

ELEKTROMOTORNI POGONI S IZMJENIČNIM MOTORIMA

Modul: Elektroenergetika

Predavanja: Prof. dr. sc. Damir Žarko

Izv. prof. dr. sc. Igor Erceg

Laboratorij: Dora Penić, mag. Ing.

Motori izmjenične struje

- Za elektromotorne pogone s izmjeničnim motorima koristimo:
 - **asinkrone motore,**
 - **sinkrone motore (s klasičnom uzbuđom ili stalnim magnetima),**
 - **bez kolektorske elektronički komutirane motore,**
 - **izmjenične kolektorske (komutatorske) motore.**
- Najšira je primjena **asinkronih motora.**
- **Izmjenični kolektorski** se koriste u starijim postrojenjima (Schrage motor i u nekim vučnim postrojenjima) te masovno u obliku univerzalnog motora male snage.

STATIČKA STANJA ELEKTROMOTORNOG POGONA S ASINKRONIM STROJEVIMA

Asinkroni motori za elektromotorne pogone

- Asinkroni motori za EMP se prema konstrukcijama rotora dijele na:
 - kavezne asinkroni motore,
 - kolutne asinkroni motore i
 - motore s masivnim rotorom.
 - Izbor za konkretni EMP ovisi o:
 - mogućnostima izvora (mreže),
 - zahtjevima pogona (način pokretanja, regulacija brzine vrtnje, ...)
 - mjestu ugradnje*,
 - nabavnoj cijeni,
 - mogućnostima i troškovima održavanja.
- * Za pogone u **eksplozijom ugroženim prostorima** treba birati motore koji u normalnim okolnostima ne stvaraju iskru i ne zagrijevaju se preko dozvoljene granice!

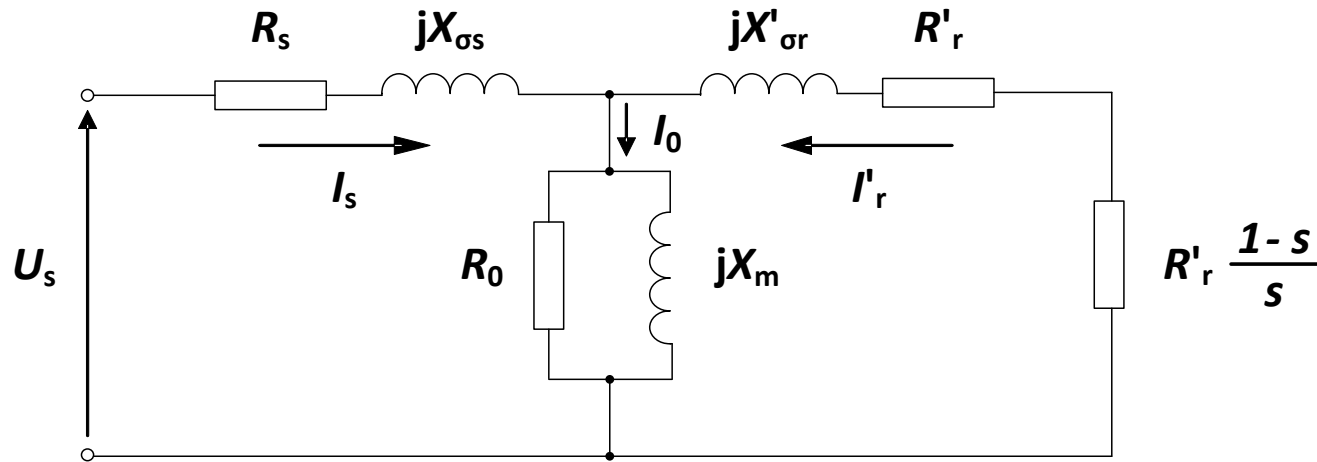
Statička stanja pogona s trofaznim asinkronim motorom

- Zbivanja u motoru se analiziraju:
 - nadomjesnom shemom,
 - analitičkim proračunima
 - ili ugrubo kružnim dijagramom.

- Od posebnog je interesa mehanička (vanjska) karakteristika motora $n = f(M)$, koja treba biti prilagođena zahtjevima pogonjenog stroja, tj. tehnologije procesa.

Računamo je iz dobro poznate električne nadomjesne sheme (modela).

Nadomjesna shema trofaznog asinkronog motora za stacionarno stanje



- Izraz za razvijeni elektromagnetski moment:

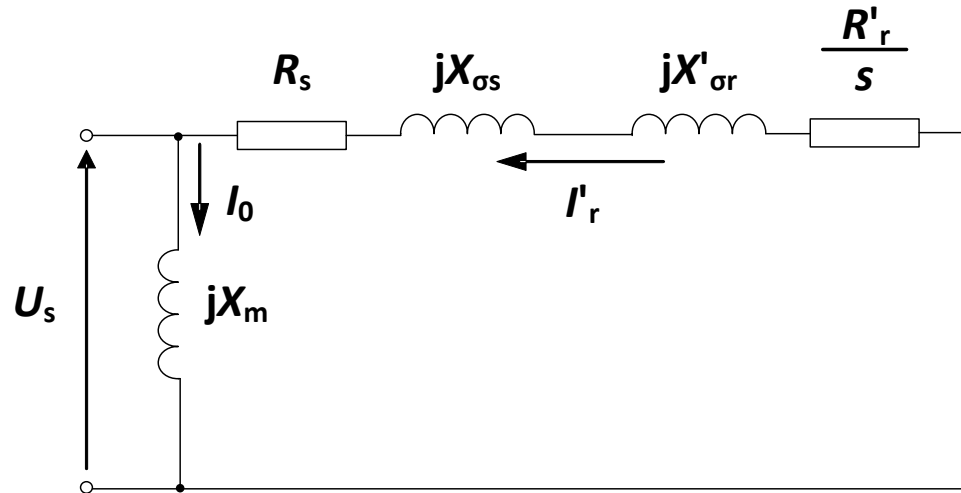
$$M = \frac{m_s U_s^2 R'_r}{\omega_{sm} s \left[\left(R_s + \sigma_s \frac{R'_r}{s} \right)^2 + \left(X_{os} + \sigma_s X'_{or} \right)^2 \right]}, \text{ Nm}$$

- faktor rasipanja: $\sigma_s = \frac{X_{os} + X_m}{X_m}$, (m_s je broj faza statora)

- klizanje: $s = \frac{n_s - n}{n_s}$

n_s je brzina vrtnje okretnog mag. polja, n je brzina vrtnje rotora, a ω_{sm} je mehanička kutna brzina okretnog mag. polja

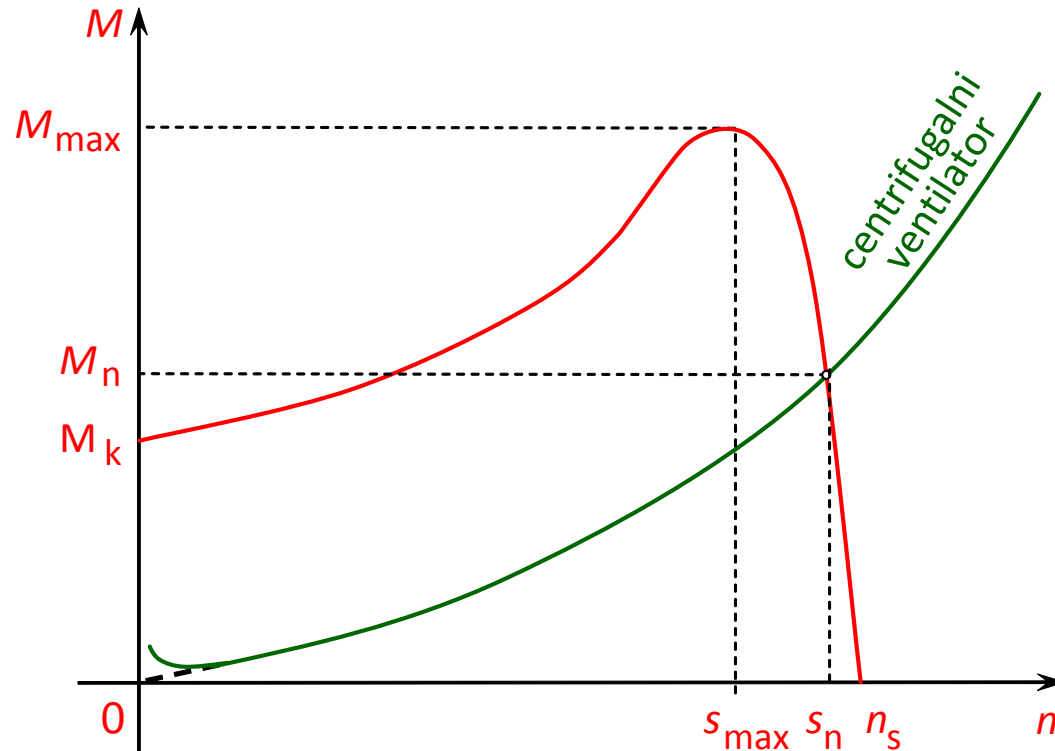
Pojednostavljena nadomjesna shema asinkronog motora za stacionarno stanje



$$I'_r = \frac{U_s}{\sqrt{\left(R_s + \frac{R'_r}{s}\right)^2 + (X_{os} + X'_{or})^2}} \text{ , A}$$

$$M = \frac{m_s U_s^2 R'_r}{\omega_{sm} s \left[\left(R_s + \frac{R'_r}{s}\right)^2 + (X_{os} + X'_{or})^2 \right]} \text{ , Nm}$$

Tipični oblici momentne karakteristike asinkronog motora i centrifugalnog ventilatora u I. kvadrantu



Ključne točke na momentnoj karakteristici asinkronog motora:

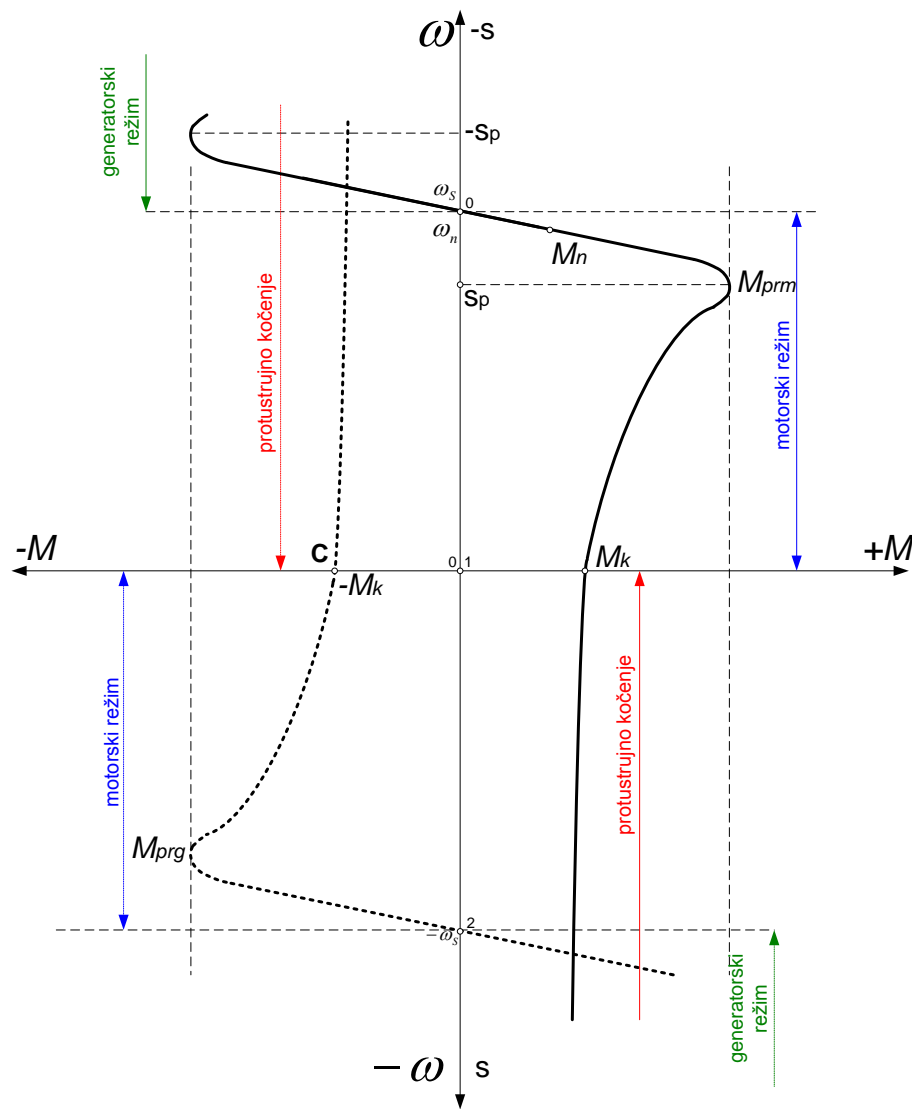
s_n – nazivno klizanje u granicama 0,5 – 8 %

s_{\max} – klizanje za maks. moment u granicama od 5 - 25%

M_{\max} – maksimalni ili prekretni moment \rightarrow obično $(1,8 - 2,8)M_n$

M_k – moment pokretanja \rightarrow obično $(0,6 - 1,5) M_n$

Prikaz momentne karakteristike asinkronog motora u sva četiri kvadranta



Klossove formule za asinkroni motor

- Vanjska karakteristika motora $n = f(M)$ se može prikazati analitički **Klossovim formulama**, pojednostavljenom i točnijom. Pojednostavljena je:

$$\frac{M}{M_{\max}} = \frac{2}{\frac{s}{s_{\max}} + \frac{s_{\max}}{s}}$$

- Pojednostavljena se koristi za grube proračune kada nema više podataka o motoru.
- Ako ima više podataka koristimo točniju formulu.

Točnija Klossova formula

$$\frac{M}{M_{\max}} = \frac{2 + \beta}{\frac{s}{s_{\max}} + \frac{s_{\max}}{s} + \beta}$$

$$\beta = \frac{2R_s}{\sqrt{R_s' + (X_{os} + \sigma_s X'_{or})}}$$

$$\sigma_s = \frac{X_{os} + X_m}{X_m}$$

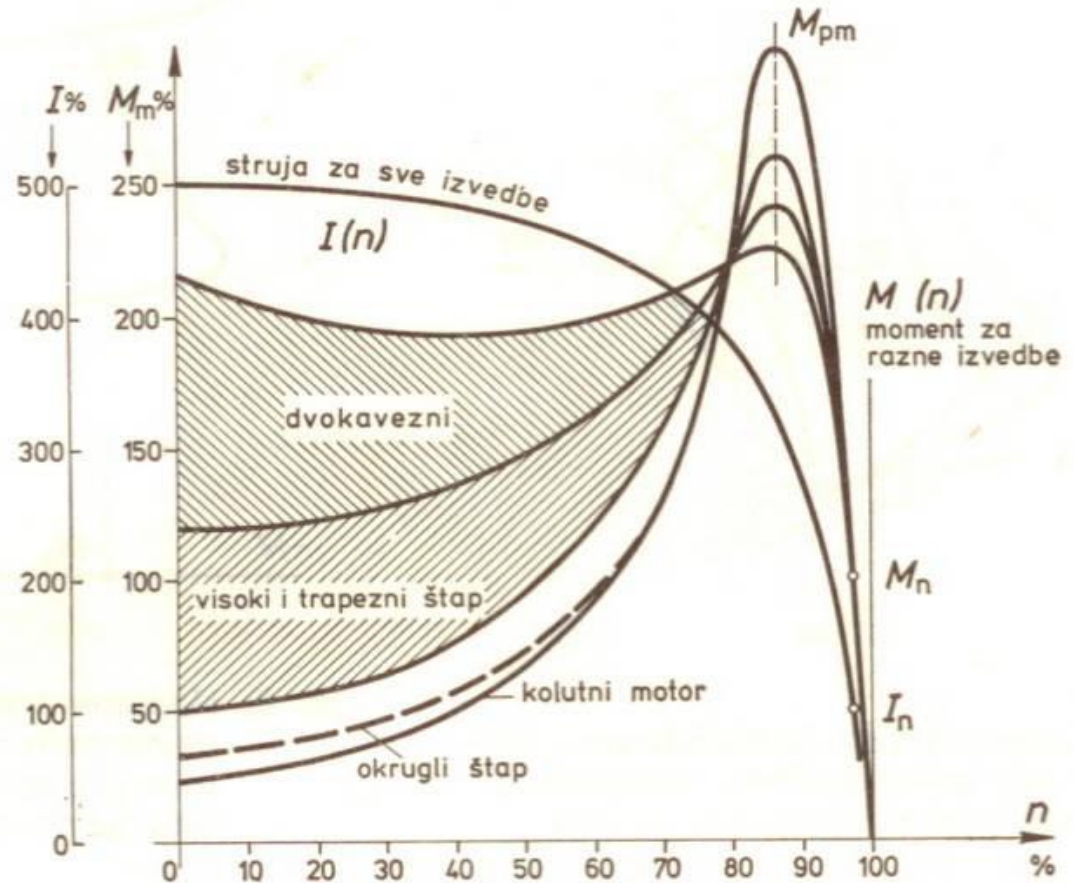
$$s_{\max} = \pm \frac{\sigma_s R_r'}{\sqrt{R_s^2 + (X_{os} + \sigma_s X'_{or})^2}}$$

- Obično je koeficijent rasipanja:

$\sigma_s = 1,01 - 1,06$ što ovisi o veličini motora; manja je vrijednost za veće motore.

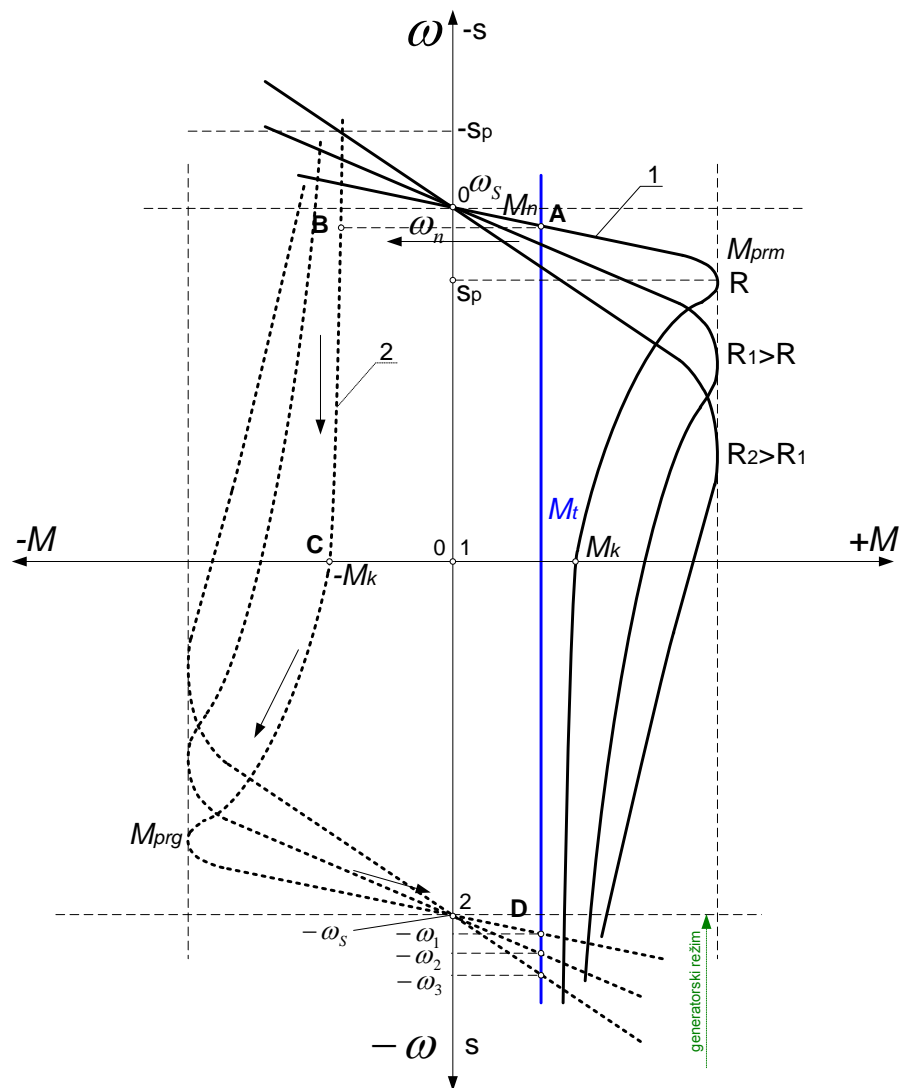
Različiti oblici momentne karakteristike asinkronih trofaznih motora – ovisnost o obliku utora rotora

Obično je zadan omjer struje kratkog spoja i nazivne, a potrebni momenti se mogu dobivati izborom geometrijskog oblika rotorskog utora:



Momentna karakteristika trofaznog asinkronog kolutnog motora u sva četiri kvadranta, podešavanje otporom u rotorskom krugu

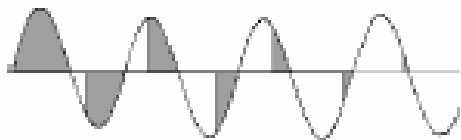
- Promjenom otpora u rotoru mijenja se nagib momentne karakteristike, a time i brzina vrtnje.



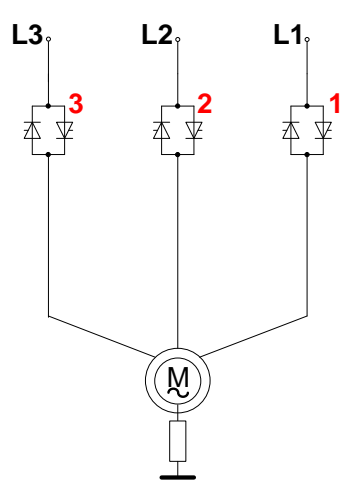
Primjer industrijskog rješenja za upravljanje pogonom s kolutnim asinkronim motorom

ABB Astat sustav za upravljanje kranjskim pogonima

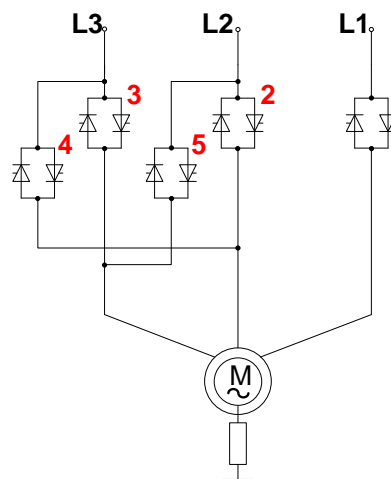
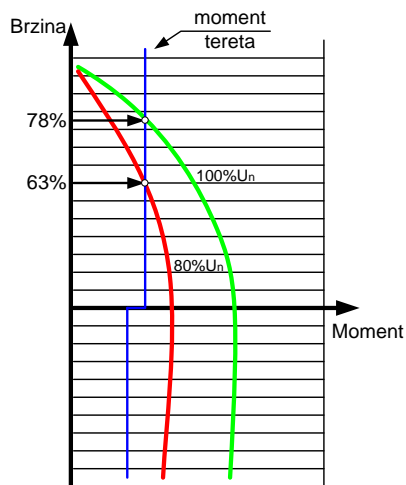
- tiristorski izmjenični pretvarač
- mogućnost promjene brzine vrtnje variranjem napona motora



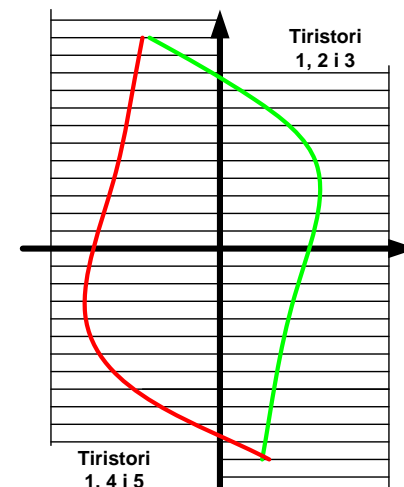
- mogućnost podešenja radne točke promjenom otpora rotora u maks. 5 stupnjeva

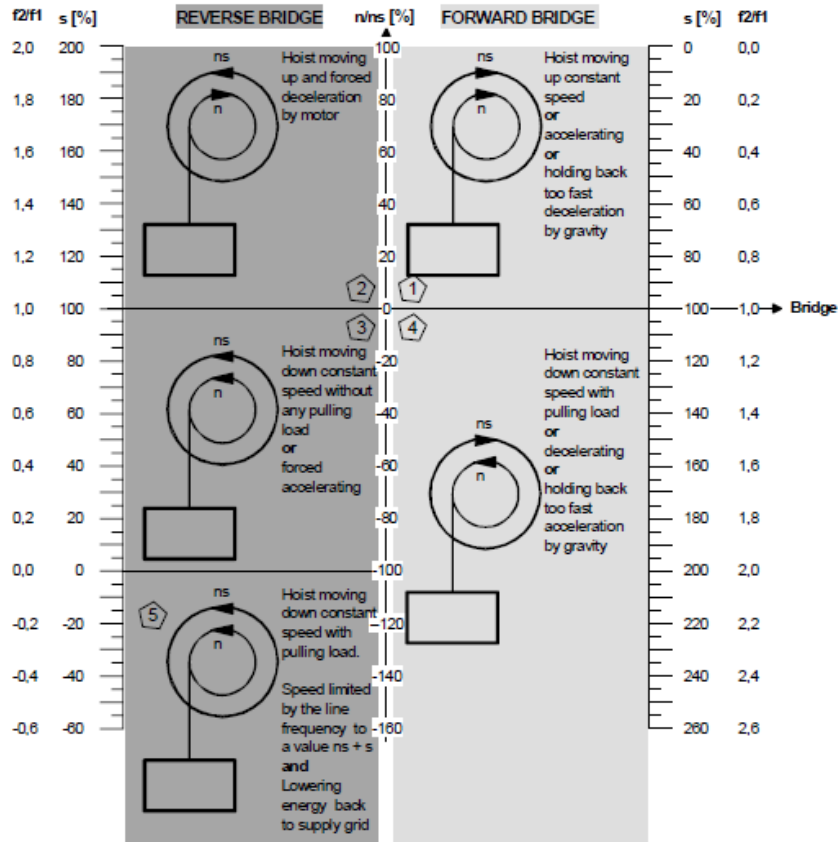


Izvedba za dvokvadrantni režim



Izvedba za četverokvadrantni režim



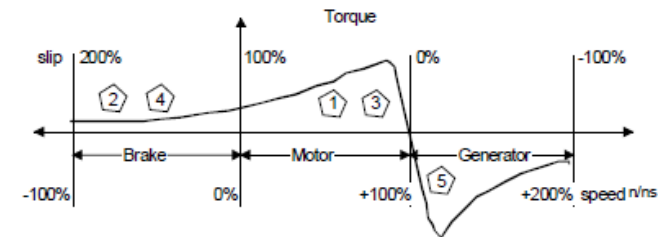


f_2/f_1The fundamental rotor frequency expressed as a multiple of the line frequency.
Value 1,0 means 50 or 60 Hz. A negative value means the direction of rotor voltage is opposite to the stator voltage.

s [%].....slip, difference in percent between the actual speed of the motor and the synchronous speed.

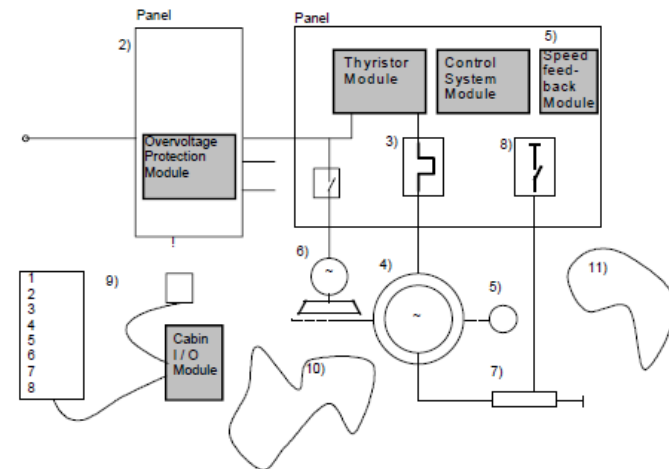
n/ns [%]..... n = Speed in percent of the motor rated speed. n = the synchronous speed of the machine.

①.....Reference mark for Torque-speed diagram



Principna shema pogona s ASTAT pretvaračem

- | | | |
|---------------------|---|----------------------|
| 1) ASTAT components | 2) Power and Control voltage distribution | 3) Motor cable relay |
| 4) Motor | 5) Speed feedback device (alternatives) | 6) Brake |
| 7) Resistor | 8) Rotor contactor | 9) Driver's console |
| 10) Cables | 11) Limit switches, Overspeed monitor, Overload monitor | |



Pokretanje pogona s asinkronim motorima

- Posebno razmatramo probleme pokretanja **pogona s kaveznim i pogona s kliznokolutnim motorima.**
- **Kolutni motori**
 - To su motori s namotom na rotoru i kliznim kolutima
Pokreću se uvijek preko pokretača-otpornika u rotorskom krugu kojim se podešava struja zaleta i moment zaleta tako da se štiti mreža i motor i da se zadovolji tehnologija procesa.

- **Kavezni motori**

Pokreću se:

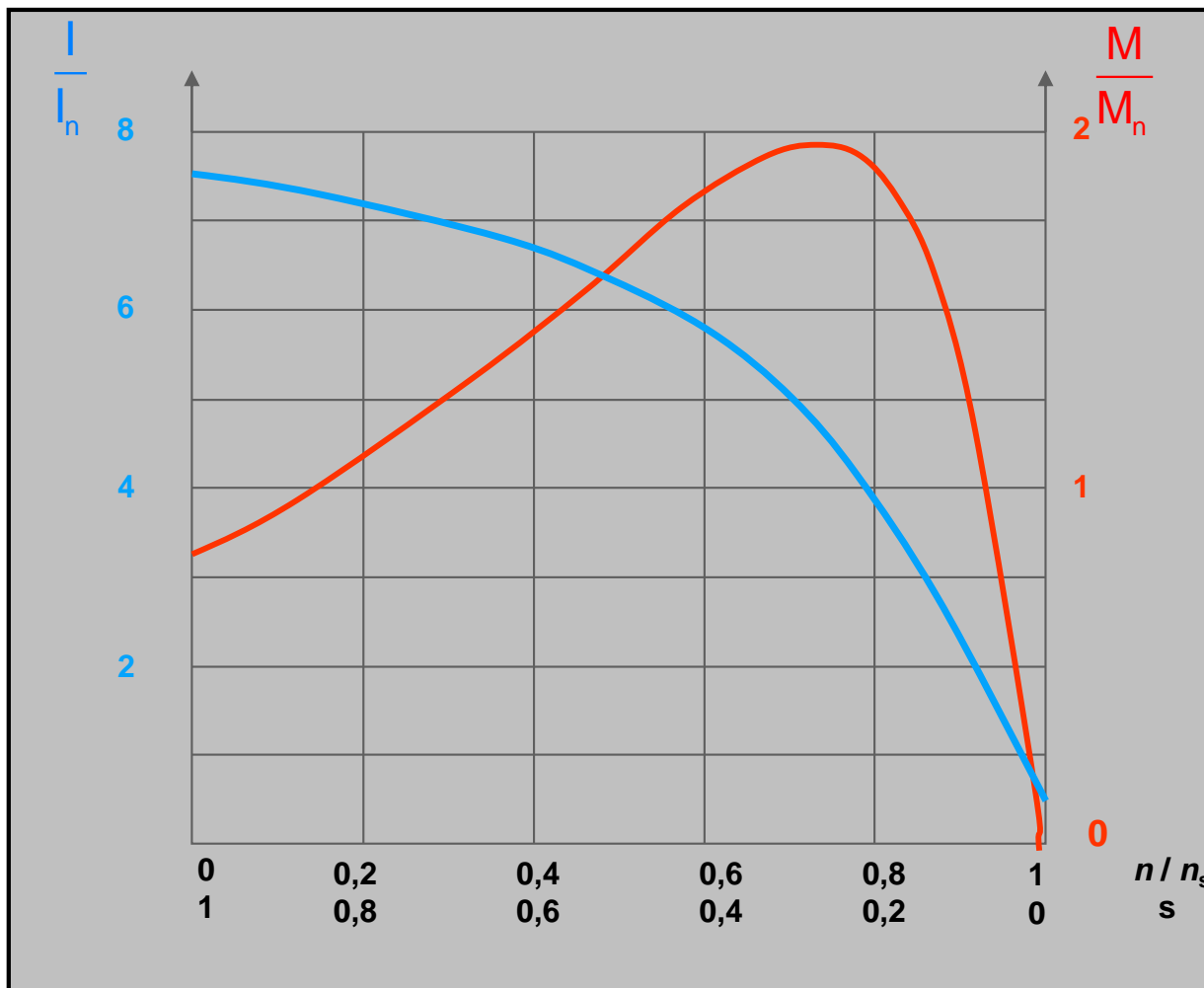
- Direktno pokretanje na mrežu, ako to dozvoljava mreža (struje pokretanja i dozvoljeni padovi napona u mreži) i stanje mehanizama pogona.
- Pokretanje zvijezda- trokut preklopkom kod motora niskog napona.
- Pokretanje elektroničkim " soft start" uređajima.

Kod primjene frekvencijskog pretvarača za regulaciju brzine vrtnje istovremeno je riješen i problem struja pokretanja.

Veliki asinkroni motori (motori snage iznad 2 MW) pokreću se slično kao i veliki sinkroni motori (vidi sinkroni motori: pomoću autotransformatora, soft start uređaja, prigušnice, dva namota,)

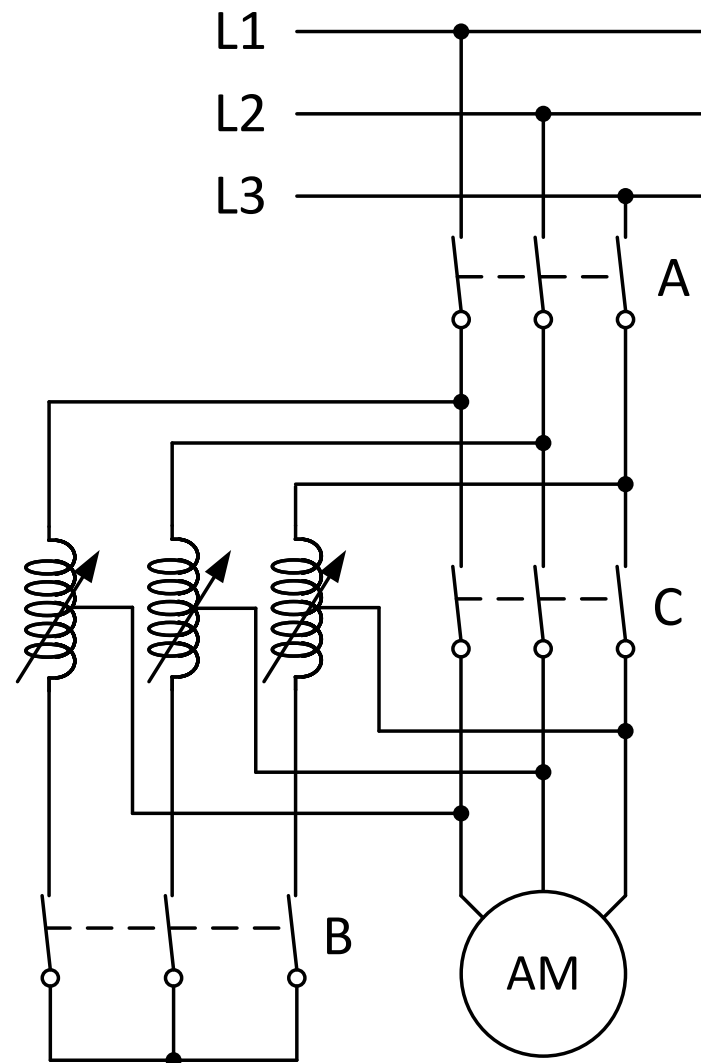
Moment i struja u zaletu asinkronog motora

- Problem velikih struja tijekom pokretanja-omjer I/I_n



Pokretanje asinkronog motora velike snage primjenom auto transformatora

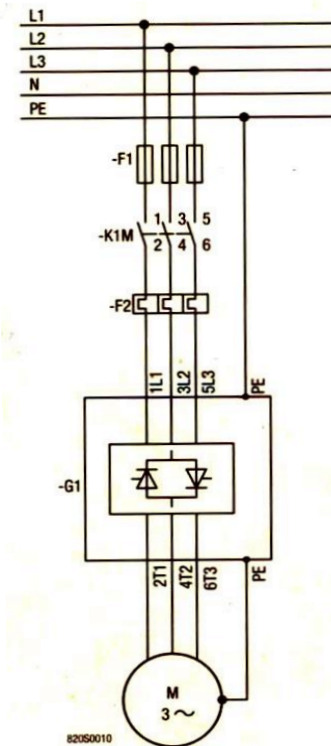
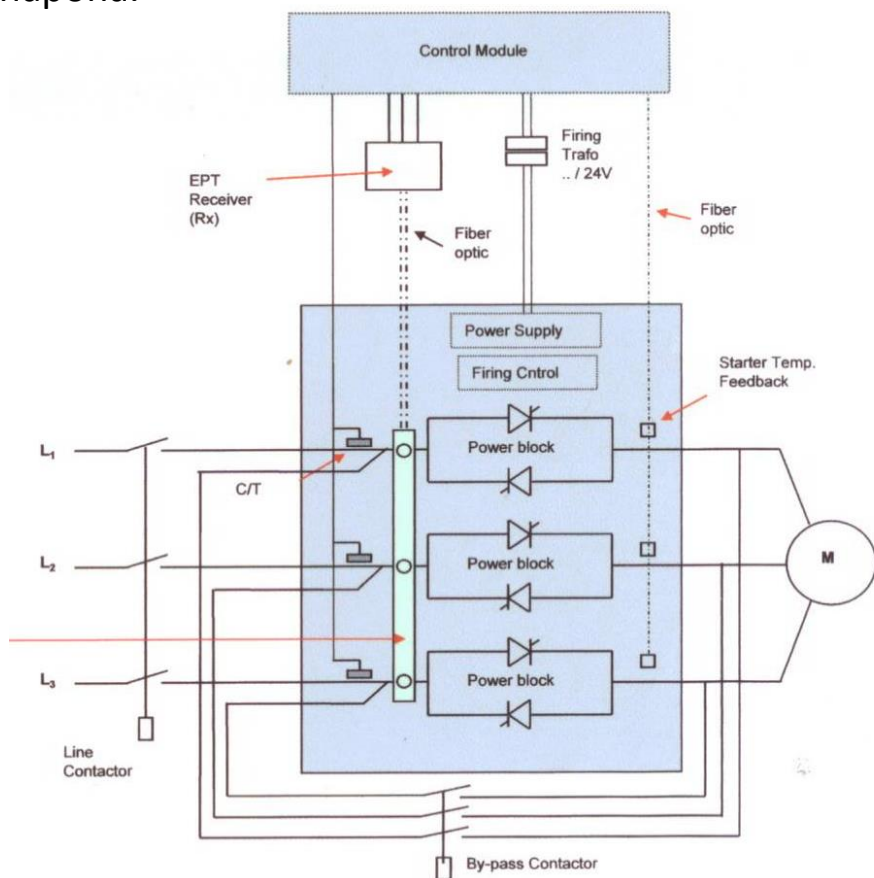
- Potrebna su tri prekidača i auto transformator.
- Struja pokretanja se odabirom napona auto transformatora prilagodi mogućnostima mreže.
- **Pokretanje:** uključeni prekidači **A** i **B**, isključen **C**
- **Pogon:** Uključeni prekidači **A** i **C**, isključen **B**



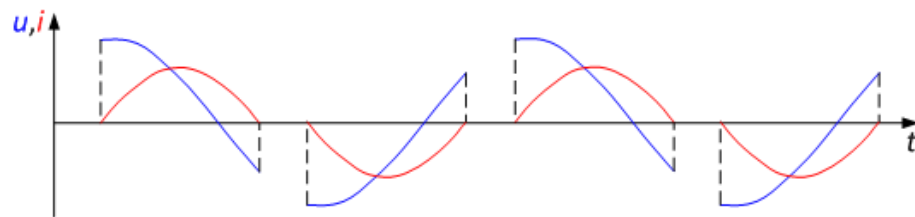
“Soft-start” uređaj s mimovodnim “bajpas” kontaktorom prema industrijskom katalogu

Soft start (mekano-polagano) je uobičajeni naziv uređaja za polagani zalet asinkronog i sinkronog motora.

Struja i moment pokretanja se podešavaju regulacijom veličine napona.



Priključak na mrežu sa “soft-start” uređajem



Valni oblici napona i struje statora

Usporedba karakteristika asinkronog kaveznog motora kod direktnog pokretanja i pokretanja pomoću “soft-start” uređaja

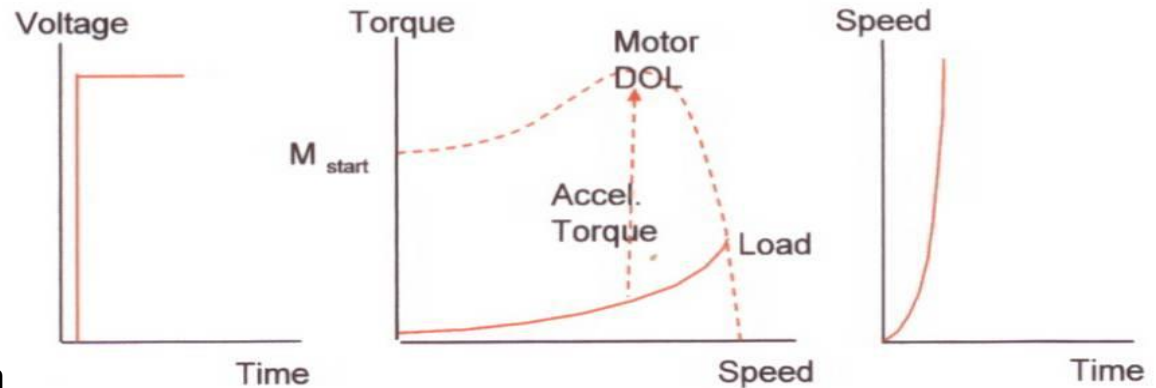
Pokretanje:

- Direktnim priključkom na mrežu

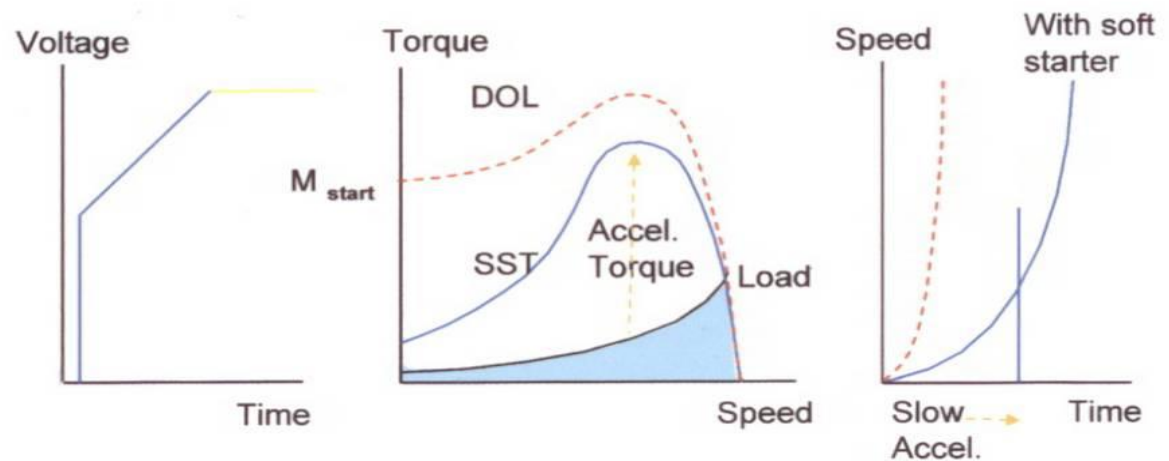
*Voltage = napon

*Torque = moment

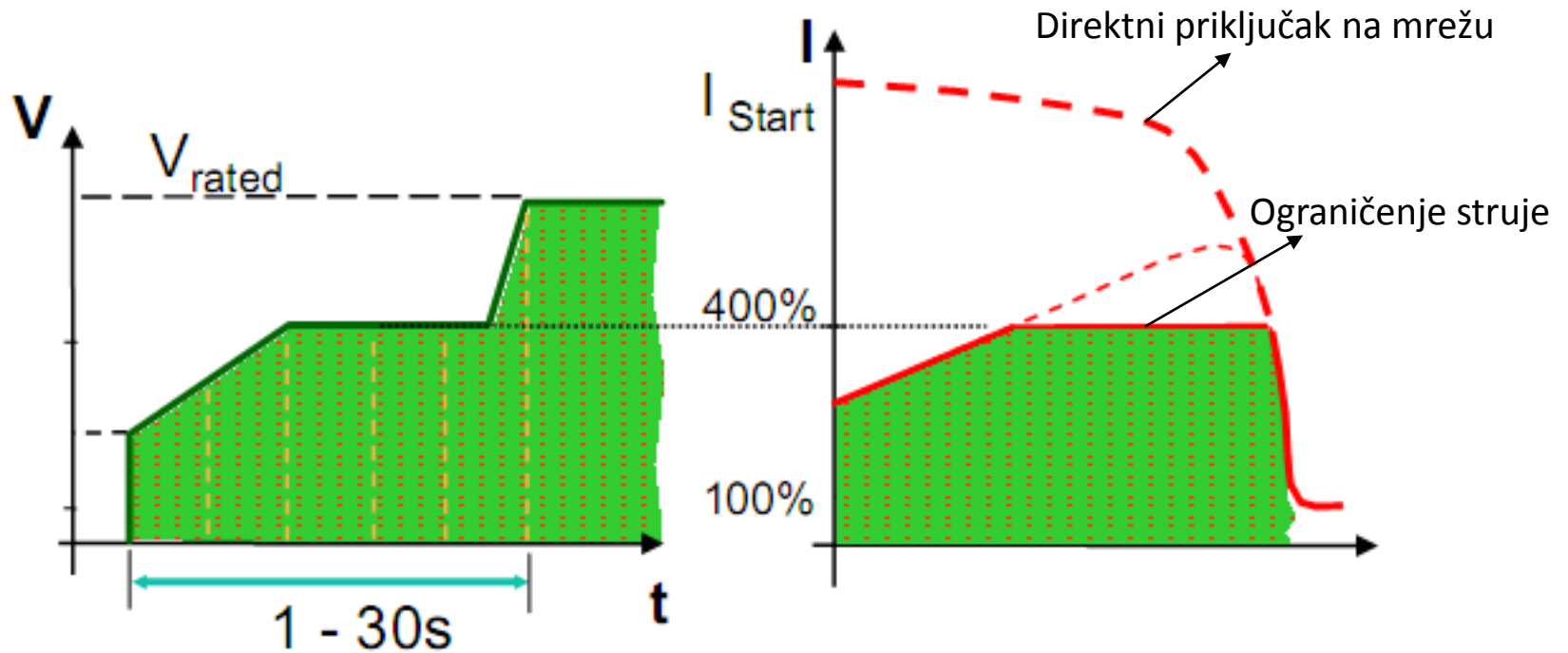
*Accel. Torque-moment ubrzanja



- “Soft-start” uređajem

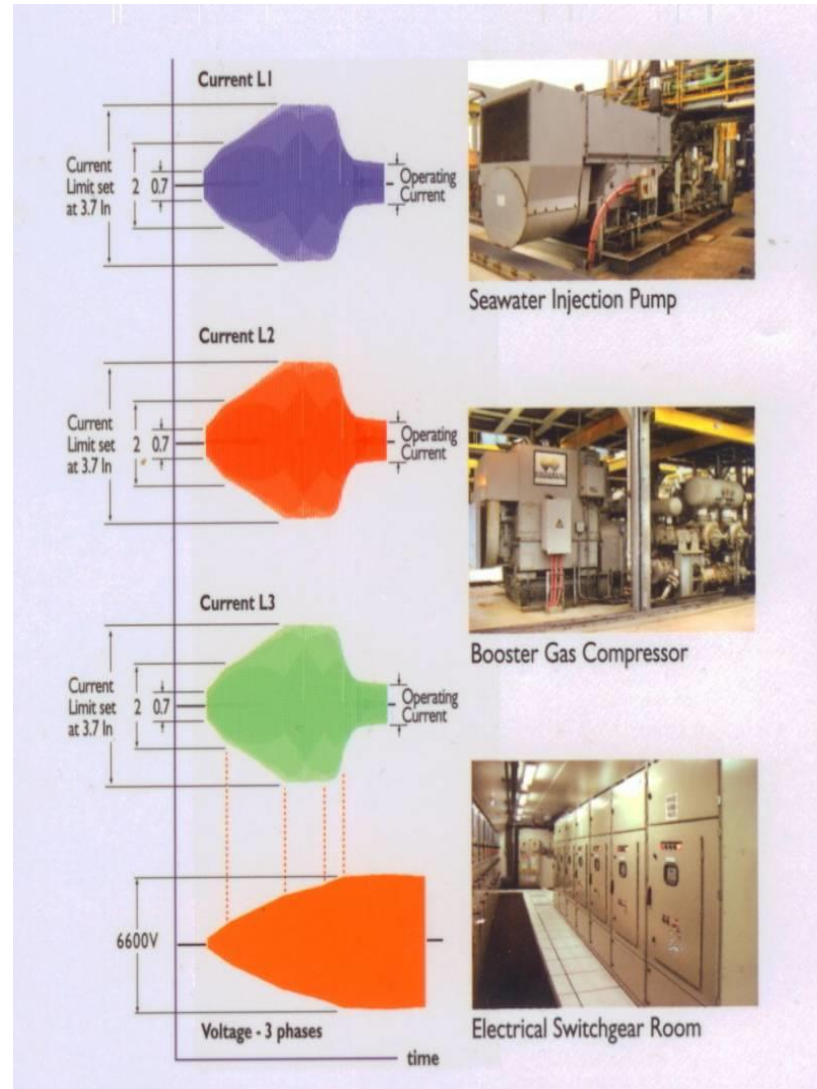


Ograničenje struje pomoću soft-start uređaja kod pokretanja



- struja se ograničava kod dugotrajnih zaleta i u svrhu zaštite motora
- ograničenje se podešava na odabrani iznos u odnosu na nazivnu struju (najčešće 200-400 %)
- Vrijeme trajanja rampe napona je podesivo (najčešće 1-30 s)

Primjene “soft-start” uređaja za pokretanje pogona s velikim motorima (proizvođački katalog)



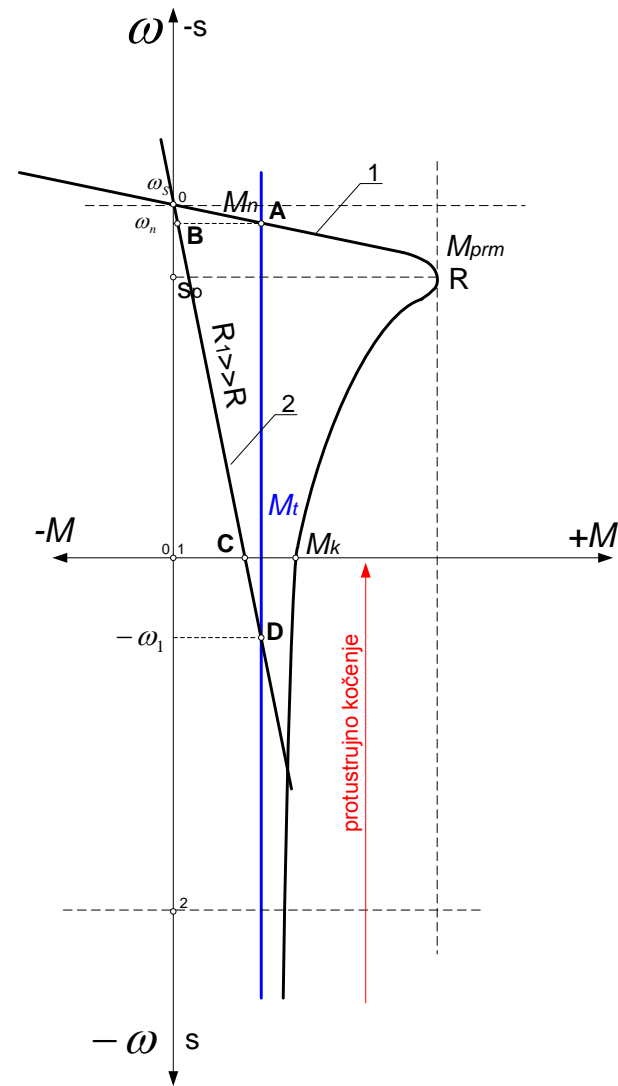
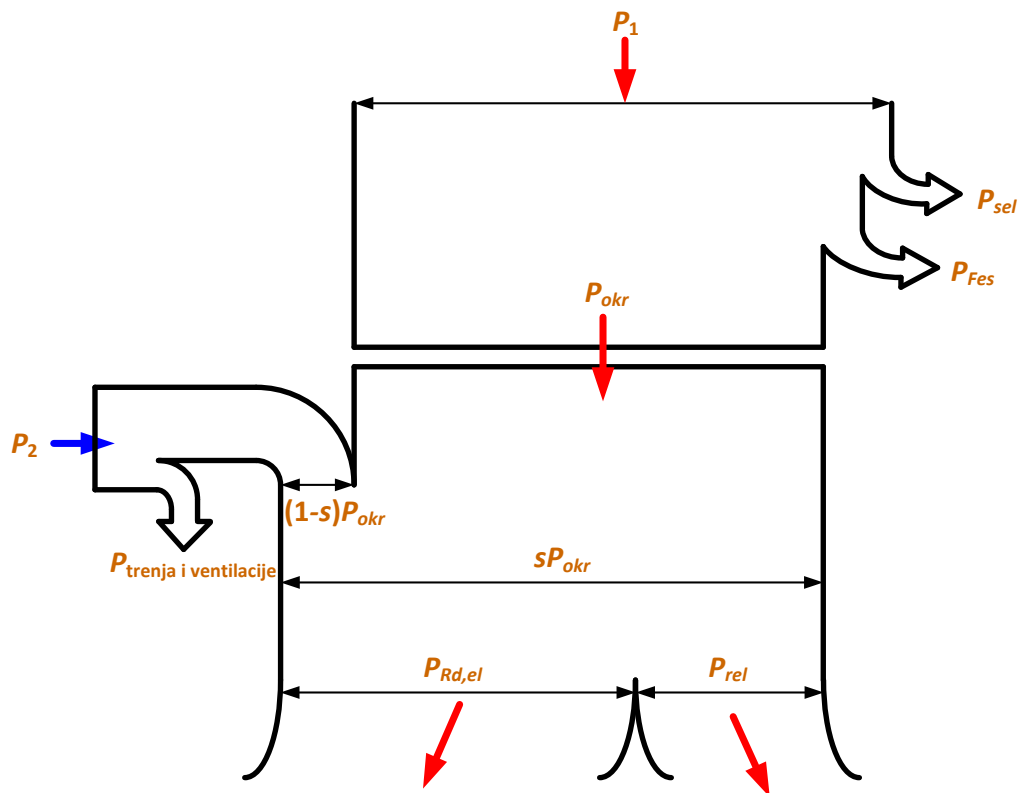
Kočenje elektromotornoog pogona s asinkronim motorima

- Koristi se više mogućnosti električkog kočenja pogona:
 - Nadsinkrono ili generatorsko kočenje potencijalnog tereta
 - Protustrujno kočenje
 - Kočenje višebrzinskim motorom (motor s više odvojenih namota)
 - Kočenje nesimetričnim spojevima statorskog namota
 - Dinamičko kočenje istosmjernom strujom
 - Dinamičko kočenje priključkom kondenzatora

Detaljno o električkim kočenjima EMP-a možete pročitati u udžbeniku **B. Jurković: Elektromotorni pogoni**

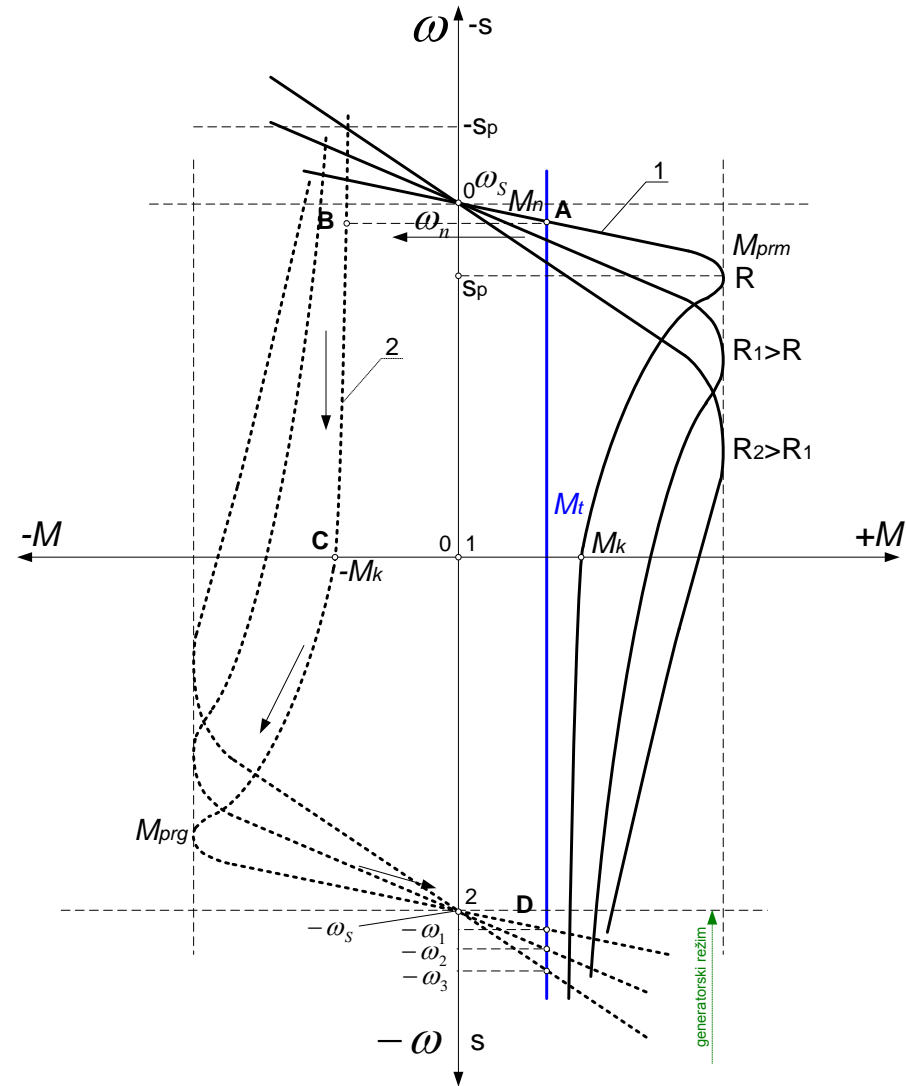
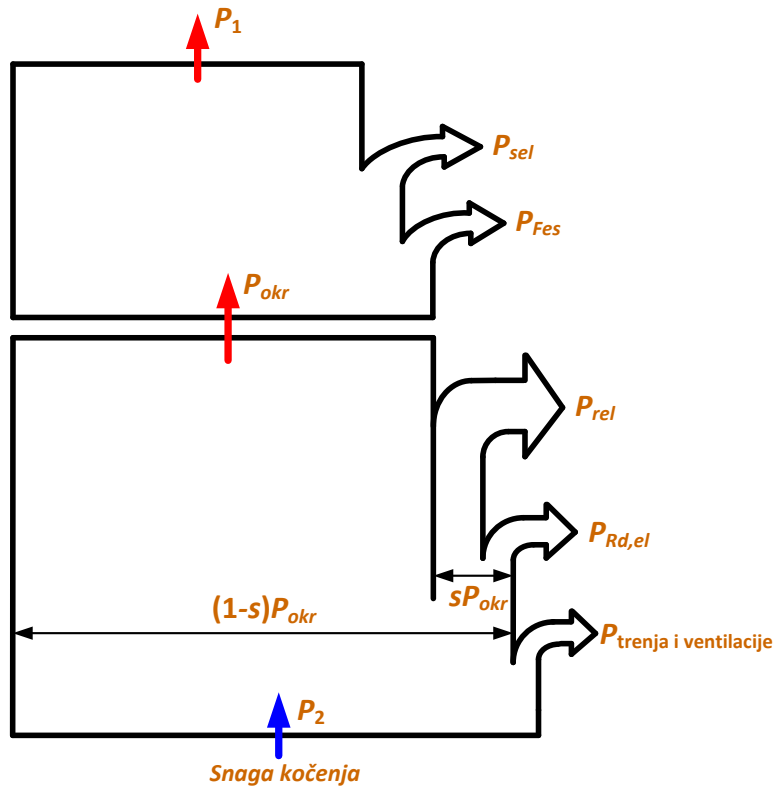
Protustrujno kočenje dodatkom velikog otpora u rotorskom krugu

- mogućnost kočenja kod potencijalnih tereta
- dodatkom velikog otpora u rotoru mijenja se nagib momentne karakteristike i postiže radna točka u II. kvadrantu
- energetski neučinkovito



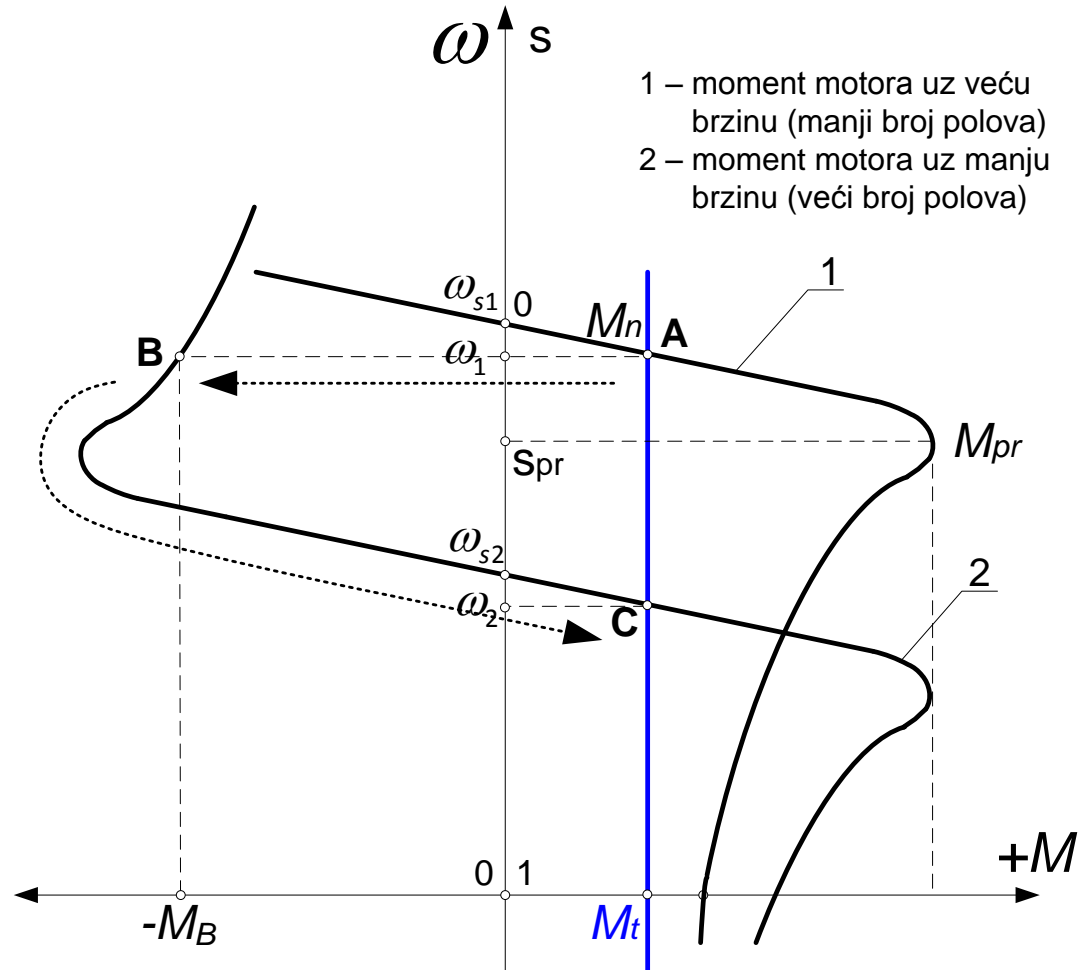
Generatorsko kočenje s dodatkom otpora u rotorskom krugu

- mogućnost kočenja kod potencijalnih tereta
- kočenje samo u nadsinkronom području
- dodatna regulacija brzine vrtnje dodatkom otpora
- povrat energije u mrežu
- energetski učinkovitije od protustrujnog kočenja



Generatorsko kočenje višebrzinskim motorom

- višebrzinski motor – odvojeni namoti ili polno preklapanje
- mogućnost generatorskog kočenja od više brzine (manji broj polova) prema manjoj brzini (manji broj polova)
- kočenje potencijalnih i reaktivnih tereta
- povrat energije u mrežu



-
- Regulirani ili neregulirani elektromotorni pogoni ?

Elektromotorni pogon promjenljive (regulirane) brzine vrtnje (engl. *variable speed drive*)- kako razumjeti taj tehnički pojam?

- Temeljna funkcija elektromotornog pogona regulirane brzine vrtnje je upravljanje tokom energije između mreže (izvora energije) i tehnološkog procesa.
- **Energija se dovodi procesu posredstvom osovine elektromotora.**
- Stanje osovine je određeno dvjema fizikalnim veličinama (koordinatama gibanja): momentom i brzinom vrtnje osovine. Da bi se upravljalo tokom energije neophodno je upravljati ovim fizikalnim veličinama.
- U pogonu se svaka od njih može upravljati stoga imamo **regulaciju brzine vrtnje i regulaciju momenta vrtnje**. Jednu i/ili drugu regulaciju se ostvaruje djelovanjem na mehaničku karakteristiku motora. Često se jednu od koordinata drži na traženoj razini pri nezavisnoj promjeni druge.
- Kada pogon radi u režimu reguliranog momenta brzina vrtnje je određena teretom. Kada pogon radi u režimu regulirane brzine moment vrtnje je određen teretom.

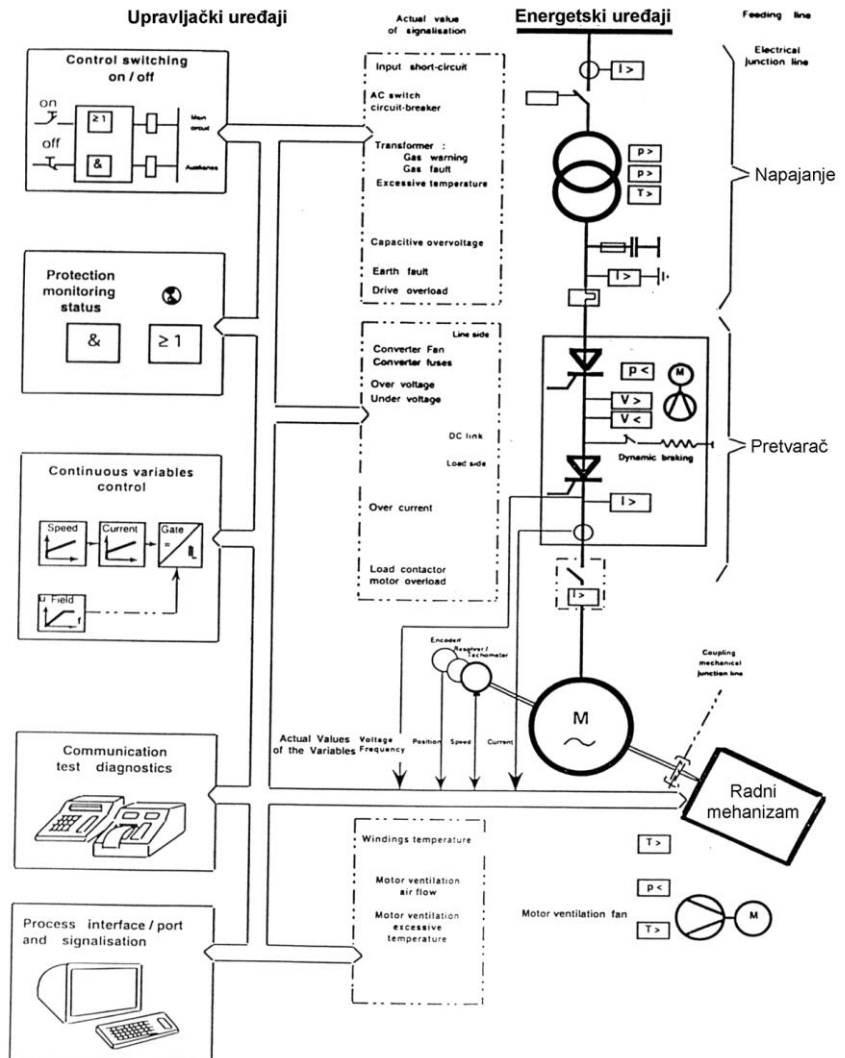
Funkcionalni dijagram izmjeničnog EMP (IEC 61800-2)

Energetski uređaji:

- izvor energije
- prekidač
- zaštita
- pretvarač
- motor
- radni mehanizam

Upravljački uređaji:

- upravljački elementi
- zaštita i nadzor
- regulacija procesne veličine
- komunikacija
- protokoliranje
- signalizacija stanja napajanja pretvarača i motora.



Regulirani ili neregulirani elektromotorni pogon-izbor?

- Zašto odabrati regulirani elektromotorni pogon ili zamijeniti postojeći neregulirani reguliranim ?

1. Zbog zahtjeva tehnološkog procesa (automatizacija,..)
2. Zbog smanjenja potrošnje (ušteda) električne energije
3. Zbog zaštite mreže, motora i radnih mehanizama

Zamjena nereguliranog elektromotornog pogona reguliranim

- Zbog nekog od navedenih razloga se dio “starih” nereguliranih pogona zamjenjuje novim reguliranim pogonima. To je moguće jer su u zadnjih desetak godina razvijene nove tehnologije i metode upravljanja izmjeničnim elektromotornim pogonima.
- Cijene pretvaračkih uređaja postaju ekonomski sve prihvatljivije zbog serijske proizvodnje i velike konkurencije na svjetskom tržištu.
- Smatra se da je broj reguliranih elektromotornih pogona oko **(10 – 15)%** svih postojećih pogona.

Regulacija zbog zahtjeva tehnološkog procesa

- Prilagodba tehnološkom procesu i uvjetima pogona upravljanjem brzinom ili momentom elektromotora umjesto drugih tehničkih mogućnosti (reduktori, multiplikatori, prigušenja, ...)
- Produktivnost i kvaliteta proizvoda mogu bitno ovisiti o preciznosti regulacije brzine vrtnje ili momenta motora (automatizirana proizvodnja).

Regulacija zbog zaštite mreže, motora i radnih mehanizama

- Komponente pogona se štite na način da se smanjenjem struje pokretanja, smanje dinamičke sile i momenti, te smanje zagrijavanja u toku zaleta i drugih dinamičkih stanja pogona.
- Naročito je važno istaknuti da se može na istoj mreži pokretati motore mnogo većih snaga nego pri direktnom pokretanju na mrežu. Tipičan je primjer uporaba elektroničkih soft-start (lagani zalet) uređaja.
- U suvremenim pretvaračima se nalaze električke zaštite motora (preopterećenje, nesimetrije, ispad jedne faze, pobjeg,....)

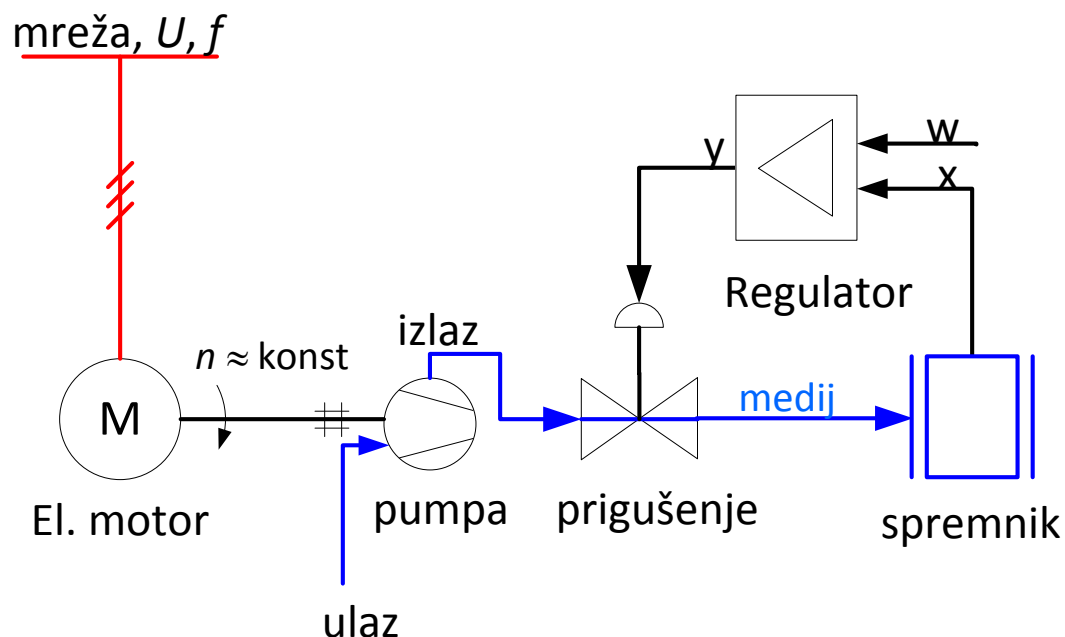
Regulacija EMP-a zbog ušteda energije

- Najveće uštede električne energije mogu se postići reguliranim pogonom centrifugalnih pumpi, ventilatora i kompresora koji su podopterećeni u normalnom pogonskom stanju i koji su godišnje relativno dugo vremena u pogonu.
- U tehnički razvijenom svijetu prevladava tendencija primjene novih reguliranih pogona i zamjena postojećih nereguliranih reguliranim zbog štednje energije.

Regulacija protoka nekog medija

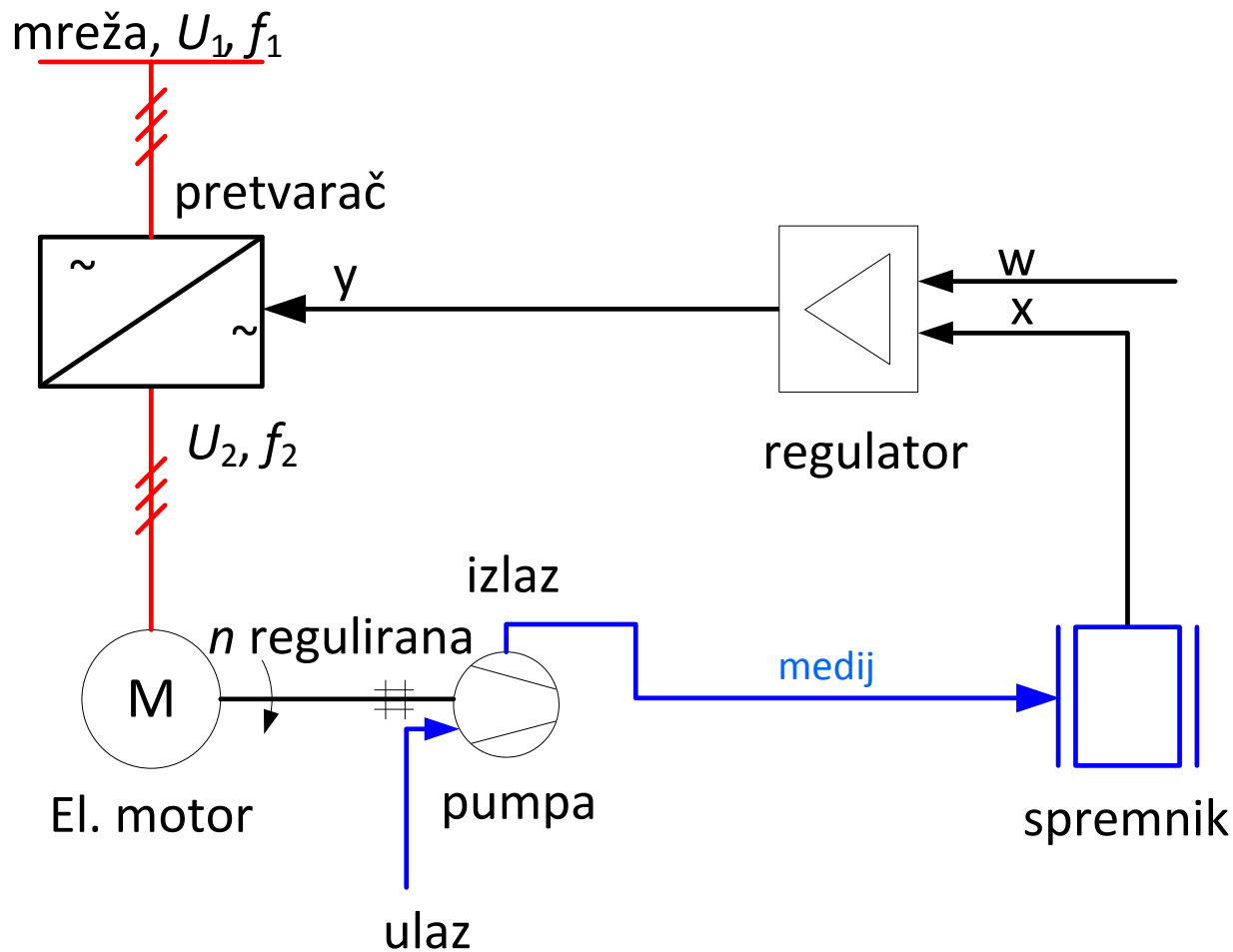
U nereguliranim elektromotornim pogonima protok medija Q (m^3/sec) se može regulirati nekim od načina prigušenja prema sl.1,

a u reguliranim prema sl.2 tako da se brzinom vrtnje motora regulira brzina vrtnje pumpe, o kojoj ovisi veličina protoka i korisnosti pumpe.



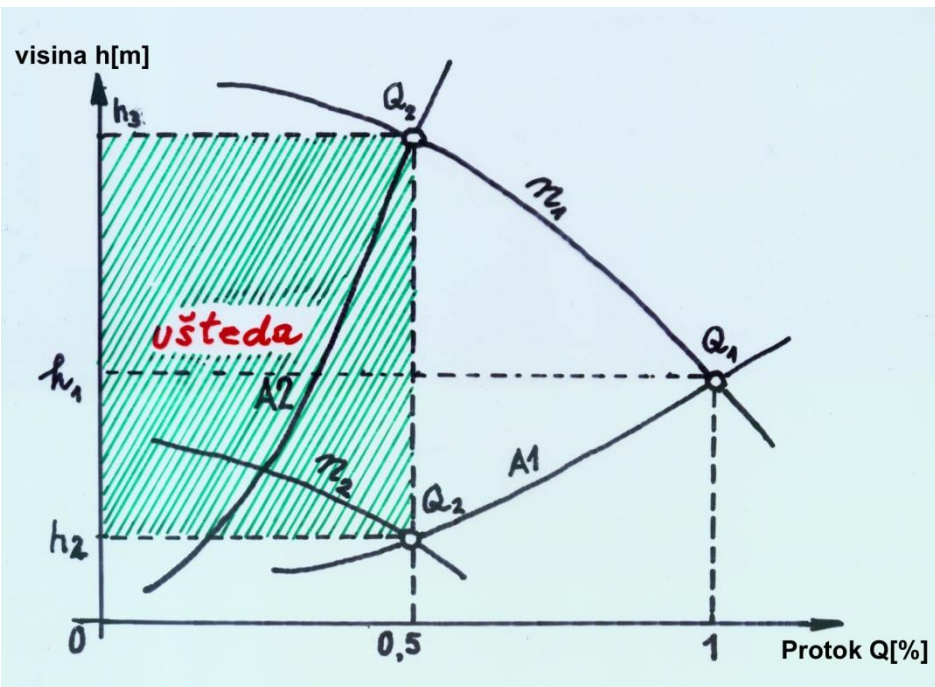
Sl. 1. EMP bez mogućnosti regulacije brzine vrtnje elektromotora i pumpe, protok se regulira prigušenjem na ulazu u spremnik medija

Regulacija protoka medija brzinom vrtnje elektromotora i pumpe



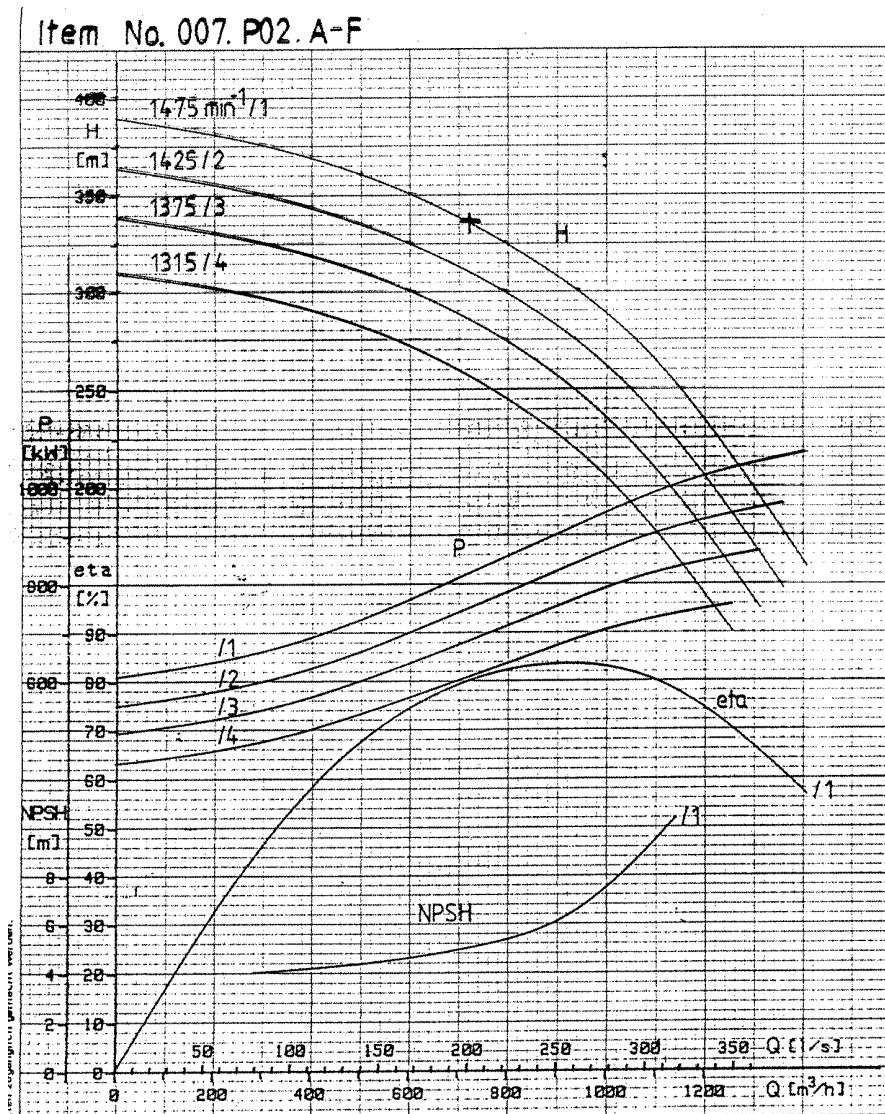
Sl. 2. Regulirani elektromotorni pogon, protok se regulira brzinom vrtnje motora odnosno pumpe (zbog ušteda energije).

Ovisnost snage na osovini pumpe o načinu reguliranja protoka medija



- n_1 → Q-h karakteristika pumpe pri brzini vrtnje n_1
- n_2 → Q-h karakteristika pumpe pri brzini vrtnje n_2
- A_1 → karakteristika otpora hidrauličkog sustava
- A_2 → karakteristika otpora istog sustava s prigušenjem
- Q_1 → radna točka, protok pri karakteristici A_1 (100% protoka)
- Q_2 → radna točka, 50% protoka ostvarenog prigušenjem (h_3) ili promjenom brzine vrtnje pumpe (h_2)
- h_1 , h_2 i h_3 → visine dizanja (m)

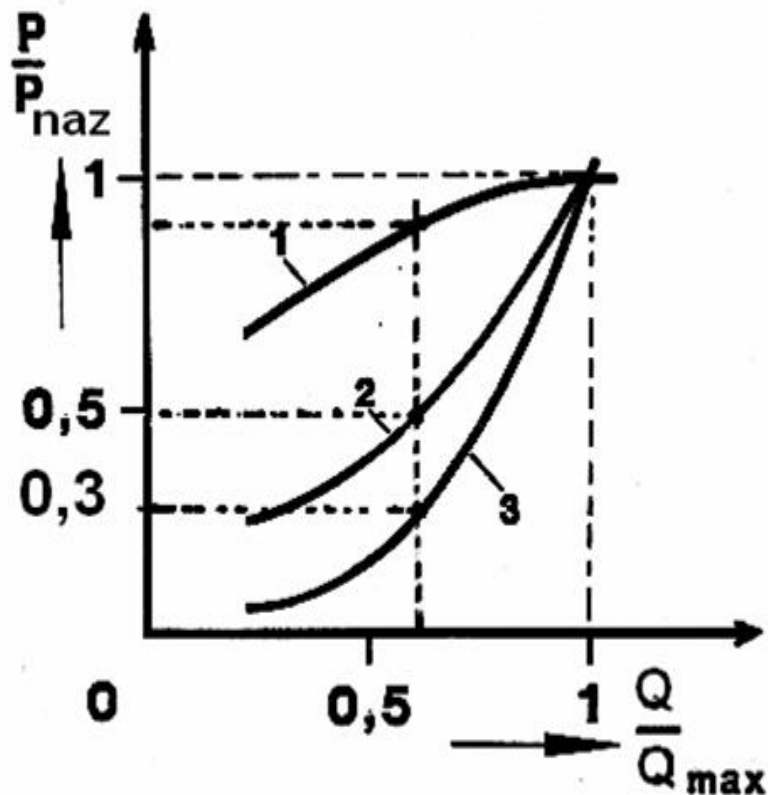
Ključne karakteristike jedne centrifugalne pumpe



Jedan primjer ovisnosti potrebne snage pogonskog stroja pumpe o načinu regulacije protoka medija

1. Regulacija prigušenjem na izlazu
2. Regulacija ulaznim ventilima
3. Regulacijom brzinom vrtnje pumpe

- Primjer: Protok 60 %, ušteda energije reguliranim pogonom može biti i do 70%



Načini regulacije protoka zraka za ventilatore

način upravljanja protokom	regulacije brzine vrtnje elektromotora	Prigušenje ventilom	otvorom ulaznih klapni
opseg regulacije	(30 - 100)% nazivne brzine vrtnje	od (100 - 30)% prigušenja	0° - 80°, zatvaranje ulaznih klapni

Δp (mbar) razlika tlaka
 V (m^3/s) volumen (kapacitet)
 (1) karakteristika ventilatora
 (2) karakteristika otpora sustava
 A radna točka, nazivna bez regulacije

Brzina vrtnje asinkronog motora

- Brzina vrtnje asinkronog motora je:

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

gdje je p – broj pari polova, s – klizanje, f_s – frekvencija napona napajanja statora

- Možemo je mijenjati (regulirati):
 - a) promjenom klizanja s ,
 - b) promjenom broja pari polova p i
 - c) promjenom frekvencije f .

Klizanje možemo mijenjati dodavanjem otpora u rotorski krug (kolutni motori), statorski krug ili promjenom napona napajanja.

Broj pari polova možemo mijenjati prespajanjem namota (Dahlanderovi spojevi) ili ugradnjom više odvojenih namota u stator.

Promjenu frekvencije možemo ostvariti napajanjem motora iz izvora promjenljive frekvencije (elektronički frekvencijski pretvarač).

Regulacija brzine vrtnje asinkronog motora promjenom napona i frekvencije

Promjenom frekvencije pri nepromijenjenom naponu mijenja se magnetski tok Φ i indukcija u motoru:

$$U_s \approx E_s = 4,44 N f_s \Phi$$

(Smanjenje frekvencije povećava mag.tok, a povećanje ga smanjuje)

kao i moment motora:

$$M = k \Phi I_r \cos \varphi_r$$

Da se održi približno isti tok (zasićenje) i razvijeni moment, napon U_s i frekvencija f_s moraju se mijenjati istovremeno po zakonu upravljanja:

$$\frac{E_s}{f_s} \approx \frac{U_s}{f_s} = \text{konst.}$$

Tehnički naziv za ovakvu regulaciju je **skalarna regulacija brzine vrtnje**.

Skalarna regulacija

- Istovremena promjena napona i frekvencije U/f , tehnički naziv **skalarna regulacija**.

- Ograničenja

Skalarna regulacija U/f ima ograničeno područje primjene zbog toga što je promjena napona motora ograničena, od iznosa nula do nazivnog napona. Povećanje napona iznad nazivnog nije dozvoljeno zbog naponskih naprezanja.

Povećanje frekvencije iznad nazivne ograničeno je mehaničkim razlozima i promjenama mehaničke karakteristike motora zbog smanjenja toka u području iznad nazivne frekvencije.

Upravljačke karakteristike pri skalarnoj regulaciji su dane na sljedećem dijagramu.

Skalarna regulacija – ograničenja u radu pretvarača

Ograničenja pri radu do nazivne brzine – područje konstantnog toka

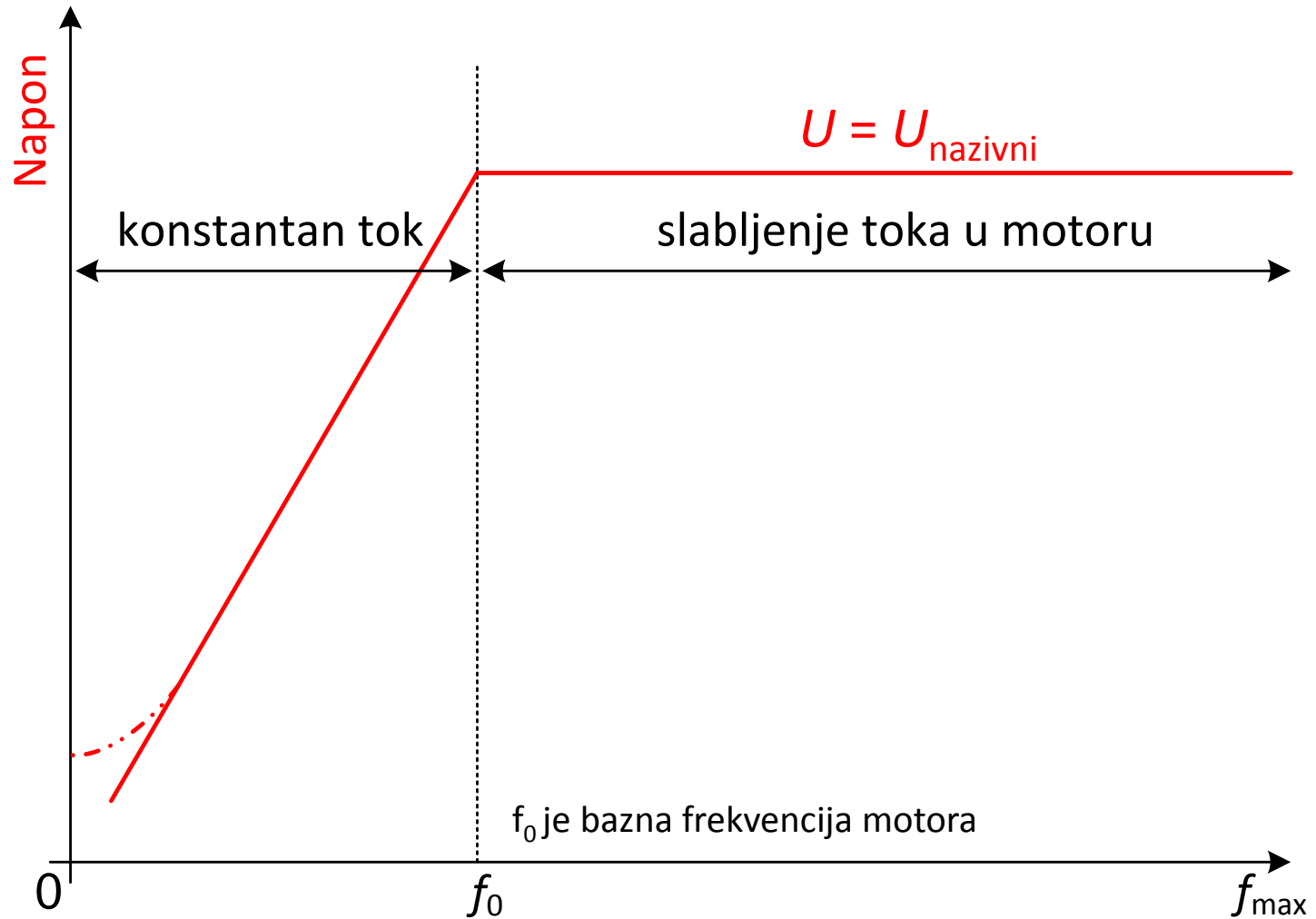
- Motoru zadane nazivne frekvencije pretvarač treba održavati proporcionalan odnos napona i frekvencije za sve niže radne frekvencije (brzine vrtnje).
- Ograničena električna veličina je struja pretvarača I_{\max} .

Područje slabljenja magnetskog toka – iznad nazivne frekvencije

- Na frekvencijama upravljanja iznad nazivne frekvencije motora trebalo bi za konstantni moment povećavati napona iznad nazivnog što nije dozvoljeno.

Napon se drži konstantnim, a magnetski tok slabi → moment motora opada prema ilustraciji na slici, uz zadržavanje struje na nazivnom iznosu.

Skalarna regulacija -upravljačke karakteristike

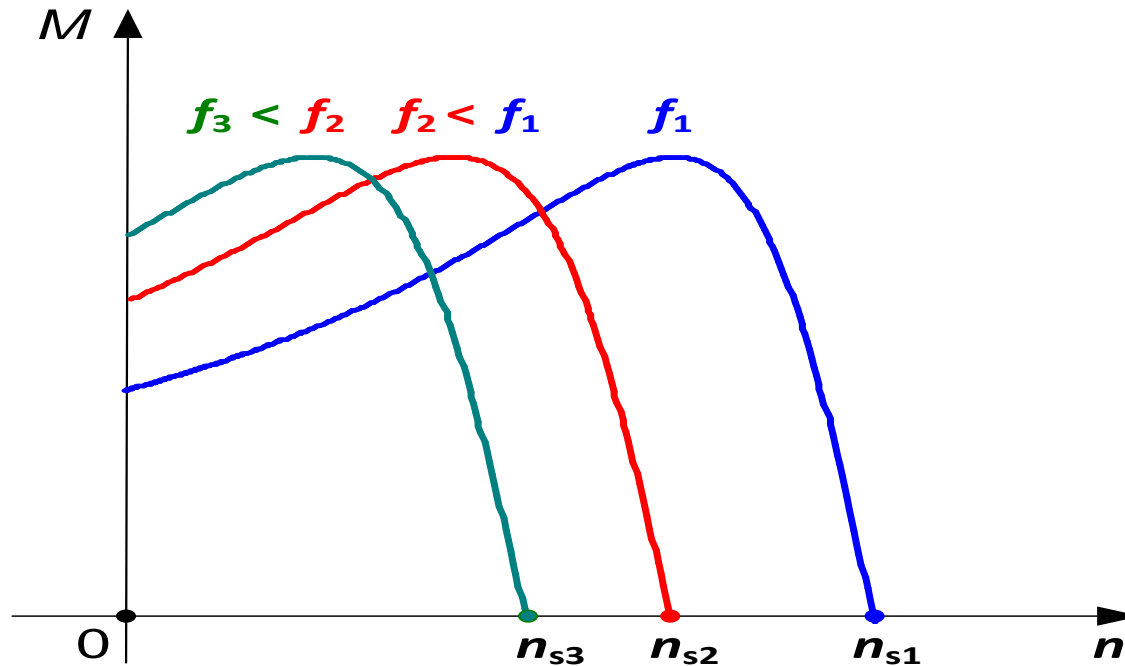


- Pri istovremenoj promjeni napona i frekvencije (konstantni mag. tok) idealizirane statičke momentne karakteristike motora izgledaju prema slici.

f_1 je bazna (osnovna) frekvencija motora

Skalarno upravljanje se općenito primjenjuje gdje se ne zahtjeva velika preciznost i dinamička svojstva pogona (tipično za centrifugalne pumpe i ventilatore)

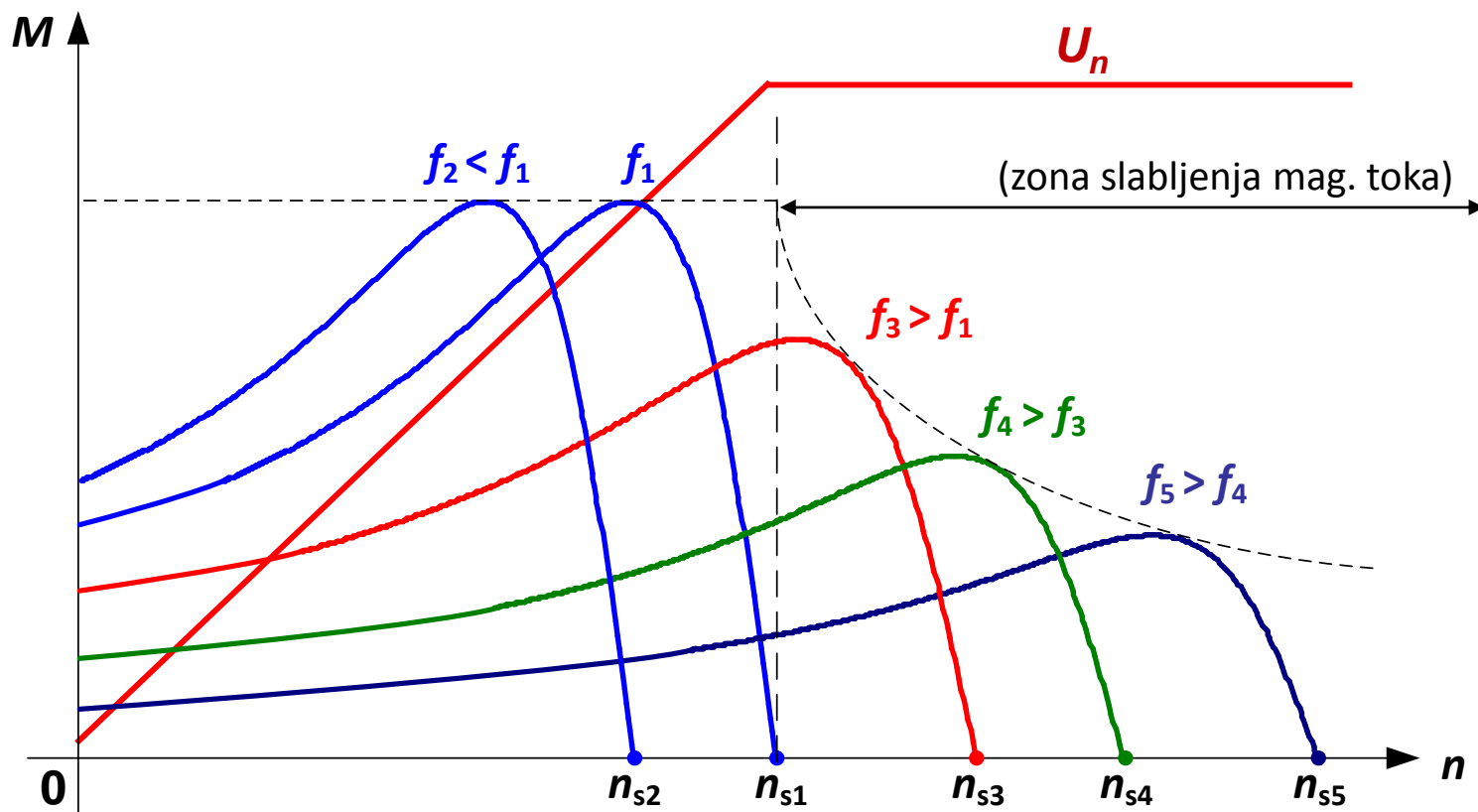
Nije potrebna povratna veza brzine pa je pogon relativno jednostavan.



Promjena momentnih karakteristika pri skalarnoj regulaciji, $\phi = \text{konst.}$

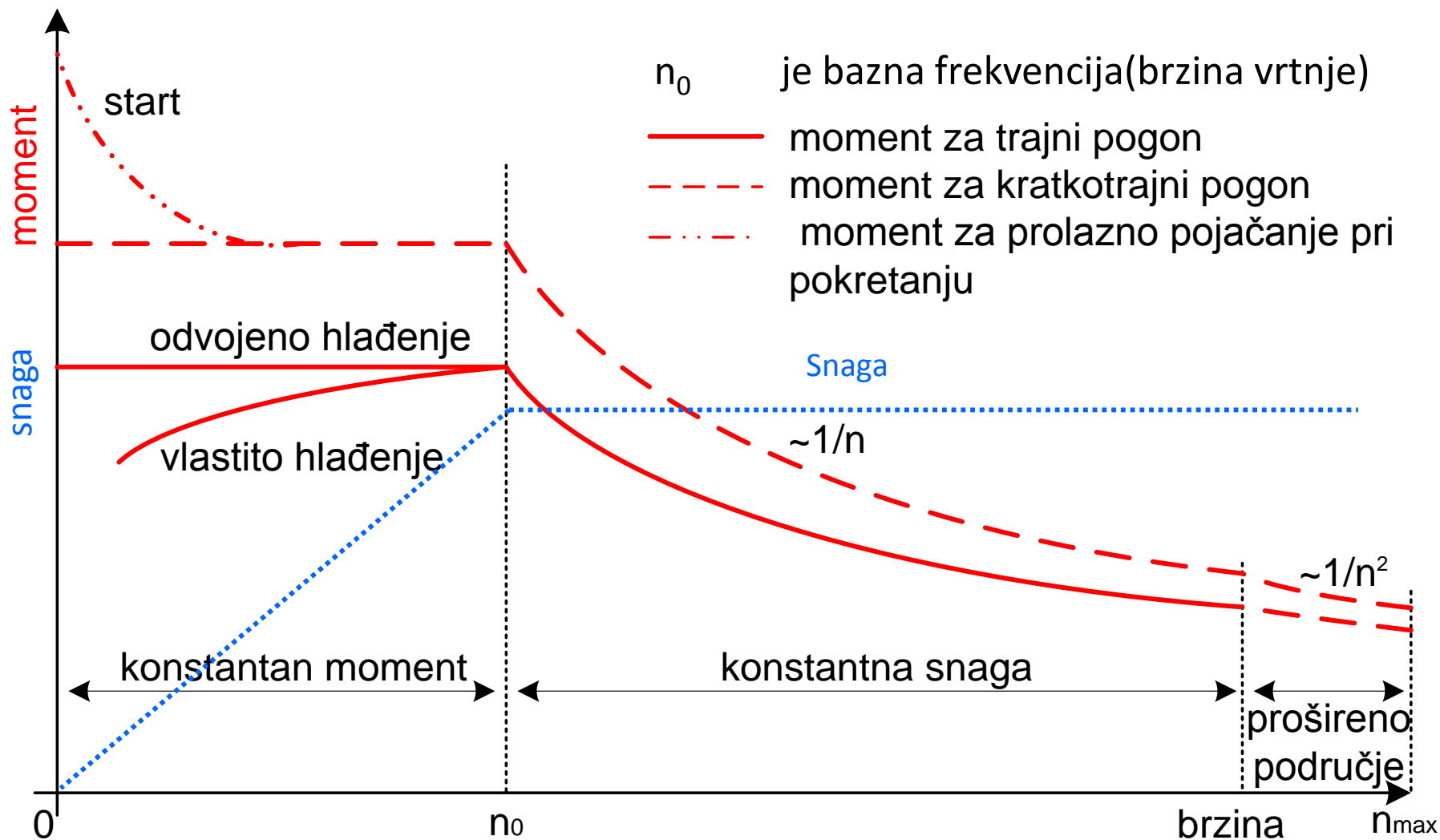
Pri nazivnom naponu i povećanju frekvencije smanjuje se magnetski tok (engl. *field weakening*) i opada moment motora prema

→ f_1 je bazna (osnovna) frekvencija motora

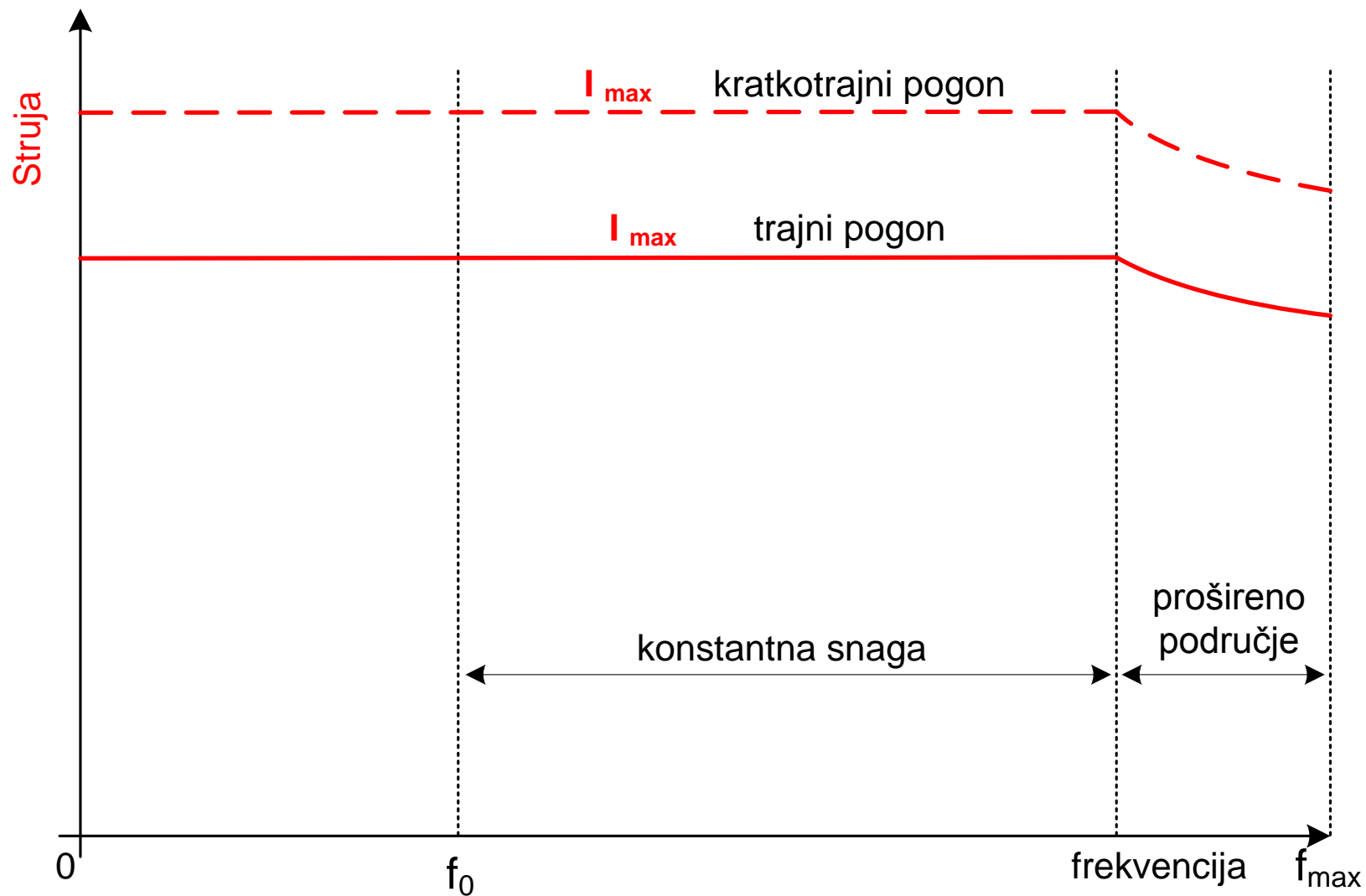


Promjena momentnih karakteristika pri skalarnoj regulaciji

Moment- brzina vrtnje reguliranog kaveznog motora (prema IEC 60034-25)



Ograničenja izlazne struje pretvarača frekvencije



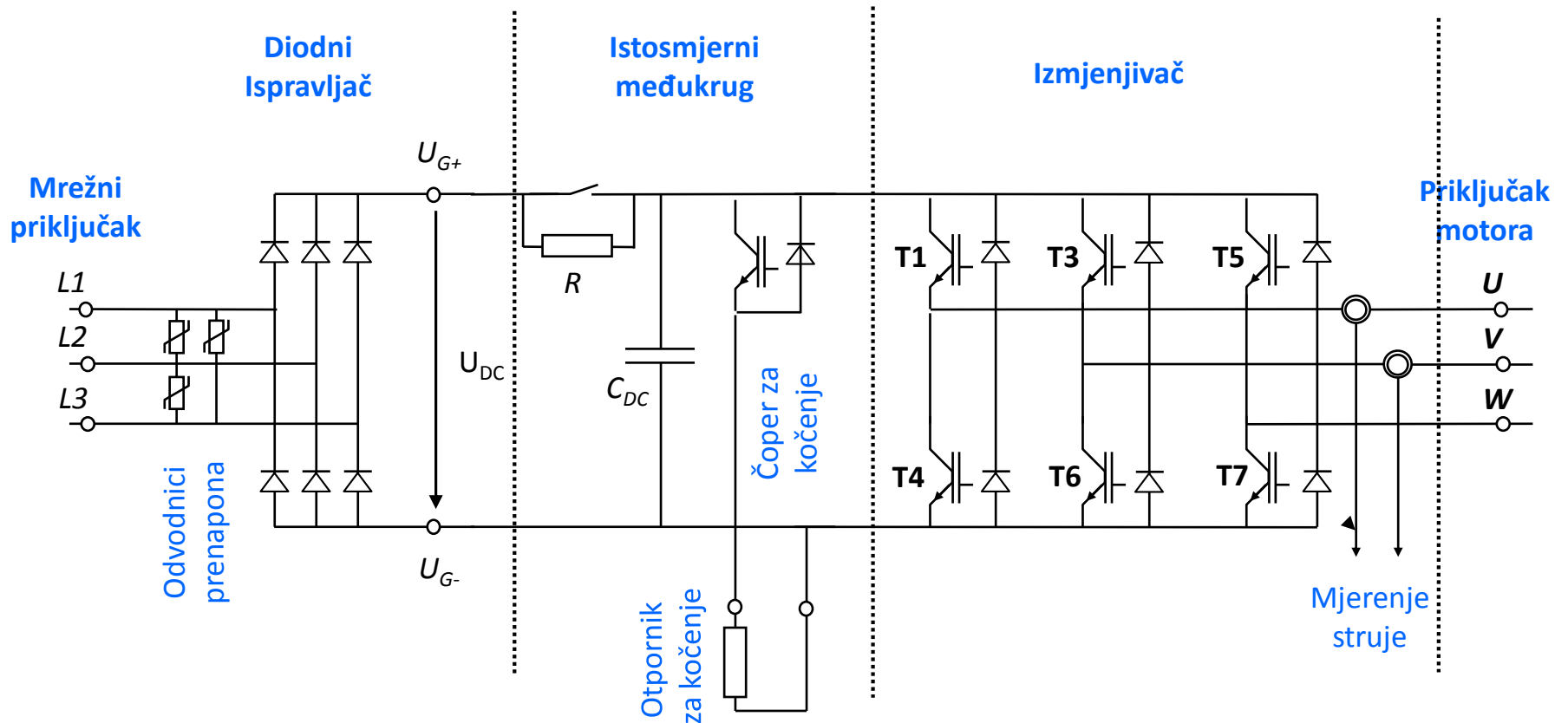
Dozvoljena opteretivost pretvarača frekvencije, prema proizvođačkom katalogu proizvođača Yaskawa

Rated Input Voltage	Drive Model Number CIMR-JU	Normal Duty ⁽¹⁾		Heavy Duty ⁽¹⁾	
		Rated Output Current (Amps)	Nominal HP ⁽²⁾	Rated Output Current (Amps)	Nominal HP ⁽²⁾
200-240V 1-Phase	BA0001BAA	1.2	1/8 & 1/4	0.8	1/8
	BA0002BAA	1.9	1/4	1.6	1/4
	BA0003BAA	3.3	1/2 & 3/4	3.0	1/2
	BA0006BAA	6.0	1	5.0	3/4 & 1
	BA0010BAA	9.6	2 & 3	8.0	2
200-240V 3-Phase	2A0001BAA	1.2	1/8 & 1/4	0.8	1/8
	2A0002BAA	1.9	1/4	1.6	1/4
	2A0004BAA	3.3	1/2 & 3/4	3.0	1/2
	2A0006BAA	6.0	1	5.0	3/4 & 1
	2A0010BAA	9.6	2 & 3	8.0	2
	2A0012BAA	12.0	3	11.0	3
380-480V 3-Phase	4A0001BAA	1.2	1/2	1.2	1/2
	4A0002BAA	2.1	3/4 & 1	1.8	3/4
	4A0004BAA	4.1	2	3.4	1 & 2
	4A0005BAA	5.4	3	4.8	3
	4A0007BAA	6.9	4	5.5	3
	4A0009BAA	8.8	5	7.2	4
	4A0011BAA	11.1	7.5	9.2	5

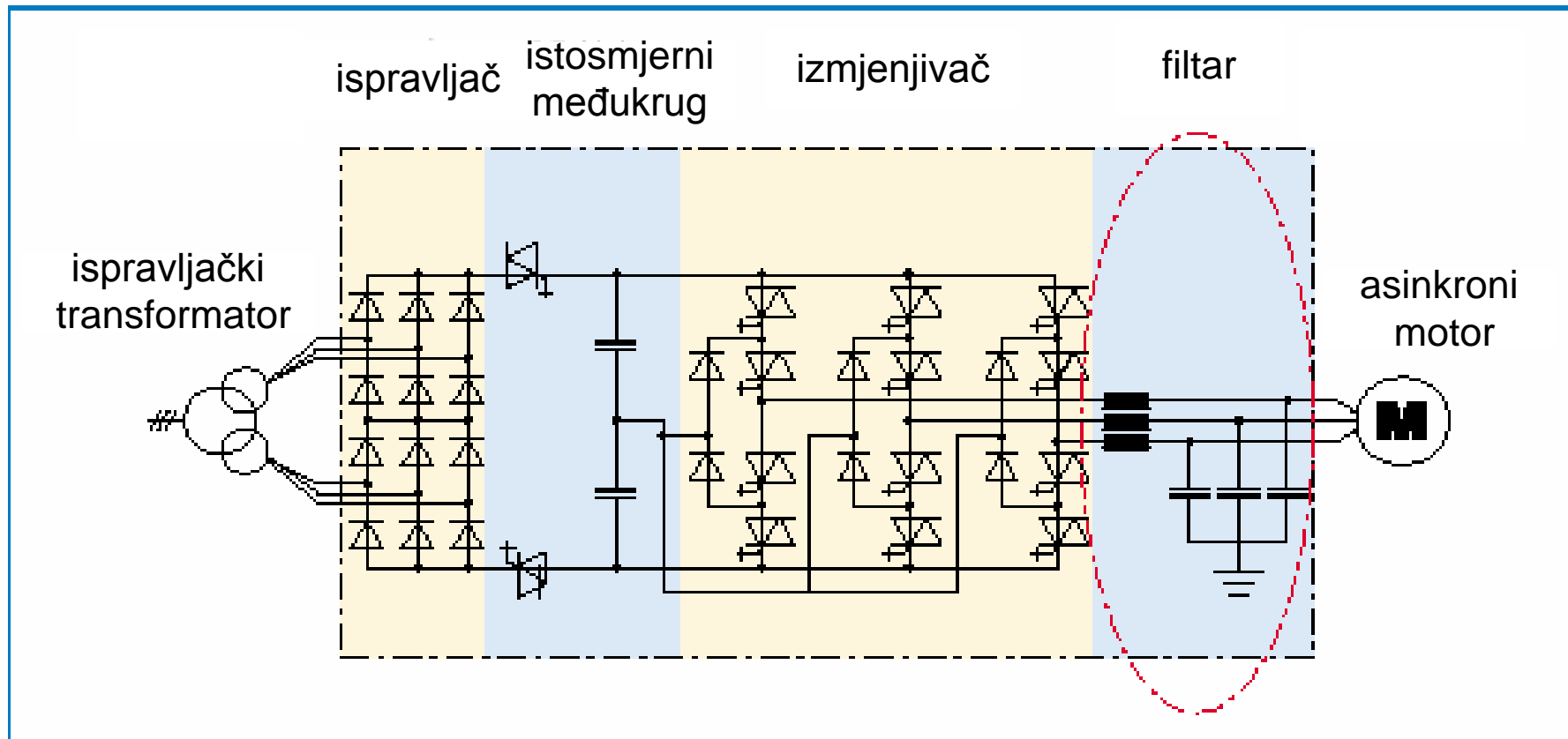
(1) Normal Duty overload current rating is 120% of rated output current for 60 seconds; Heavy Duty overload current rating is 150% of rated output current for 60 seconds

(2) Horsepower rating is based on 230-volt and 460-volt induction-type squirrel-cage NEMA B 4-pole motors as represented in NEC table 430.250 Full-Load Current, Three-Phase Alternating Current Motors

Tipična struktura pretvarača frekvencije za asinkroni motor



Načelna shema energetskega kruga pretvarača frekvencije (ABB) sa sinusnim izlaznim filterom



The ACS 1000 drive's three-level voltage source inverter topology with sine filter output

Posebni zahtjevi EMP-a

- U pogonu je često važno održati jednaku preopteretivost (omjer maksimalnog i potrebnog momenta motora) pri svakoj brzini vrtnje (frekvenciji)

$$M_{\max} = \frac{p m_1 U_1^2}{2\omega_{sm} \sigma_1 \left[\pm R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + \sigma_1 X_{2\sigma})^2} \right]}$$

- Zanemarenjem R_1 prema $X_{1\sigma} + \sigma_1 X'_{2\sigma} = X_k = 2\pi f_1 L_k$ može se pisati

$$M_{\max} = \frac{p m_1 U_1^2}{2 \cdot 2\pi f_1 \sigma_1 X_k} = k' \frac{U_1^2}{f_1^2}, \quad k' = \text{konst.}$$

- Za održavanje jednake preopteretivosti pri svakoj frekvenciji (brzini) treba da bude

$$\frac{M_{\max 1}}{M_{\max 2}} = \frac{M_{t1}}{M_{t2}} = \frac{\frac{U_1^2}{f_1^2}}{\frac{U_2^2}{f_2^2}} = \left(\frac{U_1}{U_2} \right)^2 \left(\frac{f_1}{f_2} \right)^2$$

- Iz toga slijedi osnovni zakon upravljanja za očuvanje preopteretivosti:

$$\boxed{\frac{U_1}{U_2} = \frac{f_1}{f_2} \sqrt{\frac{M_{t1}}{M_{t2}}}}$$

Optimizacija magnetskog toka pri regulaciji brzine

- Prilagodnom U/f karakteristika motora potrebama momenta opterećenja, održavanjem jednake preopteretivosti motora na svakoj brzini vrtnje, može se postići uštede energije.
- Za centrifugalne pumpe i ventilatore moment tereta kvadratno raste s brzinom vrtnje pa je za održavanje jednake preopteretivosti pri svakoj brzini vrtnje potrebna proporcionalnost:

$$U \sim f^2$$

- Takva opcija regulacije se naziva “*Flux Optimisation*”.
- Optimizacijom toka smanjuje se indukcija i gubici u željezu motora.
- Za različite vrste momenta opterećenja su izvedeni izrazi za odnos napona i frekvencija pri korištenju opcije “*Flux Optimisation*”.

Odnosi napona i frekvencije pri skalarnoj regulaciji brzine kada se traži jednaka preoperativost motora na svakoj brzini vrtnje

Vrsta mehaničke karakteristike radnog mehanizma	Odnosi momenata tereta, snaga i napona motora		
	$\frac{M_{m2}}{M_{m1}}$	$\frac{P_2}{P_1}$	$\frac{U_2}{U_1}$
$M_t = M_{tn} \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^0 = M_{tn} \left(\frac{f}{f_n} \right)^0$ (konstantna)	1	$\frac{f_2}{f_1}$	$\frac{f_2}{f_1}$
$M_t = M_{tn} \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^1 = M_{tn} \left(\frac{f}{f_n} \right)^1$ (proporcionalna)	$\frac{f_2}{f_1}$	$\left(\frac{f_2}{f_1} \right)^2$	$\left(\frac{f_2}{f_1} \right)^{\frac{3}{2}}$
$M_t = M_{tn} \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 = M_{tn} \left(\frac{f}{f_n} \right)^2$ (centrifugalna)	$\left(\frac{f_2}{f_1} \right)^2$	$\left(\frac{f_2}{f_1} \right)^3$	$\left(\frac{f_2}{f_1} \right)^2$
$M_t = M_{tn} \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^{-1} = M_{tn} \left(\frac{f}{f_n} \right)^{-1}$ (konstantne snage)	$\left(\frac{f_2}{f_1} \right)^{-1}$	konst.	$\left(\frac{f_2}{f_1} \right)^{\frac{1}{2}}$

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{f_2}{f_1} \sqrt{\frac{M_{t2}}{M_{t1}}}$$

Primjer za primjenu “flux optimisation” opcije

- Elektromotorni pogon kotlovske centrifugalne napojne pumpe je izveden s kaveznim asinkronim trofaznim motorom 4000 kW, 6300V, 50 Hz, 2p=2, 2970 min⁻¹, preopteretivost 2,5. Brzina vrtnje motora i protok se reguliraju pretvaračem napona i frekvencije. Koliki treba biti napon motora ako je potrebna brzina vrtnje 1485 min⁻¹, a preopteretivost motora treba ostati nepromijenjena?
- Primjenom izvedenog zakona upravljanja za kvadratnu ovisnost momenta tereta (pumpe) o brzini vrtnje imamo:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{f_2}{f_1} \sqrt{\frac{M_{t2}}{M_{t1}}} = \frac{f_2}{f_1} \sqrt{\frac{n_2^2}{n_1^2}} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2$$

$$U_2 = U_1 \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 = 6300 \left(\frac{1485}{2970}\right)^2 = 1575 \text{ V}$$

- Primjenom $U/f = \text{konst.}$ trebalo bi napon sniziti na 50 % nazivnog. Time bi zbog dvostruko većeg toka u motoru gubici u željezu bili znatno veći. Skicirajte!

Vektorska regulacija

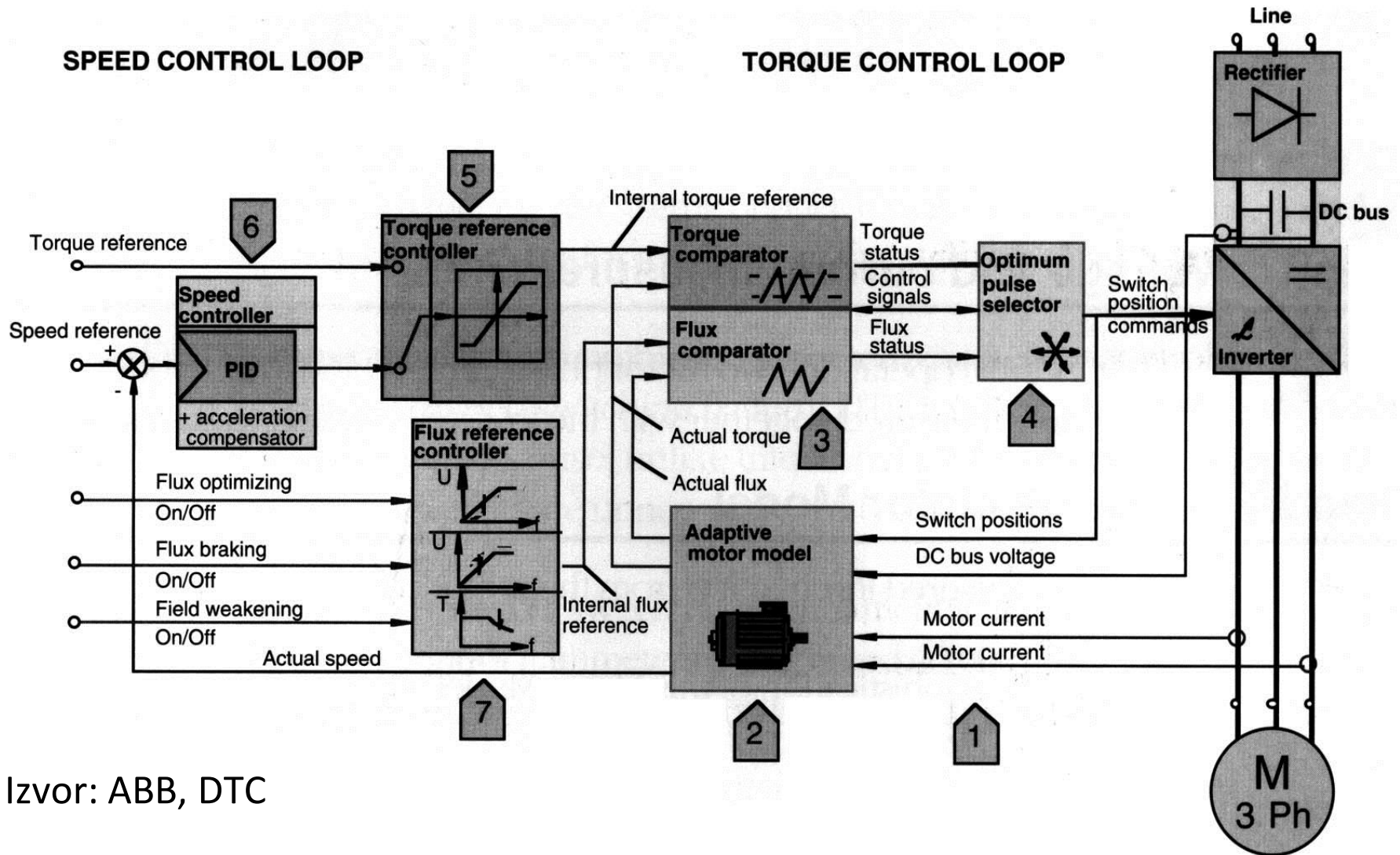
- Pored jednostavnije i manje precizne skalarne regulacije koja se zasniva na zakonu uravljanja $U/f = \text{konst.}$ razvijena je i mnogo se koristi **vektorska regulacija** izmjeničnih elektromotornih pogona.
- Temelj vektorske regulacije je matematički model motora koji obuhvaća statička i dinamička stanja električkih, magnetskih i mehaničkih pojava u motoru.

Regulacija struje motora po iznosu i oblika u skladu s trenutnim stanjem elektromagnetskih prilika u motoru.

Vektorskom regulacijom se povećava preciznost i dinamička svojstva reguliranog pogona.

Razvijeno je više metoda vektorske regulacije izmjeničnih motora. Poznati proizvođači pretvarača imaju vlastita rješenja, obično patentirana.

Blok dijagram reguliranog asinkronog pogona metoda "DTC – direct torque control"



Izvor: ABB, DTC

Usporedba različitih metoda upravljanja EMP-a

2.8 Comparison of variable speed drives

Let us now take a closer look at each of these control blocks and spot a few differences.

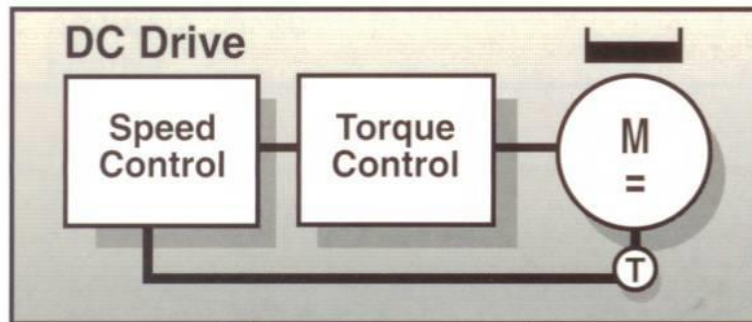


Figure 1: Control loop of a DC Drive

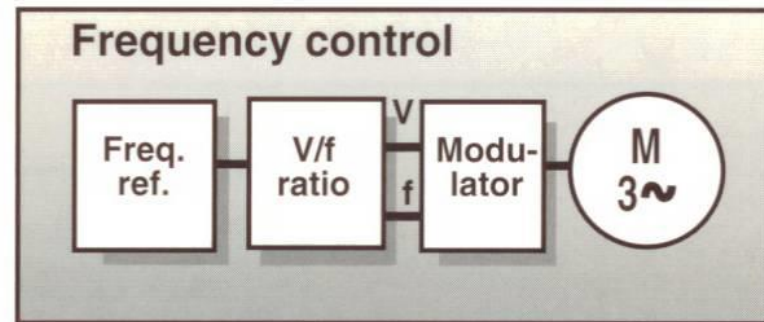


Figure 2: Control loop with frequency control

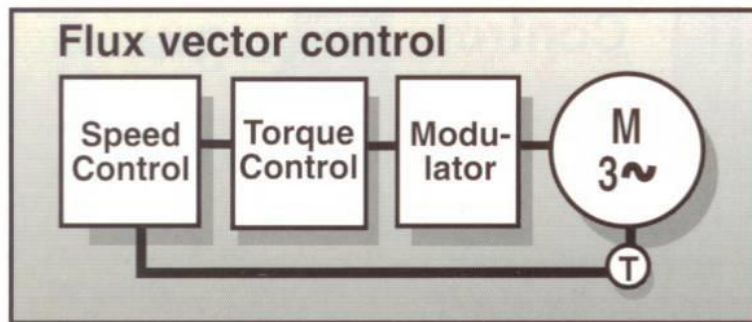


Figure 3: Control loop with flux vector control

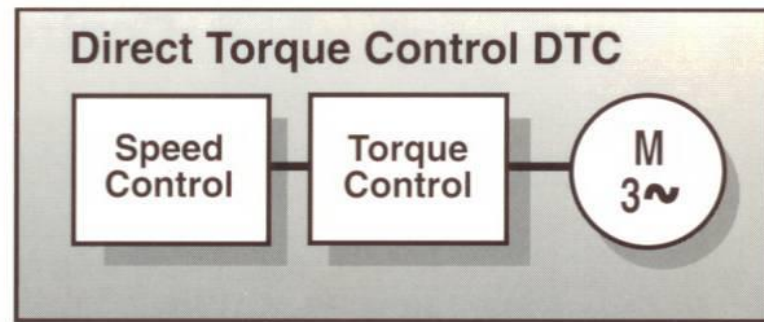


Figure 4: Control loop of an AC Drive using DTC

Izvor: ABB Technical Guide No.1

Utjecaj primjene frekvencijskih pretvarača na neka svojstva elektromotornog pogona

- Premda upotreba frekvencijskih pretvarača ima značajnih prednosti pred nereguliranim pogonima njihova upotreba unosi i neke nove probleme s aspekta zagrijavanja, utjecaja na mrežu i primjene motora u eksplozijski ugroženom prostoru.

Detaljnije možete saznati u [IEC 60034-25](#)

- Zbog nelinearnih karakteristika pretvarača naponi i struje koje motori uzimaju iz njih **nisu sinusnog oblika**, kao kod direktnog napajanja iz mreže, već sadrže različite **više harmoničke članove**.
- Pri reguliranju brzine vrtnje na niže slabi hlađenje pa se **temperature motora povećavaju** ako nije ugrađena nezavisna ventilacija motora.

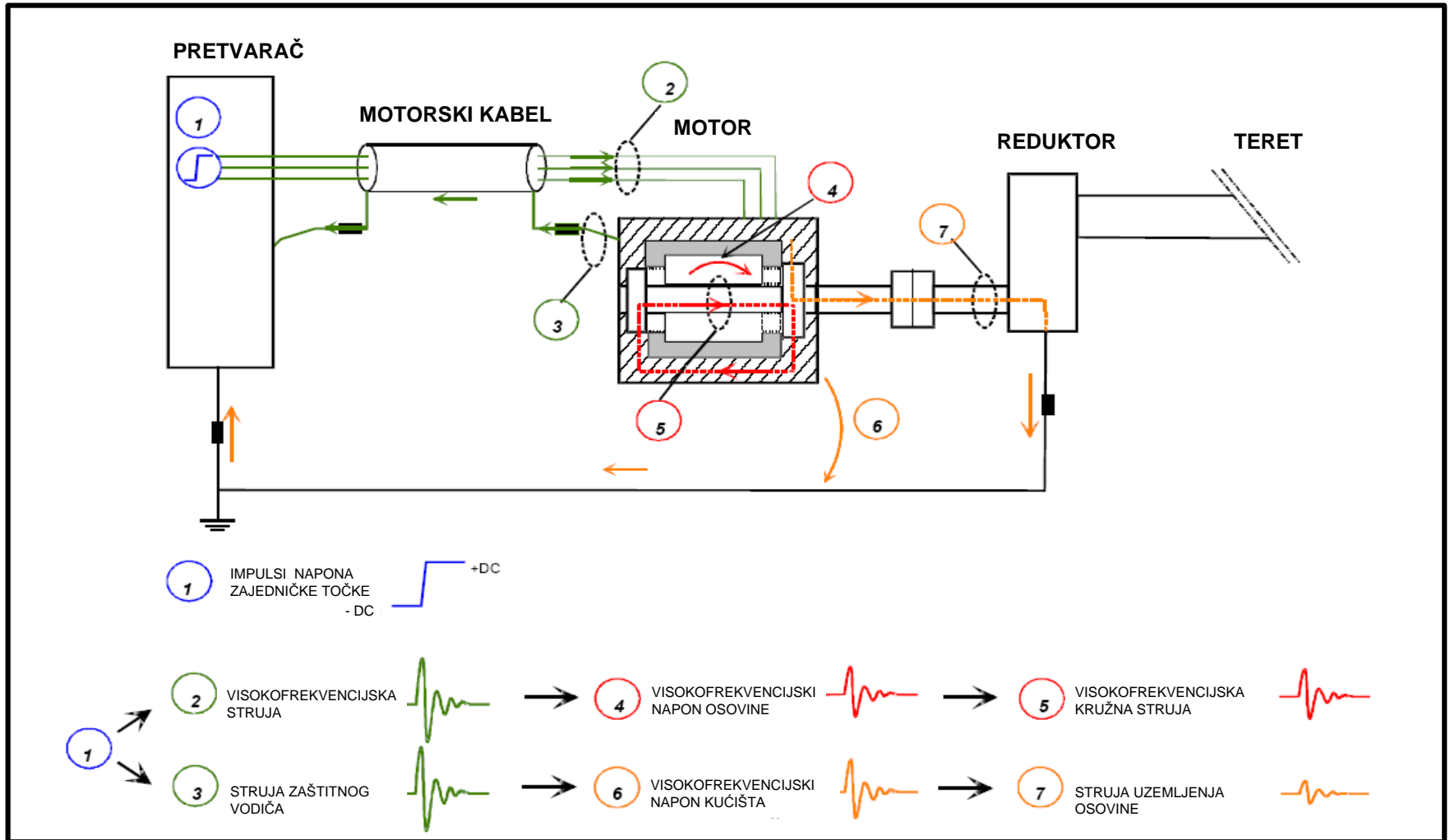
Viši harmonički članovi

- Posljedice viših harmoničkih članova u strujama motora su dodatna zagrijavanja, naročito površinskih dijelova rotora, osovine motora te namota statora i rotora.
- Viši harmonici u naponima na stezaljkama motora izazivaju dodatna naponska naprezanja izolacije motora (prenaponi zbog komutacije poluvodičkih elemenata du/dt).
- U električnoj mreži iz koje se napajaju pretvarači frekvencije mogu se pojaviti viši harmonički članovi koji deformiraju oblike napona i struja (pogoršanje kvalitete električne energije).
- Bitno je istaknuti da se na motor opće namjene ne smije primijeniti pretvarač frekvencije bez temeljitog analiziranja svih problema koje unosi frekvencijski pretvarač.

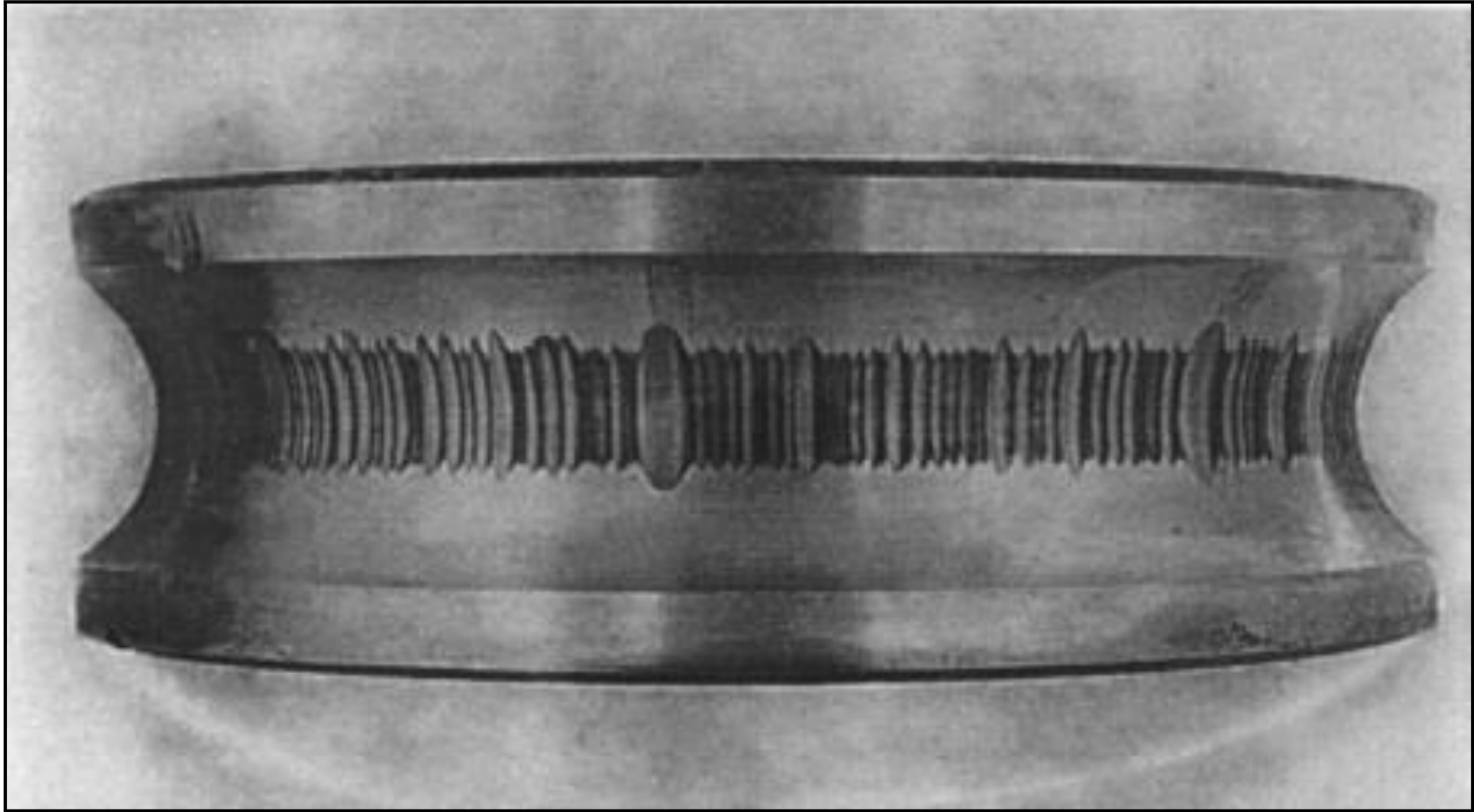
Problem ležajnih struja reguliranih pogona

- Problem ležajnih struja i osovinskih napona električnih strojeva zbog nesimetrije magnetskih krugova je davno poznat i rješava se na klasične načine.
- U modernim reguliranim pogonima generiraju se ležajne struje zbog nesimetričnosti napona zvjezdišta motora (engl. *common-mode voltages*), brzih porasta napona du/dt i visokih sklopnih frekvencija.
- Da se izbjegnu oštećenja ili uništenja ležaja moraju se upotrebljavati specijalni filtri na izlazu iz pretvarača, te simetrični pažljivo odabrani energetske kabele. Najčešće treba izolirati ležaje. Što je regulirani motor veći to je i problem veći. Uputstva daje isporučitelj pretvarača.

Ležajne struje u frekvencijski reguliranom pogonu



Unutrašnji prsten kugličnog ležaja oštećenog ležajnim strujama



Izvor: IEC

Zaštita motora u reguliranim pogonima

- U suvremenim reguliranim pogonima pojedini klasični elementi zaštite motora postaju nepotrebni, jer su njihove funkcije kao i dodatni zahtjevi ugrađeni u frekvencijski pretvarač.
- Upravljački uređaj pretvarača preuzima zaštitne funkcije: kratkog spoja, preopterećenja, povećanja napona, sniženja napona, povećanja i smanjenja frekvencije, gubitka faze, zemnog spoja, ...

Pretvarači napona i frekvencije instalirani u MCCC Molve III, (1800 + 1800 + 450) kW



Pretvarači su za motore u
protueksplozijskoj izvedbi Ex p

Regulirani EMP pumpe u rafineriji nafte, strana ventilacija, protueksplozijska izvedba EX d



Osigurači motora s prethodnog slajda, 800 A, 690 V



Međunarodne norme za motore u reguliranim pogonima

IEC 60034-25

- Preporučuje se pročitati:

IEC 60034-25 IEC Rotating electrical machines-part 25: Guide for the design and performance of cage induction motors for converter supply.

U ovoj IEC normi su detaljno obrađeni problemi koji se pojavljuju pri upotrebi frekvencijski reguliranih kavezniha asinkronih motora. Uvedeni su i tehnički pojmovi i definicije.