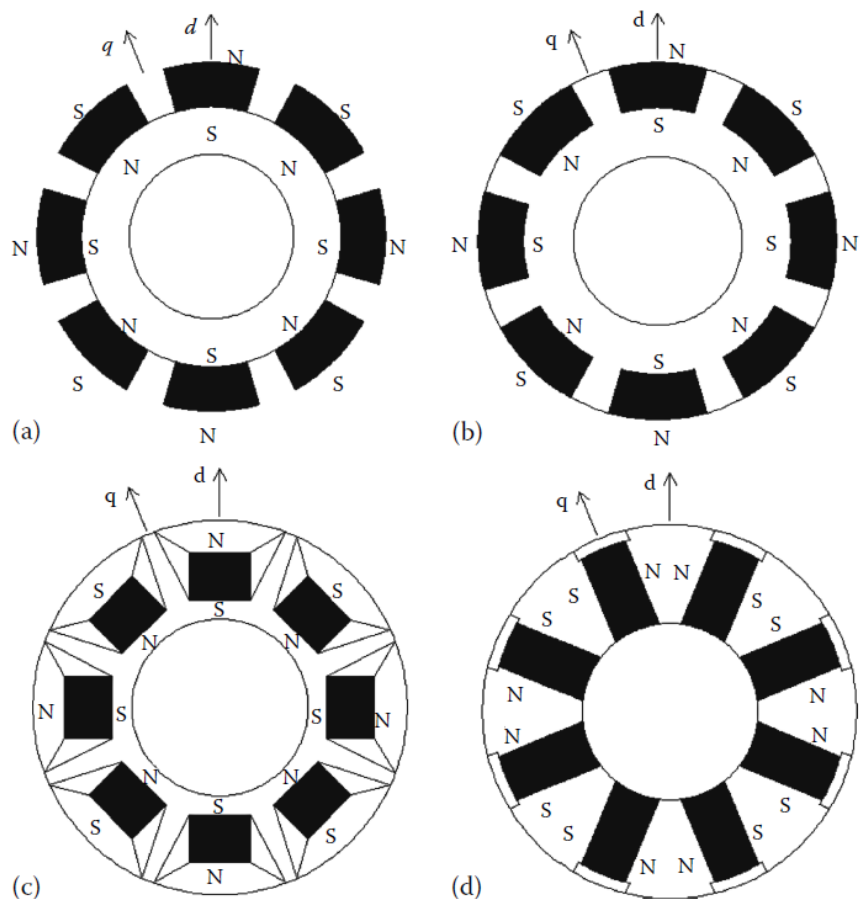
- Permanentni magneti mogu da budu namagnetisani u bilo kom željenom smeru, ali najčešće radijalno, ili paralelno. Na taj način se utiče na raspodelu magnetnog polja u zazoru, a samim tim i na ostale karakteristike motora.
- Radijalno namagnetisani motori proizvode pravougaonu raspodelu gustine fluksa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

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

Sinhroni motori sa isturenim i ukupanim permanentnim magnetima na rotoru

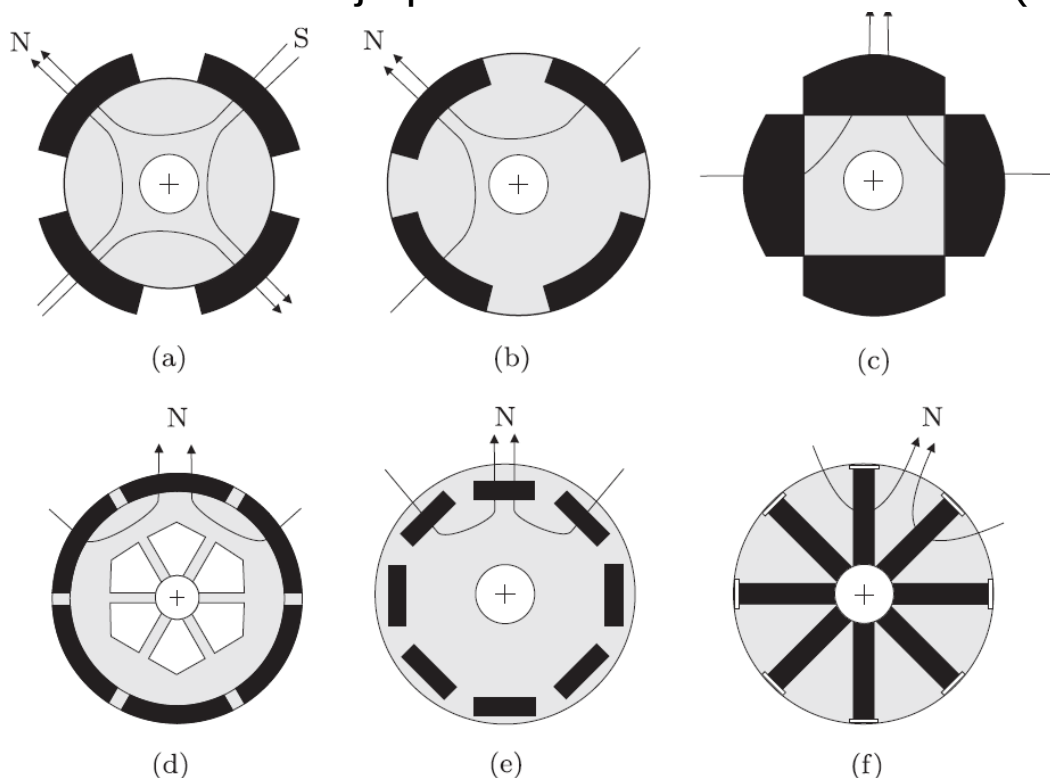


- Permanentni magneti se mogu postaviti:

- na telo rotora sa spoljašnje strane (slike a) SPM
- na telo rotora s unutrašnje strane (slika b) SIPM (surface inset PM)
- u unutrašnjost tela rotora (slika c) Interior PMSM
- u unutrašnjosti tela rotora, ka obodu (slika d).

Sinhroni motori sa isturenim i ukupanim permanentnim magnetima na rotoru

- Permanentni magneti se mogu postaviti:
 - na telo rotora sa spoljašnje strane (slike a i c)
 - na telo rotora s unutrašnje strane (slike b i d)
 - u unutrašnjost tela rotora (slika e)
 - 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.
- Magnetni materijali se mogu podeliti na klasične i moderne. U klasične spadaju alnico (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).
- PMSM sa površinski postavljenim magnetima (Surface PMSM, SPMSM) imaju izotropan rotor, što znači da su induktivnosti po podužnoj (d) i poprečnoj (q) osi približno jednake ($L_d \approx L_q$). Induktivnost statora SPMSM je mala, pa je moguća brza promena statorske 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, obezbeđuju cilindričnu površinu rotora, mehanički robustniji ($L_d \neq L_q$)
- Pored ove konstrukcije postoje i sinhroni motori sa magnetima utisnutim (ukopanim) u rotor, 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 ugla rotora koja dovodi do pojave reluktantnog momenta. Dodatna prednost IPMSM (Interior Permanent Magnet Synchronous Motor) je da se mogu koristiti na velikim brzinama koristeći tehniku slabljenja polja (skupa proizvodnja).

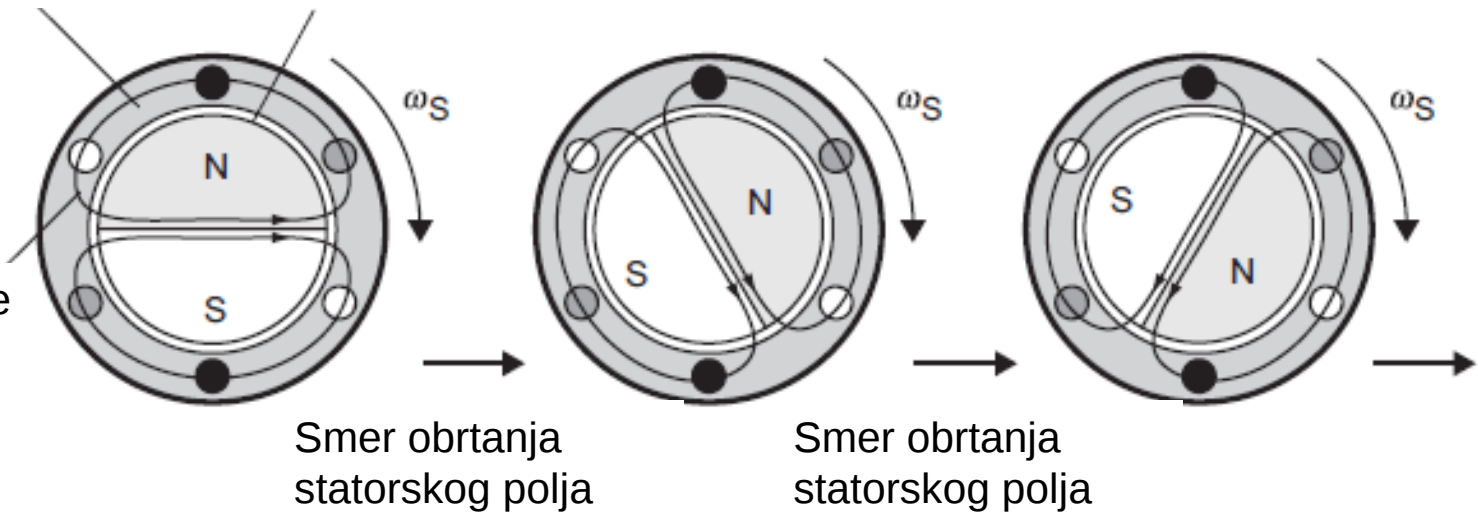
Princip rada

Stator sa trofaznim namotajem

Rotor sa permanentnim magnetima

- Namotaj 1
- Namotaj 2
- Namotaj 3

Magnetno polje statora



- Princip rada PMSM:

- 1) Zasnovan je na primeni Teslinog obrtnog polja i bezkontaktnoj konverziji energije. Strujno kolo statora čini trofazni statorski namotaj, postavljen na svoje magnetno kolo u kućištu statora.
- 2) Na rotoru se nalaze permanentni magneti, koji su zajedno sa magnetnim kolom rotora pričvršćeni za vratilo. Vratilo se oslanja na dva ležaja postavljena u ležajne štitove.
- 3) PMSM se napaja trofaznim naponima i strujama koje su fazno pomerene za $2\pi/3$, preko trofaznog namotaja koji je sinusno raspodeljen po obimu statora i kod koga su ose namotaja faza prostorno pomerene za $2\pi/3$.

Princip rada

- 4) Trofazni sistem napona i struja na statoru stvara Teslino obrtno polje, 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.
- 5) 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 momenat).
- 6) Dovođenjem momenta opterećenja na vratilo motora povećava se ugao između polja statora i polja rotora, ali se kontinualni momenat razvija samo u sinhronizmu.
- 7) Pošto PMSM može da razvija 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 dizajnirani za rad pri promenljivim brzinama obrtanja, ali se moraju napajati pomoću invertora ili 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. Najčešće se koristi inkrementalni enkoder, što povećava ukupnu cenu pogona.
- 3) Postoji rizik od demagnetizacije rotora, tj. slabljenja magneta usled velikih struja ili visokih temperatura. Za održavanje motora su potrebni specijalni alati, jer izvlačenje rotora nije jednostavno zbog postajana jakih magnetnih sila, koje stvaraju stalni magneti.

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

$$m_e = K |\varphi_1 \times \varphi_2| = K |\varphi_1| |\varphi_2| \sin \angle(\varphi_1, \varphi_2)$$

gdje je K konstruktivna konstanta mašine.

- Ako je poznat položaj rotora, odnosno osa delovanja permanentnih magneta na rotoru, moguće je odgovarajućim uključanjem prekidačkih elemenata invertora postići da magnetno polje stvoreno strujama koje teku kroz namotaje statora bude uvek pomaknuto za 90° električnih u odnosu na osu delovanja magnetnog polja permanentnih magneta, tako da sinhroni motor uvek razvija konstantan maksimalni elektromagnetni moment.

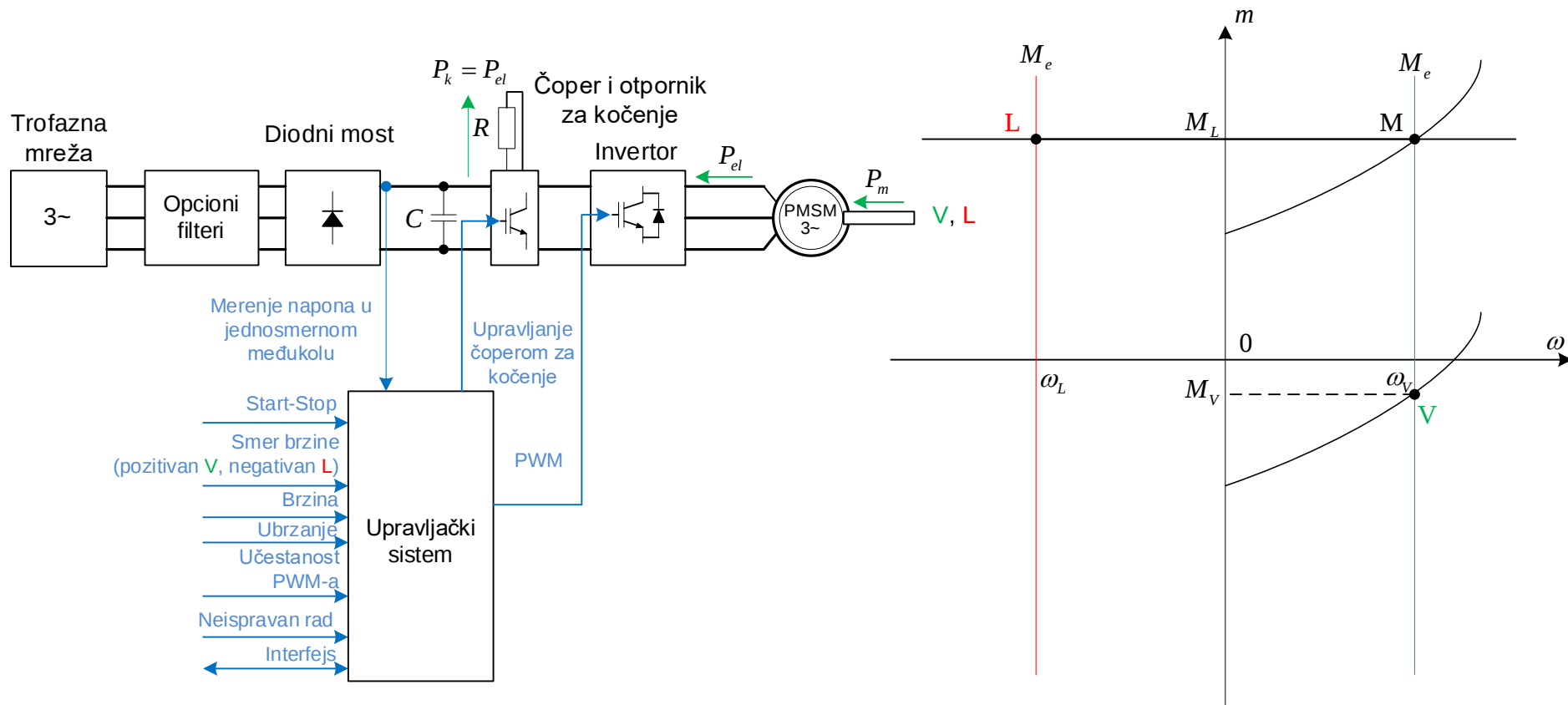
- Motor kod koga kroz namotaj na statoru teku struje približno sinusnog talasnog oblika naziva se sinhroni motor sa permanentnim magnetima (PMSM).

- Da bi se ostvario konstantan mehanički moment potrebno je da se invertorom sa širinsko impulsnom modulacijom signala proizvede napon koji će uzrokovati da struje kroz namotaje statora imaju približno sinusni talasni oblik. Upravljanje prekidačkim elementima (tranzistorima) invertora mora se uskladiti sa položajem rotora u svakom trenutku. Struje uvek teku kroz tri faze i proizvode simetrično trofazno obrtno polje čija je rezultantna osa delovanja uvek pomerena za 90° električnih u odnosu na osu delovanja permanentnih magneta na rotoru.

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

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

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 iz I kvadranta (M) prelazi u II kvadrant (radna tačka V), koja se nalazi u preseku mehaničkih karakteristika motora i opterećenja.
 - b) Pogon sa PMSM radi u I kvadrantu, tj. PMSM pokreće lift naviše (radna tačka M); lift stigne do zadatog sprata i zatim dobije komandu da se spušta na niži sprat – smer obrtanja motora se menja, a radna tačka iz I kvadranta (M) prelazi u IV kvadrant (radna tačka L), koja se nalazi u preseku mehaničkih karakteristika motora i opterećenja.
- U oba slučaja PMSM iz motornog prelazi u generatorski režim rada, tako da se mehanička snaga (snaga preuzeta iz mehaničkog podsistema 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 ulazna jedinica pretvarača, 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.

Literatura:

- [1] Ramu Krishnan, "Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Drives", CRC Press, Sept 2009, ISBN 9780824753849
- [2] Darko Marčetić, Petar Matic, "Digitalno regulisani elektromotorni pogoni", ETF Banja Luka i Akademska misao Beograd, ISBN 978-99955-46-41-0, 2020.god