

Prilagođenje elektromotornih pogona radnom mehanizmu i izvoru energije

Majsan, Mislav

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:759444>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-10-31**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Prijediplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Završni rad

**PRILAGOĐENJE ELEKTROMOTORNIH POGONA
RADNOM MEHANIZMU I IZVORU ENERGIJE**

Rijeka, lipanj 2024.

Mislav Majsan
0069090795

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Prijediplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Završni rad

**PRILAGOĐENJE ELEKTROMOTORNIH POGONA
RADNOM MEHANIZMU I IZVORU ENERGIJE**

Mentor: Izv.prof.dr.sc. Rene Prenc

Rijeka, lipanj 2024.

Mislav Majsan
0069090795

Rijeka, 16.03.2024.

Zavod: Zavod za elektroenergetiku
Predmet: Električni strojevi

ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Mislav Majsan (0069090795)**
Studij: Sveučilišni prijediplomski studij elektrotehnike (1030)

Zadatak: **Prilagođenje elektromotornih pogona radnom mehanizmu i izvoru energije /
Adaptation of electrical drives to the mechanical load and power source**

Opis zadatka:

U radu će se najprije definirati opseg podešavanja brzine vrtnje kao ključni element prilagodbe elektromotornih pogona radnom stroju. Nakon toga navest će se prilagodba pogona istosmjernim motorima uzimajući u obzir njihove različite vrste prema uzbudnom krugu. Potom će se obraditi prilagodba asinkronim motorima, te nakon toga sinkronim motorima. Konačno, opisat će se pokretači rotacijskih električnih strojeva. Navesti će se još nekoliko primjera višemotornih pogona, električnih osovina i kaskadnih spojeva aksinkronih motora.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanja diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

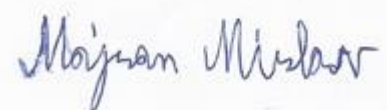
Zadatak uručen pristupniku: 20.03.2024.

Mentor:
izv. prof. dr. sc. Rene Prenc

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:
prof. dr. sc. Dubravko Franković

IZJAVA

Sukladno Pravilniku o završnom radu, završnom ispitu i završetku sveučilišnih prijediplomskih studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, izjavljujem da sam samostalno izradio završni rad pod nazivom „Prilagođenje elektromotornih pogona radnom mehanizmu i izvoru energije“.



Mijman Mislav

SADRŽAJ

1. UVOD.....	8
2. OPSEG PODEŠAVANJA BRZINE VRTNJE ELEKTROMOTORNIH POGONA.....	9
3. SPAJANJE I PODEŠAVANJE ELEKTROMOTORNIH POGONA S ISTOSMJERNIM MOTORIMA	10
3.1. Općenito o istosmjernim motorima	10
3.2. Elektromotorni pogon s nezavisno uzbuđenim istosmjernim motorom upravlján pomoću radnih otpora.....	10
3.3. Elektromotorni pogon s nezavisno uzbuđenim istosmjernim motorom upravlján naponom izvora 11	
3.4. Elektromotorni pogon s nezavisno uzbuđenim istosmjernim motorom u buster-spoju	13
3.5. Elektromotorni pogon sa serijski uzbuđenim istosmjernim motorima upravlján radnim otporima.....	14
3.6. Elektromotorni pogon sa serijski uzbuđenim istosmjernim motorima upravlján naponom izvora 14	
3.7. Impulsno upravljanje istosmjernim strojevima priključenim na istosmjernu mrežu	15
4. SPAJANJE I PODEŠAVANJE ELEKTROMOTORNIH POGONA S ASINKRONIM MOTORIMA.....	17
4.1. Općenito o asinkronim motorima	17
4.2. Podešavanje brzine vrtnje asinkronog motora pomoću otpora u rotorskom krugu.....	18
4.3. Podešavanje brzine vrtnje asinkronih motora preklapanjem polova.....	19
4.4. Podešavanje brzine vrtnje asinkronih motora promjenom frekvencije	21
4.5. Implusno upravljanje asinkronim strojevima.....	22
5. POKRETAČI.....	25
5.1. Općenito o pokretačima	25
5.2. Pokretači za istosmjerne motore.....	25
5.3. Pokretači za asinkrone motore	26
6. SPAJANJE I PODEŠAVANJE ELEKTROMOTORNIH POGONA SA SINKRONIM MOTOROM	30
6.1. Općenito o sinkronim motorima	30
6.2. Podešavanje brzine vrtnje sinkronih motora preklapanjem polova	31
6.3. Podešavanje brzine vrtnje elektromotornih pogona sa sinkronim motorom promjenom frekvencije	34
6.4. Dovođenje elektromotornog pogona sa sinkronim motorom na radnu brzinu vrtnje	34
7. PRILAGOĐAVANJE ELEKTROMOTORNOG POGONA POTREBAMA RADNOG MEHANIZMA KOD VIŠEMOTORNIH POGONA	37
7.1. Razlozi za korištenje višemotornih pogona.....	37
7.2. Elektromotorni pogon s dva elektromotora na jednoj osovini	37
7.3. Dvomotorni pogon s asinkronim motorima sa zakretanjem statora	38
8. ELEKTRIČNE OSOVINE.....	40

8.1.	Što su električne osovine?	40
8.2.	Električna osovina s pomoćnim asinkronim motorima	40
8.3.	Električna osovina s otporom.....	41
8.4.	Električne osovine sa sinkronim pomoćnim strojevima	42
8.5.	Električne osovine s istosmjernim motorima.....	43
9.	KASKADNI SPOJEVI ASINKRONIH MOTORA	45
10.	ZAKLJUČAK.....	47
11.	LITERATURA	48
12.	SAŽETAK.....	49

1. UVOD

Svaki elektromotorni pogon ima radnu točku koja je određena sjecištem mehaničkih karakteristika radnog mehanizma i elektromotora. To je samo jedan od problema prilikom prilagođavanja elektromotornog pogona. U ovom radu obradit će još mnoštvo problema poput iskorištavanja opsega brzine vrtnje pojedinih motora, dovođenja elektromotornog pogona u radnu točku, ekonomičnog prijelaza pogona iz jedne u drugu brzinu itd.

Istražit će se podešavanje elektromotornih pogona s istosmjernim, asinkronim i sinkronim motorima. Za svaki od navedenih motora postoji više mogućih metoda i spojeva kojima se postižu različite mehaničke karakteristike i rješavaju razni problemi.

Posebno će se spomenuti i pokretači koji su posebno važni za pokretanje istosmjernih i asinkronih motora.

Rad će obraditi i višemotorne pogone i kako se kod njih odvija podešavanje, pa električne osovine koje koriste i istosmjerne i asinkrone i sinkrone motore.

Obradit će se i kaskadni spojevi koji služe za elektromotorne pogone većih snaga.

2. OPSEG PODEŠAVANJA BRZINE VRTNJE ELEKTROMOTORNIH POGONA

Svaki radni mehanizam ima neki svojstveni opseg podešavanja brzine vrtnje što znači da i elektromotor koji pogoni taj mehanizam mora udovoljiti tom opsegu. Taj opseg su sve brzine vrtnje u kojima se može ostvariti statičko stanje definiranog trajanja ili posve trajno stacionarno stanje. U normalnom sinkronom motoru na mreži s konstantnom frekvencijom opseg brzine vrtnje je 1:1, ali se može povećati promjenom frekvencije izvora energije iako je ta promjena opsega minimalna te je on praktički ograničen na njegovu sinkronu brzinu vrtnje. S druge strane veliki opseg brzine vrtnje ima istosmjerni nezavisno uzbuđeni motor koji uz čvrst napon stezaljki ima opseg 1:3, ali uzme li se izvor promjenjiva napona povećanja mogu biti značajno veća (1:20 pa i više). Radni mehanizam koji radi u nekom rasponu brzina vrtnje zahtijeva razne ovisnosti momenta tereta o brzini vrtnje ($M_t=f(n)$). Karakter te ovisnosti nekad jako utječe na motor i to ne samo na opterećenje, već i na izbor veličine motora zbog činjenice da u stacionarnom stanju moment motora jednak momentu tereta ($M_m = M_t$). To znači da će motor u zadanom opsegu brzine vrtnje pratiti karakteristiku momenta tereta.

3. SPAJANJE I PODEŠAVANJE ELEKTROMOTORNIH POGONA S ISTOSMJERNIM MOTORIMA

3.1. Općenito o istosmjernim motorima

Kod istosmjernih motora posebno su pogodni elektromotorni pogoni kojima je potreban veći opseg brzina vrtnje. Razlog tome je što za razliku od sinkronih i asinkronih motora kod kojih je brzina vrtnje vezana za frekvenciju mreže, kod istosmjernih motora brzina vrtnje ovisi o omjeru inducirano napona i magnetskog toka koji su lako podesivi i nezavisni jedan o drugom. Klasični sistem napajanja istosmjernog stroja je iz krute mreže. Spajanja i podešavanja uz takvu mrežu obavljaju se preko radnih otpora u armaturnom strujnom krugu. Ponekad elektromotorni pogon ima vlastiti izvor napajanja, što je u većini slučajeva agregat s istosmjernim generatorom kao izvorom, pa se koristi mogućnost slobodnog podešavanja napona generatora kako bi se postigla razna svojstva elektromotornog pogona. U velikoj većini tih slučajeva kao agregat služi grupa strojeva ismjenični motor – istosmjerni generator, gdje je taj agregat posrednik kojim se istosmjerni motor priključi na izmjeničnu mrežu. U novije vrijeme se ta klasična rješenja zamjenjuju rješenjima u kojima se koriste poluvodiči. Tako se umjesto podešavanja otpornicima koriste elektroničke sklopke, a umjesto agregata za indirektno upravljanje koriste se spojevi s ispravljačkim ventilima. Odabir rješenja ovisi o mnogim tehničkim i ekonomskim razlozima.

3.2. Elektromotorni pogon s nezavisno uzbuđenim istosmjernim motorom upravljanim pomoću radnih otpora

Nezavisno uzbuđenom motoru elektromotornog pogona, napajanom iz istosmjerne mreže čvrstog napona, brzina vrtnje podešava se otporima i promjenom magnetskog toka. Pri tome je ekonomičniji rad s nazivnom brzinom vrtnje ili s brzinom vrtnje većom od nazivne jer se pri podešavanju na brzini vrtnje manjoj od nazivne dio energije gubi na otporima. Kod zaleta motora on kreće potpuno uzbuđen pa je priključak armature na mrežu pravi kratki spoj jer se narinutom naponu opire samo radni otpor kruga armature (induktivitet gotovo pa zanemariv). Struja armature ne smije znatno premašivati nazivnu zbog komutacije (mora

ostati ispod $2I_n$) pa se u trenutku uključanja motora dodaje veliki predotpor kako bi ta struja kratkog spoja ostala manja od $2I_n$:

$$I_k = \frac{U}{R_a + R_p}$$

I_k - struja kratkog spoja

U - napon armature

R_a - otpor armature

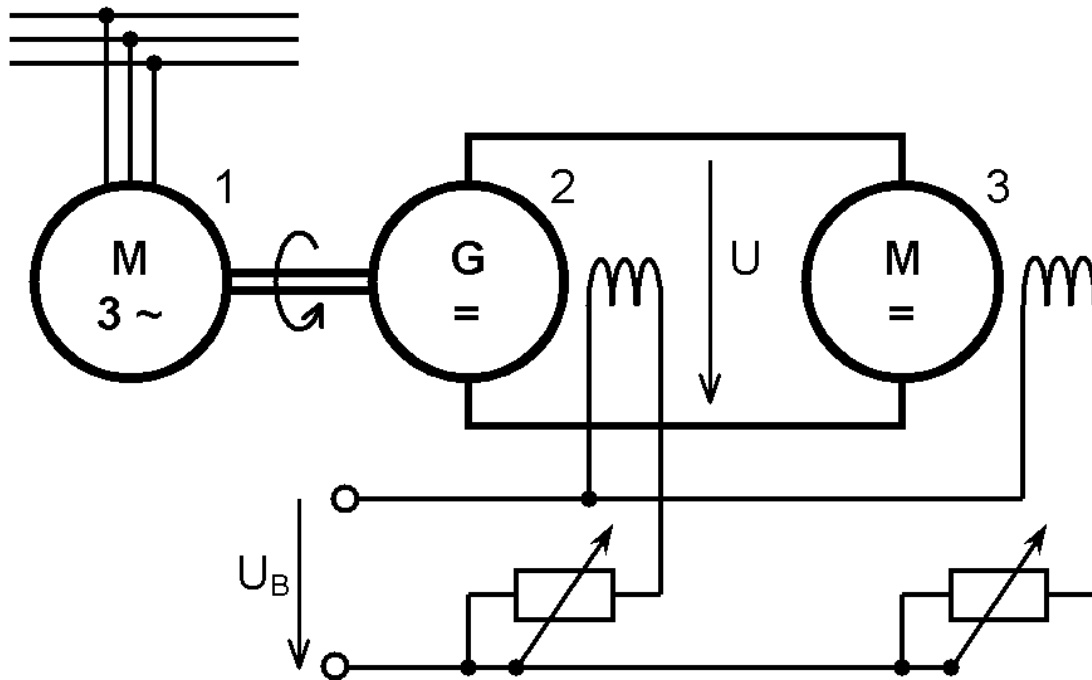
R_p - predotpor

Na temelju toga pogon treba uključiti na vrlo strmoj mehaničkoj karakteristici jer je moment motora proporcionalan struji. Tako dobivamo situaciju da mu porastom brzine vrtnje opadaju struja i moment do točke u kojoj je poželjno da se smanji otpor armaturnog kruga pa se zato obično ukupni predotpor izvodi u nekoliko stupnjeva.

3.3. Elektromotorni pogon s nezavisno uzbuđenim istosmjernim motorom upravlján naponom izvora

Za potpuno iskorištenje opsega podešavanja brzine vrtnje istosmjernog nezavisno uzbuđenog motora potrebno ga je priključiti na vlastiti izvor (istosmjerni generator). Takav spoj izmjeničnog motora s nezavisno uzbuđenim generatorom naziva se Leonardov agregat. On ima mogućnost potpuno nezavisnog podešavanja brzine vrtnje elektromotornog pogona. Cijeli spoj s Leonardovim agregatom, takozvana Leonardova grupa sastoji se od:

- Asinkronog motora
- Istosmjernog nezavisno uzbuđenog generatora
- Uzbudnika (pogonjenih asinkronim motorom)
- Istosmjernog nezavisno uzbuđenog motora



Slika 3.1 Principni spoj Leonardove grupe

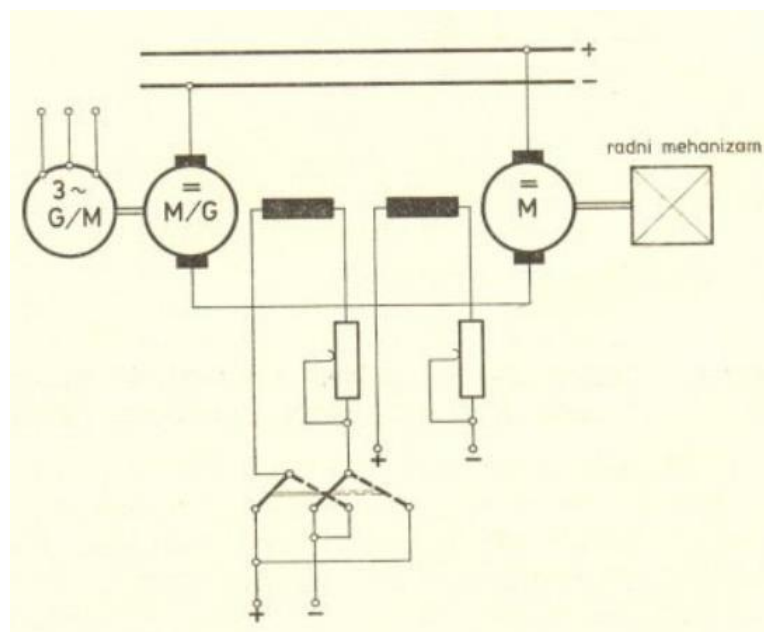
Zalet i kočenje istosmjernog nezavisno uzbuđenog motora izvode se promjenom napona istosmjernog generatora uz punu uzbuđu samog motora. Promjena napona postiže se promjenom uzbude generatora. Prirodne mehaničke karakteristike motora priključenog preko Leonardovog agregata neznatno se mijenjaju u usporedbi s direktnim priključkom na mrežu. Jedina razlika je ta što se u armaturni krug motora mora uključiti i omski otpor generatora. Posljedica je da su prirodne mehaničke karakteristike malo mekše. Leonardova grupa može biti komponirana i od nešto drugačijih elemenata pa se u nekim izvedbama umjesto uzбудnika koriste ispravljači zbog njihove jeftinije cijene. Takav spoj naziva se Graetzov spoj. U Graetzovom spoju također umjesto asinkronog motora uzima se sinkroni kojem je glavna prednost ta što kada je preuzbuđen može popravljati faktor snage cijelog postrojenja jer se ponašaju kao kondenzatori i kompenziraju jalovu snagu. Također su povoljniji jer zbog tvrde mehaničke karakteristike agregata i istosmjerni napon postaje čvršći.

Ima još mnoštvo varijacija Leonardova agregata, kojima se postižu razna pogonska svojstva poput Leonardova spoja s povratnom vezom kojim se stabilizira napon jer pri običnom Leonardovom spoju relativno male promjene momenta tereta mogu izazvati relativno velik pad brzine vrtnje. Još jedna izvedba je Leonardov agregat opremljen zamašnjakom za

elektromotorne pogone velikih snaga i vrlo visokih udarnih opterećenja gdje mu zamašnjak podnosi udarce. Takav spoj naziva se Ilgner-Leonardova grupa.

3.4. Elektromotorni pogon s nezavisno uzbuđenim istosmjernim motorom u buster-spoju

Kod elektromotornog pogona s nezavisno uzbuđenim motorom s uključenim predotporom dio napona iz mreže poništi se na predotporu. Stavi li se umjesto predotpora armatura drugog istosmjernog stroja koji je takav da mu je nazivna struja jednaka struji armature i nazivni napon jednak promjeni napona i ako se taj dodatni stroj uspije uzбудiti i opteretiti upravo tako da nadomjesti pad napona dobiva se pojam buster-spoja. Buster ima svojstvo da može biti uzbuđen i kao motor i kao generator. Razlika naspram predotpora je što je predotpor mogao samo oduzeti napon u strujnom krugu dok ga buster može i oduzeti i dodati. To svojstvo mu omogućuje asinkroni stroj na osovini s buster-strojem koji radi kao motor kad buster radi kao generator i obrnuto. Kako bi buster-spoj podešavao brzinu vrtnje u cijelom opsegu od 0 do nazivne brzine vrtnje, on se mora izgraditi za pola nazivnog napona motora, odnosno polovicu snage čime je ekonomičniji od Leonardovog agregata. Posebna mu je prednost što se može brže podešavati i s manjim snagama podešavanja od Leonardovog agregata jer su mu manje električke vremenske konstante i snage uzбудnih krugova.

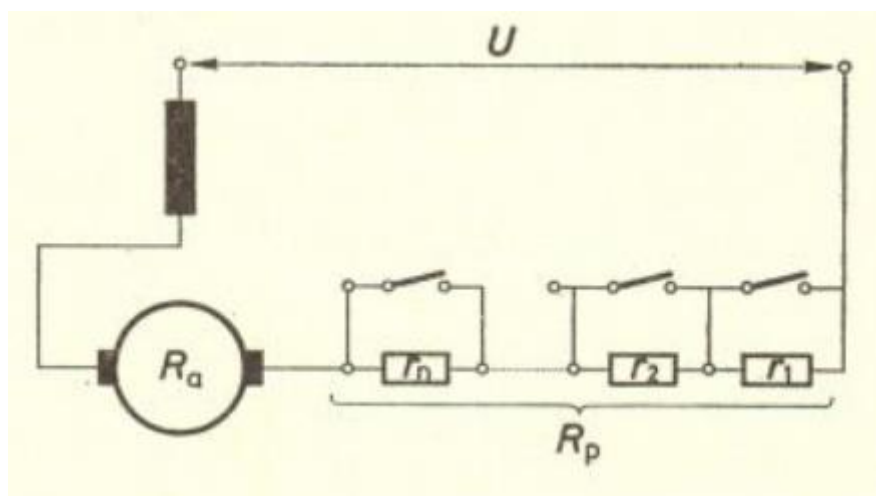


Slika 3.2 Buster-spoj nezavisno uzbuđenog istosmjernog stroja

3.5. Elektromotorni pogon sa serijski uzbuđenim istosmjernim motorima upravljani radnim otporima

Kod serijski uzbuđenih istosmjernih motora mogućnost da se elektromotornom pogonu podešava brzina vrtnje pokazuje njegova mehanička karakteristika. Napajanjem iz istosmjerne mreže čvrstog napona, korištenjem predotpora ili šantova, mogu se postići razna pogonska stanja. Dovođenje elektromotornog pogona u radnu točku slično je kao i kod nezavisno uzbuđenih motora pa je zbog toga potrebno ograničiti struju kratkog spoja u trenutku uklapanja kako ne bi nastala komutacijska naprezanja. To se postiže dodavanjem predotpora dovoljno velikog iznosa da struja kratkog spoja ne bude veća od dopuštene, ali da postoji dovoljno velik pokretni moment.

U nekim izvedbama elektromotornog pogona kad jedan elektromotorni pogona ima na sebi više jednakih serijskih motora (kod vučnih vozila) može se primijeniti princip serijski-paralelnog ukapčanja i prekapčanja više motora ili se kombinira još i s otpornicima.

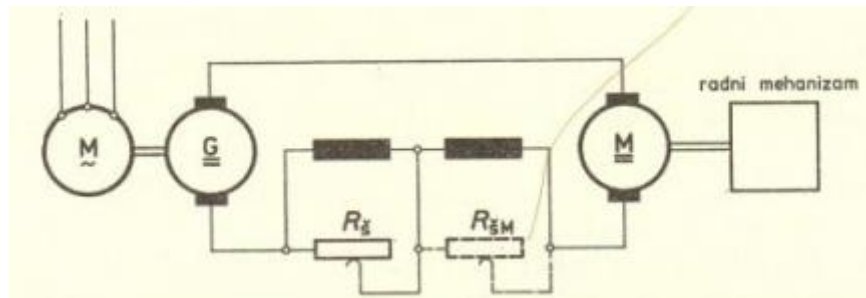


Slika 3.3 Principni spoj serijski uzbuđenog istosmjernog stroja upravljani radnim otporima

3.6. Elektromotorni pogon sa serijski uzbuđenim istosmjernim motorima upravljani naponom izvora

Korištenjem predotpora za podešavanje brzine vrtnje postižu se veliki gubitci energije. Korištenjem umjesto toga nekog izvora promjenjivog istosmjernog napona, postižu se ista

pogonska stanja sa znatno manjim gubitcima uz praktično iste mehaničke karakteristike. Kao i kod nezavisno uzbuđenih motora za priključak na mrežu može se koristiti klasični Leonardov agregat. Ipak upotreba Leonardovog agregata je rijetka zbog ekonomskih razloga. Ako je potrebna mala promjena napona uz čvrstu mrežu može se koristiti i buster spoj. Češće se koristi posebna vrsta Leonardove grupe koja se sastoji od pogonskog izmjeničnog motora i serijskog istosmjernog generatora kao agregata za pretvorbu te serijskog istosmjernog pogonskog motora.



Slika 3.4 Elektromotorni pogon sa serijski uzbuđenim istosmjernim motorom upravljani iz serijski uzbuđenog generatora

Vanjska naponska karakteristika serijskog generatora je potpuno mekana kao i vanjska mehanička karakteristika serijskog motora, no karakteristika pogonskog izmjeničnog motora je tvrda zato što s porastom struje pada brzina vrtnje istosmjernom motoru priključenom na konstantni napon, no kada se taj istosmjerni motor napaja iz serijskog generatora kojem napon raste s porastom struje, pad brzine vrtnje motora kompenzira se porastom brzine vrtnje zbog porasta napona generatora. Brzina vrtnje praznog hoda je uvijek jednaka, a kad su motor i generator jednaki ona je jednaka brzini vrtnje generatora. Opseg podešavanja brzine vrtnje ovakvog spoja je oko 1:10, a ponekad i više. Motor se upušta promjenom otpora šanta u generatorskog uzbudi. Pogon je posebno prikladana za radne mehanizme s konstantnim momentom tereta.

3.7. Impulsno upravljanje istosmjernim strojevima priključenim na istosmjernu mrežu

Impulsno upravljanje brzine vrtnje u elektromotornim pogonima odvija se tako da se neprekidnim spajanjem i odspajanjem nekog elementa u spoju motora, s određenim taktom, sistematski mijenja neki od parametara bitnih za brzinu vrtnje. Brzina vrtnje se dakle neprestano mijenja u nekim uskim granicama, ali joj je prosjek konstantan. Promjeni li se takt mijenja se prosječna vrijednost brzine vrtnje. Kolebanje struje kod pasivnih strujnih

krugova ovisi o periodu u kojoj je uključen element u usporedbi s vremenskom konstantom takta. Kod strujnih krugova složenijih od pasivnih, kakvi su i strujni krugovi električnih strojeva, ne vrijedi ovakva relacija zbog složenijih prijelaznih pojava. Jedno od rješenja za prijelazne pojave dobiva se ako se upravlja pomoću visoke frekvencije impulsa pa se dobivaju mnogo kraće periode impulsa od vremenskih konstanti pa se može linearizirati eksponencijalna funkcija jer se fizikalne veličine ponašaju kao pravac. Zamijene li se u pasivnom strujnom krugu elementi R i L armaturom istosmjernog nezavisno uzbuđenog motora, može se impulsno upravljati tim motorom ukapčavajući i iskapčavajući napon u armaturnom strujnom krugu. Uz otpor armature R_a i induktivitet L_a u armaturnom krugu stroja postoji i inducirani napon E pa zbog toga kad je stroj priključen na mrežu radi u motorskom pogonu, a u stanju elektrodinamičkog kočenja je kad je isključen iz mreže i premošten pomoćnom sklopkom.

4. SPAJANJE I PODEŠAVANJE ELEKTROMOTORNIH POGONA S ASINKRONIM MOTORIMA

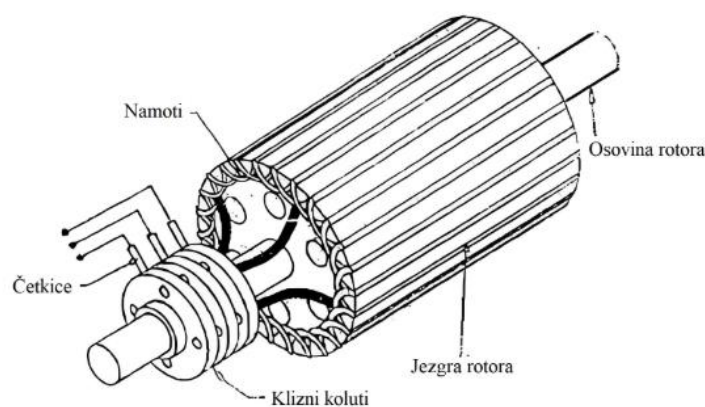
4.1. Općenito o asinkronim motorima

Asinkroni motori specifični su po tome što se kod njih napon ne dovodi na rotor već se napon inducira pomoću okretnog magnetskog polja statora. To magnetsko polje nastaje kada na statoru postoje barem dva namota protjecana izmjeničnom strujom i prolaskom kroz njih struja stvara zajedničko magnetsko polje istog intenziteta koje mijenja smjer. Na rotoru se nalaze namoti u kojima se, presjecanjem silnica okretnog magnetskog polja, inducira napon zbog gibanja vodiča u magnetskom polju. Taj inducirani napon na rotoru će protjerati struju kroz vodiče i stvoriti silu koja pokreće rotor motora. Glavna karakteristika asinkronog motora je ta što se rotor okreće brzinom koja je različita od brzine rotacije magnetskog polja stvorenog u statoru jer ne bi došlo do presjecanja magnetskog polja statora i rotora pa ne bi bilo inducirano napona na rotorskim namotima.

Prema vrsti rotorskog namota asinkroni motori dijele se na:

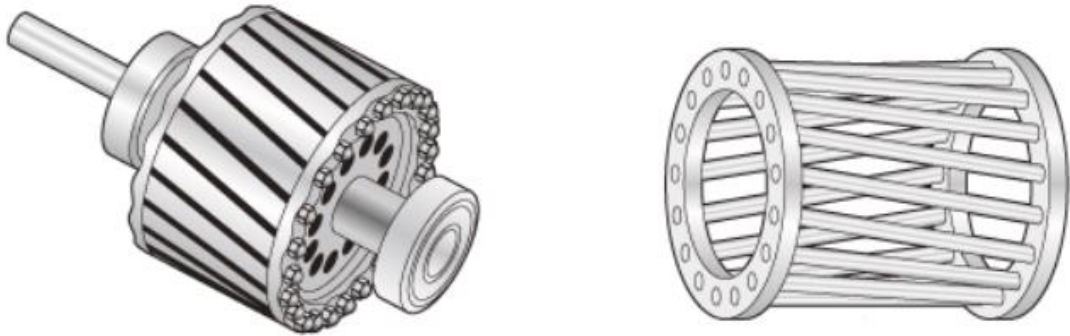
- Kliznokolutne asinkrone motore
- Kavezne asinkrone motore

Kliznokolutni ili kolutni motori na rotoru imaju trofazni namot s istim brojem pari polova kao i statorski namot. Utori rotora mogu biti otvoreni ili zatvoreni te se u njih stavljaju namoti kao i kod statora. Krajevi rotorskog namota spajaju se na klizne kolute.



Slika 4.1 Klizno kolutni rotor asinkronog motora

Kavezni asinkroni motori najčešće su korišteni asinkroni motori. Sastoji se od aluminijskih ili bakrenih štapova koji su simetrično raspoređeni po obodu željezne jezgre rotora i na krajevima su kratko spojeni prstenovima i čine višefazni namot. Glavna prednost kaveznih motora u usporedbi s kolutnim motorima je ta što je izvedba rotora jednostavnija i jeftinija zbog toga što nije potreban ni kolektor ni četkice jer mu nije potrebno dovesti struju na rotor.

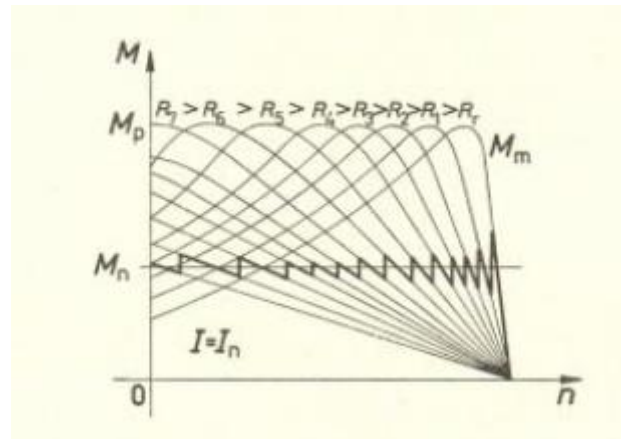


Slika 4.2 Rotor i stator kaveznog asinkronog motora

4.2. Podešavanje brzine vrtnje asinkronog motora pomoću otpora u rotorskom krugu

Ovaj tip podešavanja brzine vrtnje moguć je samo kod kolutnih asinkronih motora. Dodavanjem otpora u rotorski krug postiže se da se efektivna vrijednost napona na rotoru smanjuje, a rezultat je samim time smanjenje struje u rotoru i smanjenje brzine vrtnje motora. Poznato je da gubici u bakru rotora ovise proporcionalno o klizanju asinkronog motora, pa s većim podešavanjem opsega nadolje postoje znatni gubici. Svaka mehanička karakteristika prolazi točkom sinkrone brzine i one su mekše kako se niže podešava brzina vrtnje pa je to također razlog što se ne podešava u većem opsegu. Korištenjem mehaničkih karakteristika elektromotorni pogon s asinkronim motorom dovodi se na nominalnu brzinu vrtnje. Asinkroni motori nisu osjetljivi na kratkotrajna strujna preopterećenja poput istosmjernih motora i zato se kolutnim motorima redukcija struje u pokretanju izvodi zbog drugih razloga. Prvi razlog je taj da slaba mreža ne trpi prevelike udarce, a drugi i ozbiljniji je što je potreban dovoljan pokretni moment. Što je kolutni motor veći on ima znatno manji potezni moment od nazivnog. Prikluči li se na rotor dovoljno velik otpor, elektromotorni pogon može krenuti s pokretnim momentom većim od nazivnog. Budući da je moment zapravo proporcionalan struji na cijelom području pokretanja, pokretanje kolutnog motora

može se u cijelosti gledati identično kao pokretanje nezavisno uzbuđenog motora. Želi li se kolutni motor pokrenuti kontinuiranim momentom ili se kontinuirano želi podešavati brzina vrtnje može se iskoristiti i mogućnost kolutnog motora da se na njega puste i veće struje. Cilj je da se kod prijelaznih pojava dobije konstantan moment. Stavi li se otpornik s više stupnjeva može se pravovremenim prijelaskom s jednog na drugi stupanj dobiti otprilike konstantan moment u dobrom dijelu podešavanja.



Slika 4.3 Momentna karakteristika za različite vrijednosti otpora

Što je veći broj stupnjeva to je karakteristika bliže pravcu. Kako bi se još izgladila karakteristika moguće je umjesto klasičnih otpornika od metalnih vodiča staviti tekućinske ili vodne otpornike kod kojih se promjena otpora izvodi uranjajući elektrode dublje ili pliće u kupku.

4.3. Podešavanje brzine vrtnje asinkronih motora preklapanjem polova

Asinkroni motor u praznom hodu vrti se sinkronom brzinom vrtnje prema izrazu:

$$n = \frac{60 * f}{p}$$

n – brzina vrtnje

f – frekvencija mreže

p – broj pari polova

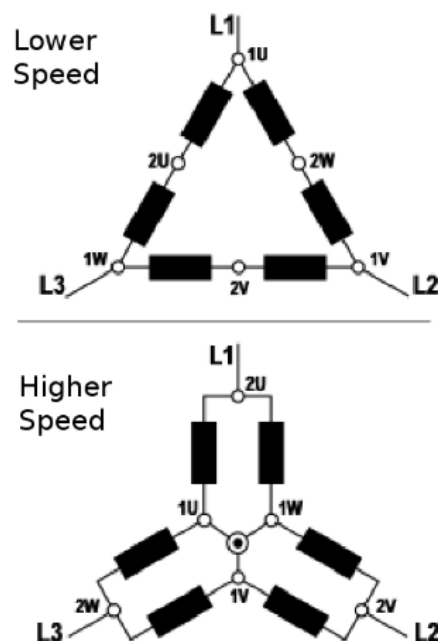
Podešavanje brzine vrtnje u principu se odvija grubim skokovima koji odgovaraju broju pari polova. Takvo podešavanje povoljno je samo za kavezne motore jer je kod kolutnih ono skupo i dolazi s mnoštvom problema.

U principu postoje dva načina prespajanja polova:

- Gradnja više nezavisnih statorskih namota različitih polariteta
- Prekapčanje grupe svitaka samo jednog statorskog namota

Prvi način preklapanja polova je poprilično jednostavan. Njegova prednost je što se snage i momenti pojedinih polariteta mogu nezavisno odrediti, pa je velika prilagodivost raznim pogonskim zahtjevima.

Drugi način u principu se izvodi tako da se svaki statorski svitak izvede na posebne stezaljke i te svitci mogu kombinirati u grupe ovisno o željenim brzinama vrtnje. Obično te mogućnosti ne odgovaraju kada se žele imati više od tri brzine jer u pojedinim kombinacijama dolazi do poteškoća zbog momenta i snage. Jedan primjer ove metode je takozvani Dahlanderov spoj kojim se motor s dvije brzine može prebacivati između više i niže brzine.

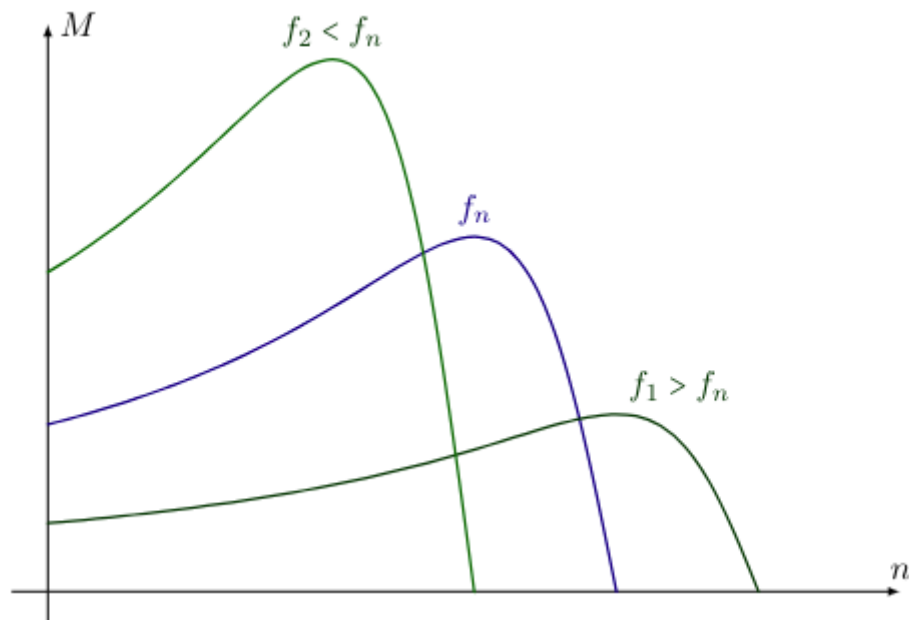


Slika 4.4 Shema Dahlanderova spoja za višu i nižu brzinu

Uz ta dva osnovna načina postoji i kombinacija jednog i drugog kad se želi dobiti više brzina. Najčešće su izvedbe motora s preklapanjem polova s dvije brzine vrtnje, ali se grade i s tri pa čak i četiri brzine.

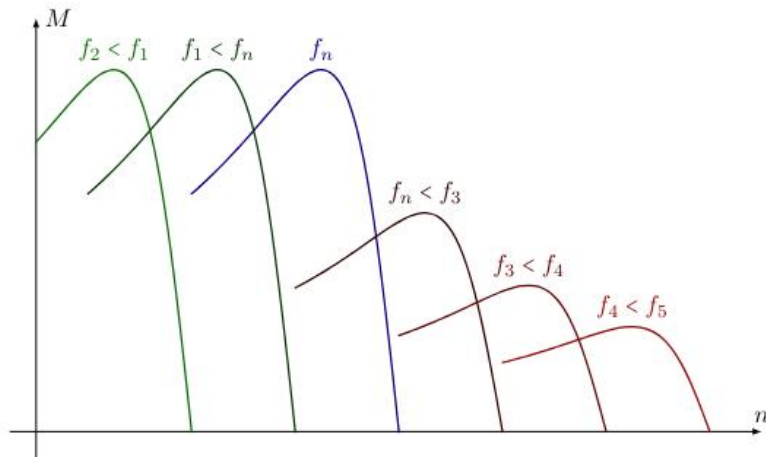
4.4. Podešavanje brzine vrtnje asinkronih motora promjenom frekvencije

Poznato je da je kod asinkronih motora brzina vrtnje vezana za frekvenciju izvora iz kojeg se motor napaja. Promjenom frekvencije je dakle, moguće mijenjati brzinu vrtnje elektromotornog pogona s asinkronim motorom i to u širokom opsegu slično kao i kod istosmjernog motora pomoću napona.



Slika 4.5 Momentne karakteristike za frekvencije veće i manje od nazivne

Ipak, kod asinkronih motora podešavanje je nešto složenije prvenstveno zbog toga što se kod istosmjernih motora promjenom napona ne utječe na ostale parametre vezane za brzinu vrtnje. Promjenom frekvencije asinkronog motora mijenja se i njegov magnetski tok te se samim time bitno utječe na vanjsku karakteristiku motora. Rješenje je da se osim promjene frekvencije mijenja i priključeni napon kako bi se dobile željene mehaničke karakteristike motora. Kako bi se dobile slične vrijednosti karakterističnih momenata pri različitim brzinama vrtnje, potrebno je da magnetski tok ostane nepromijenjen, a to znači da će se narinuti napon mijenjati proporcijalno promjeni frekvencije.



Slika 4.6 Momentne karakteristike kod promjene frekvencije i napona istovremeno

Osnovni problem kod podešavanja brzine vrtnje elektromotornom pogonu s asinkronim motorom je problem izvora promjenjivog napona i frekvencije. Najčešće rješenje su pretvarači frekvencije, strojevi i agregati, slično u principu kao Leonardov spoj kod istosmjernih motora. Ima više izvedbi, no najčešće se koriste:

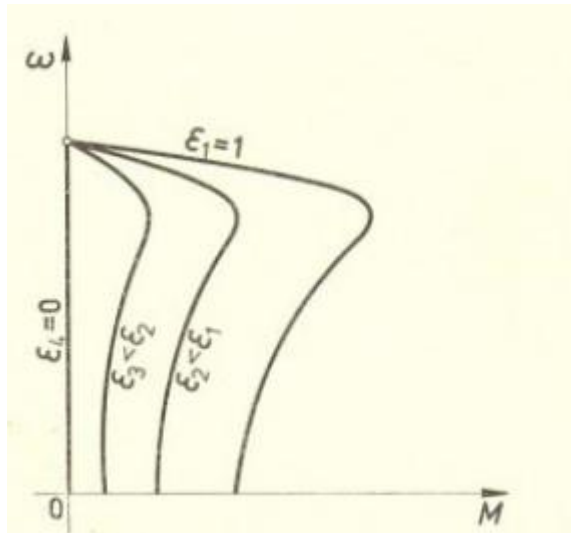
- Asinkroni pretvarač frekvencije bez mogućnosti podešavanja
- Asinkroni pretvarač frekvencije za podešavanje u širem području
- Pretvarač frekvencije sa sinkronim generatorom

4.5. Impulsno upravljanje asinkronim strojevima

Izmjeničnim strojevima u principu se brzina vrtnje regulira na dva načelna pristupa impulsnog upravljanja priključenom izmjeničnom mrežom:

- Upravljanje naponom
- Upravljanje i frekvencijom i naponom istovremeno

Impulsno upravljanje naponom slično je impulsnom upravljanju naponom istosmjernih strojeva. Do razlike dolazi isključivo zbog različitosti momentnih karakteristika istosmjernih i asinkronih motora. Dakle u spoju s trolnim prekidačem kada su uklopljene sve tri faze karakteristika ima potpunu vrijednost, kada su samo dvije faze uklopljene karakteristika se smanji, kada je uklopljena jedna faza dolazi do dodatnog pada vrijednosti karakteristike i kada je prekidač stalno isključen vrijednost karakteristike jednaka je nuli.

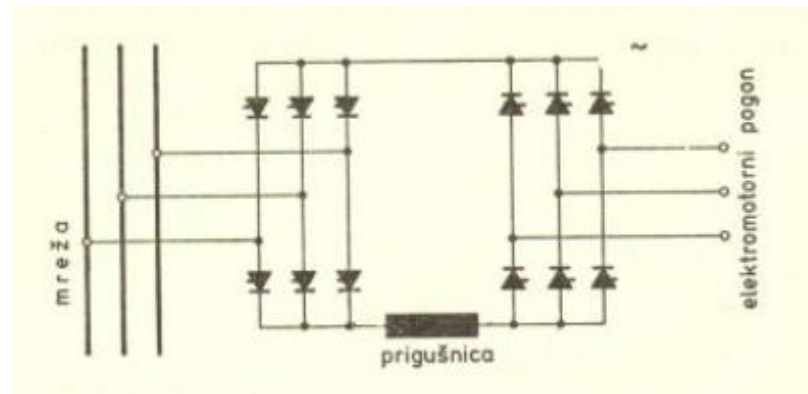


Slika 4.7 Promjena momentne karakteristike pri impulsnom upravljanju naponom

Za razliku od impulsnog upravljanja naponom, metoda impulsnog upravljanja frekvencijom i naponom ima bolja svojstva te na neki način približava asinkroni motor istosmjernom motoru prema regulacijskim osobinama. Ipak problemi vezani za ispravljačke spojeve asinkronog motora razlikuju se bitno od spojeva kod istosmjernih motora. Ispravljački sklopovi istosmjernih motora moraju dati kontinuirano promjenjiv istosmjerni napon s mogućnošću vođenja struje u oba smjera. Kod asinkronih motora ispravljački sklopovi omogućuju promjenu frekvencije i amplitude triju izmjeničnih napona i struja u statorskom i rotorskom namotu s brzinom vrtnje i opterećenjem. Postoje dva sustava pretvarača frekvencije i napona:

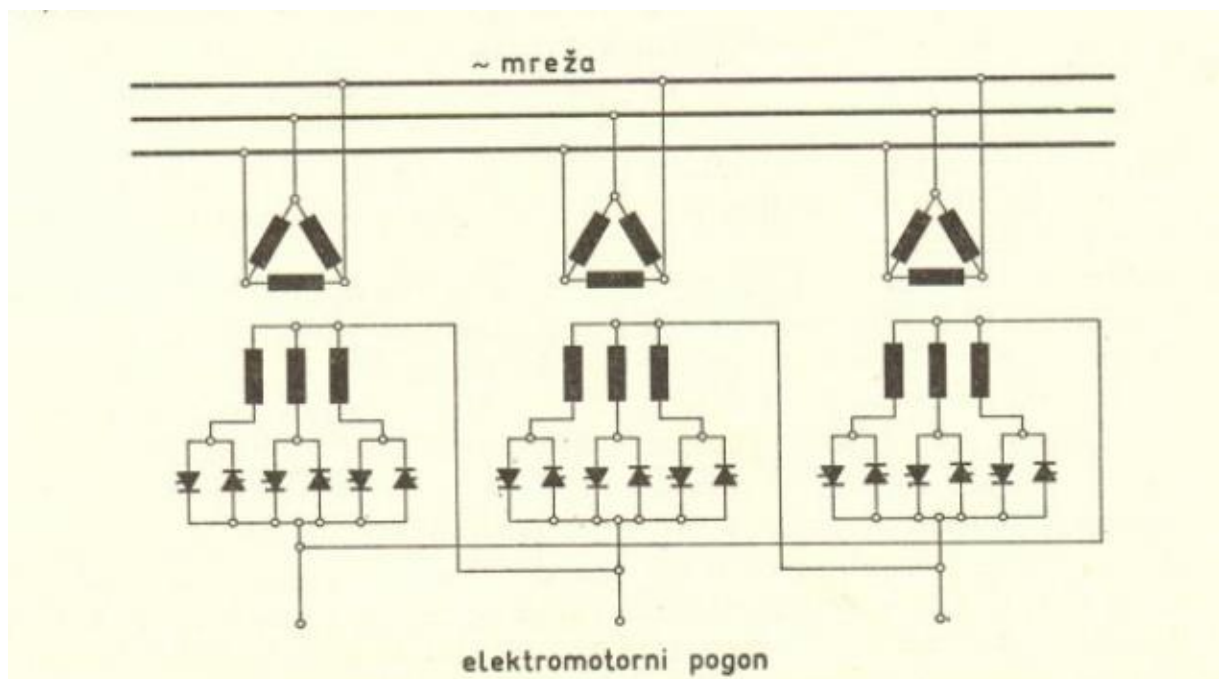
- S istosmjernim krugom
- Bez istosmjernog kruga

Princip rada pretvarača s istosmjernim krugom je taj što se najprije upravljivim diodama ispravi mrežni napon u istosmjerni, a nakon toga se on drugim setom upravljivih dioda pretvori natrag u višefazni izmjenični, ali mu je drugačiji iznos i frekvencija, no na taj način se i frekvencijom i naponom može upravljati ili ih regulirati.



Slika 4.8 Shema pretvarača frekvencije s istosmjernim međukrugom

Princip rada pretvarača bez istosmjernog međukruga temelji se na tome što se trofazni ulaz mreže upravlja sustavom tiristora tako da se na izlazu iz pretvarača dobiva izmjenični sustava promijenjenog napona i frekvencije kojima se tim sustavom tiristora može upravljati. Sustav tiristora sastoji se od tri grupe i svaka upravlja jednom fazom izlaza elektromotornog pogona. Faze izlaza napajaju se iz faza primara preko trofaznog transformatora s sustavom antiparalelno spojenih tiristora u svakoj fazi sekundara transformatora. Na taj način svaka faza može voditi struju u oba smjera.



Slika 4.9 Shema pretvarača frekvencije bez istosmjernog međukruga

5. POKRETAČI

5.1. Općenito o pokretačima

Pokretači su uređaji koji služe za dovođenje istosmjernih i asinkronih motora na nazivnu brzinu vrtnje. U nekim naprednim izvedbama oni mogu i podešavati brzinu vrtnje motora.

Osim glavne zadaće pokretača da dovode stroj do nazivne brzine, od pokretača se zahtijeva još i:

- Održavanje struje upuštanja u dopuštenim granicama
- Postizanje mekanog pokretanja
- Postizanje maksimalnog pokretnog momenta kod asinkronih strojeva
- Prijenos najvećeg dijela omskih gubitaka iz rotora u pokretač

5.2. Pokretači za istosmjerne motore

Istosmjerni motori koriste razne vrste pokretača, ovisno o zahtjevima elektromotornog pogona. Ti pokretači dijele se u tri skupine:

1. Ručno upravljani pokretači
2. Automatski pokretači
3. Zaštitni uređaji

Ručno upravljani pokretači najčešće su ručni prekidači kojima se uključuje i isključuje motor. Oni su prikladni za manje elektromotorne pogone gdje nije potrebna kontrola sustava na daljinu.

Automatski pokretači dijele se na:

- Sklopnike
- Regulatorne napona
- PWM kontrolere
- Reverzibilne pokretače

Sklopnici su elektromehanički prekidači koji omogućuju daljinsko uključivanje i isključivanje motora. Sklopnici se često koriste zajedno s relejima za zaštitu i kontrolu.

Regulatori napona kontroliraju brzinu motora promjenom napona koji se dovodi na motor. To omogućava prilagodbu brzine ovisno o potrebama elektromotornog pogona.

PWM kontroleri reguliraju brzinu motora modulacijom širine impulsa napajanja. Ova metoda je vrlo efikasna i omogućuje preciznu kontrolu brzine.

Reverzibilni pokretači koriste se za promjenu smjera vrtnje motora. To se postiže promjenom polariteta napajanja motora putem sklopnika ili elektroničkih sklopova.

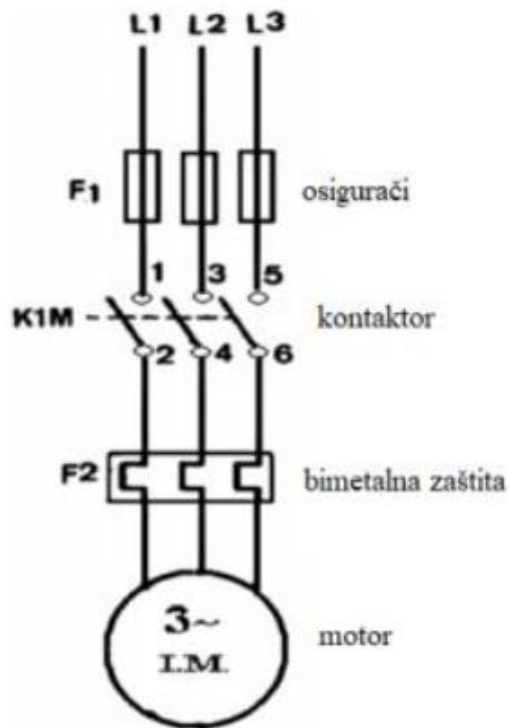
Zaštitni uređaji imaju zadaću zaštititi motor prilikom pokretanja i to su većinom osigurači i prekidači za zaštitu od prevelikih struja i kratkih spojeva, termalni releji koji štite motor od pregrijavanja i releji preopterećenja koji detektiraju preopterećenje i prekidaju napajanje motora iz mreže.

5.3. Pokretači za asinkrone motore

Asinkroni motori koriste različite vrste pokretača, ovisno o potrebnoj kontrolnoj funkcionalnosti i uvjetima rada. Najčešći pokretači za asinkrone motore su:

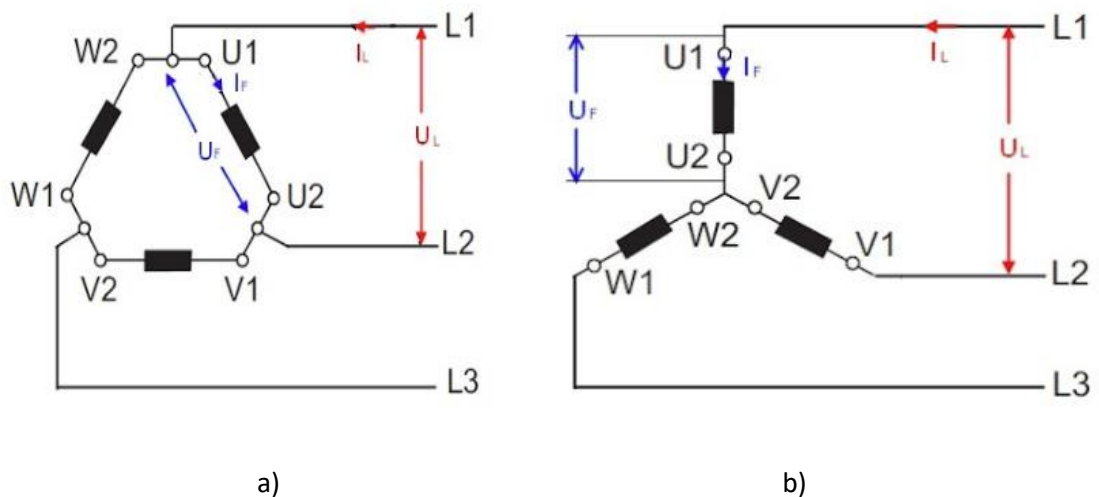
- Direktni pokretači
- Zvijezda-trokut pokretači
- Autotransformatorski pokretači
- Soft start uređaji
- Frekvencijski pretvarači

Direktni pokretači imaju funkciju da motor direktno spajaju na napajanje i tako mu omogućavaju da odmah počne raditi punom brzinom vrtnje. Koriste se kod malih motora koji mogu podnijeti visoku struju pokretanja.



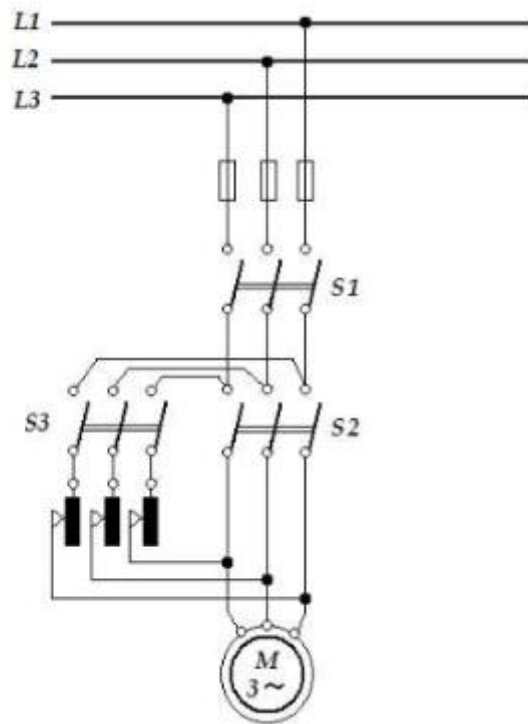
Slika 5.1 Shema direktnog pokretanja asinkronog motora

Zvijezda-trokut pokretači koriste se na način da se motor prvo spaja u zvijezdu kako bi se smanjila početna struja, a zatim se prebacuje u trokut za normalan rad. Koriste se kod srednjih i velikih motora koji ne mogu podnijeti veliku početnu struju i moment.



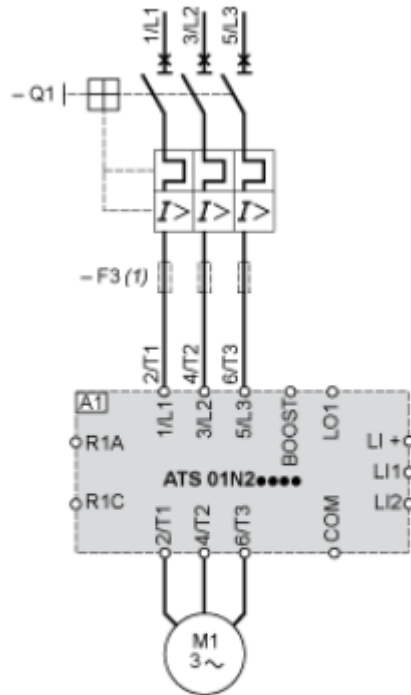
Slika 5.2 Shema namotaja asinkronih motora spojenih u a) zvijezdu i b) trokut

Autotransformatorski pokretači koriste autotransformator za smanjenje napona prilikom pokretanja, čime se smanjuje struja pokretanja. Koriste se za velike motore gdje je potrebno značajno smanjenje struje pokretanja.



Slika 5.3 Shema pokretanja asinkronog motora pomoću autotransformatora

Soft start uređaji su elektronički uređaji koji motor pokreću na način da postupno povećavaju napon primijenjen na motor pomoću tiristora u antiparalelnom spoju kojima se mijenja kut vođenja te se tako motor glatko pokrene. Koriste se kod pogona gdje je potreban baš taj glatki start kako bi se smanjio mehanički stres i samim time produžio vijek trajanja motora.



- A1 : Soft start/soft stop unit
- (1) For type 2 coordination
- Q1 : Motor circuit-breaker
- F3 : 3 fast-acting fuses

Slika 5.4 Shema soft start uređaja

Frekvencijski pretvarači kod asinkronih motora prvenstveno omogućuju precizno upravljanje brzinom vrtnje motora promjenom frekvencije napajanja, no njima se također može i pokrenuti motor pa ih je dobro spomenuti. Koriste se prvenstveno kod pogona u kojima je potrebna promjenjiva brzina poput ventilatora, crpki i transportera.

6. SPAJANJE I PODEŠAVANJE ELEKTROMOTORNIH POGONA SA SINKRONIM MOTOROM

6.1. Općenito o sinkronim motorima

Sinkroni motori su vrsta elektromotora koji rade na konstantnoj (sinkronoj) brzini. Sinkronu brzinu održavaju usprkos opterećenjima što ih čini idealnim za primjenu u pogonima gdje je ključna precizna kontrola brzine.

Sinkrona brzina definirana je brojem pari polova motora i frekvencijom napajanja prema formuli:

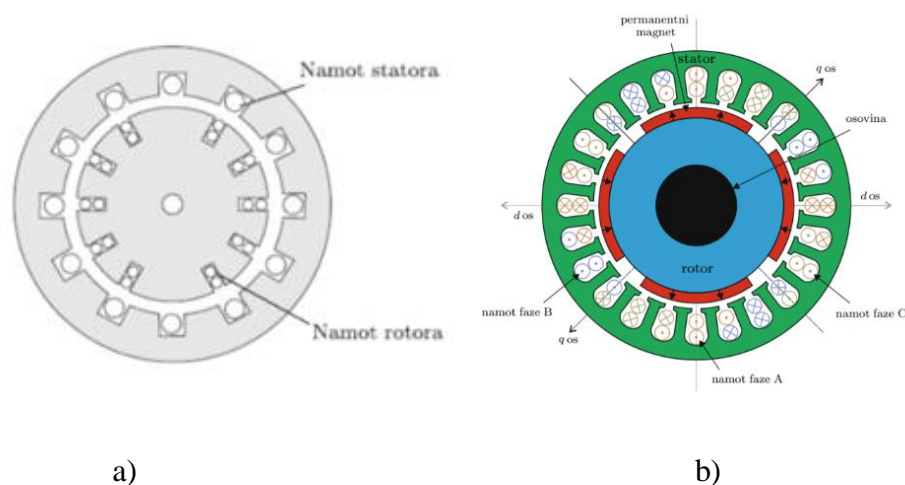
$$n_s = \frac{60 * f}{p}$$

n_s – sinkrona brzina

f – frekvencija

p – broj pari polova

Stator sinkronog motora sadrži namote kroz koje prolazi izmjenična struja tako stvarajući rotirajuće magnetsko polje. Rotor se može sastojati od permanentnih magneta ili namota koje napaja istosmjerna struja za stvaranje magnetskog polja. Osim te dvije vrste postoje još i varijacije poput histereznih motora gdje se koriste materijali s visokom histerezom u rotoru za stvaranje sinkronog momenta i reluktantni motori koji sadrže rotor s promjenjivim reluktancijom koji sinkronizira s rotirajućim poljem statora.



Slika 6.1 Rotor i stator sinkronog motora kod izvedbe a) s namotima na rotoru i b) s permanentnim magnetima

Prednosti sinkronih motora su:

- Precizna kontrola brzine – idealni su za pogone gdje je potrebna stalna brzina vrtnje
- Visok faktor snage – mogu se optimizirati za rad s faktorom snage približnom jedinici
- Stabilnost – brzina vrtnje ne varira s promjenom opterećenja

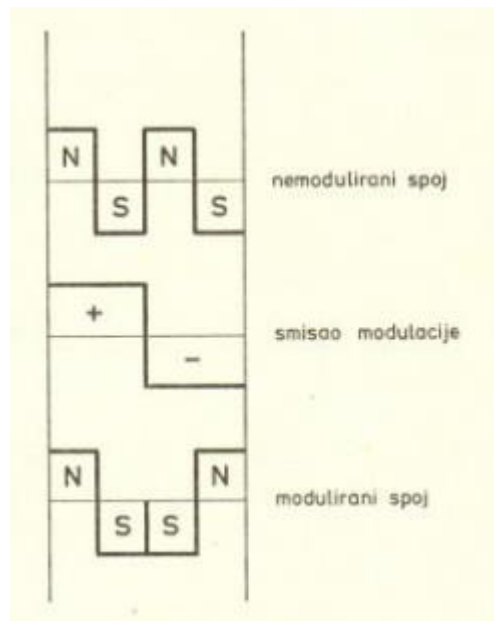
Nedostatci sinkronih motora su:

- Komplicirano pokretanje – potreban je poseban sustav uzbude kako bi rotor bio sinkroniziran s rotirajućim magnetskim poljem
- Trošak – općenito su skuplji zbog složenije konstrukcije i potrebe za dodatnim komponentama za pokretanje i kontrolu

Sinkroni motori nalaze primjenu u mnogim industrijama i uređajima, najčešće kod kompresora, pumpi i ventilatora koji zahtijevaju konstantnu brzinu vrtnje. Vrijedi spomenuti i upotrebu sinkronih motora kao reverzibilnih agregata u akumulacijskim hidroelektranama gdje turbina dio vremena radi kao generator, a dio vremena kao pumpni agregat gdje sinkroni motor tjera turbinu kao pumpu puneći akumulacijsko jezero vodom.

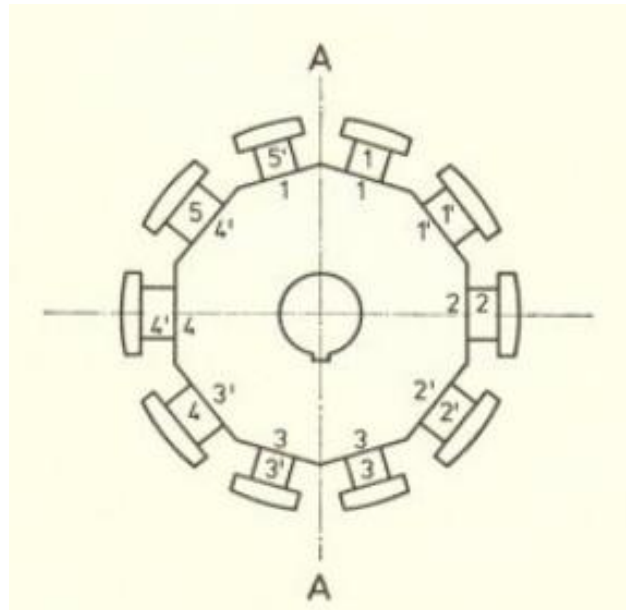
6.2. Podešavanje brzine vrtnje sinkronih motora preklapanjem polova

Upotreba sinkronih motora za pogon pumpnih agregata dovela je do izvedbi polno prekloplivih sinkronih motora. Obično su to pogoni s dvije brzine vrtnje koje su susjedne s obzirom na broj pari polova, odnosno ako jedna brzina vrtnje ima broj pari polova p , druga će brzina vrtnje imati $p \pm 1$ pari polova. Namot statora prespaja se na principu polno-amplitudne modulacije. Barem jednoj od brzina vrtnje raspored magnetskih polja na obodu statora mora biti nesimetričan.



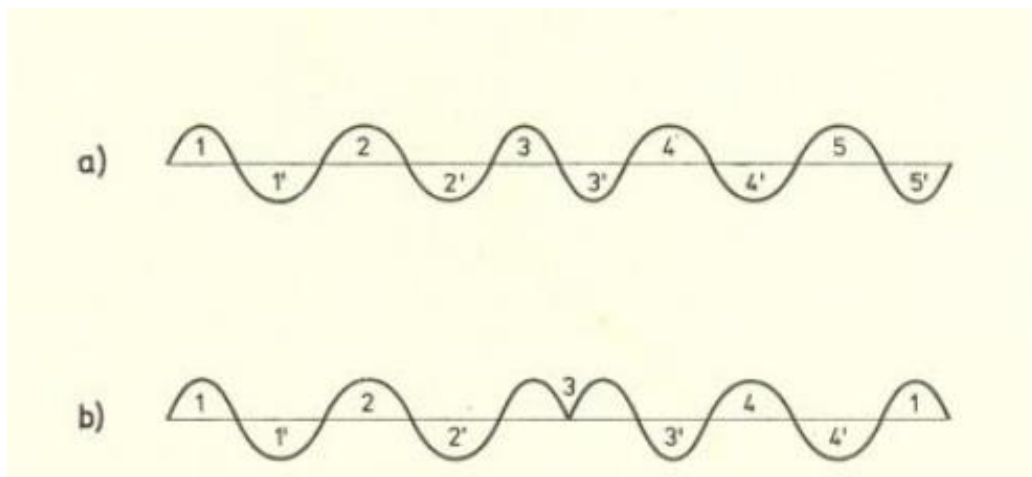
Slika 6.2 Princip polno-amplitudne modulacije

Kako bi sinkroni motor funkcionirao, nije dovoljno prespojiti samo stator, već se mora prespojiti i rotor. Zato se rotor gradi nešto drugačije od rotora za jednobrzinski motor. Za prespajanje polova s 10 na 8 izgradi se šest većih polova i četiri manja pola. Veći polovi su oni s širim obodom od oboda polova kod simetrično građenog rotora, a manji polovi s užim obodom od polova simetrično građenog rotora.



Slika 6.3 Raspored polova rotora za polno-amplitudnu modulaciju

U 10-polnom spoju svakim susjednim polom teče magnetski tok suprotnog smjera i tako se formira 5 pari polova. Modulira li se jedna polovica polova, i to tako da početak promjene bude između dva manja pola, dobiva se raspored polova koji odgovara stroju s osam polova. Tada svaki par manjih polova djeluje magnetski kao jedan pol pod uvjetom da svakim od tih manjih polova teče struja istog smjera kao i u njegovom parnjaku.



Slika 6.4 Raspored magnetskih polja polova rotora a) prije i b) poslije polno-amplitudne modulacije

6.3. Podešavanje brzine vrtnje elektromotornih pogona sa sinkronim motorom promjenom frekvencije

Brzina vrtnje sinkronog motora usko je povezana s frekvencijom izvora napajanja. Uzme li se za izvor napajanja umjesto mreže krute frekvencije neki drugi izvor promjenjive frekvencije, pogonu se brzina vrtnje može podešavati točno u rasponu u kojem se mijenja frekvencija izvora. Prema tome moguće je primjeniti sve metode upravljanja frekvencijom koje su spomenute kod pogona s asinkronim motorima. Međutim upravljanje sinkronim motorom strojnim pretvaračima frekvencije elektromotornog pogona prilično je neuobičajeno. Puno veće značenje ima impulsno upravljanje. Pri tome više dolazi u obzir impulsno upravljanje bez istosmjernog međukruga, jer se kod impulsnog upravljanja s istosmjernim međukrugom radi s malim snagama koje kod pogona sa sinkronim strojem nisu toliko bitne. Kod upravljanja sa statičkim pretvaračem bez istosmjernog međukruga sinkroni motor može imati čak povoljnije uvjete od asinkronog motora. Glavna prednost je u tome što asinkroni motor dobiva iz mreže i struju potrebnu da formira moment i uzbudnu struju kojom se stvara glavno magnetsko polje. Sinkroni motor pak, naime, dobiva iz mreže samo struju za formiranje momenta, a izvor uzbudne struje neovisan je o mreži, odnosno njegov je glavni magnetski tok stvoren neovisno o izvoru struje. Stoga je mreža na koju je priključen statički pretvarač frekvencije znatno manje opterećena višim harmoničkim članovima struje nego kod asinkronog motora. Ispravno upravljanje sinkronim motorom podrazumijeva da je prosječna efektivna vrijednost napona proporcionalna brzini vrtnje, jer je inducirani napon također proporcionalan brzini vrtnje.

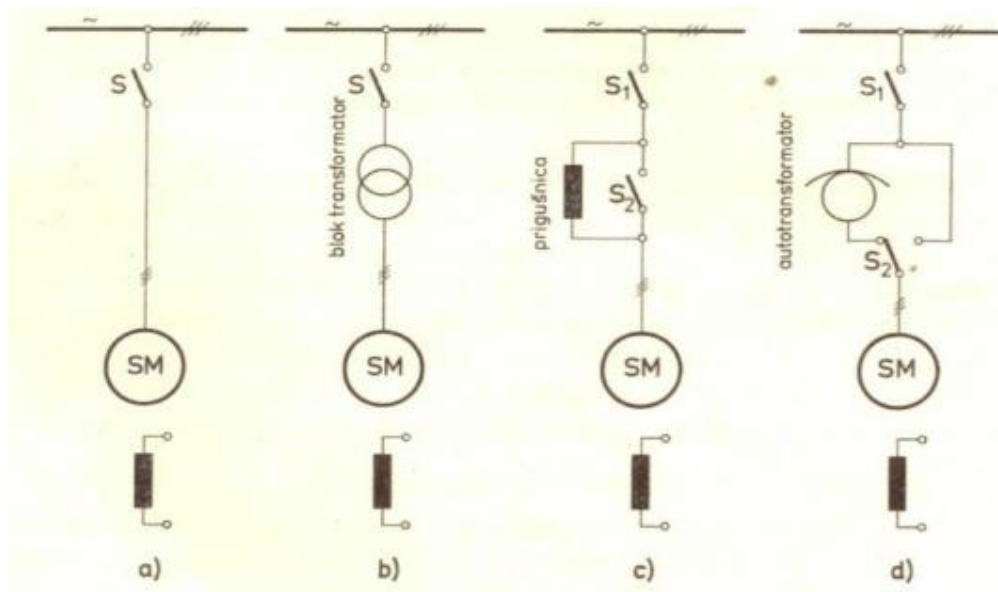
6.4. Dovodjenje elektromotornog pogona sa sinkronim motorom na radnu brzinu vrtnje

Sinkroni moment ne može pokrenuti sinkroni motor iz stanja mirovanja, niti ga može dovesti do sinkrone brzine vrtnje jer djeluje samo u sinkronizmu. Radni mehanizmi u elektromotornom pogonu mogu imati i različite momente tereta tokom zaleta, ali i različite momente inercije pa će u raznim elektromotornim pogonima zalet stvarati manje ili veće poteškoće. Stoga postoje različiti sistemi zaleta elektromotornih pogona pogonjenih sinkronim motorima koji se u osnovi dijele na četiri vrste:

- Asinkroni zalet
- Zalet s pomoćnim motorom
- Zalet s pretvaračem frekvencije
- Zalet pomoću soft-start uređaja

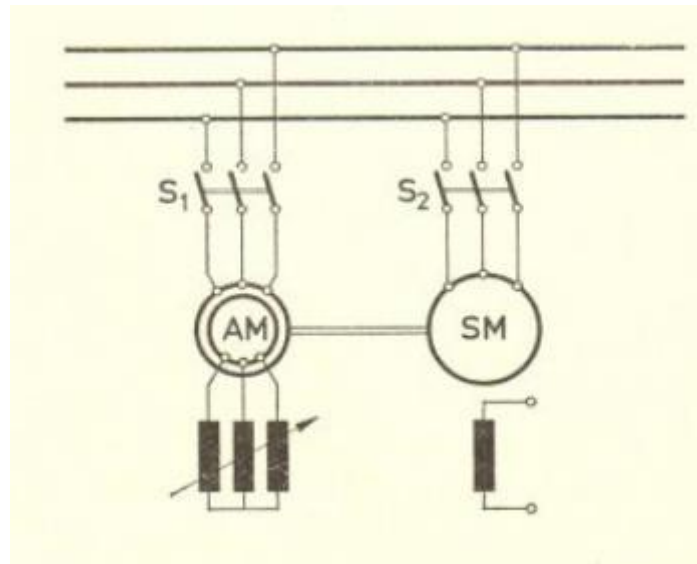
Asinkroni zalet sinkronog motora izvodi se korištenjem amortizerskih namota u rotoru motora slično kaveznom namotu kod asinkronih motora. Kod pokretanja motor se napaja kao asinkroni motor. Amortizerski namoti generiraju moment potreban za ubrzanje rotora. Kako rotor ubrzava, motor radi kao asinkroni motor, pri čemu se frekvencija rotacije rotora ne podudara s frekvencijom napajanja. Struja zaleta može biti visoka, no amortizerski namoti pomažu kod smanjenja vršnih struja i osiguravaju stabilno ubrzanje. Kad rotor dostigne brzinu blizu sinkronoj, uzбудni namot se uključuje i magnetsko polje koje on stvara omogućuje sinkronizaciju brzine rotacije rotora s frekvencijom mreže. Nakon uspostave sinkronizma, motor prelazi u sinkroni režim rada i rotor se okreće u sinkronizaciji s frekvencijom mreže. Ovisno o veličini motora i mogućnostima mreže priključivanje sinkronog motora na mrežu kod asinkronog zaleta može se napraviti na četiri načina:

- Direktno priključivanje
- Priključivanje preko blok transformatora
- Priključivanje preko prigušnice
- Priključivanje preko autotransformatora



Slika 6.5 Priključivanje sinkronog motora na mrežu a) direktno b) preko blok transformatora c) preko prigušnice d) preko autotransformatora

Zalet sinkronog motora korištenjem pomoćnog motora postiže se tako da pomoćni motor pokreće rotor sinkronog motora do gotovo sinkrone brzine. Kad rotor dostigne tu brzinu, sinkroni motor povezuje se s napajanjem i započinje sinkroni režim rada. Prednost korištenja pomoćnog motora je što se omogućava glatko pokretanje bez velikih struja zaleta. Nedostatak je što je potreban baš taj pomoćni motor, što povećava kompleksnost i troškove.



Slika 6.6 Spoj za zalet sinkronog motora s pomoćnim motorom

Metoda zaleta sinkronog motora pomoću pretvarača frekvencije odvija se na način da se motor pokreće pri niskoj frekvenciji koja se postupno povećava dok ne dostigne nominalnu frekvenciju i na takav način rotor polako ubrzava do sinkrone brzine. Prednost ove metode je glatko pokretanje uz kontroliranu struju zaleta i mogućnost preciznog upravljanja motorom, a nedostatak je što su pretvarači frekvencije skupi i kompleksni.

Zalet sinkronog motora pomoću soft-start uređaja koristi se kod velikih niskonaponskih motora ako oni nisu upravljani frekvencijski. Soft-start uređaj snižava napon pri pokretanju i smanjuje struju pokretanja do iznosa kojeg podnosi priključna mreža. Smanjenjem napona smanjuje se i asinkroni moment u zaletu proporcionalno kvadratu napona.

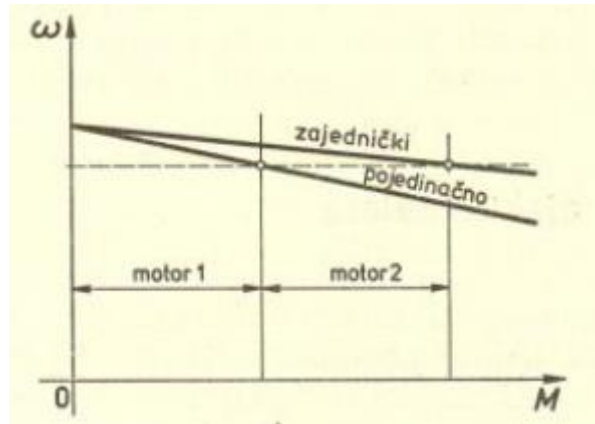
7. PRILAGOĐAVANJE ELEKTROMOTORNOG POGONA POTREBAMA RADNOG MEHANIZMA KOD VIŠEMOTORNIH POGONA

7.1. Razlozi za korištenje višemotornih pogona

Opremanje jednog radnog mehanizma s više pogonskih motora može se izvesti zbog više različitih razloga. Često se to napravi kada se žele postići tehničke ili ekonomske prednosti. Jedan primjer bio bi kod valjaonica kada se korištenjem višemotornih pogona smanjuje zamašna masa u rotaciji na način da se umjesto jednog velikog motora uzmu dva manja s pola snage. Nekad je razlog tog zahvata ograničena količina prostora za smještaj strojeva kao na primjer na brodu ili u rudniku. Kombinacijom više motora također se mogu postići različite mehaničke karakteristike, bolje mogućnosti podešavanja i regulacije brzine vrtnje, poboljšana korisnost i ušteda energije i još neke pogodnosti.

7.2. Elektromotorni pogon s dva elektromotora na jednoj osovini

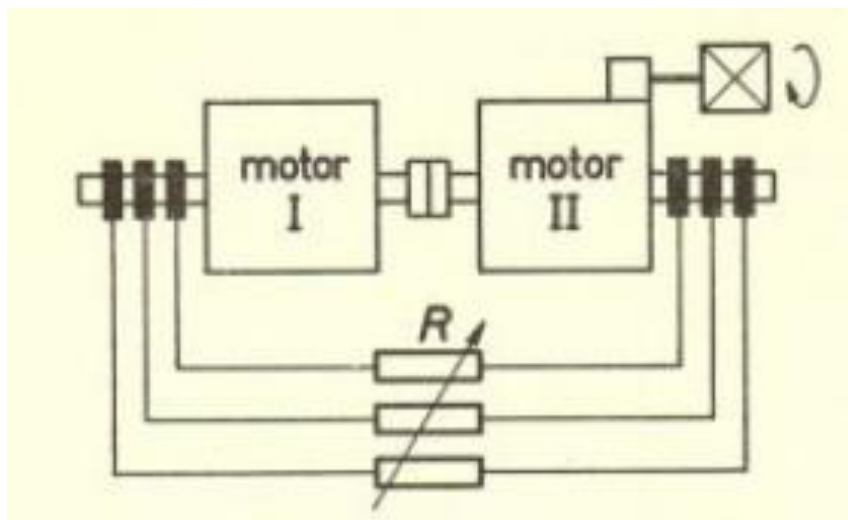
Elektromotorni pogon s dva elektromotora na jednoj osovini najjednostavnija je kombinacija višemotornog elektromotornog pogona, a postiže se pomoću dva motora kruto spojena na jednu pogonsku osovину. Najčešće se motori mehanički spoje krutom mehaničkom spojkom, ali se ponekad i unaprijed izgrade dva statora i dva rotora na jednoj osovini i u jednom kućištu. Prednost izvedbe u zajedničkom kućištu je što se kod velikih pogona mogu postići znatne uštede prostora. U suštini moguće je mehanički spojiti dva ili više bilo kakvih motora, bilo koje vrste, brzine vrtnje ili unutrašnjeg spoja. Mehanički moment koji takva kombinacija motora predaje radnom mehanizmu jednak je sumi momenata koje razvijaju motori pojedinačno, odnosno razlici momenata motora ako su motori na mrežu priključeni za suprotne brzine vrtnje. Mehaničke karakteristike motora se ili zbrajaju ili oduzimaju.



Slika 7.1 Mehanička karakteristika krutog spoja dvaju jednakih nezavisno uzbuđenih motora

7.3. Dvomotorni pogon s asinkronim motorima sa zakretanjem statora

Krutim mehaničkim spajanjem dva asinkrona kolutna motora ostvaruju se zanimljive osobine elektromotornog pogona. Jednom od kolutnih motora pomoćnim motorom se zakreće stator. Pri tome namotima faza oba rotora teče zajednička struja. Zakretanjem statora drugog motora prema prvom motoru na način da se okretno magnetsko polje vrtili unaprijed u odnosu na magnetsko polje prvog motora dobiva se da okretno magnetsko polje prvog motora prostorno zaostane iza onog drugog motora. Taj fazni pomak prenosi se na rotor jer su oni kruto spojeni i ne mogu se okretati nezavisno jedan od drugog. U rotorima su dakle, po iznosu jednaki inducirani naponi, ali su međusobno pomaknuti zbog razlike u okretnim magnetskim poljima.



Slika 7.2 Spoj dvaju asinkronih motora sa zakretanjem jednog statora

Rezultantna struja tih napona je baš struja koja teče namotima faza oba rotora koja je spomenuta ranije. Na temelju te struje se izračunava moment svakog od dva motora i na kraju ukupni moment i njegova ovisnost o kutu zakretanja statora prema relaciji:

$$M = M_m * (1 - \cos \vartheta)$$

M – ukupni moment oba motora

M_m – moment asinkronog motora u samostalnom radu

ϑ – kut zakretanja statora

Prednost ovog spoja je što se brzina vrtnje i moment mogu vrlo precizno podešavati i pri najvećim snagama. Nije potrebna prevelika snaga pomoćnog motora kako bi se pokrenuo stator. Nedostatak ovakvog spoja je što je podešavanje, iako je moguće u širokom rasponu, ekonomično samo u uskom rasponu oko sinkronizma. Kod većeg klizanja asinkronih motora zbog gubitaka u bakru rotora, koje je proporcionalno klizanju, trošak energije znatno se povećava.

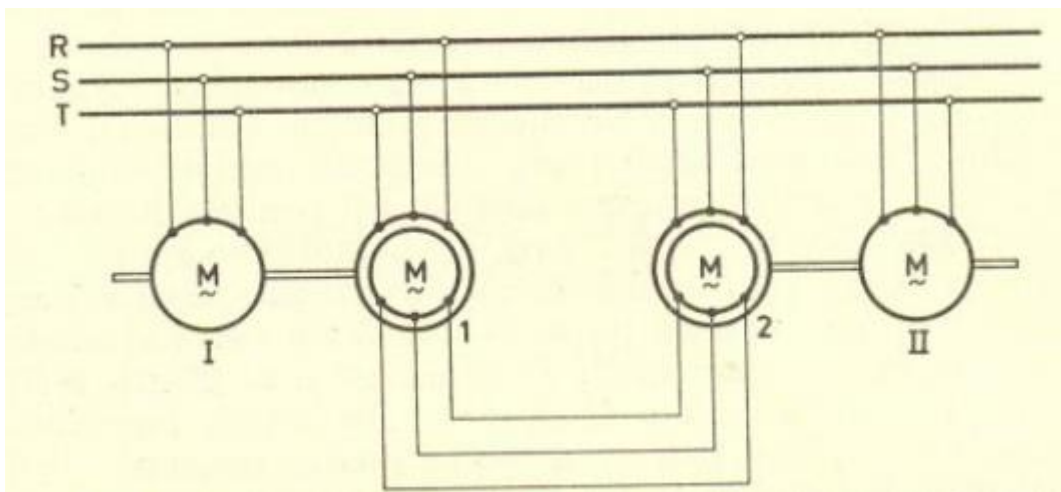
8. ELEKTRIČNE OSOVINE

8.1. Što su električne osovine?

Kod radnih mehanizama koji zahtijevaju sinkroni hod dviju ili više osovina, a da nije moguće osovine mehanički spojiti, mehanički spoj zamjenjuje se električnim osovina. Takva tehnika ima široku primjenu, od dizalica, transportera, tekstilnih strojeva, pokretnih mostova i šire. Ima više izvedbi, s raznim vrstama električnih strojeva, pomoćnih motora i ostalih elemenata. Električna osovina može poslužiti za bilo koju vrstu motora pa čak i one s unutarnjim izgaranjem.

8.2. Električna osovina s pomoćnim asinkronim motorima

Električna osovina s pomoćnim motorima sastoji se od pogonskih asinkronih motora koji su obično kavezni i pomoćnih asinkronih kolutnih motora kojima su rotori električki spojeni. Kavezni motori u principu su jednaki i imaju jednake mehaničke karakteristike.



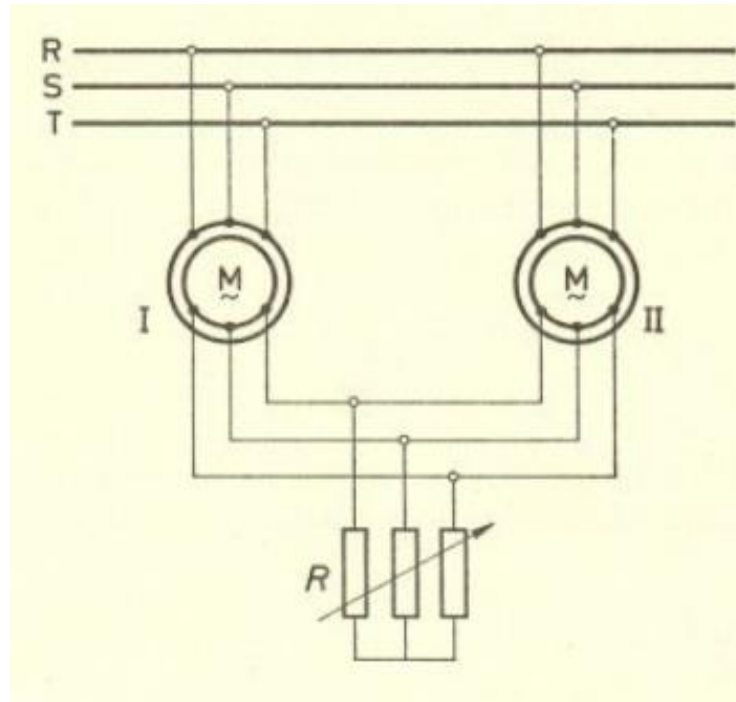
Slika 8.1 Električna osovina s pomoćnim asinkronim strojevima za izjednačenje

Kad su oba motora jednako opterećena, vrte se u obje strane i rotori pomoćnih motora jednakom brzinom vrtnje. Samim time su im i inducirani naponi rotora jednaki. Rotorima pomoćnih motora ne teče nikakva struja i samim time nema momenta izjednačenja. Većim opterećenjem jednog od pogonskih motora dolazi do posljedice da njihovi rotori više nisu u fazi. Samim time i rotori pomoćnih motora ispadaju iz faze, dakle inducirani napon jednog pomoćnog motora prethodi inducirani napon drugog. Tada pomoćni motor koji ima veći moment ubrzava cijelu osovinu i tako pomaže pogonskom motoru da nadoknadi zaostajanje za drugim pogonskim

motorom. Za električne osovine vrijedi da zbroj razvijenih snaga pomoćnih motora uvijek mora biti jednak nuli, što znači da energija kruži u krugu pomoćnih strojeva. Također pomoćni će motori uvijek imati funkciju izjednačavanja, čak i pri trajno različitim opterećenjima pogonskih motora sve dok mogu prenositi snagu koja je potrebna za izjednačavanje. Mogućnost izjednačenja mjeri se razlikom momenata koje pomoćni motori razvijaju. Pošto moment ovisi o klizanju znači da i mogućnost izjednačenja ovisi o klizanju. U praksi se pomoćni motori spoje tako da im je smjer okretanja suprotan smjeru okretnog magnetskog polja. Samim time rade u kočnom režimu uz vrijednost klizanja od 1 do 2. Uz takvo klizanje napon rotora dovoljno je visok da razvije dovoljno velik moment izjednačenja. Pošto su pomoćni motori zatvoreni u vlastiti strujni krug, a veza s pogonskim motorima im je mehanička, to znači da se ovakvim sustavom može izjednačavati brzina vrtnje bilo kakvih motora. Jedini nedostatak ovog sustava je što pomoćni motori ne pridonose snazi pogona, a znatno poskupljuju cijenu pogona i povećavaju težinu.

8.3. Električna osovina s otporom

Izvedba električne osovine s otporom jednostavnija je od izvedbe s pomoćnim motorima. Uvjet za ovu izvedbu je da motori budu potpuno jednaki s jednakim karakteristikama zato što se na sinkronizaciju ne može utjecati iz vana, pa razlike u motorima nisu poželjne. Kada je pomak među rotorima jednak nuli, rotorske struje oba motora potpuno su jednake. Motori su povezani zajedničkim otpornikom kojim teče struja jednaka zbroju rotorskih struja motora. Ta struja izaziva pad napona na otporniku.



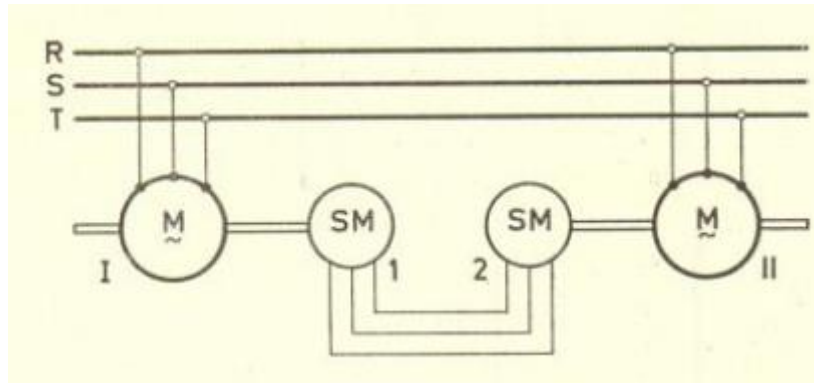
Slika 8.2 Električna osovina asinkronih strojeva sa zajedničkim otporom u rotorskom krugu

Kod različitih opterećenja jedan motor počinje klizati više od drugog, pa mu poraste inducirani napon rotora i naponi više nisu jednaki. Tada se javlja takozvana struja izjednačenja. Ta struja teče samo rotorima, a ne zajedničkim otpornikom. U oba rotora, osim momenta nastalog kao posljedica radne struje, javlja se i dodatni moment koji je posljedica struje izjednačenja. Struje izjednačenja tim dodatnim momentom usporavaju motor s manjim klizanjem i ubrzavaju motor s većim klizanjem. Na taj način brzine vrtnje teže k izjednačenju.

Ovaj spoj pouzdano može održavati električnu osovину samo kod znatnijih klizanja i u pogonima gdje se među motorima ne očekuju veće razlike u opterećenju. Nedostatak spoja su i gubitci na otporu, tako da u usporedbi s osovinom s pomoćnim motorima nema prednosti.

8.4. Električne osovine sa sinkronim pomoćnim strojevima

Električna osovina sa sinkronim pomoćnim strojevima izvodi se na način da se kruto spoje pomoćni sinkroni stroj i glavni pogonski motor. Oba su pomoćna stroja uzbuđena iz istosmjernog izvora.



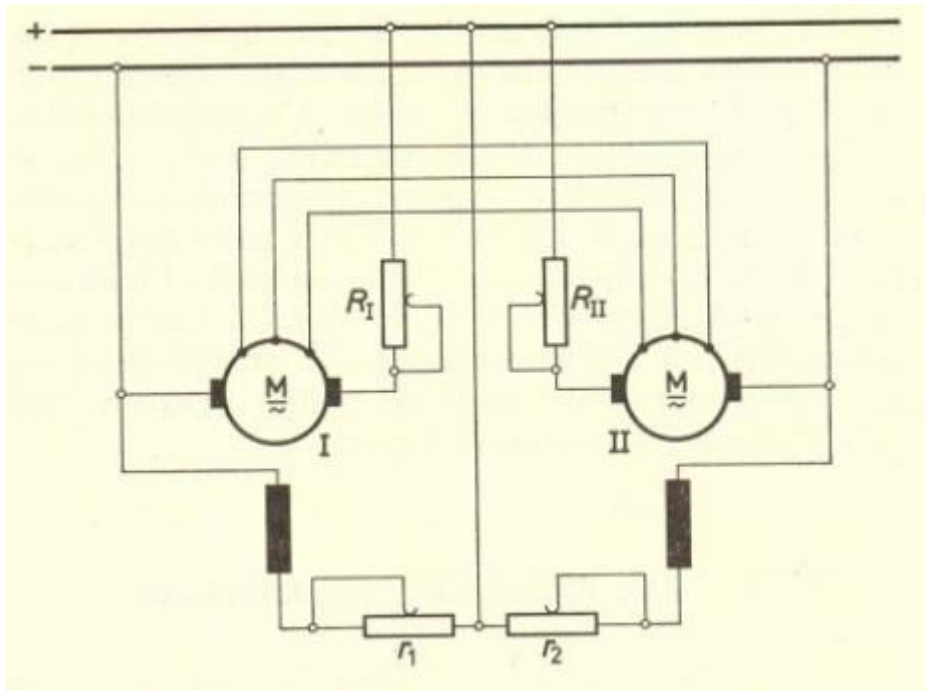
Slika 8.3 Električna osovina sa sinkronim pomoćnim strojevima

Kad je opterećenje jednog pogonskog motora veće od opterećenja drugog pogonskog motora, osovina drugog motora zaostaje za prvom. To stvara pomak u fazi induciranih napona u statorima pomoćnih strojeva. Pojavljuje se struja izjednačenja koju generira pomoćni stroj kojem inducirani napon prethodi u fazi napon drugog pomoćnog stroja. Ta struja šalje se na drugi pomoćni stroj. Time se rasterećena strana optereti generatorskim momentom, a opterećena strana pomogne se motorskim momentom.

Najveća mana ove osovine je što ju je komplicirano dovesti u sinkronizam jer nije u stanju sama sinkrono krenuti. Zbog toga se koristi samo za male snage i pogone s minimalnim teretom.

8.5. Električne osovine s istosmjernim motorima

Iako se sinkronizam električne osovine može postići i istosmjernim strojevima, njihovo sinkronizirajuće djelovanje postiže se tek da se spoje njihovi izmjenični dijelovi. Osnovni uvjet za uspostavu sinkronizma je da se u dva elementa parametri mijenjaju periodički. U izvedbi spoja koja sadrži poredno ili nezavisno uzbuđeni istosmjerni stroj, sinkronizam se ostvaruje izvođenjem kliznih koluta na istim mjestima na dva jednaka motora. Također postoje dvije grupe otpornika. Jedna grupa od dva otpornika služi za podešavanje napona, a druga grupa za podešavanje magnetskog polja. Pomoću njih bi se u teoriji mogao podesiti sinkronizam, no zbog najmanje razlike u otporima, zagrijavanju i sličnih problema, pogon ispada iz sinkronizma. Rješenje za taj problem su izmjenični vodovi izjednačenja koji preko kliznih kolutova djeluju poput pomoćnih sinkronih strojeva. Rasterećeni stroj generira struju i šalje ju u opterećeni stroj.



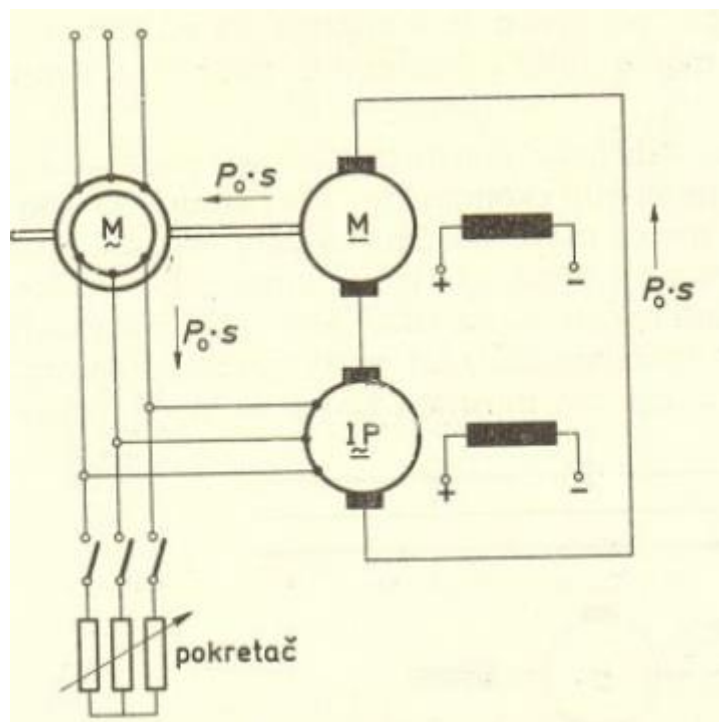
Slika 8.4 Električna osovina s poredno ili nezavisno uzbuđenim istosmjernim motorima

Izmjenični trofazni vodovi izjednačenja koriste se kod transportnih traka u rudnicima. Zbog dužine transportnih traka, često je potrebno koristiti više trofaznih motora postavljenih duž trake. Time se osigurava kontinuiran i efikasan transport materijala. Trofazni vodovi izjednačenja omogućavaju ravnomjerno raspoređivanje opterećenja između motora, što je posebno važno u slučaju da jedan motor preuzme veći dio opterećenja. Dakle trofaznim vodovima izjednačenja omogućava se efikasniji rad sustava jer svaki motor ravnomjerno doprinosi pokretanju trake.

Kod serijski uzbuđenih istosmjernih strojeva, sinkronizam se postići može po istom principu, ali se sličnost karakteristika dobiva napajanjem uzbuđnih i armaturnih namota istom strujom. To znači da su strojevi spojeni u seriju. Kako nebi došlo do kratkog spoja spoj se izvodi uz pomoć transformatora.

9. KASKADNI SPOJEVI ASINKRONIH MOTORA

Postoji mnogo vrsta kaskadnih spojeva koji imaju razne varijacije samih spojeva i pomoćnih strojeva. Najvažniji takav spoj je takozvana Krämerova kaskada ili kaskada konstantne snage. Svrha kaskadnih spojeva je u suštini premostiti neprikladnost asinkronog motora za podešavanje brzine vrtnje u većem opsegu. Električna snaga asinkronih motora u rotoru prelazi u gubitke proporcionalno klizanju. Jedino rješenje prije pojave kaskadnih spojeva bili su trofazni kolektorski strojevi koji su mogli podešavati brzinu vrtnje, ali samo za manje snage. Pri većim snagama kolektor trofaznih izmjeničnih strojeva previše iskri, odnosno prenosi preveliku snagu. Krämer se dosjetio da električnu snagu pretvori u istosmjernu i istosmjernim se motorom vrati na osovinu asinkronog motora i tako postigne podešavanje brzine vrtnje asinkronog motora bez velikih gubitaka u rotoru.

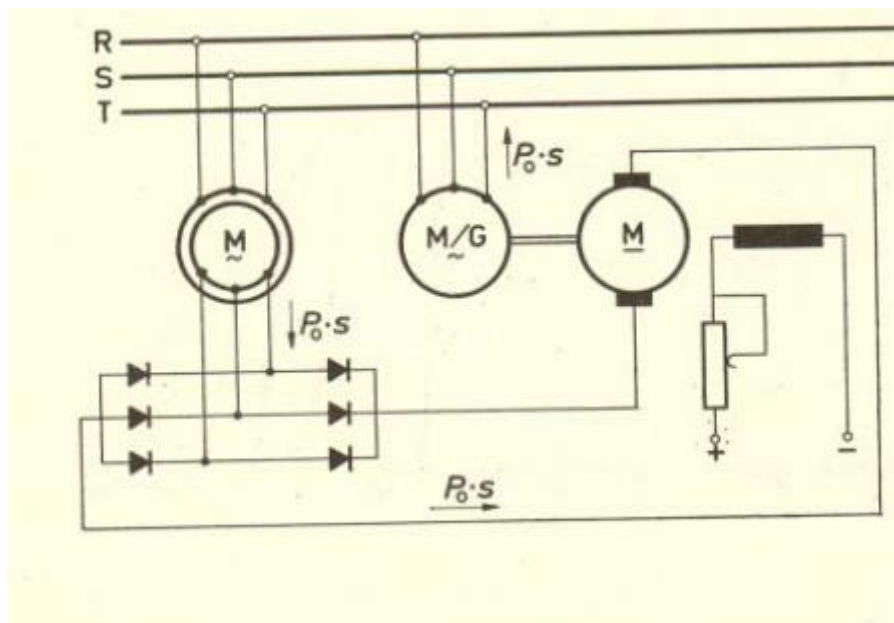


Slika 9.1 Krämerova kaskada

Električna energija rotora privodi se jednoarmaturnom pretvaraču koji je pretvara u istosmjernu i pogoni istosmjerni motor, koji je zatim vraća osovini asinkronog motora. Istosmjerni motor i jednoarmaturni pretvarač uzbuđeni su iz posebnog izvora. Kasnije je jednoarmaturni pretvarač zamijenjen ispravljačima u trofaznom mosnom spoju. Brzina vrtnje podešava se promjenom uzbude istosmjernog motora. Povećanjem uzbude raste i inducirani napon, posljedica čega je pad struje na istosmjernoj strani ispravljača. Tako se smanji i izmjenična struja u rotoru koja

izaziva pad momenta asinkronog motora. Istosmjerni motor i ispravljački sklop dimenzioniraju se prema opsegu podešavanja. Ako je opseg podešavanja veći, potrebni su i veći strojevi.

Za radne mehanizme koji ne trebaju konstantnu snagu ovo rješenje bilo bi neučinkovito. Zato se za takve mehanizme gradi kaskada konstantnog momenta. Razlika u odnosu na Krämerovu kaskadu je što je na osovini istosmjernog motora mehanički spoje asinkroni motor kojeg istosmjerni motor pogoni brzinom vrtnje većom od sinkrone, pa se ponaša kao asinkroni generator i predaje energiju klizanja natrag mreži.



Slika 9.2 Kaskada konstantnog momenta

U principu kaskade služe za sporo upravljanje i podešavanje brzine vrtnje kod elektromotornih pogona većih snaga.

U novije vrijeme razvila se i kaskada konstantnog momenta koja umjesto ispravljača i motor-generatora koristi pretvarač frekvencije. Jedina mana ovog spoja je što ne može samostalno uskladiti vlastiti izlazni napon s mrežom. Zato se na spoj dodaje još i transformator. Prednost u odnosu na spoj sa strojnim pretvaračem je što nema kolektor, moguće je brže upravljanje i korisnost je veća zato što su gubitci u rotoru manji. Nedostatci su što su pretvarači frekvencije skupi i što je opterećenje mreže jalovom strujom nepovoljnije.

10.ZAKLJUČAK

Postoji mnogo vrsta elektromotornih pogona ovisno o vrsti motora. Za svaku vrstu elektromotora postoji više metoda podešavanja opsega brzine vrtnje, regulacije brzine vrtnje ili pokretanja samog elektromotora. Bez tih metoda i spojeva elektromotorni pogoni ne bi bili u upotrebi ni približno koliko se koriste sada. U svakoj industriji postoji nekakav problem koji se može riješiti uz pomoć elektromotornih pogona.

Bez sustava za podešavanje i prilagodbu elektromotornog pogona, neki danas često korišteni strojevi poput električnih auti, dizalica, vuče i sličnog, ne bi uopće bili tehnički izvedivi.

11.LITERATURA

- [1] Berislav Jurković, Elektromotorni pogoni, Sveučilište u Zagrebu, 1978.
- [2] https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/elektromotorni_pogon.pdf
- [3] Prenc, R.: “Električni strojevi”, predavanja
- [4] Bulić, N.: “Elektromotorni pogoni”, predavanja
- [5] https://www.fer.unizg.hr/download/repository/OEMP_P8-9_2019.pdf
- [6] https://www.fer.unizg.hr/download/repository/OEMP_P5-6-7_2019.pdf
- [7] https://www.fer.unizg.hr/download/repository/EMP_2018_2019_Povijest_Pogoni_AM.pdf
- [8] https://www.fer.unizg.hr/download/repository/OEMP_P3-4_2020.pdf

12.SAŽETAK

U radu će se najprije definirati opseg podešavanja brzine vrtnje kao ključni element prilagodbe elektromotornih pogona radnom stroju. Nakon toga navest će se prilagodba pogona istosmjernim motorima uzimajući u obzir njihove različite vrste prema uzbudnom krugu. Potom će se obraditi prilagodba asinkronim motorima, te nakon toga sinkronim motorima. Konačno, opisat će se pokretači rotacijskih električnih strojeva. Navesti će se još nekoliko primjera višemotornih pogona, električnih osovina i kaskadnih spojeva aksinkronih motora.

Ključne riječi: Elektromotorni pogon, brzina vrtnje, upravljanje

The paper will first define the scope of rotation speed adjustment as a key element of the adaptation of electric motor drives to the working machine. After that, the adaptation of drives to DC motors will be indicated, taking into account their different types according to the excitation circuit. Then adaptation to asynchronous motors, and then to synchronous motors, will be processed. Finally, the drivers of rotary electric machines will be described. A few more examples of multi-motor drives, electric shafts and cascade connections of asynchronous motors will be given.

Key words: Electric motor drive, speed of rotation, control