

Elektromotorni pogoni s asinkronim strojem

- Osnovna svojstva izmjeničnog stroja detaljno su proučena u okviru temeljnog kolegija na modulu Automatika, “[Elektromehanički sustavi](#)” i izbornog predmeta “[Praktikum upravljanja električnim strojevima](#)”
- Pretpostavlja se da je osnovna fizikalna slika rada asinkronog stroja jasna, a za podsjetnik se preporuča predavanje “[Pred_ELESUS_2008](#)”.
- Osnova modela asinkronog stroja zasnovana je [simetričnom okretnom polju](#). Ono nastaje kao rezultat protjecanja struje kroz namote statora i namote rotora
- Pretpostavlja da su [namoti simetrično raspoređeni po obodu statora stroja pod kutem od \$120^\circ\$ \(električki\)](#) i da se napajaju iz trofaznog sustava napona sa [simetričnim strujama fazno pomaknutim za \$120^\circ\$ el.](#)
- U tom slučaju se može pokazati da postoji [jedinствeno okretno protjecanje](#) u zračnom rasporu koje je [rezultat djelovanja pulsirajućih protjecanja svakog namota pojedinačno](#).
- Okretno protjecanje stvara u zračnom rasporu magnetski tok Φ .

Elektromotorni pogoni s asinkronim strojem

- Brzina okretnog polja (toka) je definirana izrazom

$$n_s = \frac{60 \cdot f_1}{p} = \frac{30 \cdot \omega_1}{\pi \cdot p} \quad (1)$$

- Ako se uzme u obzir samo **osnovni harmonik magnetskog toka**, magnetski tok u zračnom rasporu moguće je opisati izrazom

$$\Phi = \Phi_m \cdot \cos(\omega_1 t) \quad ; \quad (2)$$

$$\omega_1 = 2\pi f_1 \quad (3)$$

- Inducirani se napon najčešće računa kao **umnožak algebarskog zbroja napona serijski spojenih svitaka, $N_1(d\Phi/dt)$ i namotnog faktora f_{n1}**

$$e_1 = N_1 \cdot \frac{d\Phi}{dt} \cdot f_{n1} \quad \Rightarrow \quad e_1 = -N_1 \cdot f_{n1} \cdot \omega_1 \cdot \Phi_m \cdot \sin(\omega_1 t) \quad (4)$$

- **Efektivna vrijednost napona** induciranog u namotu statora iznosi

$$E_1 = \frac{N_1 \cdot f_{n1}}{\sqrt{2}} \cdot \omega_1 \cdot \Phi_m \quad (5)$$

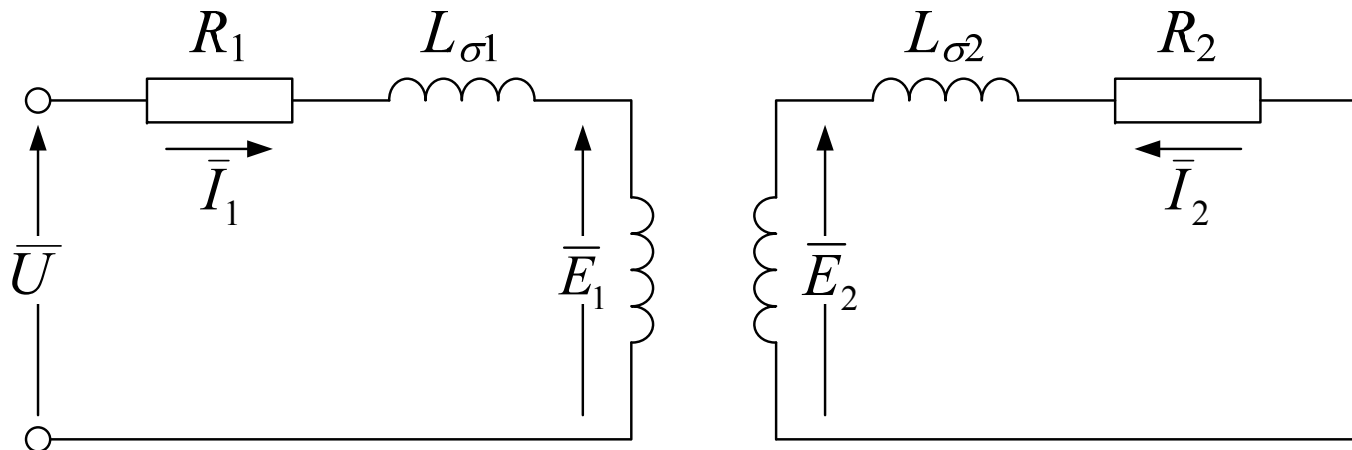
Elektromotorni pogoni s asinkronim strojem

- Gledano sa strane rotora, kružna frekvencija magnetskog toka u zračnom rasporu iznosi $\omega_2 = s \omega_1$, pa **efektivna vrijednost napona induciranog u namotu rotora i klizanje** s iznose

$$E_2 = \frac{N_2 \cdot f_{n2}}{\sqrt{2}} \cdot s \cdot \omega_1 \cdot \Phi_m \quad ; \quad (6)$$

$$s = \frac{n_s - n_m}{n_s} ; \quad n_m = n_2 = n \quad (7)$$

- Nadomjesna shema jedne faze asinkronog motora prikazana je na slici pri čemu su su R_1 i $L_{\sigma 1}$ otpor i rasipni induktivitet namota statora, R_2 i $L_{\sigma 2}$ otpor i rasipni induktivitet namota rotora, E_1 i E_2 inducirani naponi u namotu statora i rotora, I_1 i I_2 struje statora i rotora, a U napon napajanja namota statora.



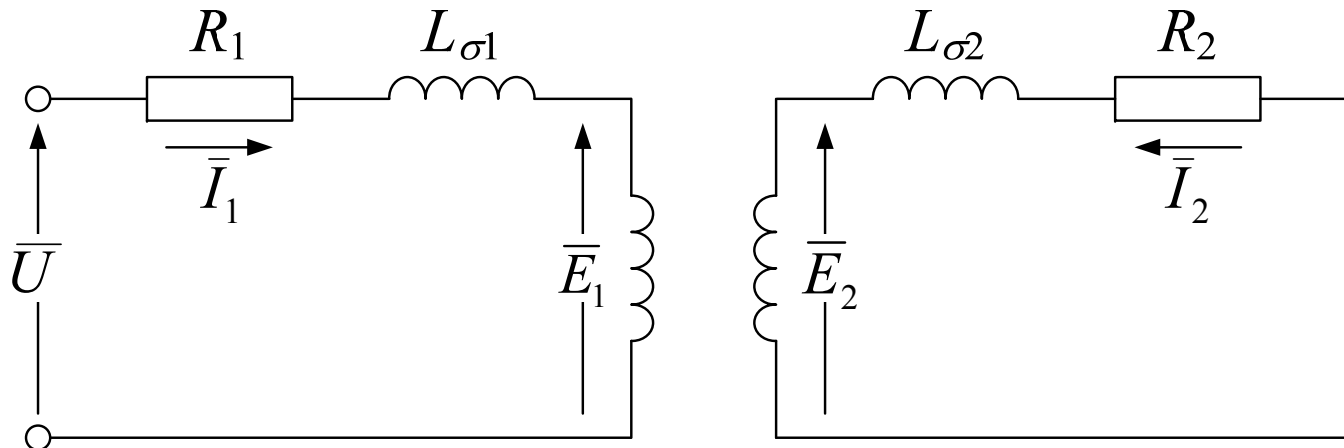
Sl.1.

Elektromotorni pogoni s asinkronim strojem

- Prema prethodnoj nadomjesnoj shemi na sl.1. može se zaključiti da je razlika napona između priključnih stezaljki \bar{U} i induciranog napona \bar{E}_1 jednaka padu napona na statorskome otporu R_1 i rasipnom induktivitetu statora $L_{\sigma 1}$, koji simbolizira dio rasipnog toka koji nije ulančen statorskim namotom.
- Za sekundarni krug vrijedi da je

$$\bar{E}_2 = R_2 \cdot \bar{I}_2 + j \cdot s \cdot \omega_2 \cdot L_{\sigma 2} \cdot \bar{I}_2 \quad (8)$$

$$X_{\sigma 2} = j \cdot s \cdot \omega_2 \cdot L_{\sigma 2} \quad (9)$$



Sl.1. Nadomjesna shema jedne faze asinkronog motora; razdvojeni parametri

Elektromotorni pogoni s asinkronim strojem

- Uobičajeno je sve veličine rotora preračunati na broj zavoja statora, pa je fazor napona induciranog u namotu rotora s parametrima preračunatim na stranu statora definiran s

$$\overline{E}_2' = R_2' \cdot \overline{I}_2' + j \cdot s \cdot \omega_1 \cdot L_{\sigma 2}' \cdot \overline{I}_2' \quad (10)$$

$$\overline{I}_2' = \overline{I}_2 \cdot \frac{N_2 \cdot f_{n2}}{N_1 \cdot f_{n1}}$$

$$L_{\sigma 2}' = L_{\sigma 2} \cdot \left(\frac{N_1 \cdot f_{n1}}{N_2 \cdot f_{n2}} \right)^2$$

$$\overline{E}_2' = \overline{E}_2 \cdot \frac{N_1 \cdot f_{n1}}{N_2 \cdot f_{n2}}$$

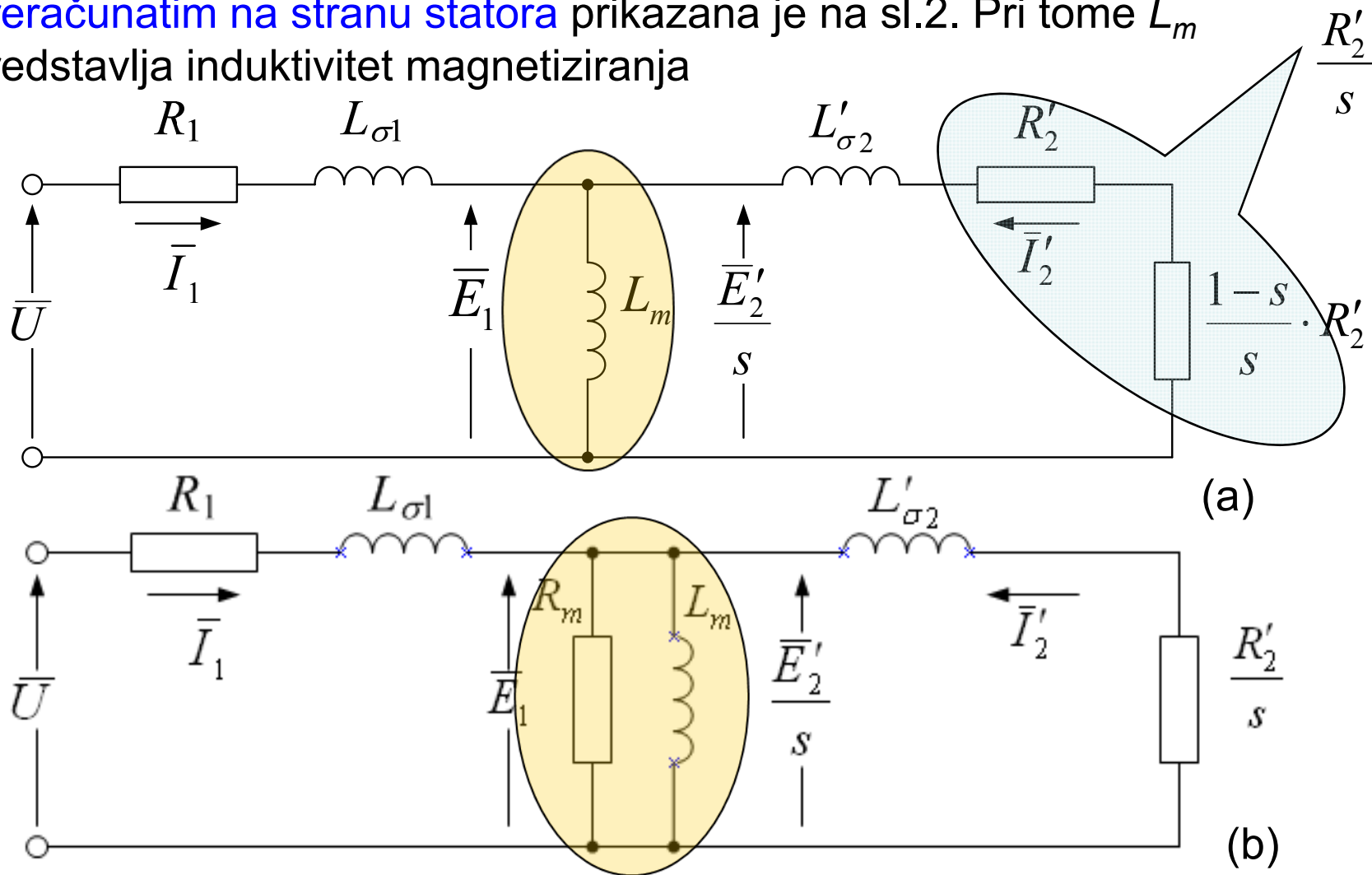
$$R_2' = R_2 \cdot \left(\frac{N_1 \cdot f_{n1}}{N_2 \cdot f_{n2}} \right)^2 \quad (6)$$

- Iz (5), (6) i (10) slijedi

$$\overline{E}_1 = \frac{\overline{E}_2'}{s} = \frac{R_2'}{s} \cdot \overline{I}_2' + j \cdot \omega_1 \cdot L_{\sigma 2}' \cdot \overline{I}_2' \quad (11)$$

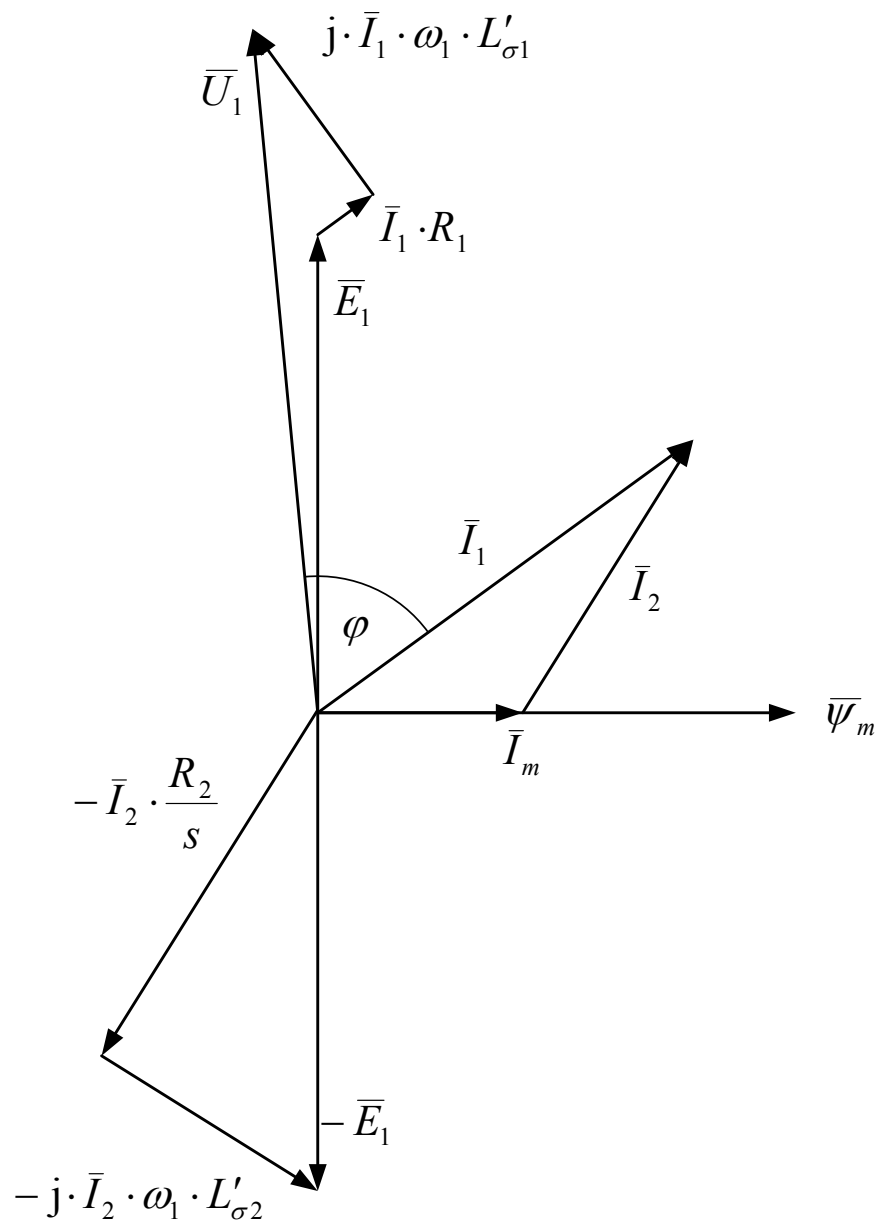
Elektromotorni pogoni s asinkronim strojem

- Nadomjesna shema jedne faze asinkronog motora s parametrima rotora preračunatim na stranu statora prikazana je na sl.2. Pri tome L_m predstavlja induktivitet magnetiziranja



Sl.2. Nadomjesna shema s preračunatim parametrima rotora na stranu statora

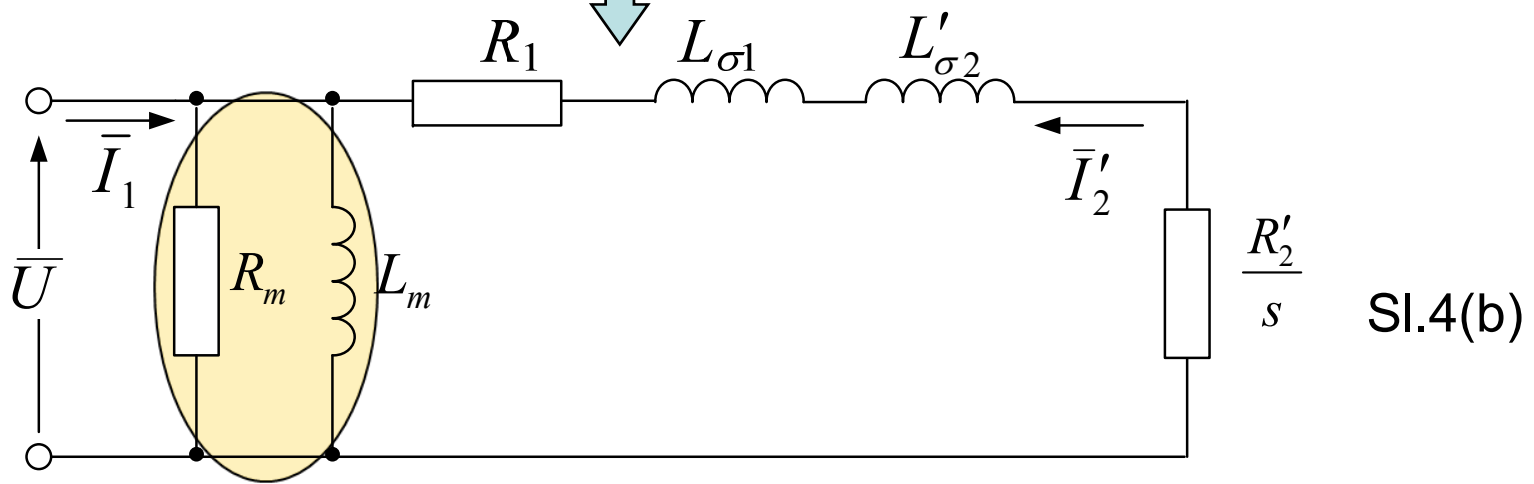
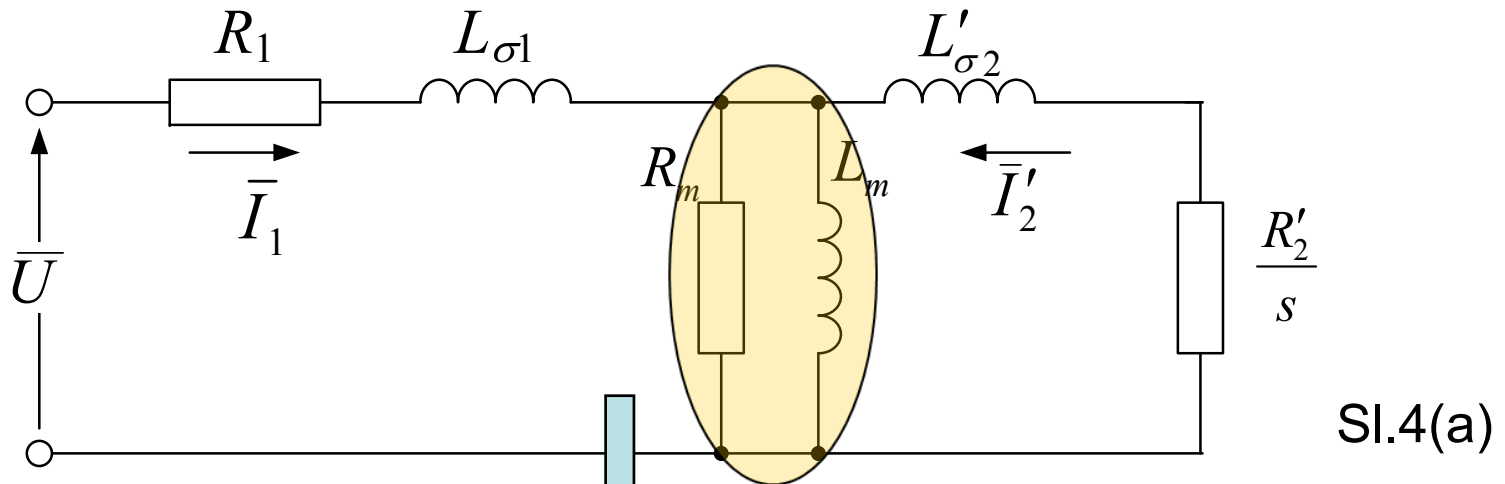
Elektromotorni pogoni s asinkronim strojem



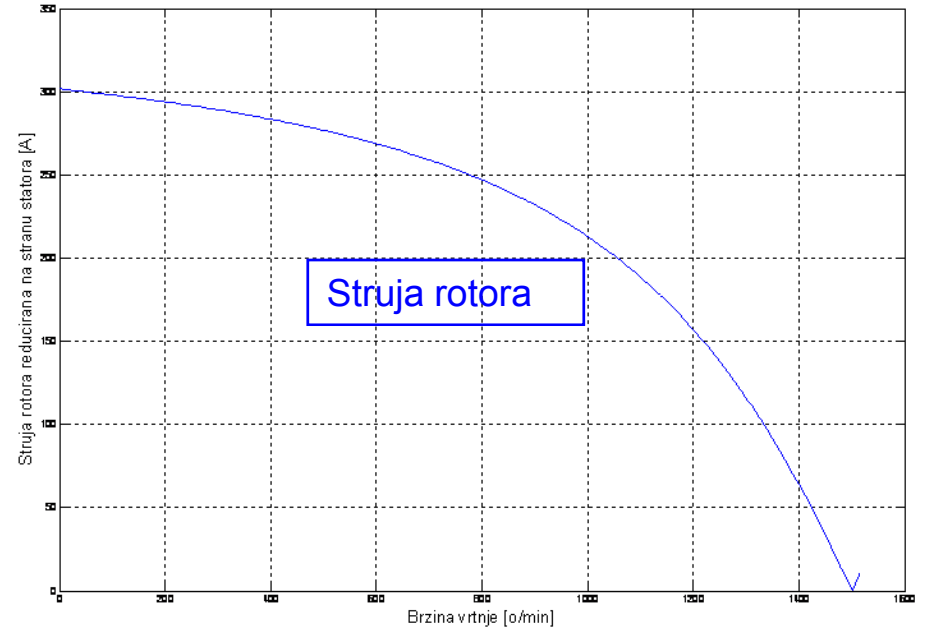
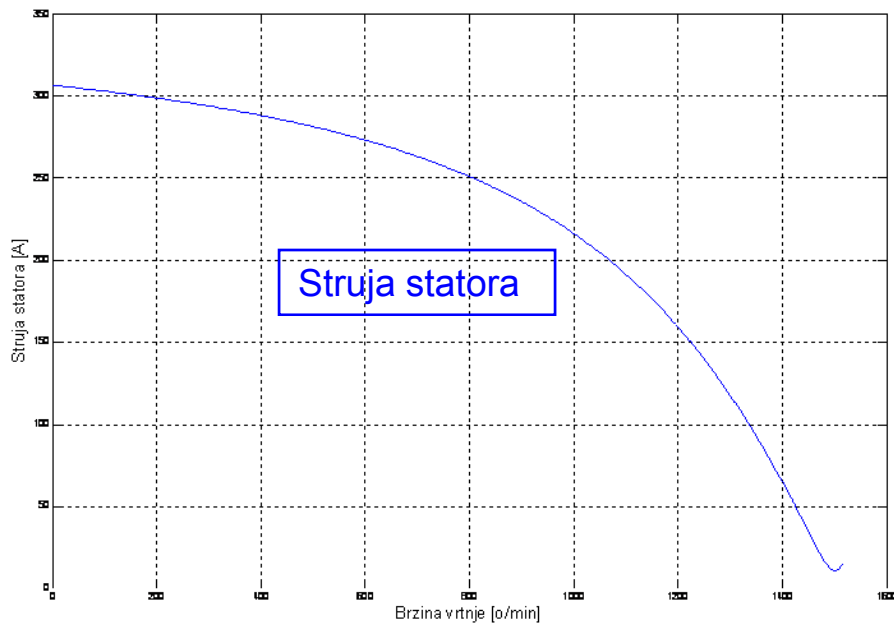
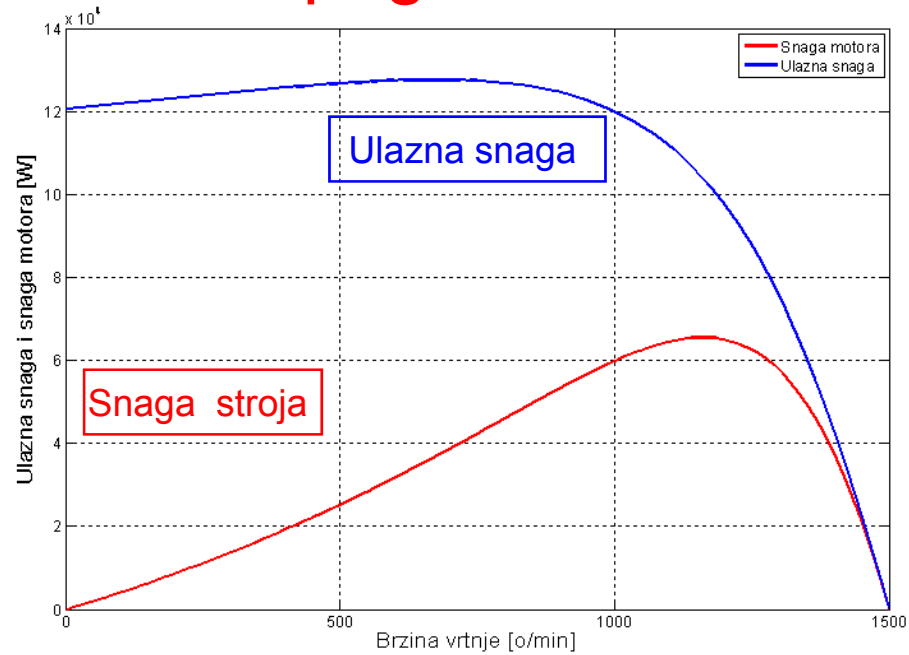
Sl.3. Fazorski dijagram
asinkronog stroja

Elektromotorni pogoni s asinkronim strojem

- Postoje i druge nadomjesne sheme koje se koriste pri modeliranju asinkronog stroja. Shema prikazana na slici se često koristi kod stroja s visokom magnetskom reaktancijom X_m (veliki induktivitet L_m)
- U tom slučaju se poprečna grana može staviti na sam ulaz nadomjesne sheme



Elektromotorni pogoni s asinkronim strojem



Elektromotorni pogoni s asinkronim strojem

- Nadomjesna shema na sl.2 a) posebno je pogodna sa stanovišta analize **energetske bilance**, gdje je važno izračunati **gubitke koji nastaju u radu stroja**
- Prema nadomjesnoj shemi na sl.2 a), **gubici u statorskim namotima** iznose

$$P_{1el} = 3 \cdot R_1 \cdot I_1^2 \quad (12)$$

a u rotorskim namotima

$$P_{2el} = 3 \cdot R'_2 \cdot I_2'^2 \quad (13)$$

Množenjem fazora napona E_1 s fazorom struje I_2' , dobije se

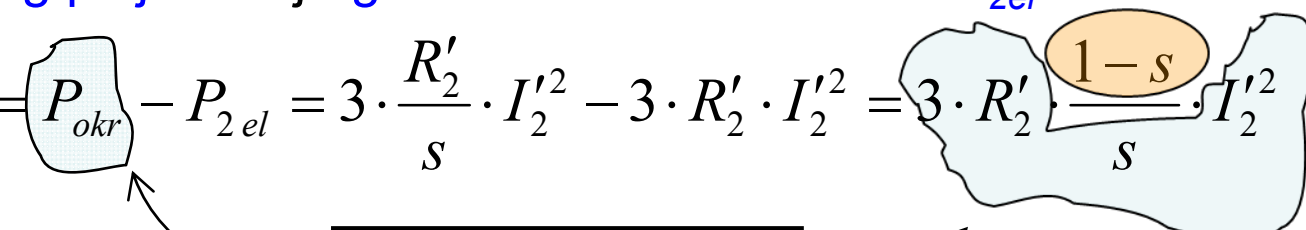
$$\overline{E}_1 \cdot \overline{I}_2' = \frac{R'_2}{s} \cdot I_2'^2 + j \cdot \omega_1 \cdot L'_{\sigma 2} \cdot I_2'^2 \quad (14)$$

u kojem **realni dio** izraza predstavlja **snagu po fazi** koja prelazi preko zračnog raspora

$$P_{okr} = 3 \cdot \text{Re}[\overline{E}_1 \cdot \overline{I}_2'] = 3 \cdot \frac{R'_2}{s} \cdot I_2'^2 \quad (15)$$

Elektromotorni pogoni s asinkronim strojem

Elektromehanička (mehanička) snaga se dobije kada se od snage okretnog polja odbiju gubici u namotima rotora P_{2el}


$$P_{2meh} = P_{okr} - P_{2el} = 3 \cdot \frac{R'_2}{s} \cdot I_2'^2 - 3 \cdot R'_2 \cdot I_2'^2 = 3 \cdot R'_2 \cdot \frac{1-s}{s} \cdot I_2'^2 \quad (16)$$

$$P_{2el} = s \cdot P_{okr} \quad (17)$$

Mehanička snaga na osovini motora, P_2 dobije se iz mehaničke snage P_{2meh} umanjene za gubitke trenja i ventilacije $P_{tr,v}$

$$P_2 = P_{2meh} - P_{tr,v} \quad (18)$$

Korisnost η je omjer između mehaničke snage P_2 i snage na ulazu P_1

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 \% \quad (19)$$

Elektromotorni pogoni s asinkronim strojem

Ulazna snaga P_1 je definirana kao

$$P_1 = 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi \quad \text{kut } \varphi, \text{ vidjeti sl.3.} \quad (20)$$

Elektromagnetski moment moguće je izraziti kao omjer snage i mehaničke brzine vrtnje rotora

$$M_{em} = \frac{P_{2meh}}{\omega_m} = \frac{(1-s)P_{okr}}{\omega_m} = 3 \cdot R'_2 \cdot \frac{1-s}{s \cdot \omega_m} \cdot I_2'^2 = 3 \cdot p \cdot \frac{R'_2}{\omega_2} \cdot I_2'^2 \quad (21)$$

Moment na osovini motora (moment motora) se onda u skladu s objašnjenjem danom u dodatku, definira kao

$$M_m = \frac{P_2}{\omega_m} \quad (22)$$

Elektromagnetski moment moguće je izraziti i pomoću magnetskog toka Φ . Izjednačavanjem izraza (5) s modulom izraza (14) dobije se ovisnost struje rotora I_2 o magnetskom toku Φ

Elektromotorni pogoni s asinkronim strojem

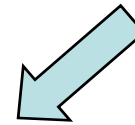
$$I_2' = \frac{\frac{N_1 \cdot f_{n1}}{\sqrt{2}} \cdot \omega_1 \cdot \Phi_m}{\sqrt{\left(\frac{R_2'}{s}\right)^2 + (\omega_1 \cdot L_{\sigma 2}')^2}}$$

uvrstiti



$$M_{em} = \frac{P_{em}}{\omega_m} = 3 \cdot p \cdot \frac{R_2'}{\omega_2} \cdot I_2'^2$$

nakon uvrštenja



$$M_{em} = 3 \cdot p \cdot \frac{R_2'}{\omega_2} \cdot \frac{\left(\frac{N_1 \cdot f_{n1}}{\sqrt{2}} \cdot \omega_1 \cdot \Phi_m\right)^2}{\left(\frac{R_2'}{s}\right)^2 + (2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot L_{\sigma 2}')^2} \quad (23)$$

konačan izraz



(24)

$$s_{pr} = \frac{R_2'}{\omega_1 \cdot L_{\sigma 2}'}$$



$$M_{em} = \frac{3}{4} \cdot p \cdot \frac{N_1^2 \cdot f_{n1}^2}{L_{\sigma 2}'} \cdot \Phi_m^2 \cdot \frac{2}{\frac{s_{pr}}{s} + \frac{s}{s_{pr}}} \quad (25)$$

Elektromotorni pogoni s asinkronim strojem

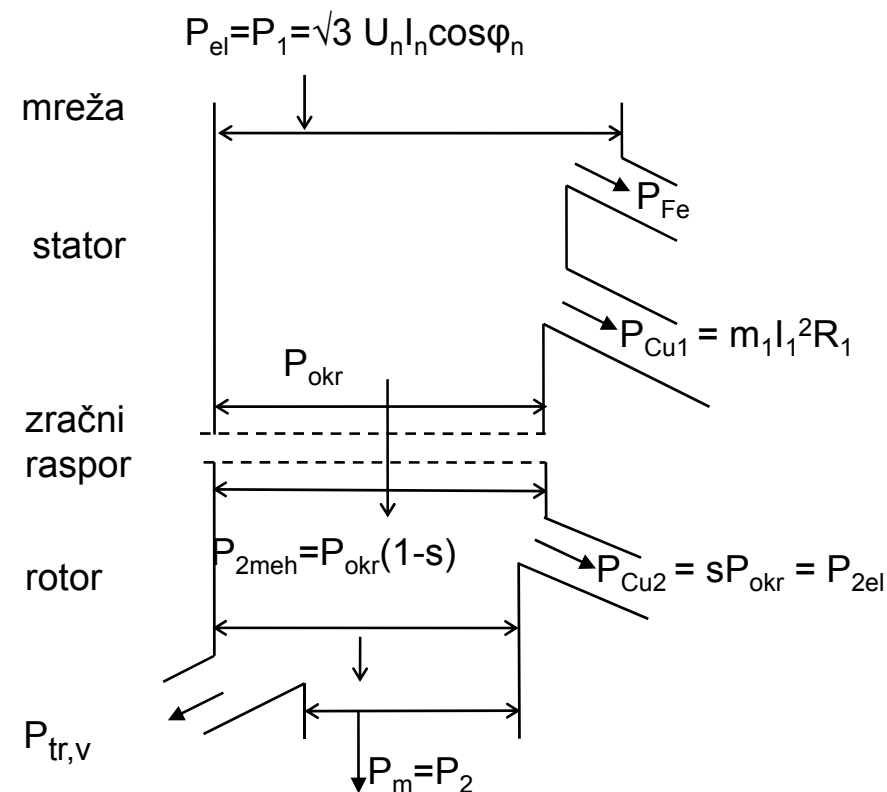
- Izraz (25) poznat je kao pojednostavljena Kloss-ova jednačba. Ona vrijedi za kolutne strojeve i za kavezne strojeve koji nemaju izražen efekt potiskivanja struje u rotoru.
- Kod kaveznih strojeva s izraženim efektom potiskivanja struje u rotoru Kloss-ova jednačba vrijedi samo u području malih klizanja. (potiskivanje struje u rotoru je problem vezan za specifičan (duboki utor) gdje se smješta rotorski vodič, vidjeti [1]).
- Izraz (26) poprima maksimalnu vrijednost (iznos prekretnog momenta) kada je klizanje $s = s_{pr}$ i pri tome iznosi

$$M_{pr} = \frac{3}{4} \cdot p \cdot \frac{N_1^2 \cdot f_{n1}^2}{L'_{\sigma 2}} \cdot \Phi_m^2 \quad (26)$$

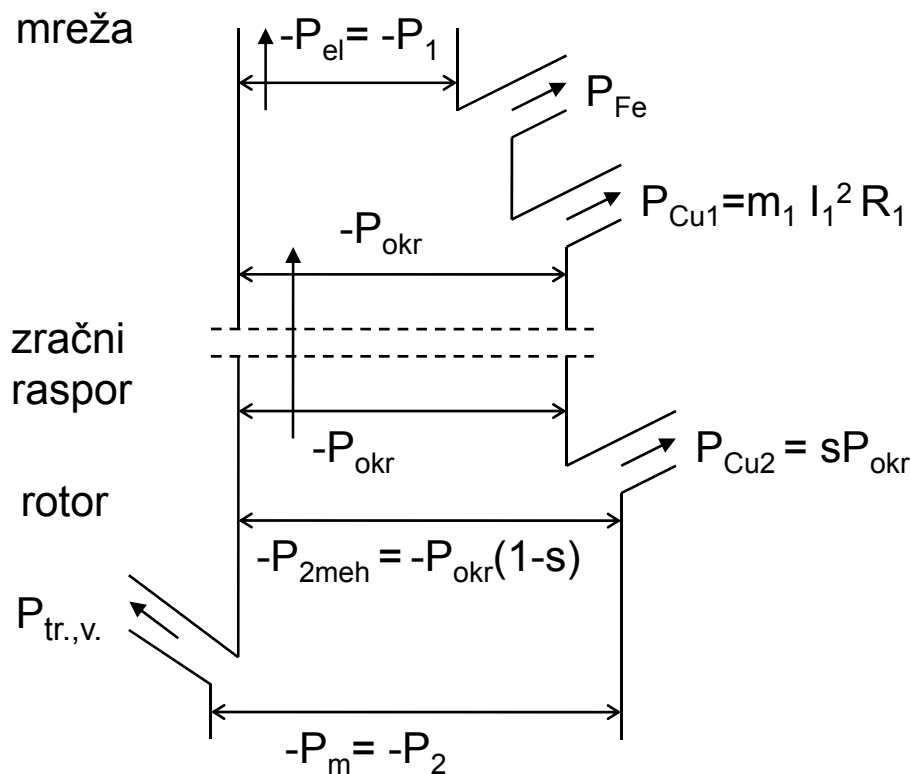
Efekt potiskivanja struje je pojava potiskivanja struje prema površini vodiča koji je smješten u dubokom (lijevanom) rotorskom utoru. Efekt rezultira PORASTOM otpora pri visokim frekvencijama (promjena poteznog momenta kod asinkronog motora)

Elektromotorni pogoni s asinkronim strojem

Bilanca snage za motorski i generatorski način (režim) rada



Sl.5.a) Motorski rad stroja



Sl.5.b) Generatorski rad stroja

Upravljanje brzinom vrtnje asinkronog stroja

- Koristi se **skalarno** i **vektorsko** upravljanje.
- **Skalarno upravljanje** se odnosi na upravljanje **iznosom** željene varijable, za razliku od **vektorskog upravljanja** gdje se upravlja i s **iznosom** i s **faznim pomakom (fazom)**.
- Kod **skalarnog upravljanja** su signali povratnih veza **istosmjerne veličine** (srednje i efektivne vrijednosti) koje su **proporcionalne varijablama** koje se upravljaju
- Kod skalarnog upravljanja se **NAPON** može koristiti za **upravljanje** **MAGNETSKIM TOKOM** a **FREKVENCIJA** i **KLIZANJE** za upravljanje s **MOMENTOM**.
- Međutim, **MAGNETSKI TOK** i **MOMENT** su ovisni i o **FREKVENCIJI** i o **NAPONU**
- Ova **NERASPREGNUTOST** se u skalarnom upravljanju **ne razmatra!**
- **Skalarno upravljanje** rezultira **lošijim dinamičkim karakteristikama** u usporedbi s vektorskim upravljanjem, ali je zbog toga vrlo jednostavno za realnu implementaciju

Upravljanje brzinom vrtnje asinkronog stroja

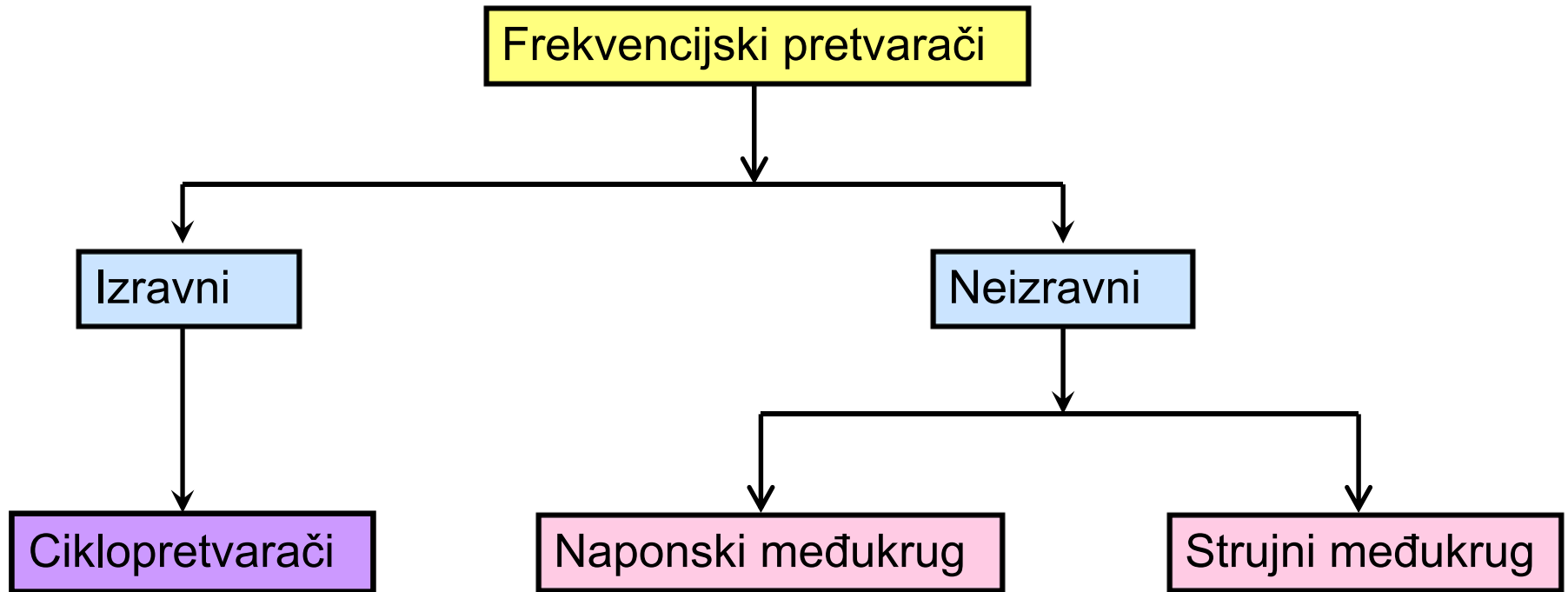
- Načini **skalarnog upravljanja** brzine vrtnje su:
 - Promjenom frekvencije napajanja (frekvencijski pretvarači)
 - ✓ Izravni pretvarači (AC/AC)
 - ✓ neizravni (AC-DC-AC)
 - Promjenom efektivne vrijednosti izmjeničnog napona
 - Promjenom iznosa rotorskog otpora (vrijedi za klizno-kolutne izvedbe)
 - Promjenom iznosa rotorskog otpora uz istovremenu promjenu efektivne vrijednosti napona statora (klizno-kolutne izvedbe)

NAPOMENA:

Metode upravljane brzinom vrtnje asinkronih strojeva koje **NISU zasnovane na sklopovima učinske elektronike** (promjena polova, promjena napona pomoću autotransformatora, kontaktna promjena rotorskih otpornika i slično) NEĆE bit razmatrana u ovom poglavlju

Upravljanje brzinom vrtnje asinkronog stroja

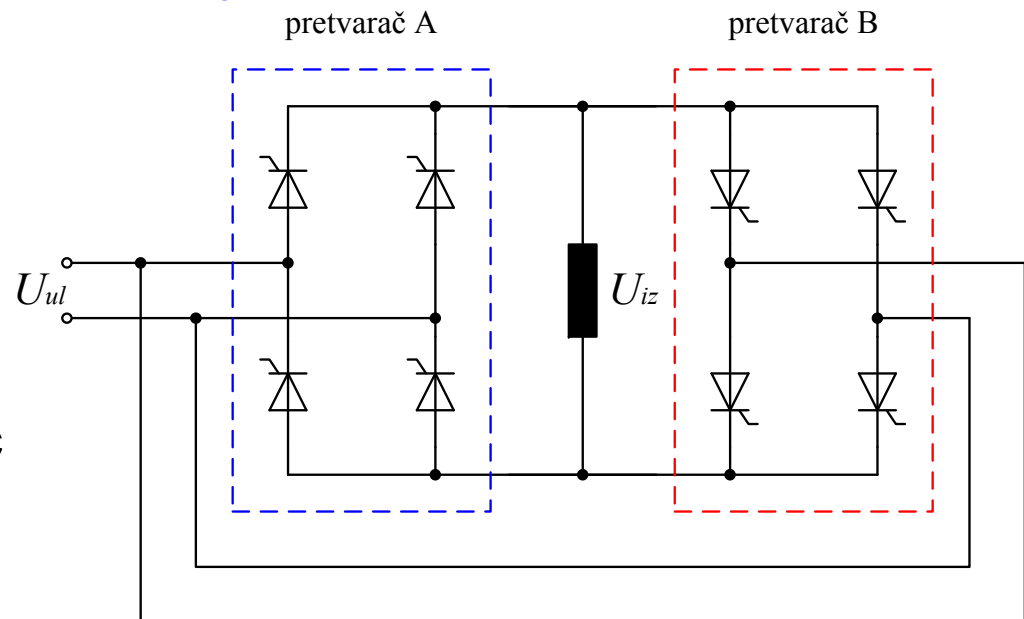
1-izravni frekvencijski pretvarači



Upravljanje brzinom vrtnje asinkronog stroja

1-izravni frekvencijski pretvarači

- Izmjenično-izmjenična pretvorba korištenjem poluvodičkih sklopki može se izvesti **izravno** (ciklopretvarač) i **neizravno** (pretvarač frekvencije s istosmjernim međukrugom)
- **Izravni pretvarači** poznati su pod nazivom **ciklopretvarači**. Koriste se za regulaciju brzine vrtnje asinkronih i sinkronih strojeva u području velikih snaga (1MW i više) i u slučajevima kada je potrebno regulirati male vrijednosti brzine vrtnje (niske frekvencije).
- **Jednofazni ciklopretvarač** napajan iz jednofazne mreže, prikazan na slici sl.6., sastoji se od **dva antiparalelno spojena punovalna pretvarača** (pretvarač A i pretvarač B)



Sl.6. Jednofazni ciklopretvarač napajan iz jednofazne mreže

Upravljanje brzinom vrtnje asinkronog stroja

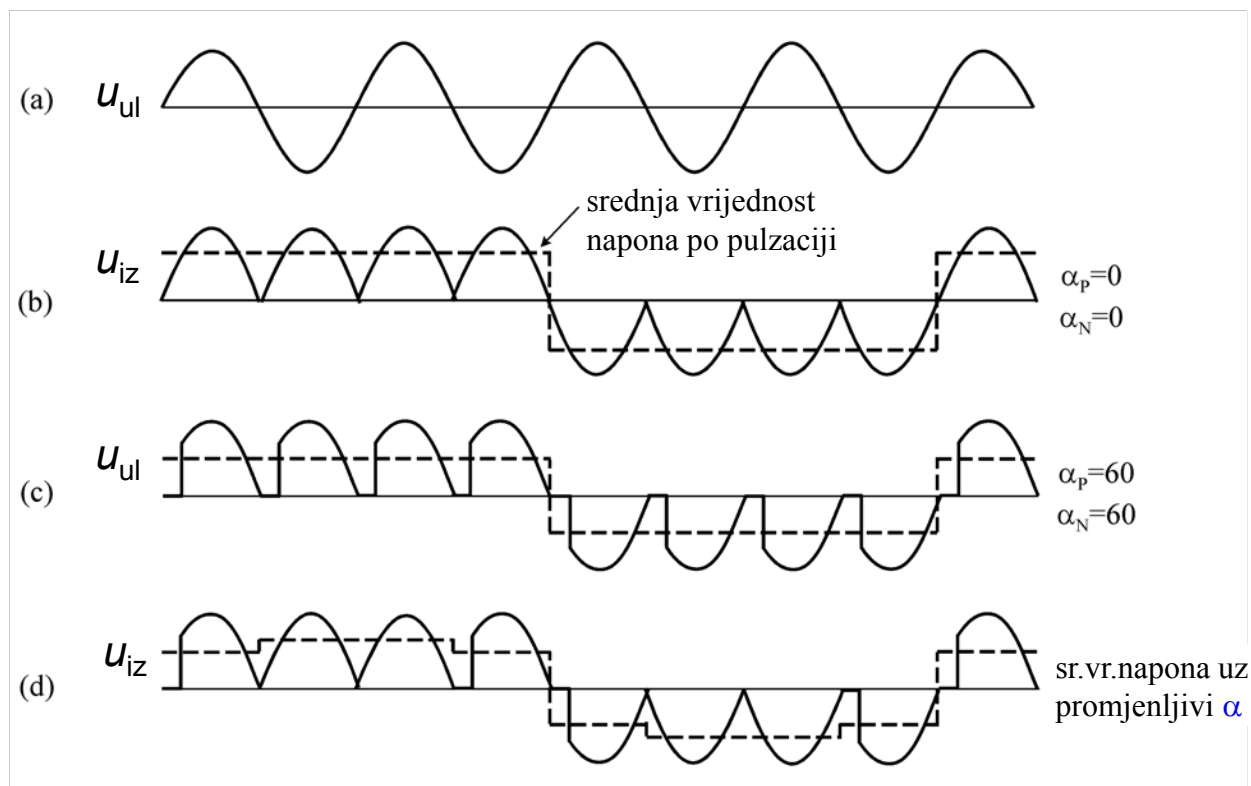
1-izravni frekvencijski pretvarači

- Svaka faza motora je spojena na mrežu preko paralelnog spoja "pozitivnog" i "negativnog" pretvarača u tzv. antiparalelnom spoju.
- Valni oblik jedne faze pokazuje da vođenje učinskih sklopki u pretvaraču mora osigurati regulaciju izlazne frekvencije u rasponu od $0-0,5f_1$ (a najčešće je ograničena na $1/3$ ulazne frekvencije f_1), da bi se sačuvao povoljan valni oblik izlaznog napona s obzirom na sadržaj viših harmoničkih članova.
- Jedna od važnih osobina je da je osnova ciklopretvarača (modul) mrežom vođen (komutiran) tiristorski usmjerivač za istosmjerne strojeve.

Upravljanje brzinom vrtnje asinkronog stroja

1-izravni frekvencijski pretvarači

- Napon na ulazu ciklopretvarača U_{ul} je izmjenični napon frekvencije f_1 . Frekvenciju izlaznog signala U_{iz} određuje broj perioda ulaznog napona u kojem je aktivan pretvarač A, odnosno pretvarač B.
- Omjer frekvencija ulaznog i izlaznog napona može biti cjelobrojan samo kod jednofaznih ciklopretvarača napajanih iz jednofazne mreže.



Sl.7. Valni oblici napona za slučaj omskog tereta

Upravljanje brzinom vrtnje asinkronog stroja

1-izravni frekvencijski pretvarači

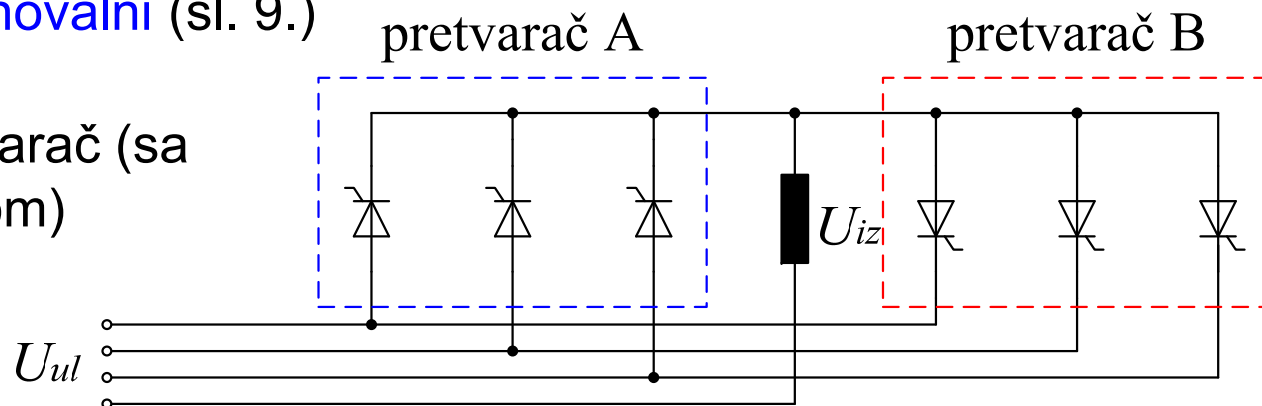
- Smjer struje trošila određuje pretvarač koji je aktivan (struja kroz pretvarač može teći samo u jednom smjeru). Ni u jednom trenutku ne smiju biti aktivna oba pretvarača kako ne bi došlo do kruženja struje između pretvarača.
- Amplituda osnovnog harmonika izlaznog napona ovisi o kutu upravljanja tiristora α . U slučaju konstantnog kuta upravljanja izlazni napon sadrži velik broj viših harmonika napona
- Modulacijom kuta upravljanja tiristora smanjuje se amplituda viših harmonika.
- Ako se na izlazu ciklopretvarača želi dobiti napon četiri puta manja frekvencija, prve dvije periode ulaznog napon trošilo se napaja iz pretvarača A, a druge dvije periode iz pretvarača B (sl.7.)
- Valni oblici napona na otpornom trošilu za različite kutove upravljanja prikazani su na sl.7.(u primjeru je omski teret što znači da su i struje istog valnog oblika)

Upravljanje brzinom vrtnje asinkronog stroja

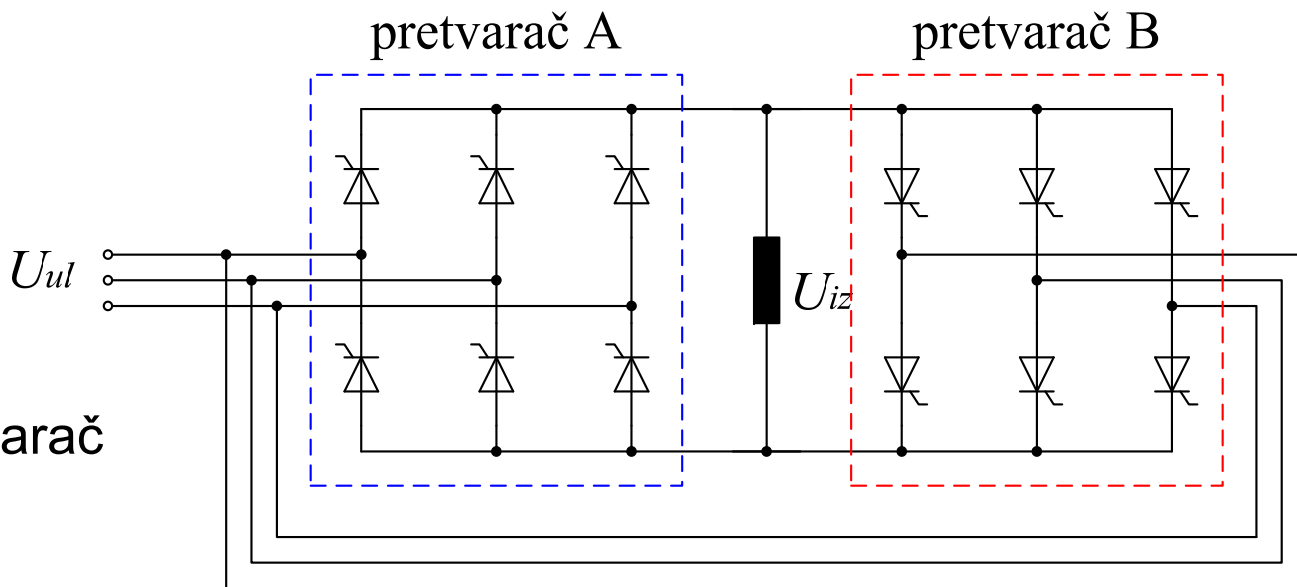
1-izravni frekvencijski pretvarači

- Postoje dvije vrste jednofaznih pretvarača napajanih iz trofazne mreže: **poluvalni** (sl.8.) i **punovalni** (sl. 9.)

Sl.8. Poluvalni pretvarač (sa srednjom točkom)



Sl.9. Punovalni pretvarač (mosni spoj)

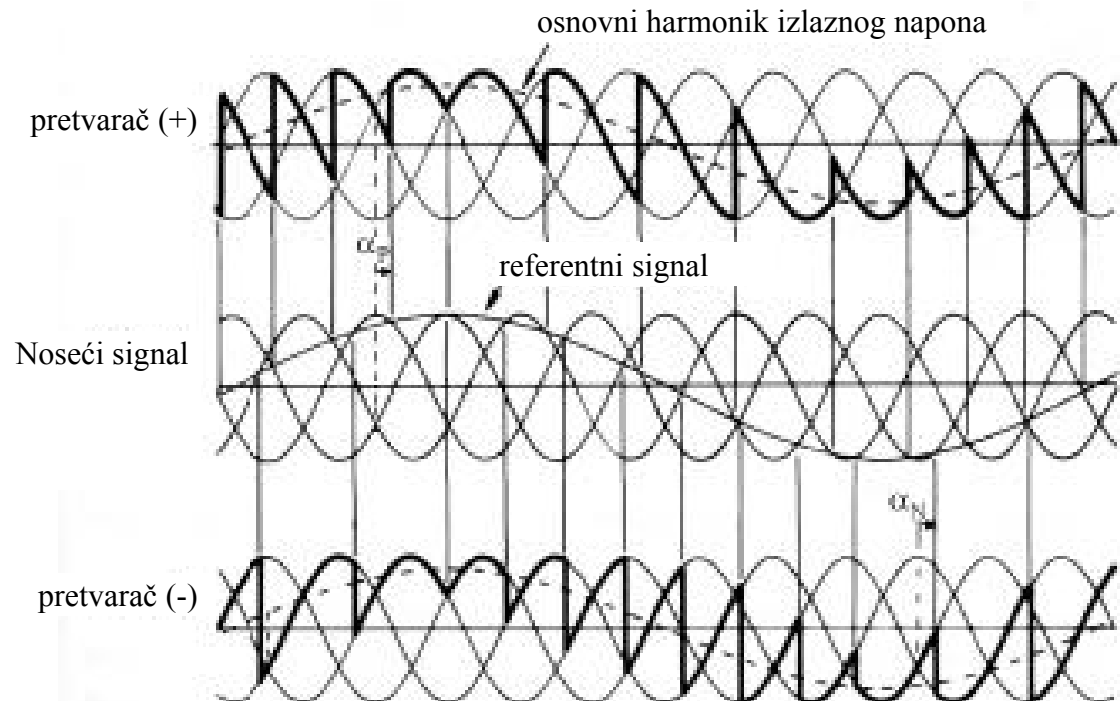


Upravljanje brzinom vrtnje asinkronog stroja

1-izravni frekvencijski pretvarači

- Pretvarači A i B mogu na svom izlazu davati **napone oba polariteta**, a **struju samo jednoga smjera**. **Antiparalelnim spojem** takva dva pretvarača omogućava se rad u **sva četiri kvadranta**
- Valni oblici napona na izlazu poluvalnog jednofaznog ciklopretvarača napajanog iz trofazne mreže prikazan je na sl.10.
- Kut α se mijenja **sinusoidalno** kako bi se na izlazu dobio harmonički optimalan napon.

Sl.10. Valni oblici napona na izlazu poluvalnog jednofaznog ciklopretvarača napajanog iz **3f mreže**



Upravljanje brzinom vrtnje asinkronog stroja

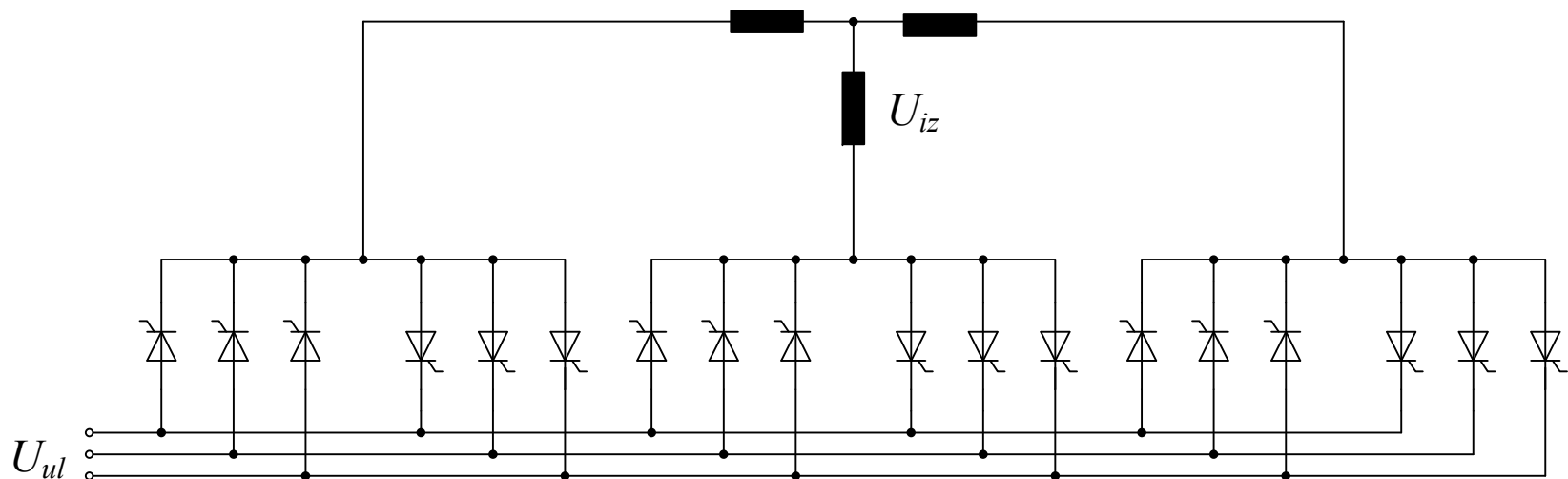
1-izravni frekvencijski pretvarači

- **Smjer struje** određuje koji od pretvarača treba biti aktivan. Kut upravljanja tiristora pretvarača **A** označava se s α_A , a pretvarača **B** s α_B .
- Kada **struja trošila mijenja smjer**, pretvarač koji je napajao trošilo **prestaje** voditi struju, a drugi pretvarač **počinje** s vođenjem struje
- Tijekom **promjene smjera struje srednja vrijednost napona na izlazima oba pretvarača treba biti jednaka**. U protivnom, prilikom prebacivanja vođenja s jednog pretvarača na drugi, došlo bi do neželjene skokovite promjene napona na trošilu

Upravljanje brzinom vrtnje asinkronog stroja

1-izravni frekvencijski pretvarači

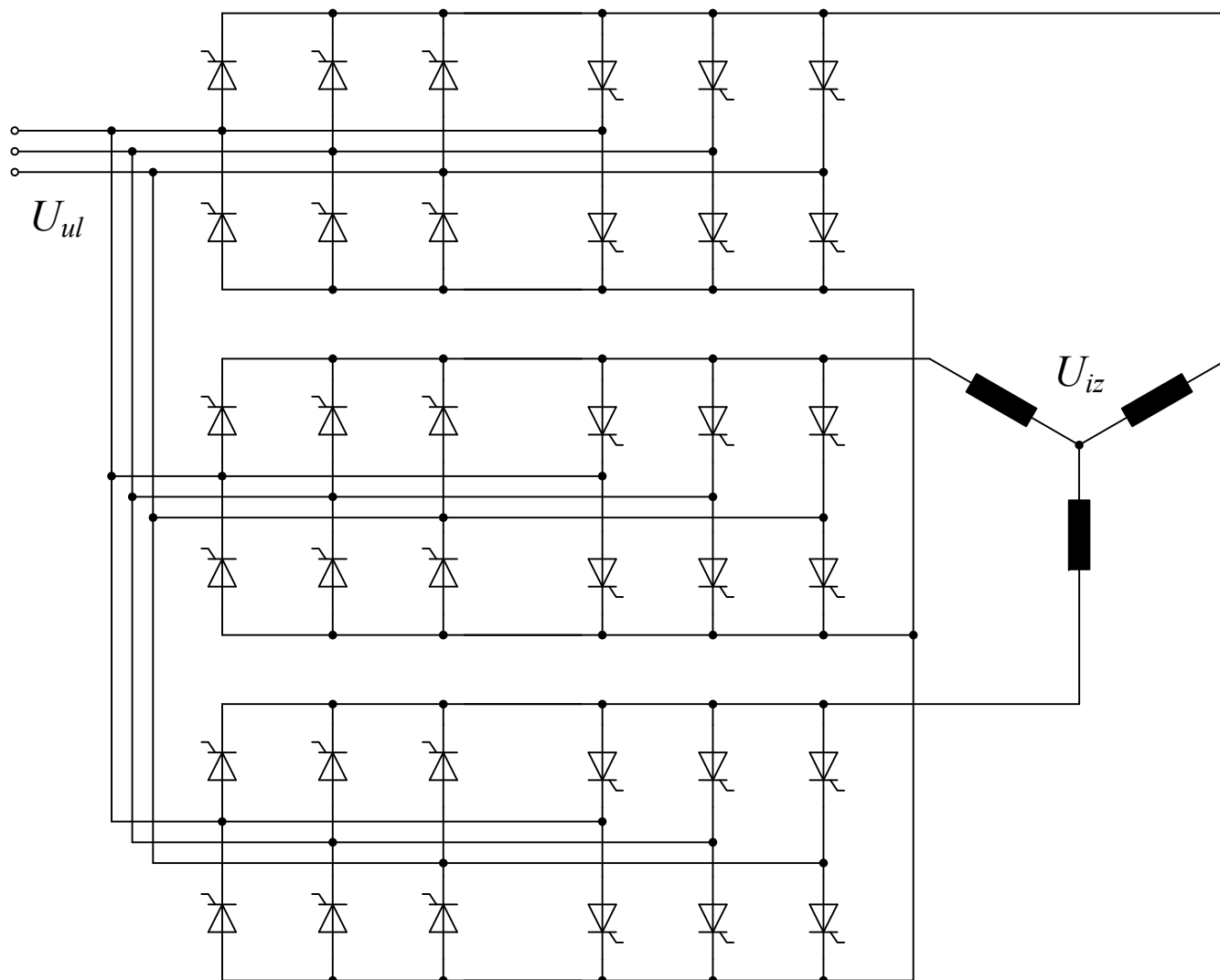
- Ako se **izlazi 3 jednofazna ciklopretvarača napajana iz trofazne mreže** spoje u zvijezdu ili trokut i ako su izlazni naponi međusobno pomaknuti za 120° **dobiva se trofazni ciklopretvarač**.
- Ovisno o tome da li su jednofazni pretvarači poluvalni ili punovalni, ciklopretvarač može biti **poluvalni** (sl.11.), ili **punovalni**, (sl.12).



Sl.11. Poluvalni trofazni ciklopretvarač (sa srednjom točkom)

Upravljanje brzinom vrtnje asinkronog stroja

1-izravni frekvencijski pretvarači



Sl.12. Punovalni trofazni ciklopretvarač (mosni spoj)

Upravljanje brzinom vrtnje asinkronog stroja

1-izravni frekvencijski pretvarači

- Na prethodnoj slici uočite da je za 4Q trofazni punoupravljivi ciklopretvarač potrebno $3(\text{broj faza}) \times 2(\text{+/- smjer struje}) \times 6(\text{broj sklopki za 1 smjer struje}) = \underline{36}$.
- Ciklopretvarači mogu raditi u modu *bez kružnih struja (blokirajući mod, način)* ili s kružnim strujama.
- U radu *bez kružnih struja* za *pozitivni smjer struje* aktivan je pretvarač A, a pretvarač B je blokiran. Za negativni smjer struje aktivan je pretvarač B, a pretvarač A je blokiran.
- Pri *prolasku struje kroz nulu* oba pretvarača su u stanju blokiranja kako bi se osigurao prekid toka struje.
- U slučaju ciklopretvarača *s kružnim strujama* u stanju vođenja su oba pretvarača. Da se izbjegne *kratki spoj izvora između izlaznih stezaljki* pretvarača A i B *spaja se prigušnica*
- Kada su oba pretvarača uključena dolazi do pojave *kružnih struja*. Ta struja teče u jednom smjeru jer tiristori omogućavaju tok struje samo u jednom smjeru.

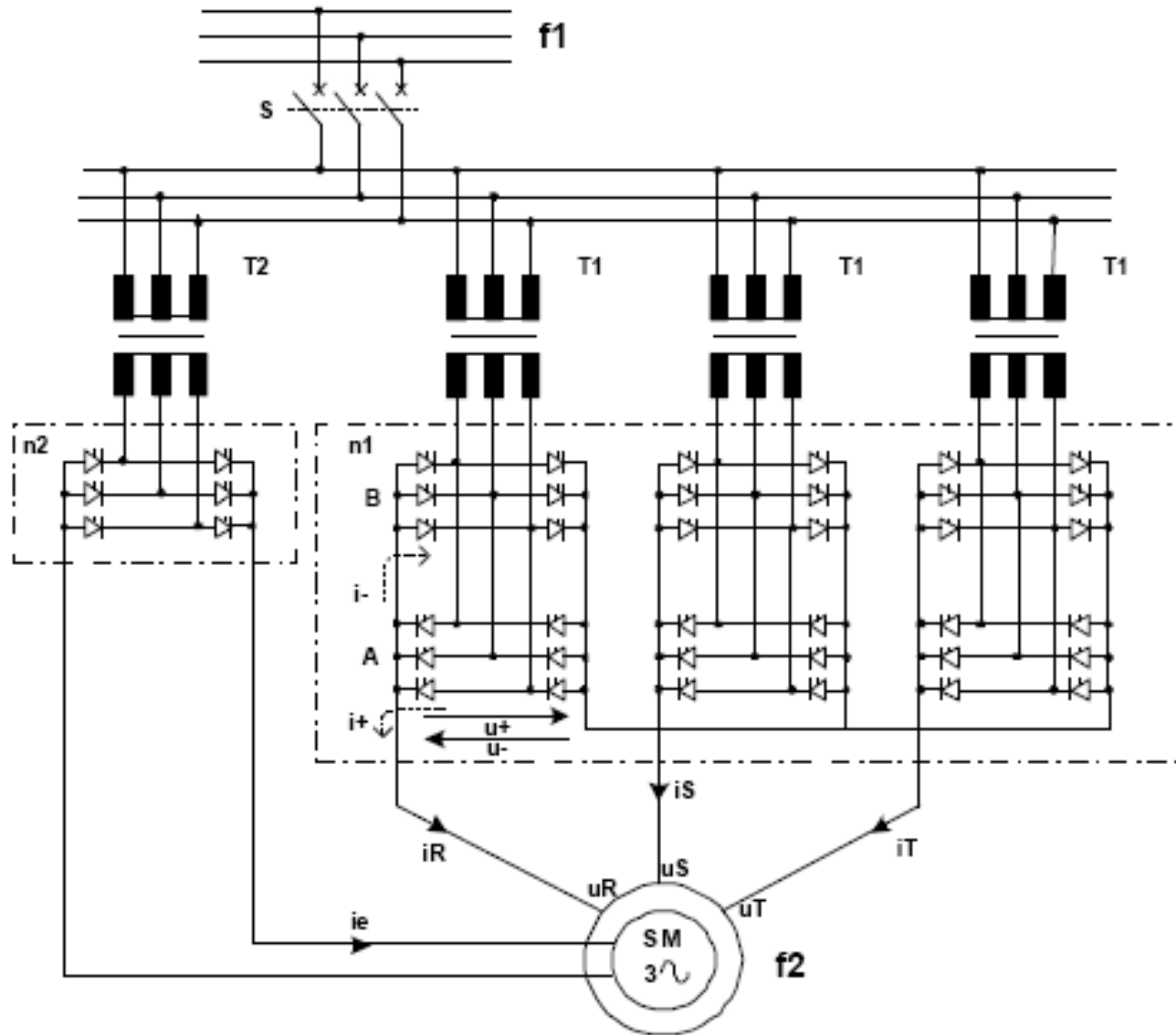
Upravljanje brzinom vrtnje asinkronog stroja

1-izravni frekvencijski pretvarači

- Važno je istaknuti **utjecaj ciklopretvarača na mrežu**. Budući da se radi u suštini o **faznom upravljanju tiristorskih usmjerivača**, mreža je neizbježno opterećena **jalovom snagom** ($\cos \alpha = \cos \varphi$)
- Kod **manjih iznosa izlaznog napona** (kut komutacije je veći!) **opterećenje mreže jalovom snagom je veće**
- Posljedica toga je da je **kod malih brzina vrtnje faktor snage znatno nizak**
- Iz navedenog razloga se često za veće snage (nekoliko 100kVA do nekoliko MVA **umjesto asinkronih koriste sinkroni strojevi**, sl.13 (valjaonice, rudnička izvozna postrojenja)
- Maksimalna izlazna frekvencija f_{i_max} ovisi o **frekvenciji napajanja ciklopretvarača f_{ul}** i o **broju pulzacija usmjerivača P** i određuje se na osnovi izraza $f_{i_max} = (Pf_{ul})/15$.
- Ako se radi o **trofaznom usmjerivaču u mosnom spoju** ($P=6$) koji se napajanja naponom frekvencije **50Hz**, onda je **maksimalna frekvencija ciklopretvarača 20Hz**.

Upravljanje brzinom vrtnje asinkronog stroja

1-izravni frekvencijski pretvarači

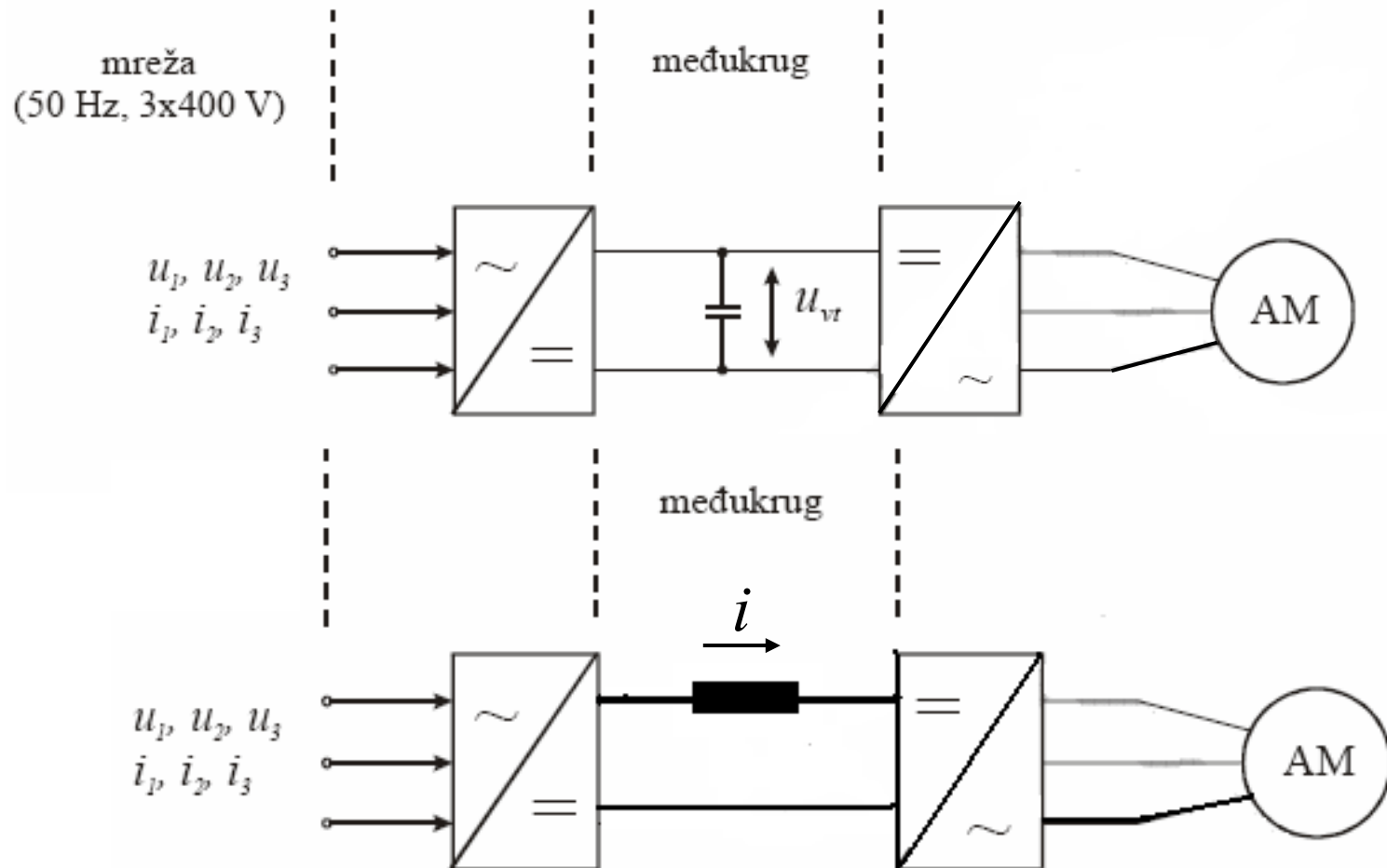


Sl.13. Sinkroni stroj napajan iz ciklopretvarača

Upravljanje brzinom vrtnje asinkronog stroja

2- neizravni frekvencijski pretvarači

- Dva osnovna tipa NEizravnih frekvencijskih pretvarača se koriste u upravljanju brzinom vrtnje asinkronog stroja



NEizravni pretvarač s naponskim (gore) i strujnim (dolje) međukrugom

Upravljanje brzinom vrtnje asinkronog stroja

2- neizravni frekvencijski pretvarači

- Kao što se vidi iz prethodne slike, za pretvarače s istosmjernim međukrugom, karakteristično je da se **energija uzeta iz mreže pretvara dva puta**.
- Najprije se **pomoću usmjerivača pretvara u istosmjernu energiju** i drugi put s pomoću izmjenjivača frekvencije u energiju željenog napona (struje) i frekvencije trofaznog sustava
- Pretvarač frekvencije s naponskim međukrugom (***utisnuti napon***) sastoji se od **usmjerivača, istosmjernog međukruga i izmjenjivača** upravljanog **širinsko Impulsnom Modulacijom** (ŠIM, engl. *PWM*).
- Tiristorski pretvarač s ***utisnutom strujom*** sastoji se od **usmjerivača, prigušnice u međukrugu, te izmjenjivača**.
- U ovom spoju ***utiskuje*** se struja **pomoću prigušnice** u međukrugu, a **usmjerivač služi kao izvor konstantne struje**.
- Zbog toga je **usmjerivač upravljan krugom regulacije struje međukruga**
- U **prisilnoj komutaciji tiristora izmjenjivača sudjeluje i sam motor**, te zbog toga izmjenjivač i motor moraju biti međusobno usklađeni (motor je dio komutacijskog kruga).

Upravljanje brzinom vrtnje asinkronog stroja

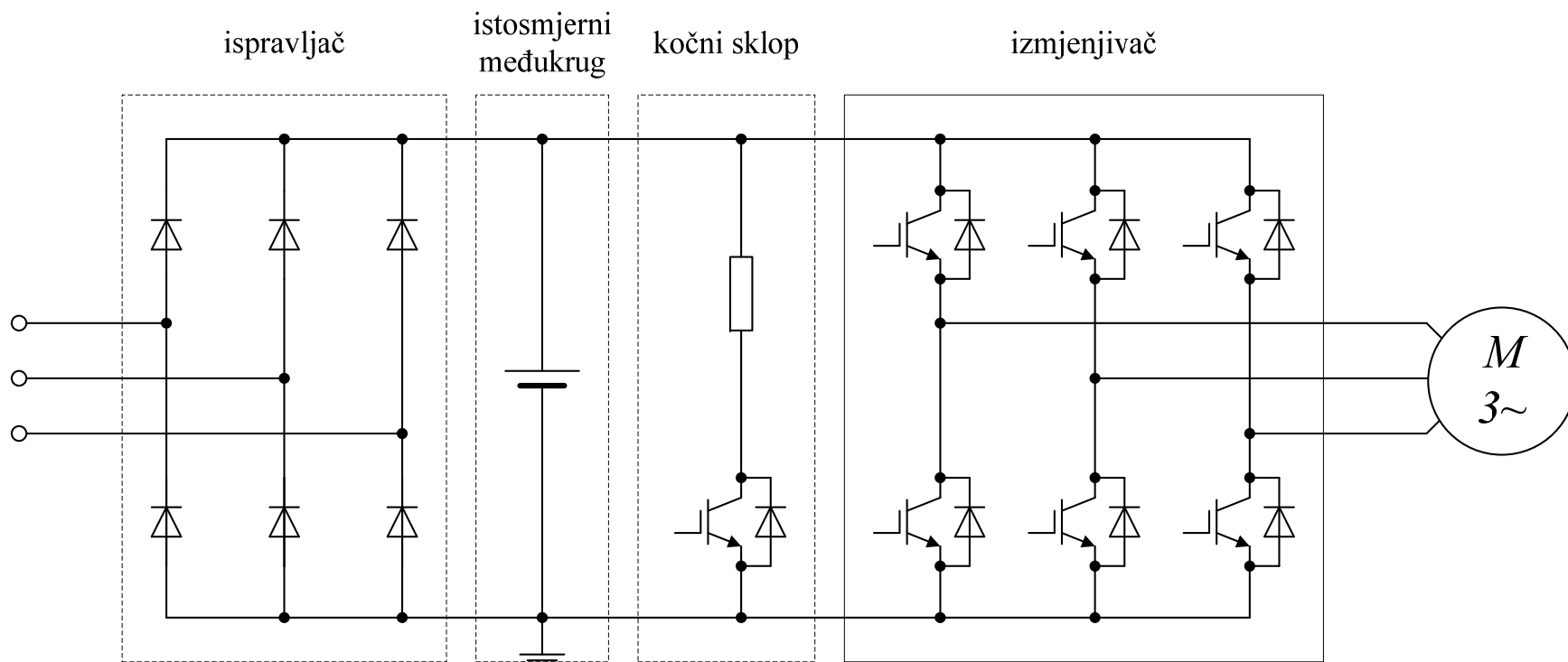
2- neizravni frekvencijski pretvarači

- Izmjenjivački dio neizravnih pretvarača se realizira s **učinskim sklopkama koje rade u sklopnom način u rada**.
- Tranzistorski pretvarači frekvencije s **IGBT** tranzistorom primjenjuju se za snage do oko **600kVA**.
- Umjesto **IGBT tranzistora**, susreću se rješenja s **MOSFET tranzistorima**, koji imaju **iznimno malu potrošnju energije u pobudnom stupnju**, a imaju i veliku brzinu sklapanja ($< 1\mu s$).
- Pretvarači s MOSFET tranzistorima grade se za manje napone (**$< 200V$**) i snage uz veću frekvenciju (**$> 25kHz$**).
- Primjenom GTO tiristora **smanjuju se broj komponenata, dimenzije, težina i cijena uređaja**, a također se smanjuje buka uređaja, budući da **ne zahtijeva komutacijski krug**. Rade se za velike snage.

Upravljanje brzinom vrtnje asinkronog stroja

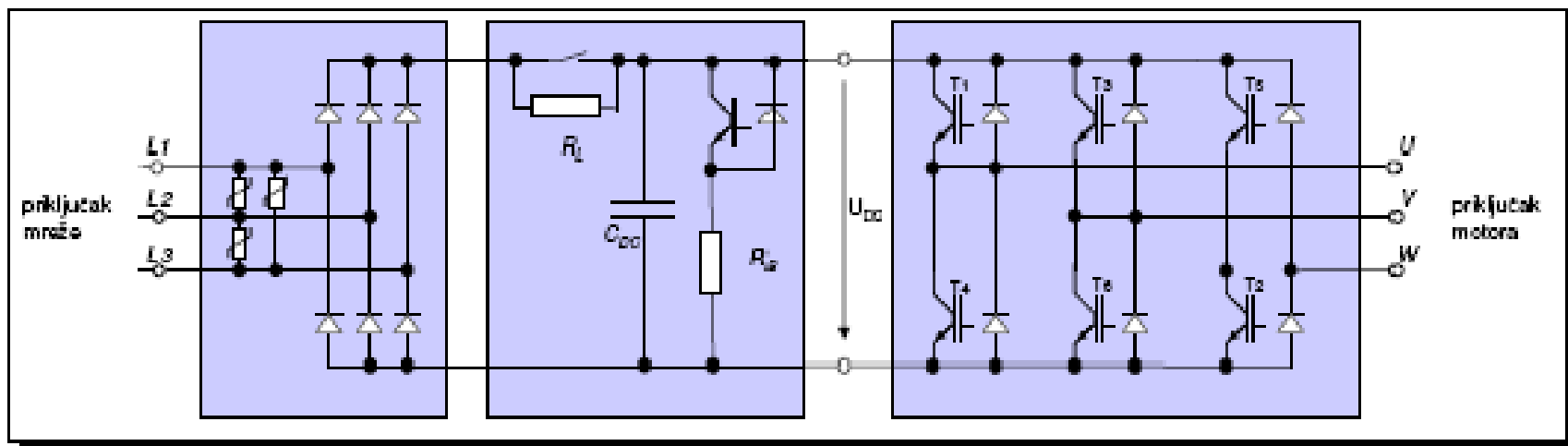
2-neizravni frekvencijski pretvarači

- Od ove dvije inačice neizravnih pretvarača najviše se koristi onaj s **naponskim međukrugom** (pretvarač s *utisnutim naponom*), pa će o njemu biti više riječi



Sl.13. Neizravni frekvencijski pretvarač s naponskim međukrugom

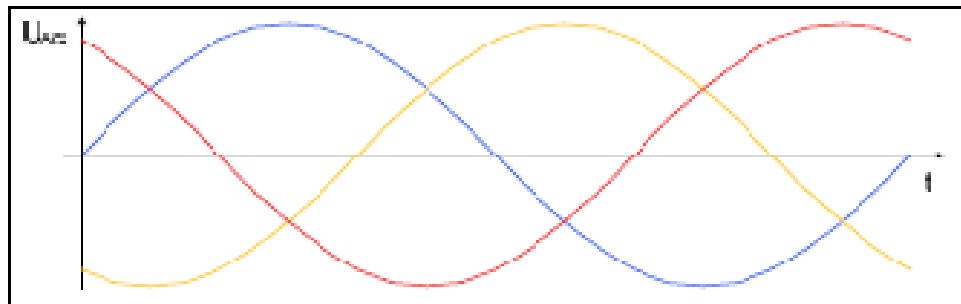
UPRAVLJANJE S ASINKRONIM KAVEZNIM STROJEM – neizravni AC/AC pretvarač



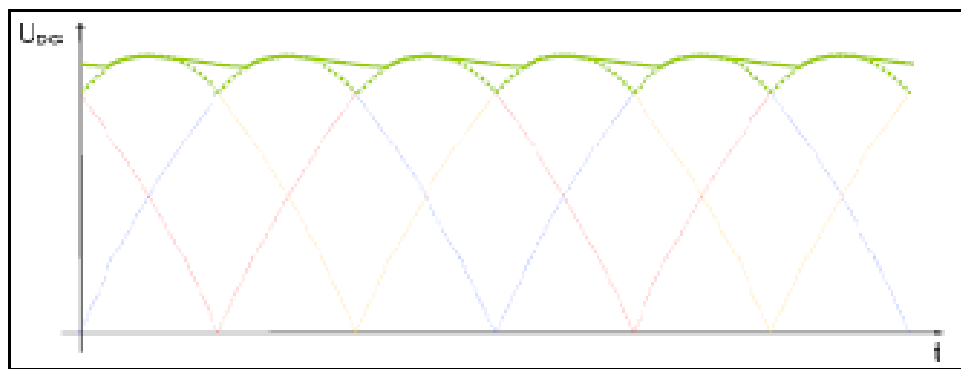
a) električna shema

Električna shema PWM izmjenjivača s istosmjernim međukrugom

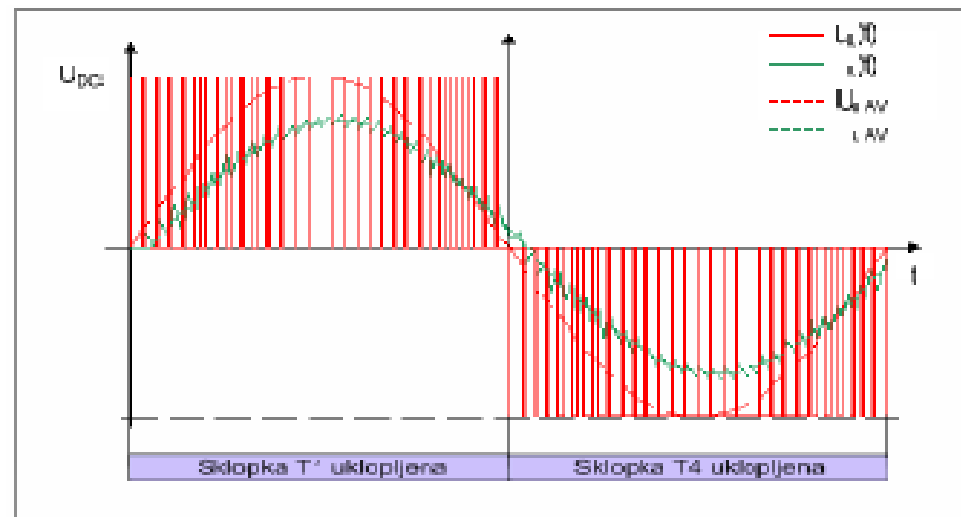
Pripadni valni oblici pretvarača s prethodnog slide-a



Ulazni (mrežni) napon



Napon istosmjernog međukruga



Napon na stezaljkama motora

Upravljanje brzinom vrtnje asinkronog stroja

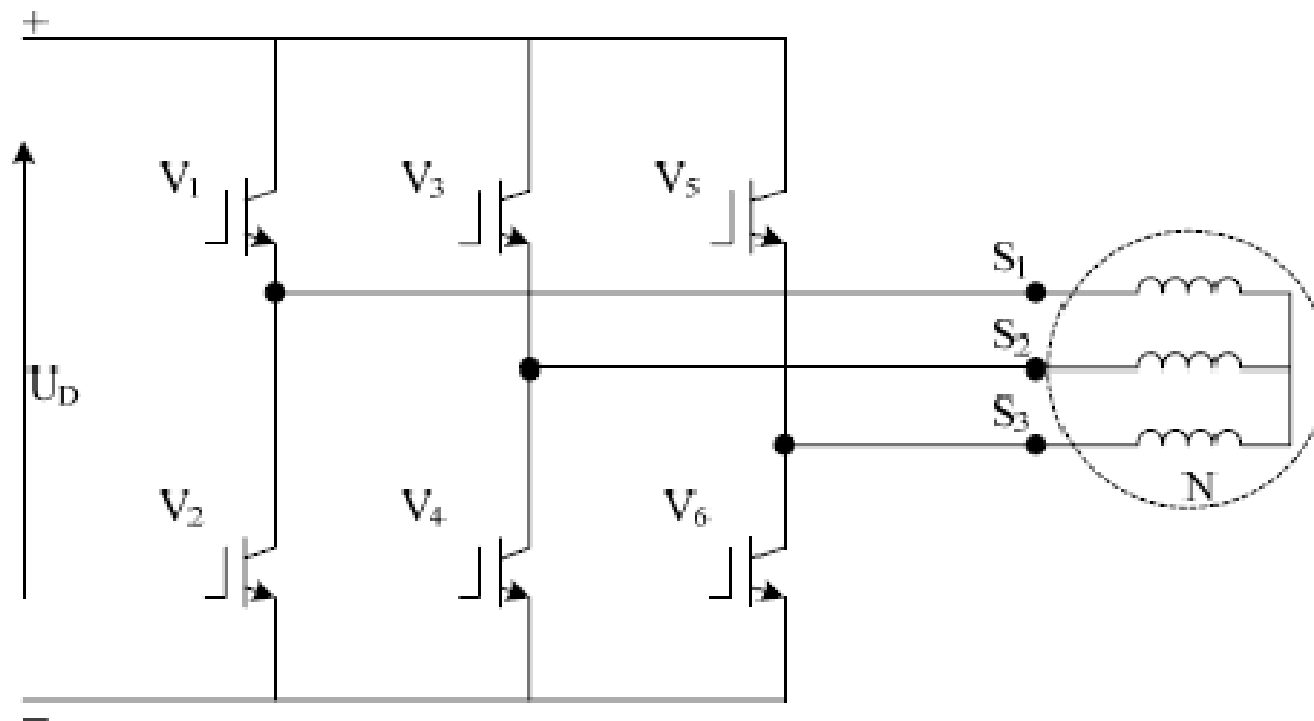
2-neizravni frekvencijski pretvarači

- Kočenje elektromotornog pogona provodi se pomoću **upravljivog otpornika (upravljanog tranzistorom)** uključenog u istosmjerni međukrug.
- Energija kočenja motora **ne vraća se u mrežu**, nego se **disipira na otporniku**.
- Za kočenje s vraćanjem energije u mrežu potrebno je **na mrežnoj strani antiparalelno dograditi tiristorski usmjerivač**. Za takve primjene potrebno je analizom utvrditi isplativost investicije u takav pretvarač.
- Upravljanje izmjenjivačem se postiže na više načina. Sve metode se svode na sklapanje poluvodičkih sklopki s ciljem da se na izlazu izmjenjivača dobije **izmjenični trofazni napon**.
- Najjednostavnija metoda formiranja trofaznog simetričnog napona je **metoda šest koraka** (eng. *Six-Step Method*), kojom se na izlazu pretvarača (izmjenjivača) dobije **pravokutni napon frekvencije određene taktom upravljanja** poluvodičkih sklopki , sl.14.

Upravljanje brzinom vrtnje asinkronog stroja

2-neizravni frekvencijski pretvarači

- Za izmjenjivač realiziran IGBT sklopka realizira se jednostavan algoritam upravljanja.



Sl.14. Načelna shema upravljanja izmjenjivačem

Upravljanje brzinom vrtnje asinkronog stroja

2-neizravni frekvencijski pretvarači

- Da bi se dobio trofazni simetričan oblik napona na izlazu izmjenjivača, potrebno je upravljati sa sklopkama izmjenjivača [na sl.14.](#) prema prikazanoj [Tablici 1.](#)

Tablica 1. Prikaz vođenja poluvodičkih sklopki

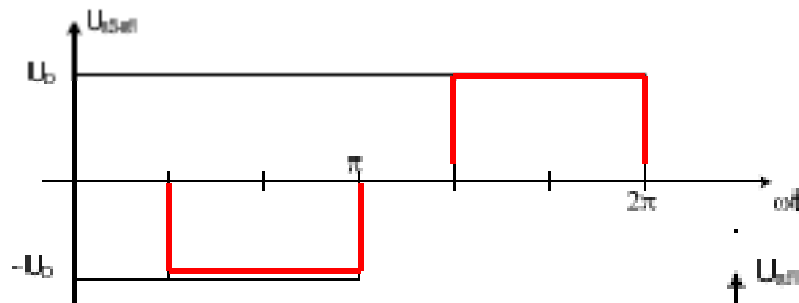
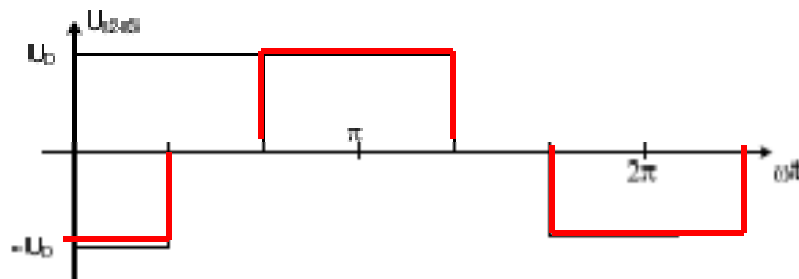
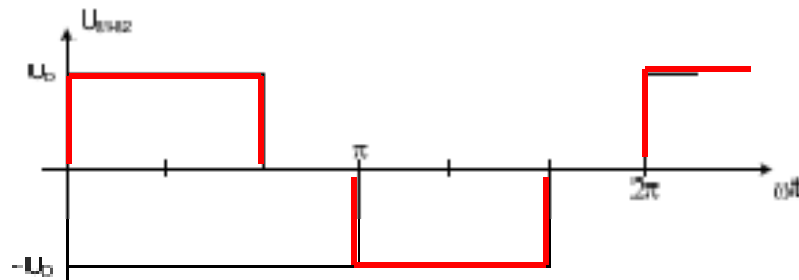
Vremenski interval	I	II	III	IV	V	VI
-	V5	V4	V1	V6	V3	V2
-	V4	V1	V6	V3	V2	V5
-	V1	V6	V3	V2	V5	V4

- Unutar jedne periode [svaka sklopka se jednom uključuje i isključuje](#) prema navedenoj tablici
- U svakom trenutku [uključene su tri poluvodičke sklopke](#)

Upravljanje brzinom vrtnje asinkronog stroja

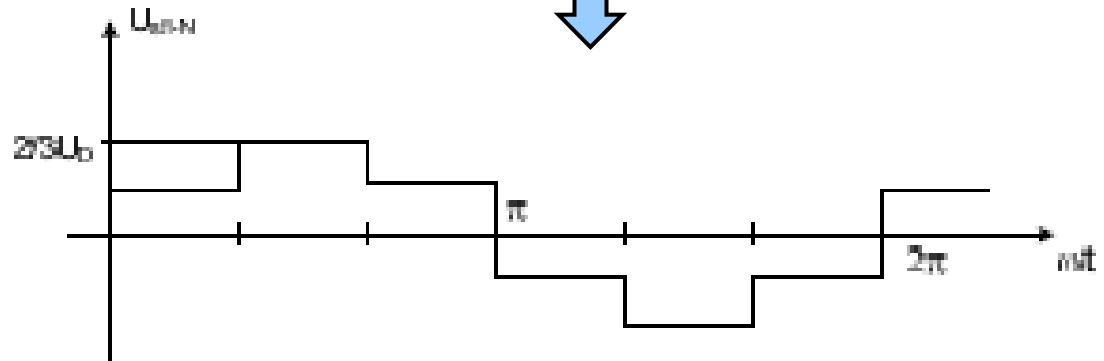
2-neizravni frekvencijski pretvarači

Sl.15. **Linijski i fazni naponi** na stroju dobiveni pravokutnom modulacijom prema sl.14,



Linijski naponi

Izlazni napon U_{1N}



Upravljanje brzinom vrtnje asinkronog stroja

2-neizravni frekvencijski pretvarači

- Ovaj oblik napona, kao rezultat **pravokutne modulacije**, unosi veliko **izobličenje struje**, a **magnetski tok motora je nesinusoidalan**.
- Pretvarač frekvencije bi morao imati oblik izlaznog napona takav da **magnetski tok motora bude što bliži po iznosu i obliku toku proizvedenom sinusnim trofaznim naponom**.
- **Sinusoidalni magnetski tok i struja motora** može se dobiti **pulsno širinskom modulacijom**.
- Danas se pretvarači izvode u **različitim inačicama pulsno širinske modulacije**.
- **Oblik izlaznog napona je tim bolji što je proizvedeni magnetski tok bliži toku koji bi bio proizveden sinusnim trofaznim naponom**.
- Kako to postići?? Nameće se kriterij po kojem bi srednja vrijednost izlaznog napona izmjenjivača u nekom dovoljno kratkom intervalu vremena morala biti jednaka srednjoj vrijednosti sinusnog napona u tom istom intervalu.

Upravljanje brzinom vrtnje asinkronog stroja

2-neizravni frekvencijski pretvarači

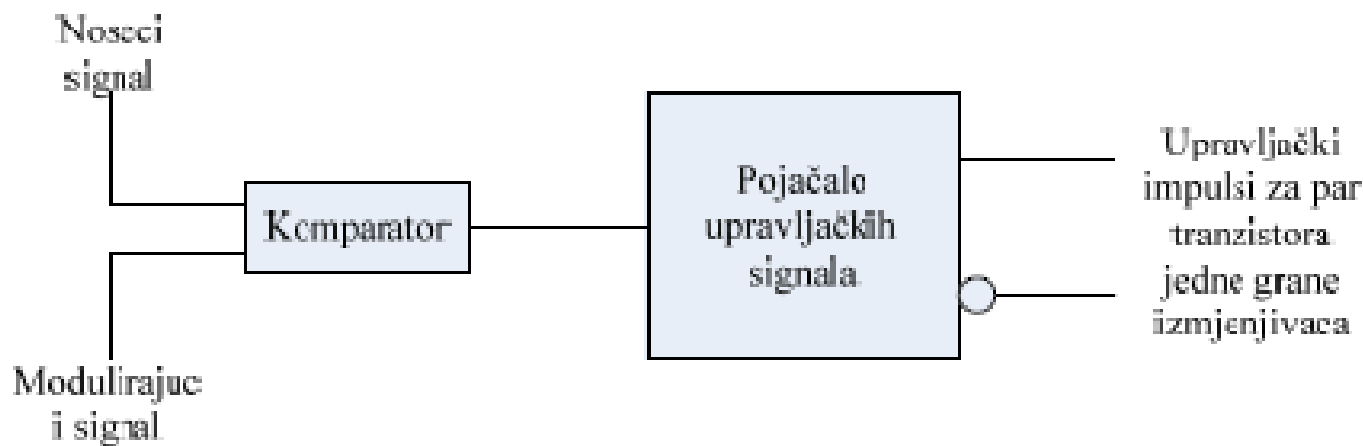
- Što je taj interval kraći, to je bolji oblik proizvedenog magnetskog toka.
- Povećanjem broja impulsa po poluperiodi izlaznog napona, znatno se mogu smanjiti, ili čak potpuno eliminirati, harmonici nižeg reda
- Na taj način se može smanjiti veličina i cijena eventualno ugrađenog filtra.
- Sam stroj, svojom niskopropusnom frekvencijskom karakteristikom filtrira harmonike višeg reda. Tako se postižu dobra upravljačka svojstva u širokom opsegu snaga i frekvencija.

Upravljanje brzinom vrtnje asinkronog stroja

2-neizravni frekvencijski pretvarači

Modulacija usporedbom nosećeg i modulacijskog signala

- Najjednostavniji je način širinsko-impulsne modulacije usporedbom **nosećeg signala** i istosmjernog **modulirajućeg signala**, sl.16.
- Promjenom **razine istosmjernog signala** (modulacijski signal) **u rasponu amplitude trokutastog signala** (noseći signal), **linearno** se mijenja **širina pravokutnih impulsa** izlaznog napona.
- Broj impulsa po poluperiodi izlaznog napona mijenja se promjenom frekvencije trokutastog signala (**što se s tim dobiva?**).



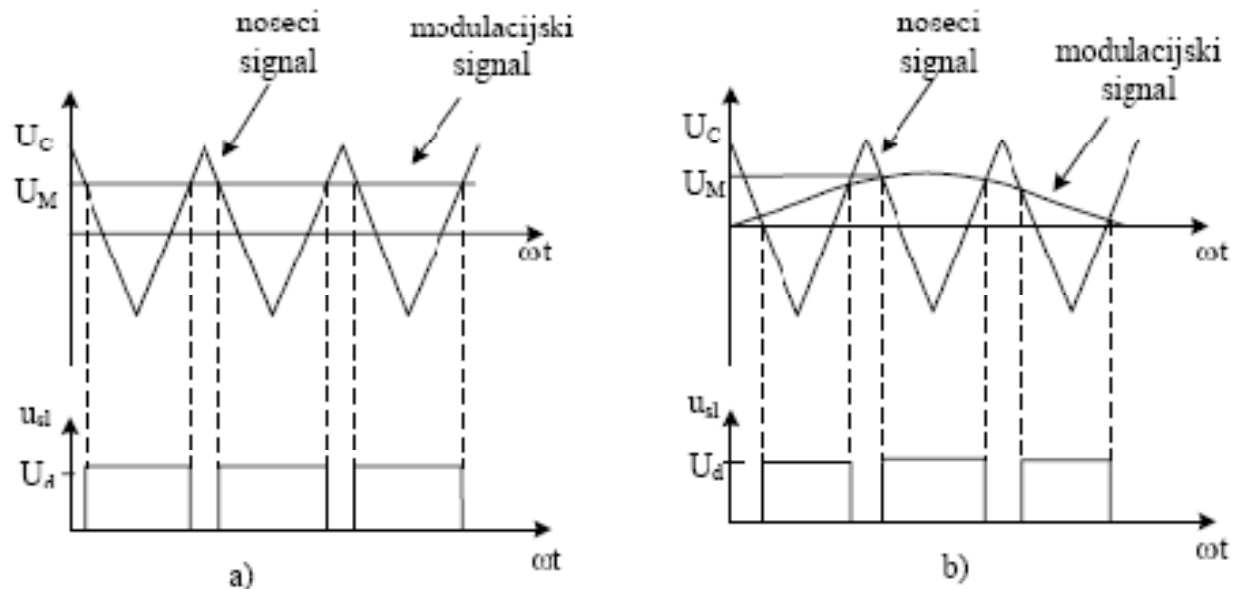
Sl.16.

Upravljanje brzinom vrtnje asinkronog stroja

2-neizravni frekvencijski pretvarači

- Upravljački impulsi elektroničkih sklopki se generiraju u trenucima kada su vrijednosti nosećeg i modulacijskog signala jednake, vidi sl.
- Frekvencija sklapanja je jednaka frekvenciji nosećeg signala.
- Pokazuje se da se amplitude harmonika nižeg reda više smanjuju što je broj M pravokutnih impulsa po poluperiodi izlaznog napona veći. **VAŽNO!**
- S druge strane, uz veći broj pravokutnih impulsa povećavaju se amplitude harmonika višeg reda (koji stvaraju zanemarive gubitke u krugovima s induktivitetima)

Sl.17. Modulacija
usporedbom nosećeg
i modulacijskog
signala



Upravljanje brzinom vrtnje asinkronog stroja

2-neizravni frekvencijski pretvarači

- Bolja se svojstva postižu ako je modulački signal sinusni signal, sl.17.b
- Širina pravokutnih impulsa je tada sinusna funkcija kuta (položaja) impulsa u periodi modulirajućeg signala.
- Perioda trokutastog signala se odabire tako da bude cjelobrojni višekratnik periode sinusnog signala (tzv. sinkrona modulacija).
- Noseći trokutni signal može biti zajednički svim fazama, dok su modulački sinusni signali za svaku fazu međusobno pomaknuti za 120°
- Odnos amplitude modulačkog i nosećeg signala $m = U_m/U_C$ naziva se indeksom modulacije.
- Promjenom indeksa modulacije upravlja se amplitudom izlaznog napona.
- Za $m \leq 1$ odnos indeksa m i srednje vrijednosti amplitude izlaznog signala je linearan.
- Moraju se zadržati minimalna vremena zadržke između dviju komutacija kako bi se omogućilo uspješno komutiranje i tako se izbjegao mogući kratki spoj među granama izmjenjivača.

Upravljanje brzinom vrtnje asinkronog stroja

2-neizravni frekvencijski pretvarači

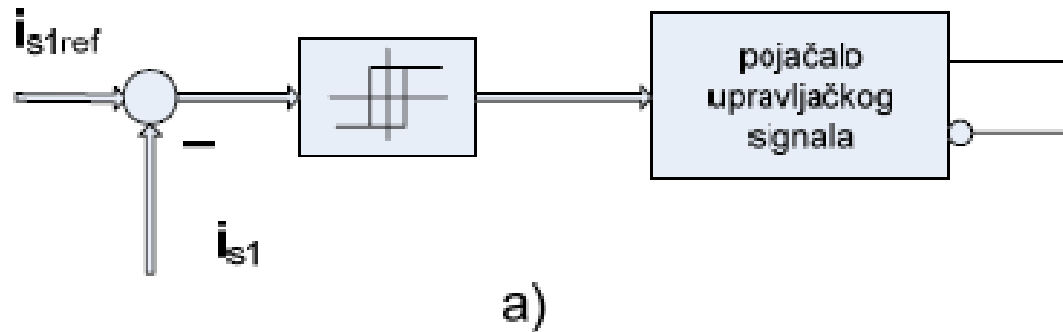
- Odnos frekvencija nosećeg i modulirajućeg signala (k) određuje frekvencijski sastav izlaznog napona. Pokazuje se da su amplitude harmonika neovisne o parametru k
- Što je veći k , veći su gubici sklapanja sklopki, ali su manji harmonički gubici u stroju (KOMPROMIS, da li se želi gubitke iz motora “preseliti” u pretvarač?!)

Modulacija reguliranjem statorsche struje

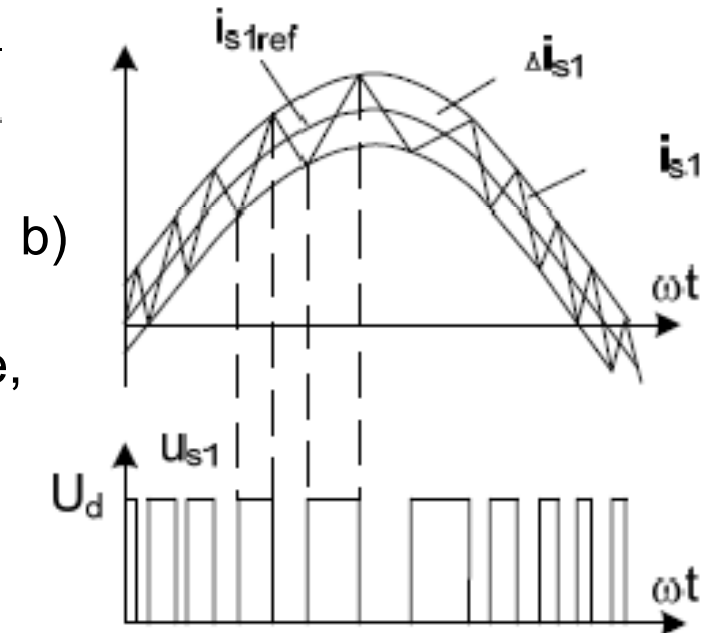
- Modulacija izlaznog napona izmjenjivača reguliranjem statorsche struje odstranjuje utjecaj pulzacija napona međukruga na struju motora. To se postiže korištenjem tzv. histereznog regulatora statorsche struje (BANG-BANG regulacija)
- Na ulaz sklopa, prikazanog na sl.18., dovodi se vodeća veličina struje statora

Upravljanje brzinom vrtnje asinkronog stroja

2-neizravni frekvencijski pretvarači

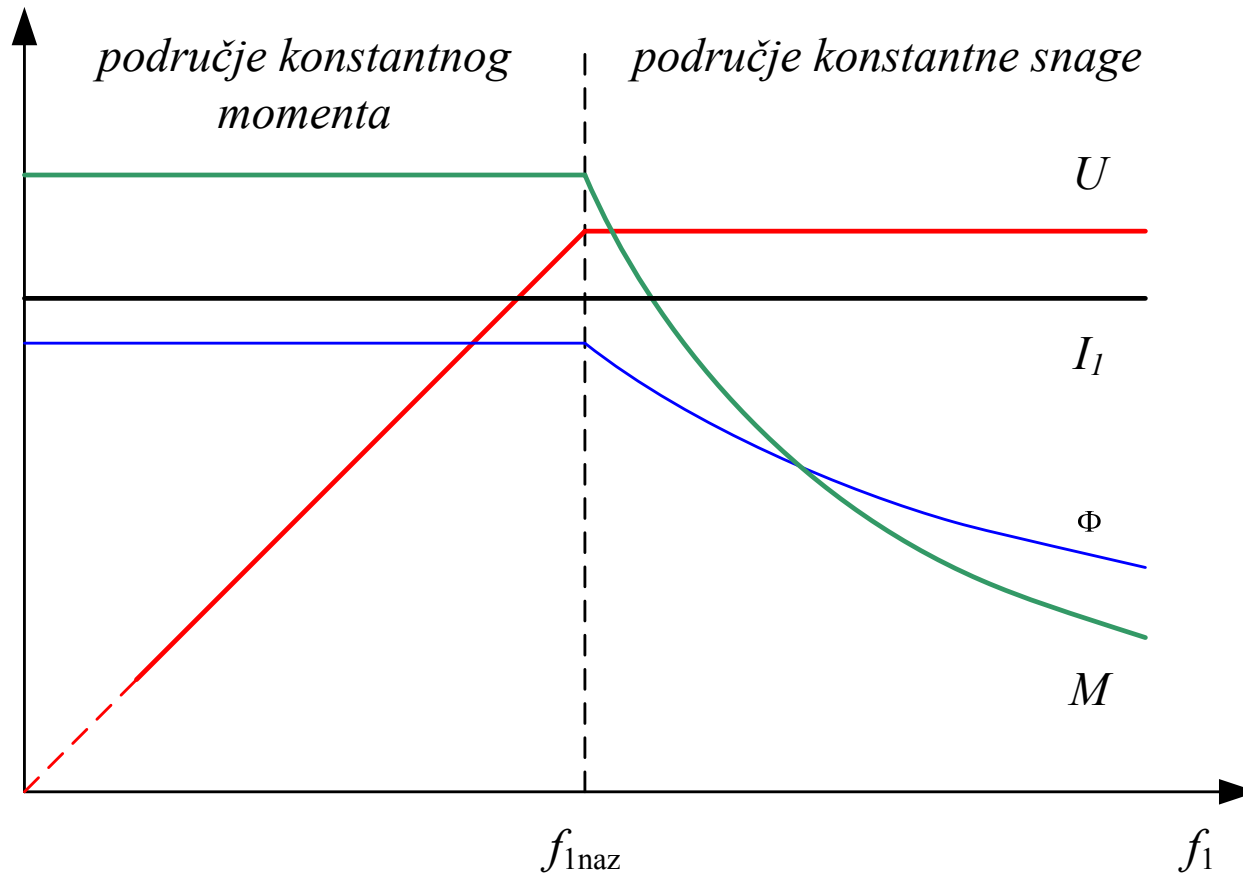


Sl.18. Modulacija regulacijom statorsche struje,
a) shema regulatora, b) valni oblik struje



- Razlika struje, preko dvopoložajnog regulatora s histerezom, određuje impulse za komutaciju sklopki izmjenjivača.
- Statorska je struja prisiljena pratiti **sinusni oblik referentnog signala** u **području određenom širinom histereze regulatora**
- Pulzacije struje (dakle i momenta) određene su širinom histereze i ne ovise o promjenama napona međukruga.
- Regulacijom struje **naponski izmjenjivač** se zapravo ponaša kao **strujni**.

SUSTAVI **SKALARNOG** UPRAVLJANJA S ASINKRONIM KAVEZNIM STROJEM



- Da bi magnetski tok i moment stroja ostali nepromijenjeni i pri malim brzinama, potrebno je kompenzirati pad napona na otporu namota statora, što se vidi iz izraza (1) i (2).

SUSTAVI **SKALARNOG** UPRAVLJANJA S ASINKRONIM KAVEZNIM STROJEM

- **PODSJETNIK:** Uz pretpostavku da je **otpor statorskog namota zanemariv**, tj. da je pad napona na tom otporu mnogo manji od napona U , vrijedi izraz

$$\Phi_m \cong \frac{1}{N_1 \cdot f_{n1} \cdot \sqrt{2} \cdot \pi} \cdot \frac{U}{f_1} \quad (1)$$

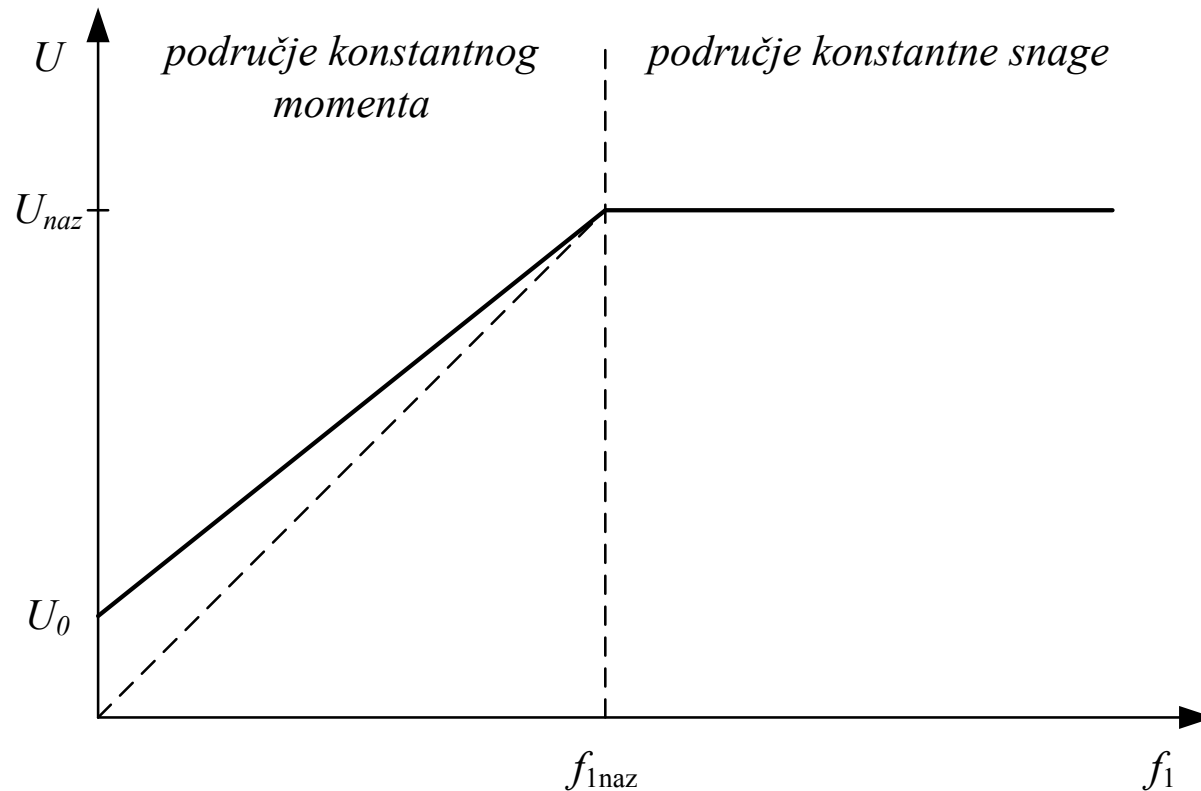
koji pokazuje vezu između magnetskog toka, napona i frekvencije. Isto tako, kombiniranjem osnovnih izraza matematičkog modela AM-a, dobije se izraz za prekretni (maksimalni) moment motora

$$M_{pr} \cong \frac{3 \cdot p}{8 \cdot \pi^2 \cdot L'_{\sigma 2}} \cdot \left(\frac{U}{f_1} \right)^2 = k \cdot \left(\frac{U}{f_1} \right)^2 \quad (2)$$

Iz izraza (2) slijedi da je **za održavanje konstantnog prekretnog momenta** potrebno omjer **U/f_1 držati konstantnim**. Područje u kojem se tok održava konstantnim naziva se **područje konstantnog momenta**.

SUSTAVI **SKALARNOG** UPRAVLJANJA S ASINKRONIM KAVEZNIM STROJEM

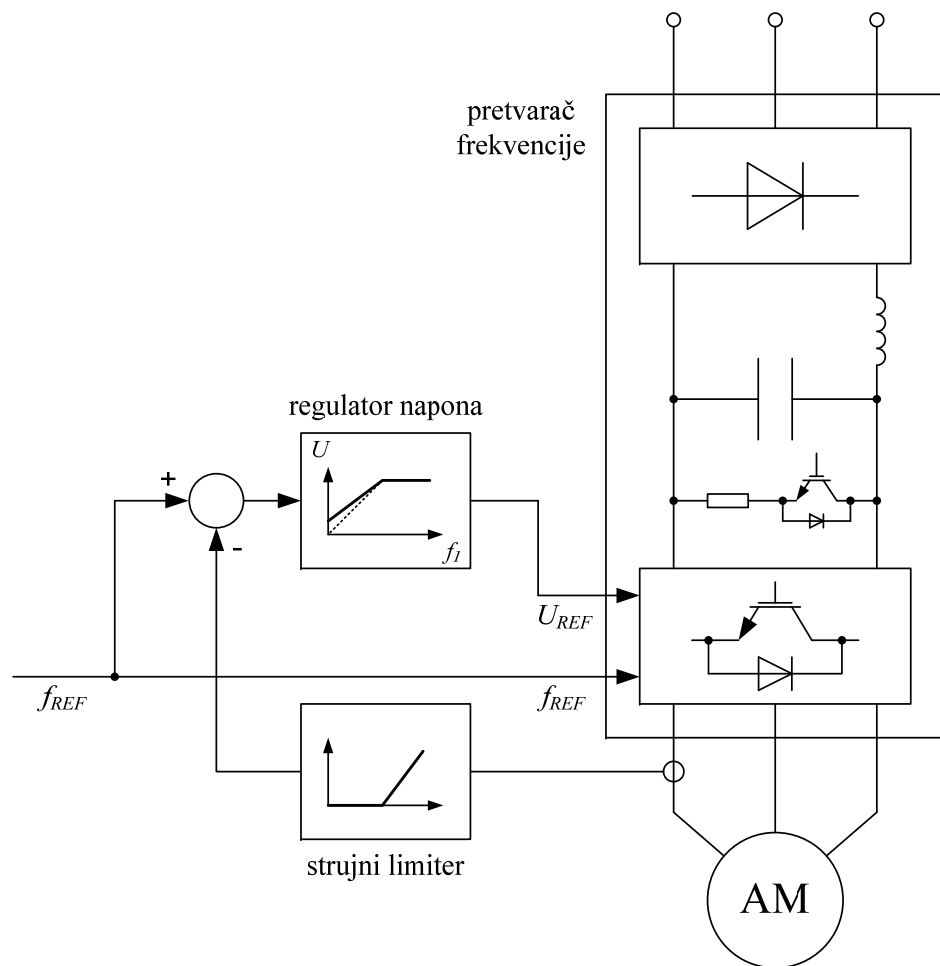
- Skalarno upravljanje s **kompensacijom pada napona na otporu namota statora** prikazano je na slici



Ovisnost amplitude napona statora o frekvenciji u slučaju kompenzacije pada napona na otporu namota statora

SUSTAVI **SKALARNOG** UPRAVLJANJA S ASINKRONIM KAVEZNIM STROJEM – u otvorenoj petlji

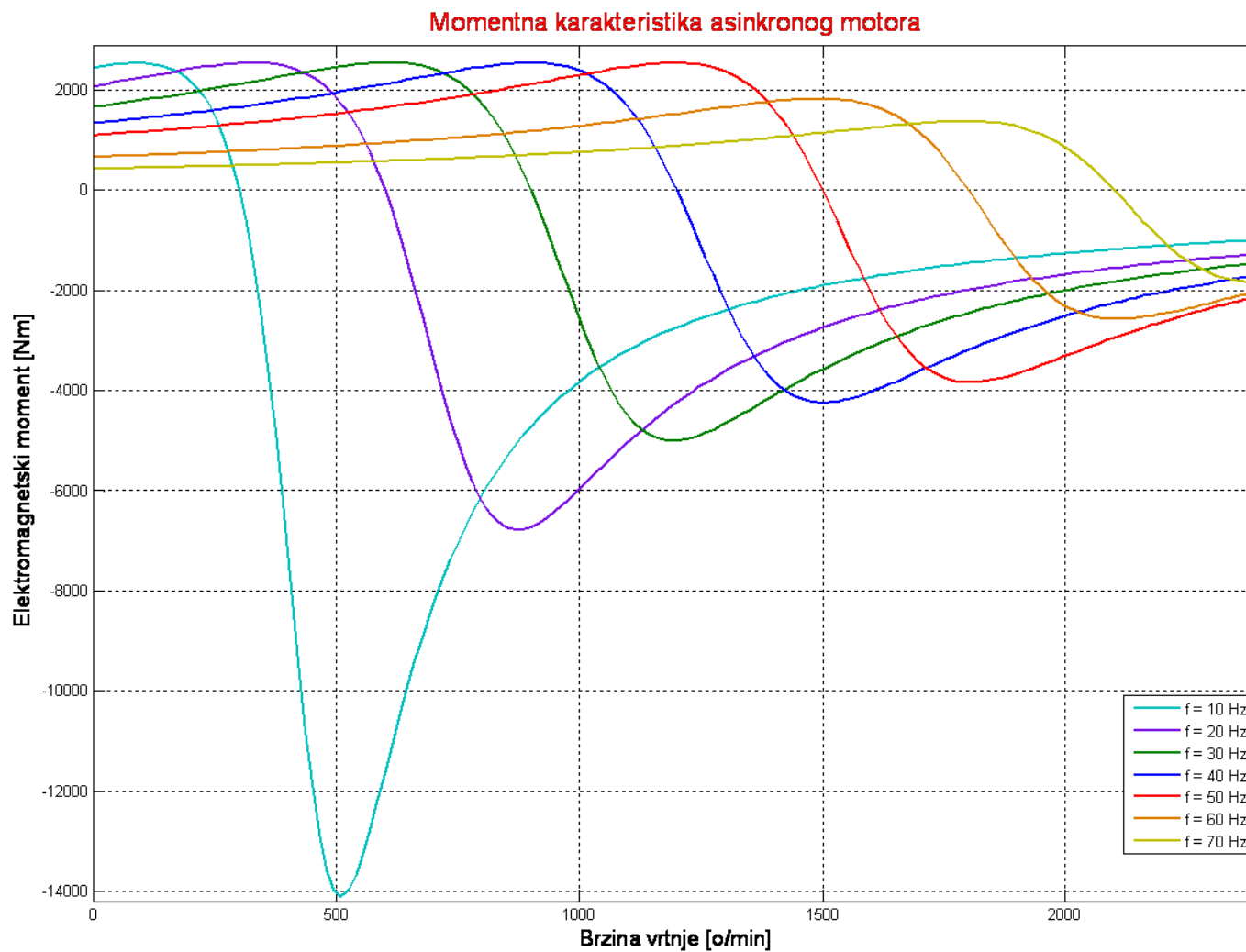
- Dvije su uobičajene izvedbe skalarnog upravljanja: u otvorenoj i zatvorenoj petlji. Pri tome se koristi pretvarač frekvencije s utisnutim naponom (naponskim međukrugom)



- Kao referentna vrijednost zadaje se frekvencija napona statora
- Na osnovu zadane referentne vrijednosti frekvencije, regulator napona generira odgovarajuću referentnu vrijednost napona statora
- Strujni limiter (ograničivač) smanjuje automatski napon povećanjem struje statora

UPRAVLJANJE S ASINKRONIM KAVEZNIM STROJEM – u

otvorenoj petlji



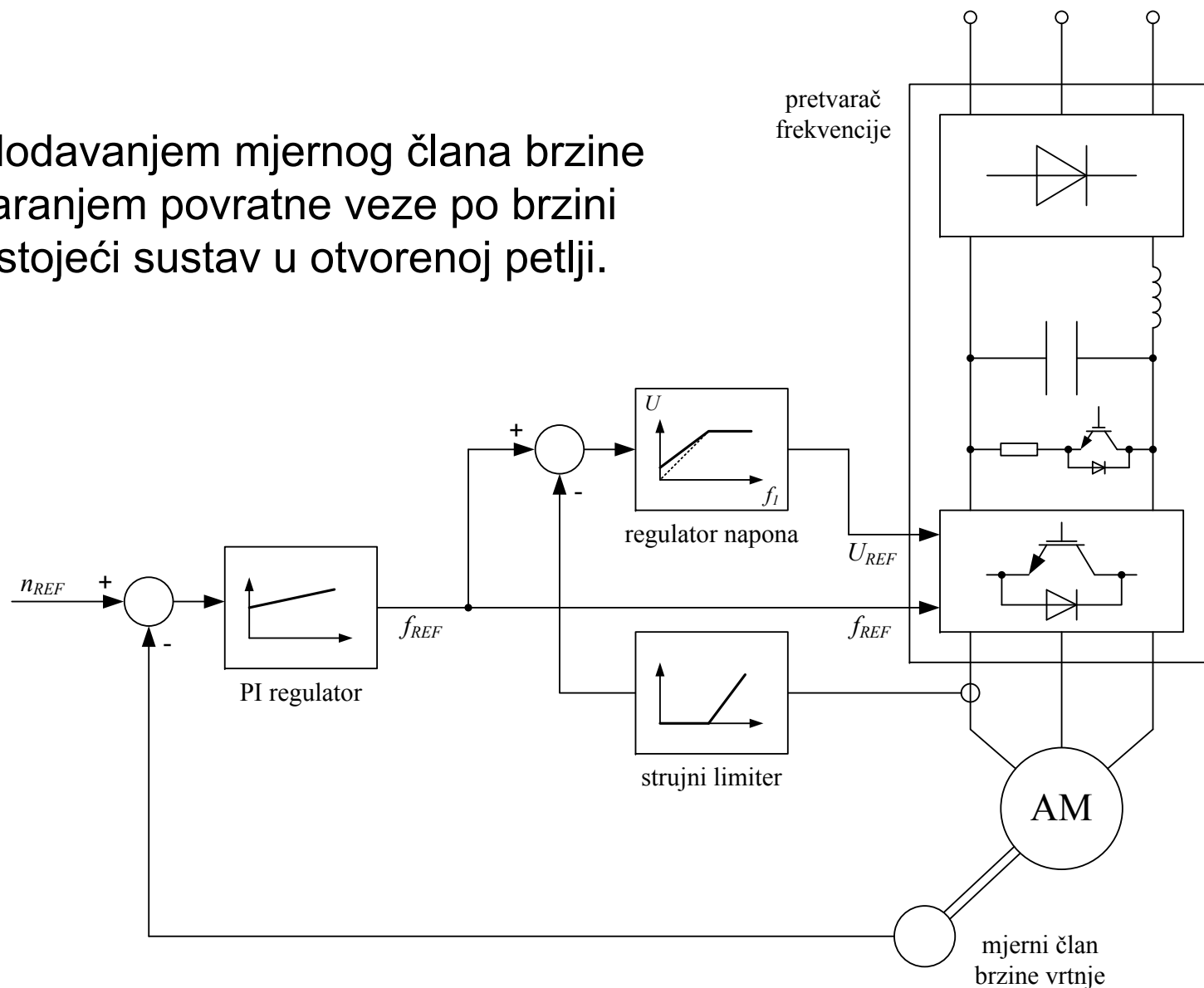
Rezultati simulacije – otvorena petlja

UPRAVLJANJE S ASINKRONIM KAVEZNIM STROJEM – u otvorenoj petlji

- Svaka promjena momenta tereta ili amplitude napona statora pri skalarnom upravljanju u otvorenoj petlji uzrokovati će promjenu brzine vrtnje stroja
- Ukoliko tehnološki proces zahtijeva stalno održavanje postavljene brzine vrtnje pri čemu su moguće i promjene opterećenja stroja tijekom rada, ovaj nedostatak skalarnog upravljanja u otvorenoj petlji se mora nadomjestiti zatvaranjem regulacijske petlje po brzini vrtnje
- U tom slučaju se mora koristiti mjerni član brzine vrtnje (najčešće inkrementalni enkoder ili tahogenerator). U slučaju da pretvarač sadrži model motora, može se koristiti i estimirana (procijenjena) vrijednost brzine dobivene iz modela.

UPRAVLJANJA S ASINKRONIM KAVEZNIM STROJEM – u zatvorenoj petlji

- Postiže se dodavanjem mjernog člana brzine vrtnje i zatvaranjem povratne veze po brzini vrtnje na postojeći sustav u otvorenoj petlji.



SUSTAVI **SKALARNOG** UPRAVLJANJA S ASINKRONIM KAVEZNIM STROJEM - **zaključak**

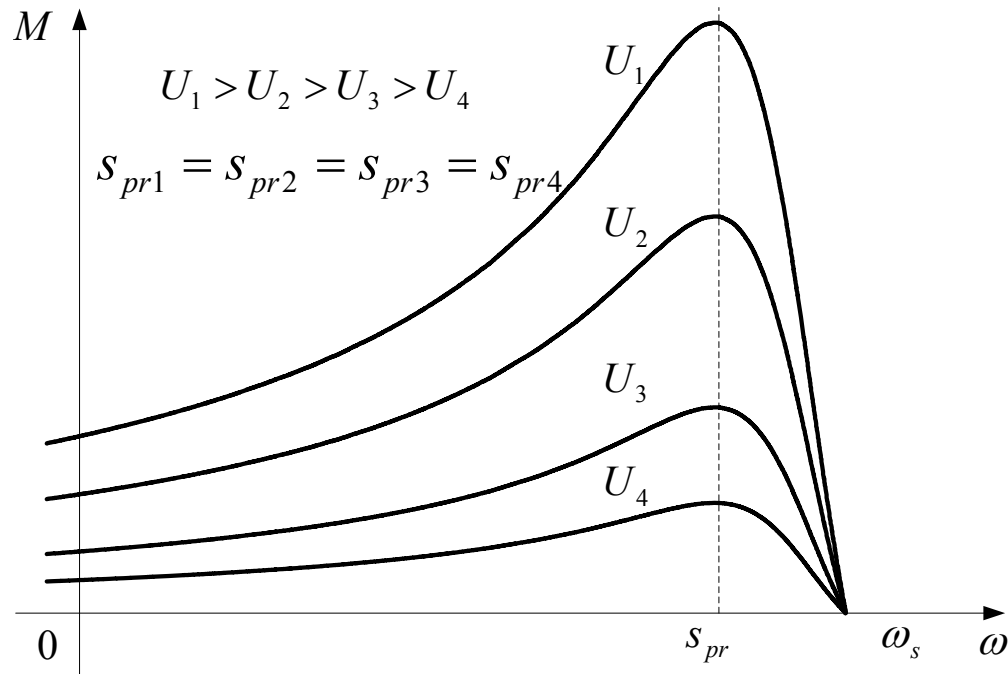
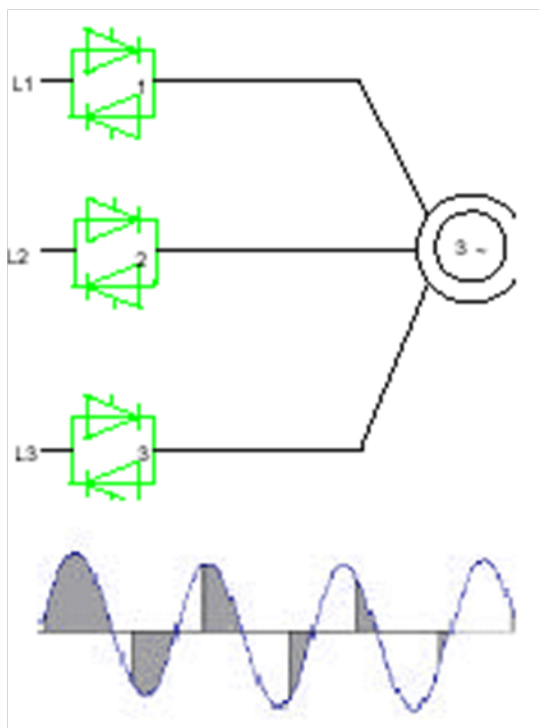
- Opisani način upravljanja se naziva **SKALARNO upravljanje** jer je zasnovan na statičkom modelu (stacionarno stanje). **Prijelazne pojave nisu uključene u postojeći model**, pa se u prijelaznim (**dinamičkim**) stanjima ne može dobiti u potpunosti konstantan tok, a s njim i moment stroja
- Za ostvarenje **boljih dinamičkih karakteristika** koje se traže za zahtjevnije servo-primjene, koriste se **druge metode upravljanja temeljene na analogiji s istosmjernim strojem**
- Te metode koriste tehniku **neovisnog upravljanja tokom i momentom** kao što je inherentno kod istosmjernih strojeva s nezavisnom uzбудom
- Algoritmi upravljanja koji se pri tome koriste zovu se algoritmi **VEKTORSKOG upravljanja**, zahtijevaju brzo izvođenje računskih (matematičkih) operacija, pa su u upravljačkom smislu zasnovane na brzim procesorom za obradu signala, tzv. **DSP-om** (engl. *Digital Signal Processor*)

Upravljanje brzinom vrtnje asinkronog stroja

3- fazno upravljanje (upravljanje s gubicima)

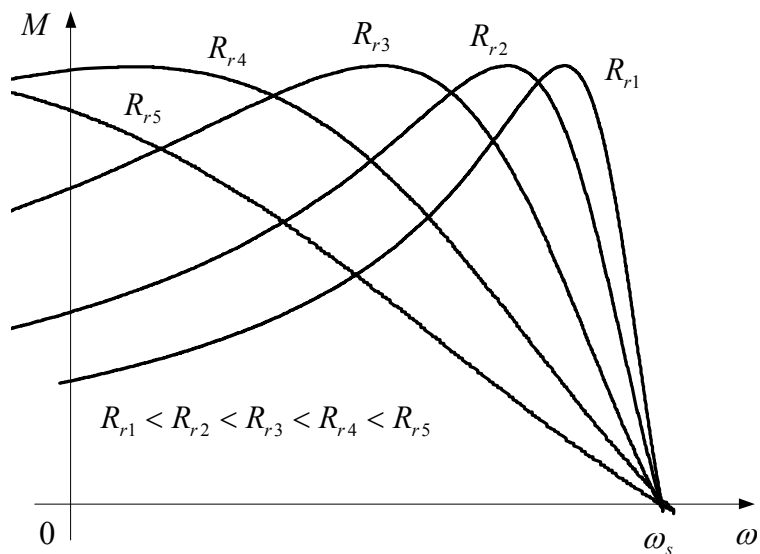
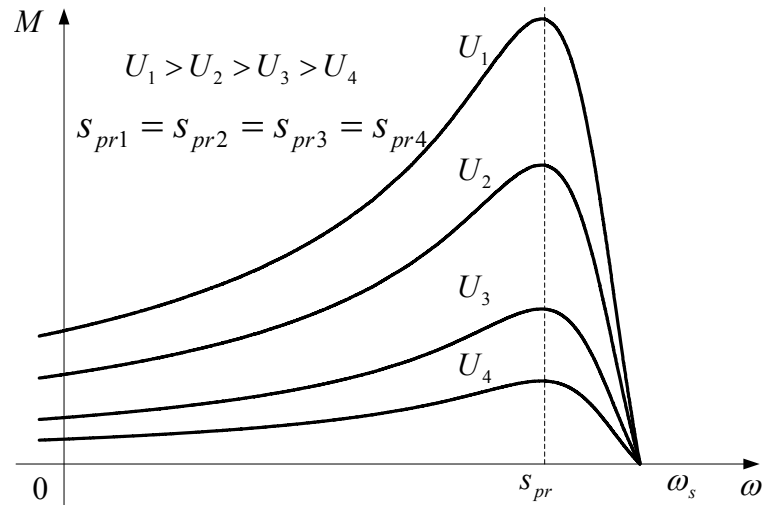
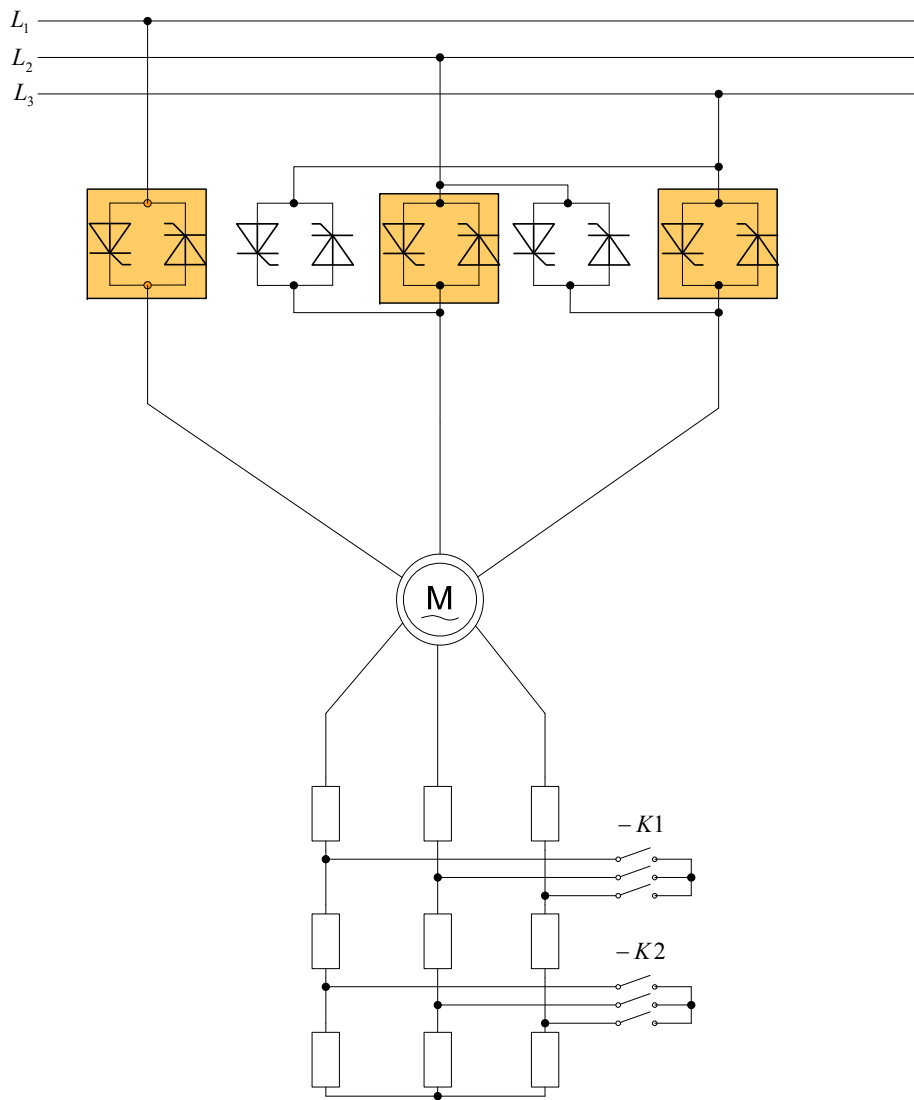
- Za podsjetnik, već je rečeno da se brzina vrtnje može mijenjati i promjenom efektivne vrijednosti napona statora te promjenom vrijednosti otpora rotorskog kruga.
- Ovaj način promjene brzine vrtnje je vezan uz gubitke energije (toplina) i koristi se samo u slučajevima kada nema mogućnosti korištenja frekvencijskih pretvarača
- Budući da se radi i o promjeni otpora u rotorskom krugu, metoda je ograničena jedino za kliznokolutne izmjenične asinkrone strojeve
- Ovdje će samo u kratkim crtama biti iznesen primjer jednog takvog pogona koji je tehnološki unaprijeđen i namijenjen za rad u teškim uvjetima (čeličane, valjaonice i slično)

UPRAVLJANJE PROMJENOM EFEKTIVNE VRIJEDNOSTI NAPONA STATORA

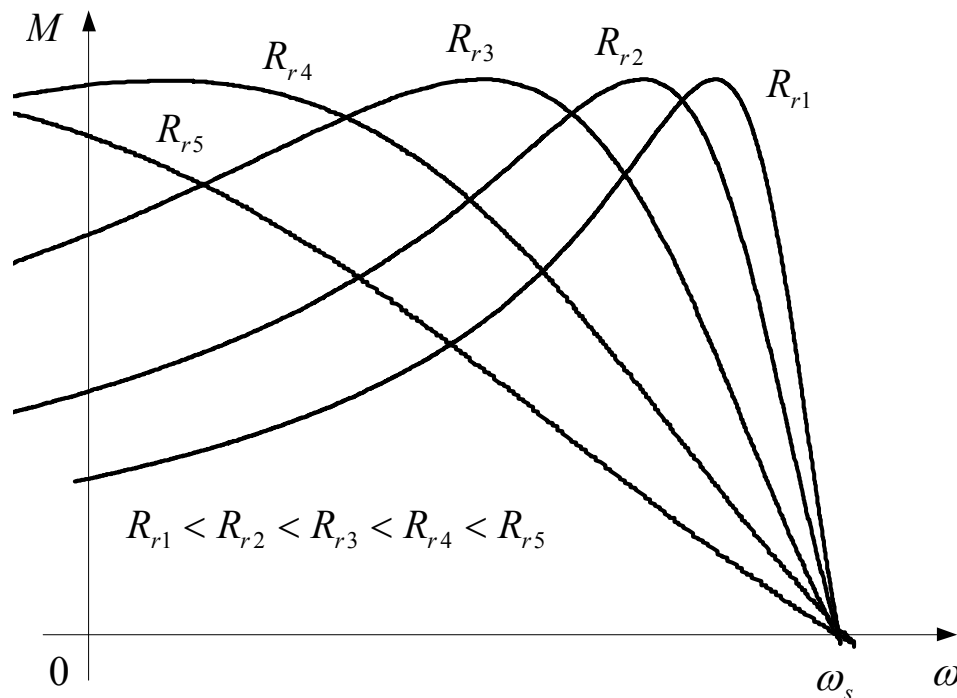
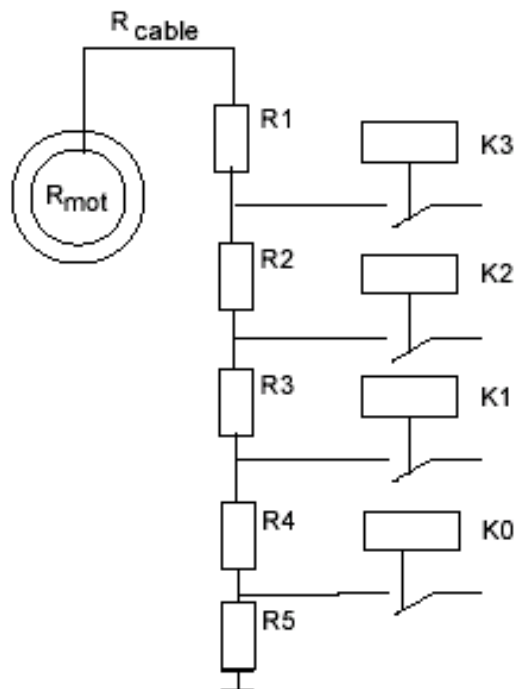


- Koje su dobre a koje loše strane ovakvog načina upravljanja?
- Koje je područje upravljanja brzine vrtnje?

UPRAVLJANJE PROMJENOM EFEKTIVNE VRIJEDNOSTI NAPONA STATORA

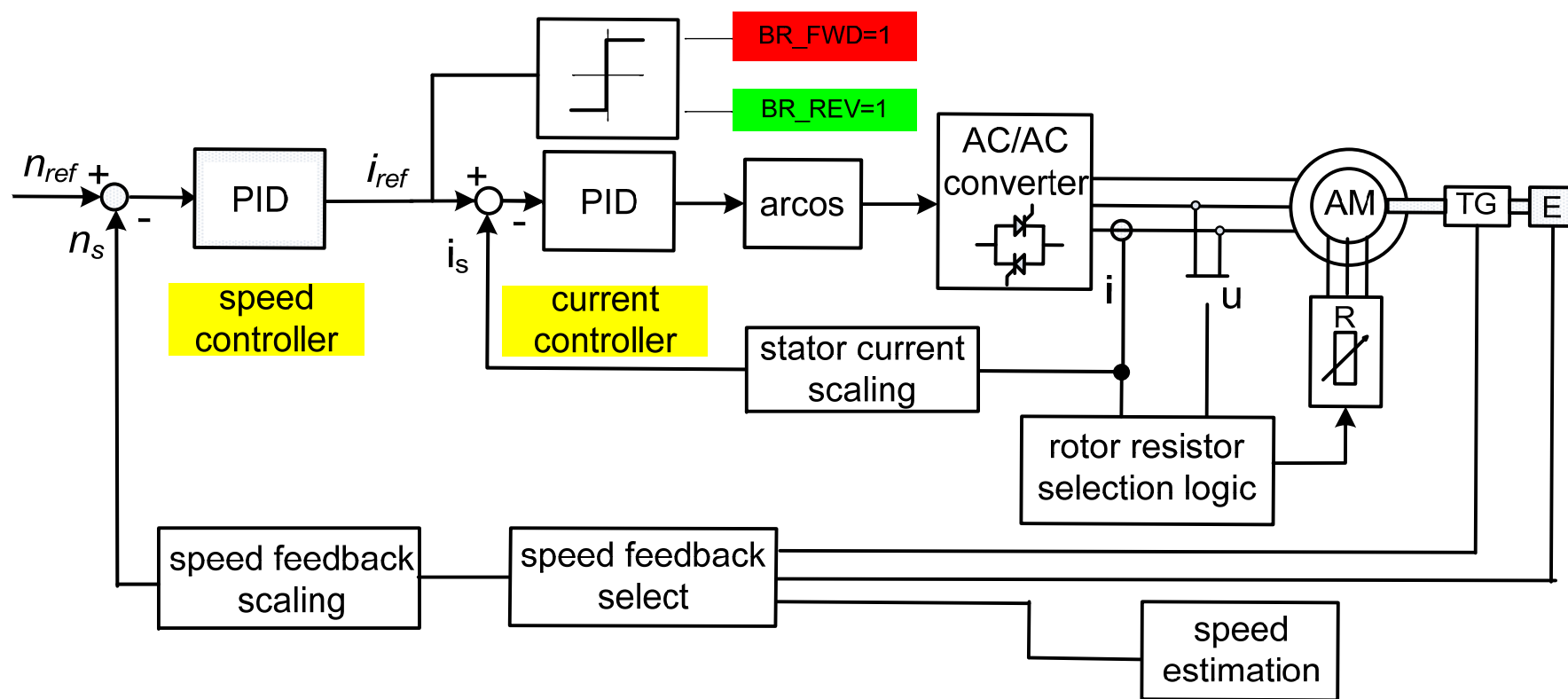


UPRAVLJANJE DODAVANJEM VANJSKIH OTPORNIKA U KRUG ROTORA



- Kako se mijenja klizanje AM-a s promjenom otpora rotorskog kruga?
- Kako se mijenjaju gubici u motoru s promjenom klizanja? Kolika se akumulira toplina u samom rotoru kao rezultat potrošene enegije gubitaka na otpornicima u krugu rotora?
- Koje su posljedice tih gubitaka sa stanovišta topline koja nastaje?

Regulacijska struktura kliznokolutnog AM-a



LITERATURA

- [1] „*Osnove električnih strojeva*“, Radenko Wolf, Školska knjiga Zagreb, 1995.
- [3] „*Elektromotorni pogoni*“, Jurković, Školska knjiga Zagreb, 1990.
- [5] „*Power Electronics*“, Mohan, Undeland, Robbins, John Wiley & Sons
- [6] „*Control of electrical drives*“, Leonhard, Springer 1996.

KRAJ

Dodatak-1

- Ovdje bi trebalo istaknuti jednu važnu činjenicu. Kada se govori o momentu motora, moguće su zapravo dvije vrijednosti momenta motora koje bi trebalo razlikovati!
- U suštini, to se dešava ako se moment promatra na dva različita mjesta u emp-u, tj. na dva različita mjesta u dijagramu bilance energije. Rotor motora razvije uvijek moment koji odgovara ekvivalentu električne energije prenesene sa statora preko zračnog raspора na rotor, $P_{2\text{meh}}$.
- Zato se, precizno rečeno, tako definiran moment stroja zove *elektromagnetski* moment. Moment što ga motor predaje radnom mehanizmu je nešto manji od ovako definiranog *elektromagnetskog* momenta i to za iznos gubitaka trenja i ventilacije. Taj moment se definira jednostavno kao *moment na osovini* motora ili kraće samo kao *moment motora*. On je definiran ekvivalentom električne snage P_2 .
- S tim u vezi su i različite matematičke definicije *elektromagnetskog* momenta i *momenta na osovini motora* (momenta motora) i one su određene u posebnim izrazima