

VISOKA ŠKOLA ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA STRUKOVNIH STUDIJA-
VIŠER, BEOGRAD

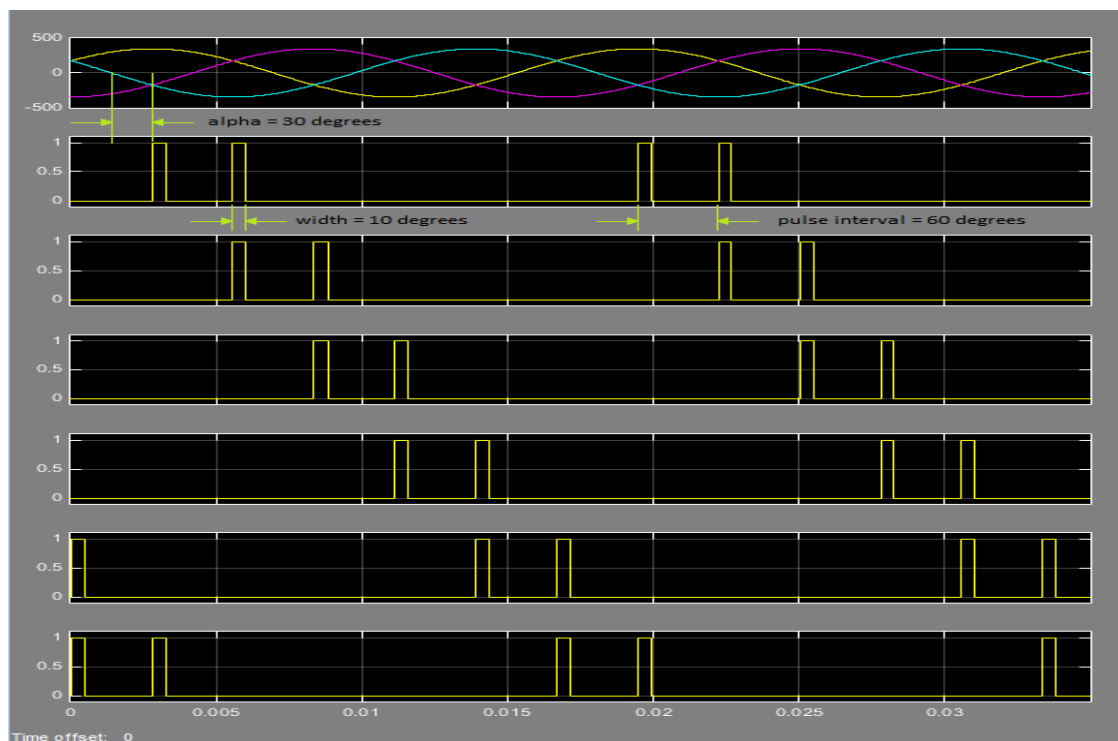
STUDIJSKI PROGRAM: Elektrotehničko inženjerstvo

MASTER STUDIJE 2017/2018

PREDMET : PROJEKTOVANJE ELEKTROENERGETSKIH PRETVARAČA



KOMUTACIJA STRUJE U TIRISTORSKIM ISPRAVLJAČIMA



Predmetni profesor: Dr Željko Despotović, dipl.el.inž.

UVOD

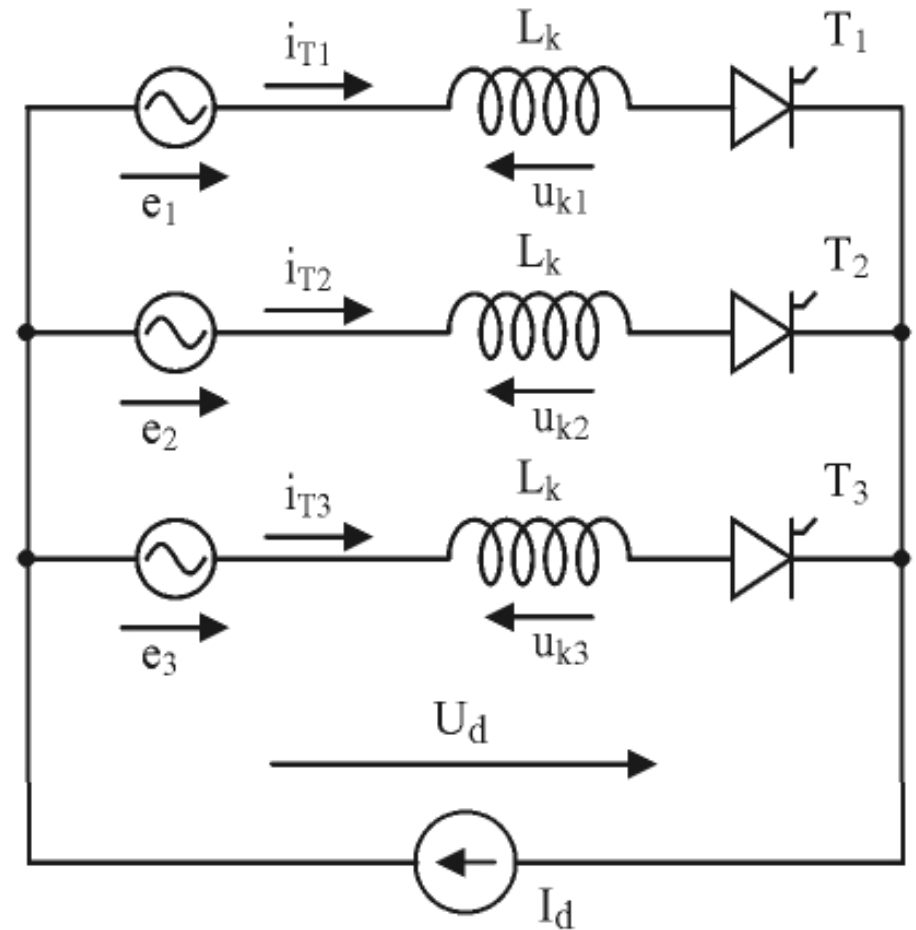
Pretvarači sa prirodnom komutacijom

Osnovne karakteristike:

- Struja sa jednog tiristora prelazi na drugi, zahvaljujući promenama faznih napona na ulazu
- Ulazni transformator je trofazni i njegov sekundar je obično spregnut u „zvezdu”
- Tipična primena ispravljača sa malim vrednostima izlaznog jednosmernog napona (obično do 50 ili 100V) i relativno velikim izlaznim strujama (par stotina ampere i više) su pogoni elektrolize, galvanizacije, punjenje trakcionih akumulatora i sl.
- Povoljno je što struja uvek teče samo kroz jedan tiristor
- Na strani potrošača obično postoji velika induktivnost L koja smanjuje valovitost struje potrošača (ako ne postoji često se i dodaje),
- Ako je L toliko velika da je struja potrošača neprekidna i sa malom talasnošću, onda se grana sa induktivnošću L i potrošačem može predstaviti kao strujni ponor.
- Prethodna pretpostavka je veoma bitna za analizu procesa komutacije između tiristora u regulisanom ispravljaču

KOMUTACIJA STRUJE –pretpostavke

- Struja potrošača je konstantna
- Padovi napona na tiristorima koji komutuju su zanemarljivi
- Padovi napona na spojevima se zanemaruju
- Sprega sekundara transformatora je “zvezda”
- Ulazni fazni naponi $e_1 \dots e_3$ su sinusni i simetrični
- L_k je ustvari zbir ekvivalentne rasipna induktivnost transformatora i reaktanse kratkog spoja mreže.



Ekvivalentna šema za proučavanje procesa komutacije

ANALIZA PROCESA KOMUTACIJE

Posmatrajmo prvu granu ovog ispravljača (prethodni slajd).

Neposredno pre početka komutacije biće:

$$i_{1(0)} = I \quad i_{2(0)} = 0$$

Tiristor T2 ne može da se upali sve dok je $e_2 < e_1$ (jer nije direktno polarisan)

Dok vodi T1 biće: $u_L = e_1$

$$I = \text{const} \Rightarrow L_k \frac{dI}{dt} = 0$$

Kada postane $e_1 = e_2$, stekli su se uslovi da T2 može da provede, pod uslovom da dobije pobudni impuls na gejt. Za to vreme još uvek vodi T1. Kada T2 dobije impuls na gejt on počinje da provodi, a T1 prestaje da vodi. U ovom intervalu komutacije vode oba tiristora i izvori e_1 i e_2 su kratko spojeni preko komutacionih induktivnosti L_k . Ove induktivnosti sprečavaju nagle promene struje.

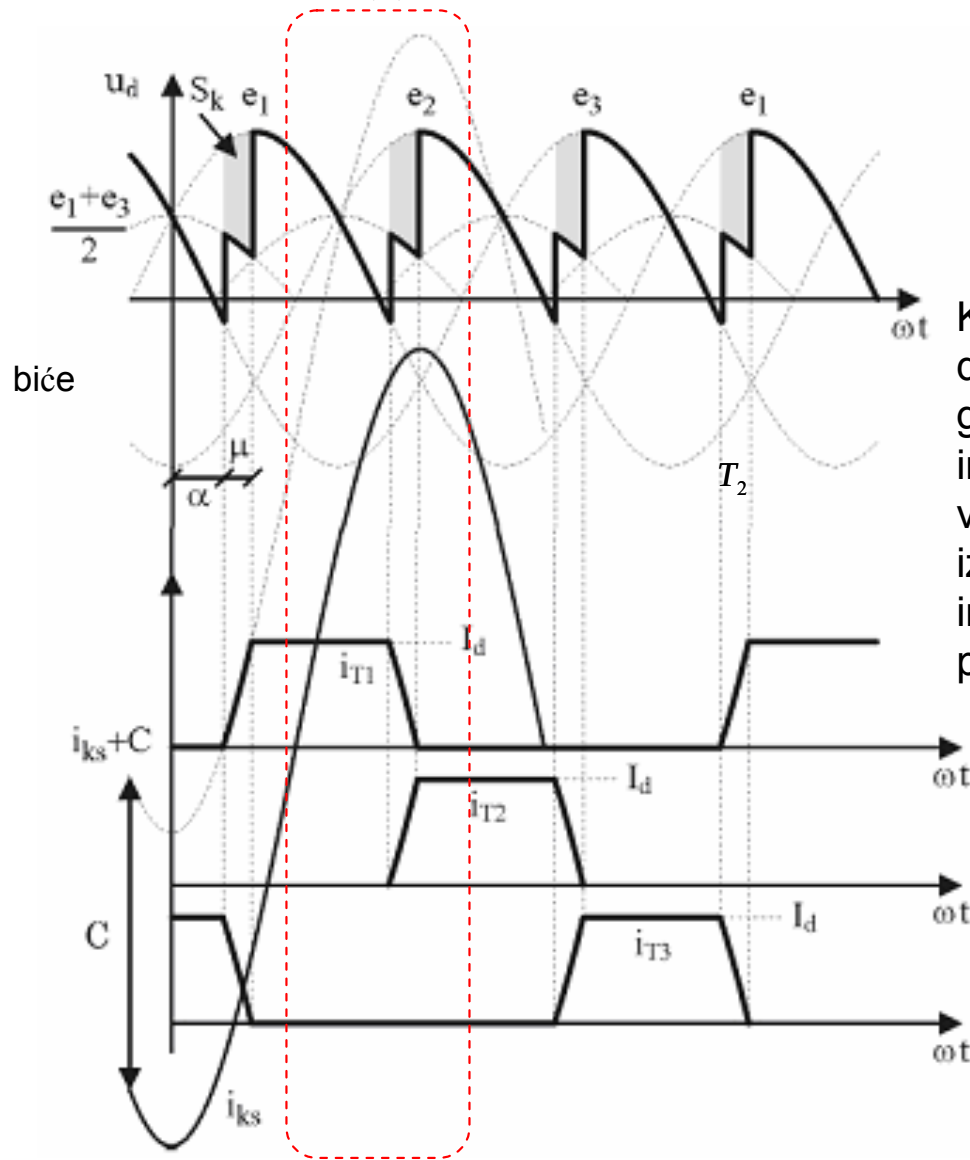
α - ugao paljenja (regulacije)

μ - ugao komutacije

$$i_1 + i_2 = I \quad \text{I. Kirhofov zakon}$$

$$e_1 - L_k \frac{di_1}{dt} - u_L = 0 \quad \text{II. Kirhofov zakon}$$

$$e_2 - L_k \frac{di_2}{dt} - u_L = 0 \quad \text{II. Kirhofov zakon}$$



$$\begin{aligned}
 e_1 - L_k \frac{di_1}{dt} - u_L &= 0 \\
 + \\
 e_2 - L_k \frac{di_2}{dt} - u_L &= 0
 \end{aligned}$$

← $i_1 + i_2 = I = \text{const.}$

$$u_L = \frac{e_1 + e_2}{2}$$

• Za vreme trajanja komutacije izlazni napon ispravljača jednak je aritmetičkoj sredini faznih napona faza koje komutuju.

• To je posledica kratkog spoja komutujućih faza.

Koliko traje komutacija?

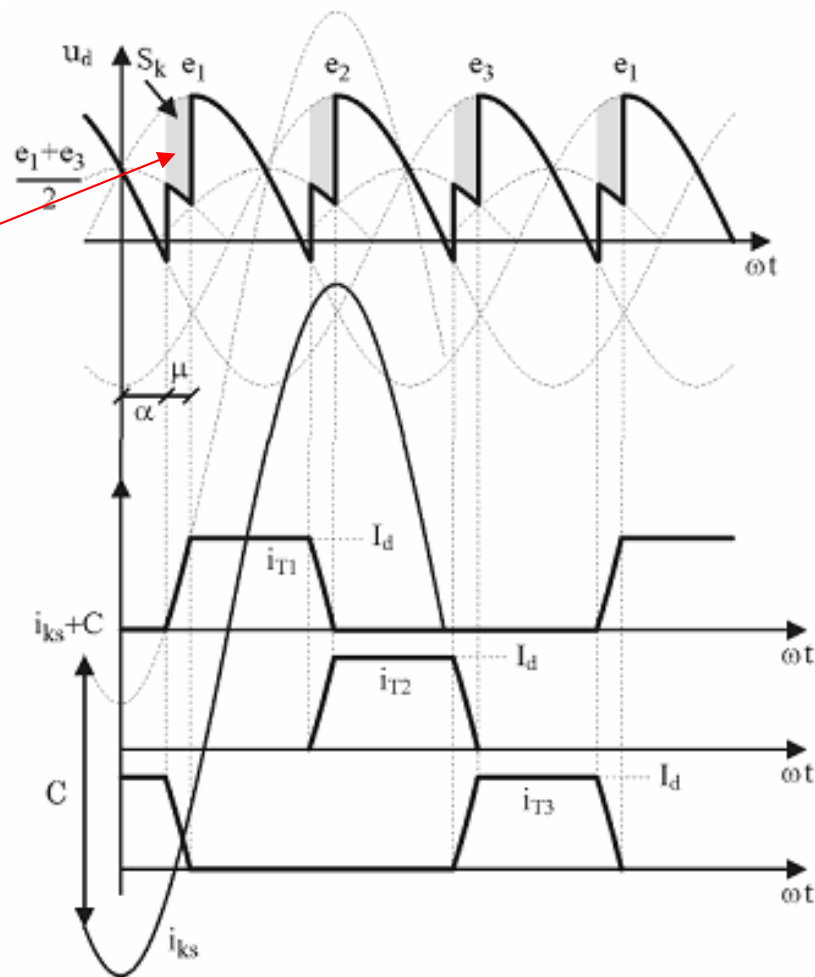
Pomoću sledećeg izraza se može odrediti koliko traje komutacija:

$$L_k I = \int_0^{\frac{\mu}{\omega}} \frac{e_2 - e_1}{2} dt$$

Pošto je:
$$e_2 - \frac{e_1 + e_2}{2} = \frac{e_2 - e_1}{2}$$

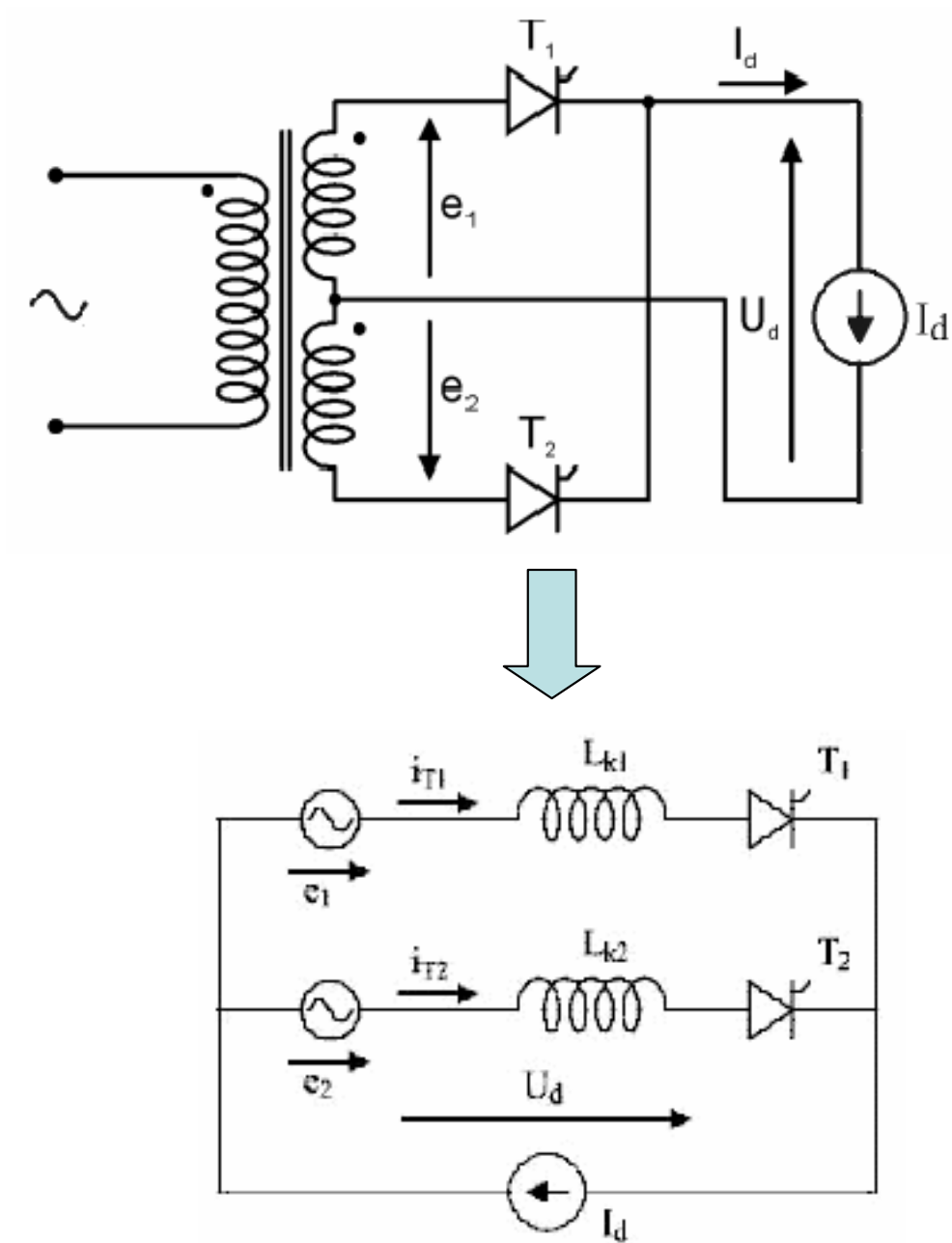
onda je osenčena površina S_k nedostajućeg napona iznad zuba na talasnom obliku napona jednaka:

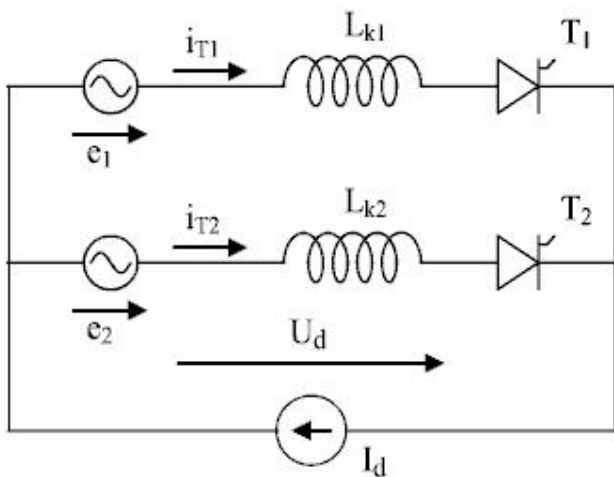
$$\int_0^{\frac{\mu}{\omega}} \frac{e_2 - e_1}{2} dt = L_k I$$



Iz ovoga sledi vrlo važan zaključak: “izgubljene” volt-sekunde gase struju kroz rasipnu induktivnost L_k !!!!

PRIMER 1: Monofazni ispravljač sa srednjom tačkom(spoj M2)



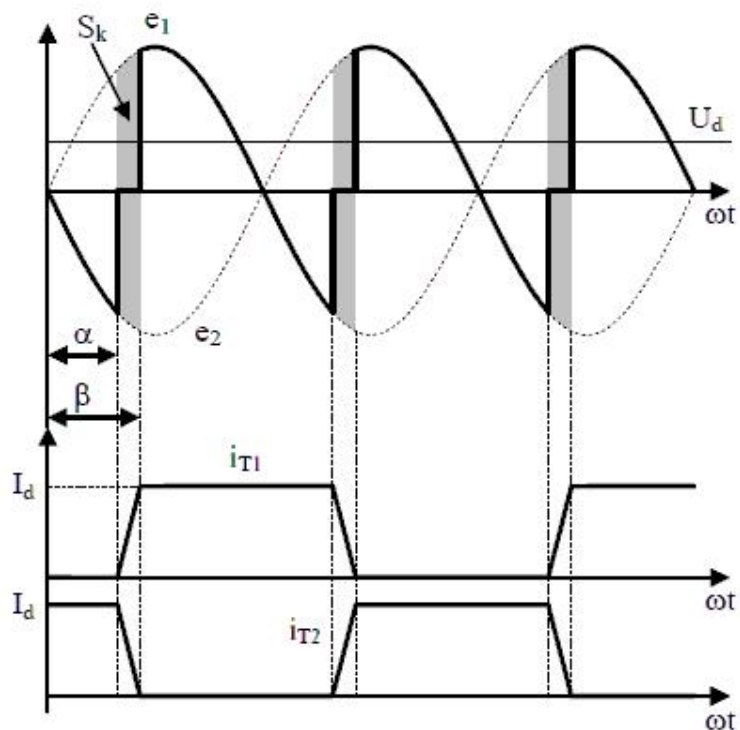


Naponi e_1 i e_2 iste amplitude, a fazno pomereni za 180° .

$$u_L = \frac{e_1 + e_2}{2} = 0$$

Srednja vrednost napona na opterećenju je:

$$U_{AV} = \frac{1}{T} \left\{ \int_{\frac{\alpha}{\omega}}^{\frac{T}{2} + \frac{\alpha}{\omega}} \sqrt{2} E \sin \omega t dt - L_k I \right\}$$



Ekvivalentna šema za analizu rada ispravljača u spoju M2 i karakteristični talasni oblici

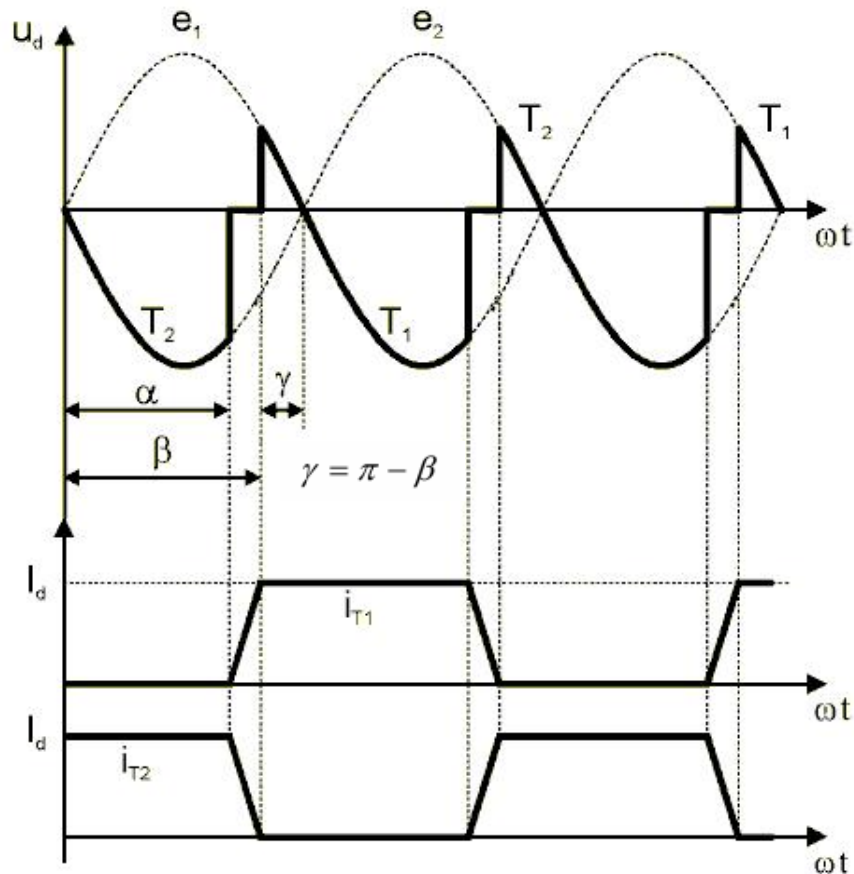
$$U_{AV} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} E \cos \alpha - \frac{X_k}{\pi} I$$

pad napona na ispravljaču

E- efektivna vrednost faznog napona
 $X_k = \omega L_k$ -reaktansa rasipanja

Invertorski limit?

$$90^\circ < \alpha_{\max} < 180^\circ$$



t_o - vreme odmaranja tiristora

$$\omega t_o = \gamma$$

kataloški podatak za tiristor
vreme odmaranja tiristora

U ovom slučaju mora biti ispunjen uslov da je $t_o > t_q$ da ispravljač nebi ušao u ponovno nekontrolisano vođenje i kratak spoj.

- Pri uglovima paljenja većim od 90° (ako je potrošač strujni ponor) srednja vrednost napona U_{AV} biće negativna.
- To znači da mrežom komutovani pretvarač (u spoju M2) radi u invertorskom režimu rada i vraća energiju sa jednosmerne strane u napojnu mrežu.
- Pri tome postoji maksimalni ugao paljenja $\alpha_{\max}$ koji se može primeniti u invertorskom režimu rada, a da pretvarač ne uđe u trajni kratak spoj:

Određivanje ugla komutacije i vremena odmaranja (spoj M2)

$$\alpha_{\max} + \mu + \omega t_o < 180^\circ$$

$$L_k I = \frac{\sqrt{2}E}{\omega} \left\{ \cos \alpha - \cos(\alpha + \mu) \right\}$$

$$\frac{\omega \cdot L_k}{\sqrt{2}E} \cdot I = \cos \alpha - \cos(\alpha + \mu)$$

Efektivna vrednost struje transformatora (spoj M2)

Efektivna vrednost struje kroz fazni namotaj sekundara

$$I_{T1RMS} = I''_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot I_d^2 \cdot \frac{T}{2}} \Rightarrow I''_{RMS} = \frac{I_d}{\sqrt{2}}$$

Tipska snaga transformatora

$$P_T = (P' + P'') / 2 = P_d \pi \frac{1 + \sqrt{2}}{4\sqrt{2}} \approx 1.34 \cdot E \cdot I_d = 1.34 P_d$$

Zaključuje se da je tipska snaga transformatora veća od jednosmerne snage na izlazu ispravljača!!!

Iz ovog razloga su ispravljački transformatori u određenom procentu predimensionisani

Pri tome su učinjene dve važne pretpostavke: struje opterećenja je konstantna, a da napon napajanja ima stalnu efektivnu vrednost

Reaktivna snaga uzeta iz mreže u vezi sa uglom regulacije (spoj M2)

- Naponski i strujni talas prolazi kroz 0 u istim tackama.
- Pošto je oblik strujnog talasa pravougaoni i simetričan, kažemo da su napon i struja u fazi (strogo govoreći, u fazi su napon i prvi harmonik struje).
- Pri uglu paljenja $\alpha=90^\circ$ talasni oblik primarne struje kasni za 90° u odnosu na napon.
- **Znači, pri tom režimu rada, ispravljač troši rektivnu snagu!!!**
- Približno je fazni ugao prvog harmonika struje je jednak uglu regulacije:

$$\varphi_1 \approx \alpha$$

Izlazni napon ispravljača

$$U_{AV}(\alpha) = U_{AV}(0) \cos \alpha$$

Izlazna snaga ispravljača

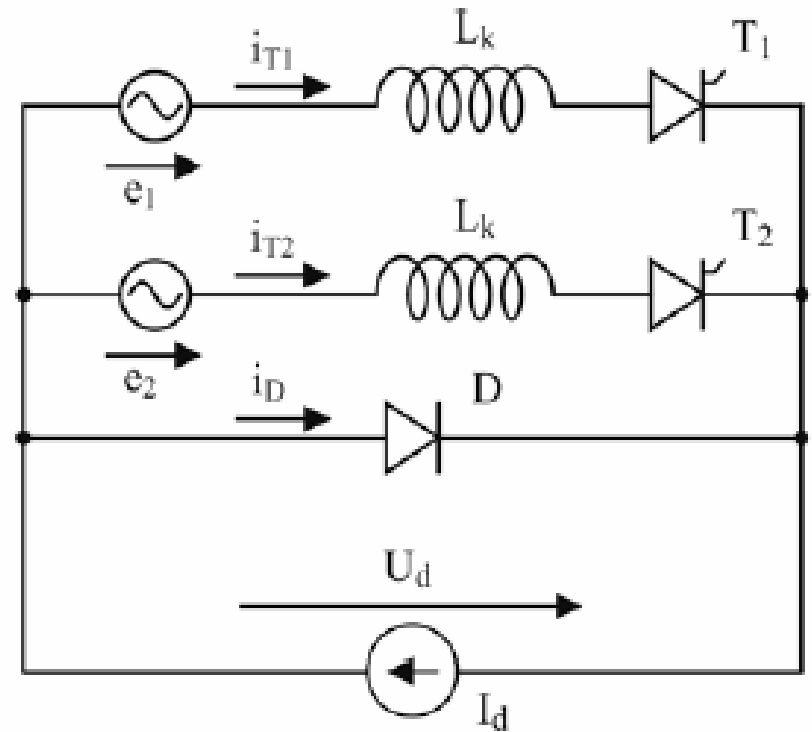
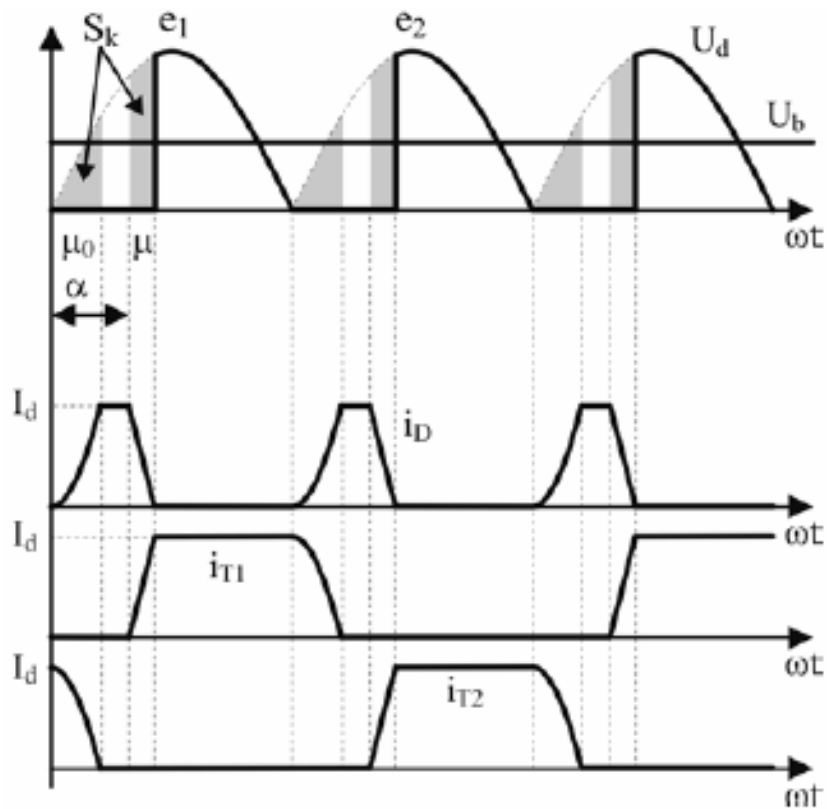
$$P_{AV} = U_{AV}(0) I_d \cos \alpha$$

Prividna snaga ispravljača
ne zavisi od ugla regulacije

$$S = U I_d \left(\frac{N''}{N'} \right) = U'' I_d$$

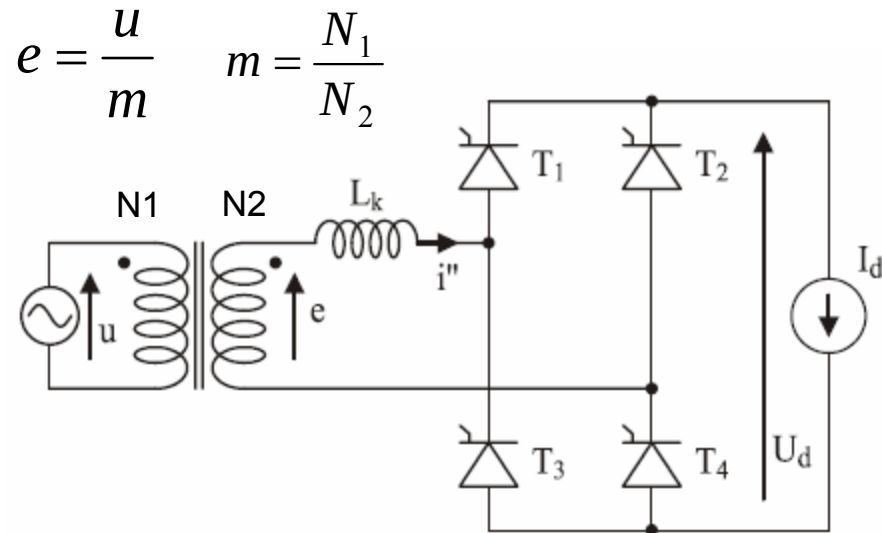
Srednja vrednost izlaznog napona ispravljača (M2) sa dodatom zamajnom diodom biće jednaka:

$$U_{AV} = \frac{2}{T} \left\{ \int_{\frac{\alpha}{\pi}}^{\frac{T}{2}} \sqrt{2} E \sin \omega t dt - L_k I \right\}$$



$$U_{AV} = \frac{\sqrt{2} E}{\pi} (1 + \cos \alpha) - \frac{X_k}{\pi} I$$

PRIMER 2: Monofazni punouprtljivi ispravljač (spoj B2C)

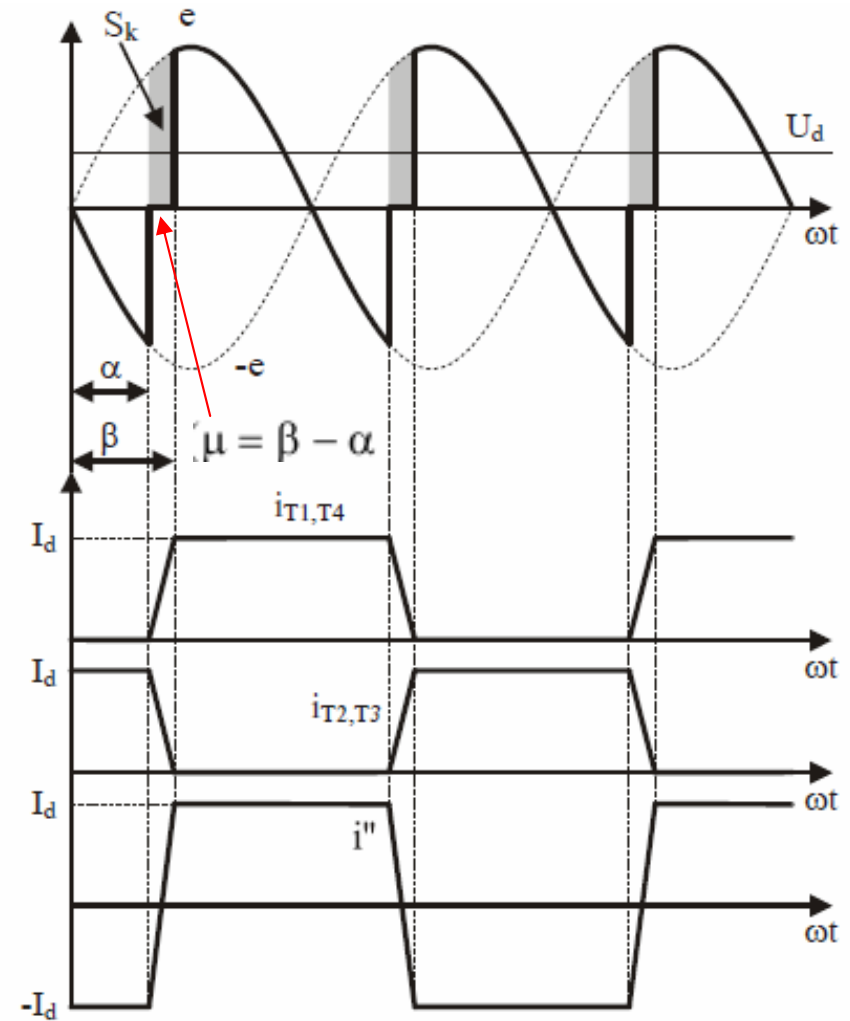


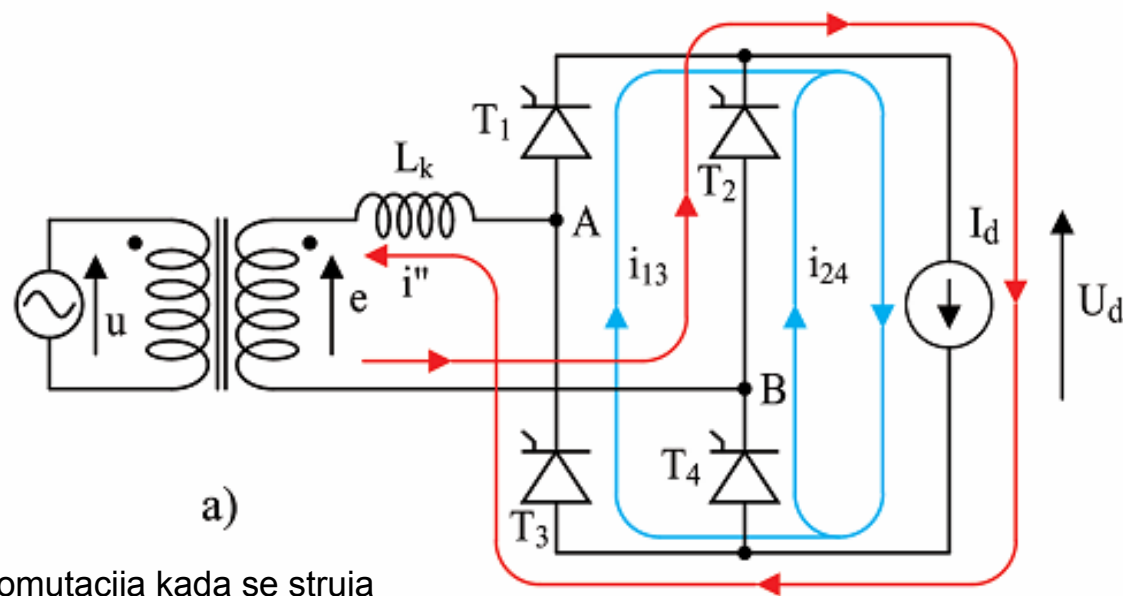
$$e = E\sqrt{2} \cdot \sin \omega t \quad X_k = \omega \cdot L_k$$

$$S_k = 2 \cdot L_k \cdot I_d$$

SREDNJA VREDNOST IZLAZNOG NAPONA

$$U_d = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot E \cdot \cos \alpha - \frac{2}{\pi} \cdot X_k \cdot I_d$$



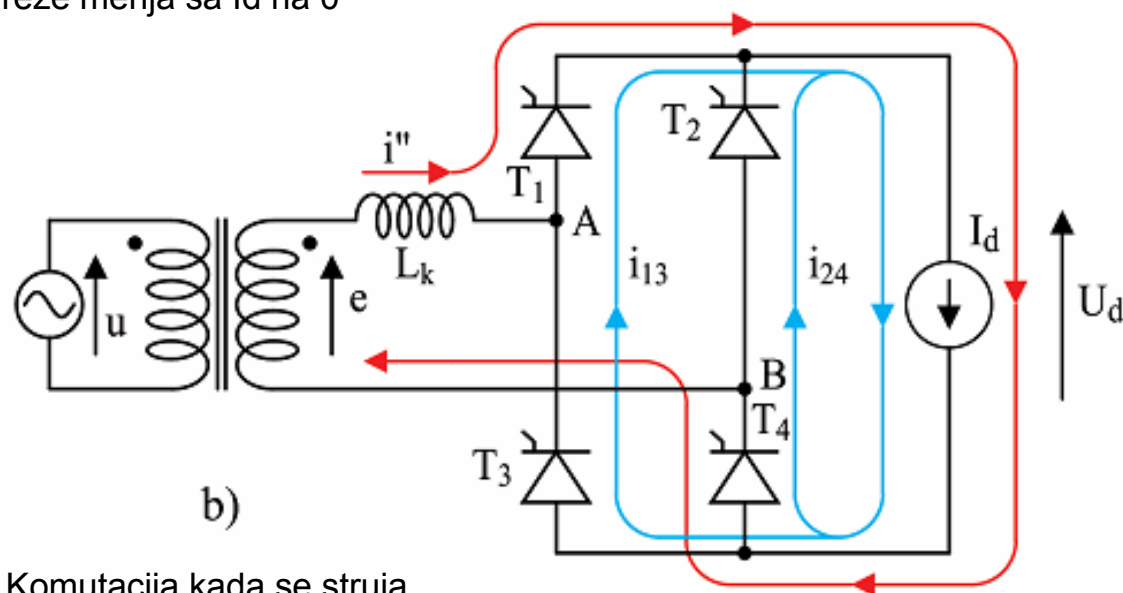


a)

Komutacija kada se struja mreže menja sa I_d na 0

$$i_1 = i_4 = i_{13} = i_{24} = \frac{I_d - i''}{2}$$

$$i_2 = i_3 = i'' + i_{24} = i'' + i_{13} = \frac{I_d + i''}{2}$$



b)

Komutacija kada se struja mreže menja sa 0 na $-I_d$

$$i_1 = i_4 = i'' + i_{13} = i'' + i_{24} = \frac{I_d + i''}{2}$$

$$i_2 = i_3 = i_{24} = i_{13} = \frac{I_d - i''}{2}$$

$$S_k = L_k \cdot 2I_d = \int_{\frac{\alpha}{\omega}}^{\frac{\beta}{\omega}} \sqrt{2}E \sin(\omega t) dt = \frac{\sqrt{2}E}{\omega} [\cos(\alpha) - \cos(\beta)]$$

$$\cos(\beta) = \cos(\alpha) - \frac{2X_k I_d}{\sqrt{2}E}$$



$$U_d = \frac{2\sqrt{2}E}{\pi} \cos(\alpha) - \frac{2S_k}{T} = \frac{2\sqrt{2}E}{\pi} \cos(\alpha) - \frac{4L_k I_d}{T}$$



$$T = 2\pi/\omega$$



SREDNJA VREDNOST IZLAZNOG NAPONA

$$U_d = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot E \cdot \cos \alpha - \frac{2}{\pi} \cdot X_k \cdot I_d$$

SNAGA DIMENZIONISANJA TRANSFORMATORA

$$S = S' = S'' = EI_d \quad I' = I_d / m$$

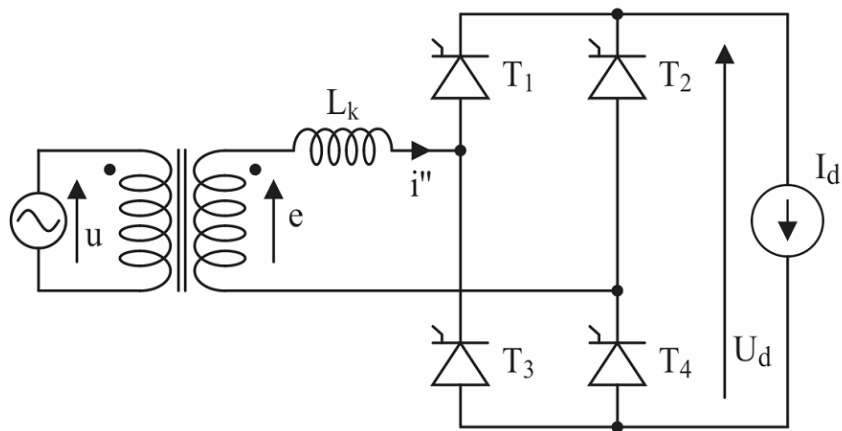
Maksimalna snaga se ima pri $\alpha=0$

$$P_0 = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot EI_d$$

$$\frac{S}{P_0} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11$$

Iz ovog izraza se vidi da se transformator mora dimenzionisati na 11% veću snagu od maksimalne snage kojom se energija može prenositi opterećenju!!!

Upoređenjem ovog rezultata sa rezultatom dobijenim za dvofazni jednostrani ispravljač (tip M2) se vidi da je kod monofaznog mosnog ispravljača znatno bolje iskorišćenje transformatora.



HVALA NA PAŽNJI!!!
PITANJA?????

