

MAŠINE JEDNOSMERNE STRUJE

SADRŽAJ

1	MAŠINE JEDNOSMERNE STRUJE	3
1.1	Osnovni delovi.....	3
1.2	Princip rada.....	4
1.3	Namotaji indukta	5
1.4	Namotaji pobude	7
1.5	Elektromotorna sila indukta	8
1.6	Obrtni momenat.....	9
1.7	Brzina obrtnja	10
1.8	Reakcija indukta	10
1.9	Komutacija	12
1.10	Generatori jednosmerne struje	15
1.11	Karakteristike momenta motora.....	17
1.12	Pokretanje mašina jednosmerne struje.....	18
1.13	Regulisanje brzine nezavisno pobuđenog motora jednosmerne struje	18
1.14	Kratak osvrt na prelazne pojave i raspobuđivanje	20
1.15	Univerzalni motor	20
1.16	Literatura.....	21

1 MAŠINE JEDNOSMERNE STRUJE

Mašine jednosmerne struje (jednosmerne mašine) su zbog svojih veoma dobrih funkcionalnih karakteristika nekada predstavljale često rešenje u električnim postrojenjima i pogonima. Zbog veće cene, složenijeg i skupljeg održavanja, manje pouzdanosti i kraćeg veka trajanja, danas se motor jednosmerne struje sve više potiskuje od strane jeftinijih, jednostavnih i robustnih električnih motora za naizmeničnu struju upravljanih mikroprocesorima i napajanih energetskom elektronikom.



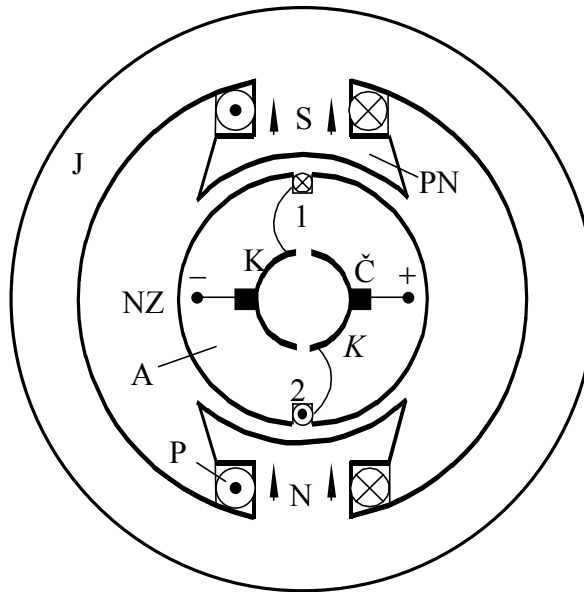
Slika 1-1 Motor jednosmerne struje

Generatori jednosmerne struje su praktično potisnuti poluprovodničkim ispravljačima. Međutim, generator jednosmerne struje sa nezavisnom pobudom, zbog svojih veoma dobrih karakteristika se često koristi kao kočnica u laboratorijama za ispitivanje električnih mašina.

1.1 Osnovni delovi

Osnovni elementi mašine su mirujući deo (stator) i obrtni deo (rotor). Između mirujućeg i obrtnog dela nalazi se međugvožđe (vazdušni procep, zazor). Magnetsko kolo ima rotacionu simetriju. Stator je načinjen od jarma u obliku šupljeg valjka od masivnog gvožđa, na čijoj su unutrašnjoj periferiji pričvršćena $2p$ istaknuta pola složenih od feromagnetskih limova. Na polovima statora je smešten koncentrisan pobudni namotaj (induktor), povezan između polova na određeni način i izveden na dva priključna kraja. Rotor je cilindričnog oblika i sastavljen od tankih feromagnetskih limova i ravnomerno je ožljebljen po svom obimu. Paket limova rotora čvrsto je spojen sa vratilom mašine. Namotaj na rotoru (indukt, armatura) je raspodeljen, smešten u žlebovima i zatvoren sam sa sobom.

Komutator (kolektor) je sastavljen od bakarnih segmenata (kriški) koji su izolovani međusobno i u odnosu na masu. Postavljen je sa jedne strane rotora i obrće se zajedno sa njim. Na površinu komutatora naleže izvestan broj *dirki* (četkica), koje su smeštene na simetrali među polovima, u "*neutralnoj zoni*" i nepomične (mehanički učvršćene za stator), spojene na dva priključna kraja na statoru. Segmenti komutatora su u električnoj vezi sa namotajem indukta, svaki segment indukta spojen je sa istim tolikim brojem tačaka namotaja indukta.



Slika 1-2 Šematski presek pojednostavljene dvopolne mašine jednosmerne struje
 (oznake odgovaraju generatorskom režimu rada) – J jaram, S i N glavni polovi, P- pobudni namotaj, PN- polni nastavci, A- indukt, K- komutator (kolektor), Č- četkice, NZ- neutralna zona (osa), 1 i 2 - pojednostavljeni namotaj rotora

1.2 Princip rada

Princip rada mašine za jednosmernu struju pojednostavljeno ćemo objasniti na primeru generatora (Slika 1-2). Kada se kroz provodnike namotaja statora pusti jednosmerna struja, ona će stvoriti stalno magnetsko polje pobude, Φ , odgovarajućeg polariteta, vezanog za smer struje. Ovo polje je periodično, sa periodom jednakom dužini dvostrukog polnog koraka, i funkcija je samo prostorne koordinate (položaja na obimu mašine).

Kada se pomoću neke pogonske mašine rotor obrće konstantnom brzinom, n , u njegovim provodnicima će se usled presecanja magnetnog fluksa indukovati odgovarajuća elektromotorna sila, po zakonu $e=Blv$. Budući da je u prethodnoj jednačini samo magnetska indukcija promenljiva, oblik ems će biti isti kao i oblik magnetnog polja (indukcije B). U pojedinim provodnicima koji sačinjavaju navojak, ems će biti suprotne i sabiraće se, pošto su oni vezani na red. Kada je navojak u položaju da je kroz njega fluks maksimalan, prema jednačini:

$$e = - d\Psi / dt,$$

u njemu će indukovana ems biti jednaka nuli, i taj položaj nazivamo neutralnom zonom (horizontalni položaj navojka na slici). Međutim, zahvaljujući delovanju kolektora, polaritet ems , pa prema tome i struje, u odnosu na spoljašnje kolo, neće se menjati jer, uz nepromenjeni smisao obrtanja, dirke su uvek istog polariteta jer su preko kolektora povezane sa provodnicima koji prolaze ispod istog magnetnog pola. Prema tome, pomoću kolektora se naizmenične struje u provodnicima "ispravljaju", što ima za posledicu jednosmernu struju u spoljnjem električnom kolu.

1.3 Namotaji indukta

Namotaj indukta nalazi se na rotoru, a po tipu je obično valjkasti (dobošasti, bubnjasti, cilindrični). Nekada se namotaj izvodio u obliku prstena, ali ovo rešenje je napušteno jer je zbog potrebe za ručnim motanjem vreme izrade bilo veliko, a i potrošnja bakra je bila veća jer provodnici na unutrašnjem delu prstena nisu aktivni i ne učestvuju u stvaranju *ems*.

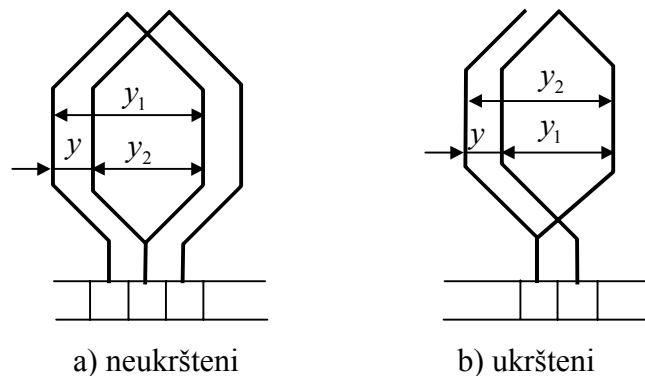
Dva provodnika treba spojiti u navojak tako da indukovana *ems* u navojku bude maksimalna, tj. tako da navojak obuhvata sav fluks po polu. Navojni deo (sekciju) čini više navojaka vezanih na red postavljenih u dva žleba, i to u gornjem sloju jednog žleba i donjem sloju drugog žleba.

Prema načinu vezivanja provodnika u navojne delove možemo valjkasti namotaj da podelimo uglavnom na četiri vrste: prost omčasti namotaj, složeni omčasti namotaj, prost valoviti namotaj i složen valoviti namotaj. Ovde će biti date samo osnove izvođenja namota ilustrovane na prostom omčastom i prostom valovitom namotaju.

Osnovni princip izvođenja namotaja je da se vezuju dva provodnika koji se nalaze u istom ili približno istom položaju pod dva različita pola. Kod izvođenja *omčastih namotaja* prvo povezujemo sve navojke ili navojne delove koji se nalaze pod jednim parom polova, te namotaj ima oblik omče, po čemu je i dobio ime. Rastojanje između ulaznog i izlaznog provodnika, pošto ih vežemo sa zadnje strane (sa strane suprotne komutatoru) naziva se zadnji navojni korak (y_1). Sada izlazni provodnik vezujemo sa prednje strane (strane komutatora) preko lamele za sledeći ulazni. To rastojanje se naziva prednji navojni korak (y_2). Zadnji i prednji navojni koraci su delimični navojni koraci. Ukupni navojni korak (y) kod omčastog namotaja je:

$$y = y_1 - y_2 .$$

Ako je $y_2 < y_1$ onda dobijamo neukršteni namotaj, a ako je $y_2 > y_1$ onda dobijamo ukršteni omčasti namotaj. Ukršteni omčasti namotaji se obično ne prave.

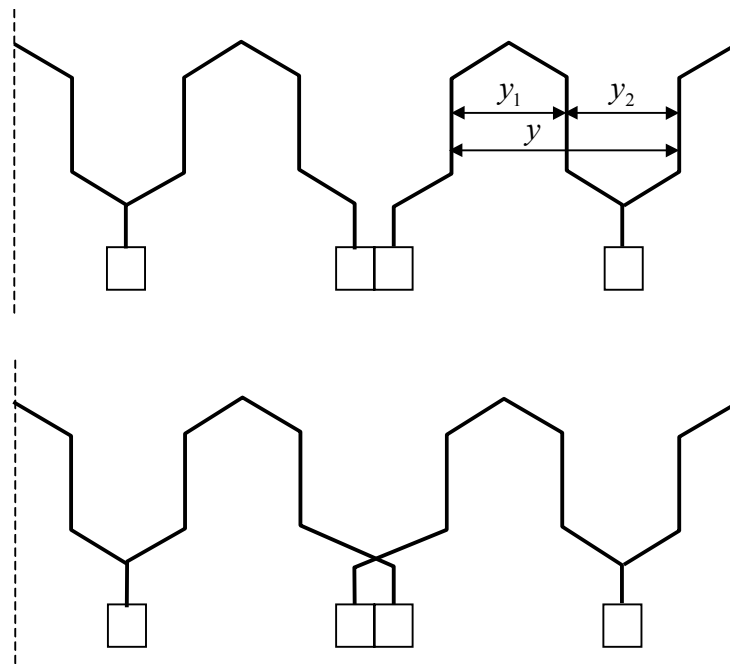


Slika 1-3 Prosti omčasti namotaj

Kod *valovitog namotaja* kada obrazujemo navojak nastavljamo sa vezivanjem na red po položaju sličnih navojaka pod svim polovima mašine. Ovo povezivanje svih sličnih navojaka pod svim polovima vršimo tako da pri završetku jednog obilaženja dođemo do susedne lamele na komutatoru. U zavisnosti od toga, da li smo idući u smeru namotavanja došli do lamele ispred ili iza početne, razlikujemo neukrštene namotaje (slika 1-4a) i

ukrštene namotaje (slika 1-4b). I kod prostih valovitih namotaja ukrštanje se izbegava, zbog ipak nešto veće potrošnje bakra. Ukupni navojni korak kod valovitih namotaja je:

$$y = y_1 + y_2 .$$

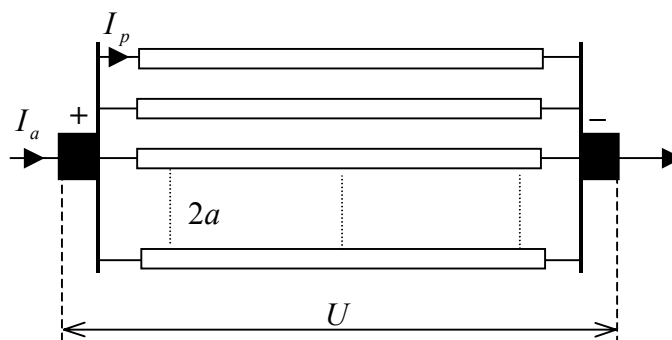


Slika 1-4 Neukršteni i ukršteni prost valovit namotaj

Između "pozitivnih" i "negativnih" četkica nalazi se celi namotaj indukta. Na slici 1-5 je prikazan namotaj kao šema otpora. Budući da je otpor svake od $2a$ paralelnih grana jednak (a je oznaka za broj pari paralelnih grana), struja u provodniku ili grani je:

$$I_p = \frac{I_a}{2a} ,$$

gde je I_a ukupna struja indukta.



Slika 1-5 Šema otpora namotaja indukta

Ako je ukupan broj provodnika u namotaju N , uz a pari paralelnih grana, onda jednoj strujnoj grani, koja aktivno učestvuje u stvaranju napona, pripada $N/2a$ provodnika. Za

ukupni otpor indukta, R_a , uvažavajući da je ukupni otpor $1/2a$ puta manji od otpora jedne grane, imamo:

$$R_a = \frac{1}{2a} \frac{N}{2a} R_p = N \left(\frac{1}{2a} \right)^2 R_p,$$

gde je R_p otpor jednog provodnika.

1.4 Namotaji pobude

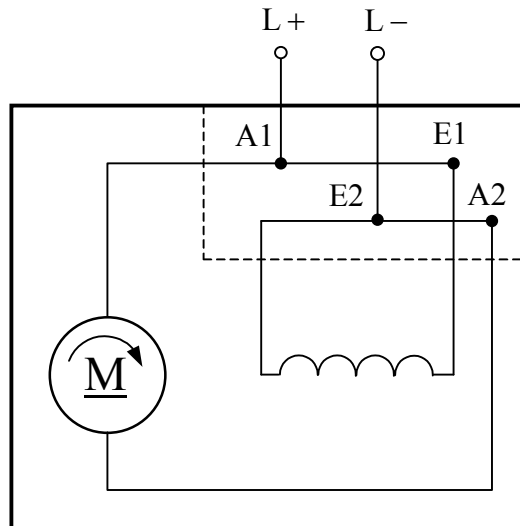
Prema načinu spajanja namotaja pobude u odnosu na namotaj indukta, razlikujemo sledeće osnovne vrste pobude:

- *nezavisna pobuda*, kod koje je namotaj pobude spojen na poseban spoljni izvor napona, koji je potpuno nezavisan od prilika u mašini. Pobudni namotaj je dimenzionisan prema tom spoljnjem naponu. Vrednost pobudne struje može se podešavati, nezavisno od mašine, ako u strujnom kolu pobude postoji promenljivi otpornik. Ovo je danas najčešće rešenje, a jednosmerni pobudni napon se dobija iz naizmenečne trofazne mreže, preko ispravljača.
- *otočna (paralelna) pobuda*, kod koje je pobudni namotaj spojen paralelno na namotaj indukta. Pobudna struja kreće se u granicama 1 do 5% struje indukta, pri čemu se manja vrednost odnosi na mašine većih snaga. Za postizavanje potrebne magnetopobudne sile, pošto je struja magnećenja mala, potrebno je da paralelni namotaj ima veliki broj navojaka. Otpor paralelnog namota je velik.
- *redna (serijska) pobuda*, kod koje je pobudni namotaj spojen na red sa namotajem indukta. Za dimenzionisanje namotaja merodavna je struja indukta. Za postizanje odgovarajuće magnetopobudne sile, pošto je struja velika, broj navojaka namotaja redne pobude ne mora biti velik. Teži se da otpor rednog namotaja bude što manji, kako bi pad napona na njemu bio što manji.
- *složena pobuda*, gde pored glavnog, nezavisnog ili paralelnog, postoji i pomoćni, redni pobudni namotaj. Učešće pojedine pobude u ukupnoj *mps* uslovljavljava *spoljnja karakteristika mašine*, tj. zahtevana zavisnost napona na priključcima od struje opterećenja za generator, odnosno brzine obrtanja o razvijenom momentu (za motore). U zavisnosti od toga da li su glavni i pomoćni pobudni namotaj izvedeni tako da im se fluksevi potpomažu ili suprotstavljaju, razlikujemo aditivnu, odnosno diferencijalnu, složenu pobudu.

U upotrebi su sledeće oznake za krajeve pojedinih namotaja:

Tabela 1-1 Oznake krajeva namotaja mašina jednosmerne struje

namotaj	nova oznaka	stara oznaka
indukt	A1, A2	A, B
pomoćni polovi	B1, B2	G, H
kompensacija	C1, C2	G, H
redna pobuda	D1, D2	E, F
paralelna pobuda	E1, E2	C, D
nezavisna pobuda	F1, F2	I, K



Slika 1-6 Motor sa otočnom pobudom

1.5 Elektromotorna sila indukta

Elektromotorna sila indukta (napon rotacije), E , u režimu generatora daje napon:
 $E = U + R_a I_a$,

dok u režimu motora drži ravnotežu naponu napajanja:

$$U = E + R_a I_a,$$

gde je R_a ukupni otpor indukta u koji su uključeni galvanski otpori svih namotaja u kolu indukta R_n , i prelazni otpor na četkicama.

Ukupni otpor indukta možemo prikazati na sledeći način:

$$R_a = R_n + \frac{\Delta U_\epsilon}{I_a},$$

gde je ΔU_ϵ pad napona na četkicama, koji je funkcija gustine struje. Pri naznačenoj struji pad napona na četkicama približno iznosi $2V$.

Jednačina naponske ravnoteže, uz posebno navođenje pada napona na četkicama ima sledeći oblik:

$$E = U \pm (R_n I_a + \Delta U_\epsilon)$$

gde se predznak "+" odnosi na generatore a "-" na motore.

Da bi se stekao osećaj za veličine, navešćemo primer za generator:
 $E \langle 230V \rangle = U \langle 220V \rangle + R_n I_a \langle 8V \rangle + \Delta U_\epsilon \langle 2V \rangle$.

Analizirajmo sada detaljnije napon usled rotacije, E . Trenutna vrednost ems jednog provodnika na rotoru je:

$$e_{pr} = l_s v b$$

gde je l_s svedena (aktivna) dužina provodnika (onaj deo dužine provodnika koji preseca magnetsko polje).

Ems se obično izražava preko srednje vrednosti fluksa po polu Φ :

$$\Phi = S_p B_{\delta sr} = l_s \tau B_{\delta sr},$$

gde je τ polni korak, a $B_{\delta sr}$ srednja vrednost indukcije.

Za polni korak imamo:

$$\tau = \frac{d\pi}{2p}.$$

Za obodnu brzinu imamo:

$$v = \frac{d}{2} \omega_m = \frac{d}{2} 2\pi \frac{n}{60} = d\pi \frac{n}{60} = 2p\tau \frac{n}{60} = \frac{p\tau n}{30}.$$

gde je ω_m mehanička ugaona brzina rotora.

Srednja vrednost ems jednog provodnika je:

$$E_{pr} = l_s v B_{\delta sr} = l_s \frac{p\tau n}{30} \frac{\Phi}{l_s \tau} = \frac{pn}{30} \Phi.$$

Za ems između četkica imamo:

$$E = \frac{N}{2a} E_{pr} = \frac{N}{2a} \frac{pn}{30} \Phi = \frac{p}{a} N \frac{n}{60} \Phi = k_E n \Phi.$$

Dakle, napon između četkica je proporcionalan sa brzinom obrtanja i srednjom vrednosti fluksa. Konstantna proporcionalnosti, k_E , zavisi od konstrukcionih podataka (broja pari polova i paralelnih grana, te broja provodnika).

Ovaj napon nazivamo naponom rotacije, jer, uz postojanje fluksa, postoji samo kada se rotor obrće ($n \neq 0$).

1.6 Obrtni momenat

Obrtni momenat, M , u režimu motora obezbeđuje pogon radnog mehanizma, dok u režimu generatora drži ravnotežu (deluje protiv) momenta pogonske mašine.

Izraz za obrtni momenat možemo najlakše da dobijemo ako posmatramo režim motora. Mehaničku snagu na vratilu za pogon radnog mehanizma i pokrivanje gubitaka usled trenja i ventilacije obezbeđuje odgovarajući električni ekvivalent $E I_a$.

Dakle, možemo da pišemo:

$$E I_a = M \omega_m = M \frac{n\pi}{30}.$$

Koristeći prethodno izveden izraz za napon rotacije, imamo:

$$\frac{p}{a} N \frac{n}{60} \Phi I_a = M \frac{n\pi}{30},$$

iz čega za obrtni momenat sledi:

$$M = \frac{p}{a} \frac{N}{2\pi} \Phi I_a = k_M \Phi I_a.$$

Dakle, obrtni momenat je proporcionalan sa srednjom vrednosti fluksa i strujom indukta. Konstantna propocionalnosti, k_M , zavisi od konstrukcionih podataka (broja pari polova i paralelnih grana, te broja provodnika).

1.7 Brzina obrtnja

Izraz za brzinu obrtanja sledi iz prethodnih naponskih jednačina:

$$n = \frac{E}{k_E \Phi} = \frac{U \pm R_a I_a}{k_E \Phi},$$

gde se predznak "-" odnosi na motore, a predznak "+" na generatore.

1.8 Reakcija indukta

U praznom hodu u mašini postoji samo magnetsko polje pobude, dok pri opterećenju, usled struje indukta ("reakcije indukta"), javlja se i magnetsko polje indukta. Mps indukta je poprečno postavljena u odnosu na $m_p s$ induktora. Talas $m_p s$ pobude ima oblik pravougaonika, dok je talas $m_p s$ linearna funkcija obima indukta i ima oblik trougla. Reakcija indukta utiče kako na prostornu raspodelu fluksa u vazдушnom zazoru tako i na veličinu rezultantog fluksa po polu.

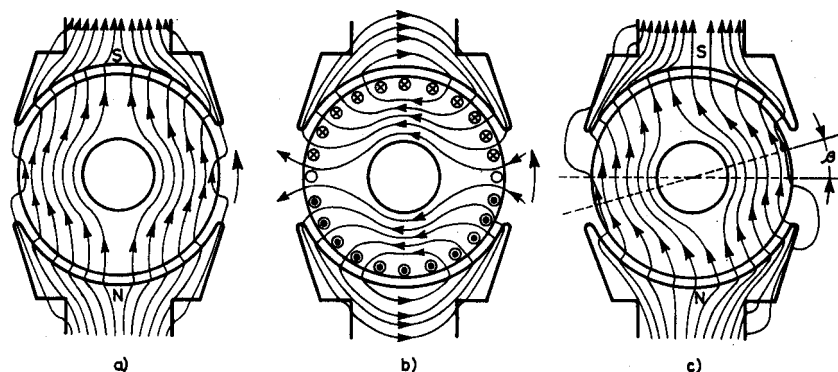
Definišimo sada još jedan značajan pojam, *strujni obuhvat*, A , koji predstavlja podužnu gustinu ampernavojaka po obimu mašine:

$$A = \frac{N I_p}{\pi D_a} = \frac{N I_a}{2a\pi D_a},$$

gde je D_a prečnik indukta.

Označimo sa x rastojanje po obimu, pri čemu uzmimo da je u osi glavnih polova $x=0$. U posmatranoj tački vrednost $m_p s$ indukta je $F = A \cdot 2x$.

Rezultanta raspodela fluksa je karakterisana povećanjem fluksa pod jednim krajem polnog nastavka i smanjenjem pod drugim krajem. Zbog zasićenja, ovo povećanje fluksa je manje od smanjenja, tako da se rezultatni fluks zbog reakcije indukta ipak smanjuje.

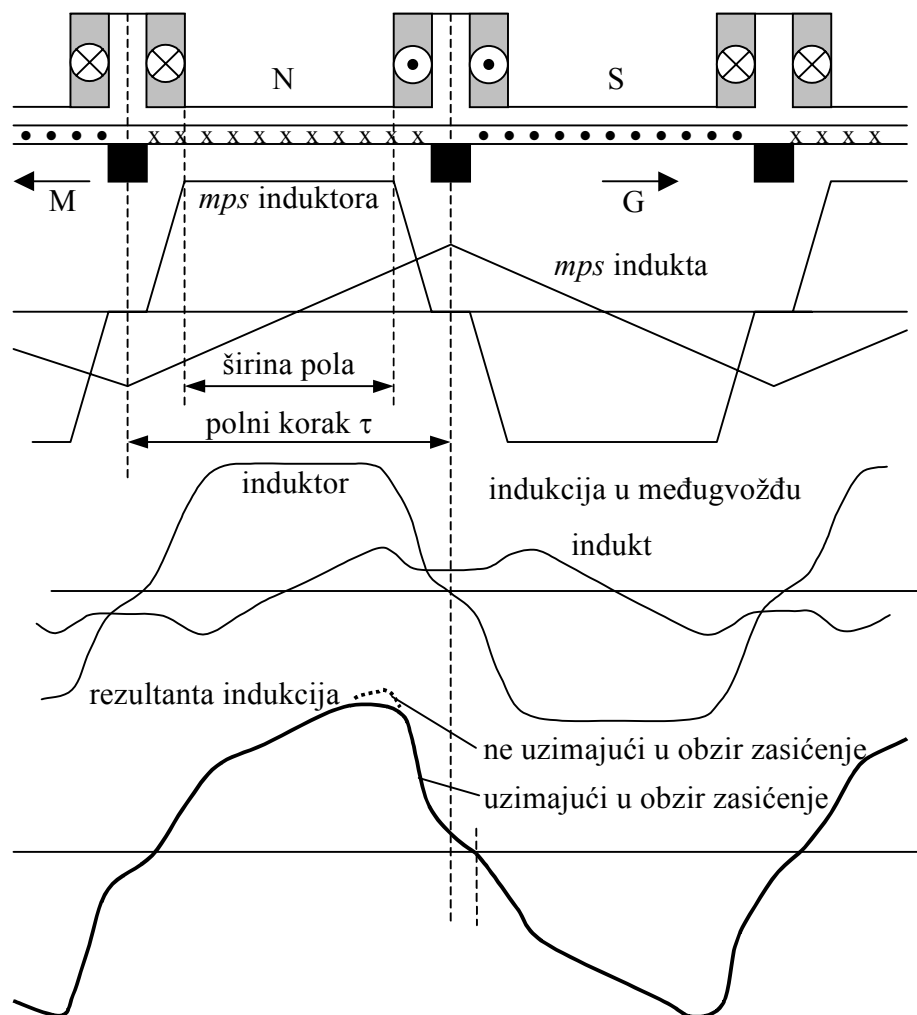


Slika 1-7 Reakcija indukta

a) polje pobude b) reakcija indukta c) resultantno polje

Nepovoljne posledice koje prate reakciju indukta, a vezane su za izobličenje resultantnog fluksa su:

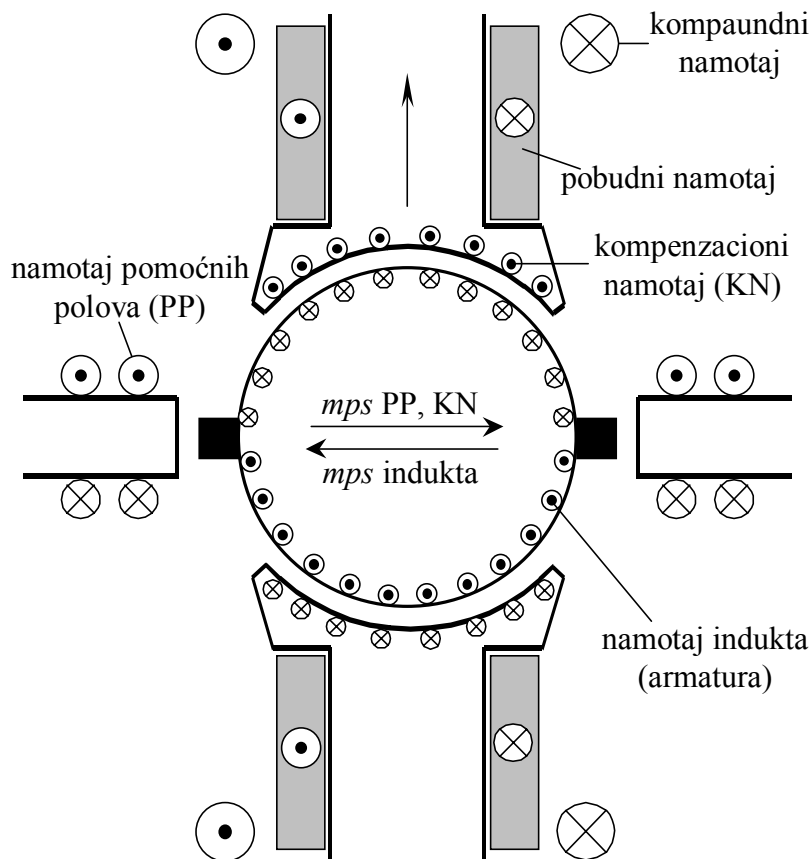
- gubitak na elektromotornoj sili usled smanjenja resultantnog fluksa,
- lošija komutacija (funkcionisanje komutatora) usled pomeraja neutralne ose (zone). Navojni deo se prilikom komutacije još uvek nalazi u položaju u kojem ga zahvata jedan deo resultantnog, deformisanog, magnetskog polja. Do promene smera struje dolazi u nepovoljnom naponskom stanju navojnog dela, što za posledicu ima lošu komutaciju (varničenje).
- povećanje maksimalne indukcije izaziva veće gubitke u gvožđu i povećanje napona među susednim lamelama komutatora. U provodnicima indukta su naizmenične struje, a u gvožđu indukta se prostire naizmenično magnetsko polje. Gubici u gvožđu zavise, pored ostalog, i od kvadrata maksimalne indukcije (B^2). Indukovana *ems* između dve susedne lamele je linearno proporcionalna sa maksimalnom indukcijom. Dozvoljena maksimalna vrednost ove *ems* zavisi od otpora navojnog dela i kod mašina srednjih snaga iznosi oko 35V. Ako vrednost *ems* pređe dozvoljenu maksimalnu vrednost, može doći između dve susedne lamele do preskoka varnice, odnosno uspostavljanja malog luka zbog gorenja ugljene prašine. Pošto se mašina obrće, svi navojni delovi dolaze u položaj najveće indukcije, pa se mali lukovi između susednih lamela pretvaraju u veliki luk po čitavom obimu (tzv. kružna vatra). Pošto je otpor luka neznatan, nosači četkica suprotnog polariteta dolaze u kratak spoj.



Slika 1-8 Reakcija indukta – oblik resultantnog magnetskog polja

Mere koje su preduzimaju u cilju suzbijanja ovih nepovoljnih posledica su:

- pomeranje dirki u stvarnu neutralnu zonu. Ovo je najstarija i praktično napuštena metoda. Pomoću posebne poluge se celi nosač dirki stavlja u stvarni položaj neutralne zone.
- uvođenje dodatnih namotaja čija m_{ps} ima zadatak da poništi delovanje reakcije indukta. Za poništenje reakcije indukta u prostoru ispod glavnog pola se upotrebljavaju *kompaundni* i *kompensacioni namotaj*. *Kompaundni namotaj* je najjednostavnije i najjeftinije rešenje, ali koje deluje samo na izbegavanje gubitaka u indukovanoj ems . Sastoji se od nekoliko navojaka žice velikog preseka namotanih oko glavnih magnetskih polova. Kroz taj namotaj puštamo struju indukta u istom smeru kao i struju pobudnog namotaja. *Kompensacioni namotaj* je najbolje, ali najskuplje rešenje. Smešten je u žlebove na polnim nastavcima statora, kroz provodnike se pušta struja indukta, ali tako da je smer struja suprotan. Za poništenje reakcije indukta u prostoru između glavnih polova upotrebljava se *namotaj pomoćnih polova*, koji je fizički smešten na simetrali između glavnih polova. Glavna funkcija namotaja pomoćnih polova je poboljšanje komutacije. M_{ps} kompensacionog namotaja mora biti jednaka i suprotna m_{ps} indukta, dok kod namotaja pomoćnih polova m_{ps} mora biti takva da prvo poništi m_{ps} indukta, a zatim da stvori jedno suprotno polje radi poboljšanja komutacije.

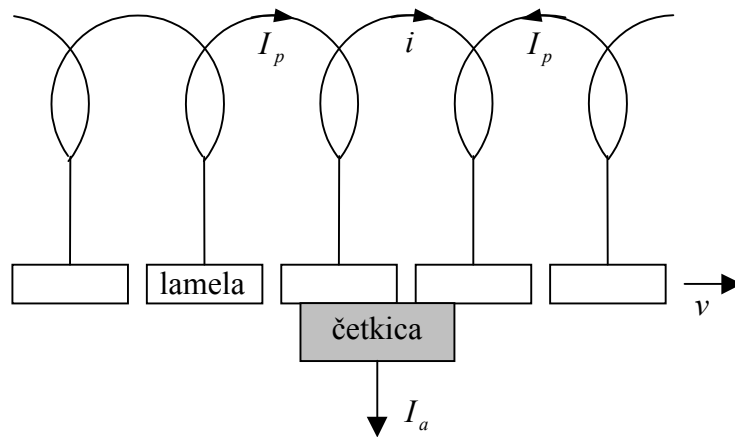


Slika 1-9 Namotaji mašine jednosmerne struje

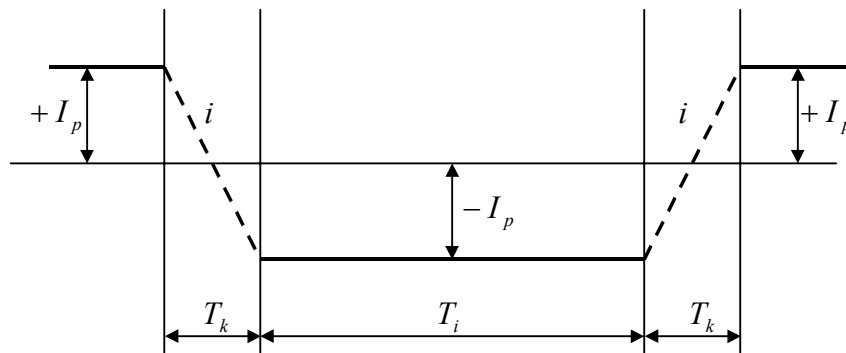
1.9 Komutacija

Pod komutacijom podrazumevamo proces promene smera ems , odnosno struje prilikom prolaska navojka ili navojnog dela kroz neutralnu osu. Za vreme trajanja komutacije, T_k , dirke kratko spajaju navojak ili navojni deo. Vreme za koje je struja konstantna označimo

sa T_i . Struja provodnika (grane) sa vrednosti $+I_p$ prvo pada na vrednost nula, a zatim raste u suprotnom smeru do vrednosti $-I_p$. Kvalitet komutacije ocenjuje se prema njenim posledicama, koje se manifestuju u pojavama varničenja između komutatora i dirki. Loša komutacija se ogleda u znatnom iskrenju kod naznačenog opterećenja ili kod manjih preopterećenja. Komutacija bez varničenja je neophodan uslov sigurnog i dugog rada mašine jednosmerne struje. Uzroci loše komutacije mogu biti mehanički (neokruglost i istrošenost komutatora, vibracije komutatora, površinsko oštećenje dirki i komutatora, loše vođenje četkica u držačima, neispavan pritisak ili smer pritiska na četkice itd.) i električki (uticaj otpora i *ems* usled samoinduktivnosti i međuinuktivnosti). U električnom pogledu, na komutaciju najviše utiče otpor četkica, položaj četkica u odnosu na neutralnu osu i delovanje pomoćnih polova.



Slika 1-10 Navojni deo u komutaciji



Slika 1-11 Vremenska promena struje u navojnom delu

Promenu struje prilikom komutacije $i(t)$ označili smo, za početak, pravom, crtkanom linijom. Uz određena pojednostavljenja i pretpostavke, može se doći do analitičkih izraza koji približno opisuju promenu struje prilikom komutacije. Budući da je ostvarenje dobre komutacije više rezultat iskustva nego naučne analize, ovde se nećemo baviti kvantitativnom analizom, već ćemo definisati uticajne veličine prilikom komutacije i navesti mere koje se preduzimaju u cilju poboljšanja komutacije.

Veličine koje utiču na oblik krive komutacije su sledeće:

- a) otpori

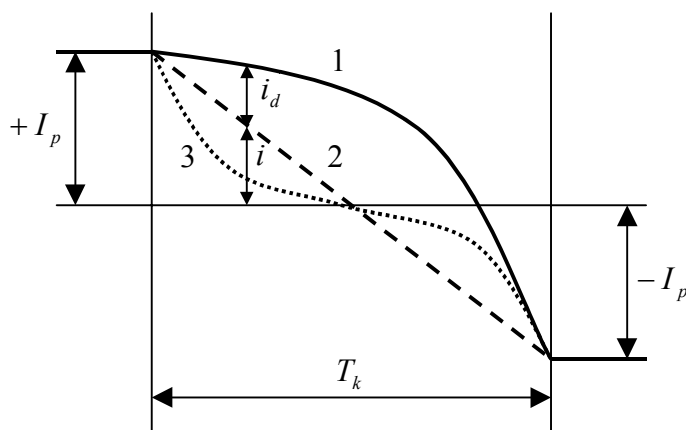
- prelazni otpor četkica,
- otpor kratkospojenog navojnog dela koji komutira,
- otpor spojnih vodova (veza) između navojnog dela i lamele komutatora.

b) *ems*

- spoljnjeg kola, e_k , koji se u navojnom delu indukuje kada četkica ne stoji strogo u liniji neutralne ose,
- usled samoinduktivnosti navojnog dela e_L i
- usled međuinduktivnosti, e_M , koja se javlja ako širina četkice premašuje širinu komutatorske lamele $b_c > b_l$ i ako se komutacija dešava u više navojnih delova.

Slika 1-12 prikazuje oblike krivih komutacije za sledeće slučajeve:

- crtkano – idealna otporna komutacija, uzet je u obzir samo prelazni otpor četkica, dok su ostale uticajne veličine zanemarene,
- tačka-tačka otporna komutacija kod koje su uzeti u obzir svi otpori, a zanemaren uticaj *ems*,
- puna linija – komutacija kod koje su uzeti u obzir i *ems* usled samoinduktivnosti e_L . Sa i_d je označena dodatna struja komutacije usled *ems*, koja se superponira na struju idealne otporne komutacije.

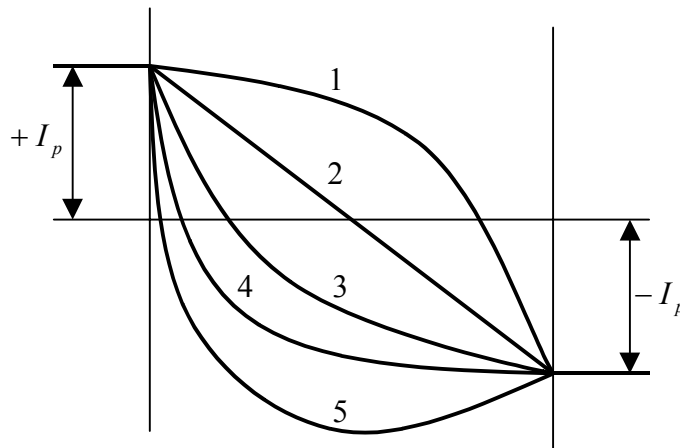


Slika 1-12 Krive komutacije uz određene vrednosti uticajnih veličina

Ems usled samoinduktivnosti e_L sprečava promene struje u kolu (u analogiji mehaničkih i električnih kola induktivnost predstavlja inerciju), pa deluje u smislu usporavanja komutacije. *Ems* usled međuinduktivnosti, e_M , je slična po svojoj prirodi e_L , dok *ems* spoljneg kola, e_K , može da ima različite predznake, tj. može da deluje u jednom ili drugom smeru, zavisno u kakvom se polju po polaritetu, severnom ili južnom, nalazi navojni deo koji komutira.

Nepovoljni slučaj, koji se izbegava, jeste pojava preterano velike gustine struje na jednom delu površine četkice, što može da izazove cepanje opne i varničenje u toj tački. Pogotovo je opasna velika gustina struje na zadnjim (izlaznim) krajevima četkica, kod usporene komutacije, jer varničenje na njima može da dovede do pojave kružne vatre, za razliku od varničenja na prednjim krajevima četkica kod ubrzane komutacije, koje je ipak manje opasno jer sama četkica predstavlja prepreku za prenošenje varnica po obimu komutatora. *Ems* usled samoinduktivnosti, e_L , značajno pogoršava komutaciju, te bi kod mašina malo većih snaga čak i onemogućila rad, kada je ne bismo suzbili.

Sa "linearnom" komutacijom, (Slika 1-13, karakteristika 2), kod koje se kontaktna površina ravnomerno koristi za prolaz struje, odnosno kod koje je gustina struje po površini četkice konstantna tokom celog procesa komutacije, mogli bismo biti uglavnom zadovoljni. Idealna bi bila ona komutacija kod koje je na izlaznoj ivici četkice gustina struje što manja (karakteristika 3 i 4).



Slika 1-13 Krive komutacije

Prvi uslov za dobru komutaciju je relativno veliki prelazni otpor četkica, u odnosu na otpor veza (dovoda) i navojnih delova, što se postiže upotrebom četkica od ugljena odnosno grafita. Poboljšanje komutacije na ovaj način je moguće samo kod mašina malih snaga, do 1kW. Za mašine većih snaga se primenjuju dodatna sredstva, pre svega pomoćni polovi.

Pomoćni polova imaju zadatak da suzbiju *ems* usled samoinduktivnosti e_L . Magnetsko polje pomoćnih polova izaziva u navojnom delu suprotnu *ems* u odnosu na e_L , pa je na taj način neutrališe. Pomoćni polovi moraju da budu pravilno dimenzionisani kako bi se dobila odgovarajuća komutacija. Slika 1-13, kriva 5 prikazuje komutaciju uz prejak delovanje pomoćnih polova.

Jedna od mera za poboljšanje komutacije je i pomeranje dirki u stvarnu neutralnu osu.

Problem vezan za komutaciju, odnosno postojanje sistema komutatora i dirki, usložnjava održavanje mašina za jednosmernu struju i isključuje ih u područjima primene sa zapaljivom i eksplozivnom okolinom.

1.10 Generatori jednosmerne struje

Savremeni razvoj ide u pravcu eliminisanja električne mašine jednosmerne struje kao generatora, ali ih još uvek ima u upotrebi kada se traži jako gladak napon, što se ne može postići sinhronim alternatorom sa diodama ili mrežnim ispravljačem. U laboratorijama za ispitivanje električnih mašina često se upotrebljava generator jednosmerne struje sa nezavisnom pobudom, koji služi za opterećivanje ispitivanih mašina.

Nezavisno pobuđen generator ima "tvrdu" karakteristiku (sa porastom struje napon relativno malo opada). To opadanje napona izazvano je:

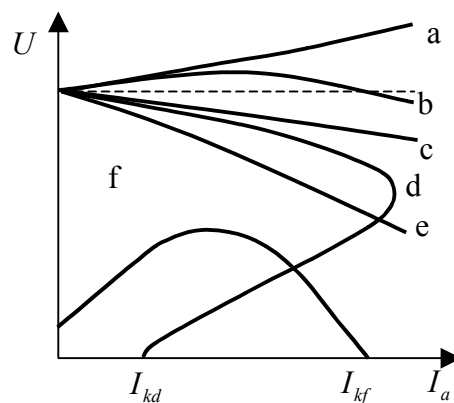
- smanjenjem resultantnog fluksa, Φ , usled reakcije indukta, a time i indukovane *ems* $E = k_E n \Phi$,
- povećanjem pada napona na otporu indukta usled povećanja struje indukta.

Paralelno pobuđen generator ima samopobuđivanje (sam vrši svoju pobudu), ali pod uslovom da je iz prethodnog rada preostao izvesni remanentni magnetizam, odnosno napon E_{rem} . Da bi došlo do samopobudjivanja, ukupni radni otpor kola paralelne pobude R_m ne sme da bude previsok, odnosno pravac $R_m i_p$ mora da seče karakteristiku magnećenja $E = f(i_p)$. Da bi se osiguralo samopobuđivanje, odnosno stabilnost napona, na glavnim polovima se postavljaju prorezi na kojima je presek magnetskog kola jako smanjen (tzv. *istmusi*), pa zasićenje nastupa već kod vrlo malog fluksa. Time karakteristika magnećenja dobija dva kolena, od kojih je prvo usled istmusa, sa većim nagibom, čime se osigurava da pravac $R_m i_p$ sigurno preseca karakteristiku $E = f(i_p)$. U delu do $1,5I_n$ karakteristika ovog generatora je slična karakteristici nezavisno pobuđenog generatora, ali je nešto "mekša". Kod određene vrednosti struje linearni deo krive $U = f(i_p)$ poklopi se sa pravcem samopobuđivanja, što fizički predstavlja razbuđivanje mašine, pa kriva napona naglo pada i ide po donjoj grani karakteristike.

Redno pobuđen generator nije pogodan za upotrebu jer mu se napon prvo povećava, a zatim opada sa porastom struje indukta. Nije primenjen u praksi, ali se ovde pominje zbog toga što se ovaj način pobuđivanja primenjuje u složeno pobuđenim (kompaundiranim) generatorima.

Složeno pobuđeni (kompaundovan) generatori imaju nezavisnu (ili paralelnu) i rednu pobudu. Uobičajen zahtev je da se napon na krajevima (priključcima) održava na stalnoj vrednosti, bez obzira na veličinu struje indukta (apsolutno tvrda karakteristika). Pošto bi gradnja generatora sa takvom karakteristikom bila neekonomična, obično se delovanja pojedinih pobuda podese tako da se pri naznačenoj struji indukta dobije naznačena vrednost napona na priključcima.

Na slici 1-14 prikazane su spoljnje karakteristike generatora $U = f(I_a)$, pri $n = const.$ za razne vrste pobude generatora.



Slika 1-14 Spoljnje karakteristike generatora jednosmerne struje

Legenda slike 1-14:

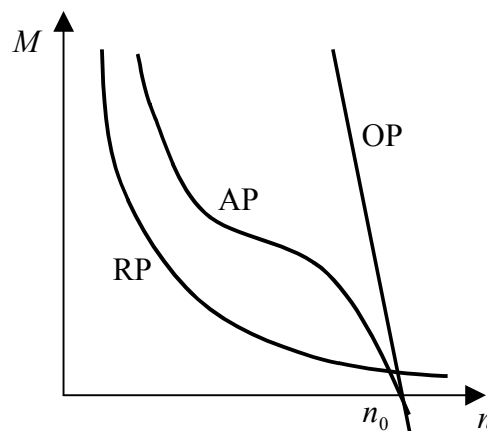
- a) nadkompaundovan,
- b) kompaundovan (karakteristika seče crtkanu liniju u tački (I_n, U_0))
- c) nezavisno pobuđen
- d) paralelno pobuđen
- e) protivkompaundovan
- f) redno pobuđen,

Odgovarajuće struje kratkog spoja su označene indeksom k .

1.11 Karakteristike momenta motora

Karakteristike momenta motora (mehaničke karakteristike) predstavljaju zavisnost momenta od brzine obrtanja, $M=f(n)$. Kod motora jednosmerne struje njih prvenstveno određuje sistem pobude, i one mogu biti:

- "tvrde" kod kojih se brzina obrtanja vrlo malo menja sa promenom momenta opterećenja, koju srećemo kod očno (paralelno) pobuđenih motora, oznaka na slici OP;
- "meke" kod kojih se značajno menja brzina obrtanja sa promenom momenta opterećenja, koju srećemo kod redno pobuđenih motora, oznaka na slici RP;
- celo područje između ove dve karakteristike može da se ostvari primenom jednosmernih motora sa složenom aditivnom pobudom, oznaka na slici AP.



Slika 1-15 Karakteristike momenta motora jednosmerne struje

Nezavisno pobuđen motor se najčešće primenjuje u elektromotornim pogonima.

Redno pobuđen motor se u praksi najčešće primenjuje u električnoj vuči. Ovaj motor predstavlja veoma fini menjač brzine (bez skupih sklopova zupčanika). Iz mehaničke karakteristike se vidi da je veoma opasno ostaviti redni motor neopterećen ($M \rightarrow 0$, $n \rightarrow \infty$), jer tada može doći do eksplozije rotora. U mehanici se to postiže sklopovima zupčanika. Kod jako velikih snaga nemoguće je napraviti tako veliki menjač, pa se tada se mora pristupiti električnom rešenju prenosa snage. Tako npr. kod dizel električnih lokomotiva dizel motor pogoni protivkompaundovani generator, a redni motori jednosmerne struje u točkovima pokreću lokomotivu.

1.12 Pokretanje mašina jednosmerne struje

Za režim generatora nema naročitih problema prilikom puštanja u rad. Sa pogonskom mašinom generator se dovede na naznačenu brzinu obrtanja. Generatori sa paralelnom pobudom se sami pobude, ako im otpor pobudnog kola nije prevelik. Generatori sa nezavisnom pobudom se priključuju na pobudu pre ili posle zaleta. Sa regulacionim otpornikom pobuda se podesi tako da odgovara onom naponu koji se zahteva u radu. Kada se generator optereti, onda se pobuda podešava tako da u mreži jednosmerne struje vlada željeni napon.

Puštanje motora jednosmerne struje iz stanja mirovanja je složeniji problem. Ako se radi o nezavisno pobuđenom motoru onda je pre priključka strujnog kola indukta motor potrebno pobuditi punim fluksom Φ , kako se ne bi pojavila mogućnost pobega (velikog povećanja brzine) motora usled slabog fluksa. Dakle, tek kod potpuno pobuđenog motora indukt se priključuje na napon izvora (mreže).

Prilikom puštanja u rad u motoru se mogu javiti veoma velike struje, što se može videti iz jednostavne analize koja sledi. U trenutku puštanja u rad imamo: $n=0 \Rightarrow E=0$. Iz naponske jednačine motora $U = E + R_a I_a$ sledi $I_a = I_k = U/R_a \gg I_n$. Dozvoljena polazna struja ograničena je vrednošću koju motor može da komutuje bez varničenja ili dozvoljenim opterećenjem mreže odnosno priključaka za napajanje motora. Za ograničenje struje prilikom puštanja motora u rad koriste se specijalni otpori priključeni na red sa namotajem indukta. Oni su tako odabrani da struja u puštanju u rad ne bude mnogo veća, npr. najviše dva puta, od naznačene. Otpornici za puštanje u rad mogu ponekad i da služe za regulisanje brzine obrtanja, ali tada moraju da trajno izdrže punu struju opterećenja motora. Ako služe samo za pokretanje, onda su dimenzionisani za kratkotrajni rad i kao takvi su znatno jeftiniji.

Kod motora manjih snaga relativne vrednosti otpora indukta su veće, tako da nije potrebno koristiti otpornike za puštanje u rad jer je struja puštanja neznatno veća od naznačene.

Redni motori su pogodniji u odnosu na otočne kada se puštanje u rad vrši pri teškim uslovima, npr. kada je potrebno da motor razvije veće polazne momente pri istoj struji (kranovi, dizalice, električna vozila), kao i tamo gde je potrebno jako veliko preoterećenje motora ($3M_n$).

1.13 Regulisanje brzine nezavisno pobuđenog motora jednosmerne struje

Motor jednosmerne struje je mogućnost kontinualnog regulisanja brzine obrtanja u širokim granicama održala u konkurenciji sa naizmeničnim motorima kod pogona sa promenljivom brzinom obrtanja. Prema ranije navedenom izrazu,

$$n = \frac{E}{k_E \Phi} = \frac{U - R_a I_a}{k_E \Phi},$$

brzinu obrtanja motora jednosmerne struje možemo vršiti na tri osnovna načina:

- promenom napona napajanja,
- promenom magnetnog fluksa pobude, tj. struje pobude i
- promenom otpora u kolu indukta.

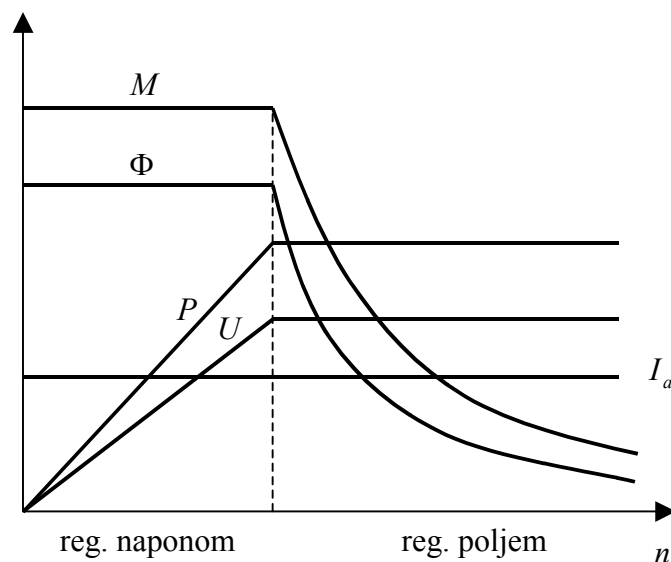
Od ova tri navedena načina, praktično se primenjuju prva dva načina.

Regulacija naponom je efikasna počevši od brzine obrtanja jednako nuli, pa do brzine koja odgovara naznačenom naponu motora, uz neku konstantnu, obično naznačenu pobudu. To

je veliki opseg regulacije, i kod mašina sa nezavisnim hlađenjem, u odnosu na brzinu obrtanja, motor se u celom ovom opsegu može opteretiti konstantnom strujom, odnosno konstantnim momentom (uz konstantnu pobudu), tako da je snaga motora proporcionalna brzini obrtanja, odnosno približno proporcionalna sa naponom. Kod motora hlađenih ventilatorom, kod manjih brzina se mora smanjiti struja, odnosno momenat, da ne bi došlo do pregrevanja.

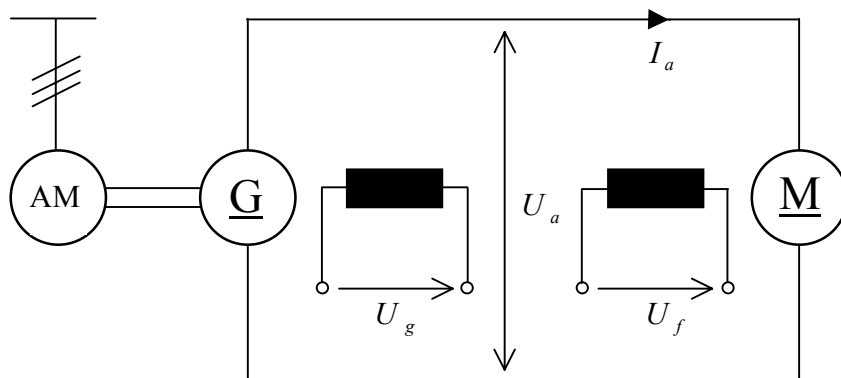
Regulacija poljem se sprovodi tako da se priključeni napon drži na konstantnoj vrednosti, a magnetsko polje se smanjuje smanjenjem struje pobude. Opseg regulacije je otprilike 2:1 za motore normalne izvedbe, tj. sa regulacijom brzine se može ići do dvostruke vrednosti u odnosu na brzinu kod punog magnetnog fluksa. Daljnje smanjenje fluksa se ne praktikuje, jer bi rad motora mogao da postane nestabilan, te može lako da pobegne (eksplozija kolektora), nastupaju poteškoće kod komutacije, jer se smanjuje vreme komutacije T_k , a mora se voditi računa i o mehaničkim naprezanjima usled cetrifugalnih sila koja rastu sa kvadratom brzine obrtanja

Za regulaciju brzine motora jednosmerne struje prirodno je da se konstantni momenat postiže regulacijom napona, dok se konstantna snaga postiže regulacijom poljem. Konstantnu vrednost struje I_a možemo da obezbedimo samo nezavisnom ventilacijom.



Slika 1-16 Princip regulacije brzine obrtanja

Vard-Leonardova grupa predstavlja klasičan način upravljanja motorom jednosmerne struje (Slika 1-17). Grupu mašina sačinjavaju asinhroni motor, koji pokreće generator jednosmerne struje koji, pak, napaja motor jednosmerne struje čijom brzinom obrtanja upravljamo. Pobudom generatora reguliše se napon motora, dok se menjanjem pobude motora sprovodi regulacija poljem. Danas je Vard- Leonardova grupa uglavnom potisnuta pogonom sa *tiristorskim konvertorom* umesto generatora sa asinhronim motorom.



Slika 1-17 Vard-Leonardova grupa

Ako je za napajanje motora za jednosmernu struju na raspolaganju izvor jednosmerne struje (akumulatorska baterija ili neregulisani ispravljač) kontinualno podešavanje napona može se vršiti pretvaračem jednosmernog napona u jednosmerni (*čoper*).

1.14 Kratak osvrt na prelazne pojave i raspobuđivanje

Pri prelaznim pojavama dolazi do izražaja uticaj induktiviteta. Kolo nezavisne (otočne) pobude ima veliki induktivitet (mnogo navojaka tanke žice) i veliku vremensku konstantu. Značajno manja je vremenska konstanta indukta (armature), približno je $T_{pobude} / T_{indukta} = 5 \div 20$, tako da je lakše upravljati prelaznim pojavama u električnom kolu indukta, nego u kolu pobude. Rotor sa radnim mehanizmom unosi određenu mehaničku inerciju u prelazni proces.

Pod raspobuđivanjem (demagnetisanjem) podrazumevamo proces smanjivanja pobudne struje, i_p , do vrednosti jednake nuli. Kod paralelno pobuđenog generatora to se vrši uključivanjem sve većeg otpora u strujno kolo pobude, dok se ono potpuno ne otvori, tj. dok se pobudno kolo ne prekine. Taj proces ne sme da se odvija prebrzo, a pogotovo ne trenutno, zbog jer bi se zbog velikog induktiviteta, prema jednačini $e = -L \frac{di}{dt}$, mogli pojaviti visoki (pre)naponi koji bi mogli da probiju izolaciju pobudnog namotaja ili da izazovu luk. Koliko god bile male struje u trenutku isključenja, vrednost $\frac{di}{dt}$ još uvek može da bude opasna, tako da se u trenutku konačnog isključenja pobudni namotaj kratko spaja.

1.15 Univerzalni motor

Univerzalni motor je kolektorski motor koji se može priključiti i na jednosmerni i na naizmenični izvor napajanja. Zbog male cene, dobrih pogonskih karakteristika i jednostavnog održavanja, nalazi se u primeni u stotinama sitnih elektromotornih pogona, posebno u aparatima u domaćinstvima.

Ovde se koristi činjenica da se sa promenom polariteta priključenog napona (i na pobudnom namotaju i na četkicama) ne menja se smer obrtanja motora jednosmerne struje. Dakle, u principu se motor jednosmerne struje može priključiti na naizmeničnu

(jednofaznu) mrežu i on će imati iste fizičke osobine kao i da je priključen na jednosmernu mrežu. Da bi tehnički iskoristili ovu mogućnost, potrebno je da celo magnetsko kolo (statora i rotora) bude napravljeno od tankih feromagnetskih limova.

Za sasvim male snage (ispod 0,5kW) izrađuju se, po pravilu dvopolni, redni motori bez pomoćnih polova (i bez kompenzacionog namotaja) za brzine obrtanja preko 10000 ob/min za ručne alate i druge ručne elektromotorne uređaje, oko 15000 ob/min i više za usisivače i miksera, te oko 30000 ob/min za mlinove za kafu. Važno je primeniti da su brzine obrtanja sa napajanjem jednosmernom strujom nešto veće nego sa napajanjem naizmjeničnom. Karakteristika momenta im je ograničeno meka, tako da obično mogu da izdrže prazni hod. Na svakom polu imaju po jednu četkicu, koje u radu varniče plavičasto. Zbog varničenja i široke opšte upotrebe, univerzalni motori izazivaju radio i televizijske smetnje, koje se ograničavaju dogradnjom kondenzatora ili prigušnica.

1.16 Literatura

- [1] B. Mitrović: *Mašine za jednosmernu struju*, Sl. list SFRJ, Beograd, 1981.
- [2] M. Petrović, *Električne mašine i postrojenja*, Naučna knjiga, Beograd, 1988.
- [3] B. Jurković, Z. Smolčić, *Kolektorski strojevi*, Školska knjiga, Zagreb, 1986.