

3. Pogoni s istosmjernim motorima

DC Motor Drives with variable Voltage Control. DC-DC and AC-DC Converters

3.1. Upravljanje s istosmjernim pogonima

Upravljanje pogonom znači rad motora po nazivnoj i po izvedenim mehaničkim karakteristikama, a sadrži: pokretanje, podešavanje brzine vrtnje, reverziranje i kočenje. Izvođenje ovih postupaka je kod istosmjernih motora ovisno o međusobnom povezivanju armaturnog i uzbudnog kruga (nezavisna, poredna, serijska ili kompaundna uzbuda), i o izvedbi uzbude (elektromagnetima ili permanentnim magnetima).

Upravljanje istosmjernim motorom može se izvesti odvojenim ili istovremenim promjenama: napona napajanja, otpora u armaturnom krugu i uzbude. Upravljanje promjenom otpora u armaturnom krugu je neekonomično, jer se gubici uz one u motoru pojavljuju i u otpornicima.

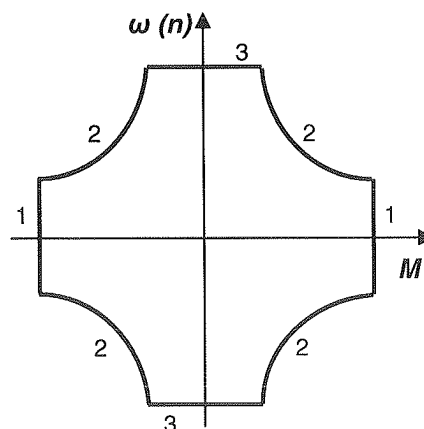
Kako se pri dimenzioniranju motora nastoji postići što veća gustoća magnetskog toka, on već u nazivnom pogonu radi na granici zasićenja. Stoga se upravljanje promjenom uzbude izvodi samo njenim smanjivanjem sve do postizanja najveće dozvoljene brzine vrtnje utvrđene izvedbom komutatora.

Najekonomičnije i najsigurnije upravljanje motorom je promjenom napona napajanja, za što je potrebno imati ekonomični izvor promjenljivog napona. Kod nezavisno uzbuđenih motora se zbog odvojenog napajanja armature i uzbude ovdje govori o upravljanju armaturom i upravljanju poljem (uzbudom), i ta ih mogućnost kvalificira za izvanrednu primjenu u automatiziranim pogonima.

Područja rada istosmjernih strojeva upravljanih promjenom napona imaju u četverokvadrantnom prikazu određena ograničenja.

Područja upravljanja:

- 1 – granice za moment
- 2 – granice za snagu
- 3 – granice za brzinu vrtnje



3.2. Elektronički naponski pretvarači

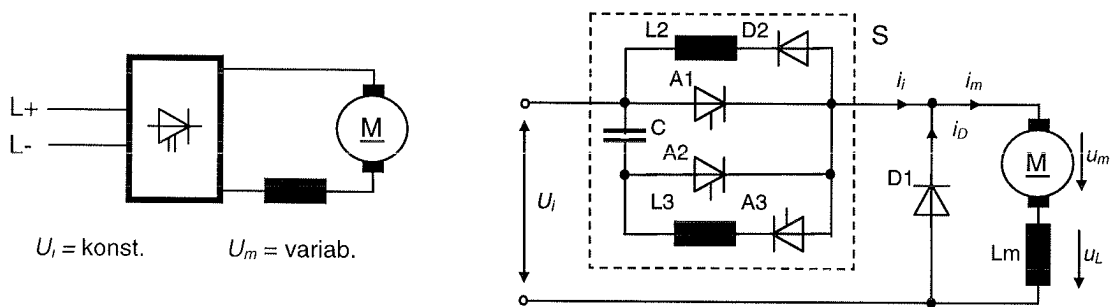
Promjenjivi istosmjerni napon ekonomično se dobiva isključivo spojevima energetske elektronike, a to je i ulaznica za istosmjerne motore u svijet automatizacije. Ti spojevi mogu bit različito izvedeni, a daju se grupirati prema ulaznom naponu. On može biti istosmjerni ili izmjenični, a ovaj drugi opet jednofazni ili trofazni.

Kao osnovni upravljački elektronički element najčešće se koristi tiristor, a za manje snage i tranzistor. Nazivni podaci tiristora dosežu danas do struja propuštanja od preko 1 kA i do zapornih napona od oko 4 kV. Pri tako visokim strujama i naponima javljaju se i veliki gubici, što iziskuje i prisutnost složenog rashladnog sustava.

3.3. Napajanje iz istosmjernog izvora

Ovakvo se napajanje koristi primjerice u pogonu tramvaja ili podzemne željeznice napajanih iz kontaktnog voda, kao i kod pogona elektroautomobila pri napajanju iz akumulatora smještenog u samom vozilu. Kao pogonski motor najčešće se pojavljuje serijsko uzbuđeni.

Elektronički pretvarač se može zamisliti kao kao jedan brzi prekidač s kojim se konstantni napon izvora U_i u vrlo brzom ritmu pulsnom frekvencijom f_c pretvara u slijed pravokutnih blokova (impulsa) i takav privodi pogonskom motoru. Veličina tih blokova određuje visinu izlaznog napona U_m .



Osnovu pretvarača čini elektronički sklop ili postavni član S, sadržaja otprilike kao na gornjoj slici desno. R_m u slici je radni otpor motora, a L_m njegov induktivitet. Oba ovise o načinu spajanja armaturnog i uzбудnih namota motora.

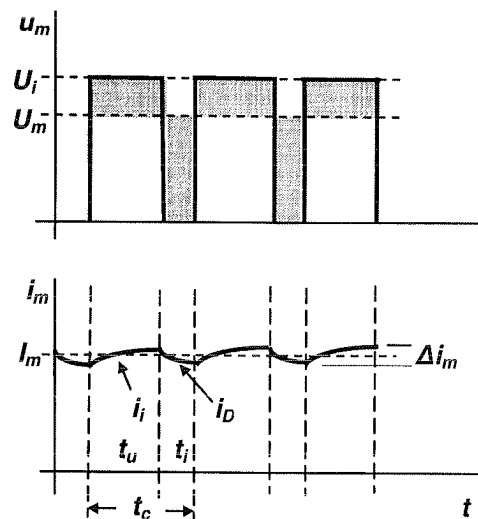
Glavnu ulogu u postavnom članu S ima tiristor A1, dok su ostali elementi pomoćni. On će raditi tako da se iz napona izvora U_i tvore naponski blokovi U_m kao na donjoj slici. Za vrijeme uključanja t_u struja će rasti eksponencijalno, a za vrijeme isključenja t_i ona se neće prekinuti već će teći preko diode D1 i eksponencijalno opadati.

Izlazni napon U_m dobiva se kao srednja vrijednost naponskih impulsa prema izrazu:

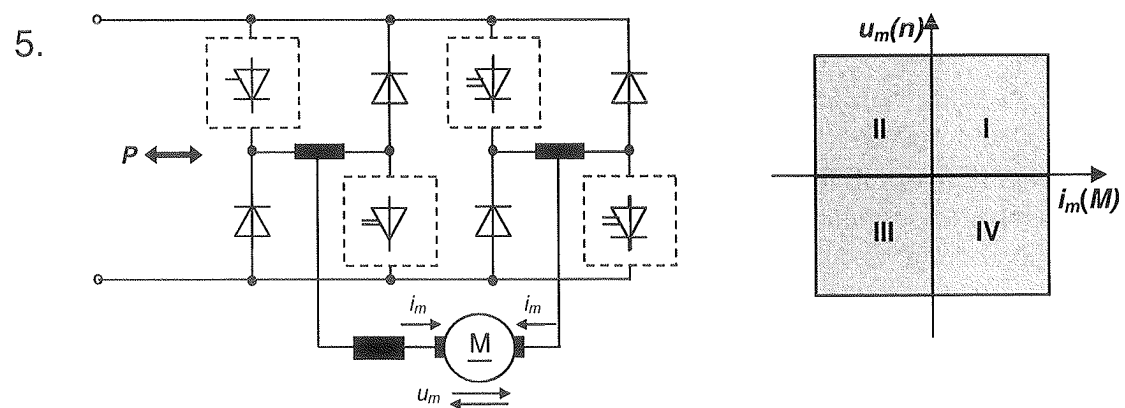
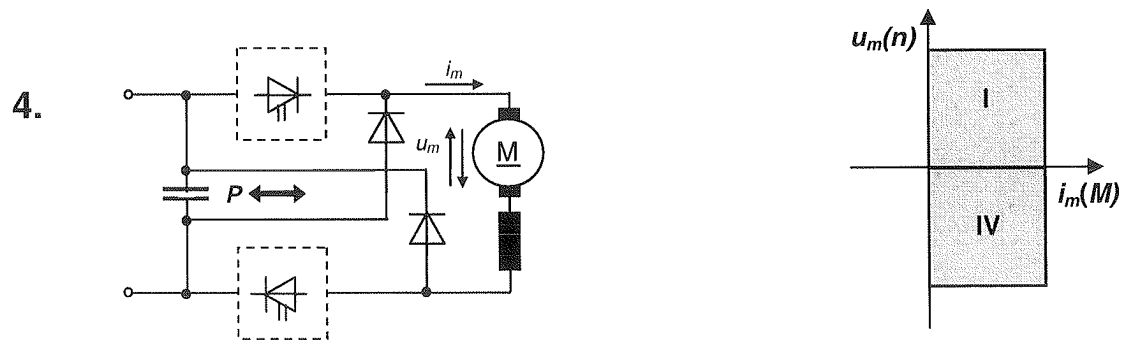
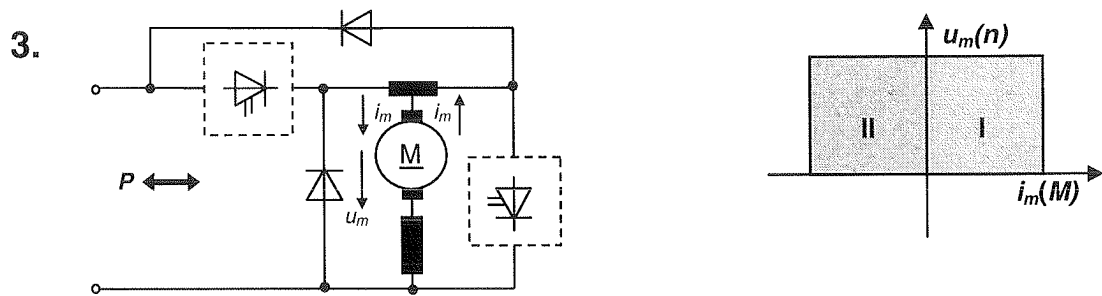
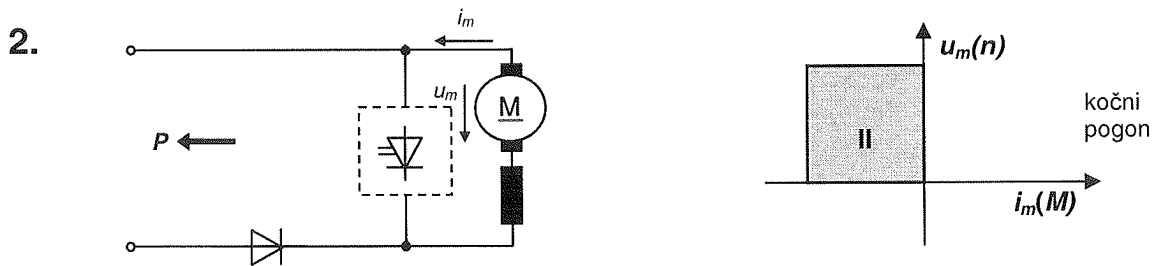
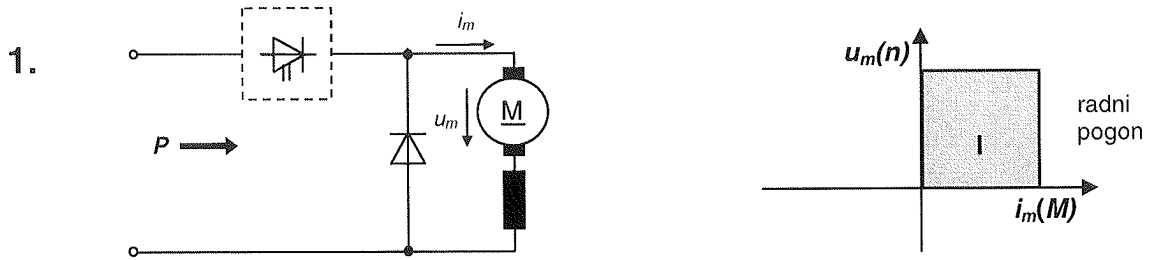
$$U_m = U_i \frac{t_u}{t_c} = U_i \frac{t_u}{t_u + t_i}$$

pa se za $0 \leq t_u \leq t_c$ može kontinuirano mijenjati između nule i U_i .

Kombiniranjem više elektroničkih sklopova S dobiva se složeniji pretvarač koji može omogućiti reverziranje motora i generatorsko kočenje, pri čemu se energije vraća natrag u izvor.



Pogon u sva četiri kvadranta; u_m između 0 i U_i



3.4. Napajanje iz izmjeničnog izvora

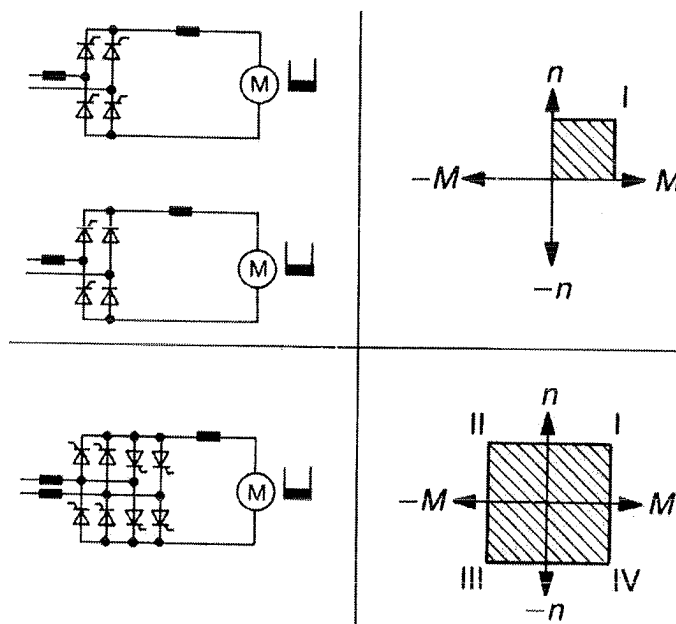
Elektronički pretvarači kojima se iz sinusnog izmjeničnog napona neposredno dobiva promjenjivi istosmjerni, upravljani su sinkrono s frekvencijom mreže i nazivaju se mrežno vođenim pretvaračima.

Dobiveni napon je pulzirajući, a valovitost mu ovisi spoju pretvarača i o upravljivim ventilima u njemu. Na mrežu se priključuje izravno kad je napon mreže podudaran s naponom motora, a ako nije onda se prilagođava preko predspojenog transformatora. Najčešće se koriste u napajanju nezavisno uzbuđenih istosmjernih motora.

a) Jednofazni priključak

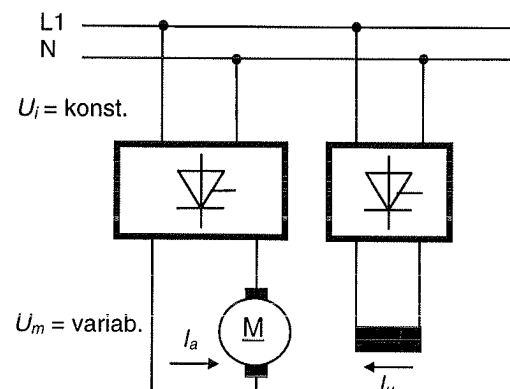
Uobičajeni spojevi pretvarača i područja njihova rada prikazani su u idućoj slici. Prvi je punoupravljivi a drugi poluupravljivi, pa je raspon izlaznog napona kod ovo drugog uži. Oba omogućavaju pogon samo u jednom kvadrantu, no zbog šireg područja upravljanja brzinom vrtnje češće se primjenjuje prvi, s 4 tiristora u tzv. dvopulsno mosnom spoju (B2).

Treći je punoupravljivi spoj s antiparalelno spojenim tiristorima i omogućava rad u sva četiri kvadranta. On također radi dvopulsno, a spoj mu je jedna podvarijanta spoja B2.



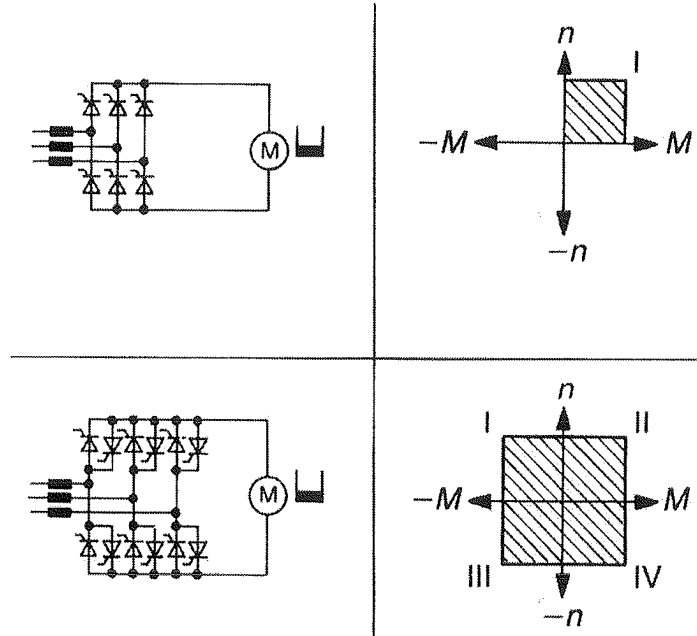
Oznaka dvopulsno kaže koliki je broj periodičkih promjena u ispravljenom naponu za vrijeme trajanja jednog periode ulazne izmjenične struje.

Slika prikazuje jednu široko primjenjenu verziju napajanja nezavisno uzbuđenog motora, gdje jedan pretvarač, s 4 tiristora u spoju B2, upravlja naponom na armaturi (armaturom), a drugi također s 4 tiristora u spoju B2, naponom na uzбудnom namotu (poljem). Predviđen je za dvokvadrantni pogon, a primjenjuje se za motore do oko 5 kW.

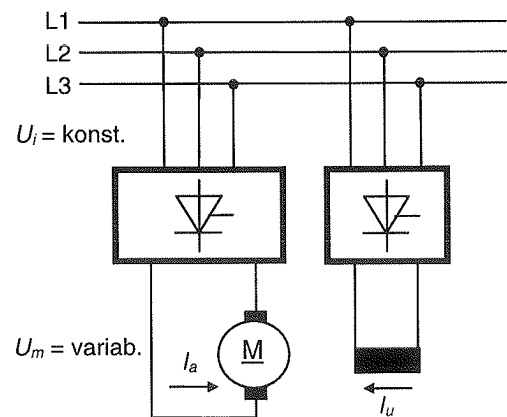


b) Trofazni priključak

Najširu primjenu u automatiziranim postrojenjima ima ovdje punoupravljivi most sa 6 tiristora. On se naziva šesteropulsnim mosnim spojem i označuje s B6. Prvi pretvarač u slici omogućava pogon samo u jednom kvadrantu, a drugi ima antiparalelno spojene tiristore, njih 12, i omogućava pogon u sva četiri kvadranta.



Bočna slika prikazuje jednu široko primjenjenu verziju napajanja nezavisno uzbuđenog motora, s jednim pretvaračem sa 6 tiristora u spoju B6, u upravljanju naponom na armaturi (armaturom), i s drugim, također sa 6 tiristora u spoju B6, u upravljanju naponom na uzбудnom namotu (poljem). Predviđen je za dvokvadrantni pogon, a primjenjuje se za motore do najviših snaga.



3.5. Problemi pri napajanju elektroničkim pretvaračima

Elektronički pretvarači donose sa sobom vrlo ozbiljne probleme. Ne samo da djeluju povratno na napojnu mrežu, nego se odražavaju i na izvedbu i na ponašanje motora.

- Valovitost struje.** Izlazni napon nije čisti istosmjerni i sadrži izmjenične komponente, pa je valovit. Ti harmonici se pribrajaju srednjoj vrednosti izlaznog napona U_m .
- Smanjenje snage motora.** Izmjenične komponente struje u armaturi vode do povišenja gubitaka u bakru armature i smanjuju korisnost.
- Mehaničke oscilacije** koje nastaju zbog ovih valovitosti izazivaju nemirni hod motora, jer je okretni moment motora proporcionalan struji armature i stoga i sam valovit.
- Vrtložne struje.** Valovitost struje armature izaziva promjene u magnetskom toku stroja, pa nastaju dodatne vrtložne struje. Izlaz je u izvedbi motora u cijelosti iz paketa limova.

4. Pogoni s trofaznim motorima

AC Drives with variable Frequency and Voltage Control. AC-AC Converters. Vector Control

4.1. Pogon s asinkronim motorom

Za automatiziranje su podobni samo kavezni. Brzinom vrtnje se kod njih može upravljati prema izrazu:

$$n = n_s(1-s) = \frac{f_1 60}{p}(1-s)$$

- promjenom broja pari polova p , a postiže se složenom izvedbom statorskog namota i time puno skupljom izvedbom,
- promjenom klizanja s , a postiže se promjenom priključenog napona,
- promjenom frekvencije napona napajanja f_1 .

Mijenja li se frekvencija napajanja, asinkronom se motoru mijenja magnetski tok, čime se bitno utječe na njegovu mehaničku karakteristiku. Želi li se to izbjeći mora se uz mijenjanje frekvencije istovremeno mijenjati i visina napona napajanja.

Za prekretni moment važi izraz:

$$M_{prek} \approx k \left(\frac{U_1}{f_1} \right)^2$$

a želi li ga se zadržati konstantnim, pa time zadržati i isti oblik mehaničke karakteristike, onda treba omjer U_1/f_1 ostati stalan.

Tu dalje važi omjer:

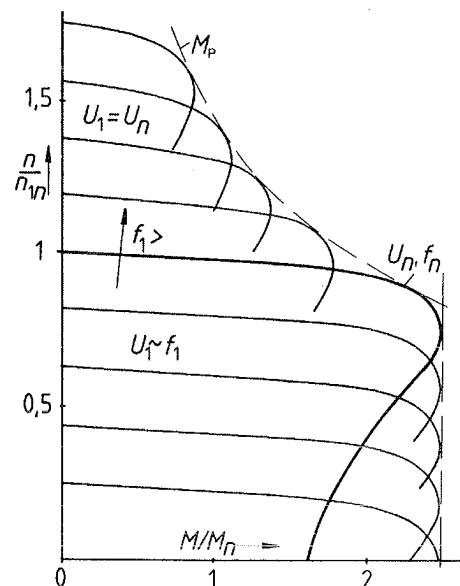
$$\frac{M_{prek}}{M_{prek,n}} = \left(\frac{U_1}{f_1} \right)^2 : \left(\frac{U_n}{f_n} \right)^2 = \left(\frac{U_1}{U_n} \right)^2 \cdot \left(\frac{f_n}{f_1} \right)^2$$

a isto tako i omjer:

$$\frac{n_1}{n_n} = \frac{f_1}{f_n}$$

Istovremena promjena frekvencije i napona izaziva paralelno pomicanje karakteristike $n = f(M)$ uzduž osi brzine vrtnje n . U tom području motor radi s $M_{prek} = \text{konst.}$ i može biti s M_n opterećen.

Pri postizanju nazivnog napona U_n frekvencija se može i dalje povišavati, ali to vodi do slabljenja magnetskog polja i time i do smanjenja okretnog momenta uz istovremeno povećanje brzine vrtnje.



Kritično je područje najnižih frekvencija, a početna frekvencija uvjetovana je relativnom brzinom $n_{rel}=s_n \cdot n_s$, odnosno relativnom frekvencijom f_{rel} , koje u cijelom području rada motora ostaju konstantne.

Kod pokretanja se napon na motoru podiže od jedne početne vrijednosti $U_{poč}$ unutar zadanog vremena sve do nazivnog napona U_n . $U_{poč}$ se izabire tako, da se struja pokretanja zadrži u dopuštenim granicama.

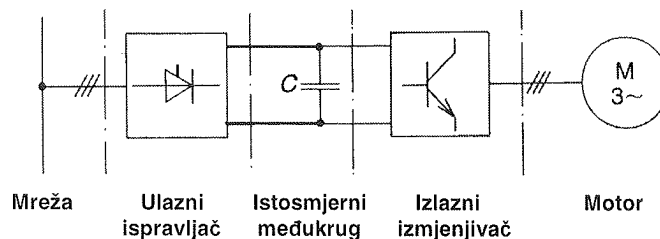
Razlikuju se naponski i frekvencijsko-naponski pretvarači, no rad ovih prvih vezan je uz porast gubitaka, pa se upotrebljavaju samo kod manjih snaga i u automatizaciji nisu našli primjenu. Kod frekvencijsko-naponskih pretvarača pojavljuju se također dvije vrste, onih s istosmjernim međukrugom i onih bez njega. Ovi drugi se nazivaju i direktni.

a) Pretvarači s istosmjernim međukrugom

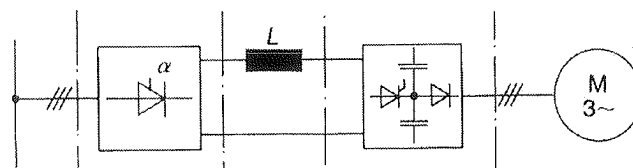
Načelo rada pretvarača s istosmjernim međukrugom je u tome da se najprije mrežni napon ispravi u istosmjerni, a zatim se drugim dijelom pretvarača on pretvara natrag u trofazni izmjenični, ali s drugim iznosom i drugom frekvencijom. Sastoji iz tri cjeline: na ulazu je upravljivi ili neupravljivi ispravljač, zatim istosmjerni međukrug kojeg čini ili jedan kondenzator, ili jedna zavojnica, i na izlazu je izmjenjivač.

Ako međukrug sadrži kondenzator cjelokupni pretvarač se naziva **naponskim**, jer je upravljiva ili postavna veličina napon na motoru a struja se prilagođava opterećenju. Kod neupravljivog ispravljača napon na međukrugu je konstantan, a kod upravljivog je promjenljiv. Kod prvog se i napon i frekvencija podešavaju u izmjenjivaču, a kod drugog se u izmjenjivaču podešava samo frekvencija.

a) S istosmjernim međukrugom napona (naponski)



b) S istosmjernim međukrugom struje (strujni)



Ako međukrug sadrži zavojnicu cjelokupni pretvarač se naziva **strujnim**, jer je upravljiva veličina struja. Ona se ovisno o okretnom momentu opterećenja motora podešava u ulaznom ispravljaču. Podatak o veličini okretnog momenta mora biti dostupan ispravljaču. Napon na motoru se sam prilagođava opterećenju motora. Ulazni ispravljač je ovdje uvijek upravljiv, a frekvencija se podešava u izlaznom izmjenjivaču.

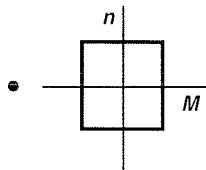
Istosmjerni međukrug izveden je tako da daje jalovu snagu potrebnu za izgradnju rotacijskog magnetskog polja asinkronog motora. Istosmjerna komponenta valovite struje u međukrugu daje motoru potrebnu radnu a izmjenična jalovu snagu.

Takav pretvarač može raditi u I. i III. kvadrantu uz uvjet da se na izlazu izmjenjivača da promijeniti redoslijed faza. Rad u sva četiri kvadranta moguć je onda, ako je ulazni ispravljač izveden s dodatnim upravljanjem tako da energiju može vraćati u mrežu, ili ako se na međukrug priključi otpornik za kočenje. On se najčešće priključuje preko jednog dodatnog čopera.

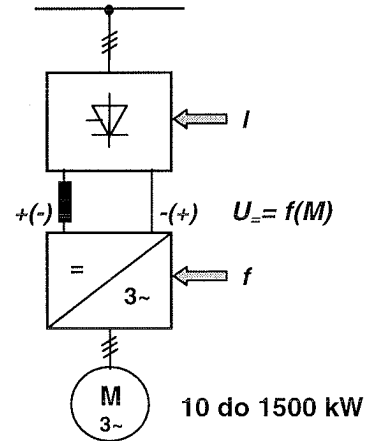
b) Značajke pretvarača s istosmjernim međukrugom; $f_{izlaza} \approx 0$ do 100 (200) Hz

1. Strujni pretvarač

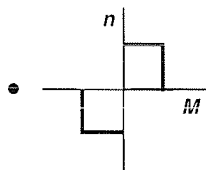
- promjena polariteta napona međukruga



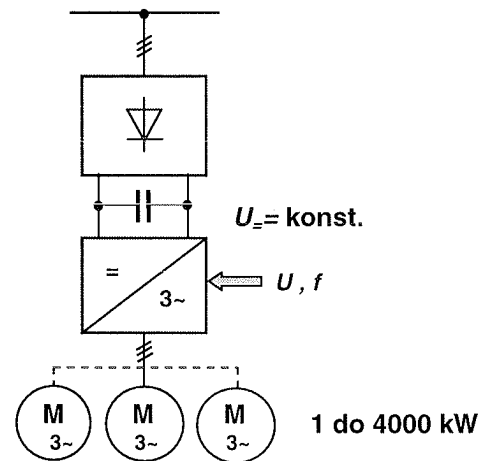
- pojedinačni pogoni
- visoki potezni moment



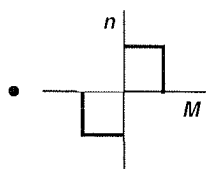
2. Naponski pretvarač s $U_ = konst.$



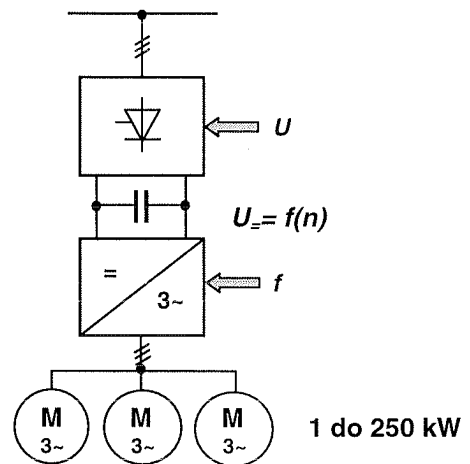
- kočenje uz dodatni R priključen na istosmjerni međukrug
- pojedinačni i grupni pogoni
- pogodan za udarna opterećenja



3. Naponski pretvarač s $U_ = promjenjiv$



- grupni pogoni, napr. tekstilni strojevi, bageri, dizalice



c) **Direktni pretvarač (pretvarač bez istosmjernog međukruga)**

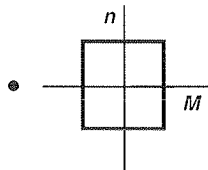
Načelo rada ovog pretvarača sastoji se u tome da se sustavom tiristora upravlja tako da se iz trofaznog napona mreže, na izlazu pretvarača dobiva izmjenični sustav promjenjivog napona i frekvencije direktno, dakle bez prisutnosti istosmjernog međukruga.

Direktni pretvarač sadrži tri tiristorske grupe, a svaka od njih povezuje sve tri ulazne faze s jednom izlaznom. Isto tako se svaka od njih napaja preko jednog trofaznog transformatora. Sve tri grupe sadrže slogove antiparalelno spojenih tiristora u svakoj fazi sekundara svih triju transformatora. Na taj je način svaka izlazna fazna grupa sposobna voditi struju i u jednom i u drugom smjeru.

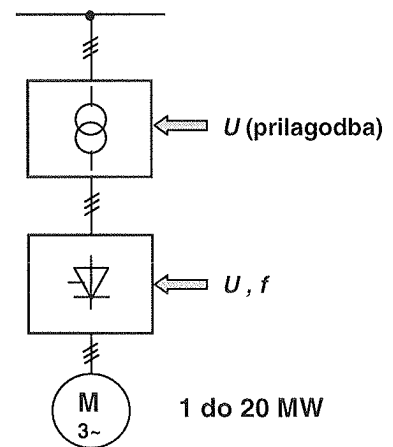
Visina izlaznog napona može se upravljati kutom paljenja pojedinih tiristora. Takav pretvarač prikladan je za pogone promjenjive brzine vrtnje ali samo pri nižim frekvencijama napajanja. Prednost prema onom s istosmjernim međukrugom je u tome da direktni pretvarač svu potrebnu jalovu snagu uzima iz primarne mreže, što kod onog s istosmjernim međukrugom nije moguće.

d) **Značajke direktnog pretvarača; $f_{izlaza} \approx 0$ do 25 Hz**

- $f_{izlaza} \approx 0$ do 25 Hz



- pojedinačni i sporohodni pogoni, napr. mlinovi u cementarama, valjaonički stanovi



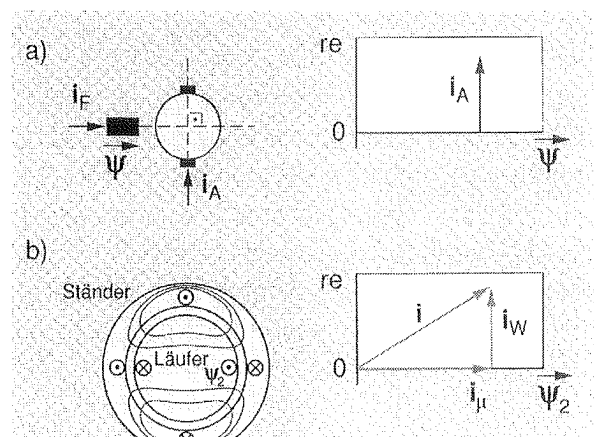
Zbog valovitosti struje motori, napajani preko obje vrste pretvarača, moraju biti predimenzionirani za oko 10 do 15%.

e) **Vektorska regulacija**

Kod vrlo dinamičkih pogona, regulacija okretnog momenta pomoću omjera U/f (skalarna regulacija), nije dovoljno brza, pa ju je zamijenila vektorska.

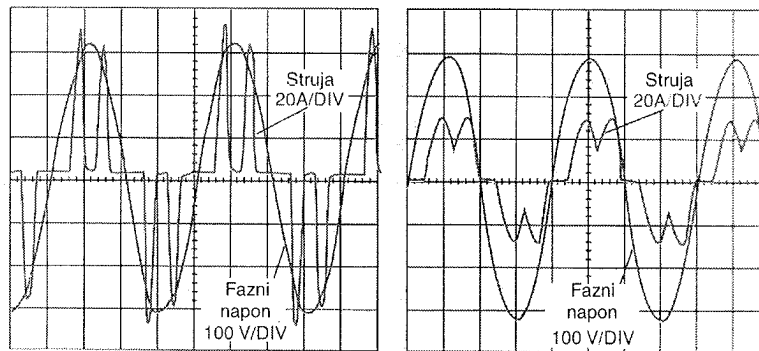
Vektorska regulacija počiva na već ranije poznatoj regulaciji okretnog momenta istosmjernog motora preko njegovog uzbudnog magnetskog toka, a izvodi se odvojenim regulacijama toka i momenta.

Postoje različite izvedbe ove regulacije, a ovise o izabranom referentnom koordinatnom sustavu i o primjenjenom matematičkom modelu motora.



Dok kod nezavisno uzbuđenog istosmjernog motora struja uzbuđene i_F stvara ulančeni tok Ψ (slika a gore), dotle se kod asinkronog motora iz izmjerenih napona i struje statora određuju iznosi i faze struje statora i i magnetskog toka rotora Ψ_2 , a iz njih jalova i_μ i radna i_w komponenta struje statora. Dvama regulacijskim petljama utječe se preko i_μ na magnetski tok Ψ_2 a preko i_w na okretni moment (slika b).

Donja slika prikazuje kako se prigušnicama spojenim ispred frekvencijko-naponskog pretvarača mogu smanjiti viši harmonici kojima pretvarači opterećuju napojnu mrežu. Lijevo struja bez i desno s prigušnicom.



4.2. Pogon sa sinkronim motorom

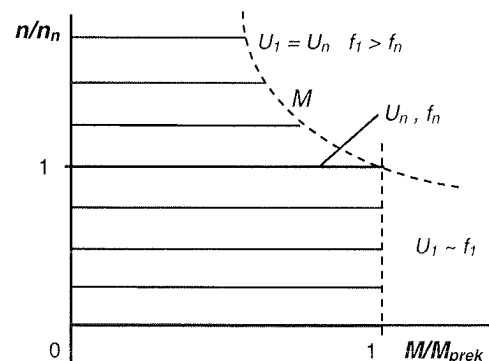
Sinkroni motor ima konstantnu brzinu vrtnje neovisno o teretu, pa je njegova mehanička karakteristika pravac. Brzina vrtnje određena je brojem pari polova i frekvencijom napajanja, a ne momentom tereta. Tek kad okretni moment premaši određenu granicu M_{max} motor naglo ispada iz sinkronizma.

Na prvi pogled čini se da ne postoje razlozi za primjenu sinkronog stroja kao motora, jer mnogim zahtjevima pogona bolje udovoljava asinkroni motor. No, nije uvijek baš tako. Prvo, sinkroni motor troši manje jalove snage od asinkronog, jer se kod njega rotorske veličine ne induciraju magnetskim poljem statora. Znači ukupna privedena snaga je kod njega manja uz istu izlaznu snagu na osovini. Drugo, njegov faktor snage $\cos \varphi$ je jednako povoljan za sva opterećenja i nije ovisan o opterećenju kao što je to kod asinkronog motora.

Za podešavanje brzine vrtnje mjerodavan je izraz:

$$n = \frac{60 f_1}{p}$$

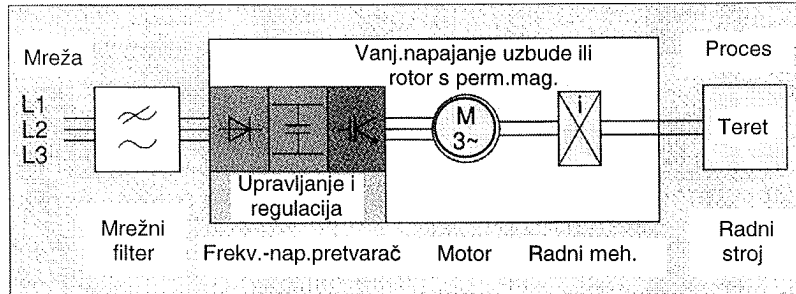
iz kojeg slijedi da se brzinom vrtnje da upravljati ili brojem pari polova p ili frekvencijom f_1 . Za primjenu u automatizaciji dolazi u obzir ovo drugo. No, kako je okretni moment ovisan o visini napona napajanja, to se i ovdje slično kao kod asinkronog motora uz promijenu frekvencije mora mijenjati i visina napona napajanja.



I ovdje je u načelu moguća primjena svih onih metoda podešavanja frekvencije i napona koje se susreću kod asinkronih motora, no posebno je pogodna primjena pretvarača frekvencije bez

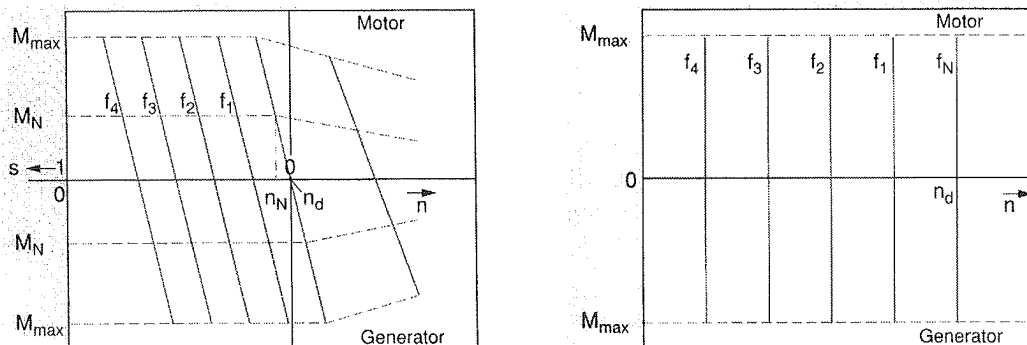
istosmjernog međukruga. On je u izvedbi jednostavniji, jer ne mora prenositi jalovu snagu stoga što se rotorski namot napaja iz drugog izvora energije. Za podešavanje brzine vrtnje tu dakle važi da je $U_1/f_1 = \text{konst.}$

Frekvencijsko-naponski pretvarač ima istu strukturu kao i kod asinkronog motora.



4.3. Usporedni prikaz pogona asinkronim i sinkronim motorom

Karakteristike $M = f(n)$ asinkronog i sinkronog motora za razne napone i frekvencije napajanja prikazane su i u motorskom i generatorskom području.



Područje rada asinkronog motora ograničeno je naponom za koji je motor dimenzioniran, pa se daljnjim povećavanjem frekvencije napajanja, uz zadržavanje nazivnog napona konstantnim, dolazi do graničnih linija u sva četiri kvadranta. S druge pak strane sinkroni motor ima suženo područje rada ograničeno nazivnom frekvencijom i time nazivnom brzinom vrtnje, pri kojoj je još u stanju razviti M_{max} .

