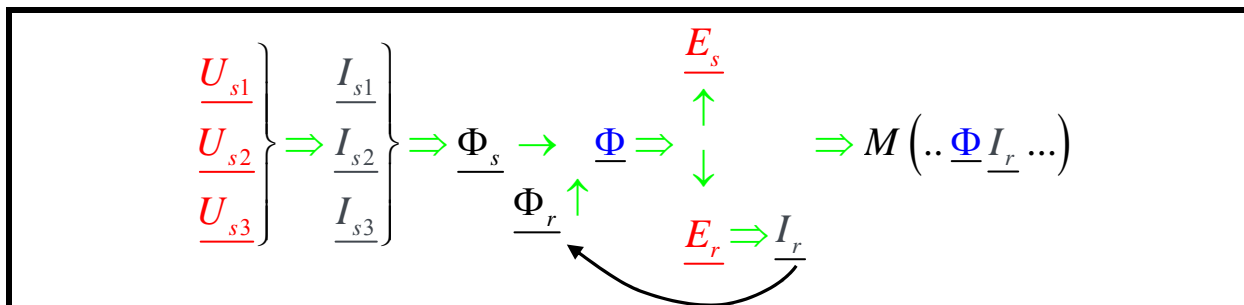


Opis delovanja: trifazni AM obratuje na principu vrtilnega magnetnega polja, ki ga ustvari tok skozi statorsko navitje, ki je priključeno na trifazni vir napetosti. V statorskem in rotorskem navitju se inducirata napetosti \underline{E}_s in \underline{E}_r , ki v rotorju požene tok \underline{I}_r . Ta v interakciji z magnetnim pretokom $\underline{\Phi}$ ustvari vrtilni moment AM.



Pogoj za vrtilno polje

- 3 fazno statorsko navitje – krajevno premaknjeno za 120 st.
- trifazni vir napetosti – fazne napetosti so časovno premaknjene za 120 st.

▶ enake amplitude faznih napetosti

**SIMETRIČNO
VRILNO
POLJE**

$$E_s = 4 \cdot f_{os} \cdot f_{ns} \cdot N_s \cdot f_s \cdot \Phi \Rightarrow \langle 4.44 \cdot f_{ns} \cdot N_s \cdot f_s \cdot \Phi \rangle = K \cdot f_s \cdot \Phi$$

$$E_r = 4 \cdot f_{or} \cdot f_{nr} \cdot N_r \cdot f_r \cdot \Phi \Rightarrow \langle 4.44 \cdot f_{nr} \cdot N_r \cdot f_s \cdot \Phi \rangle = K_r \cdot f_r \cdot \Phi$$

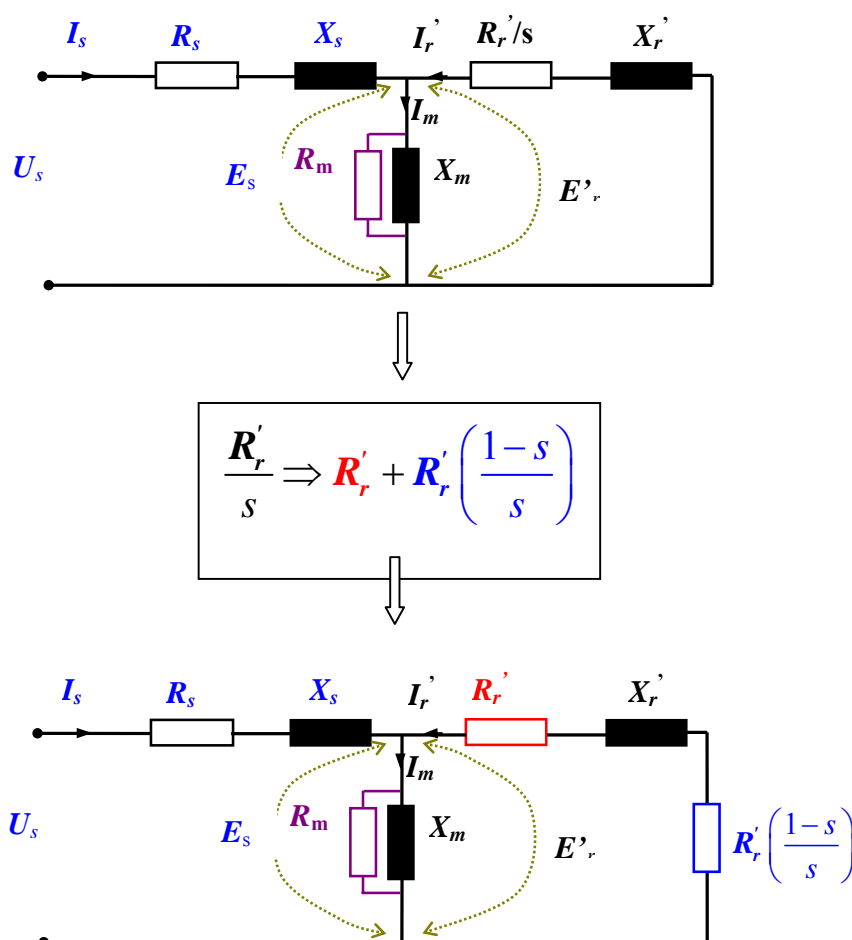
f_s, f_r	frekvenca statorja oz. rotorja
N_s, N_r	število ovojev statorskega oz. rotorskega navitja
f_{os}, f_{or}	faktor oblike statorskega oz. rotorskega navitja
Φ	magnetni pretok
n_s, n	sinhronsko število vrtljajev vrtilnega polja, število vrtljajev rotorja
Ω, Ω_s	mehanska kotna hitrost rotorja, mehanska sinhronska kotna hitrost vrtilnega polja
s	slip

Obratovalna stanja:

	n (vrtljaji)	E_r	s (slip)	f_r
Rotor stoji (KS)	0	E_{20}	1	f_s
Rotor se vrti	$0 < n < n_s$	$0 < E_r < E_{20}$	$0 < s < 1$	$0 < f_r < f_s$
Idealni PT	n_s	0 !!	0 !!	0 !!

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \left\langle n_s = \frac{f_s \cdot 60}{p} \right\rangle, \quad \Omega_s = \frac{2\pi f_s}{p}, \quad E_r = s E_{20}, \quad f_r = s f_s$$

Nadomestno vezje AM



$$\left. \begin{aligned} P_{meh} &= m_r \cdot I_r'^2 \cdot R_r' \left(\frac{1-s}{s} \right) \\ P_{cur} &= m_r \cdot I_r'^2 \cdot R_r' \end{aligned} \right\} \frac{P_{meh}}{P_{cur}} = \frac{m_r \cdot I_r'^2 \cdot R_r' \left(\frac{1-s}{s} \right)}{m_r \cdot I_r'^2 \cdot R_r'} = \frac{1-s}{s}$$

$$P_{\delta} = P_{cur} + P_{meh} = m_r \cdot I_r'^2 \cdot R_r' + m_r \cdot I_r'^2 \cdot R_r' \left(\frac{1-s}{s} \right) = m_r \cdot I_r'^2 \cdot \frac{R_r'}{s} = \frac{P_{cur}}{s}$$

$$M_{meh(i)} = \frac{P_{meh}}{\Omega} = \frac{P_{cur}}{\Omega_s (1-s)} \left(\frac{1-s}{s} \right) = \frac{1}{\Omega_s} \frac{P_{cur}}{s} = \frac{P_{\delta}}{\Omega_s}$$

$M_{meh(i)}$... idealni mehanski moment v katerem še ni upoštevan moment zaradi trenja in ventilacije

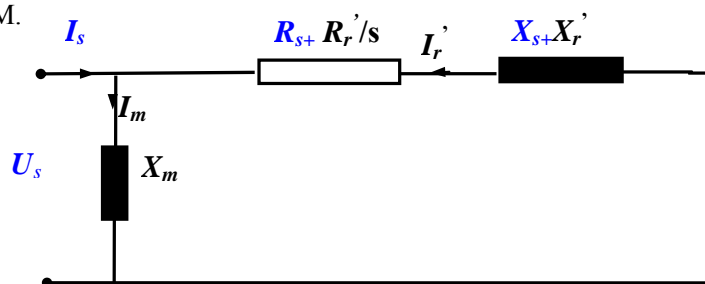
Izračun momenta AM:

$$M_{meh(i)} = \frac{P_{meh}}{\Omega} = \frac{P_{cur}}{\Omega_s (1-s)} \left(\frac{1-s}{s} \right) = \frac{1}{\Omega_s} \frac{P_{cur}}{s} = \frac{P_\delta}{\Omega_s}$$

$$I_r' = \frac{E_r'}{\sqrt{R_r'^2 + X_r'^2}} = \left\langle E_r' = s E_{r0}' \right\rangle \frac{E_{r0}'}{\sqrt{\left(\frac{R_r'}{s} \right)^2 + \left(\frac{2\pi f_r L_r'}{s} \right)^2}}$$

$$M_{meh(i)} = \frac{m_r}{\Omega_s} I_r'^2 \cdot \frac{R_r'}{s} = \frac{m_r}{\Omega_s} \frac{E_r'^2}{R_r'^2 + X_r'^2} \frac{R_r'}{s} = \frac{m_r}{\Omega_s} \frac{E_{r0}'^2}{\left(\frac{R_r'}{s} \right)^2 + \left(\frac{2\pi f_r L_r'}{s} \right)^2} \frac{R_r'}{s}$$

Če poenostavimo zgornje nadomestno vezje (zanemarimo padec napetosti na statorju zaradi magnetilnega toka), dobimo naslednje vezje s pomočjo katerega izpeljemo enačbo za idealni mehanski vrtilni moment AM.

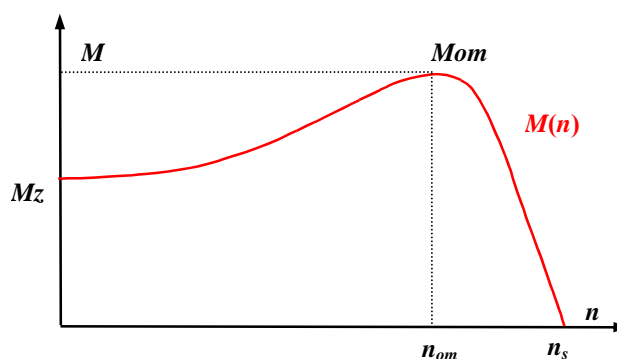


$$\sigma_1 = 1 + \frac{\Psi_s}{\Psi_g} \text{ Hopkinsov faktor}$$

$$X_i = X_s + \sigma_1 \cdot X_r'$$

$$M = \frac{m_s \cdot U_s^2}{\Omega_s \cdot s} \frac{R_r'}{\left[\left(R_s + \sigma_1 \frac{R_r'}{s} \right)^2 + X_i^2 \right]}$$

$$\Rightarrow M = \left(U_s^2, R_s, R_r', \overbrace{X_s, X_r'}^f, s \right)$$



S strani uporabnika, je najbolj zanimiva odvisnost momenta AM od:

- **statorske napetosti,**
- **frekvence,**
- **rotorske upornosti,**

saj lahko z vplivanjem na U_s , f_s in R_r (samo v primeru AM z navitim rotorjem) enostavno spreminjamo momentno karakteristiko AM in s tem prilagodimo motor zahtevam delovnega stroja.

Omahni moment:

$$\frac{\partial M}{\partial s} = 0 \rightarrow \begin{array}{l} M \Rightarrow M_{om} \\ s \Rightarrow s_{om} \end{array}$$

Karakteristika $M(n)$ oz. $M(s)$ doseže v točki $M_{om}-n_{om}$ oz. $M_{om}-s_{om}$ maksimalno vrednost (ekstrem), to je omahni moment (M_{om}). Enačbo za M_{om} dobimo z iskanjem ekstrema enačbe za vrtilni moment AM.

$$M_{om} = \pm \frac{m_s \cdot U_s^2}{\Omega_s \cdot 2} \frac{1}{\sigma_1 [\pm R_s + X_i]} \Rightarrow M_{om} \text{ (ni odvisen od } R_r \text{)}$$

$$s_{om} = \pm \frac{\sigma_1 \cdot R_r'}{\sqrt{R_s^2 + X_i^2}} \Rightarrow s_{om} \text{ (je odvisen od } R_r \text{)}$$

Klossova enačba

$$\frac{M}{M_{om}} = \frac{2 \left(1 + s_{om} \frac{R_s}{\sigma_1 R_r'} \right)}{\frac{s}{s_{om}} + \frac{s_{om}}{s} + 2 \cdot s_{om} \frac{R_s}{\sigma_1 R_r'}} = \frac{2 + \beta}{\frac{s}{s_{om}} + \frac{s_{om}}{s} + \beta}, \quad \beta = 2 \cdot s_{om} \frac{R_s}{\sigma_1 R_r'}$$

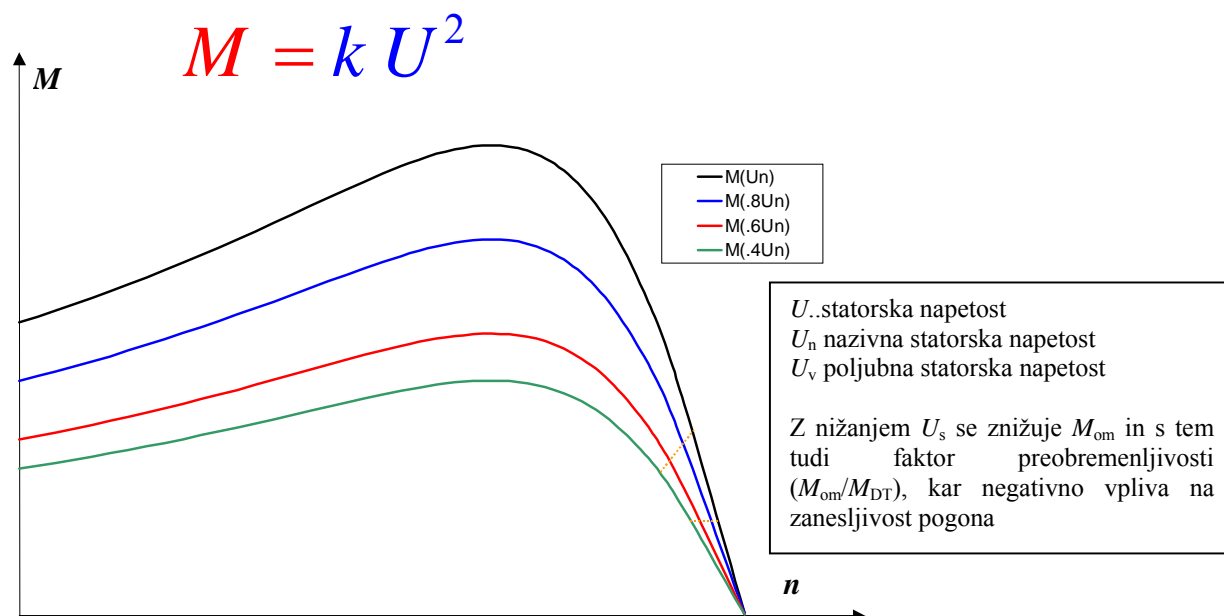
$$\frac{M}{M_{om}} = \frac{2 + \beta}{\frac{s}{s_{om}} + \frac{s_{om}}{s} + \beta} \Rightarrow \frac{M}{M_{om}} = \frac{2}{\frac{s}{s_{om}} + \frac{s_{om}}{s}}$$

motor : M_{omM} , $s_{om(\text{motor})} = s_{om}$

generator : $M \rightarrow M_{omG}$, $s \rightarrow s_{om(\text{generator})} = -s_{om}$

$$\frac{M}{M_{omM}} = \frac{2 + \beta}{\frac{s}{s_{om}} + \frac{s_{om}}{s} + \beta} \Rightarrow \frac{M_{omG}}{M_{omM}} = \frac{2 + \beta}{\frac{-s_{om}}{s_{om}} + \frac{s_{om}}{-s_{om}} + \beta} = -\frac{2 + \beta}{2 - \beta}$$

Odvisnost momentne karakteristike AM od statorske napetosti (U_s)



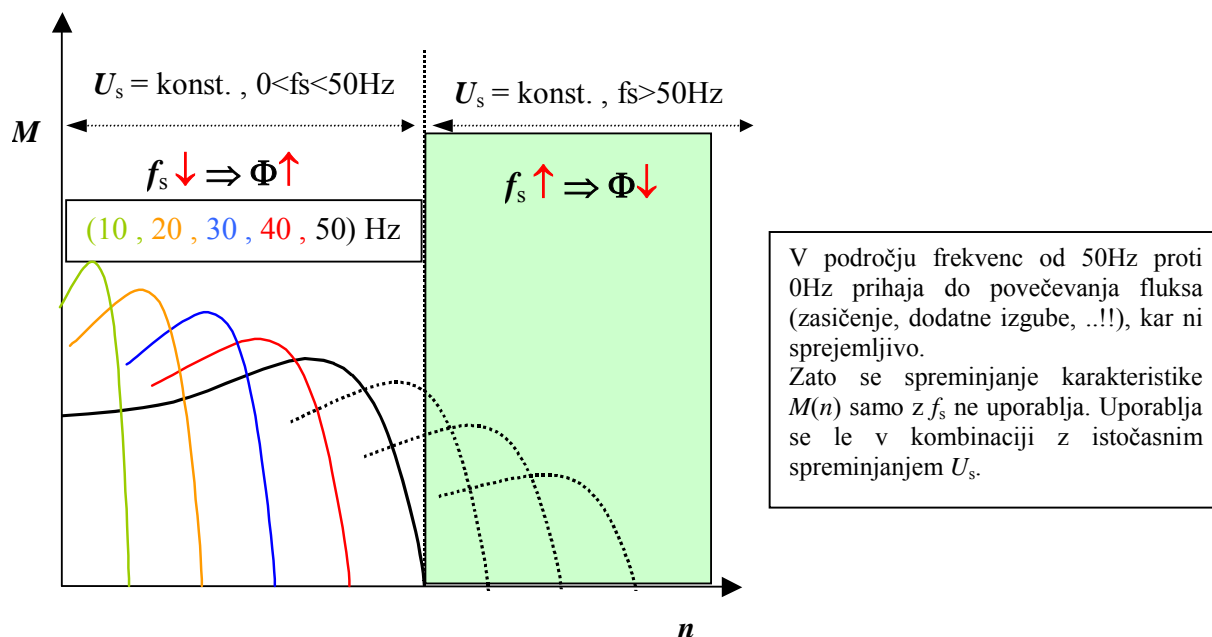
$$\frac{M_{u_x}}{M_{u_n}} = \frac{k U_x^2}{k U_n^2} \Rightarrow M_{u_x} = M_{u_n} \left(\frac{U_n}{U_x} \right)^2 \Rightarrow M_{om,u_x} = M_{om,u_n} \left(\frac{U_n}{U_x} \right)^2$$

\downarrow \downarrow
 Omahni moment Omahni moment pri
 pri napetosti U_x nazivni napetosti U_n

Zaradi spreminjanju napetosti (običajno pod nazivno vrednost) prihaja do **zmanjševanja faktorja preobremenljivosti**

$$U_x < U_n \Rightarrow M_{om,u_x} < M_{om,u_n} \Rightarrow \left(\frac{M_{om,u_x}}{M_{DT}} \right) \downarrow$$

Odvisnost momentne karakteristike AM od statorske frekvence pri $U_s = \text{konst.}$

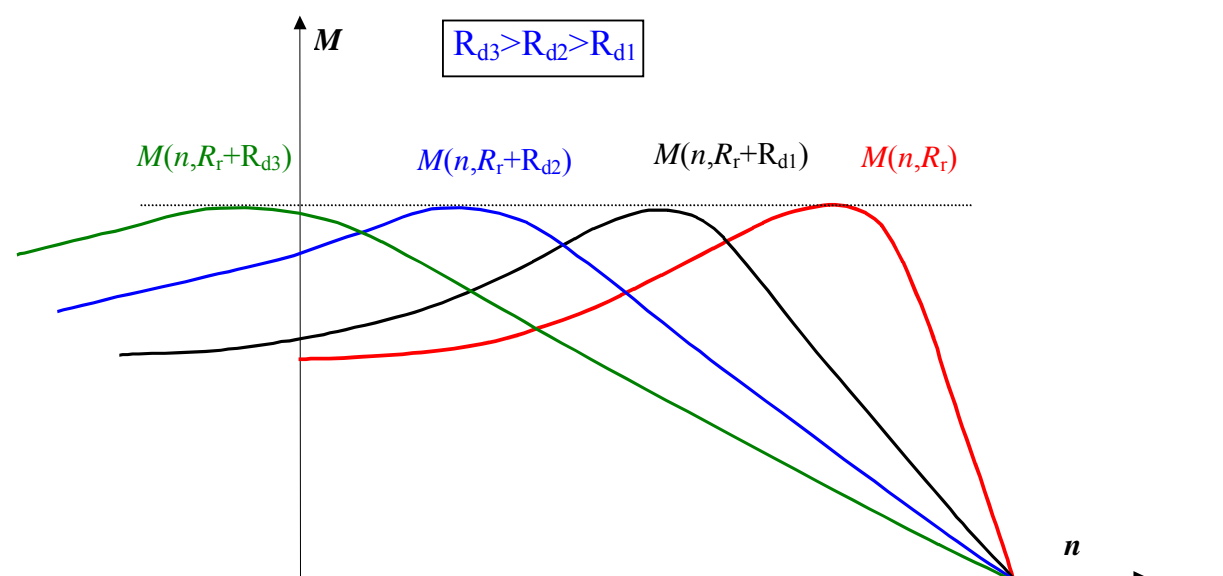


Odvisnost momentne karakteristike AM z drsnimi obroči od rotorske upornosti R_r

S spreminjanjem rotorske upornosti :

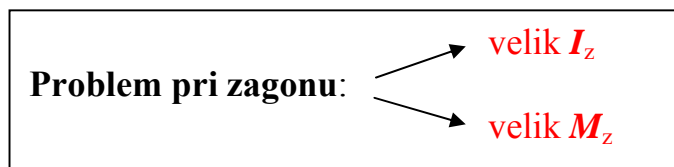
➤ se M_{om} ne spreminja

➤ s_{om} se spreminja in sicer se povečuje $s_{om} = \pm \frac{\sigma_1 \cdot R_r'}{\sqrt{R_s^2 + X_i^2}}$



3.2 Zagon AM

Tovarne običajno izdelujejo motorje približno od 5KW naprej v obeh izvedbah: s kratkostično kletko oz. z navitim rotorjem. Zraven standardnih AM s kratkostično kletko ponujajo tudi posebne izvedbe z zmanjšanim I_z . Izbor motorja je odvisen od vrste zagona.



- s spremembo statorske napetosti
- s spremembo statorske napetosti in frekvence
- s spremembo rotorske upornosti (samo AM z drsnimi obroči)

- direktni zagon (do cca. 4KW)
- zagon z znižano vrednostjo I_z in M_z (mehki zagon)

- zagon Y/ Δ
- zagon z avtotransformatorjem
- zagon s pomočjo odcepov na statorju
- zagon s pomočjo naprave za mehki zagon

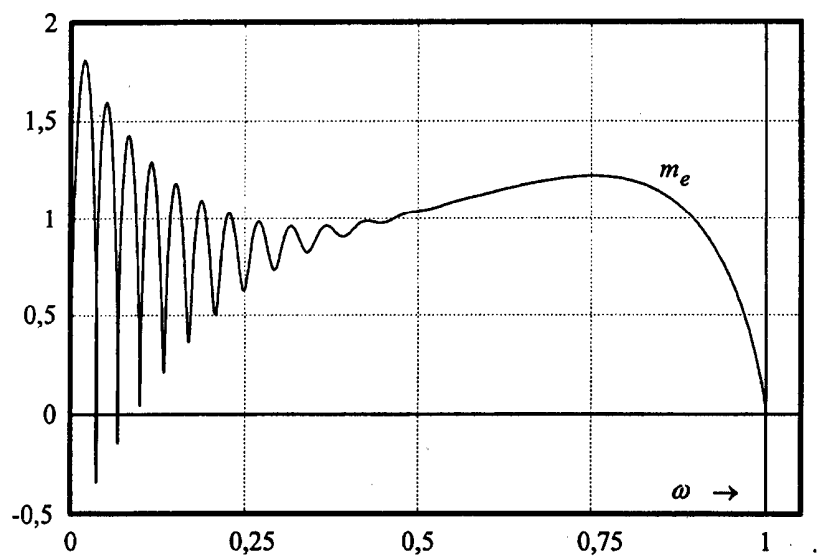
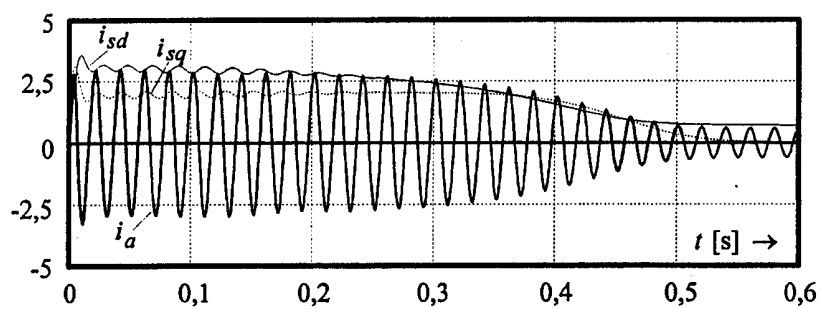
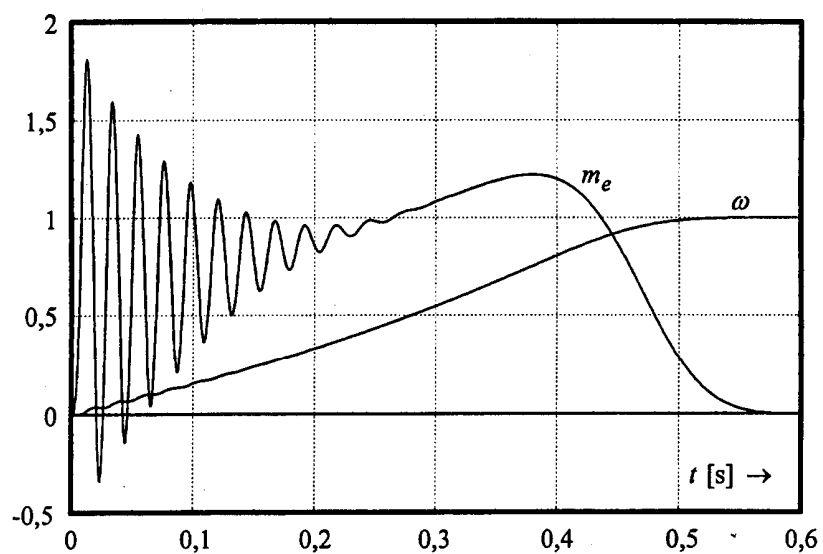
} U_s

- frekvenčni zagon } f_s, U_s

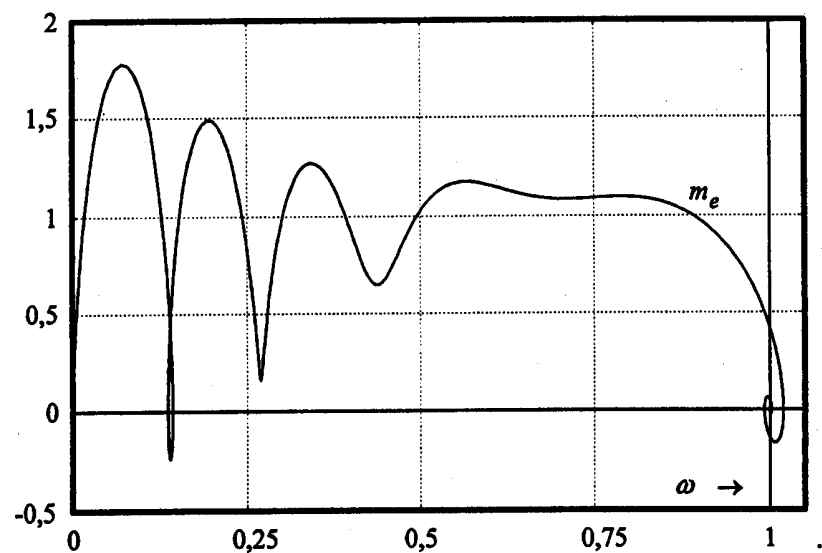
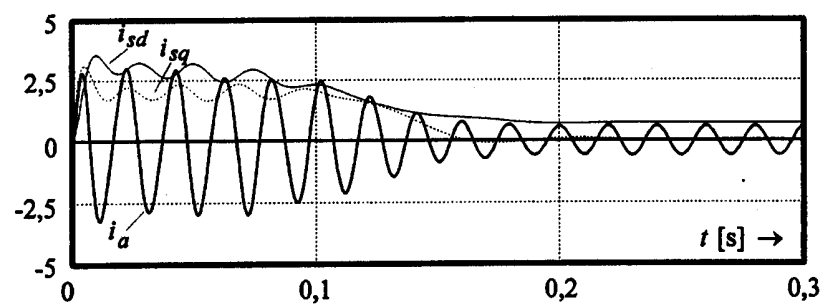
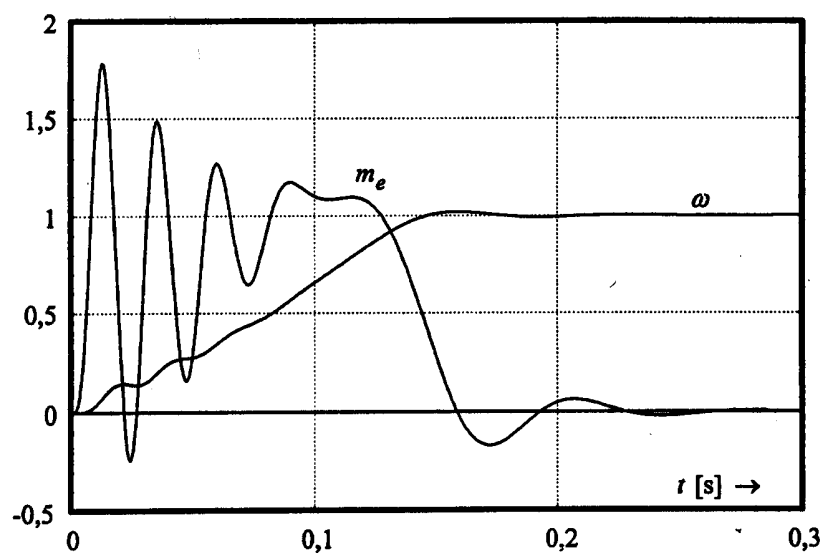
- zagon s predupori } R_r

- s pomočjo drsne sklopke

Primer zagona AM: $T_r=23.04\text{ ms}$, $T_s=46.20\text{ ms}$, $T_m=454\text{ ms}$ (veliki vztrajnostni moment), $T_m/T_r=19.7$, $T_m/T_s=9.8$ (primer iz knjige Vladan Vučković: Električni pogoni)



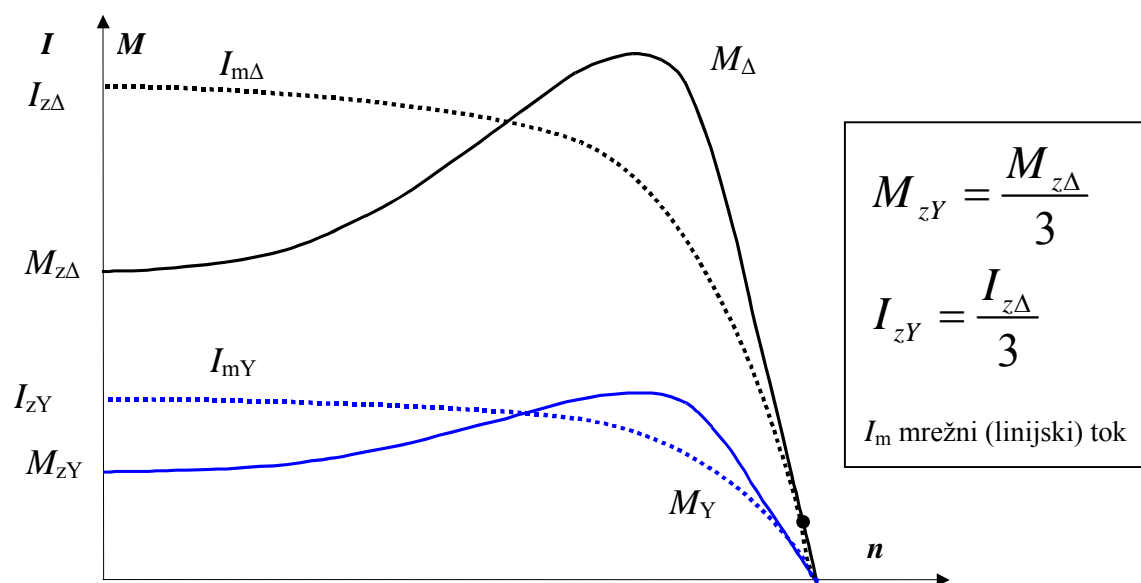
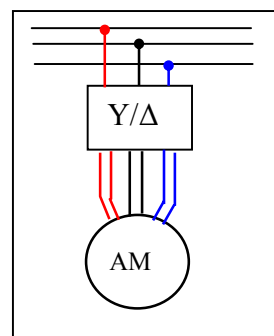
Zagon AM: $T_r=23.04\text{ ms}$, $T_s=46.20\text{ ms}$, $T_m=127\text{ ms}$ (mali vztrajnostni moment),
 $T_m/T_r=5.5$, $T_m/T_s=2.7$ (primer iz knjige Vladan Vučković: Električni pogoni)



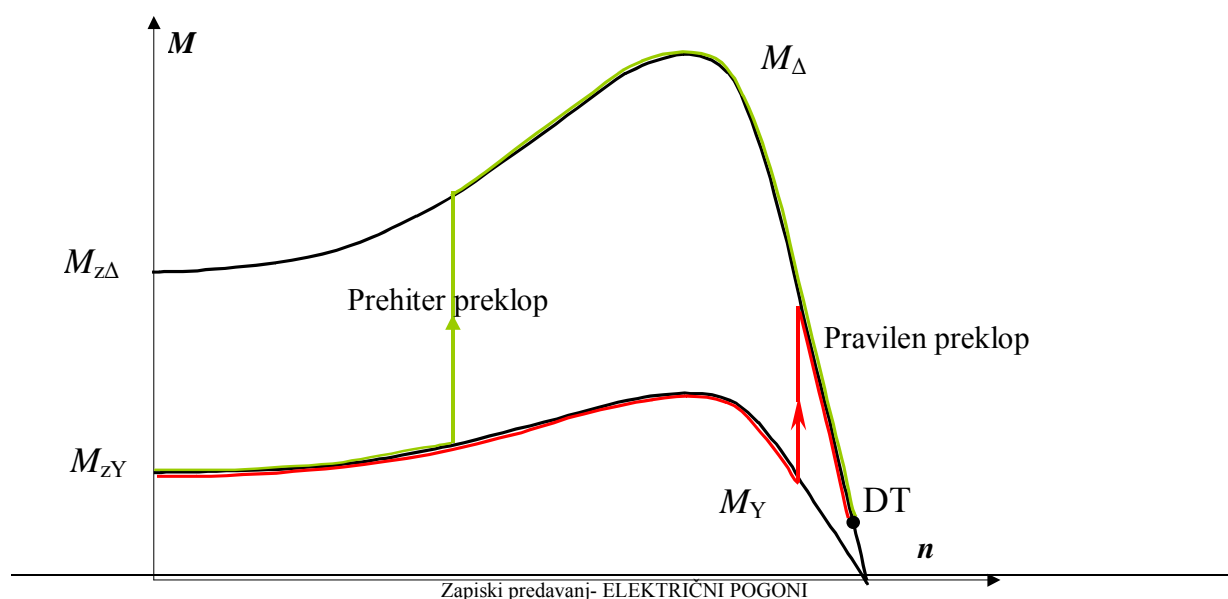
Zagon zvezda (Y)/ trikot (Δ)

Zahteve:

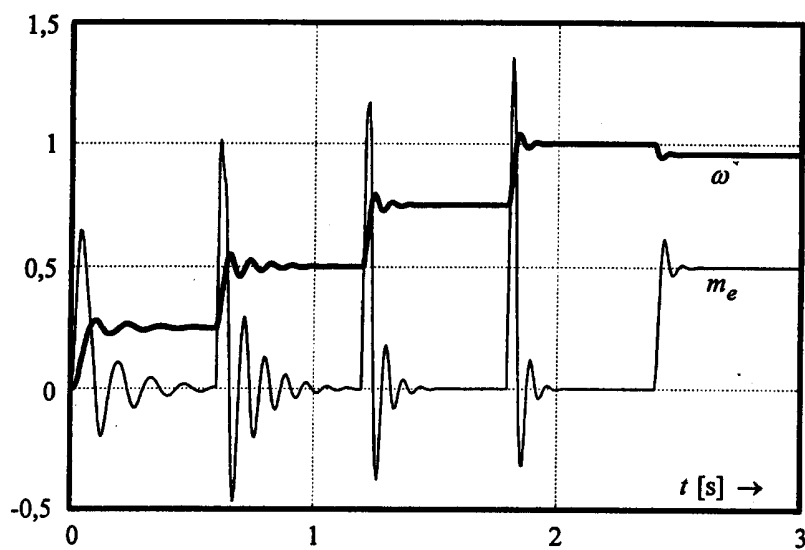
- Osnovna vezava motorja mora biti trikot
- dostopa do začetka in konca statorskega navitja



Preklop iz vezave zvezda v trikot mora biti opravljen dovolj pozno, kajti v primeru prehitrega preklopa ne dosežemo željenega znižanja momenta med zagonom.

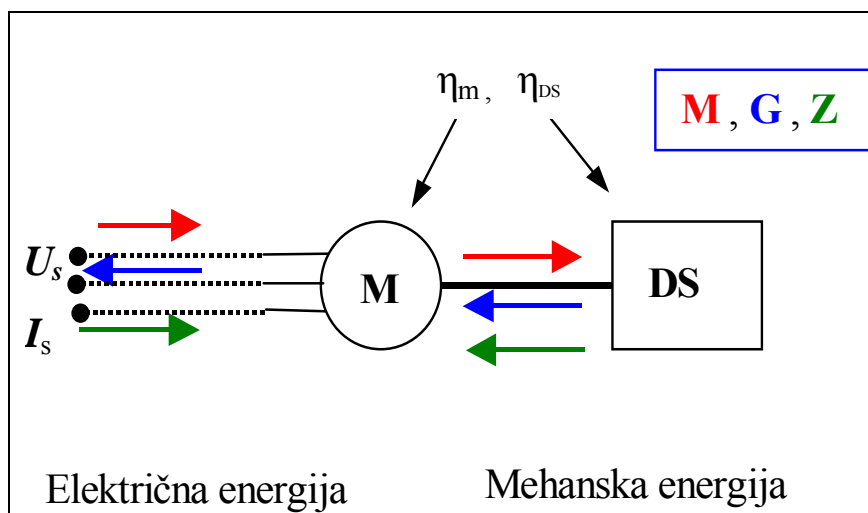


Frekvenčni zagon



Slika: primer stopenskega spreminjanja frekvence (12,5→25→37.5→50Hz)med zagonom AM)

3.3 Zaviranje asinhronskih motorjev



ZAVIRANJE:

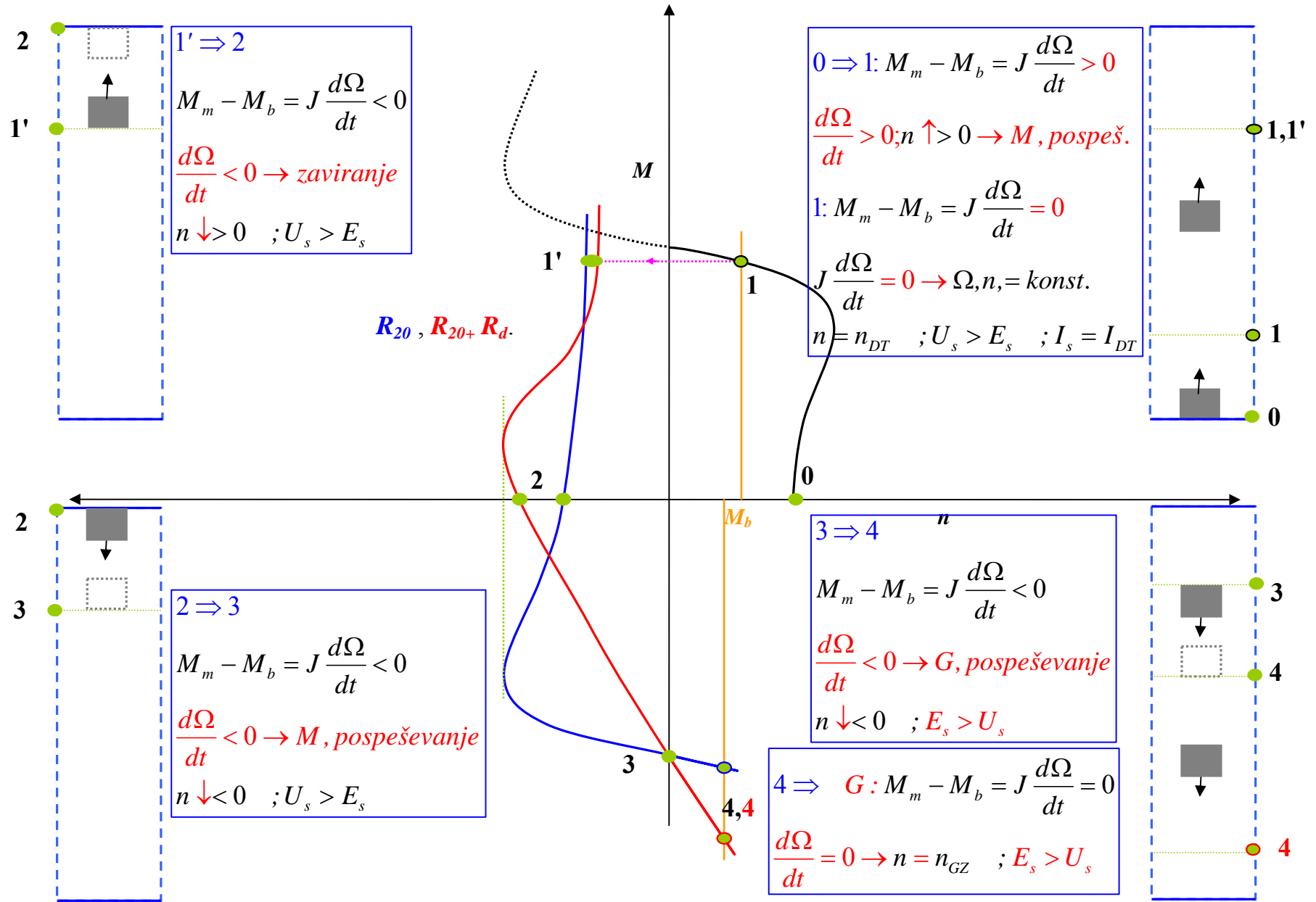
koristno zaviranje (del mehanske energije se lahko pretvori v električno energijo oz. vrne v omrežje)

➤ **GENERATORSKO**

zaviranje z izgubo (mehanske energije se pretvori v toploto – segrevanje ES ↑)

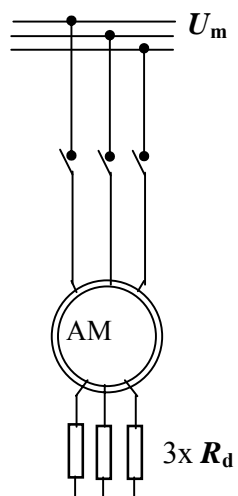
➤ **ELEKTRODINAMIČNO (UPOROVNO)**

➤ **PROTITEČNO (PROTITOČNO)**



ELEKTRODINAMIČNO ZAVIRANJE

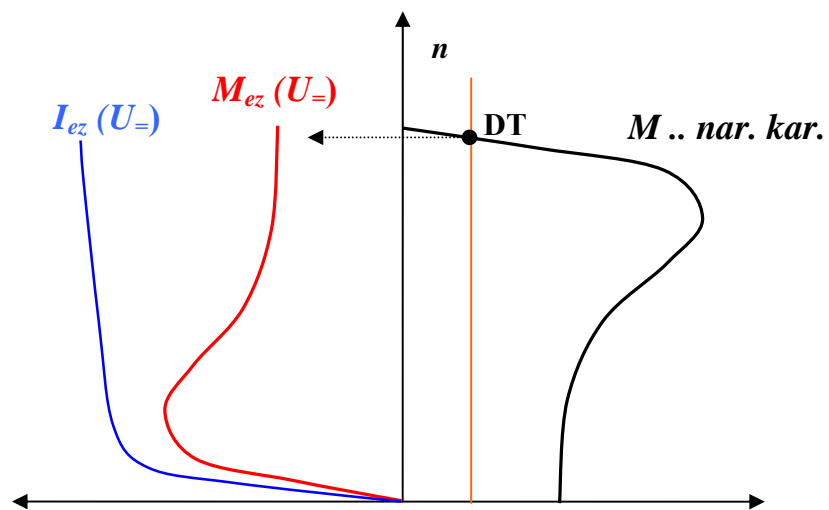
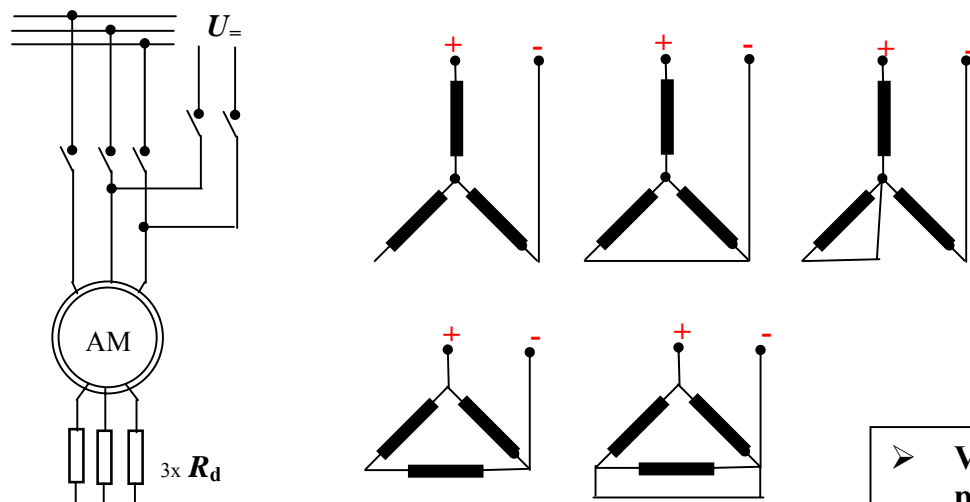
Če statorsko navitje odklopimo od napajanja in ga zaključimo preko uporov ali brez njih, se v statorju inducira napetost. \Rightarrow Ta požena tok I_r , ki ustvari **zavorni moment** \Rightarrow ta traja zelo kratko, tako da je takšen način zaviranja neuporaben. Zaradi tega je potrebno dodatno vzbujanje za zaviranje.



Možna sta dva načina:

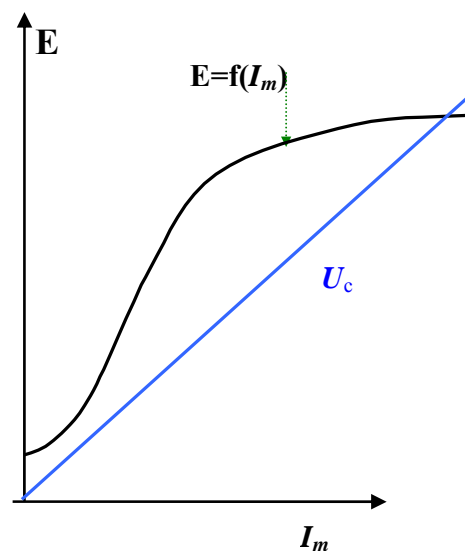
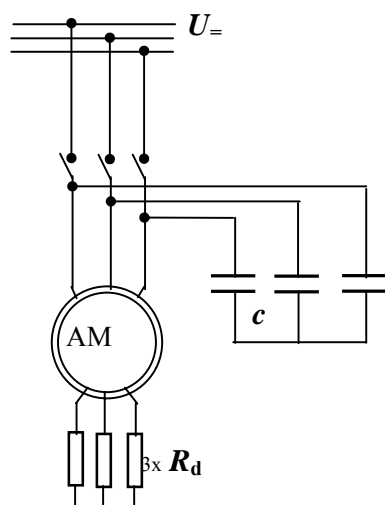
- z enosmernim vzbujanjem na statorju, **ko AS obratuje, kot sinhronski generator**
- s lastnim vzbujanjem, **ko obratuje AS kot asinhronski generator.**

1. Pri zaviranju enosmernim vzbujanjem odklopimo statorsko navitje od mreže in priklopimo na stator enosmerno napajanje. Rotor kratko vezemo; pri AM z drsnimi obroči preko uporov s katerimi omejimo tok in nastavljamo različne zavorne karakteristike. **Stroj obratuje kot sinhronski generator**, ki ima karakteristike v drugem kvadrantu z začetkom v koordinatnem izhodišču. Možne so različne vezave statorskega navitja na enosmerno napajanje.



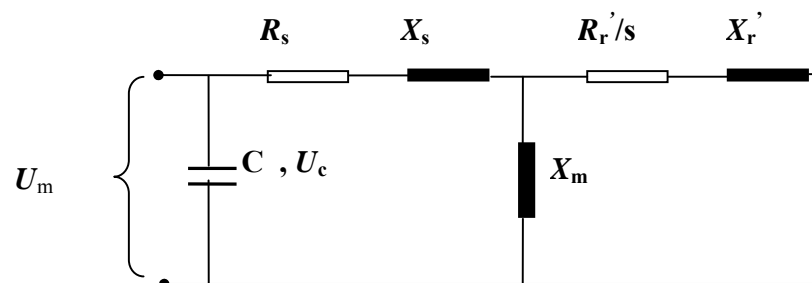
- Vrednost omahnega momenta je sorazmerna pritisnjeni enosmerni napetosti na statorju, vrednost omahnega slipa pa rotorski upornosti.
- Prednost takšnega zaviranja je v majhnih dinamičnih izgubah (le 1/3 izgub kot pri protitočnem zaviranju!), slabost pa, da se ne more zavrteti v nasprotno smer.

2. Pri zaviranju s samovzbujanjem motor odklopimo od mreže in k statorskemu navitju priključimo kondenzatorsko baterijo. **Pri tem obratuje AM sedaj kot samovzbudni asinhronski generator**, ki črpa jalovo energijo iz kondenzatorske baterije. Da pa pride do samovzbujanja, je potrebno izbrati ustrezne kondenzatorje, glede na karakteristiko praznega teka oz. X_m . To pomeni, da pride do presečišča karakteristike $E=f(I_m)$ in premice samovzbujanja I_m / ω_{el} .



Nadomestna shema po procesu samovzbujanja:

$$U_c = \frac{I_c}{2\pi f C} = U_m$$



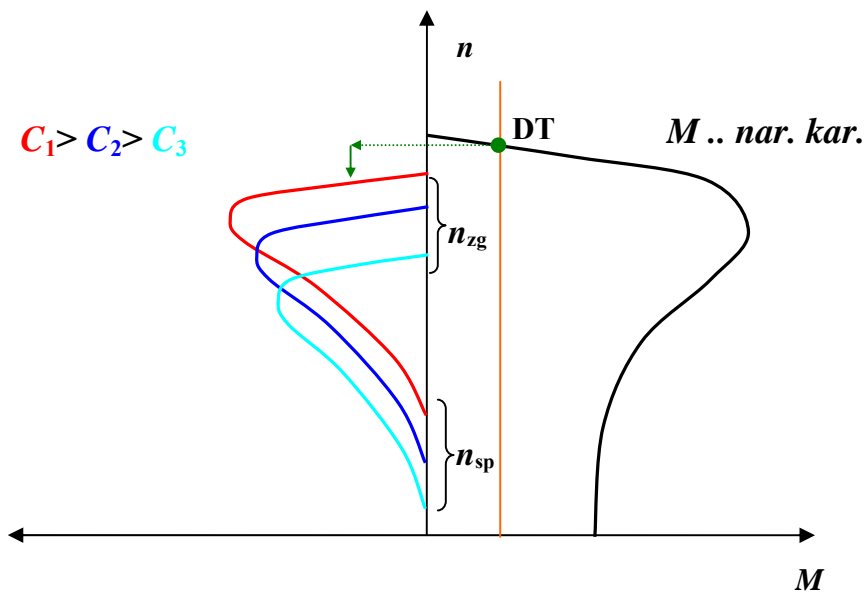
Pri določeni ω_{el} manjši od minimalne ω_{el} ne pride več do samovzbujanja. S tem so določeni tudi minimalni vrtljaji n_{sp} (ω_{sp}) potrebni za samovzbujanja, ki so določeni z enačbo.

$$\omega_{sp} = \omega_s \sqrt{\frac{X_c}{X_m}} = \frac{\omega_s}{\sqrt{2\pi f_1 X_m C}}$$

Ker pri vrtljajih manjših od n_{sp} (ω_{sp}) ni samovzbujanja nam ti vrtljaji predstavljajo tudi najnižjo točko mehanske karakteristike. Podobno lahko izrazimo tudi največje vrtljaje na zavorni karakteristiki, ki so podani z enačbo

$$\omega_{zg} = \omega_s \left(1 + \frac{R_2'}{R_1}\right) \sqrt{\frac{1}{2\pi f_1 (X_1 + X_2') C}}$$

- Iz obeh enačb se vidi, da se z večanjem kapacitivnosti kondenzatorja, zmanjšuje tako ω_{sp} kot ω_{zg} .
- Slabost takšnega zaviranja je visoka cena kondenzatorske baterije in nezmožnost zaviranja pri nizkih vrtljajih.



3.4 Spreminjanje vrtljajev (n) asinhronskemu motorju

Iz enačb za moment in vrtljaje, vidimo da lahko vrtljaje AM spreminjamo na različne načine.

$$M = g(U_s^2, f_s, R_r) \quad (1)$$

$$n = n_s (1 - s) = \frac{f_s \cdot 60}{p} (1 - s) \quad (2)$$

- s spreminjanjem *slipa* (R_r)
- s spreminjanjem *števila polovih parov*

- s spreminjanjem U_s ,
- s spreminjanjem U_s in f_s

3.4.1 Spreminjanje vrtljajev s spreminjanjem *slipa* (R_r+R_d)

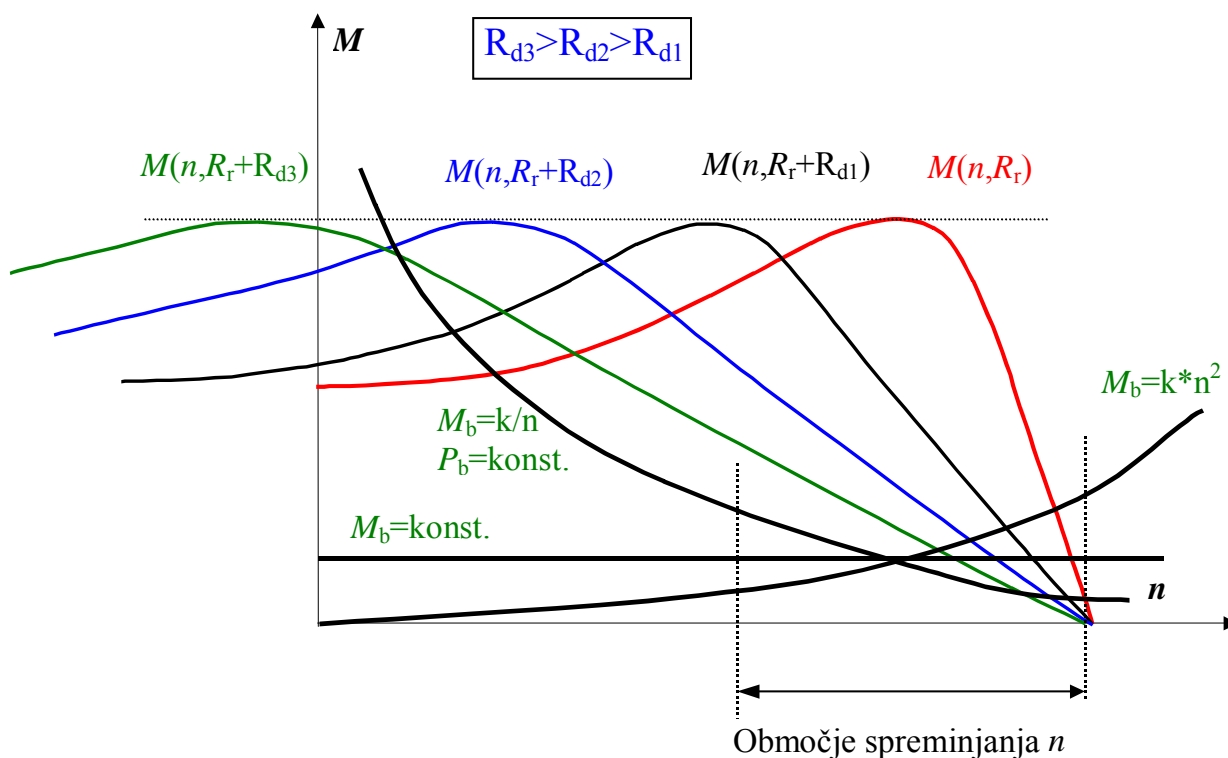
Vrtljaje lahko spreminjamo v področju pod naravno karakteristiko, tako da vključimo v rotorski tokokrog dodatne upore. Z dodajanjem R_d v rotorski tokokrog se spremeni omahni slip, medtem ko M_{om} ostane nespremenjen, kar pomeni, da postajajo momentne karakteristike bolj mehke.

Območje spreminjanja vrtljajev je razmeroma velika, odvisna pa od M_b .

Velika pomanjkljivost so **dodatne izgube** pri tem načinu nastavljanja n , ki zelo poslabšajo izkoristek pogona. **Znano je da so izgube P_{cu2} sorazmerne slipu, zato večje spreminjanje slipa tudi povečuje delež izgub v sprejemani moči P_1 .**

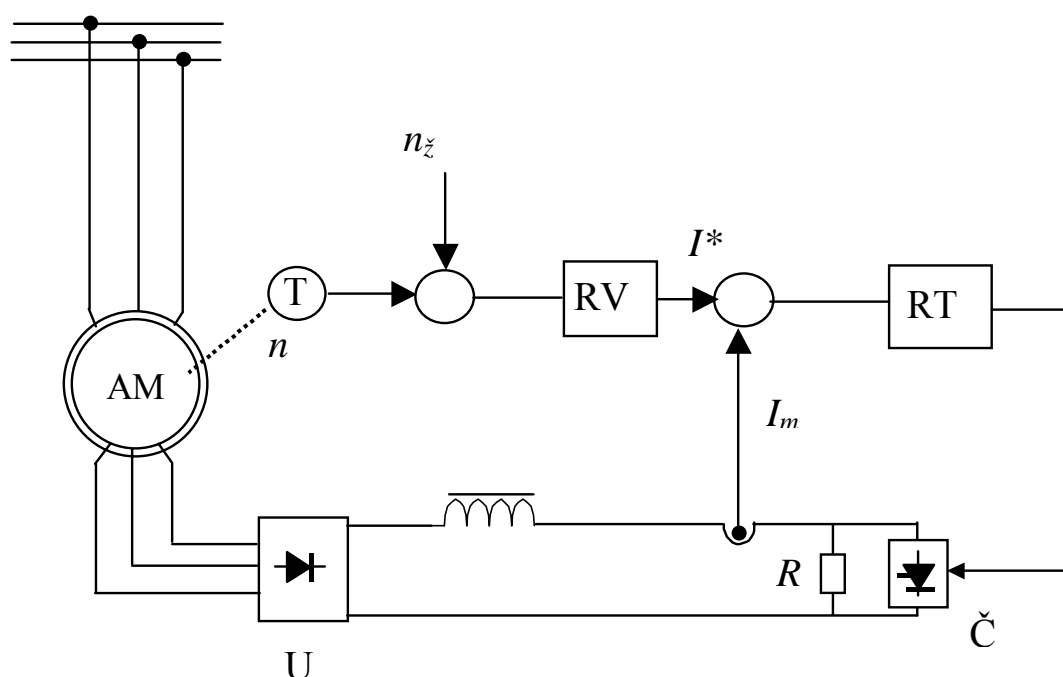
Posebno neugodno je takšno nastavljanje n pri bremenih s $P_b=konst.$ ali $M_b=konst.$

Zaradi tega uporabljamo ta način le v manjšem obsegu spreminjanja vrtljajev in še to pri kratkotrajnem obratovanju. Za trajno obratovanje bi potrebovali močnejši motor, ker bi se drugače motor preveč segrel. **Nekoliko ugodnejše so razmere pri bremenih, ki imajo ventilatorsko karakteristiko.** Zaradi močnega zmanjševanja momenta s padanjem n , se zmanjšuje tudi P_1 , tako da so izgube v dodatnem uporu razmeroma male in običajno ni problemov s hlajenjem.



Sodobna izvedba nastavljanja n z uporom, pa ni več izvedena z dodatnimi upori v rotorju, ampak s visokofrekvenčnimi tiristorskimi čoperskimi vezji dodanimi rotorskem tokokrogu. Takšno vezje omogoča stacionarno brezstopensko spreminjanje zunanje dodatne rotorske upornosti in predstavlja ceneno rešitev za spreminjanje n AM z drsnimi obroči in dobre dinamične lastnosti.

V rotorski tokokrog dodamo trifazni usmernik na katerega je priključen upor. Paralelno uporu se nahaja elektronsko stikalo, ki vključuje ali kratko veže upor z izbrano relativno vklopno dobo ε . S spreminjanje ε spreminjamo vrednost srednje vrednosti upora, ki je εR . Efekt je enak spreminjanju upornosti rotorskega tokokroga, vendar enostavnejši, predvsem pa omogoča zvezno spreminjanje n . Če dodamo uporu R še kondenzator C , lahko spreminjamo R v obsegu od 0 do neskončno. Vendar izgub na ta način ne zmanjšamo. Ta način običajno uporabljamo v kombinaciji s spreminjanjem napetosti na statorju.



n, n_z merjeni, zeleni vrtljaji

Ttahogenerator

RV, RT.. regulator vrtljajev oz. regulator toka

U, Č .. usmernik, čoper

3.4.2 Spreminjanje vrtljajev s spreminjanjem števila polov

$$n = n_s (1 - s) = \frac{f_s \cdot 60}{p} (1 - s) \quad (2)$$

Iz enačbe (2) se vidi, da lahko spreminjamo sinhronske vrtljaje motorju in s tem tudi momentno karakteristiko, če mu spreminjamo $2p$. To je možno izvesti z ustreznim prevezovanjem statorskega navitja. Spreminjanje je možno samo v stopnja. Pri tem smo kot uporabniki vezani na motorje za več hitrosti, ki so običajno izvedeni z navitji v Dahlander vezavi, ki mogoča spreminjanje sinhronskih n v razmerju 1:2, ali pa z ločenimi navitji, kjer je razmeje sinhronskih n lahko poljubno. Običajne kombinacije so naslednje:

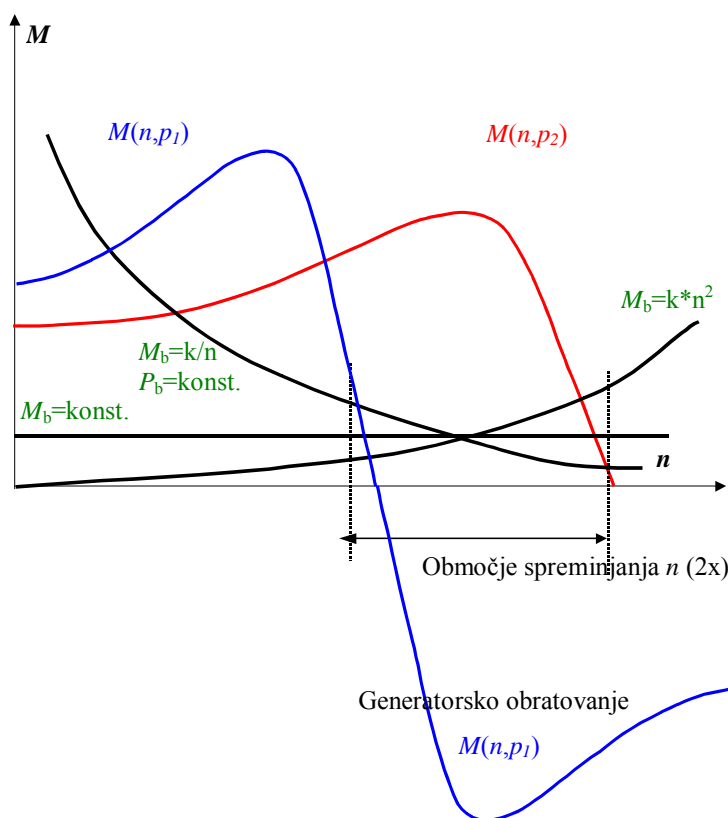
- 1 Dahlander navitje - 2 hitrosti
- 2 ločeni navitji - 2 hitrosti
- 3 Dahlander navitje + ločeno navitje - 3 hitrosti
- 4 2xDahlander navitje - 4 hitrosti

Motorje za več hitrosti uporabljamo pri pogonih **nekaterih obdelovalnih strojih, dvigal, ventilatorjev in črpalk pa tudi centrifug.**

(Uporaba 3,4 hitrosti v dvigalni tehniki, tudi do 5 hitrosti v sladkorni industriji, za centrifuge.)

Uporaba je omejena na motorje s kratkostično kletko, **ker moramo pri AM z drsnimi obroči preklapljati tudi navitje rotorja.**

Čeprav lahko spreminjamo vrtljaje le stopensko, pa je uporaba pogosta v enostavnih pogonih. Prednost pri uporabi teh motorjev je tudi v **zmanjšanju dinamičnih izgub pri zaviranju in zagonu pogonov.**

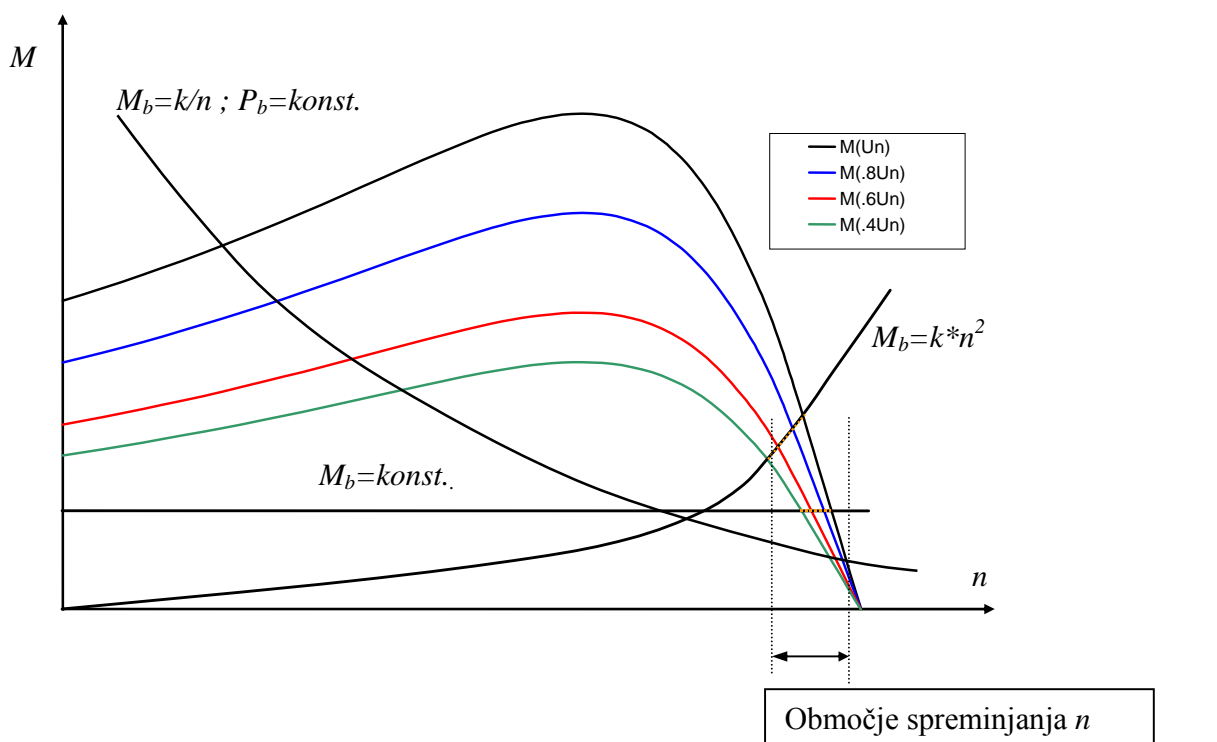


3.4.3 Spreminjanje vrtljajev s spreminjanjem U_s

Iz teorije AM vemo, da se M pri konstantnem slipu spreminja s kvadratom U_s , pri čemer je slip odvisen seveda od M_b . Zvezno spreminjanje n je omogočeno s brezstopenskim spreminjanjem statorske U . Pri zmanjševanju U se zmanjšujejo n in tudi M_{om} . **Obseg spreminjanja n je omejen z velikostjo M_b in samo obliko momentne karakteristike AM.** Običajno je možen obseg spreminjanja n zelo majhen, razen če omogočimo obratovanje tudi v nestabilnem delu karakteristike. Vendar pa to na drugi strani prinaša velike izgube, kar ni zaželeno.

Večje področje spreminjanja n lahko dosežemo pri AM z drsnimi obroči z veliko rotorsko upornostjo. Vendar se tudi tukaj ne moremo izogniti povečanju izgub. Je pa prednost ta, da se del izgub porabi zunaj motorja na uporih.

Če vzamemo primer spreminjanja n pri $M_b = \text{konst.}$ vidimo, da je takšen pogon nekvaliteten, posebej pri nizkih vrtljajih, saj je preobremenljivost (M_{om} / M_n) minimalna. Karakteristike so zelo mehke, kar pomeni, da majhna sprememba M_b povzroči veliko spremembo n . Praktično se ta način uporablja le za kratkotrajno obratovanje, **razen pri ventilatorskih bremenih**, kjer ni problemov s segrevanjem, zaradi istočasnega padanja karakteristike motorja in M_b pri nižanju n .



$$M_b = \text{konst.} \Rightarrow M = K \cdot \Phi \cdot I_r \cos \varphi_r = K \cdot \Phi^* \cdot I_r^* \cos \varphi_r^*$$

$$I_r^* \cos \varphi_r^* = \left(\frac{\Phi}{\Phi^*} \right) \cdot I_r \cos \varphi_r$$

3.4.4 Spreminjanje vrtljajev s spreminjanjem U_s in f_s

Ta način spreminjanja n je pogosto uporabljan in je najbolj primeren za motorje s kratkostično kletko.

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

S tem da spreminjamo frekvenco f_s spreminjamo n_s v relativno širokem obsegu (podobno kot pri enosmernem motorju n s spreminjanjem U_a). S spremembo f_s se spreminja tudi fluks in s tem momentne karakteristike AS (v področju od 0 – 50 Hz fluks narašča, kar ni ugodno). Zaradi tega moramo spreminjati tudi napetost U_s . Iz enačbe za inducirano napetost v statorskem navitju izhaja, da lahko obdržimo fluks nespremenjen ob ustrezni spremembi U_s in f_s .

$$\begin{array}{l}
 E_s = K \cdot \Phi \cdot f_s \quad \left. \begin{array}{l} \Rightarrow \Phi = konst. \Leftrightarrow \frac{E_s}{f} = konst. \\ \Rightarrow \Phi \approx konst. \Leftrightarrow \frac{U_s}{f} = konst. \end{array} \right\}
 \end{array}$$

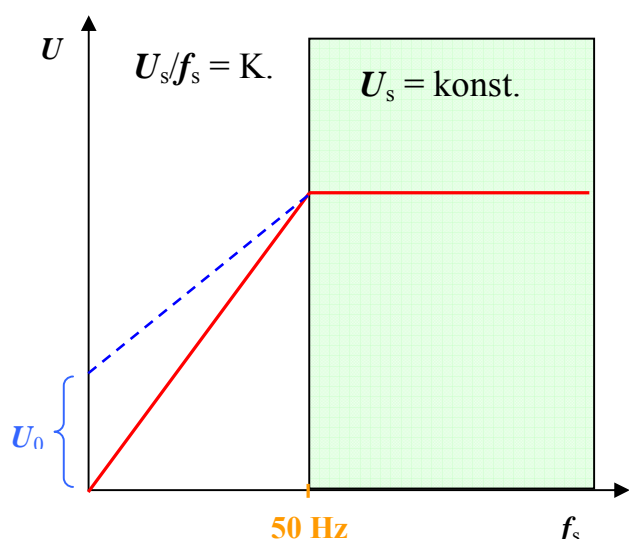
Glede na to, da lahko direktno spreminjamo le U_s ne pa E_s ob istočasnem spreminjanju f_s , zahtevata zgornji možnosti popolnoma različna pristopa (regulacijo oz. krmiljenje). V splošnem pogonu, je seveda vse odvisno od zahtev delovnega stroja, tako da je lahko tudi zahtevano

$$\begin{array}{l}
 E_s = K \cdot \Phi \cdot f_s \quad \left. \begin{array}{l} \Rightarrow \Phi \neq konst. \Leftrightarrow \frac{E_s}{f} \neq konst. \\ \Rightarrow \Phi \neq konst. \Leftrightarrow \frac{U_s}{f} \neq konst. \end{array} \right\}
 \end{array}$$

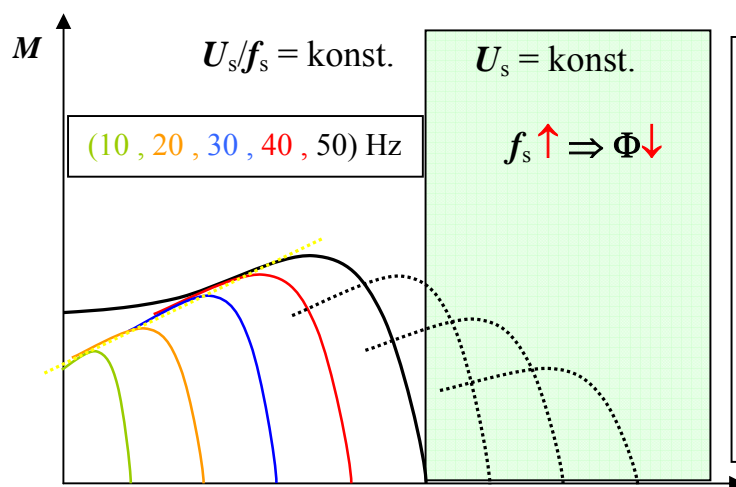
3.4.4.1 Obratovanje pri $U_s/f_s = \text{konst.}$

Razmerje $U_s/f_s = \text{konst.}$ je omejeno samo na področje od 0Hz do 50Hz. Fluks se v tem področju pri zmanjšanju f_s zmanjšuje, ker se zmanjšuje tudi E_s . Razlog tiči v dejstvu, da je statorski ohmski padec napetosti (induktivni padec je zanemarljiv) pri $M_b = \text{konst.}$ praktično konstanten v celotnem področju spreminjanja frekvence. Zaradi tega ima relativno večji vpliv pri nižjih frekvencah, kar pomeni večje zmanjšanje E_s (kot U_s) in s tem tudi zmanjševanje fluksa. To se kaže z zmanjševanjem omahnega momenta, kar lahko v nekaterih pogonih (bremenih) pripelje do problemov zaradi zmanjšanja faktorja preobremenitve.

$$M = \frac{p \cdot m_s}{2 \cdot \pi \cdot f_s} \cdot (I_r')^2 \frac{R_r'}{s} = \frac{p \cdot m_s}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{U_s}{f_s} \right)^2 \frac{f_r \cdot \frac{X_m}{R_r'}}{\left[R_s + \frac{f_r}{f_s} \cdot R_r' (X_m^2 - X_{11} \cdot X_{22}) \right]^2 + \left(X_{11} + \frac{f_r \cdot R_s \cdot X_{22}}{f_s \cdot R_r'} \right)^2}$$



$$X_{11} = X_m + X_s \quad , \quad X_{22} = X_m + X_r'$$

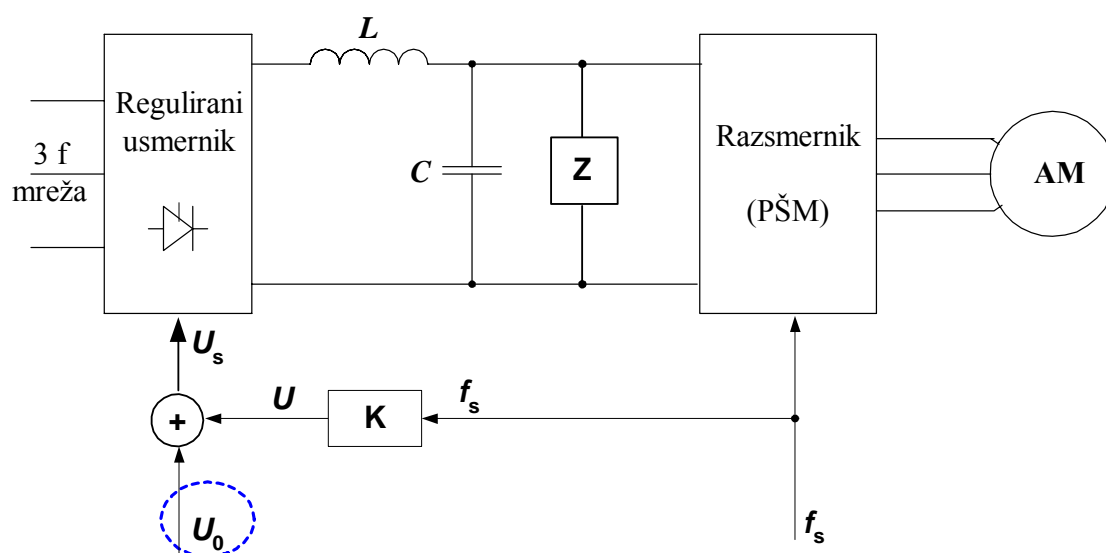


Če želimo obdržati približno konstantno vrednost **fluksa**, moramo kompenzirati statorski (ohmski) padec, kar naredimo z dodatnim povečevanjem napetosti U_s (krmiljenje / regulacija).

V področju nad 50Hz ne spreminjamo U_s , tako da se v tem področju fluks zmanjšuje (slabljenje polja). Obremenitev motorja je potrebno v tem delu zmanjšati (običajno je meje maksimalne obremenitve $P_b = \text{konst.}$)

PRIMERI NAPAJANJE U_s/f_s ASINHRONSKEGA MOTORJA

1.



Z ... del namenjen za zaviranje, energija se troši na upor

$U_0 = \text{konst.}$, $U_s = K \cdot f_s + U_0$, K je lahko tudi funkcija

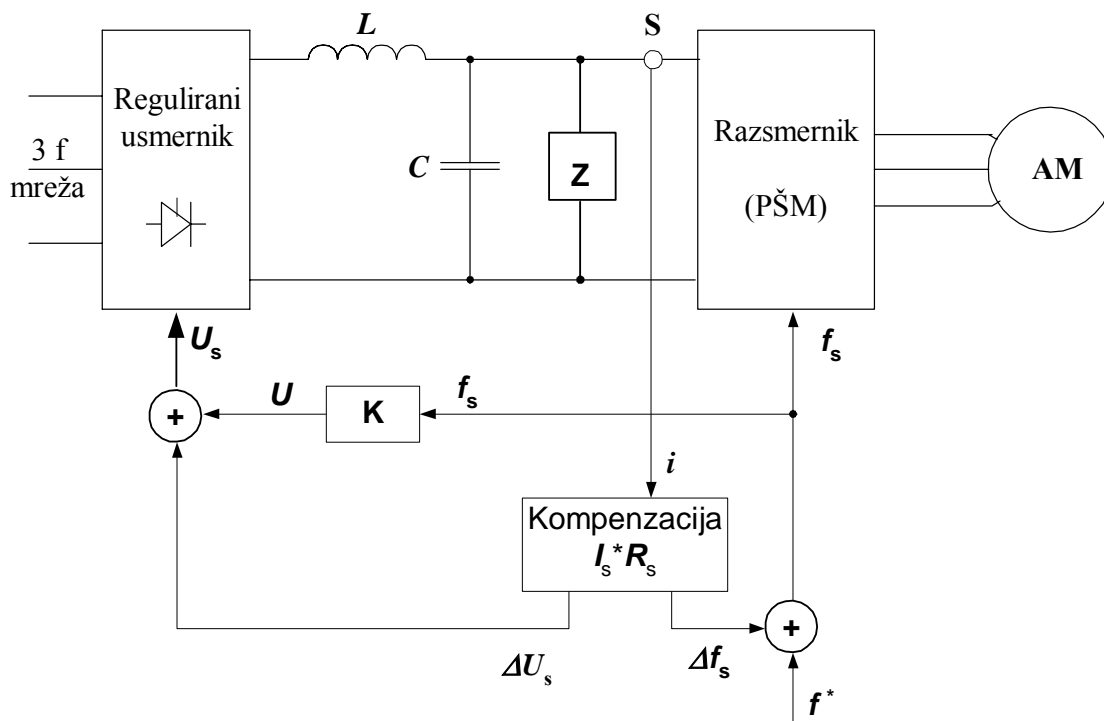
$U_0 = 0$, $U_s = g(f_s)$, $g(f_s)$ je tabelirana in in se pri spremembi odčita in nastavi

Uporaba:

- ko sprememba vrtljajev pri spremembi obremenitve ni pomembna
- ko se ne pričakujejo hitra povečanja obremenitve (kajti to bi povzročilo prevelike tokove, ki se ne kontrolirajo oz omejujejo).

Preveliki tokovi, nastanejo tudi pri veliki spremembi podanih vrtljajev (še posebej pri zagonu). Rešitev: počasne spremembe vrtljajev (npr. dodana naprava za mehki zagon)

2.



S ... senzor (običajno merilnik s Hallovimi sondami)

Kompenzacijska naprava (analogna ali digitalna): na osnovi podatka o enosmernem toku se izračuna korekcija:

- Δf_s podane frekvence (f^*), tako da se kompenzira povečanje slipa pri povečani obremenitvi,
- ΔU_s napetosti $U = K \cdot f_s$, tako da se kompenzira statorski padec ($I_s \cdot R_s$).

omogočena je zaščita razsmernika in motorja pri hitrih spremembah obremenitve ali vrtljajev

Regulacija vrtljajev:

- pri konstantni obremenitvi od 10% do 100% nazivnih vrtljajev
- pri konstantni napetosti (področje slabljenja polja) od 100% do 200% nazivnih vrtljajev

nihanje nastavljenih vrtljajev $\pm 1\%$ v območju spreminjanja obremenitve od M_0 do M_n

3.4.4.2 Obratovanje pri $E_s/f_s = konst.$

Razmerje $E_s/f_s = konst.$ je omejeno samo na področje od 0Hz do 50Hz. Fluks je v tem področju konstanten. S pomočjo nadomestnega vezja lahko izračunamo rotorski tok ter moment.

$$I_r' = \frac{E_s}{\sqrt{\left(\frac{R_r'}{s}\right)^2 + (X_r')^2}}$$

$$M = \frac{p \cdot m_s}{2 \cdot \pi \cdot f_s} \cdot (I_r')^2 \frac{R_r'}{s} = \frac{p \cdot m_s}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{E_s}{f_s}\right)^2 \frac{f_r \cdot R_r'}{(R_r')^2 + (2 \cdot \pi \cdot f_r \cdot L_r)^2}$$

Iz zadnje enačbe sledi, da je moment odvisen samo od **rotorske frekvenca** (pri nespremenjeni R_r' in L_r). To pomeni, da enakemu momentu ustreza enaka f_r . Ta ugotovitev omogoča zelo precizno regulacijo števila vrtljajev asinhronskemu motorju v odvisnosti od bremena, saj moramo meriti le f_r . Omahni moment je konstanten, kar izpeljemo iz zgornje enačbe.

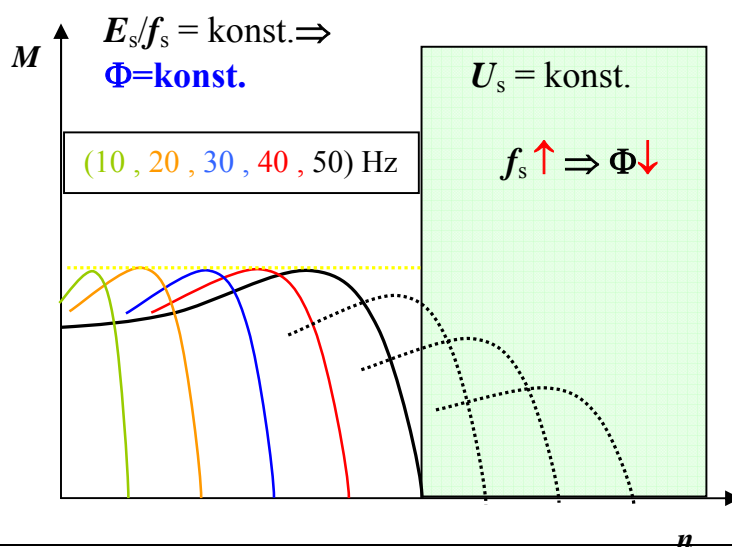
$$\frac{\partial M}{\partial f_r} = 0 \Rightarrow f_{r,om} = \pm \frac{R_r'}{2 \cdot \pi \cdot L_r} \Rightarrow M_{om} = \pm \frac{p \cdot m_s}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{E_s}{f_s}\right)^2 \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot L_r}$$

Klossova enačba:

$$\frac{M}{M_{om}} = \frac{2}{\frac{f_r}{f_{r,om}} + \frac{f_{r,om}}{f_r}}$$

$$E_s = K \cdot f_s \cdot \Phi \Rightarrow \frac{E_s}{f_s} = K \cdot \Phi$$

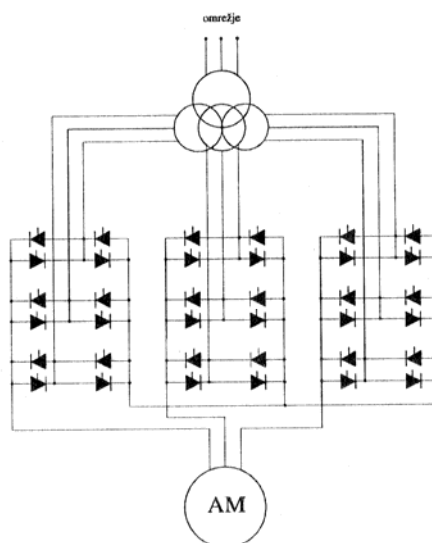
$$\Rightarrow \Phi = konst.$$



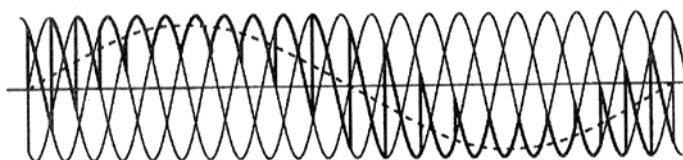
Dodatek (več v knjigi: Vanja Ambrožič, SODOBNE REGULACIJE POGONOV Z IZMENIČNIMI STROJI, FE-Ljubljana)



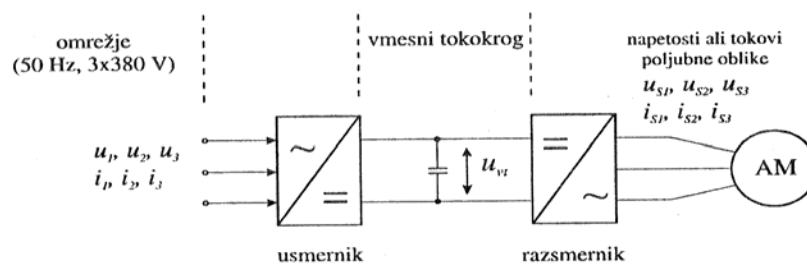
Slika 4. 1: Osnovna delitev tipov pretvornikov



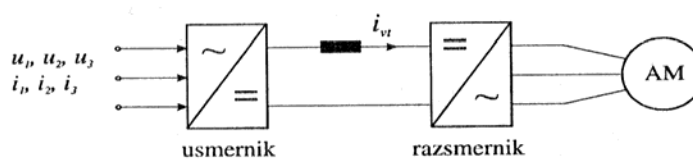
Slika 4. 2: Zgradba ciklokonverterja



Slika 4. 3: Poteki vhodnih in izhodnih trenutnih napetosti ter srednja vrednost napetosti na izhodu ciklokonverterja

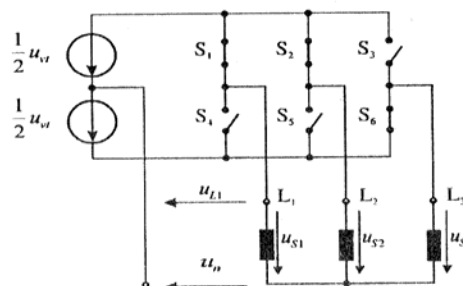


Slika 4. 4: Osnovni princip zgradbe pretvornika z napetostnim vmesnim tokokrogom

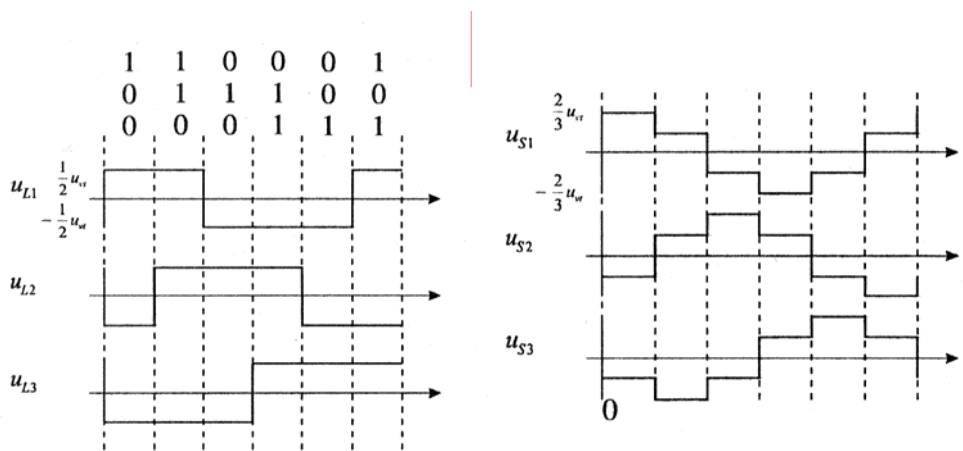


Slika 4. 5: Osnovni princip zgradbe pretvornika z tokovnim vmesnim tokokrogom

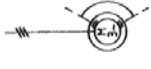
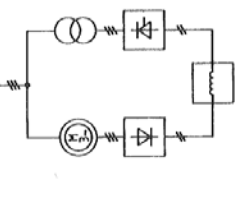
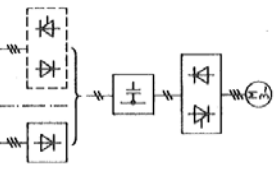
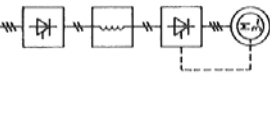
Razsmernik (slika 4. 6) je sestavljen iz tiristorskih ali tranzistorskih stikal, ki obratuj v stikalnem režimu [16, 18].



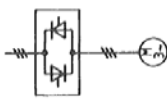
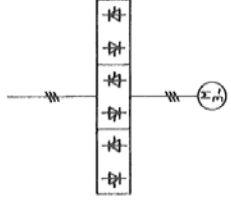
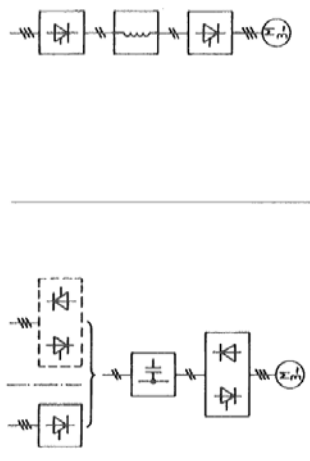
Slika 4. 6: Poenostavljena zgradba razsmernika



Dodatek (več v knjigi: PRIROČNIK ZA ELEKTROTEHNIKO IN ELEKTRONIKO, Horst Rohlfing, Harry Schmidt, Tehniška založba Slovenije, 2000)

10.27 Trifazni pogoni spremenljive vrtilne frekvence			
<p>Pogon</p>  <p>Trifazni preletno vezani motor</p>	 <p>Usmerniška kaskada, trifazni motor z drsnimi obroči na rotorju</p>	 <p>Pulzni presmernik, sinhronski motor¹⁾</p>	 <p>Usmerniški motor, trifazni sinhronski motor</p>
Krmilna veličina	napetostno krmiljenje s prestavitvijo ščetk	protinapetost presmernika	napetost statorja
Spreminjanje vrtilne frekvence in navora	dovod in odvod silpne moči, odvzem preko komutatorjevih ščetk	nastavitev rotorske napetosti in odvzem silpne moči s presmernikom v rotorjevem tokokrogu	nastavljanje napetosti vmesnega kroga, usmernik na motorski strani voden z bremenom in krmiljen v odvisnosti od kolesnega kota
Tipično obratovanje	ena smer vrtenja, poganjanje in zaviranje	ena smer vrtenja, poganjanje	ena smer vrtenja, poganjanje
Pavza brez navora pri obratu navora enako pri obratu vrtenja	je ni 0,2 do 0,5 s	-	je ni
Tipično območje moči v kW	2 do 65	10 do 20 000	0,5 do 10 000
Tipič. nazivne vrtilne frekv. v min ⁻¹	1450 do 2300	600 do 1500 (3000)	1000 do 3000
Tipič. nastav. območje vrtilne frekv.	1 : 3 do 1 : 20	1 : 1,3 do 1 : 5	1 : 20 do 1 : 50
Tipične značilnosti	posebno gospodaren pri majhnem območju nastav. vrtilne frekvence	posebno gospodaren pri majhnem območju nastav. vrtilne frekvence	obratov. last. kot pri enosmernem stroju brez krtačk (komutatorja)
Težišče uporabe	predelovalni stroji (tekstil, tisk, umetne mase)	črpalke in ventilatorji	predelovalni stroji, velika puhalna in črpalke

10.28 Trifazni pogoni spremenljive vrtilne frekvence z asinhronskimi kletkastimi motorji

Pogon	Trifazni krmilnik	Direktni presmernik ¹⁾	Presmernik z vmesnim tokokrogom z vsiljenim tokom
Regulirna veličina			
Regulirna veličina	statorska napetost	statorska napetost in frekvenca	statorska napetost in frekvenca
Spreminjanje vrtilne frekvence in navora	nastavitev slipne moči s slabljenjem polja (znižanje karakteristike navora)	protiparalelna vezava s sinusno ali pravokotno krmiljeno napetostjo	nastavitev statorske frekvence, s sočasnim vodenjem statorske napetosti, s krmiljenim usmernikom
Tipično obratovanje	ena smer vrtenja, poganjanje	dve smeri vrtenja, poganjanje in zaviranje	ena smer vrtenja, poganjanje in zaviranje
Pavza brez toka pri obratu navora enako pri obratu smeri vrtenja	0,1 do 0,2 s	je ni	je ni
Tipično območje moči v kW	do 50	MW-področje	50 do 400
Tipične nazivne vrt. frekvence	1000 do 3000	15	1000 do 3000
Tipič. nastav. območje vrt. frekv.	1:3 do 1:50	1:∞	1:20
Tipične značilnosti	predimenzioniranje motorja zaradi velike izgubne moči v rotorju	maksimalna izhodna frekvenca, približno 0,4-krat mrežna frekv.	Visoke vrtilne frekvence (> 3000 min ⁻¹) dosežemo z ustrezno frekvenco presmernika
Težišče uporabe	črpalke in ventilatorji manjše moči, navijalni stroji	počasni tekoči pogoni, npr. cevni mlini	skupinski pogoni, npr. izdelava umetnih vlaken enomotorni pogoni, npr. kolebni stroji

¹⁾ Delno tudi s sinhronskimi trifaznim motorjem.

FREKVENČNI PRETVORNIKI DRUŽINE INDRIVES - P

Slavko Senica, Stanko Možic, Tomaž Dvojmoč, Jože Venc

INES d.o.o.

Prešernova 4, 68290 Sevnica, Slovenija

Povzetek: v prispevku so opisani frekvenčni pretvorniki družine INDRIVES - P. Prikazani so osnovni principi delovanja frekvenčnega pretvornika, zgradba naprav, opisani so posamični podsklopi ter načini delovanja naprave. Opisane so tudi lastnosti asinhronskega motorja, napajanje s frekvenčnim pretvornikom, s stališča uporabnika pogona.

1. UVOD

Pri elektromotorskih pogonih v industriji znaša delež pogonov, realiziranih z asinhronskimi motorji, okoli 80%. Od tega je velik del pogonov še nekrmljenih in nereguliranih (pri tem mislimo na krmiljenje ali regulacijo **hitrosti vrtenja** motorja). Med možnimi načini krmiljenja in regulacije hitrosti vrtenja asinhronskega motorja so si v zadnjih 15 letih na tržišču največji tržni delež pridobili statični, elektronski frekvenčni pretvorniki. V času od prvih komercialno dobavljivih frekvenčnih pretvornikov pa do danes je razvoj elementov močnostne elektronike, kakor tudi razvoj sistemov najprej analogne, v zadnjih letih pa tudi digitalne tehnike, omogočil današnjo izdelavo robustnih in cenovno dostopnih naprav. Še posebej razvoj mikrorračunalniške tehnologije je omogočil apliciranje že skoraj pozabljenih teorij o obdelavi asinhronskega motorja v matematično in fizikalno bolj ugodnem koordinatnem sistemu [L1], kjer bi se asinhronski motor lahko obravnaval kot enosmerni tujevzbujani motor ter se na koncu regulacijsko tudi tako obnašal (t.i. vektorska regulacija).

Trenutno se na tržišču med frekvenčnimi pretvorniki še vedno prodaja od 80 do 90 % navadnih frekvenčnih pretvornikov (tu so mišljene "klasične rešitve", napajanje motorja po predpisni U/f karakteristiki) z enostavnimi nadgradnjami do regulacije hitrosti ali tehnološke regulacije, preostali tržni delež pa zasedajo aplikacije vektorske regulacije.

1.1 Dve osnovni definiciji

Kaj je to frekvenčni pretvornik?

Frekvenčni pretvornik je naprava, ki omogoča zvezno krmiljenje in regulacijo hitrosti vrtenja klasičnega trifaznega asinhronskega motorja.

Kako deluje frekvenčni pretvornik?

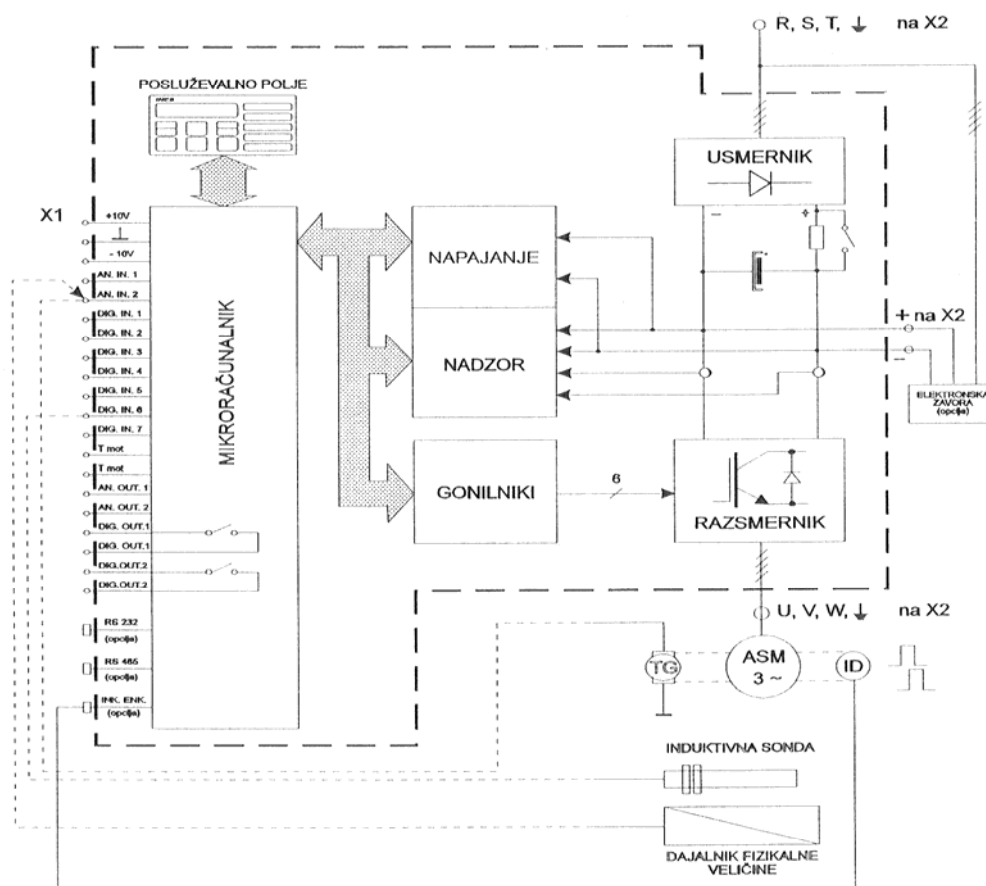
Frekvenčni pretvornik pretvarja omrežno napetost (trifazno ali enofazno) konstantne frekvence v trifazno izmenično napetost zvezno in poljubno spremenljive frekvence in efektivne vrednosti, s katero potem napajamo motor. Posledica tega je, da se lahko motor vrti z različnimi hitrostmi. Pretvorba poteka tako, da se omrežna napetost najprej usmeri, nato pa se v razmerniku razsmeri nazaj na trifazno izmenično napetost po principu pulzno širinske modulacije.

2. SESTAVNI DELI FREKVENČNEGA PRETVORNIKA

Frekvenčni pretvornik družine INDRIVES - P vsebuje naslednje podsklope:

- energetske usmerneke
- enosmerni vmesni tokokrog
- razsmernik
- interni napajalnik za napajanje vseh notranjih podsklopov z vezjem za interno kontrolo in nadzor
- galvansko ločene gonilnike za razsmernik
- kontrolno enoto za kompleten nadzor nad napravo z uporabniškimi digitalnimi ter analognimi vhodi/izhodi, z vmesniki za komunikacijo z ostalimi računalniškimi sistemi ter s posluževalnim poljem

Slika 1 prikazuje blok shemo frekvenčnega pretvornika družine INDRIVES - P.



slika 1

2.1 Energetski usmernik

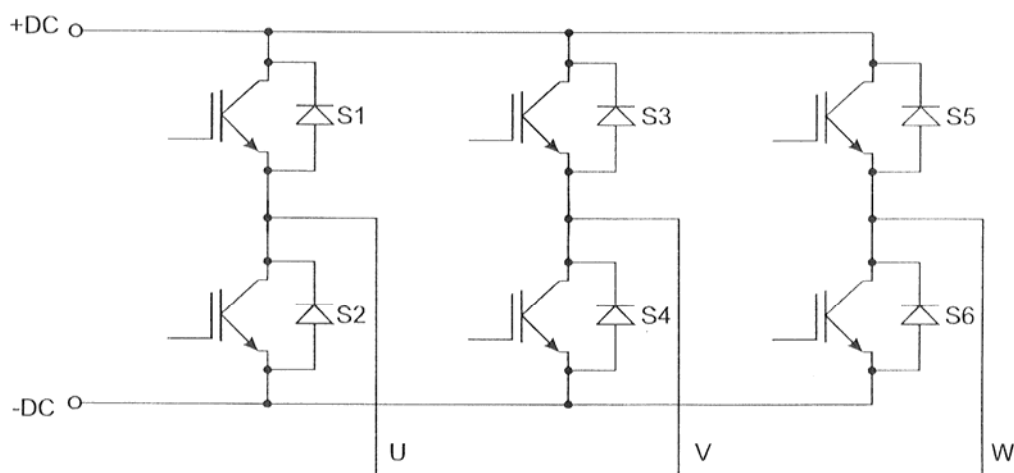
Energetski usmernik je običajen trifazni polnovalni nekrmiljeni usmernik, sestavljen iz 6 usmerniških diod, ki so fizično nameščene v usmerniškem modulu.

2.2 Enosmerni vmesni tokokrog

Enosmerni vmesni tokokrog sestavljajo veliki elektrolitski kondenzatorji, ki gladijo usmerjeno napetost. Kapacitivnost je odvisna od nazivnega toka naprave. V ta podsklop spada tudi zaščitno polnilno vezje kondenzatorjev (upor za omejitev vklopnega toka naprave z relejem ali kontaktorjem za premostitev). V enosmerni vmesni tokokrog je nameščena tudi merilna sonda za meritev toka v motor ter za izvajanje kratkostične zaščite razsmernika, ter priključki za primarno stran napajalnika v sistemu.

2.3 Razsmernik

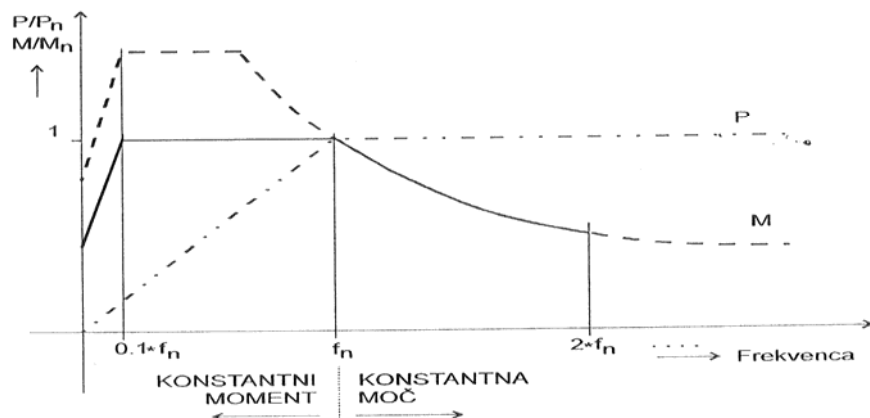
Razsmernik predstavlja sistem 6 elektronskih stikal, ki preklaplajo priključne sponke motorja med potencialoma + in - enosmerne napetosti v napravi. Stikalni elementi so IGBT tranzistorji z že vgrajenimi antiparalelnimi diodami. (Isolated Gate Bipolar Transistor; bipolarni tranzistor z izoliranim krmilnim vhodom). Že ime samo pove, da je to preklopni element, ki združuje nekaj dobrih lastnosti bipolarnih tranzistorjev (nizek padec napetosti v prevodnem stanju, visoko zaporno napetost, robustnost glede tokovnih preobremenitev) ter mosfet tranzistorjev (enostavno, samo napetostno krmiljenje, dobri preklopni časi) [L2]. Trenutno predstavljajo IGBT tranzistorji optimalno rešitev za razsmernike pri napetostih do 1200Vdc in tokovih do 400A, s paraleliziranjem pa tudi do nekajkrat večjih. Slika 2 prikazuje osnovno topologijo razsmernika.



slika 2

Stikalni elementi so opremljeni tudi s pasivnimi in aktivnimi vezji za prenapetostno zaščito. Najboljša prenapetostna zaščita je seveda minimiziranje parazitnih induktivnosti v tokokrogih v napravi. S pravilno prenapetostno zaščito stikalnih elementov v razsmerniku bistveno vplivamo na robustnost elementa, ki je v celi napravi podvržen najtežjim obremenitvam.

4.2 Karakteristika momenta in moči



slika 9

Slika 9 prikazuje momentno karakteristiko motorja in karakteristiko moči. Vidni sta 2 tipični področji karakteristik: do nazivne frekvence motorja, kjer je možno zagotavljati kvocient U/f konstanten ("področje konstantnega momenta") in nad nazivno frekvenco motorja, kjer to ni več možno ("področje konstantne moči", slabljenje polja).

4.3. Izkoristek motorja, napajane s frekvenčnim pretvornikom

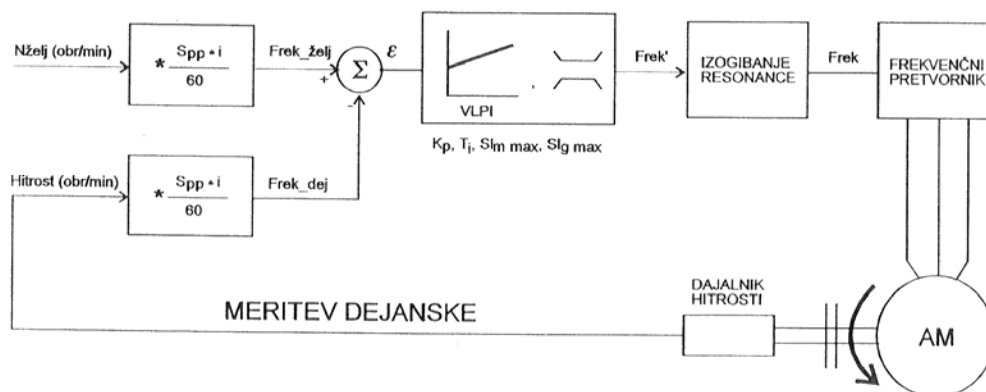
Tabela 3 prikazuje rezultate meritve izkoristka motorja, napajane s frekvenčnim pretvornikom pri različnih frekvencah napajalne napetosti. Meritev je bila izvedena pri nazivnem toku motorja. Izvedena je bila tudi primerjalna meritev izkoristka motorja, napajane direktno z mrežo, pri 50Hz in nazivnem toku (Motor: 7.5kW, 16.4A, 1445 o/min; pretvornik INDRIVES - P17).

Frekvenca [Hz]	η [%]	η , na mreži [%]
10	48	
20	66	
30	72	
40	75	
50	80	82
60	75	

tabela 3

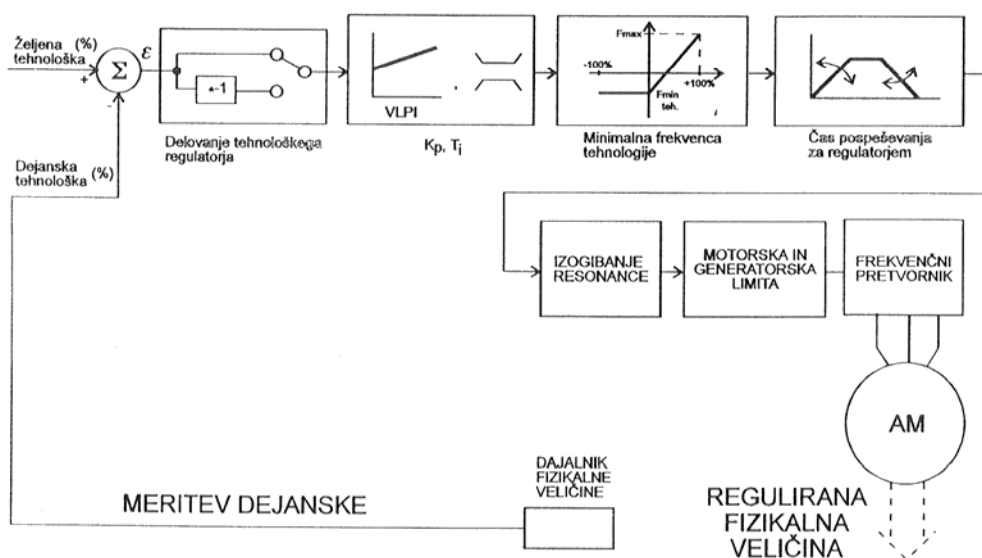
3.6 Regulacija hitrosti vrtenja

Za pogone, ki zahtevajo večjo statično in dinamično točnost hitrosti vrtenja, lahko apliciramo zaprtzoančno regulacijo hitrosti vrtenja. Pri tem je potrebna meritev dejanske hitrosti. Aplicirani algoritem nam omogoča eksaktno kontrolo slipa motorja v motorskem in generatorskem režimu. Slika 7 prikazuje shemo apliciranega algoritma.



3.7 Tehnološka regulacija

Tehnološki regulator uporabljamo pri pogonih, kjer s hitrostjo vrtenja motorja vplivamo (reguliramo, nastavljamo) na tehnološko fizikalno veličino (npr. pri črpalkah na nivo tekočine v zbirališču ali na pretok ali tlak v cevovodu..., pri pogonih navijalcev in odvijalcev na napetost previjajočega materiala, ipd.). Regulirano fizikalno (tehnološko) veličino moramo meriti z ustreznim dajalnikom (merilnim pretvornikom), ki merjeno fizikalno veličino pretvori v električni signal (+/-10V, 0 do 20mA ali 4 do 20mA). Krmiljenje tehnološke veličine (s spreminjanjem hitrosti vrtenja pogona) se tako prevede na zaprtzoančno regulacijo tehnološke veličine z avtomatskim prilagajanjem hitrosti pogona glede na potrebe. Slika 8 prikazuje shemo apliciranega algoritma.



10.3 Vrste obratovanja po VDE 0530 (12.84)

Označevanje

Obratovanje je določena obremenitev stroja, ki vključuje njeno trajanje in zaporedje, po potrebi pa vključuje tudi zagon, električno zaviranje, prosti tek in pavze.

Vrsta obratovanja je lahko označena z eno od oznak na naslednji strani.

Primer: S 1 ali DB

za stroje, ki so namenjeni in izdelani za trajno obratovanje, se pravi za splošno uporabo.

Pri vrsti obratovanja S 2 sledi kratki oznaki S 2 še podatek o trajanju obratovanja.

Primer: S 2 30 min

Pri vrstah obratovanja S 3 in S 6 sledi kratki oznaki še podatek o relativnem vklopnem času in času sekvence, če se zadnji razlikuje od 10 min.

Primer: S 3 30 % S 6 40 %

Pri vrstah obratovanja S 4 in S 5 so kratke oznake razširjene še s podatki o relativnem času vklopa, vztrajnostnem momentu motorja (J_M) in bremena (J_{ext}), reduciranim na gred motorja.

Primer: S 4 25 % $J_M = 0,15 \text{ kg m}^2$ $J_{ext} = 0,8 \text{ kg m}^2$

Pri vrsti obratovanja S 7 je kratka oznaka razširjena z vztrajnostnim momentom motorja (J_M) in bremena (J_{ext}), reduciranim na gred motorja.

Primer: S 7 $J_M = 0,4 \text{ kg m}^2$ $J_{ext} = 7,2 \text{ kg m}^2$

Pri vrsti obratovanja S 8 je kratka oznaka razširjena še s podatki o vztrajnostnem momentu motorja (J_M) in bremena (J_{ext}), reduciranimi na gred motorja, enako pa tudi breme, vrtilna frekvenca in relativni čas vklopa za vsako upoštevano vrtilno frekvenco.

Primer: S 8 $J_M = 0,4 \text{ kg m}^2$ $J_{ext} = 7,2 \text{ kg m}^2$

15 kW 740 min⁻¹ 30 %

25 kW 980 min⁻¹ 40 %

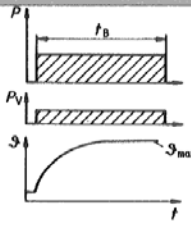
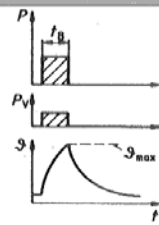
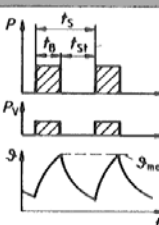
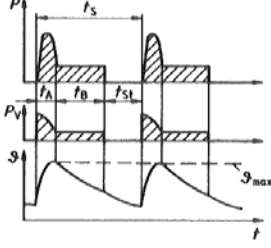
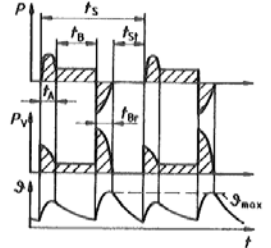
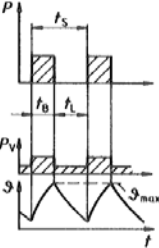
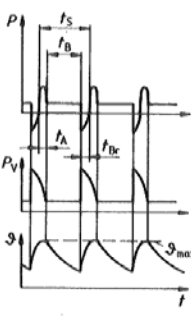
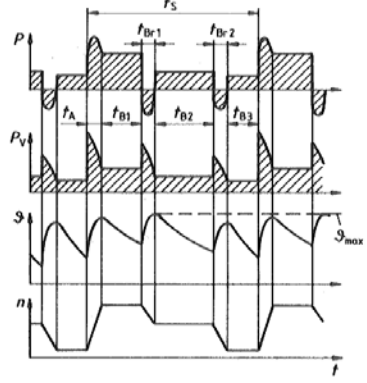
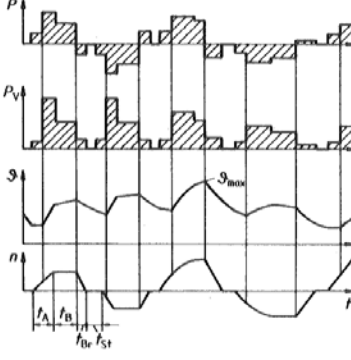
40 kW 1460 min⁻¹ 30 %

Če nazivni moči ne sledi nobena oznaka, velja trajno obratovanje kot nazivno.

V slikah uporabljeni znaki za enačbe:

P	moč	t_A	zagonski čas
P_V	izgube	t_B	bremenski čas
n	vrtilna frekvenca,	t_{Br}	zavorni čas
	hitrost vrtenja	t_L	čas praznega teka
ϑ	temperatura	t_r	relativni vklopni čas
ϑ_{max}	najvišja temperatura	t_S	čas trajanja sekvence
t	čas	t_{St}	čas stanja, mirovanja

10.3 Vrste obratovanja po VDE 0530 (12.84)

Trajno obratovanje (S1)	Kratkotrajno obratovanje (S2)	Prekinjevano obratovanje (S3)
 <p>Obratovanje s konstantno obremenitvijo P, ki traja dovolj dolgo, da se doseže toplotno ustaljeno stanje.</p>	 <p>Obratovanje s konstantnim bremenom P ne traja dovolj dolgo, da bi se doseglo toplotno ustaljeno stanje. V pavzi sledi hlajenje, ki traja dovolj dolgo, da se temperaturi stroja in hladilne snovi ne razlikujeta za več kot 2 K.</p>	 <p>Obratovanje z zaporedjem enakih sekvenc s konstantno obremenitvijo in mirovanjem. Zagonski tok ne vpliva opazno na segrevanje.</p> $t_r = \frac{t_B}{t_B + t_{St}} \cdot 100\%$
Prekinjevano obratovanje z vplivnim zagonom (S4)	Prekinjevano obratovanje z električnim zaviranjem (S5)	Neprekinjeno periodično obratovanje s prekinjevano obremenitvijo (S6)
 <p>Vrsta obratovanja z zaporedjem enakih sekvenc z opaznim zagonskim časom, časom konstantne obremenitve in pavze.</p> $t_r = \frac{t_A + t_B}{t_A + t_B + t_{St}} \cdot 100\%$	 <p>Obratovanje z zaporedjem enakih sekvenc z opaznim zagonskim časom, časom konstantne obremenitve, časom hitrega električnega zaviranja in pavzo.</p>	 <p>Obratovanje z zaporedjem enakih sekvenc s časom konstantne obremenitve in časom praznega teka ter brez pavze.</p> $t_r = \frac{t_B}{t_B + t_L} \cdot 100\%$
Neprekinjeno periodično obratovanje z električnim zaviranjem (S7)	Neprekinjeno periodično obratovanje s spreminjanjem vrtilne frekvence (S8)	Neprekinjeno obratovanje z neperiodičnim spreminjanjem bremena in vrtilne frekvence (S9)
 <p>Obratovanje z zaporedjem enakih sekvenc z opaznim zagonskim časom, časom konstantne obremenitve in časom hitrega električnega zaviranja ter brez pavze.</p>	 <p>Obratovanje z zaporedjem enakih sekvenc s časom konstantne obremenitve pri določeni vrtilni frekvenci; sledijo časi z drugimi konstantnimi obremenitvami pri drugih vrtilnih frekvencah.</p>	 <p>Obremenitev in vrtilna frekvenca se neperiodično spreminjata v območju dovoljenega obratovanja. Pogosto nastajajo konice obremenitve, ki lahko močno presežejo nazivno moč.</p>