

Pretvarači energetske elektronike u REMP

Regulisani elektromotorni pogoni (REMP)

– Mehatronika

(April 2024)

Sadržaj: pretvarači u REMP

- 1. Pretvarači energetske elektronike u REMP**
- 2. Poluprovodnici u prekidačkom režimu rada**
- 3. Primer prekidačkog izvora jednosmernog napona**
- 4. Osnovni princip PWM modulacije**
- 5. Naponsko i strujno upravljanje pretvaračima**

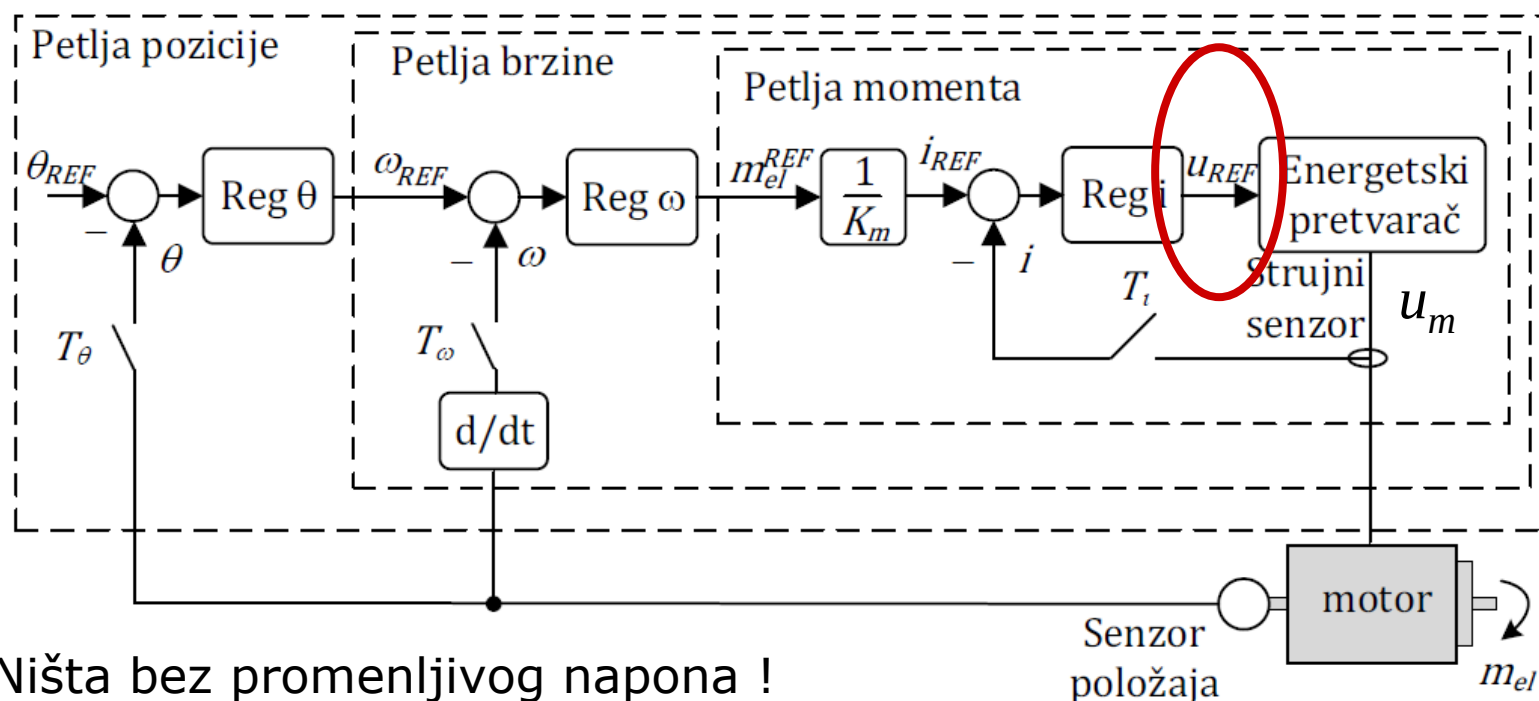
1. Pretvarači energetske elektronike kojima se napajaju motori

Neophodnost primene pretvarača u REMP

Pretvarači energetske elektronike menjaju oblik izlaznog napona.

U REMP se tipično koriste tri regulacione petlje: petlju položaja (upravlja brzinom), petlju brzine (upravlja momentom) i petlju momenta/struje koja upravlja naponom na motoru).

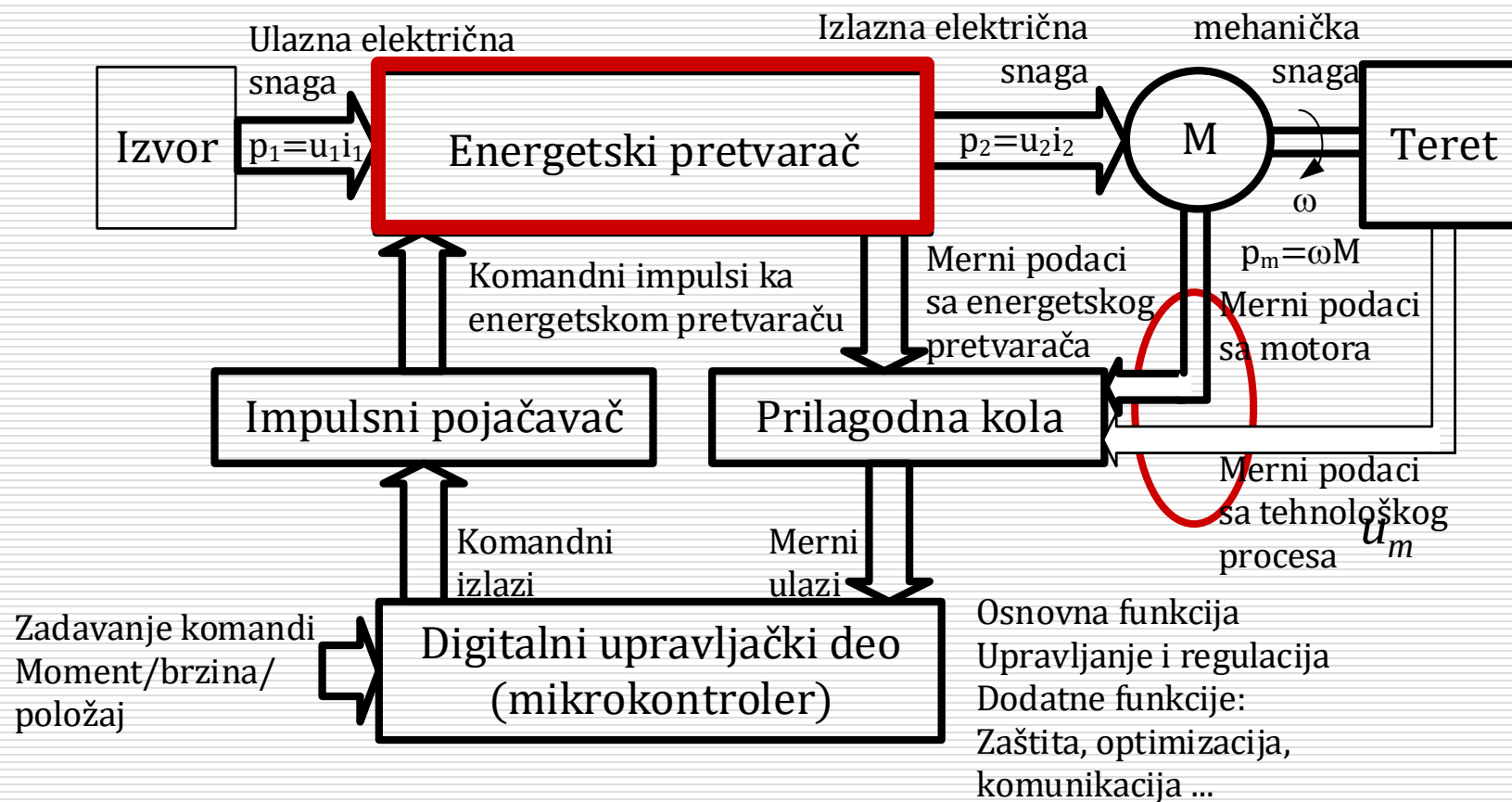
U bilo kojoj varijanti, u REMP jedino možemo da menjamo napon na motoru. Promenom napona promenimo struju motora, na osnovu te struje motor generiše moment, a taj moment utiče na promenu brzine ili položaja vratila.



Ništa bez promenljivog napona !

Neophodnost primene pretvarača u REMP

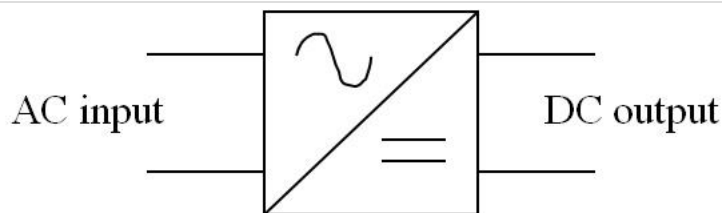
Pretvarač energetske elektronike u REMP menja oblik napona/struje na svom ulazu i pretvara ih u oblik pogodan motoru, u skladu sa zadatim referentnim vrednostima (moment, brzina, položaj).



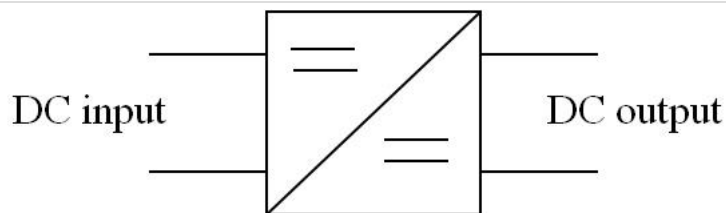
Ništa bez promenljivog napona !

Četiri tipa pretvarača: AC/DC, DC/DC, DC/AC, AC/AC

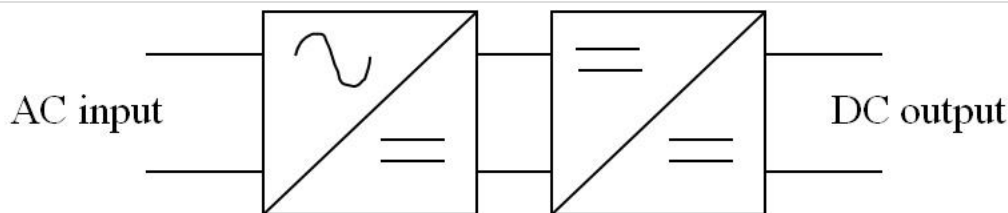
- ❑ U REMP se koriste razne vrste pretvarača što zavisi od tipa napona izvora, tipa konvertora kao i od oblika napona koji treba motoru (DC ili AC)
- ❑ Za motore jednosmerne struje koriste se tri kombinacije
- ❑ Dodatno, topologija AC/DC konvertora zavisi od broja faza mreže



DC motor napajan promenjivim DC naponom iz regulisanog ispravljača a pogon energiju dobija iz AC mreže



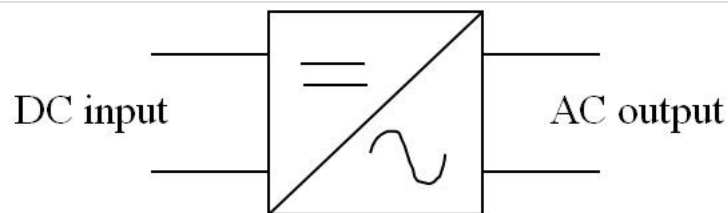
DC motor napajan promenjivim DC naponom a pogon energiju dobija iz DC izvora (npr. akumulator)



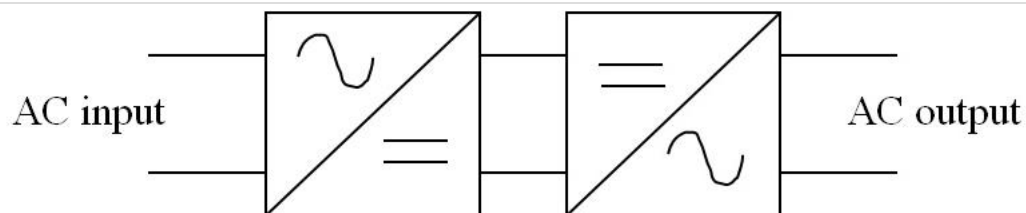
DC motor napajan promenjivim DC naponom iz regulisanog DC/DC konvertora koji napaja neregulisani ispravljač. Pogon energiju dobija iz AC mreže

Četiri tipa pretvarača: AC/DC, DC/DC, DC/AC, AC/AC

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



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



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

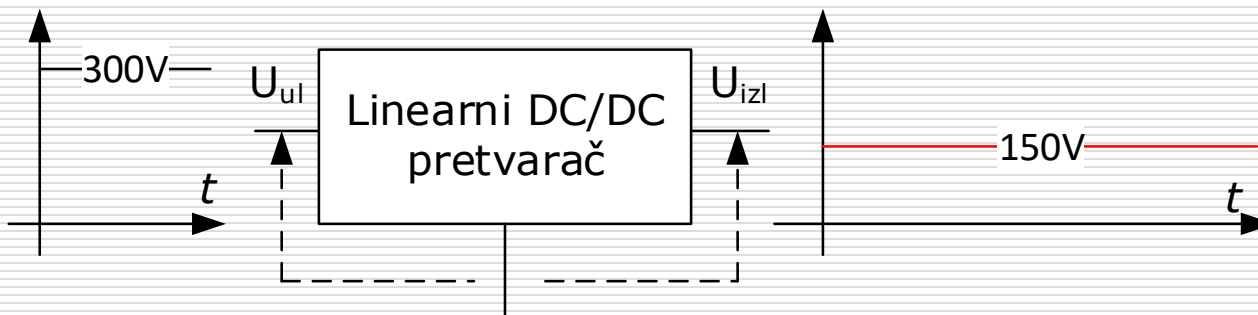
2. Poluprovodničke komponente u prekidačkom režimu rada

Linearni i impulsni pretvarači

□ Primer za DC/DC pretvarače

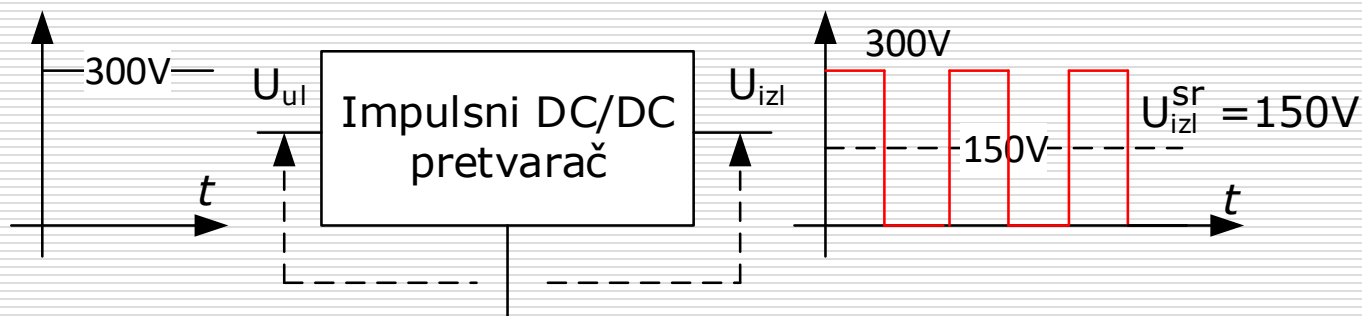
Linearni DC/DC pretvarač

- Prekidači rade u linearnom (aktivnom režimu)
- ne koriste se u REMP, a skoro i nigde više

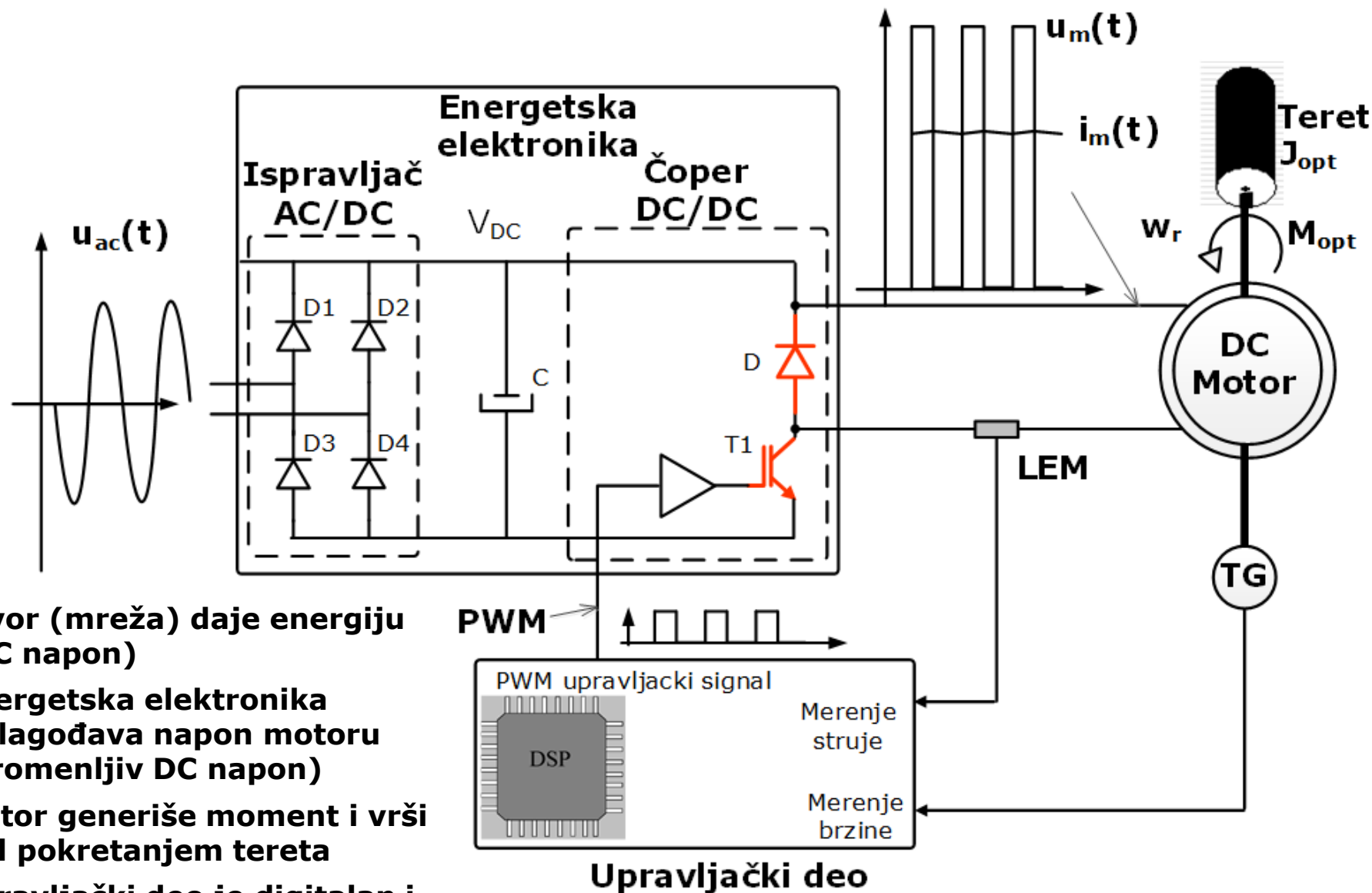


Impulsni DC/DC pretvarači

- Prekidači rade u impulsnom (prekidačkom) režimu
- uvek koriste u REMP
- sada i za osvetljenje, a polako osvajaju i muziku, itd...

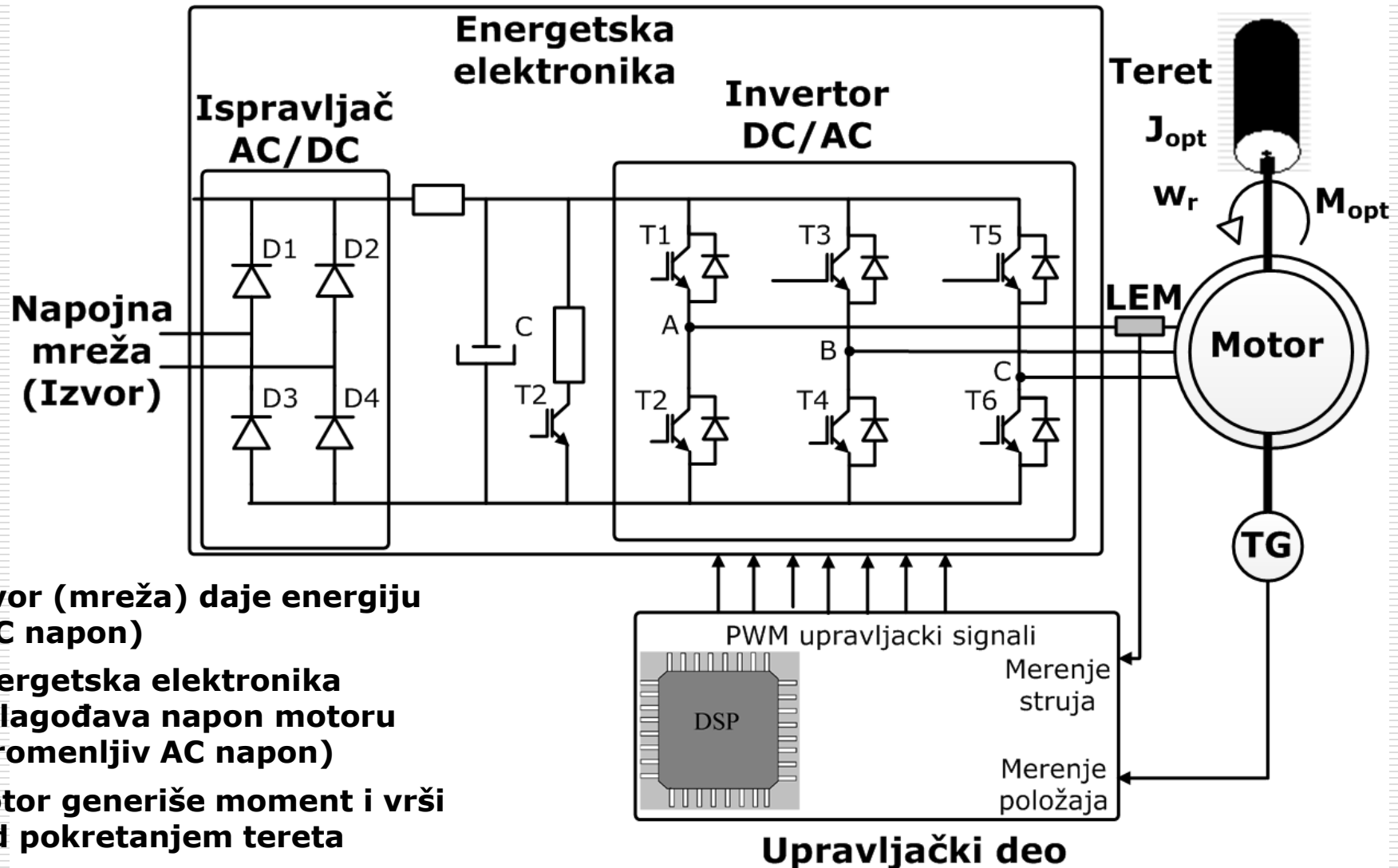


3.1 Primer šeme REMP sa DC motorom



3.2. Primer šeme REMP sa AC motorom

informativno



- 1 Izvor (mreža) daje energiju (AC napon)
- 2 Energetska elektronika prilagođava napon motoru (promenljiv AC napon)
- 3 Motor generiše moment i vrši rad pokretanjem tereta
- 4 Upravljački deo je digitalan i on generiše 6 x PWM signala

Šta je cilj ? Idealni i realan prekidač

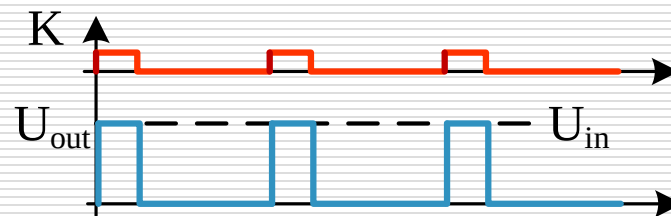
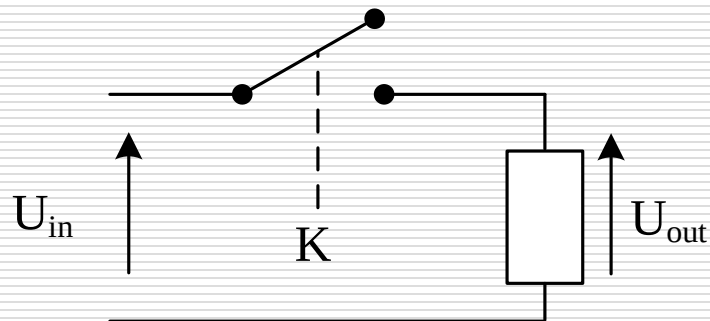
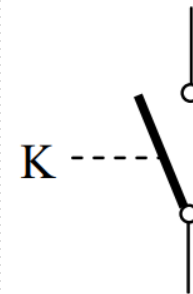
U REMP se koristi impulsno napajanje i svi poluprovodnički elementi rade u prekidačkom modu !!!!

□ **Idealan prekidač** se upravlja signalom K

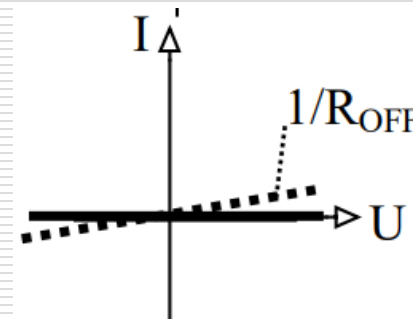
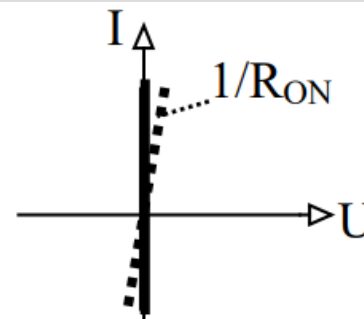
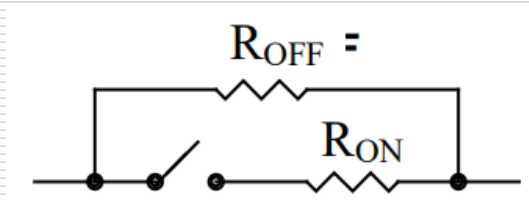
$K=1$ prekidač uključen, $K=0$ prekidač isključen

(K signal male snage, upravlja tokom velike snage)

□ **Primer primene prekidača**



□ **Realni prekidač** se isto upravlja signalom K ali ima R_{ON} i R_{OFF}



Karakteristike realnog prekidača

Rele kao prekidač

U REMP se RELE NE KORISTI kao prekidač

Rele je elektronska sprava koja prekida i uspostavlja strujno kolo putem elektromagneta

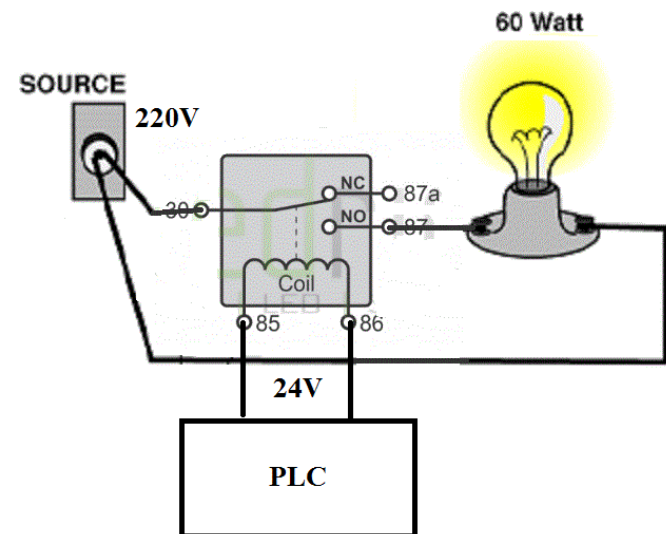


Kada se na špulnu releja, ulaz A1-A2, dovede napon uspostavi se struja i magnetno kolo koje privuče kontakte releja i promeni se stanje u kolu, u prikazanom slučaju se spoje kontakti 1 i 2.

Rele se primenjuje u energetici, primer:

Ali, rele je mehanička sprava i time spor (desetine ms) i sa ograničenim brojem uključenja u toku radnog veka (nekoliko miliona uključenja).

On nije za brze promene pri upravljanju pretvaračima, npr 20kHz znači 20 000 uključenja u sekundi



Dioda kao prekidač

U REMP se DIODA ČESTO KORISTI kao prekidač

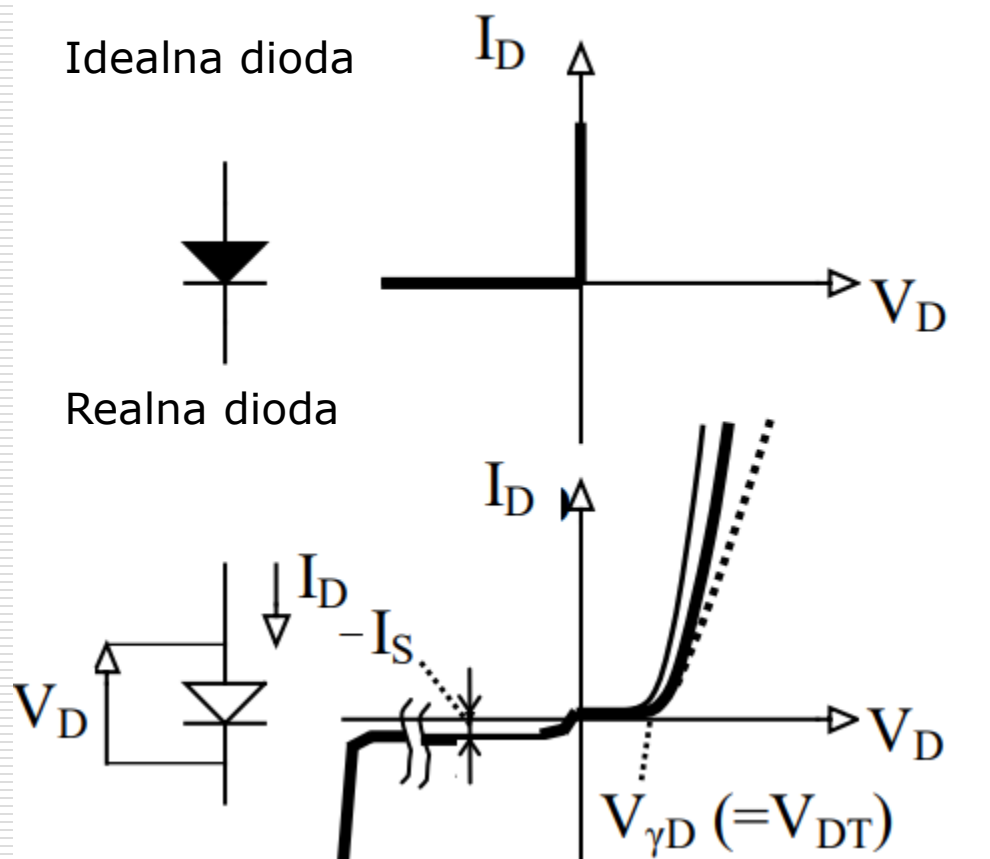
Dioda je neupravljivi prekidač, nema kontrolni ulaz K

Dioda provodi ako je direktno polarisana $V_D > 0$

V_{DT} je pad napona na uključenoj diodi (on pomalo raste sa strujom)

Dioda se isključuje ako je inverzno polarisana $V_D < 0$

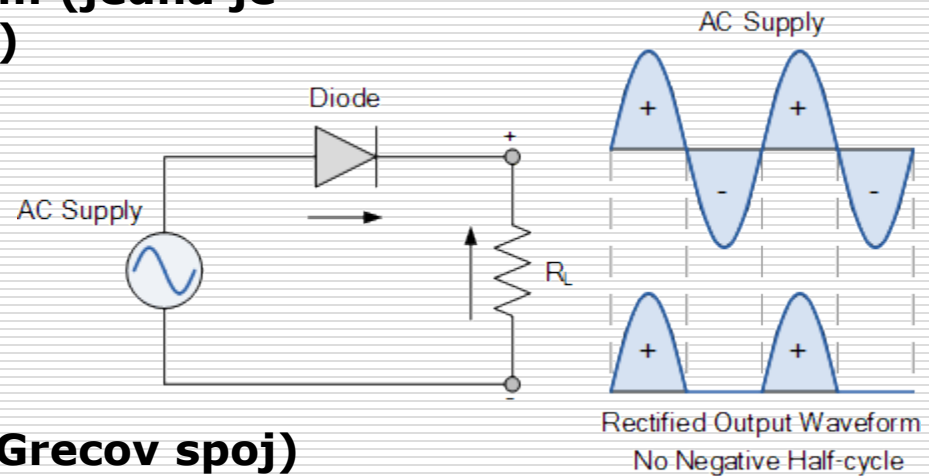
Dioda blokira inverzan napon do neke granične vrednosti, onda probije (proboj prikazan kao nagli porast negativne struje levo na UI karakteristici)



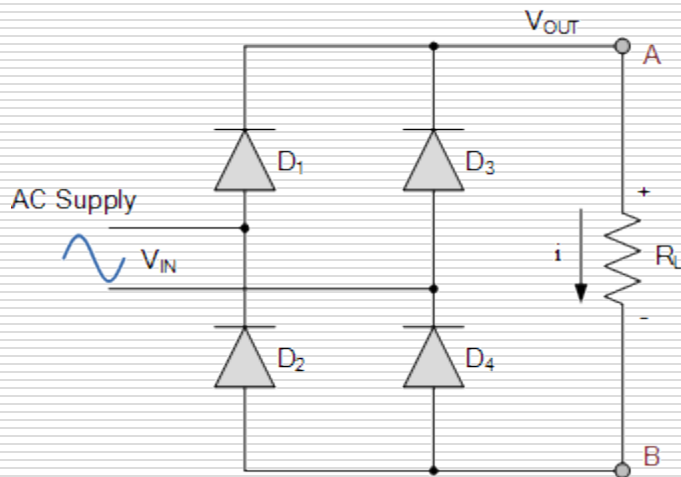
Primer primena diode u pretvaračima REMP

1. Ispravljač sa jednom diodom (jedna je dovoljna za najprostiji AC/DC)

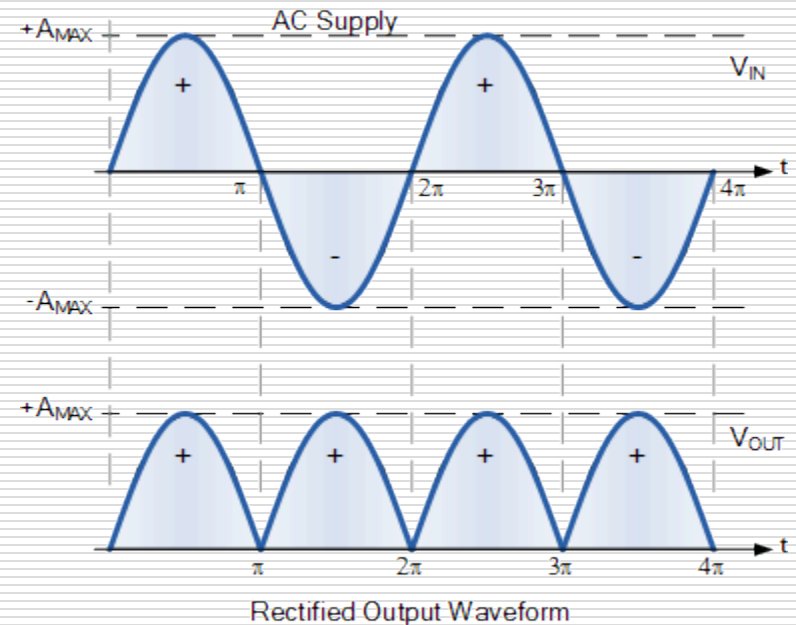
- Prosto (+)
- Velika talasnost napona(-)



2. Ispravljač sa četiri diode (Grecov spoj)



- + perioda AC napona vode D_1 i D_4
- perioda AC napona vode D_2 i D_3



Upravljive poluprovodničke komponente

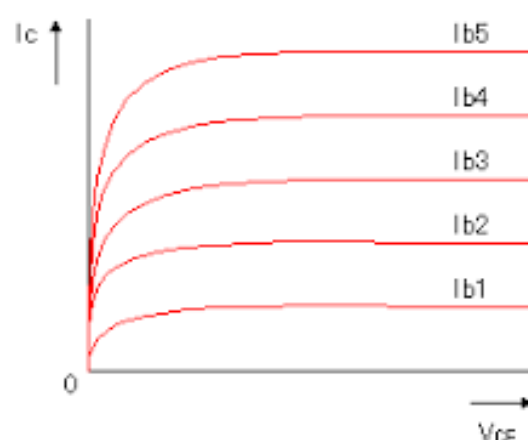
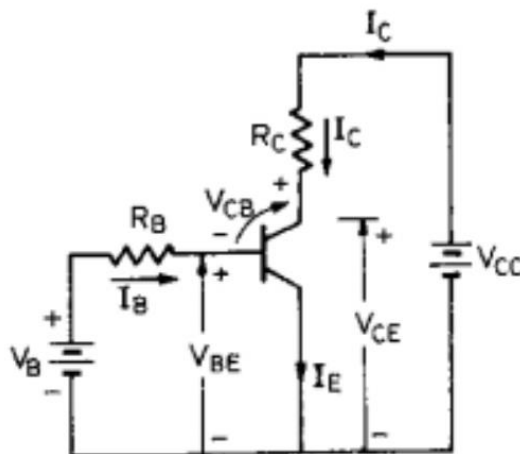
U REMP se UVEK KORISTI NEKI UPRAVLJIVI POLUPROVODNIČKI PREKIDAČ

Tranzistor (Bipolar Junction Transistor)

Struja kolektora zavisi od bazne struje

$$I_C = \beta \cdot I_B$$

$$\beta \gg 1 \quad (100, 1000 \dots)$$

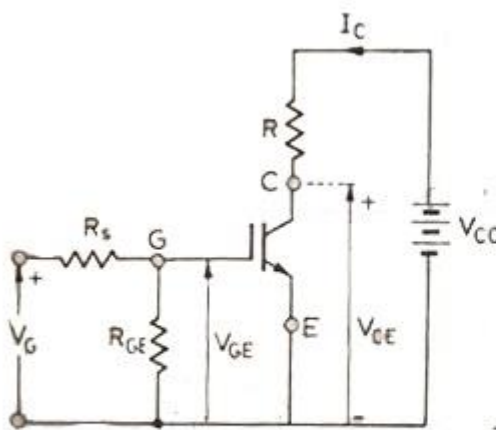


$$I_{B1} < I_{B2} < I_{B3} < I_{B4} < I_{B5}$$

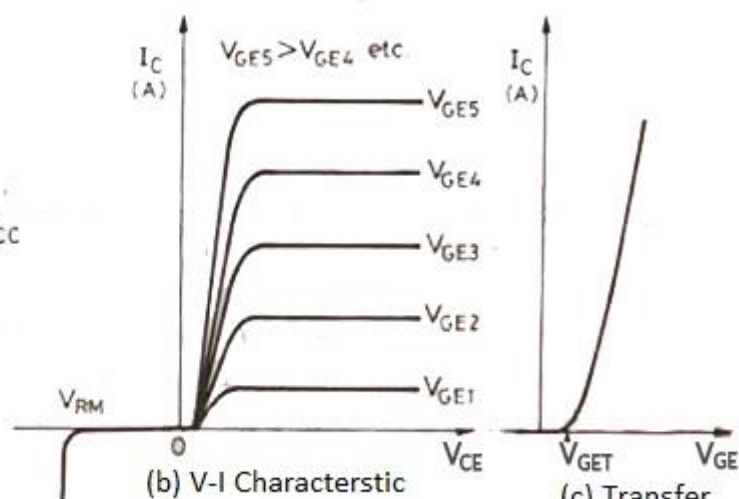
IGBT (insulated-gate bipolar transistor)

Struja emitera zavisi od napona gejta

$$I_C = k \cdot V_{GE}$$



(a) Circuit Diagram



(c) Transfer Characteristic

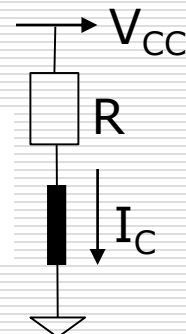
Tranzistor se u REMP koristi samo kao prekidač

TON stanje, tačka A

Dovoljno velika bazna struja uvodi tranzistor u saturaciju (TON). Bez obzira na stanje u kolu napon je blizak nuli, a struja zavisi od stanja u el. kola.

$$V_{CE} \approx 0$$

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R} \approx \frac{V_{CC}}{R}$$

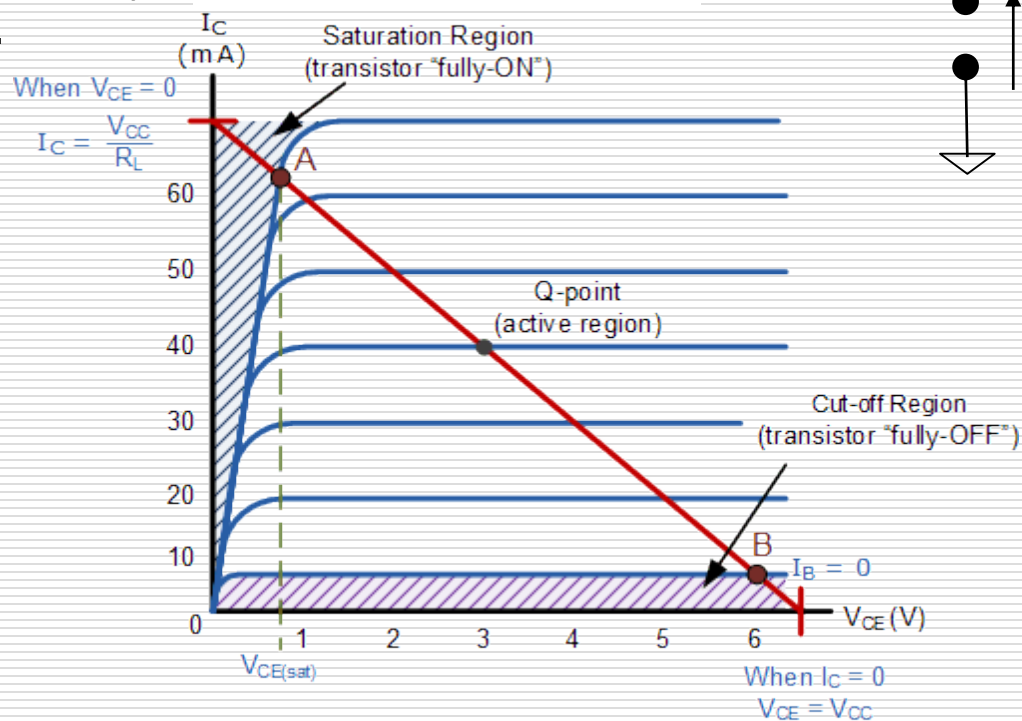
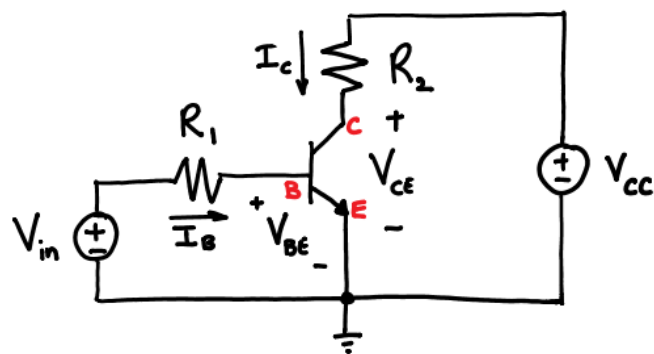
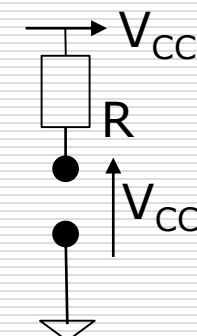


TOFF stanje, tačka B

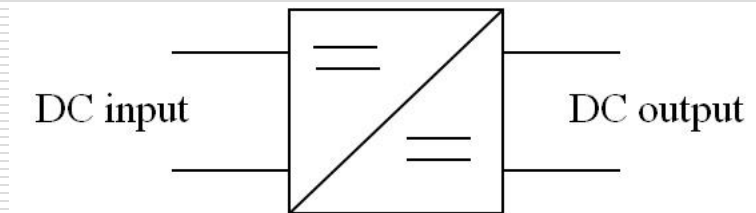
Ako mu se ukinе struja baze, tranzistor se isključuje (TOFF). Struja postaje nula, a napon zavisi od stanja u el. kolu.

$$V_{CE} \approx V_{CC}$$

$$I_C = 0$$

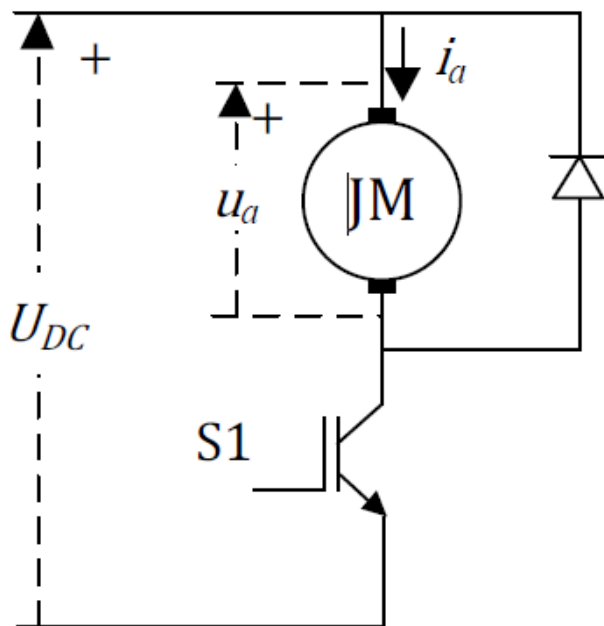


3. Prekidački izvori jednosmernog napona – primer DC/DC pretvarača (čoperi)

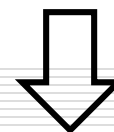
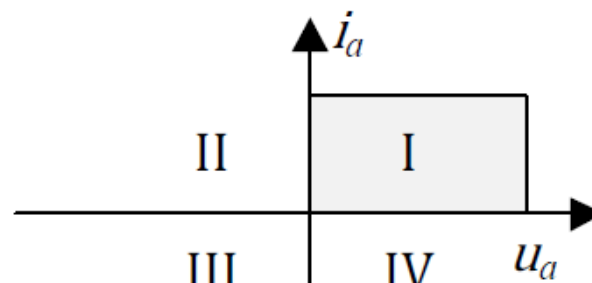


- Prost pretvarač dat kao primer u ovoj prezentaciji

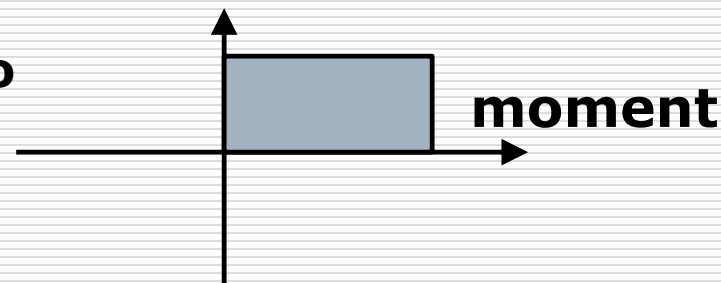
3.1 Jednokvadrantni čoper



Najprostije moguće za početak!



brzina



- ☐ Samo jedan prekidački element
- ☐ Radi u prekidačkom režimu
- ☐ Pretvarač je prost ali podržava samo jedan smer napona i struje
- ☐ samim tim i samo jedan kvadrant motorski režim i jedan smer brzine!

Od primene pogona zavisi tip pretvarača

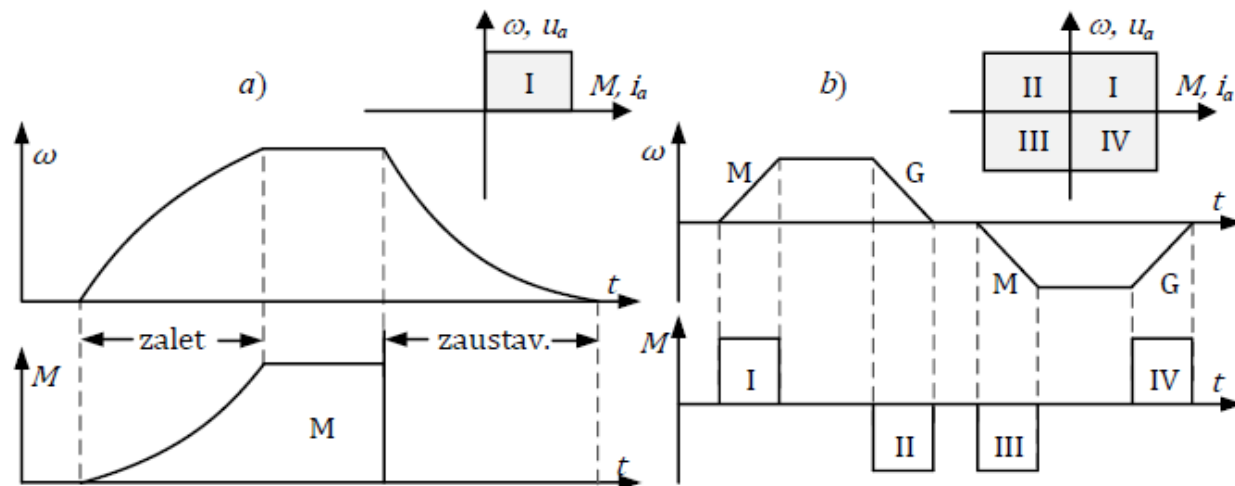
- U koliko kvadranta želimo pogon da radi

Ventilator samo
motorski režim i
samo jedan smer !

Servi pogon oba smera
i pored motorskog i
generatorskim režim
rada

$$P_{el} \approx u i$$

$$P_{meh} \approx m \omega_r$$



Sl. 2.15. Promena brzine i momenta kod: a) pogona ventilatora i b) pozicionog servopogona

Ako hoćemo dva smera brzine mora
napon da menja znak

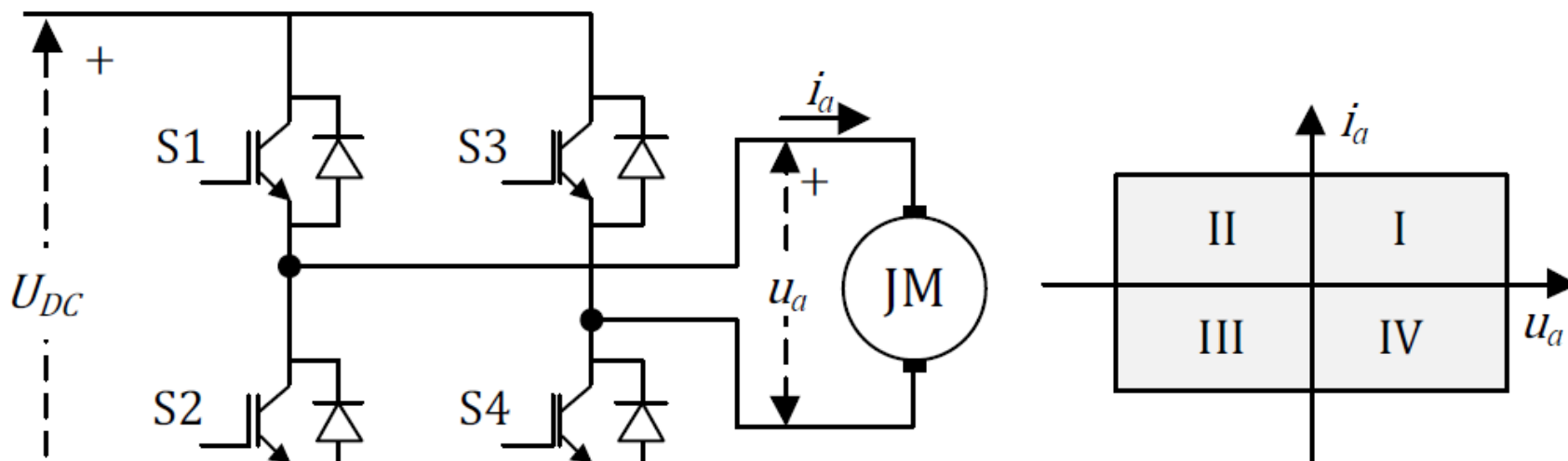
$$u \approx \Psi \omega_r$$

Ako hoćemo dva smera momenta
(snage) mora struja da menja znak

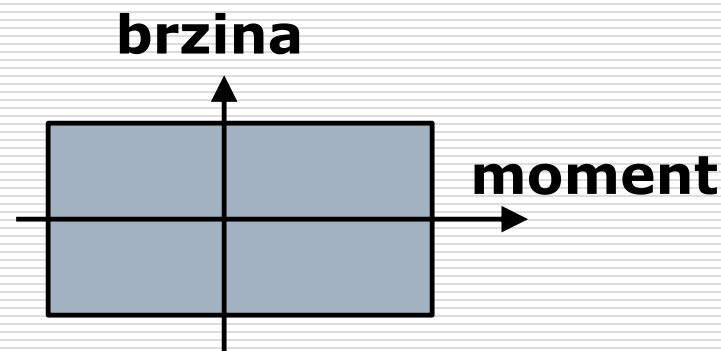
$$m \approx \Psi i$$

brzina			
2	3	1	4
		moment	
2	$\omega > 0$ pozitivan smer $M < 0$ pozitivan moment $P < 0$ generatorski režim Uzima energiju sa vratilu i usporava ga	$\omega > 0$ pozitivan smer $M > 0$ pozitivan moment $P > 0$ motorski režim Predaje energiju vratilu i ubrzava ga u pozitivnom smeru	1
	$\omega < 0$ negativan smer $M < 0$ negativan moment $P > 0$ motorski režim Predaje energiju vratilu i ubrzava u negativnom smeru	$\omega < 0$ negativan smer $M > 0$ pozitivan moment $P > 0$ generatorski režim Uzima energiju sa vratilu i usporava ga	4

3.2 Četvorokvadrantni čoper (H - bridge)

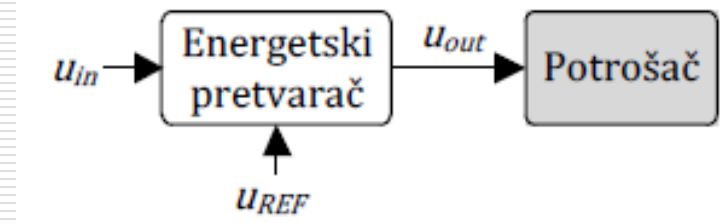


- ❑ Četiri prekidačka elementa
- ❑ Prekidači režim
- ❑ Uvek radi jedan par: ili $S1$ i $S4$, ili $S2$ i $S3$
- ❑ Može i negativan napon/struja
- ❑ Četiri kvadranta – motorski/gen. režim i dva smer!



4. Kako se upravlja prekidačima u REMP?

Cilj: Ostvariti promenljiv napon na izlazu pretvarača ($u_{out} = u_{REF}$)?

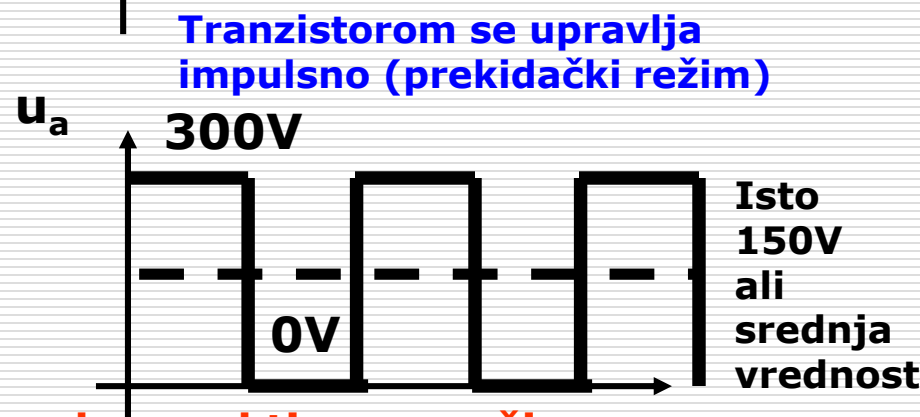
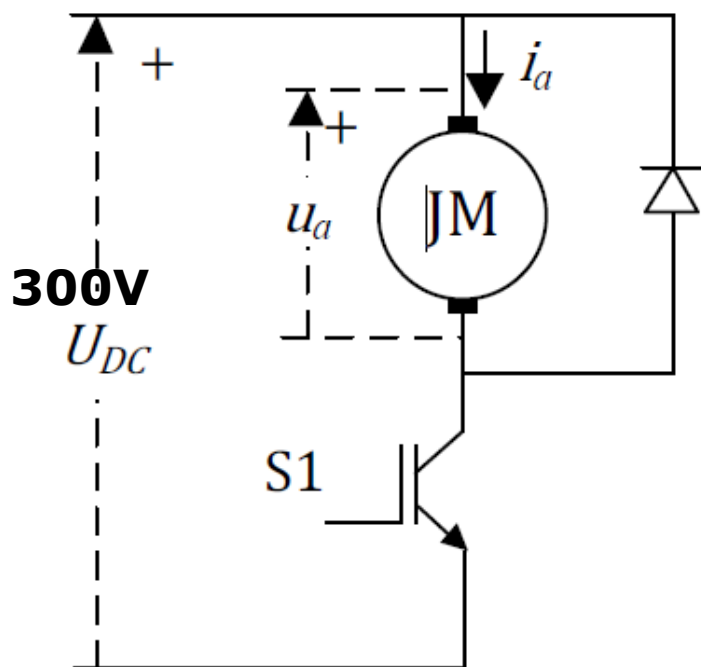


Rešenje,

- Impulsno upravljanje (manji gubici)
- Promenom širine impulsa se menja srednja vrednost napona (PWM – Pulse Width Modulation)

Princip rada prekidačkog DC/DC konvertora

Primer: 300V na ulazu, želimo 150V na izlazu, kako ?



Rešenje 1 Tranzistor koji radi kontinualno u aktivnom režimu

karacterišu veliki gubici na prekidaču $P_g = U \cdot I$ (u datom primeru $U_{s1} = 150V$, za npr, $i_a = 10A$ imamo ogromnih $P_g = 1500W$ na tranzistoru) .. NE NE NE

Resenje 2 Tranzistor koji radi u prekidačkom režimu

karacterišu najmanji mogući gubici DA DA DA !!!!!

$$P_g = U \cdot I \approx 0$$

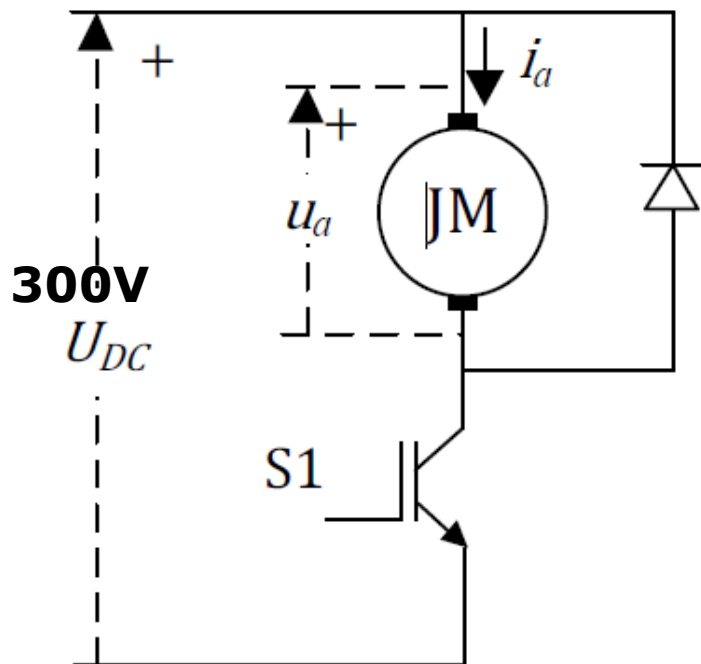
U stacionarnom stanju je uvek neko blizak nuli, ili napon ili struja

Kada tranzistor vodi skoro da nema napon $P_g = 0 \cdot I$ (u praksi, $1V \cdot 10A = 10W$),

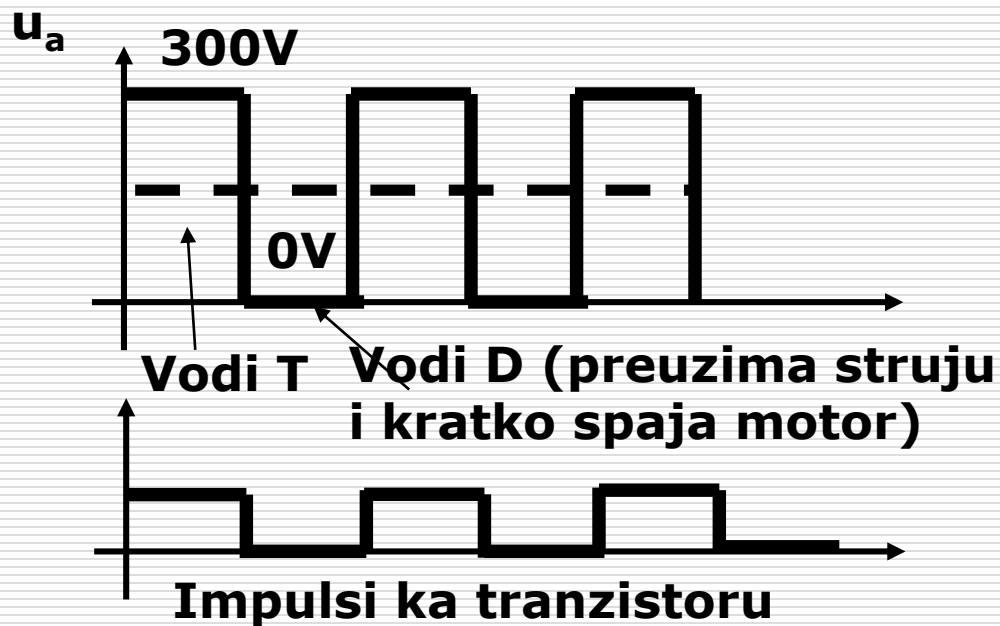
Kada tranzistor NE vodi, nema struju $P_g = V \cdot 0$ (u praksi $0W$)

Princip rada prekidačkog DC/DC konvertora

Primer: 300V na ulazu, želimo 150V na izlazu, kako ?



Tranzistorom se upravlja impulsno (prekidački režim)



Resenje 2 Tranzistor koji radi u prekidačkom režimu

karakterišu najmanji mogući gubici

$$P_g = U \cdot I \approx 0$$

U stacionarnom stanju je uvek neko blizak nuli, ili napon ili struja

Kada tranzistor vodi skoro da nema napon $P_g = 0 \cdot I$ (u praksi, $1V \cdot 10A = 10W$),

Kada tranzistor NE vodi, nema struju $P_g = V \cdot 0$ (u praksi $0W$)

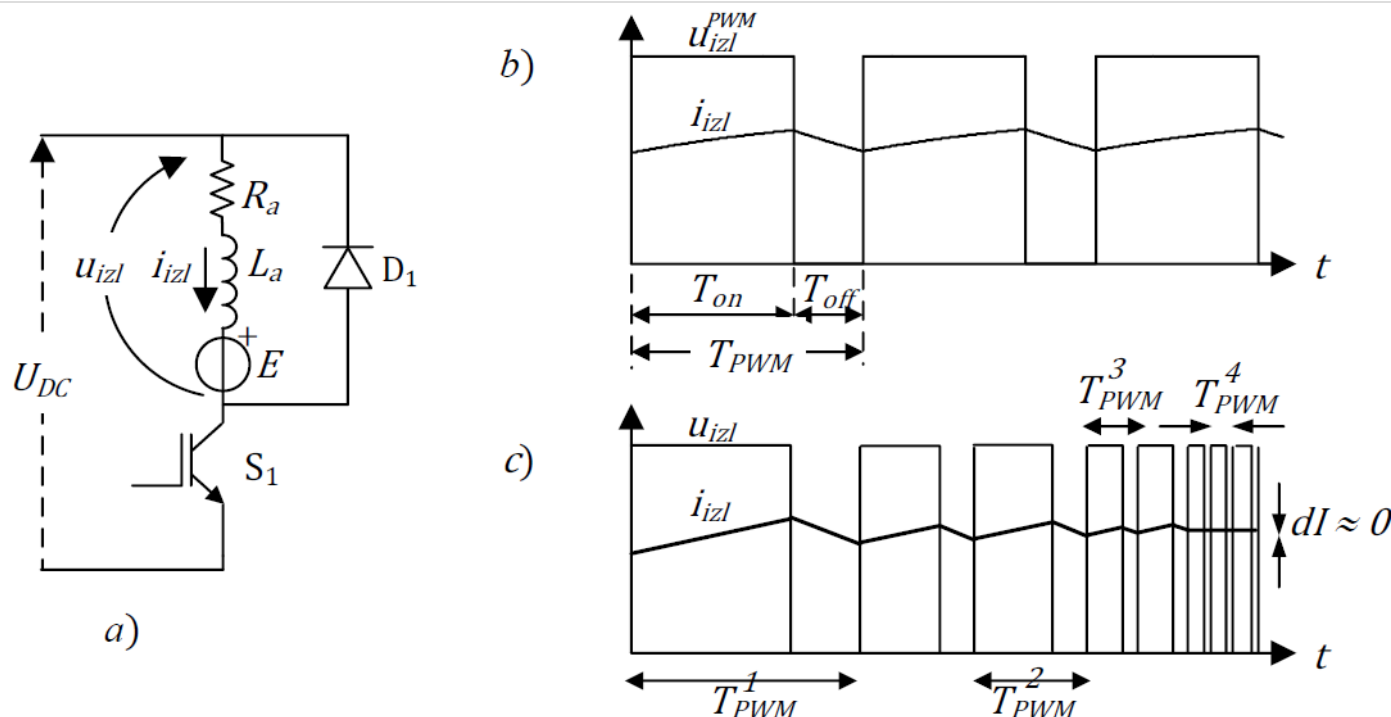
Princip rada prekidačkog DC/DC konvertora

MANA IMPULSNOG UPRAVLJANJA je IMPULSNI NAPON.

Ali, potrošač RL tipa (**većina jeste**) filtrira taj napon i dobijamo približno konst. struju pa impulsni napon uglavnom ne smeta.

Jedino je važno imati dovoljno veliku PWM frekvenciju (kratku PWM periodu). $L_a/R_a \gg T_{pwm}$

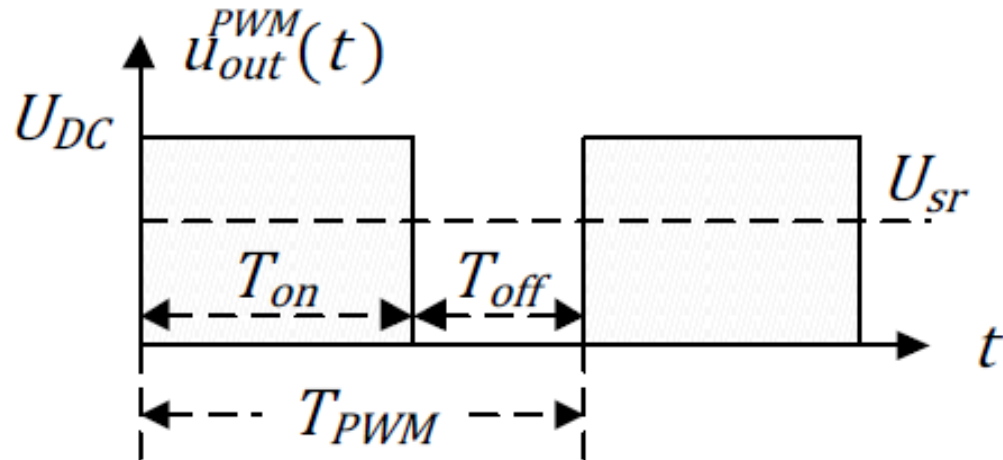
Tada i pored prekidačkog napona izlazna struja neće imati značajnu spektralnu komponentu na prekidačkoj učestanosti.



Što manje talasnosti struje manja je i talasnost momenta!

Princip rada prekidačkog DC/DC konvertora

Talasni oblik napona na izlazu 1kv čoper



T_{pwm} -PWM perioda
 T_{on} -vreme uključenja
 T_{off} -vreme isključenja
 $U_{out}(t)$ -trenutna vrednost napona
 U_{sr} -srednja vrednost napona

Srednja vrednost izlaznog napona 1kv čopera

$$U_{sr} = \frac{1}{T_{PWM}} \int_0^{T_{PWM}} u_{out}^{PWM}(t) dt = \frac{1}{T_{PWM}} \int_0^{T_{on}} U_{DC} dt + \frac{1}{T_{PWM}} \int_{T_{on}}^{T_{PWM}} 0 \cdot dt,$$

$$U_{sr} = \frac{T_{on}}{T_{PWM}} U_{DC} = a \cdot U_{DC}$$

a - faktor ispune (0,1)

$a=0 \rightarrow u=0$

$a=1 \rightarrow u=U_{dc}$

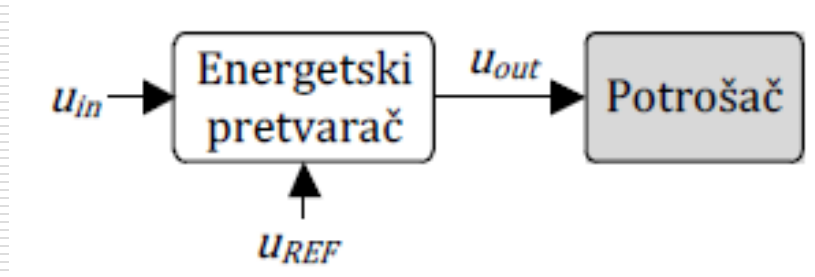
Promenom faktora ispune možemo da menjamo srednju vrednost izlaznog napona!!!!

**5. Kako se naponskim pretvaračem
dobije željeni napon na izlazu a
kako željena struja ?**

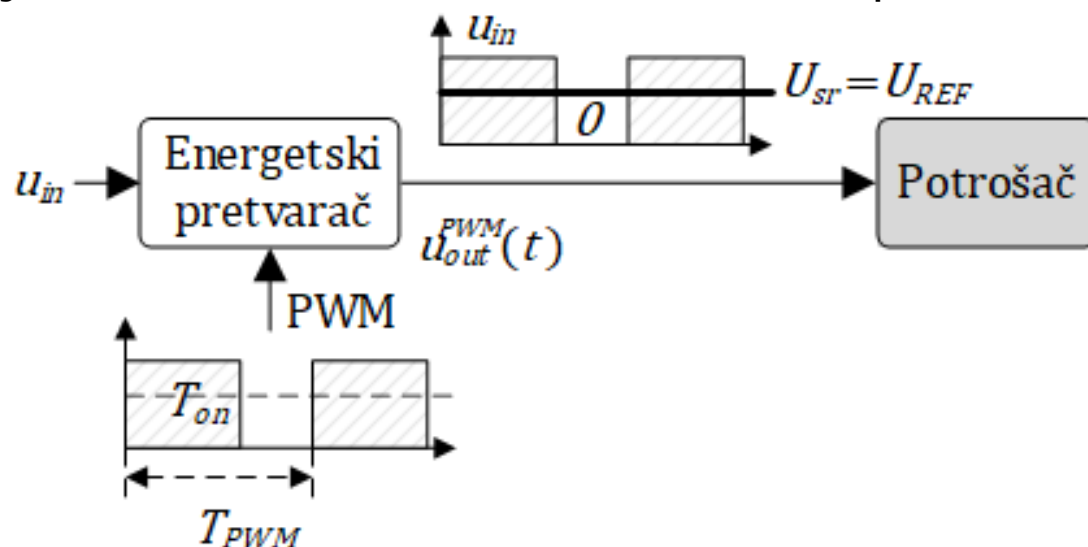
5.1. Pretvarač kao naponski izvor

Pretvarači energetske elektronike vrše pretvaranje električne energije iz jednog oblika u drugi. Krajnji cilj je da se dobiju izlazni napon i/ili struja odgovarajućeg oblika i parametara.

Pretvarača neko mora da zada referentni napon $U_{izl}=U_{REF}$



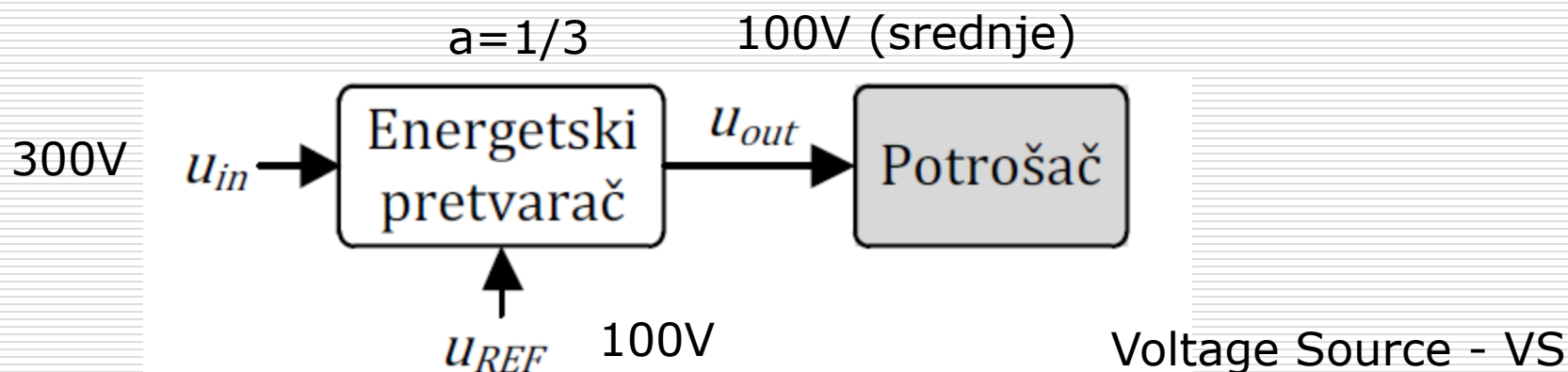
U praksi, **pretvaraču se šalju komandni impulse** za sve njegove pretvarače kojima će on da ostvariti referentni napon



5.1. Pretvarač kao naponski izvor

- ❑ Većina impulsnih pretvarača su naponski izvori
- ❑ Trenutna vrednost njihovog izlaznog napona je ili V_{dc} ili 0
- ❑ Struja se ne kontroliše, ona zavisi od potrošača, i sa vremenskom konstantom L/R teži vrednosti V_{dc}/R ili 0
- ❑ Srednja vrednost izlaznog napona se može kontrolisati promenom faktora ispunje
- ❑ Reguliše se SREDNJA vrednost napona na izlazu u jednoj PWM periodi
- ❑ Ako je na ulazu napon U_{in} , a željeni napon U_{ref} , da bi $U_{out}=U_{ref}$ za faktor ispunje se dobija m

$$\text{faktor_ispune} = U_{ref}/U_{in}$$



5.2 Pretvarač kao strujni izvor

Po potrebi, na izlazu pretvarača je moguće regulisati struju, a ne napon. Koja je to potreba, pa, sve veća:

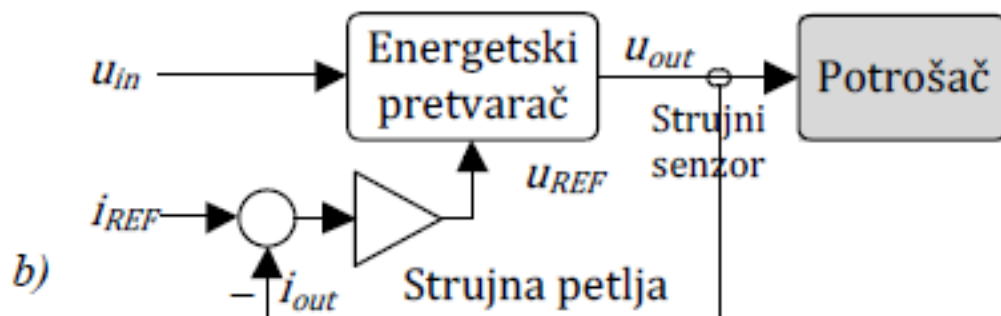
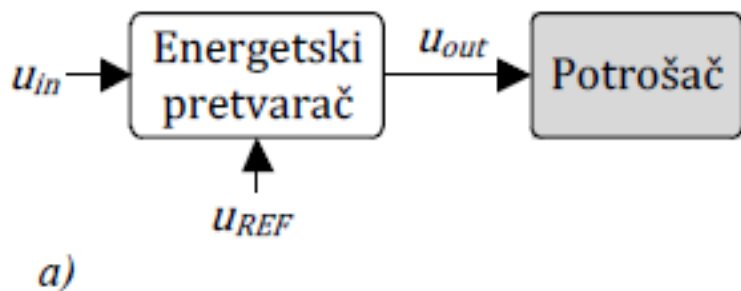
1. U REMP treba struja, a ne napon
2. Za LED treba struja, ne napon
3. Svi pretvarači u mrežu utiskuju struju, a ne napon

$$m_{el} = \Psi \cdot i$$

Pošto su strujni izvori nepraktični, željena izlazna struja se takođe ostvaruje naponskim izvorom, ali strujno regulisanim. Strujno regulisan naponski izvor zadaje napon koji je potreban da se ukine greška između zadate i merene izlazne struje.

$$U_{izl} = U_{REF}$$

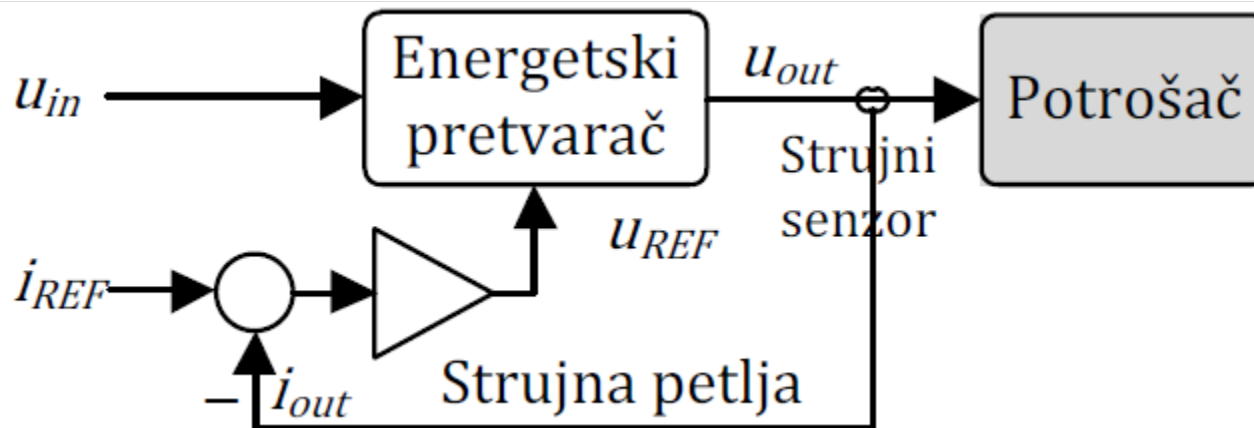
$$I_{izl} = I_{REF}$$



Slika 4.1. Energetski pretvarač kao a) naponski izvor, b) strujno regulisani naponski izvor

5.2. Strujno regulisani naponski izvor

- ❑ Na izlazu naponskog pretvarača je moguće regulisati struju.
- ❑ Potreba za tim je velika , kao prvi primer moment JMS je proporcionalan struji armature, a ne naponu
- ❑ Pošto su strujni izvori nepraktični, željena izlazna struja se takođe ostvaruje naponskim izvorom, ali strujno regulisanim
- ❑ Na izlazu se meri struja i poredi sa referentnom.
- ❑ Razlika se uvodi u regulator struje
- ❑ Regulator struje menja referentni napon tako da se izlazna struja izjednači sa željenom
- ❑ Ref. napon se dobija na isti način kao i kod naponskog izvora



Current Regulated Voltage Source - CRVS

Razlike između izvora napona i struje

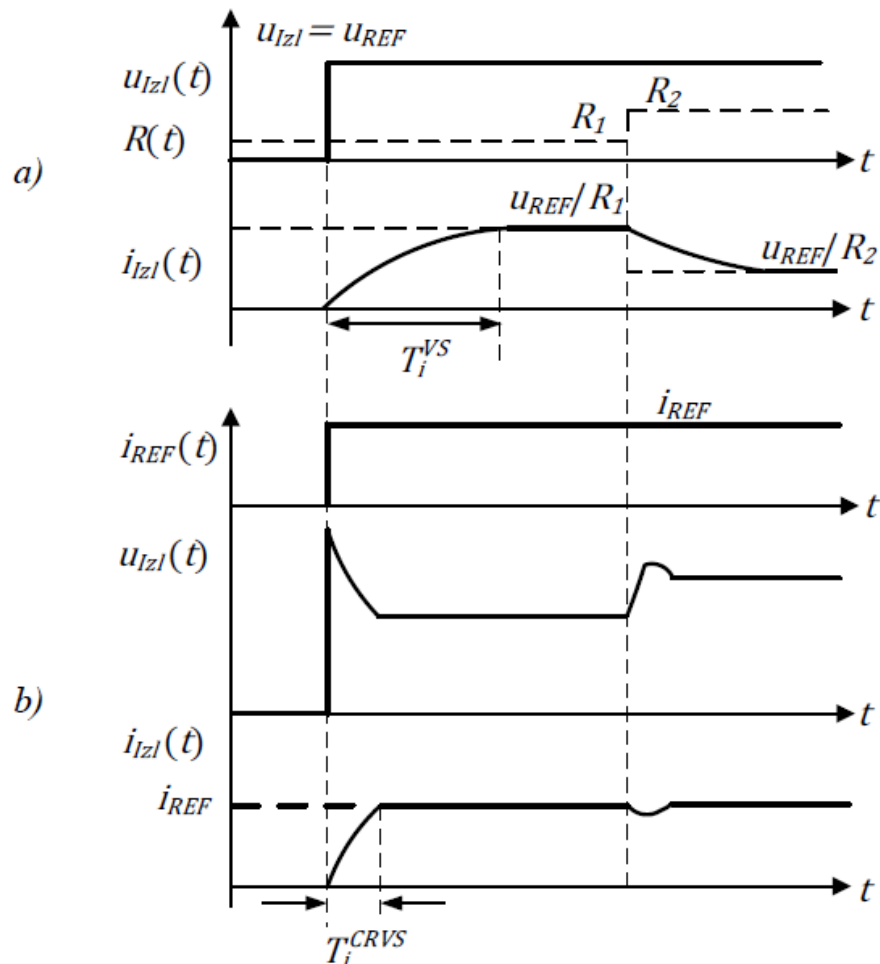
Ako je cilj $I = I_{ref}$, CRVS je jedino rešenje

1. Brža dinamika CRVS

- struja VS se sporo uspostavlja, zavisi od L/R
- Regulator CRVS poništi taj pol i ubrza sistem

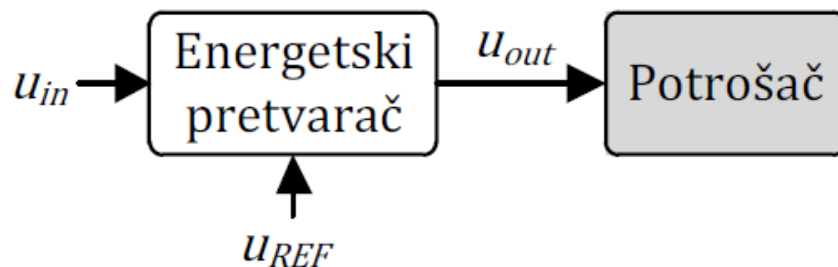
2. Greška stac. Stanja

- Struja VS se menja sa promenom R
- Struja VS se kod REMP menja i sa promenom EMS



Sl. 1.74. Karakteristični oblici izlaznih napona i struja za: a) VS izvor, b) CRVS izvor

2.3. Primer naponskog izvora sa 1kv DC/DC



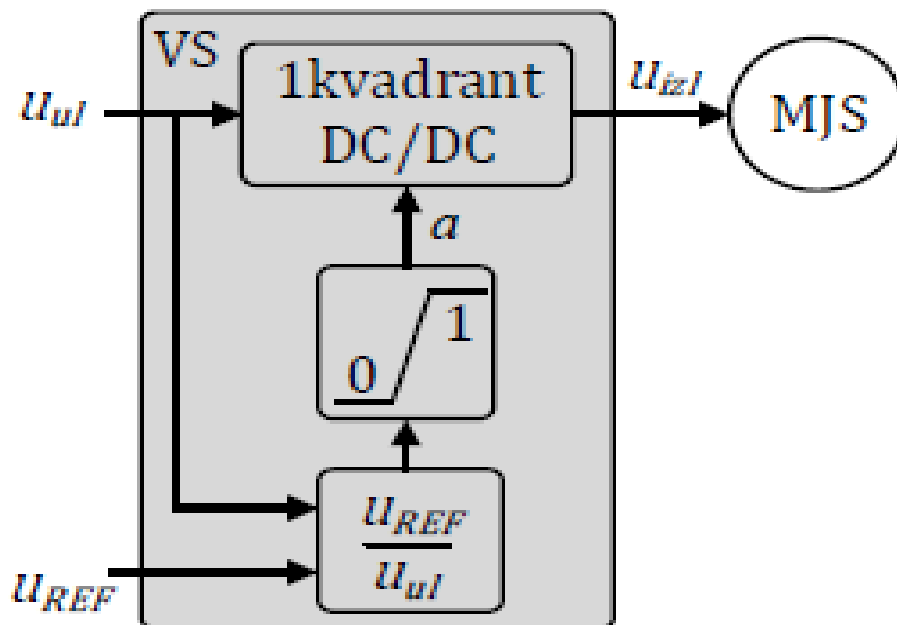
Pošto važi $\longrightarrow U_{izl}^{sr} = u_{REF} \wedge U_{izl}^{sr} = a u_{ul} \rightarrow a = \frac{u_{REF}}{u_{ul}}$

Realizacija:

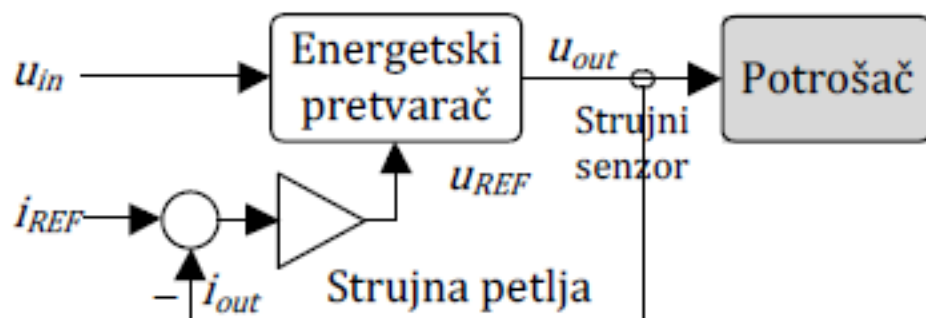
- ❑ Uzeti referentnu vrednost izlaza u_{REF}
- ❑ Meriti ulazni napon u_{ul}
- ❑ Izračunati potreban faktor ispune

$$a = \frac{u_{REF}}{u_{ul}}$$

- ❑ Ograničiti a na 0-1



2.3. Primer strujnog izvora sa 1kv DC/DC



$$a = \frac{U_{REF}}{U_{ul}}$$

Realizacija:

- ❑ Uzeti referentnu vrednost izlazne struje I_{REF}
- ❑ Meriti izlaznu struju I_{iz}
- ❑ PI regulatorom menjati napon U_{REF}
- ❑ Naponski izvor prima U_{REF} i radi kao što je već opisano

