

MAŠINE JEDNOSMERNE STRUJE

1. UVOD

Mašine jednosmerne struje (MJS) su vrlo rasprostranjene. Često se koriste za elektromotorne pogone promenljive brzine, zbog vrlo jednostavne regulacije brzine. Iako su druge vrste motora u poslednjih par decenija postale ozbiljan konkurent za upotrebu u pogonima promenljive brzine, MJS se i dalje koriste u sledećim oblastima:

a) mali napon:

- automobili i ostala drumska vozila (anlaser, brisači, ventilacija kabine, podizači prozora, pomeranje sedišta),
- uređaji kućne elektronike i zabave (DVD i CD plejeri, računari),
- igračke.

b) srednji i viši napon:

- električna vuča (trolejbusi, tramvaji, vozovi, viljuškari i unutrašnji transport).

Ovo poglavlje koncentriše se na motore, jer se generatori jednosmerne struje vrlo retko koriste – kao izvori jednosmerne struje koriste se pretvarači energetske elektronike.

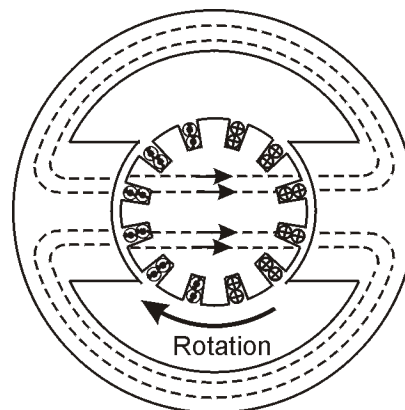
Motore jednosmerne struje imaju linearne a time i lako upravljive radne karakteristike, fleksibilne performanse i visok stepen iskorišćenja. Ovi faktori, zajedno sa dugom razvojnom istorijom, doveli su da se MJS koriste u mnogim industrijskim aplikacijama. Sa razvojem novih magnetnih materijala i automatske proizvodnje u poslednjih par decenija, na tržištu postoji širok izbor običnih i servo motora malih i srednjih snaga.

2. RAZVIJANJE MOMENTA MOTORA

Rad MJS zasniva se na konstantnom magnetnom polju, koje potiče od stalnih magneta ili od statorskog namotaja (elektromagnetno delovanje). Glavni namotaj, smešten na rotoru, ima više namotaja smeštenih u aksijalne žljebove blizu površine rotora. Početak i kraj svakog

namotaja rotora povezani su na različite segmente (kriške) komutatora. Na nekoliko segmenata komutatora naležu grafitne četkice, koje napajaju te namotaje rotora strujom. Četkice su pozicionirane tako da napajaju namotaje koji su u jakom magnetnom polju (blizu magnetnog pola statora) i stoga proizvode maksimalni korisni moment (motorno delovanje).

Kad je razvijen moment veći od momenta radne mašine, rotor počinje da se obrće, pa se namotaji rotora kreću u nepokretnom magnetnom polju, te se u njima indukuje elektromotorna sila (generatorsko delovanje, iako mašina radi kao motor).



Slika 1: Poprečni presek MJS.

Kontinualna proizvodnja momenta motora omogućena je postojanjem više navojaka i sistema komutator-četkice. Komutator usmerava struju u navojke u povoljnoj magnetnoj poziciji, pa je rezultantni moment motora maksimiziran za dati nivo struje i uvek usmeren u jednom smeru rotacije.

Smer momenta, a time i kretanja, određen je smerom polja i smerom struje. Smer rotacije menja se promenom smera struje rotora, tj. promenom polariteta napajanja.

3. MODELI I EKVIVALENTNA ŠEMA

3.1. Dinamički Model

MJS se predstavljaju sledećim modelom:

Dve jednačine ravnoteže napona:

$$u_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + L_{ap} \frac{di_p}{dt} + \omega L_{ap} i_p \quad (1)$$

$$u_p = R_p i_p + L_p \frac{di_p}{dt} \quad (2)$$

Gde indeks a označava armaturu (namotaj rotora) dok indeks p označava pobudni namotaj (statora).

Elektromagnetni moment konverzije:

$$m_e = L_{ap} i_a i_p \quad (3)$$

Mehaničko kretanje:

$$m_e = m_m + m_{tr} + k_{vent} \omega_m + J_m \frac{d\omega_m}{dt} \quad (4)$$

U većini primena, (osim kod motora sa rednom pobudom), struja pobude je konstantna, pa se često koristi tzv. konstrukciona konstanta motora:

$$K_m = L_{ap} I_p \quad (5)$$

gde je K_m izraženo u [Vs] (odnosno [V/(rad/s)]) i u [Nm/A]. Ovakav način modelovanja je koristan kad se razmatraju mašine u kojima se fluks obezbeđuje stalnim magnetima.

3.2. Statički Model

Statički model važi kad su i napajanje i opterećenje konstantni dovoljno dugo, tako da su svi elektromagnetni i elektromehanički prelazni procesi završeni. Pri takvom radu, MJS se predstavlja sledećim jednačinama:

$$U_a = R_a I_a + K_m \omega_m \quad (6)$$

$$M_e = K_m I_a \quad (7)$$

$$M_e = M_m + M_{tr} + k_{vent} \omega_m \quad (8)$$

Model se može predstaviti ekvivalentnom šemom sa slike 2. Treba primetiti da gubici u magnetnom kolu i mehanički gubici nisu obuhvaćeni ovim matematičkim modelom, niti ekvivalentnom šemom.

4. VRSTE MJS

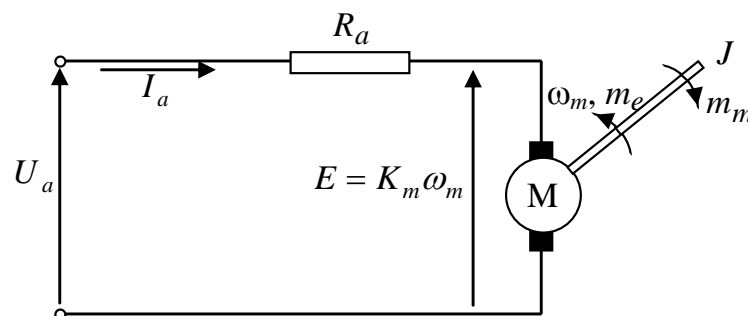
Uobičajena klasifikacija mašina jednosmerne struje zasniva se na načinu povezivanja pobudnog namotaja. Postoje sledeće vrste pobuda:

- nezavisna,
- stalnim magnetima,
- redna,
- složena (kompaundna),
- paralelna.

Izlazne karakteristike mašine značajno zavise od vrste pobude. Kod generatora, misli se na zavisnost napon-struja, a kod motora na zavisnost moment-brzina, odnosno izlaznu mehaničku karakteristiku.

4.1. Motori sa Nezavisnom Pobudom

Ovaj tip MJS najčešće se koristi u opštim i servo aplikacijama svih nivoa snaga. Namotaj pobude napaja se iz nezavisnog izvora manje snage i obično se struja pobude održava na nominalnom nivou. Pobudni namotaj ima mnogo (desetine pa i stotine) navojaka, da bi se dobilo jako magnetno polje pri malim nivoima struje pobude.



Slika 2: Ekvivalentna šema MJS, za nezavisnu pobudu i pobudu stalnim magnetima.

Glavni namotaj (rotora) napaja se iz izvora jednosmernog napajanja veće snage, koji obično može da obezbedi struju veću od nominalne, kako bi se postiglo što bolje ubrzanje pri startu. Kod mašina malih snaga, strujna preopteretivost je i do 400 %, a kod vrlo velikih snaga bar 30 %

Momentna karakteristika motora se izvodi tako što se iz jed. (7) izrazi struja:

$$I_a = M_e / K_m \quad (9)$$

i uvrsti u jed. (6):

$$\omega_m = \frac{U_a - R_a \frac{M_e}{K_m}}{K_m} = \frac{U_a}{K_m} - \frac{R_a}{K_m^2} M_e \quad (10)$$

odnosno

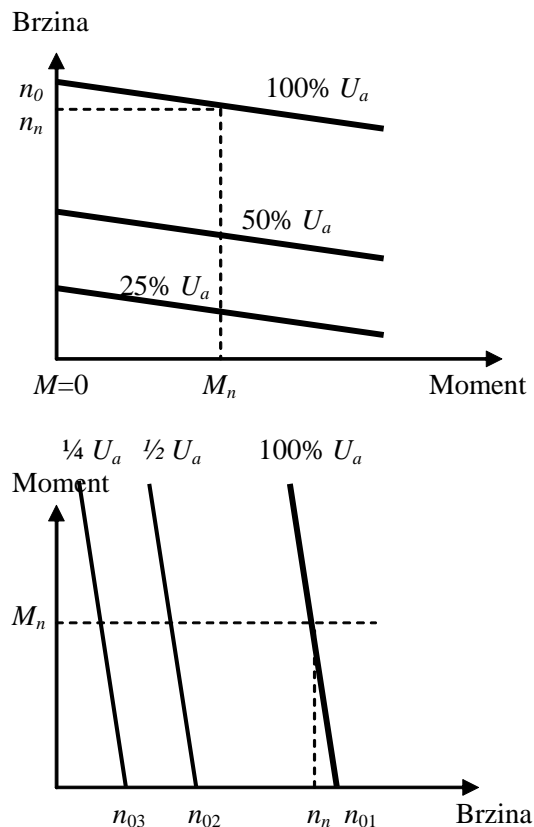
$$\omega_m = \omega_0 - K_1 M_e \quad (11)$$

gde je ω_0 brzina praznog hoda za dati napon. Dakle, ovo je jednačina prave. Za dobijanje visokog stepena iskorišćenja, mašine se prave sa visokim K_m a malim otporom namotaja rotora R_a pa je član K_1 u jednačini (11) prilično mali.

Mehaničke karakteristike za tri vrednosti napona napajanja prikazane su na slici 3a. Može se videti da se dobijaju relativno male promene brzine pri promenama opterećenja od praznog hoda do nominalnog momenta, što se naziva "tvrda" mehanička karakteristika. Slika 3.b. prikazuje iste karakteristike MJS, ali sa zamenjenim koordinatnim osama.

Sa druge strane, regulacijom napona napajanja može se postići bilo koja brzina, od sasvim malih brzina do nominalne. Za regulaciju napona koriste se relativno jednostavni i jeftini uređaji energetske elektronike (ispravljači i čoperi).

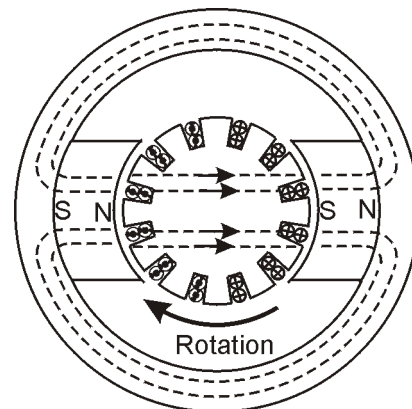
Treba primetiti da će MJS raditi u nominalnom režimu samo ako je perfektno uparen sa teretom kojeg pogoni. Ovo se dešava samo povremeno, jer je pri izboru motora neophodna određena rezerva momenta (i brzine), radi ubrzanja i zbog sigurnosti. Ovo znači da većina motora značajan deo vremena radi delimično opterećena.



Slika 3 – Statičke izlazne karakteristike MJS sa nezavisnom pobudom.

4.2. Motori sa Stalnim Magnetima

Pobudni namotaj statora može se zameniti stalnim magnetima, koji obezbeđuju magnetisanje celog magnetnog kola, slika 4.



Slika 4: Motor sa stalnim magnetima

Klasični feritni i Al-Ni-Co magneti daju srednju jačinu magnetnog polja i već decenijama se koriste u manjim motorima. U poslednjih dve decenije, nova tehnologija

magneta od tzv. retkih zemalja (Samarijum-Cobalt i Neodijum-Bor-Fe), omogućila je dostizanje većih jačina magnetnog polja i vrlo visoke gustine magnetne energije. Ovi magneti su stoga manji po zapremini pa je cena ugradnje prihvatljiva. Prednost ovih magneta je što je nepoželjno razmagnetisavanje, koje se može javiti pri startu i pri kvarovima, praktično nemoguće. Loša strana primene je visoka cena magneta, ali zbog postizanja jačeg magnetnog polja ceo motor postaje manji (za istu snagu), što ublažava porast cene.

Stalni magneti su pogodni za motore malih snaga, gde je izrada i ugradnja malih pobudnih namotaja komplikovana i relativno skupa. Moderni magneti su idealni za servo-motore, gde su neophodne visoke dinamičke performanse:

- otpor i induktivnost rotora su vrlo mali pa se omogućavaju vrlo brze promene struje tj. momenta.
- smanjene dimenzije rotora, pogotovo pri specijalnim konstrukcijama rotora, omogućuje izradu mašina sa izuzetno malim momentom inercije, što doprinosi postizanju visokih ubrzanja i usporenja.

Mehaničke karakteristike motora sa stalnim magnetima slične su karakteristikama motora sa nezavisnom pobudom, sa slike 3.

4.3. Motori sa Rednom Pobudom

Ovaj tip motora je najčešće korišćen za ručne alate (mala snaga) i u pogonima električne vuče. Namotaj pobude je redno povezan sa namotajom armature i ima manji broj navojaka deblje žice. Oba se napajaju iz jednog izvora DC napajanja. Povećanjem opterećenja raste i struja koja protiče i kroz namotaj pobude, pa se magnetno polje pojačava, čime se dobija veći moment konverzije uz umeren porast struje.

Statički model motora sa rednom pobudom se sastoji od sledećih jednačina:

$$U_a = (R_a + R_p)I + L_{ap}I \omega_m \quad (12)$$

$$M_e = L_{ap}I_p I_a = L_{ap}I^2 \quad (13)$$

$$M_e = M_m + M_{tr} + k_{vent} \omega_m \quad (14)$$

Ovaj model predstavlja se ekvivalentnom šemom sa slike 5. Ponovo, gubici u magnetnom kolu nisu obuhvaćeni modelom pa ni ekvivalentnom šemom.

Momentna karakteristika rednog motora se izvodi tako što se iz jed. (13) izrazi struja:

$$I = \sqrt{M_e / L_{ap}} \quad (15)$$

i uvrsti u jed. (12):

$$\omega_m = \frac{U - (R_a + R_p)I}{L_{ap}I}$$

$$\omega_m = \frac{1}{\sqrt{L_{ap}}} \frac{U}{\sqrt{M_e}} - \frac{R_a + R_p}{L_{ap}} \quad (16)$$

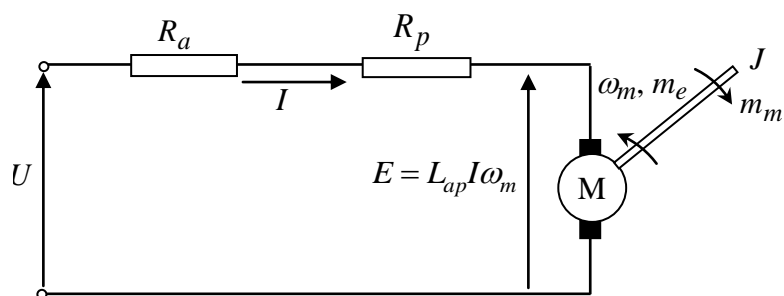
$$\omega_m = K_1 \frac{U}{\sqrt{M_e}} - K_2$$

Ovo je jednačina krive, gde brzina nelinearno opada sa momentom. Mehaničke karakteristike rednog motora, za četiri vrednosti napona napajanja, prikazane su na slici 6. Može se videti da se dobijaju relativno velike promene brzine pri promeni momenta opterećenja. Ovo se naziva "meka" mehanička karakteristika.

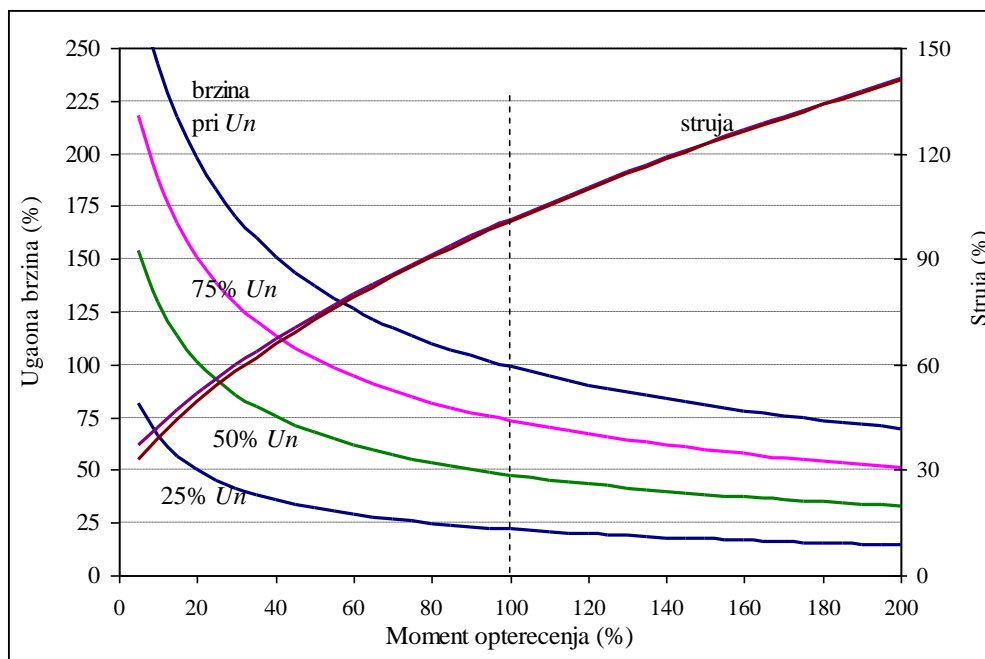
Dobra strana ovih motora je što moment raste sa kvadratom struje, te motor može da razvije dvostruki moment sa samo 140% nominalne struje. Kratkotrajna preopterećenja, neophodna za ubrzanje, su dozvoljena jer se motor za to vreme neće prekomerno zagrejati. Zbog ovakve momentne karakteristike, motor razvija visok moment pri startu i zaletu, pa je zbog toga jako pogodan za korišćenje u električnim vozilima i električnoj vuči (visok moment pri zaletu a umeren za vožnju).

Ako se motor sa rednom pobudom potpuno rastereti, brzina obrtanja će značajno porasti, pa postoji opasnost od razletanja rotora usled velikih centrifugalnih sila. Kod manjih motora, ventilator će predstavljati neko opterećenje, a kod velikih motora postavlja se prekobrzijska zaštita.

Regulacijom napona napajanja može se postići bilo koja brzina od sasvim malih do nominalnih. Iako je regulacija brzina-napon linearna, "meka" izlazna karakteristika ima za posledicu kompleksnije upravljačke sisteme.



Slika 5: Ekvivalentna šema MJS sa rednom pobudom.



Slika 6: Ugaona brzina (za pun i snižene napone napajanja) MJS sa rednom pobudom.

5. OGRANIČENJA U PRIMENI MJS

Iako obavljaju efikasno i fleksibilno elektromehaničko pretvaranje energije, uz laku i jednostavnu regulaciju momenta i brzine, motori jednosmerne struje imaju i neke ozbiljne nedostatke.

Najslabija tačka MJS je sklop komutatora i četkica. Kao prvo, javlja se neizbežno varničenje kada četkice klize preko segmenata komutatora i preusmeravaju struju iz namotaja u namotaj. Varničenje sprečava korišćenje MJS u eksplozivnim sredinama. Kao drugo, četkice su napravljene od ugljenika i stoga se javlja ugljena prašina, koja je nepoželjna u "čistim" industrijama (prehrambenoj, hemijskoj, farmaceutskoj, kozmetičkoj). Takođe, četkice ograničavaju nivo kratkotrajnog preopterećenja i smanjuju dinamičke performanse motora. Konačno, i

četkice i komutator se troše pa ih treba redovno kontrolisati i povremeno menjati.

Drugi ozbiljan problem, koji nastaje zbog prirode konstrukcije MJS, je hlađenje. Praktično sva električna snaga prolazi kroz namotaj rotora, te i većina gubitaka nastaje u rotoru. Motori zatvorene konstrukcije se hlade prisilnom ventilacijom spoljnog oklopa, a prenos toplotne energije sa rotora na stator se rešava unutrašnjim ventilatorom. Kako se ovim načinom toplotna energija teže odvodi iz rotora, ne može se postići povoljna snaga motora za datu veličinu motora. Ako se motor hladi direktnom prisilnom ventilacijom kroz vazdušni procep, mora biti otvorenije konstrukcije pa vlaga, prašina i razne ostale materije mogu dospeti u motor i izazvati probleme, pogotovo na četkicama i u ležajevima.

Konačno, postoji problem polaska iz stanja mirovanja. Kod motora sasvim malih snaga, omski otpori namotaja su relativno veliki pa je polazna struja pri direktnom uključenju nekoliko puta veća od nominalne. Ako se četkice i komutator predimenzionišu, izdržaće takvu polaznu struju bez većih problema. Međutim, visok omski otpor povećava gubitke, čime se pogoršava stepen iskorišćenja. Kod motora srednjih i velikih snaga omski otpor je vrlo mali (veći stepen

iskorišćenja) pa bi struja polaska bila i do 25 puta veća od nominalne. Iako ovo izgleda pogodno s obzirom na ogromno ubrzanje, ovako velika struja bi vrlo brzo uništila četkice i komutator, a i prouzrokovala probleme sa napajanjem. Problem velike polazne struje rešava se tako što se motor prvo priključuje na niži napon, koji se povećava kako motor ubrzava tokom zaleta, ali to zahteva dodatne uređaje i poskupljuje pogon.