

Pogoni sa motorima naizmenične struje

Regulisani elektromotorni pogoni – Mehatronika
predavanje 13,14

(maj 2020)

- 4. Upravljanje brzinom AM**
- 5. Pretvarači u pogonu sa AM (trofazni inverter)**
- 6. Upravljanje pretvaračem (trofaznim inverterom)**
- 7. Upravljanje i regulacija brzine AM**
- 8. Digitalna realizacija u/f upravljanja**

4. Mogućnosti upravljanja momentom i brzinom AM izmenom veštački mehaničkih karakteristika

Kako menjati moment i brzinu AM ?

Razmatra se samo naponski napajan AM

$$u_a(t) = U_s \sin(\omega_s t)$$

$$u_b(t) = U_s \sin(\omega_s t - 2\pi/3)$$

$$u_c(t) = U_s \sin(\omega_s t - 4\pi/3)$$

- Upravljanje brzinom promenom amplitude napona statora **U_s**
- Upravljanje brzinom promenom frekvencije napona statora statorske učestanosti $\omega_s = 2\pi \mathbf{f}_s$

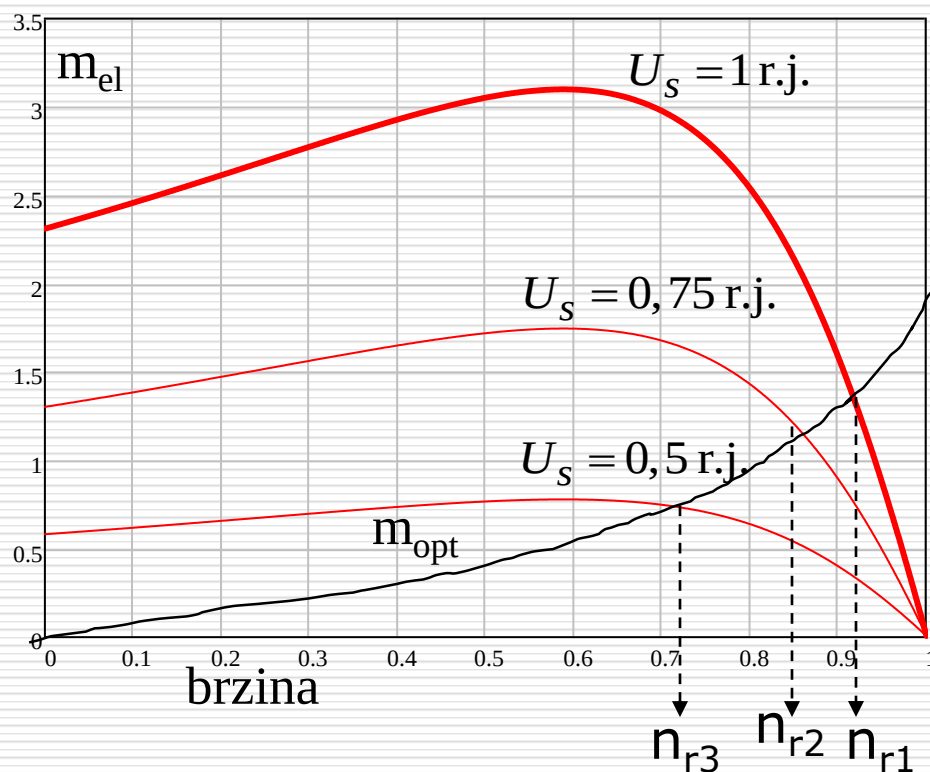
Upravljanje brzinom promenom amplitude napona

Na osnovu ekvivalentne šeme i izraza za moment može se zaključuje da sa smanjenjem amplitude napona U_s pri istoj učestanosti mehanička karakteristika opada

Opada i prevalni i polazni moment

$$M_e = M_e(U_s^2); \quad M_{pol} = M_{pol}(U_s^2); \quad M_{pr} = M_{pr}(U_s^2);$$

$$I_s = I_s(U_s), \quad s_{pr} \neq s_{pr}(U_s)$$

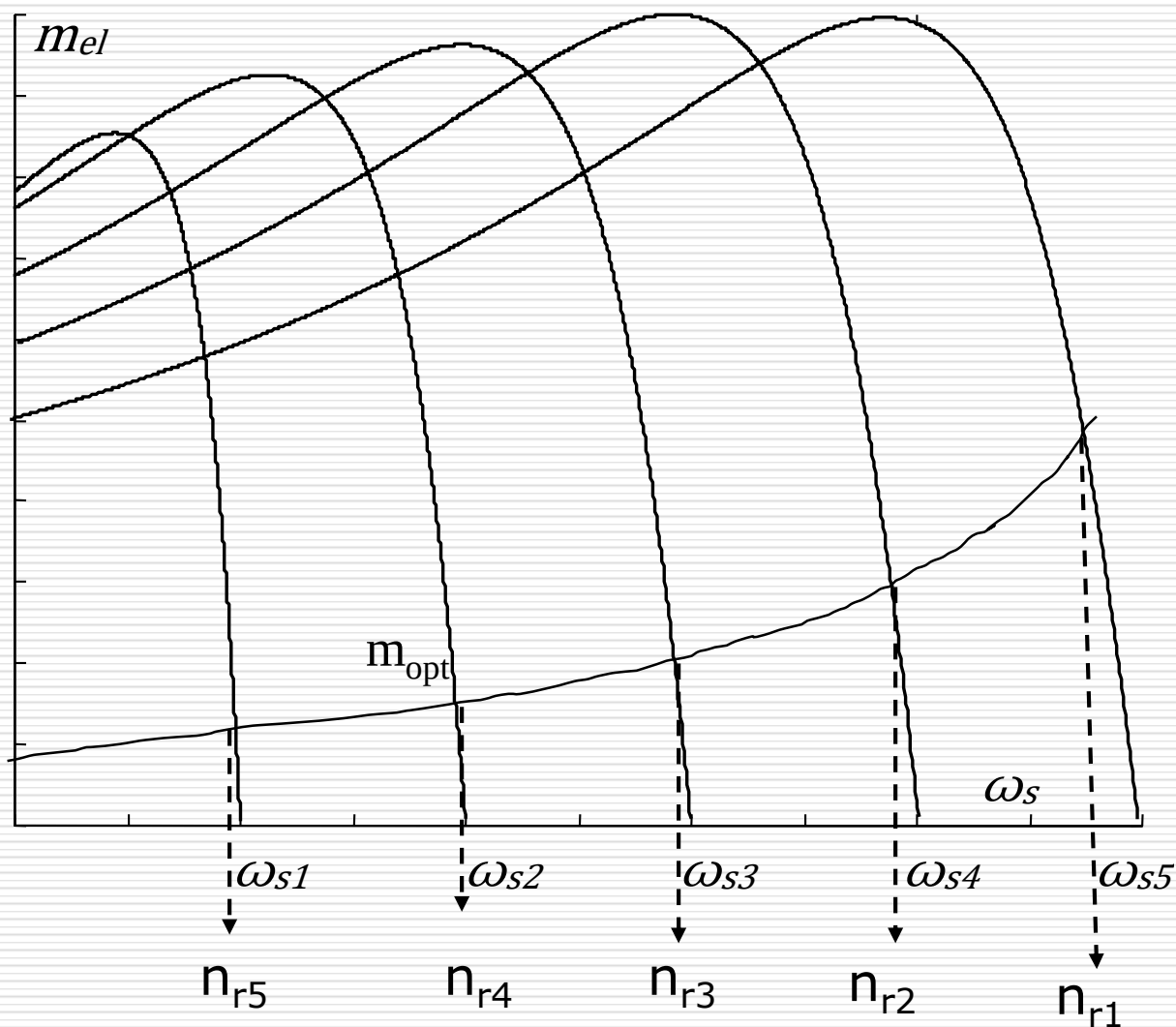


Ovo je nekad bilo aktuelno zbog tiristorskih AC/AC naponskih regulatora ali tako je moguća promena brzine **samo u uskom opsegu** oko sinhronne brzine

Upravljanje brzinom promenom frekvencije napona

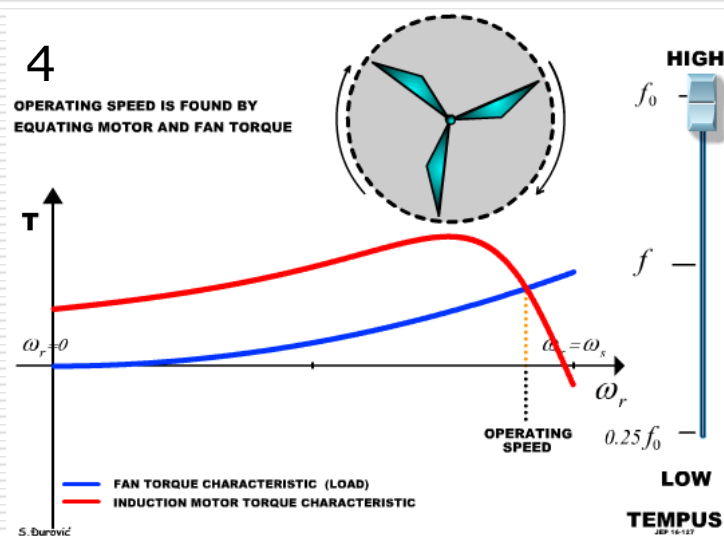
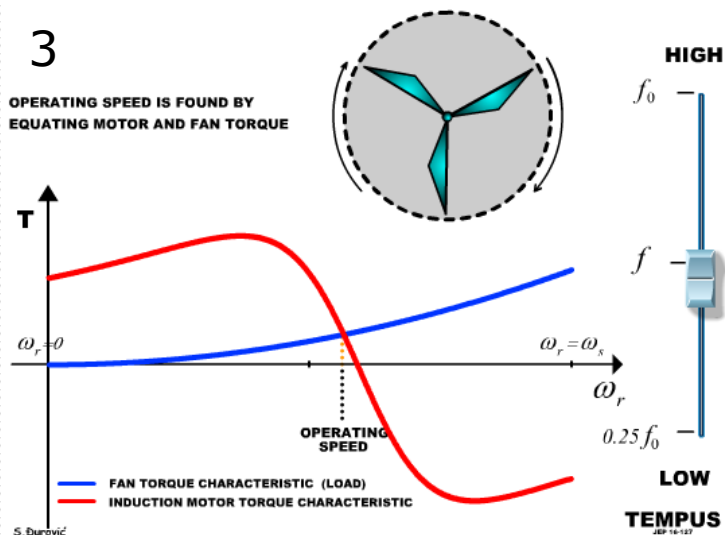
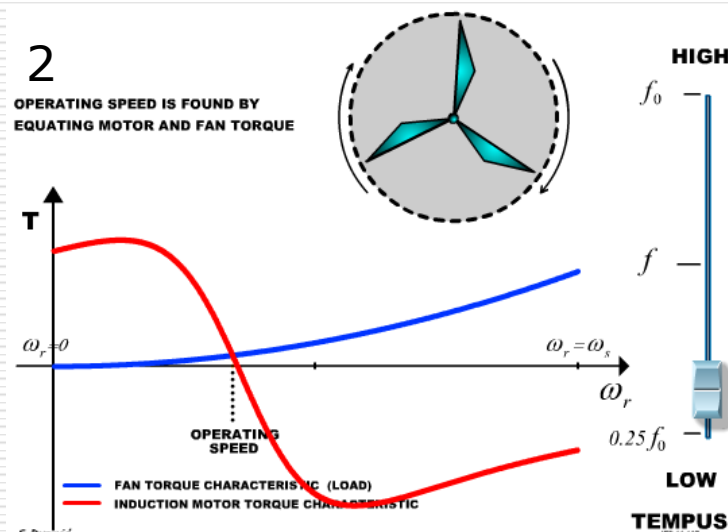
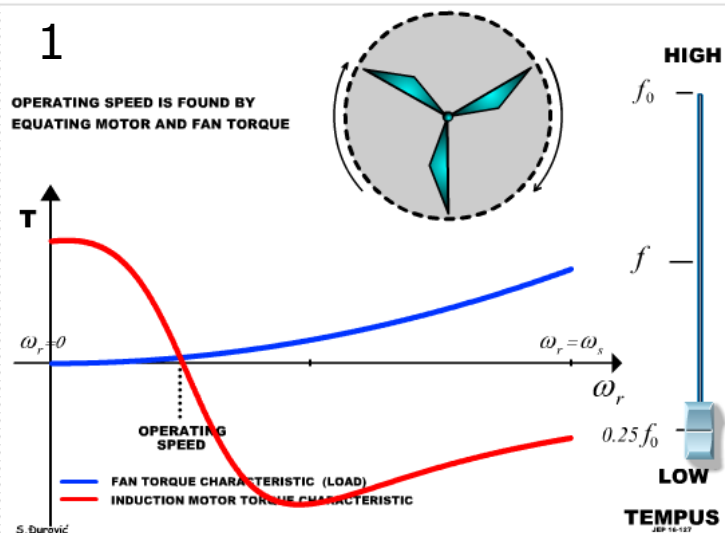
Mnogo bolji način primene brzine rotora asinhronog motora je primenom frekvencije statora

Rastom frekvencije od 0 do $f_{\max}$, brzina se menja od 0 do $n_{\max}$, gde je $n_{\max} = 60f_{\max}/p$ p-broj pari polova



Upravljanje brzinom promenom frekvencije napona

Demonstracija promene brzine sa frekvencijom Pustiti animaciju



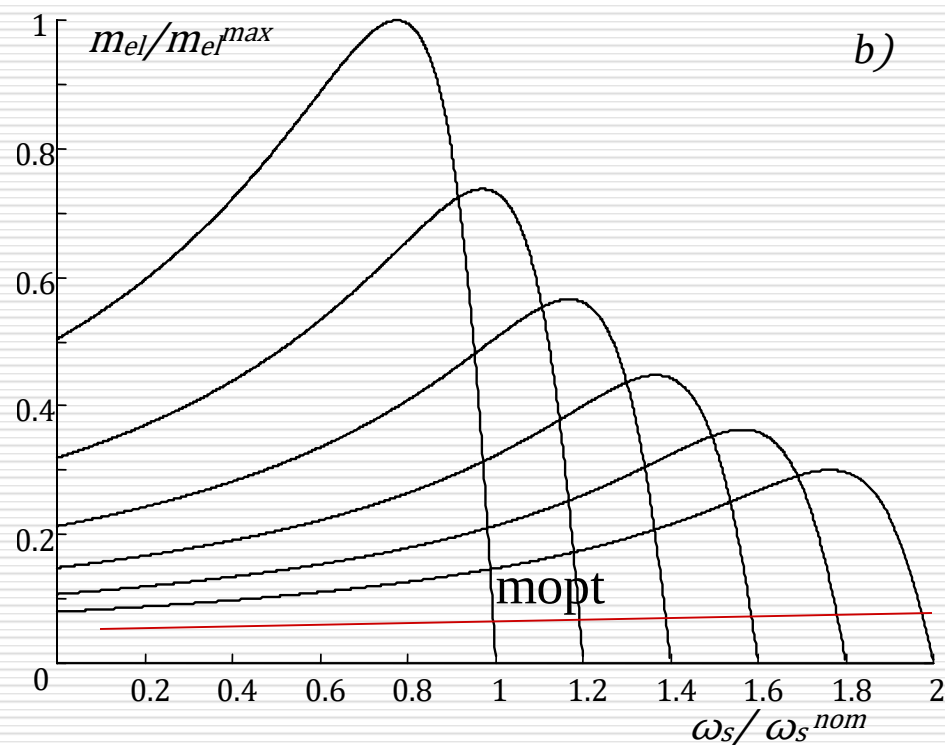
Promena momentne karakt. AM za razne frekvencije

Ali, rast frekvencije uz konstantnu amplitudu napona dovodi do opadanja karakteristika, na osnovu

$$m_{el} = \frac{3}{2} P \left(\frac{U_s}{\omega_s} \right)^2 \frac{\omega_k R_r}{R_r^2 + \omega_k^2 L_{r\gamma}^2}$$

$$U_s = const$$

$$\omega_s \text{ raste}$$



Strategija $u/f = const$ se mora napustiti na brzinama većim od nominalne, slika 5.17b, na kojima bi za održavanje konstantnog u/f odnosa bio potreban napon veći od nominalnog. Iz tog razloga se nakon nominalne brzine amplituda napona drži konstantnom, fluks pada sa uvećanjem frekvencije i ulazi se u režim slabljenja polja AM. Slika 5.17b ukazuje na očigledan pad momentnih karakteristika sa daljim uvećanjem frekvencije.

Promena momentne karakt. AM za razne frekvencije

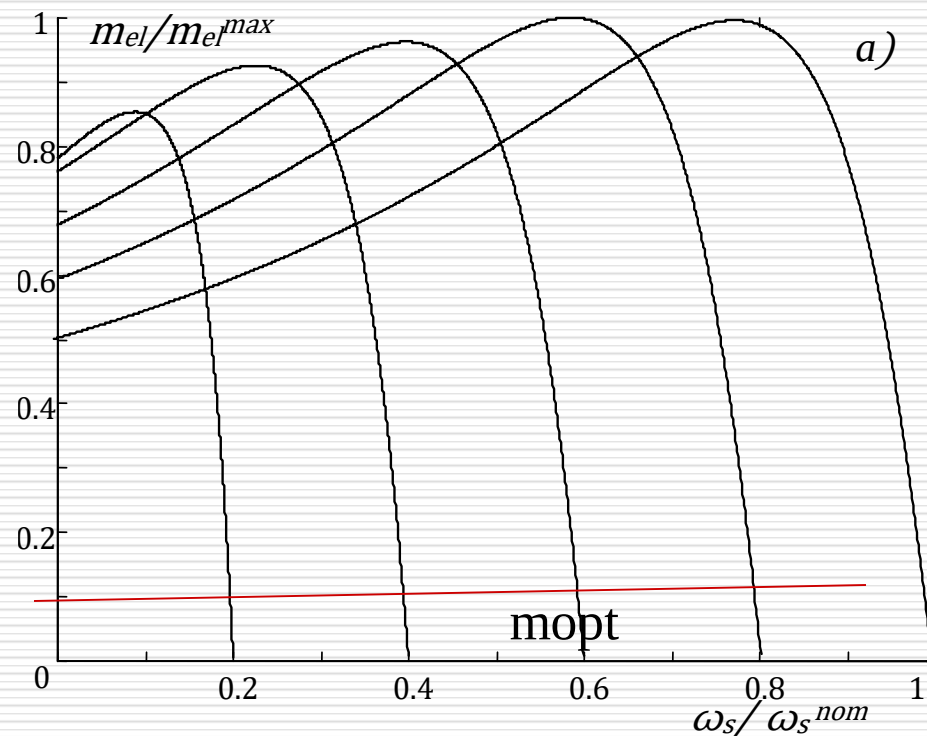
Ako rast frekvencije prati i rast napona dobijamo

$$\psi_s \sim \frac{U_s}{\omega_s}$$

i isto na osnovu

$$m_{el} = \frac{3}{2} P \left(\frac{U_s}{\omega_s} \right)^2 \frac{\omega_k R_r}{R_r^2 + \omega_k^2 L_{r\gamma}^2}$$

prevalni i polazni moment
mehaničke karakteristike
ostaju isti



Slika 5.17a pokazuje krive momenta koje se pomeraju udesno sa uvećanjem statorske učestanosti ali zadržavaju relativno jednake vrednosti prevalnog momenta. Pad ovih vrednosti je izbegnut uvećanjem napona statora sa učestanošću tj. održavanjem konstantnog odnosa $U_s/\omega_s = const$. Ovim je održan nominalan fluks u mašini i dobijene su slične momentne karakteristike. Odnos $U_s/\omega_s = const$ ne garantuje nominalan fluks na malim brzinama pošto pad napona na statorskoj otpornosti postaje značajan (slika i pokazuje da su prvih par momentnih karakteristika nešto niže od ostalih, uglavnom zbog uticaja otpornosti statora).

Promena momentne karakt. AM za razne frekvencije

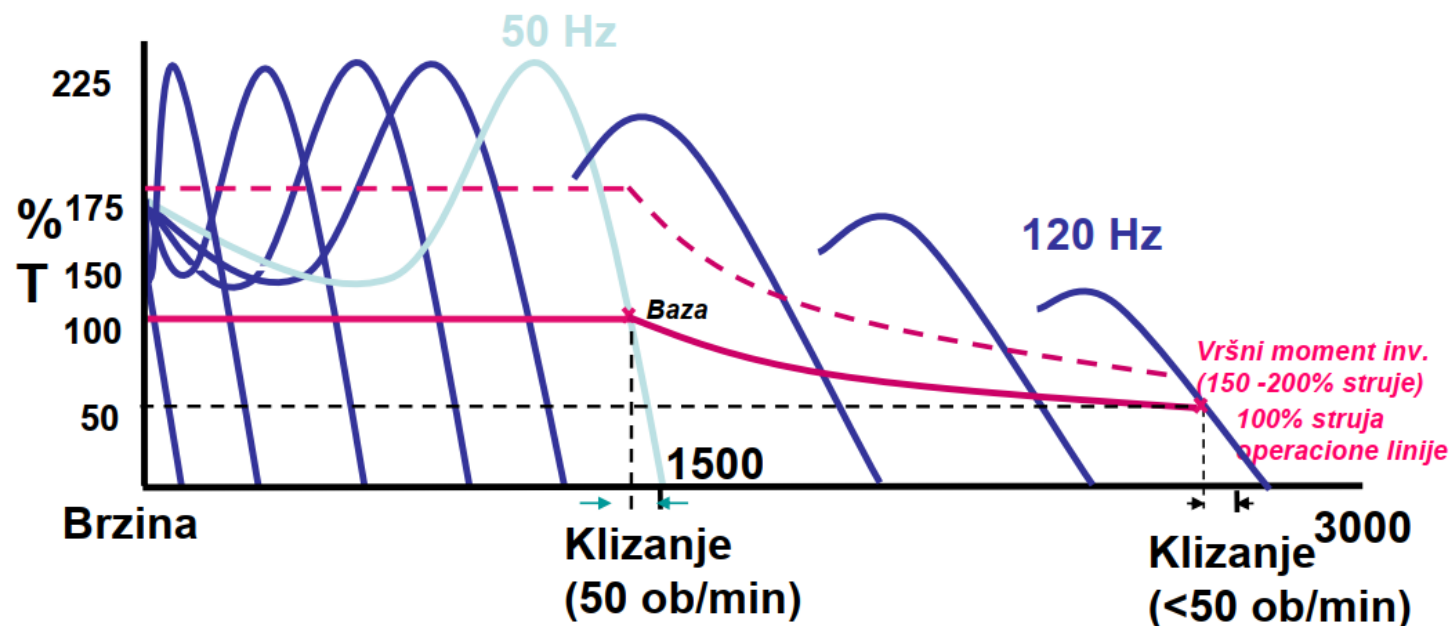
Zaključak, brzinu asinhronog motora treba menjati promenom učestanosti.

A) Napon treba da prati rast učestanosti. Time se i pored promene frekvencije održava $u/f = \text{const}$, a samim tim i konstantan fluks rotora, i pojačanje momenta konstantno

$$u = \omega \Psi \rightarrow \Psi = \frac{u}{\omega}$$

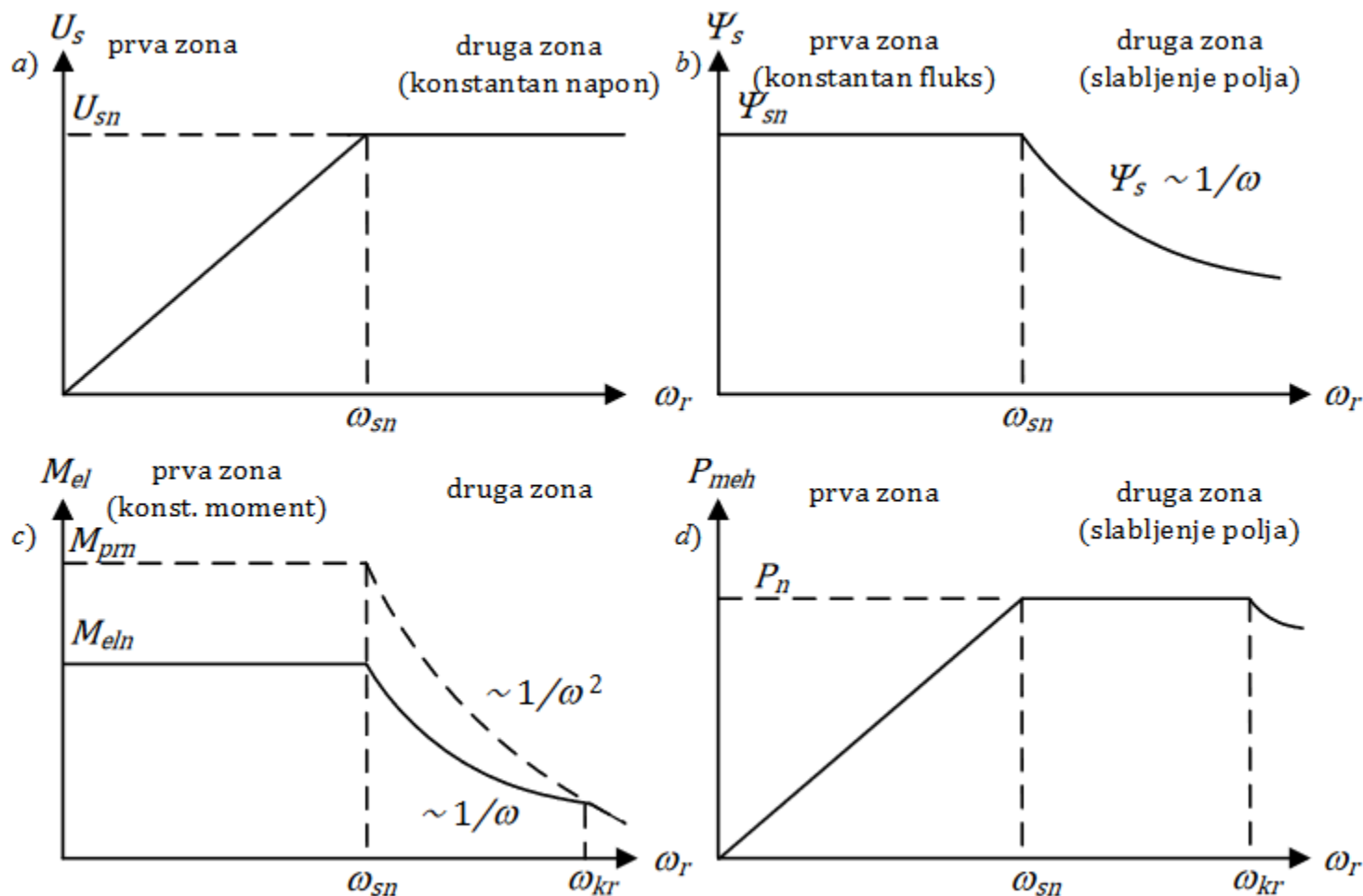
$$m = \Psi i$$

B) Ako napon dođe do maksimuma, daljim rastom frekvencije pada fluks, samim tim i pojačanje momenta tj. meh karakteristike AM



Upravljanje brzinom AM promenom učestanosti

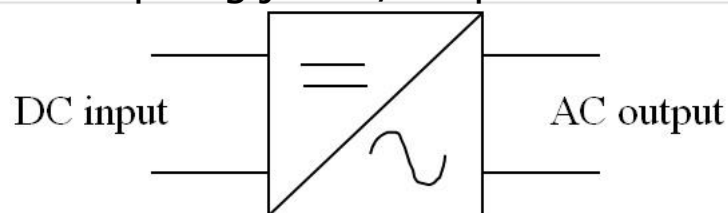
- A) Napon prati rast učestanosti, konstanta fluks i maksimalni moment za istu struju, snaga raste sa brzinom - I zona (nominalno polje)
- B) Napon uđe u limit, rastom brzine pada fluks i maksimalni moment, snaga konstantna - II zona , slabljenje polja



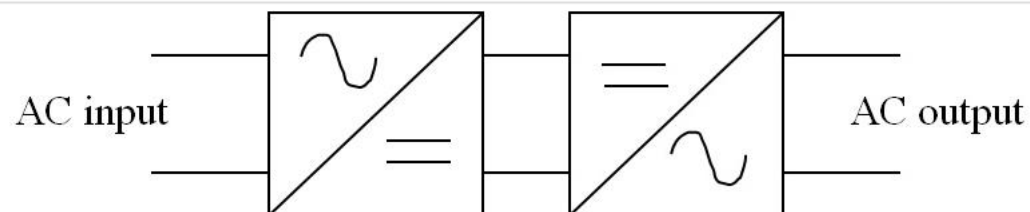
5. Tipičan pretvarač korišćen u trofaznim AC pogonima

Dva tipa pretvarača: DC/AC i AC/AC

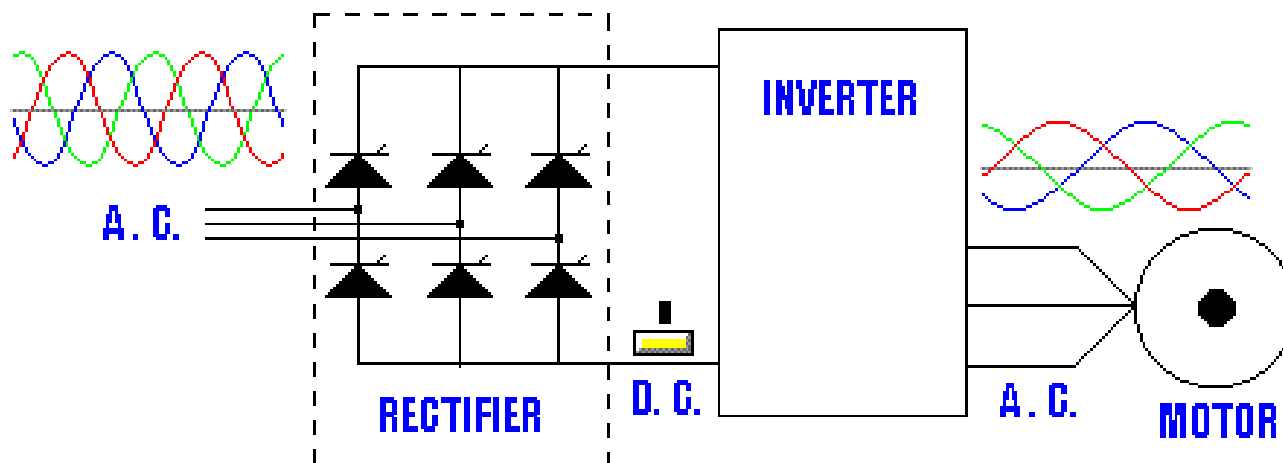
- Za motore naizmenične struje najčešće se koriste dve kombinacije
- Topologija DC/AC pretvarača zavisi od broja faza motora



AC motor napajan promenljivim AC naponom a pogon energiju dobija iz DC izvora (npr. akumulator)

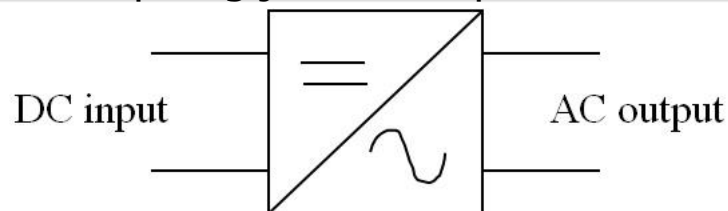


AC motor napajan promenljivim AC naponom a pogon energiju dobija iz AC mreže

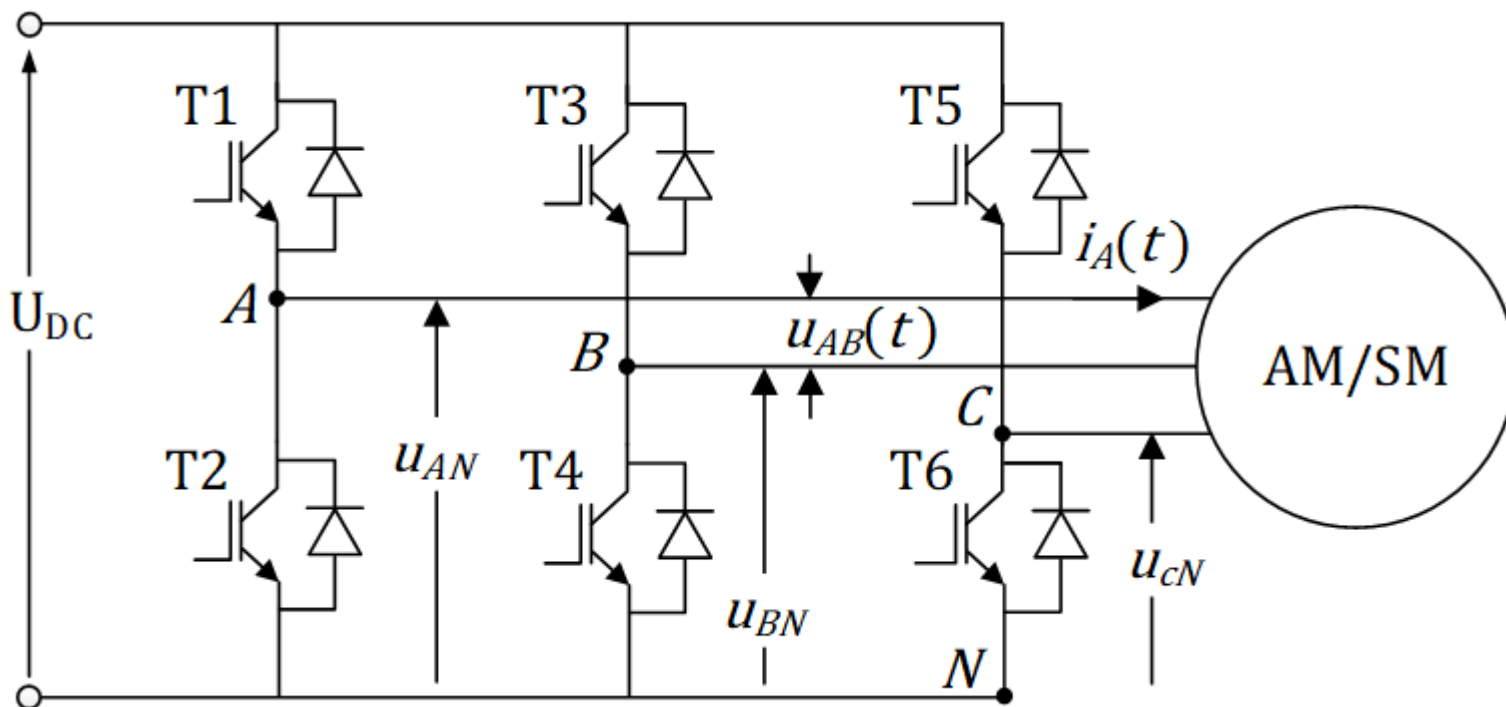


Trofazni inverter (DC/AC pretvarač)

- Za motore naizmenične struje najčešće se koriste dve kombinacije
- Topologija DC/AC pretvarača zavisi od broja faza motora

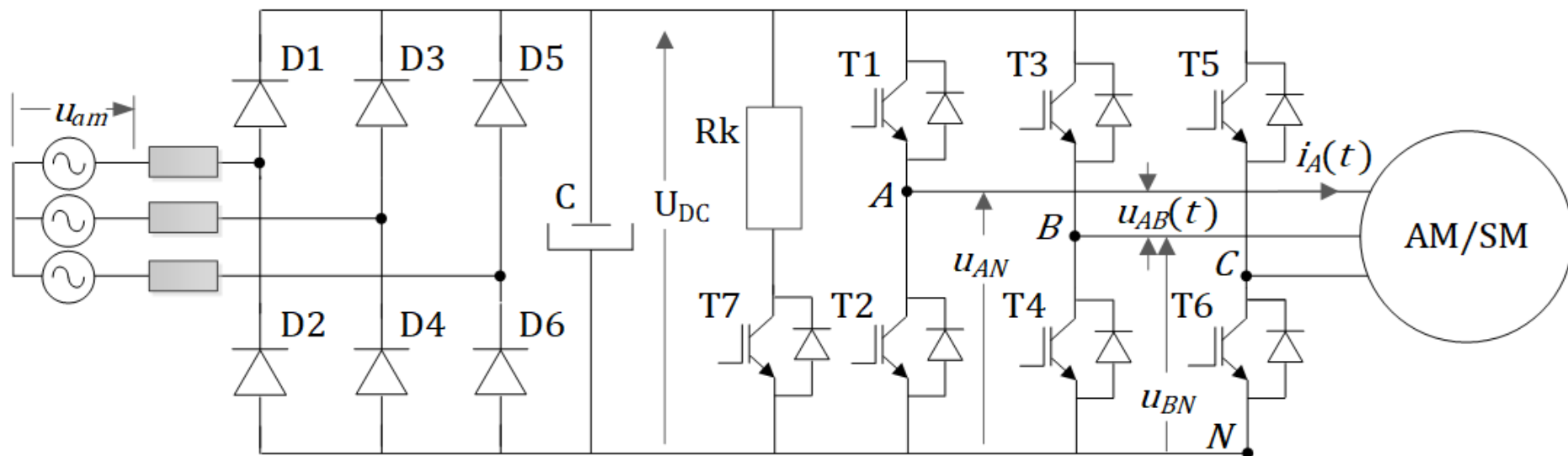


AC motor napajan promenljivim AC naponom
a pogon energiju dobija iz DC izvora (npr.
akumulator)

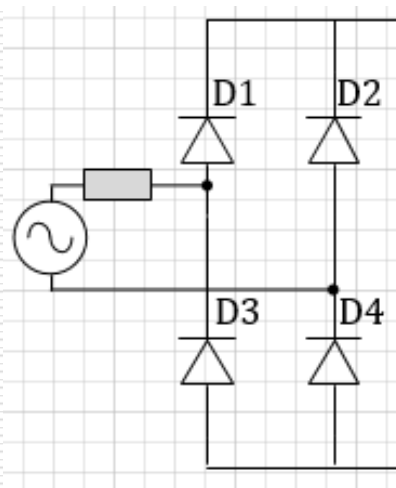


Diodni ispravljač AC/DC i trofazni inverter DC/AC

- ❑ Neupravljivi AC/DC diodni ispravljač
- ❑ Upravljivi DC/AC inverter

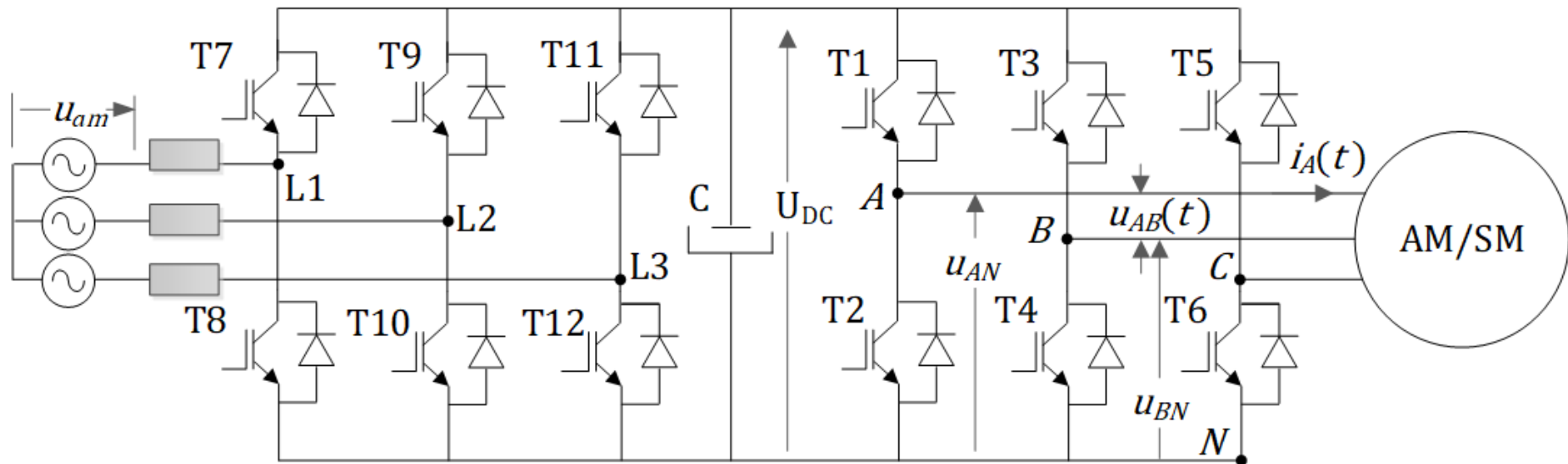


- ❑ Monofazni ulaz



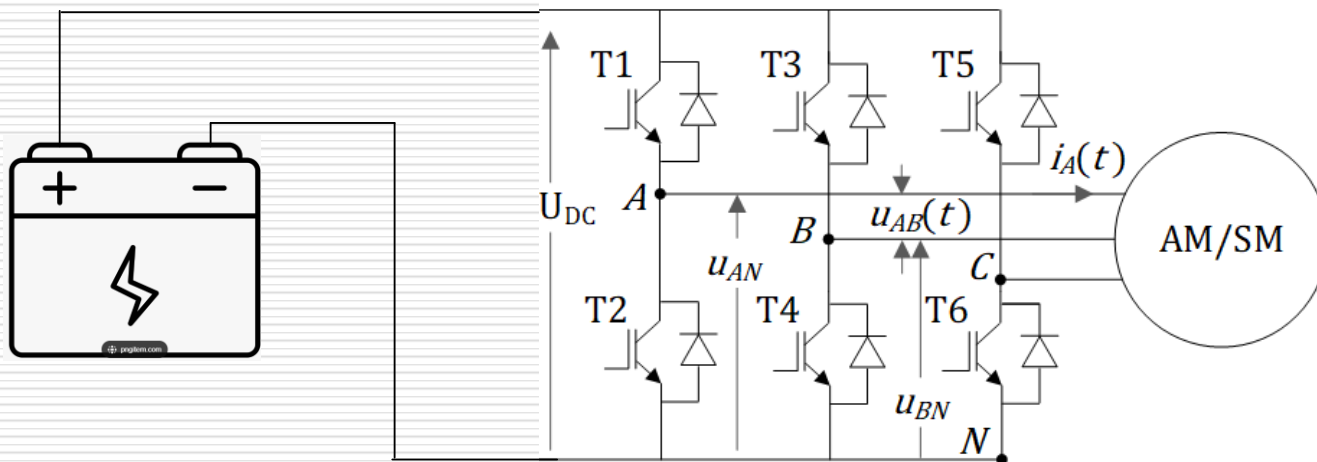
Dvostruki pretvarač AC/DC + DC/AC

- Za motore naizmenične struje najčešće se koriste dve kombinacije
- Topologija DC/AC pretvarača zavisi od broja faza motora



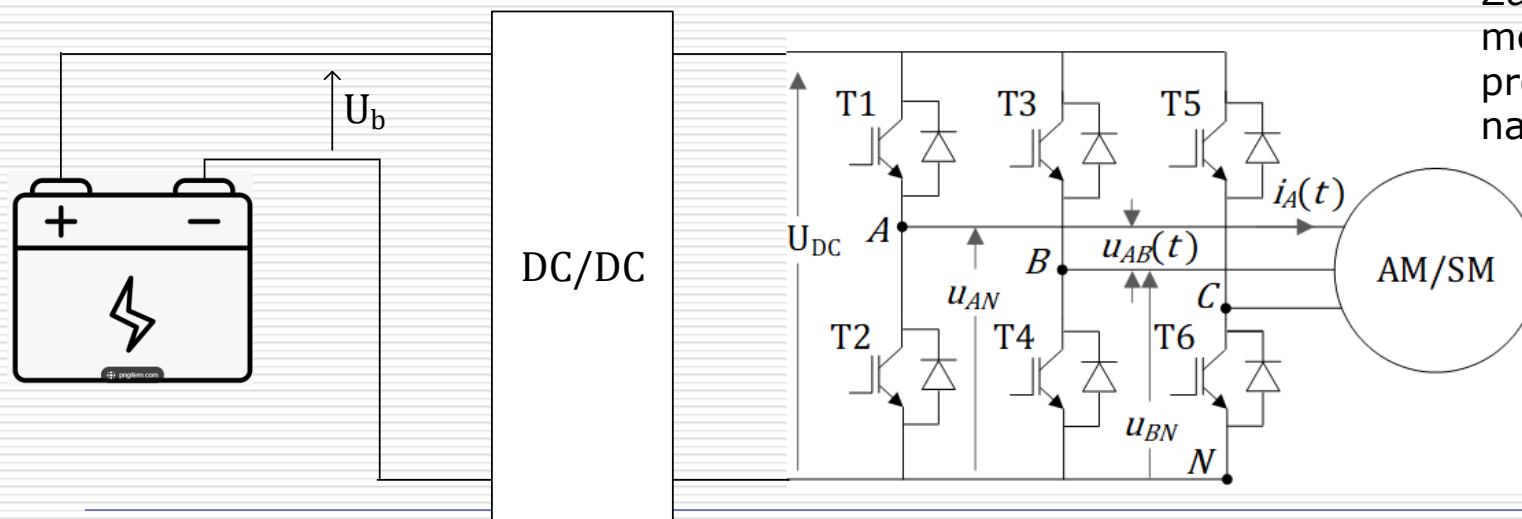
Baterijsko napajanje, dovoljan samo DC/AC

- Za baterijski napajana vozila DC/AC pretvarača je ponekad dovoljan



Invertor je reverzibilan pretvarač tako da se u slučaju generatorskog režima (kočenje, vožnja nizbrdo..) baterija puni

- Za veće snage se napon baterije podiže na viši nivo dodatnim DC/DC pretvaračem podizačem napona (boost tipa)



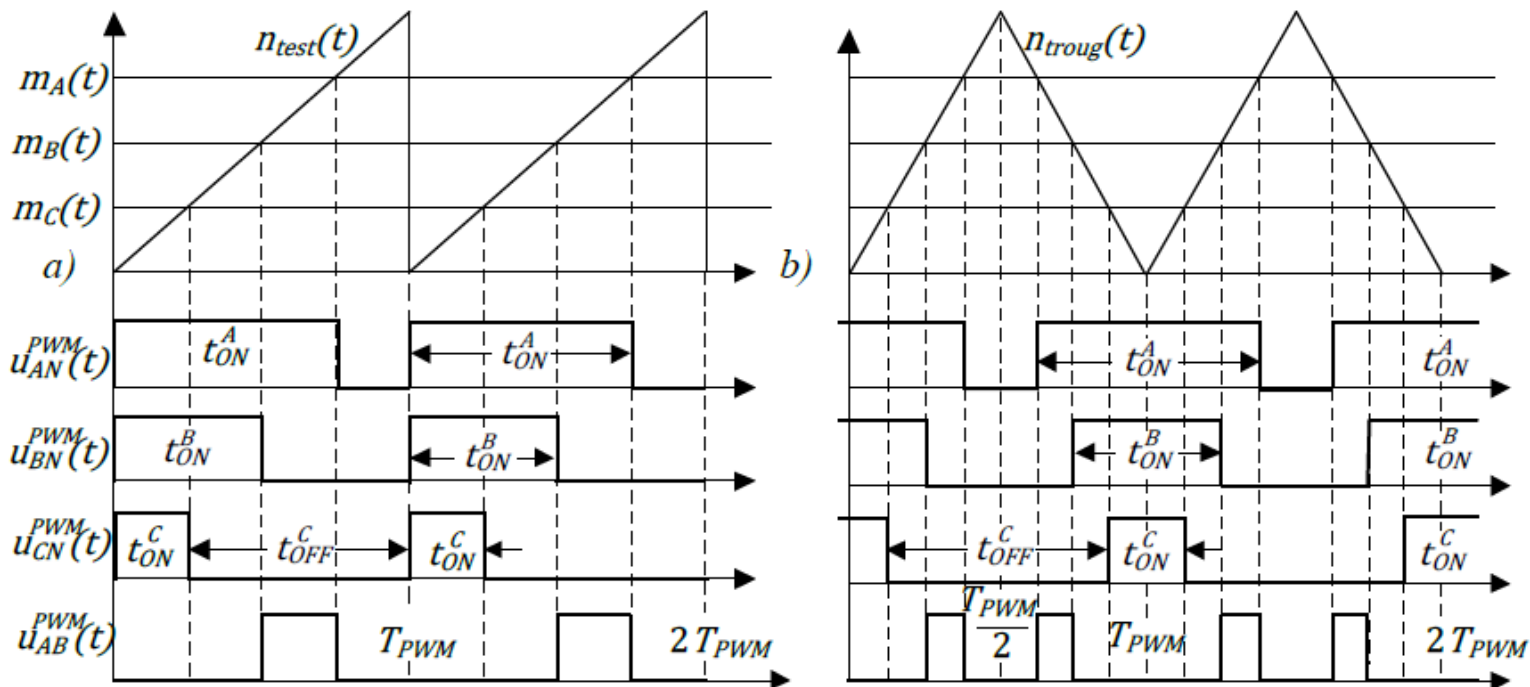
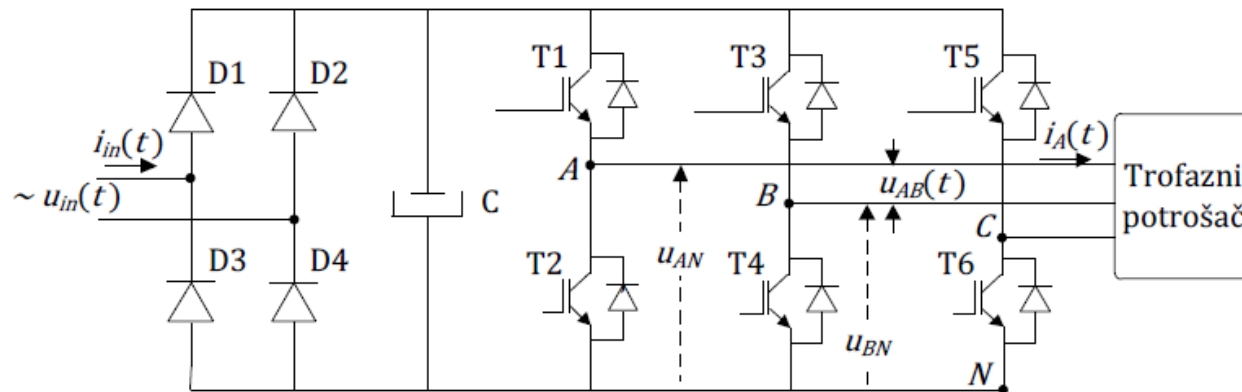
Za velike snage motori se lakše projektuju sa više napona

6. Upravljanje trofaznim invertorom

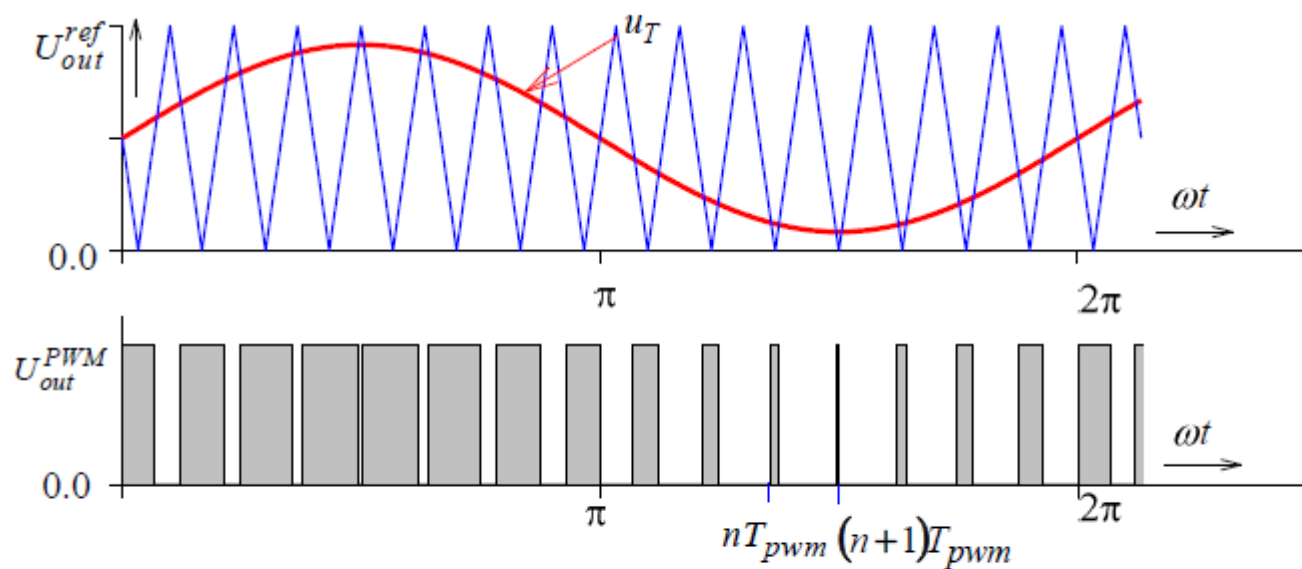
Invertor mora da generiše trofazni napon potrebnih parametara, t.j. amplitude i frekvencije koje zahteva regulator AC pogona

- 1. Impulsno upravljanje**
- 2. Sin PWM modulacija je najprostoji način modulacije izlaznog signala tako da se generiše trofazni napon promenljive frekvencije i amplitude**

Izbor PWM nosioca



Trofazna sinusna PWM modulacija



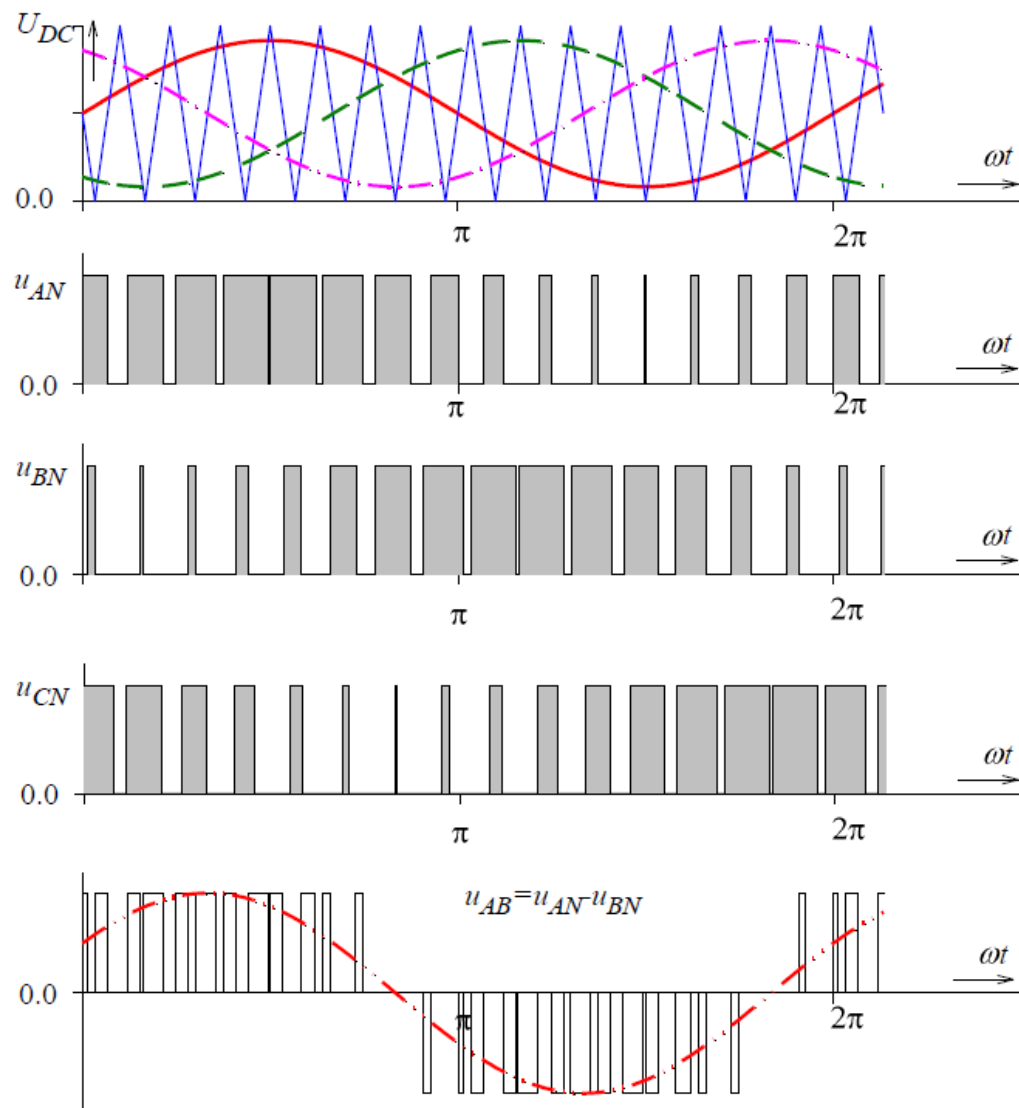
Slika 5.3. Sinusna PWM modulacija jedne grane invertora - Trougaoni PWM nosilac (u_T), modulišući prostoperiodični signal (u_{out}^{REF}) i PWM signal kao rezultat (u_{out}^{PWM})

$$u_{out}^{SR} = u_{out}^{REF} = (t_{on}/T_{PWM})U_{DC}.$$

$$u_{out}^{REF}(t) = u_{AN}(t) = \frac{U_{DC}}{2} + A_{REF} \frac{U_{DC}}{2} \sin(\omega_{REF}t).$$

$$t_{on}^A(k) = \frac{T_{PWM}}{2} + A_s \frac{T_{PWM}}{2} \sin(k\omega_s T_{PWM})$$

Trofazna sinusna PWM modulacija



A_s – promenjliva amplituda napona

ω_s – promenjliva frekvencija napona

$$u_{AN}(t) = \frac{U_{DC}}{2} + A_s \frac{U_{DC}}{2} \sin(\omega_s t),$$

$$u_{BN}(t) = \frac{U_{DC}}{2} + A_s \frac{U_{DC}}{2} \sin(\omega_s t - 2\pi/3),$$

$$u_{CN}(t) = \frac{U_{DC}}{2} + A_s \frac{U_{DC}}{2} \sin(\omega_s t - 4\pi/3),$$

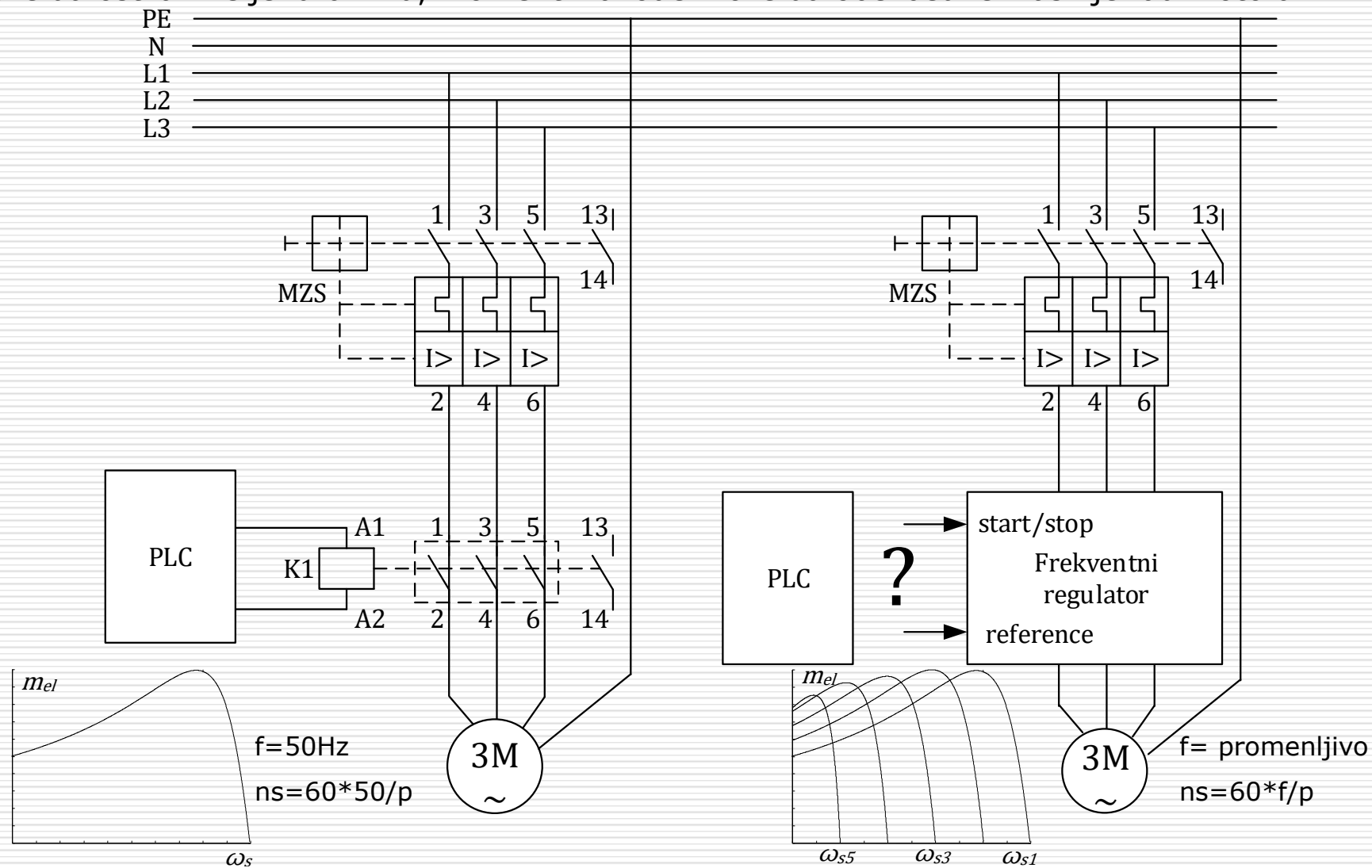
Naponi na izlazima invertora u odnosu na masu invertora imaju istu jednosmernu komponentu

Međufazni naponi nemaju jednosmernu komponentu

7. Upravljanje i regulacija brzine asinhronog motora

Upravljanje motorom preko frekventnog regulatora

- Direktni start AM levo , upravljanje i regulacija AM sa frekventnim regulatorom.
- Desno rešenje je skuplje rešenje, ali regulator promenom amplitude i frekvencije napona može da ostvari željenu brzinu, moment. Takođe može da obezbedi efikasnije rad motora

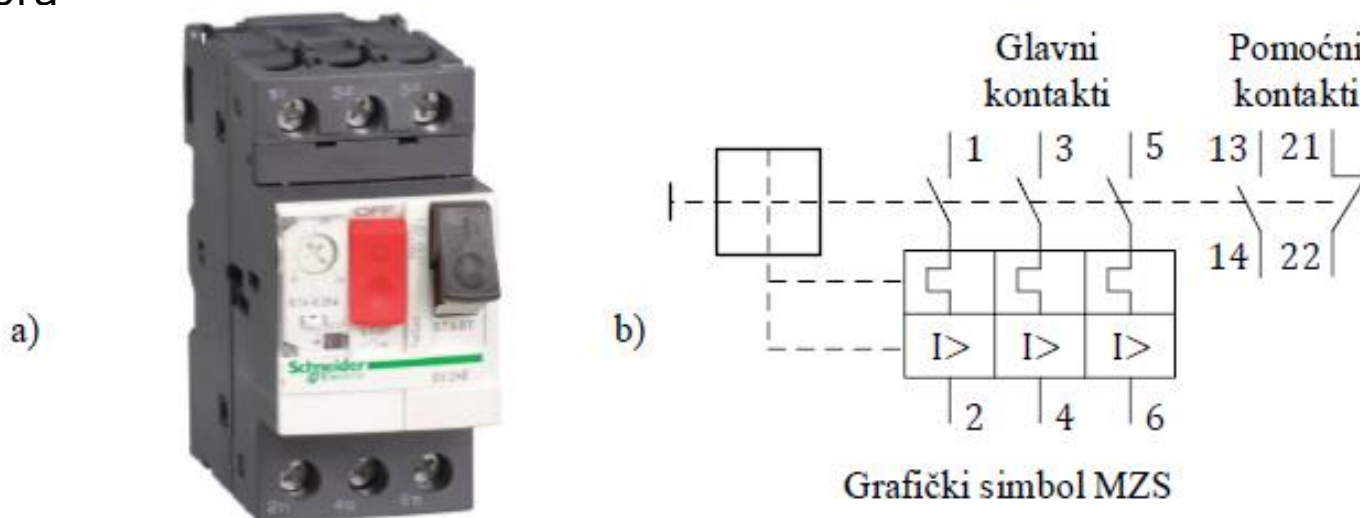


Motorna zaštitna sklopka

MZS je uređaj koji objedinjuje funkcije osigurača i releja za preopterećenje i time štiti motor i od krakog spoja i od preopterećenja. MZS je namenjena i za prekidanje struje kvara tako da je ona u stvari prekidač, i deo literature je naziva motorni zaštitni prekidač.

MZS je dobar i za direktni start motora jer neko vreme toleriše veliku struju starta. Ako start nije uspešan, na primer zaglavljen rotor, velika struja ostaje, motor se greje ali MZS nakon nekog vremena isključuje pogon.

MZS se aktivira samo ručno (nikad daljinski) pritiskom na taster pri čemu se njeni glavni energetske kontakti spajaju. MZS nije namenjena za veliki broj manipulacija, tako da se ona samo jednom uključi da dozvoli rad pogona, dok se uključanje/isključanje motora u normalnom režimu rada vrši preko kontaktora

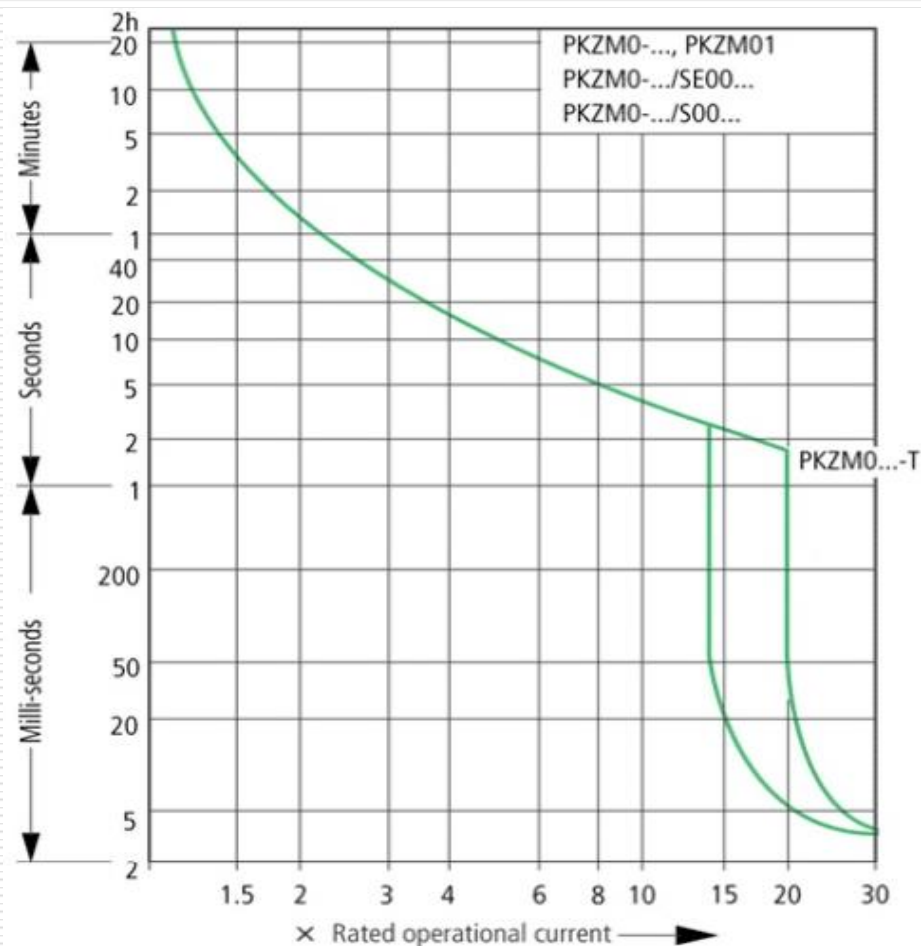


Motorna zaštitna sklopka

Primer: PKZMO -6.3 maksimalna struja.
Struja se može podesiti na manju vrednost, na primer 5A

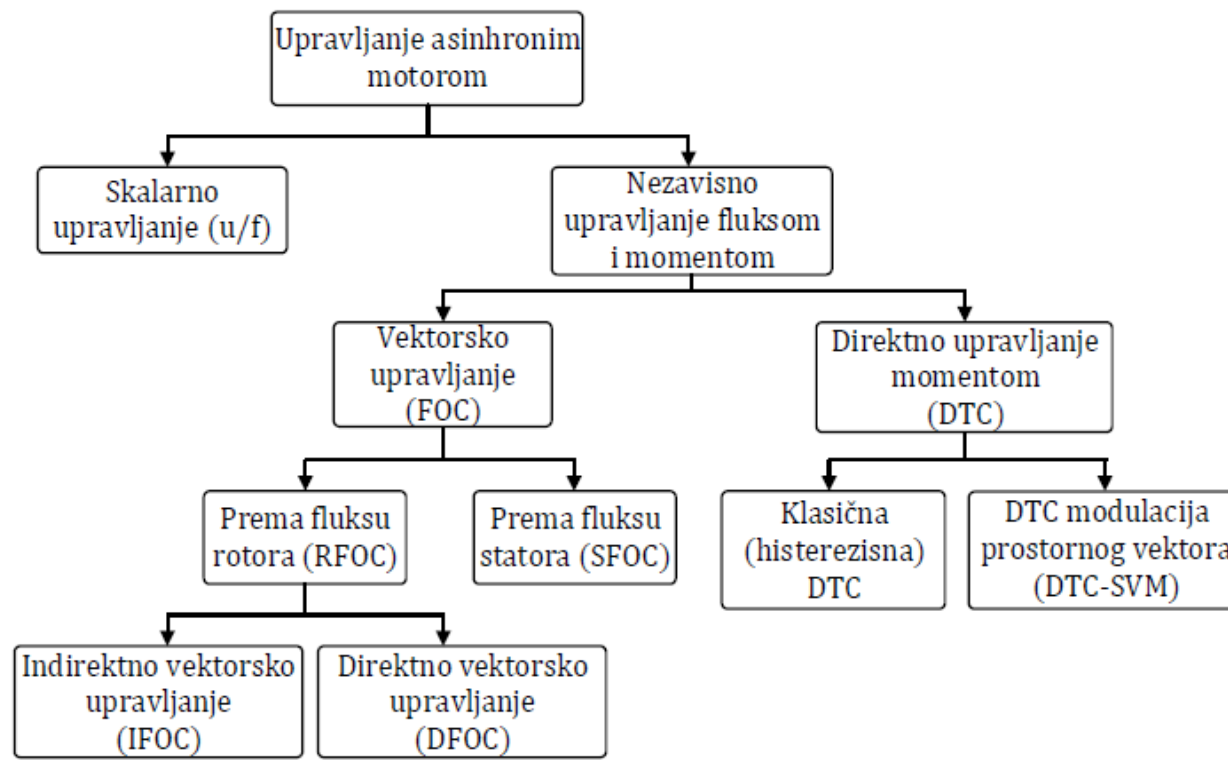
Sa grafika se čita:

- Ova MZS na struju $1,5 \times I_{set}$ MZP reaguje za 2h (7.5A)
- Na $2 \times I_{set}$ reaguje za 1h
- Na $10 \times I_{set}$ reaguje za 3s



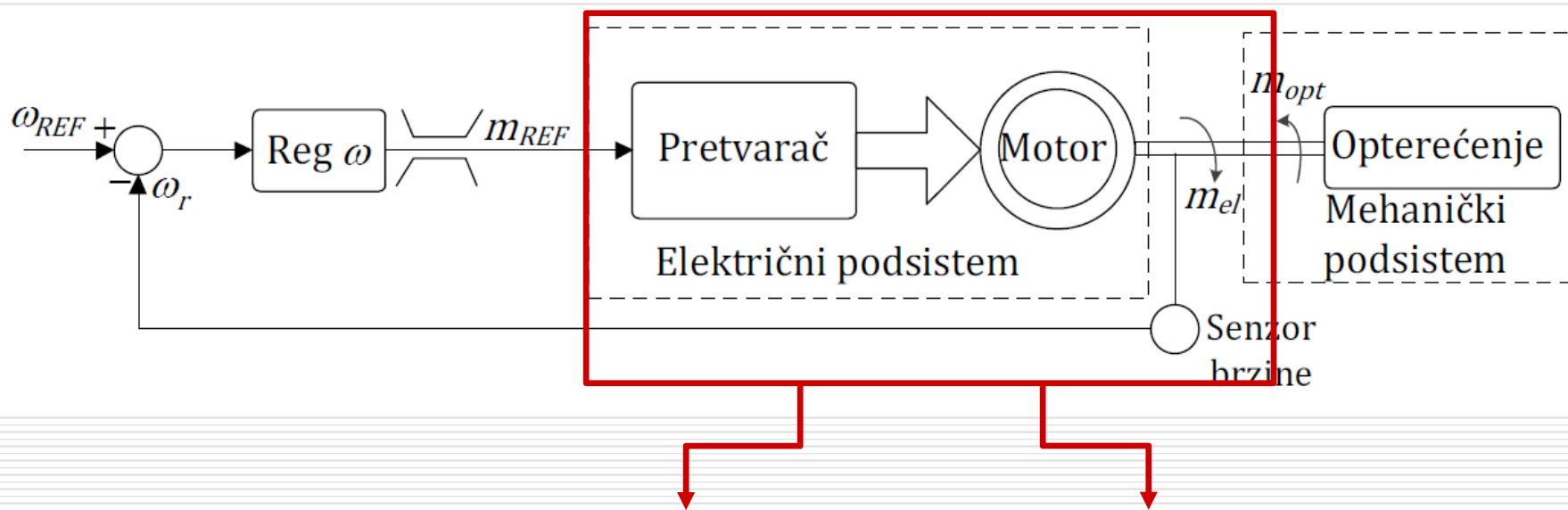
Metode za upravljanje asinhronim motorom

- Skalarno upravljanje: Naponi i struje se tretiraju kao trofazne veličine sa dva skalarna parametra: amplituda i frekvencija čijom promenom se pomeraju veštačke karakteristike AM
- Vektorsko upravljanje: Naponi i struje se tretiraju kao vektori (rezultantni vektorski su vektorski zbir tri fazne veličine) sa dve koordinate u sinhrono rotirajućem d-q sistemu



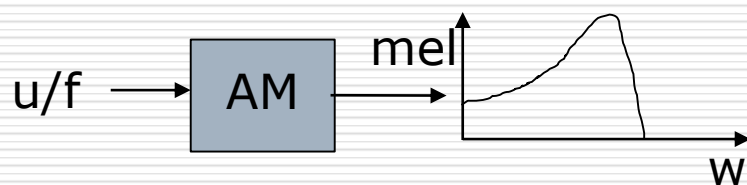
Sl. 3.49. Klasifikacija metoda upravljanja asinhronog motora

Kako asinhroni motor generiše moment?



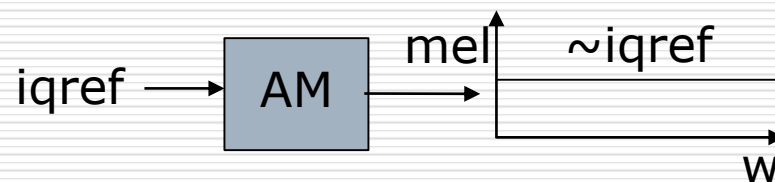
Skalarno upravljanje

Izvedeno iz stacionarnog stanja tj. na osnovu meh. karakteristika AM. Omogućuje promenu momenta promenom klizanja.



Vektorsko upravljanje

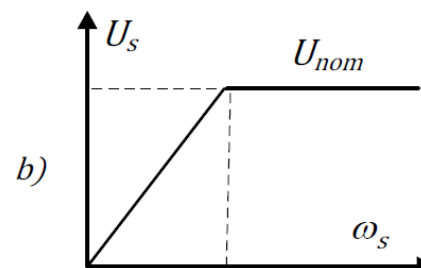
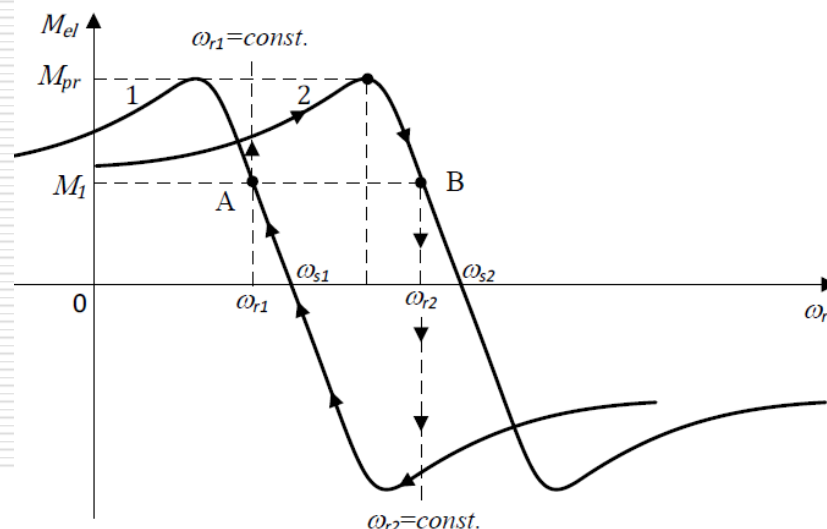
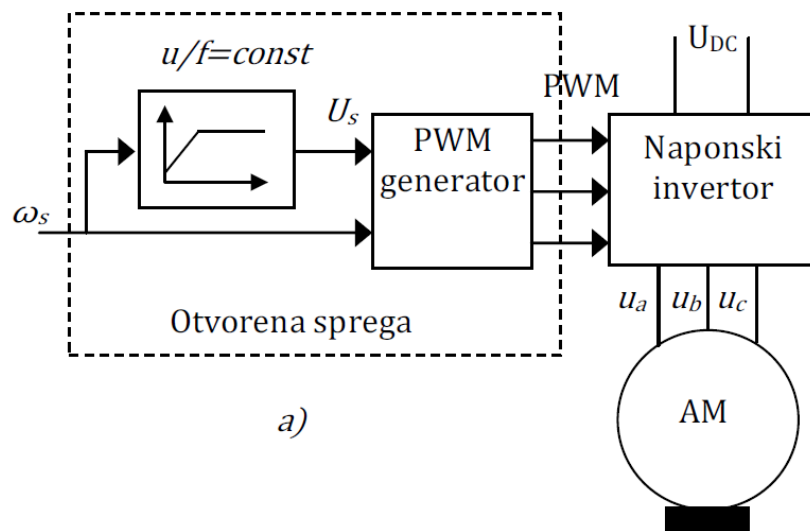
Izvedeno iz dinamičkog modela i upravljanjem vektorom struje statora omogućuje linearnu kontrolu momenta AM kako u stac stanju tako i u dinamičkom režimu



Skalarno upravljanje - Otvorena povratna sprega

Skalarno upravljanje AM je dobilo ime po tome što se upravlja samo skalarnim parametrima napona statora, tj. amplitudom i učestanošću

Promenu učestanosti se menja sinhrona brzina, i pomeraju se mehaničke karakteristike



Skalarno upravljanje - Otvorena povratna sprega

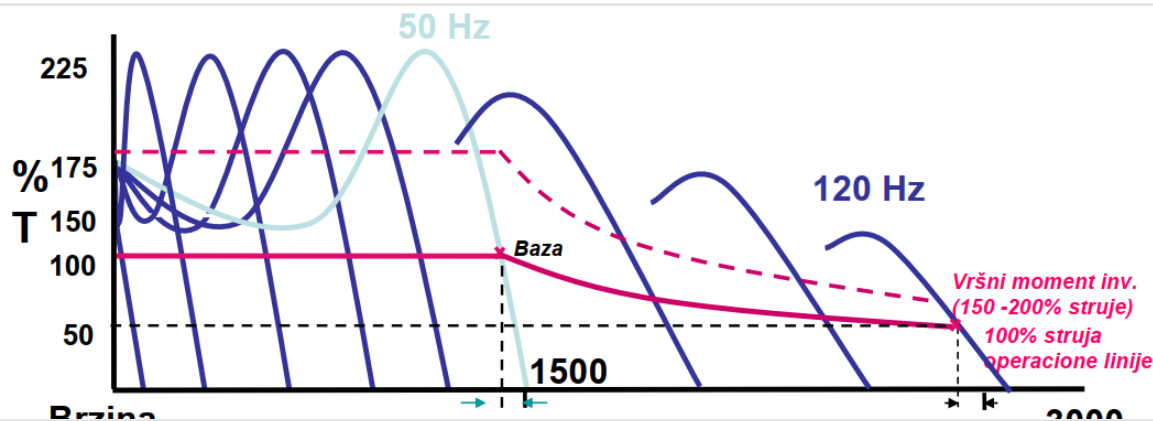
Dakle, pri skalarnom upravljanje AM promenom učestanosti se menja sinhrona frekvencija a samim tim i brzina rotora

Ako se usput menja napon tako da se održi odnos $u/f = \text{const}$, održava se konstantan nivo fluksa u mašini

$$M_c = \frac{3}{2} P \frac{|U_s|^2}{\omega_s} \frac{\frac{R_r}{s}}{(R_s + R_r/s)^2 + (X_{ys} + X_{yr})^2}$$

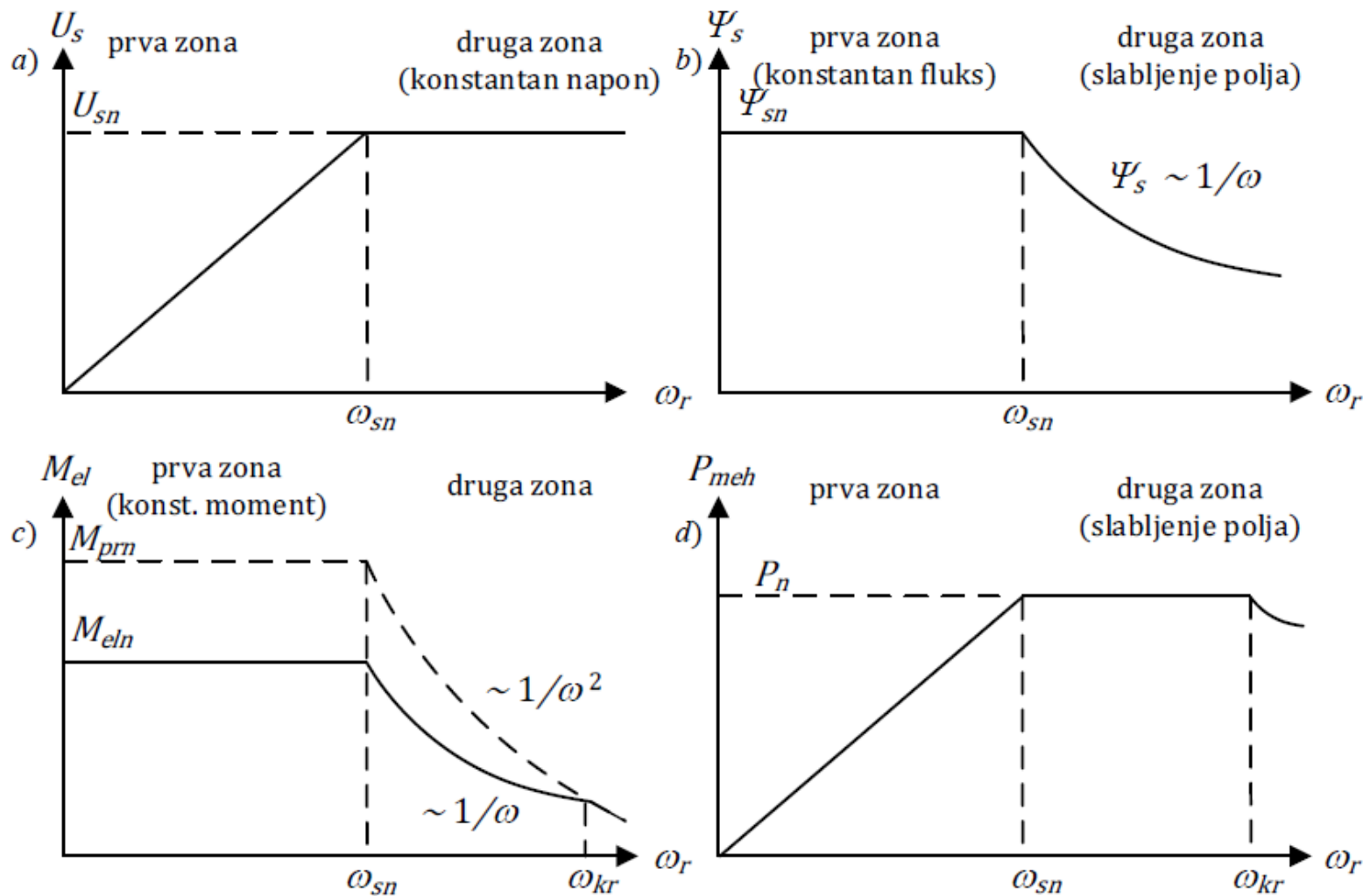
Kada inverter uđe u naponski limit, dalje povećanje brzine (frekvencije) dovodi do pada fluksa i tada može da se ostvati manji moment za istu struju (snaga je i dalje ista). Tada sa brzinom pada prevalni moment

$$M_{pr} = \pm \frac{3}{4} P \frac{|U_s|^2}{\omega_s^2} \frac{1}{L_{ys} + L_{yr}}$$



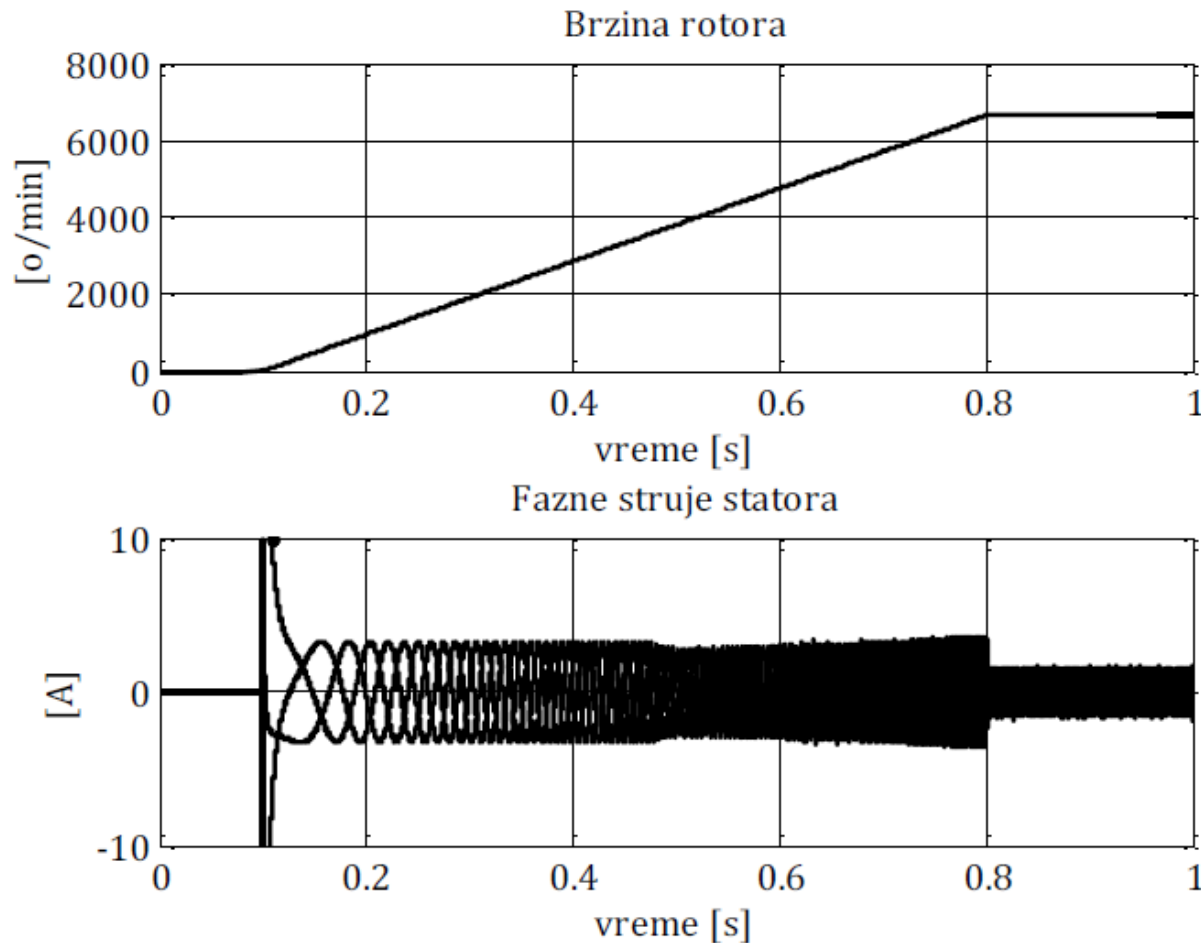
Upravljanje brzinom AM promenom učestanosti

Prva zona: const flux/moment, Druga zona: const snaga, Treća zona: limit klizanja
Prva (do nominalne brzine) i druga (preko nominalne brzine) zona iste kao kod MJS



Upravljanje brzinom AM promenom učestanosti

Da ne bude zabune, na prethodnom slajdu je prikazana efektivna vrednost napona. Trenutna vrednost napona i struje AM su prostoperiodične veličine, čija se frekvencija uvećava sa brzinom. Na primer:

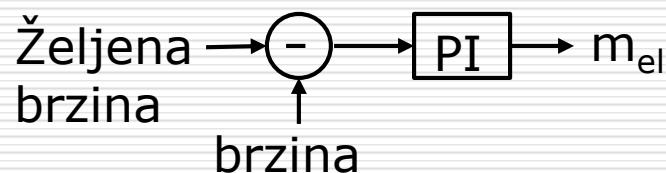


Skalarno upravljanje - zatvorena povratna sprega

Regulacija brzine rotora AM uz pomoć skalarnog upravljanja

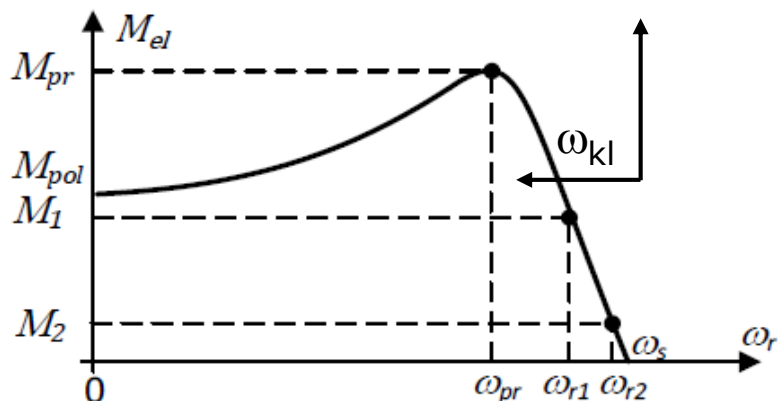
U REMP grubo upravljanje brzinom nije dovoljno, brzinu je potrebno precizno regulisati sa kontrolisanim prelaznim procesima i greškom u stacionarnom stanju. Najbolji način da se to uradi je upravljanjem momentom mašine što nije moguće u slučaju skalarnog upravljanja.

Ovo je ono što želimo $\Rightarrow$



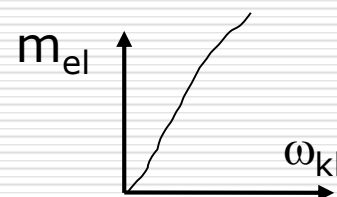
U slučaju skalarnog upravljanja je isto moguće zatvoriti povratnu spregu po brzini tako što regulator brzine upravlja klizanjem. Ideja nastaje na osnovu mehaničke karakteristike AM koja ukazuje da je u radnom delu meh. karakteristike, uz određene uslove, klizanje proporcionalno momentu AM

Ovo je ono što možemo $\Rightarrow$

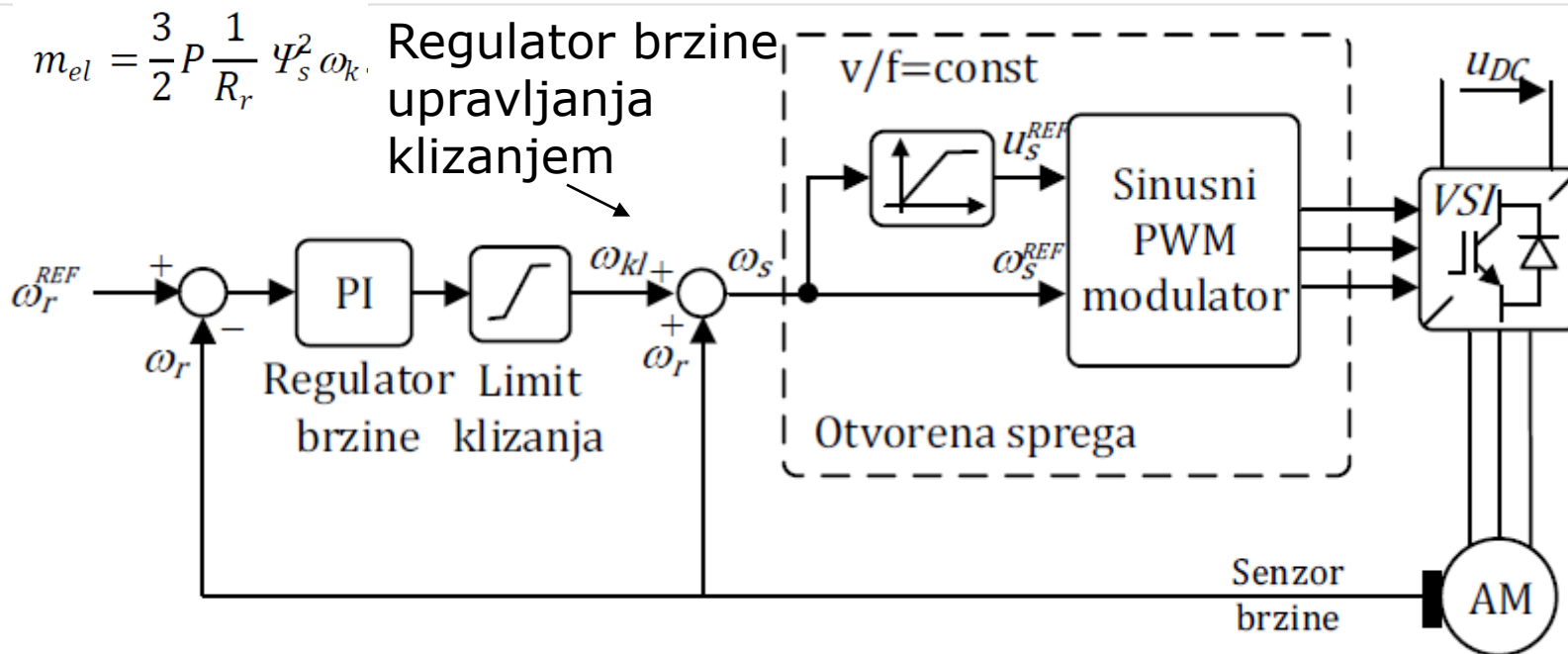


Veće klizanje veći moment !!!

$$m_{el} = \frac{3}{2} P \frac{1}{R_r} \psi_s^2 \omega_k$$



Skalarno upravljanje - zatvorena povratna sprega

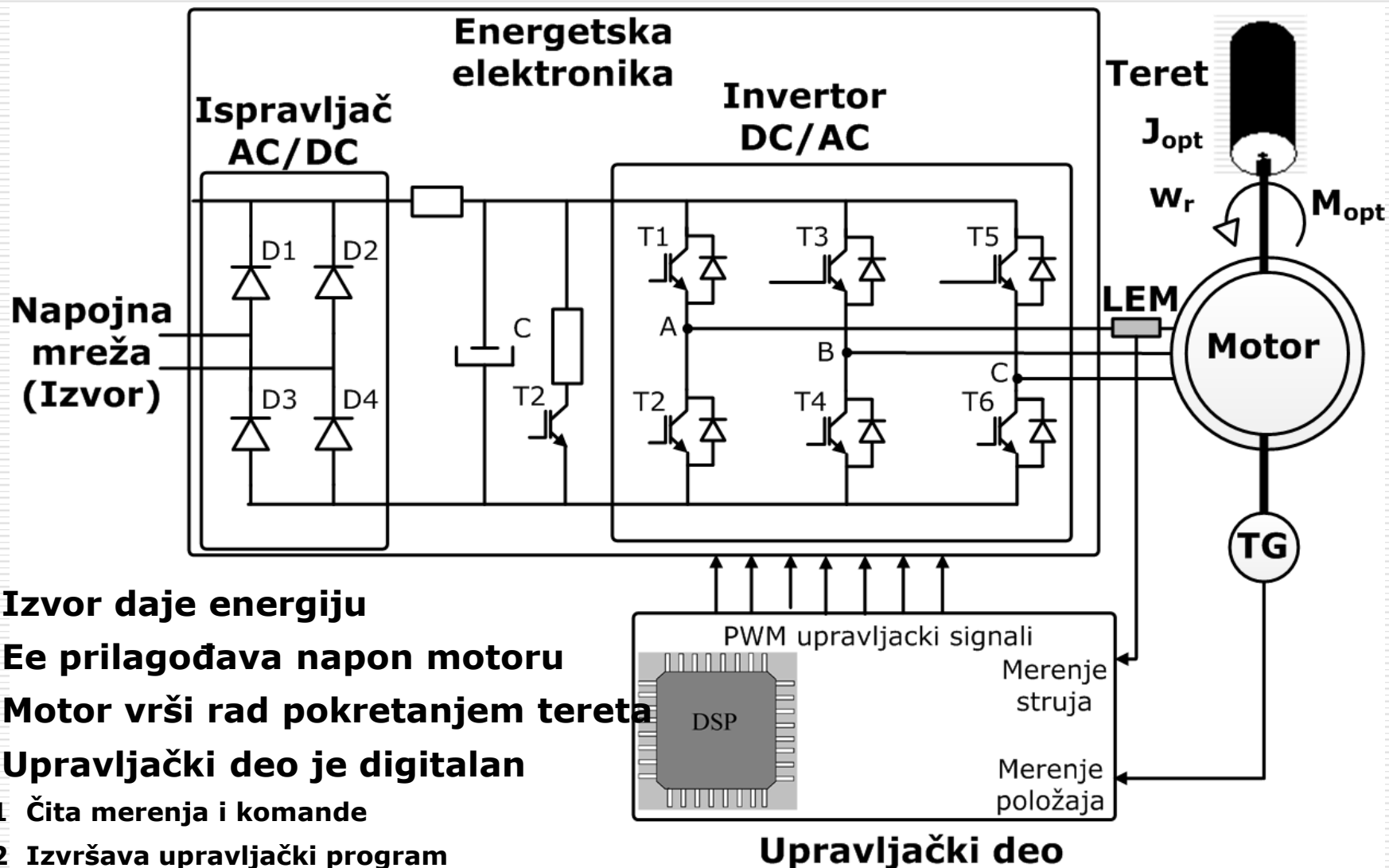


Sl. 3.51. Skalarno upravljanje AM sa zatvorenom spregom po brzini rotora

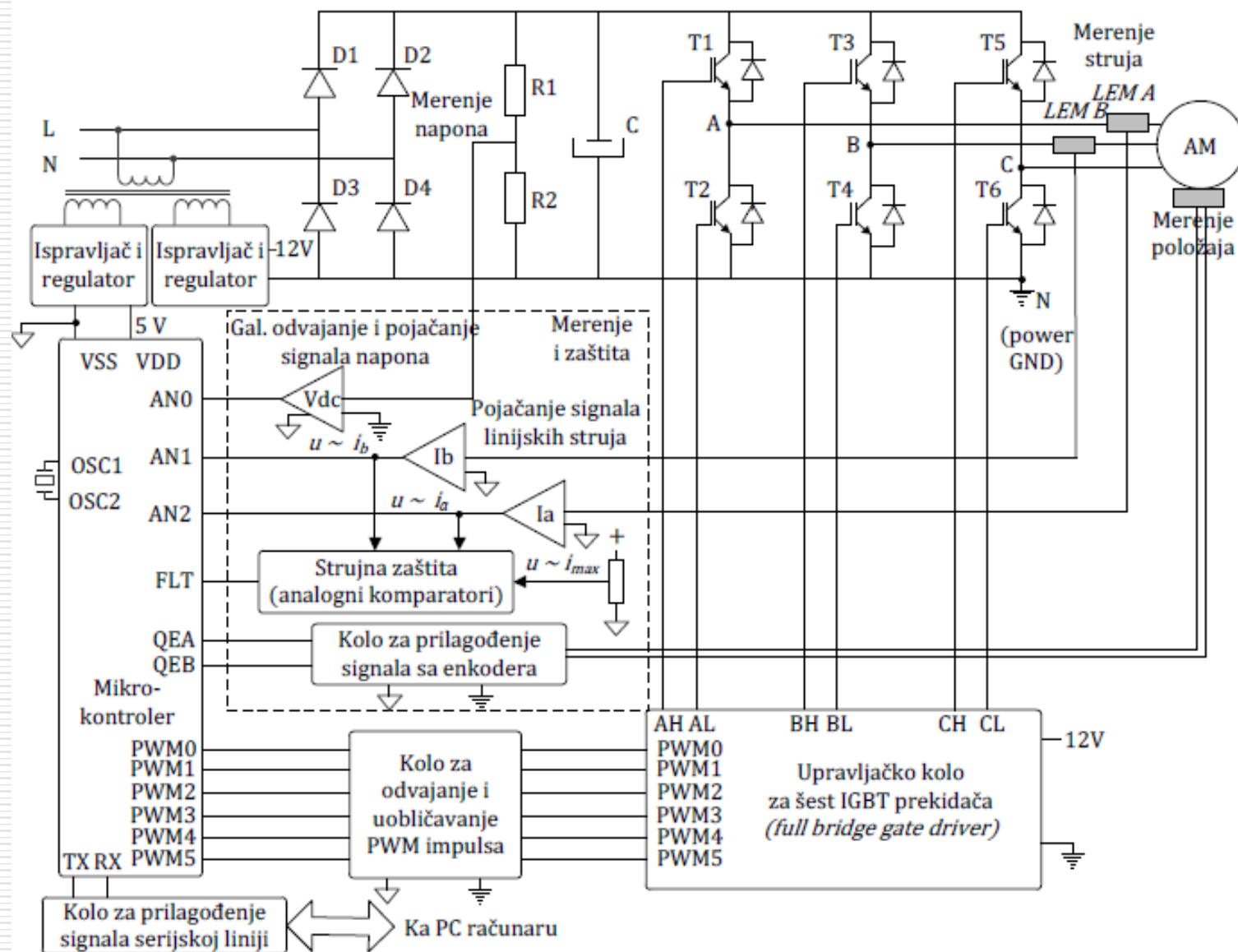
Izraz (5.69) pokazuje da uz konstantan fluks, koji se obezbeđuje po zakonu $U_s/\omega_s = \text{const}$, promenom učestanosti klizanja možemo linearno da regulišemo ostvareni elektromagnetni moment. Struktura upravljanja brzinom AM prikazana na slici 5.19 koristi ovu vezu između učestanosti klizanja i razvijenog momenta. Upravljačka promenljiva koju reguliše linearni PI regulator brzine je upravo zadata učestanost klizanja. Da bi se zadato klizanje ostvarilo, ugaona frekvencija statorskog napona ω_s se dobija kao zbir trenutne ugaone brzine rotora ω_r i ugaone frekvencije klizanja ω_k zadate na izlazu PI regulatora brzine.

8. Digitalno upravljanje pogonom sa asinhronim motorom

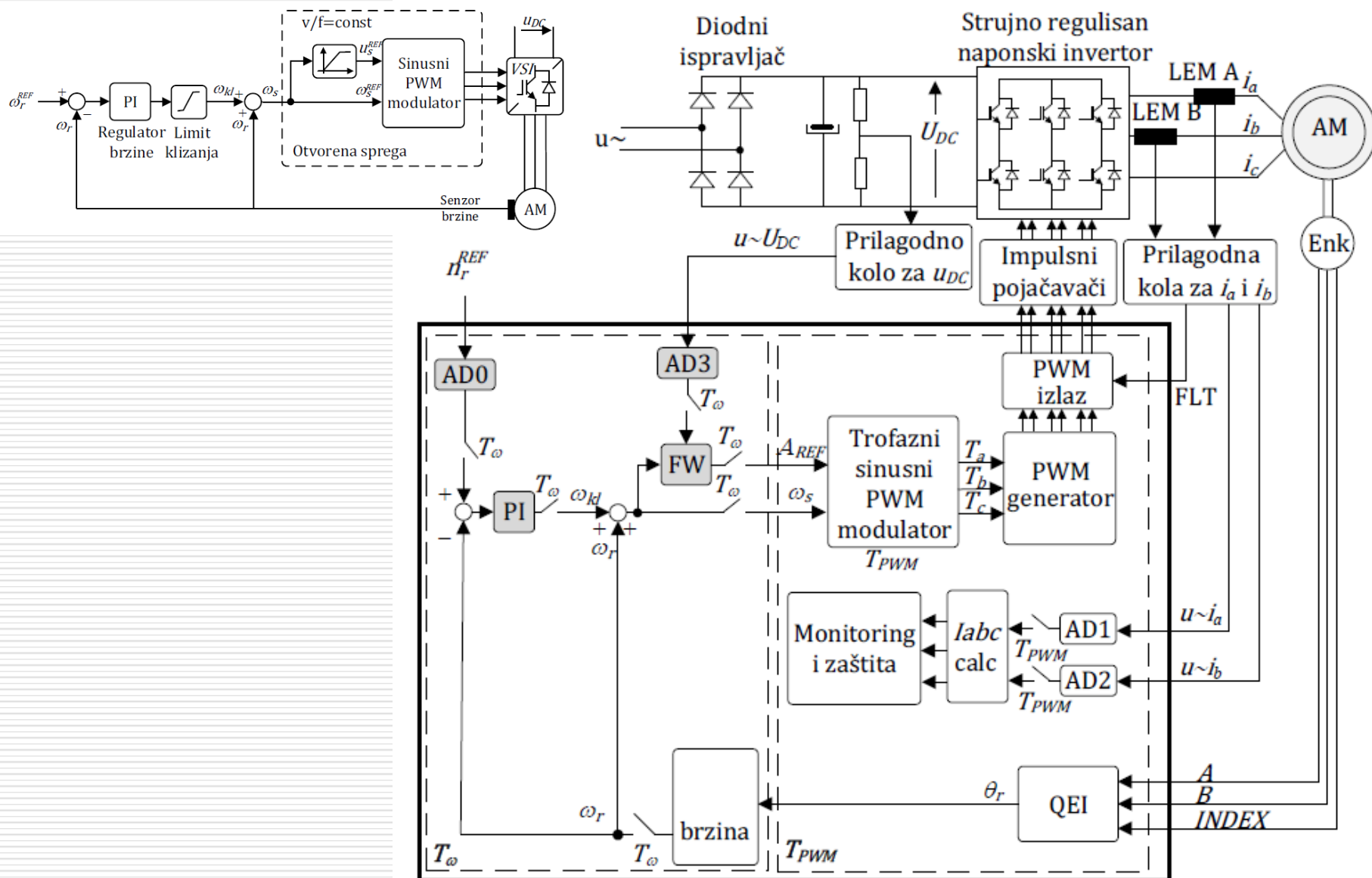
Jedna tipična šema modernog REMP



Mikroprocesorska realizacija 3F-SPWM

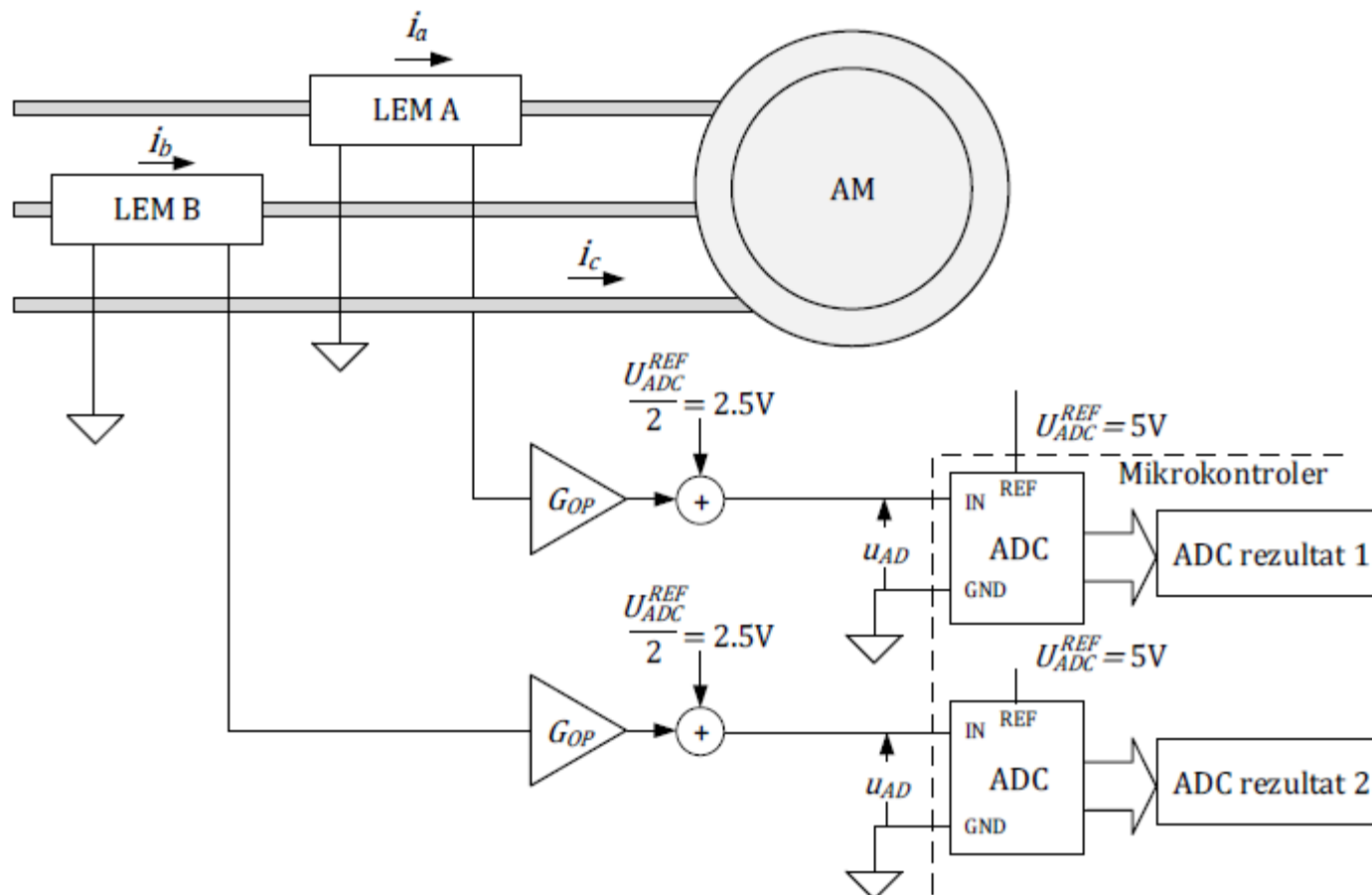


Mikroprocesorska realizacija 3F-SPWM



Mikroprocesorska realizacija 3F-SPWM

Merenje faznih struja AC motora

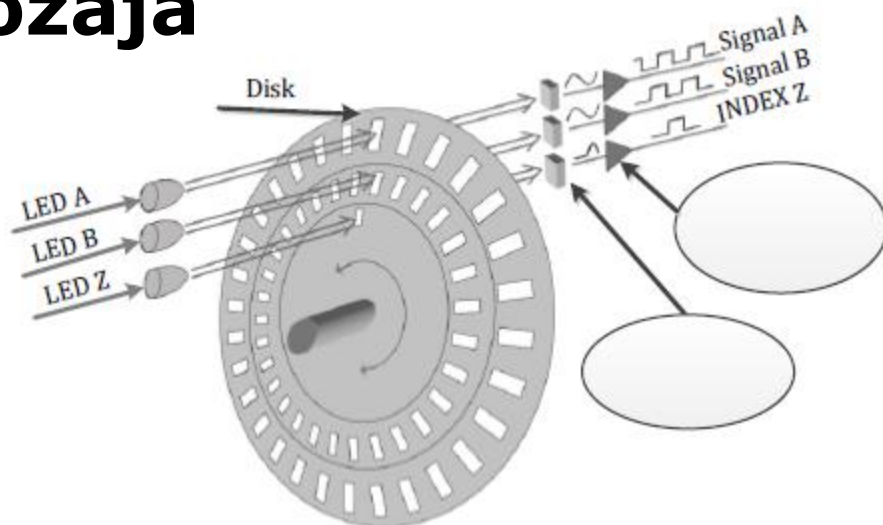


Sl. 3.82. Merenje dve fazne struje AM pomoću LEM sondi

Mikroprocesorska realizacija 3F-SPWM

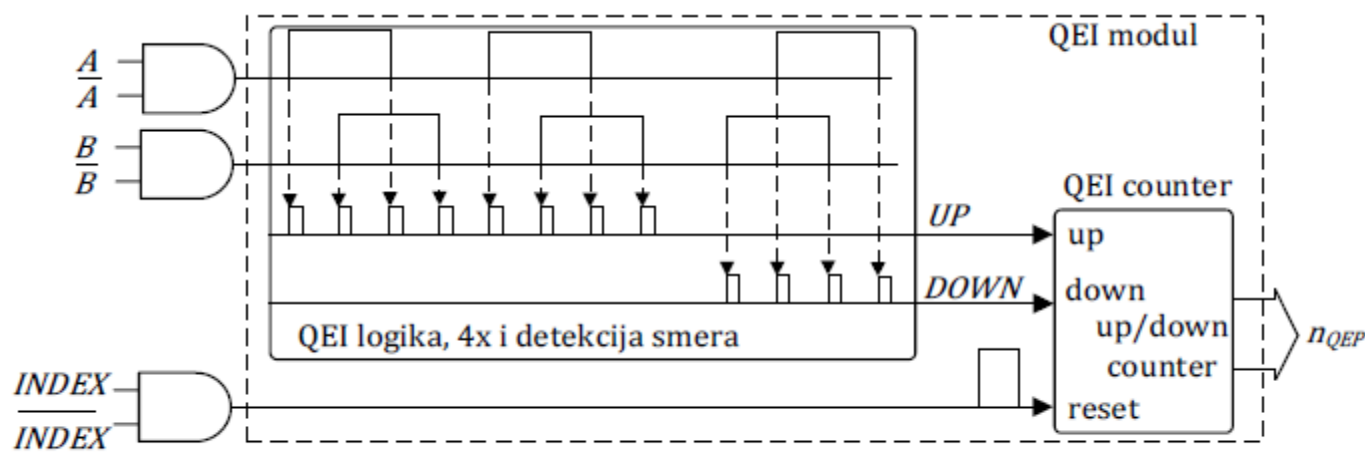
Merenje brzine i položaja

Princip rada enkodera



Sl. 3.84. Princip rada optičkog inkrementalnog enkodera [3]

Specijalna periferija za brojanje impulsa sa enkodera QEI

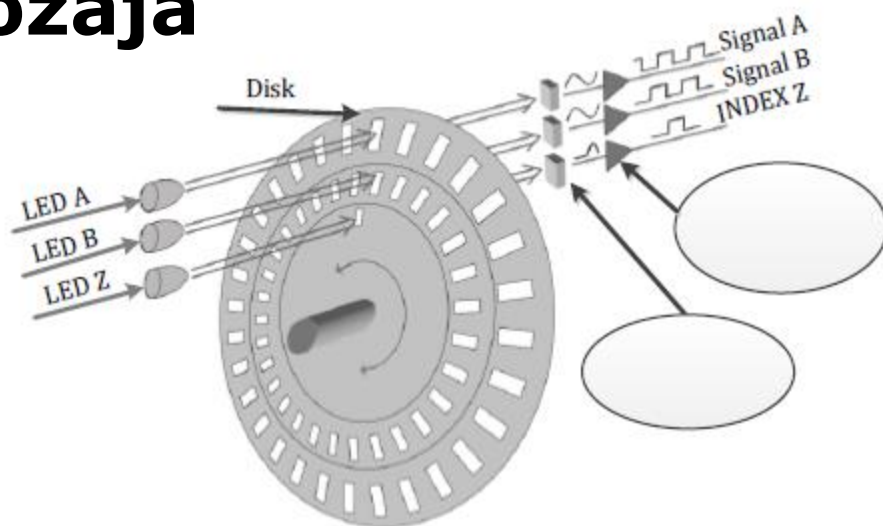


Sl. 3.85. Ilustracija rada QEI modula sa ulazima A,B i INDEX

Mikroprocesorska realizacija 3F-SPWM

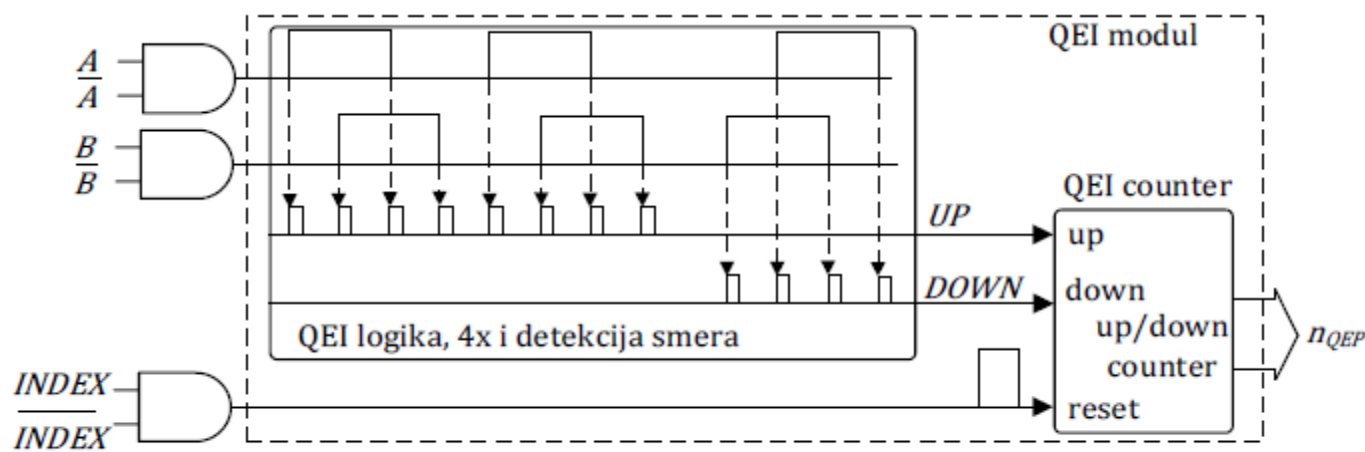
Merenje brzine i položaja

Princip rada enkodera



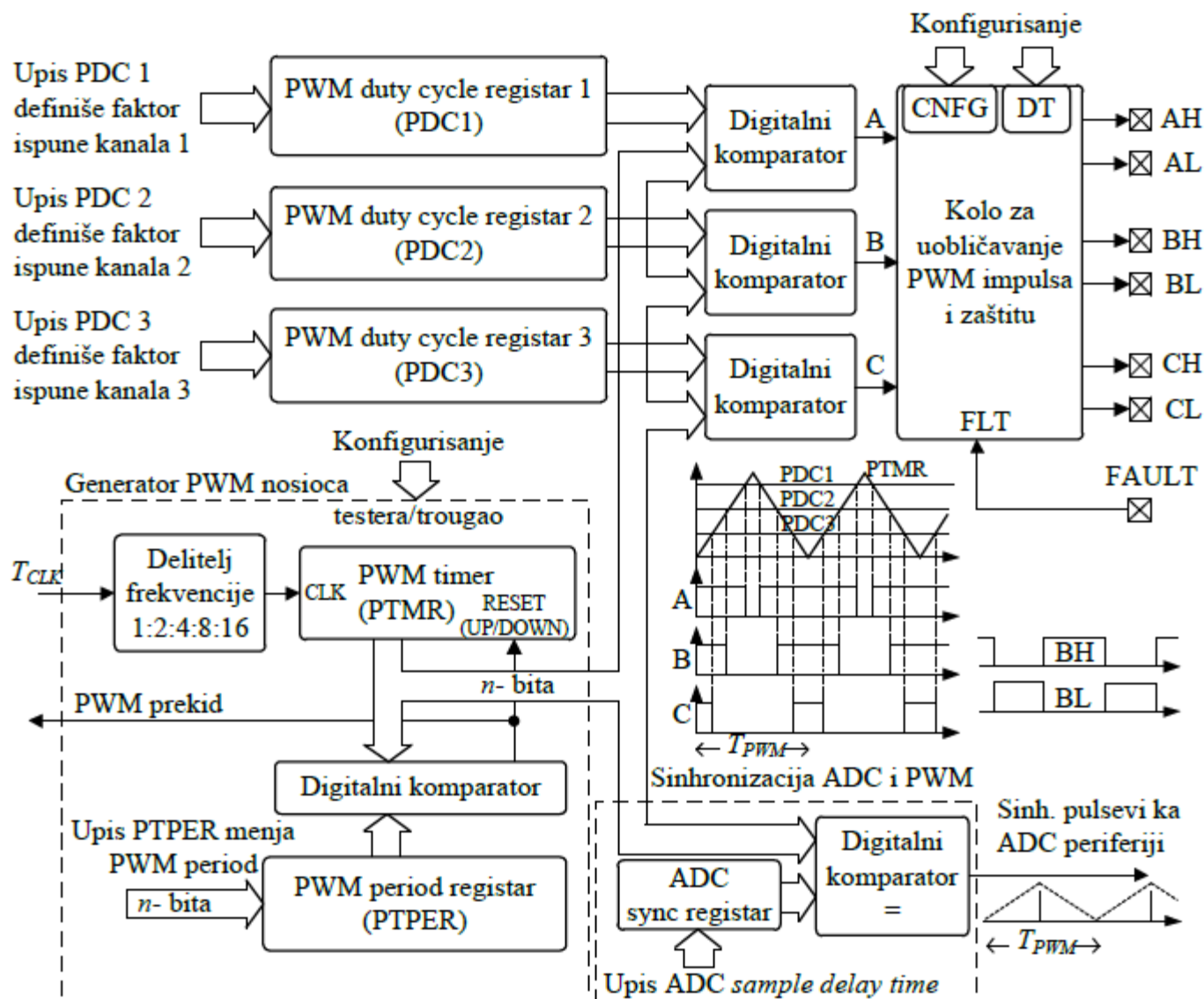
Sl. 3.84. Princip rada optičkog inkrementalnog enkodera [3]

Specijalna periferija za brojanje impulsa sa enkodera QEI

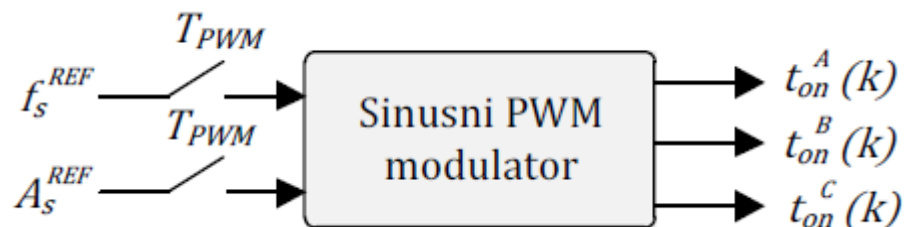


Sl. 3.85. Ilustracija rada QEI modula sa ulazima A,B i INDEX

Mikroprocesorska realizacija 3F-SPWM



Mikroprocesorska realizacija 3F-SPWM



$$u_{AN}(t) = \frac{U_{DC}}{2} + A_s \frac{U_{DC}}{2} \sin(\omega_s t),$$

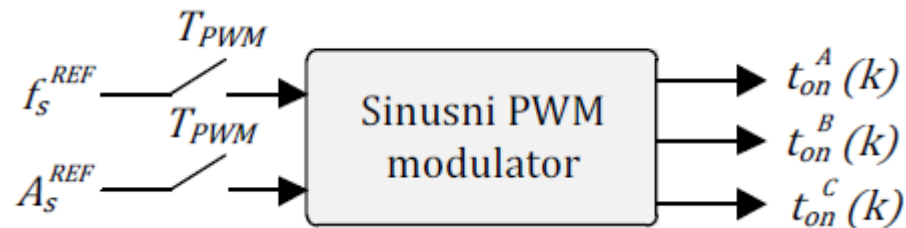
$$u_{BN}(t) = \frac{U_{DC}}{2} + A_s \frac{U_{DC}}{2} \sin(\omega_s t - 2\pi/3),$$

$$u_{CN}(t) = \frac{U_{DC}}{2} + A_s \frac{U_{DC}}{2} \sin(\omega_s t - 4\pi/3),$$

i ima sledeće parametre,

- A_s koji predstavlja relativnu amplitudu napona ili indeks modulacije $A_s \in \{0,1\}$, za amplitudu od 0 do $U_{DC}/2$,
- ω_s koji predstavlja zadatu frekvenciju izlaznog napona (fundamentalne komponente).

Mikroprocesorska realizacija 3F-SPWM



$$u_{AN}(t) = \frac{U_{DC}}{2} + A_s \frac{U_{DC}}{2} \sin(\omega_s t),$$

$$u_{BN}(t) = \frac{U_{DC}}{2} + A_s \frac{U_{DC}}{2} \sin(\omega_s t - 2\pi/3),$$

$$u_{CN}(t) = \frac{U_{DC}}{2} + A_s \frac{U_{DC}}{2} \sin(\omega_s t - 4\pi/3),$$

i ima sledeće parametre,

- A_s koji predstavlja relativnu amplitudu napona ili indeks modulacije $A_s \in \{0,1\}$, za amplitudu od 0 do $U_{DC}/2$,
- ω_s koji predstavlja zadatu frekvenciju izlaznog napona (fundamentalne komponente).

Mikroprocesorska realizacija 3F-SPWM

Veza između srednje vrednosti faznog napona A u toku k -te PWM periode $u_A^{sr}(k)$ i vremena uključenja faze A $t_{on}^A(k)$ u toku te iste PWM periode glasi,

$$u_A^{sr}(k) = \frac{t_{on}^A(k)}{T_{PWM}} U_{DC}. \quad (5.28)$$

Sa druge strane, u periodu kT_{PWM} , za k -ti odabirak referentnog signala za fazu A se dobije,

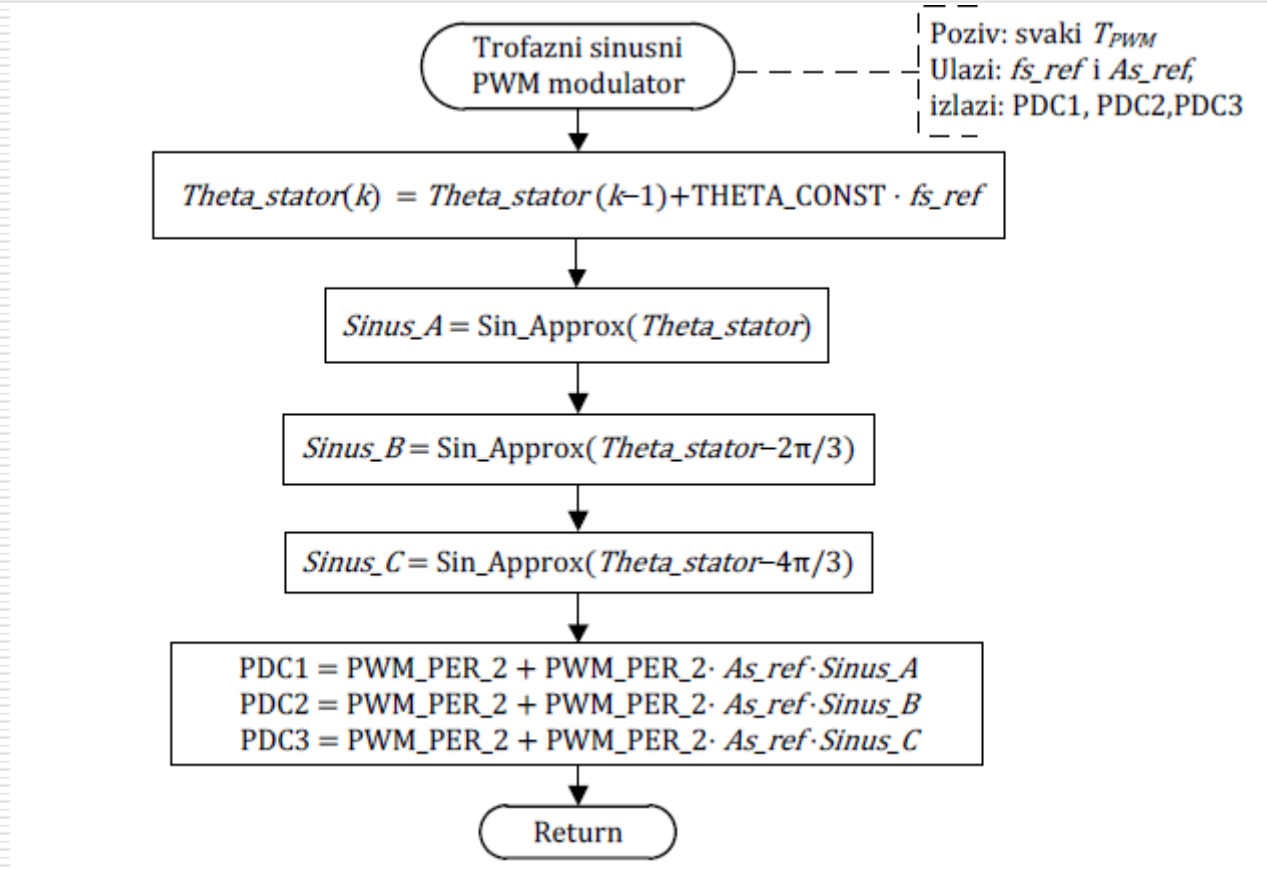
$$u_{AN}(k) = \frac{U_{DC}}{2} + A_s \frac{U_{DC}}{2} \sin(\omega_s k T_{PWM}). \quad (5.29)$$

$$t_{on}^A(k) = \frac{T_{PWM}}{2} + A_s \frac{T_{PWM}}{2} \sin(k \omega_s T_{PWM}),$$

$$t_{on}^B(k) = \frac{T_{PWM}}{2} + A_s \frac{T_{PWM}}{2} \sin(k \omega_s T_{PWM} - 2\pi/3),$$

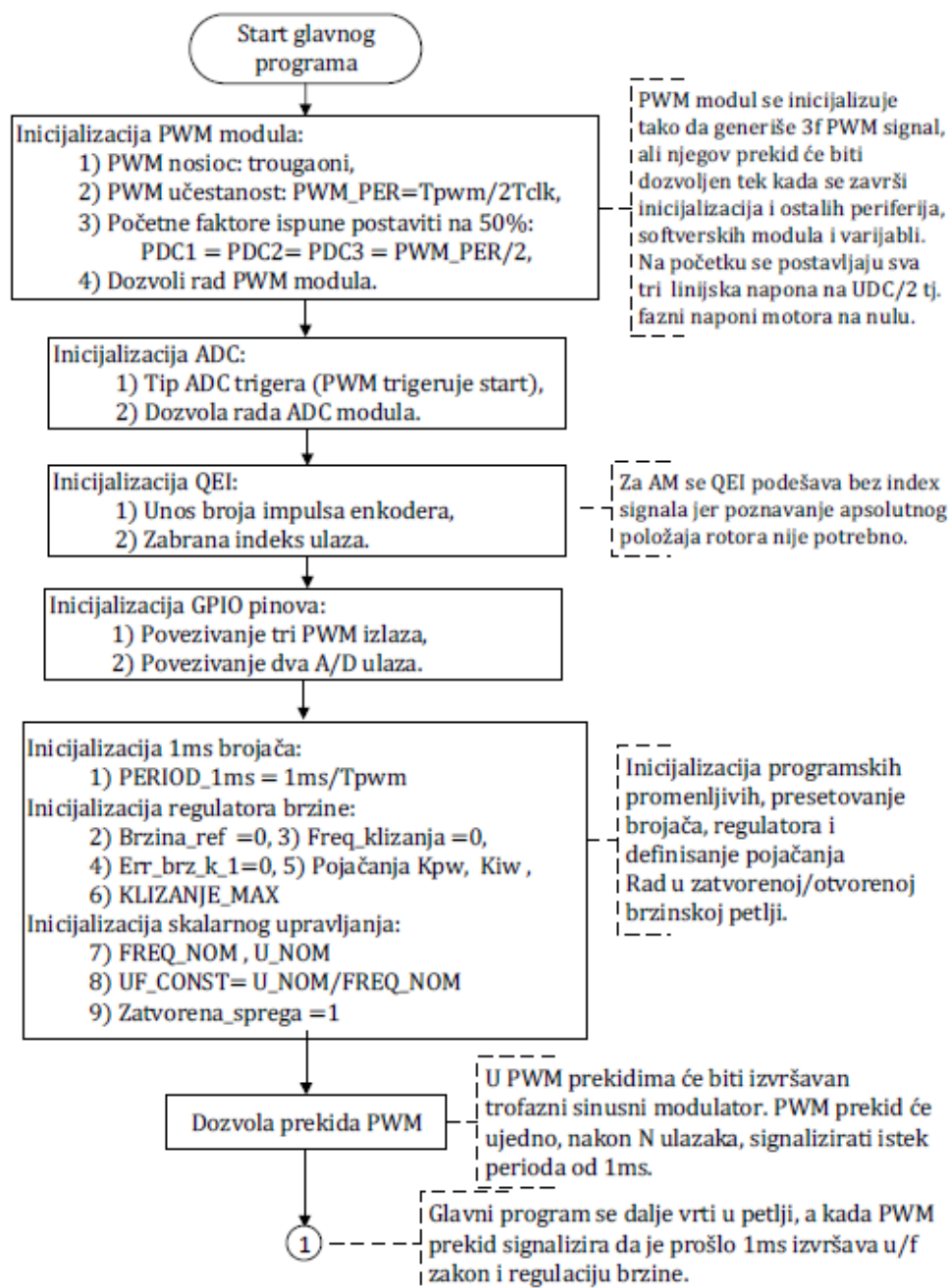
$$t_{on}^C(k) = \frac{T_{PWM}}{2} + A_s \frac{T_{PWM}}{2} \sin(k \omega_s T_{PWM} - 4\pi/3).$$

Mikroprocesorska realizacija 3F-SPWM



Mikrop. program

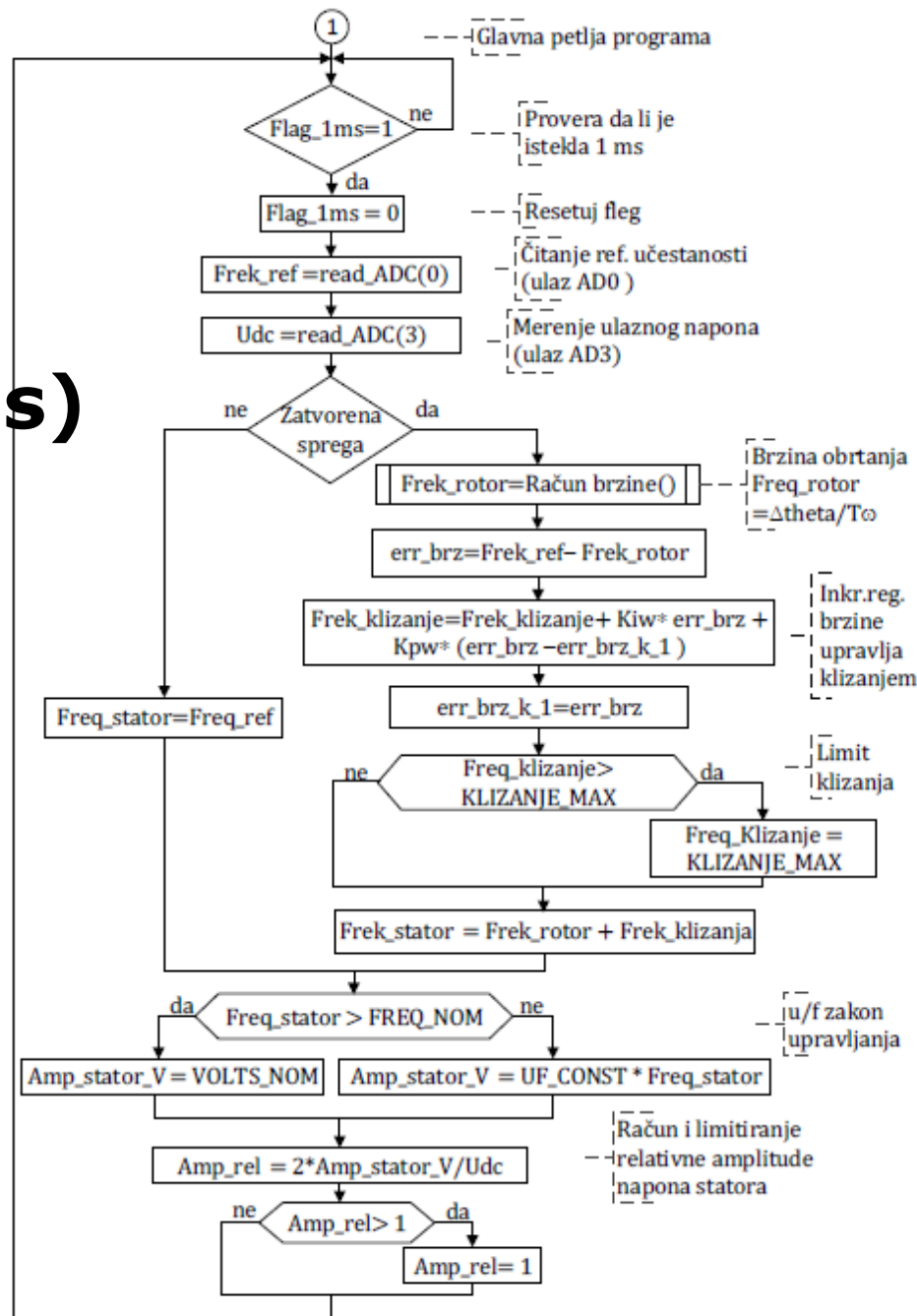
Skalarno (u/f) upravljanja AM - Inicijalizacija



Sl. 3.93. Blok dijagram algoritma inicijalizacije programa za skalarno upravljanje AM

Mikrop. program

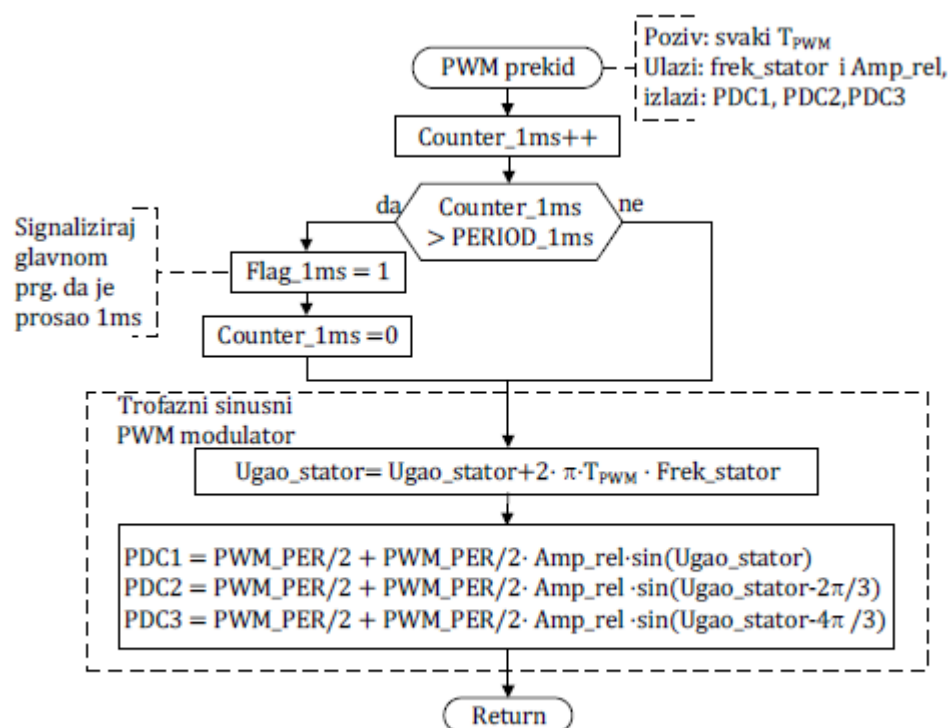
Skalarno (u/f) upravljanja AM - glavna petlja (1ms)



Sl. 3.94. Blok dijagram algoritma glavnog programa za skalarno upravljanje AM koji je regulisan po brzini

Mikroprocesorski program

Skalarno (u/f) upravljanja AM - 3F PWM modulator (svake PWM periode)



Sl. 3.95. Blok dijagram algoritma programa PWM prekidne rutine za skalarno upravljanje AM koji je regulisan po brzini [3]