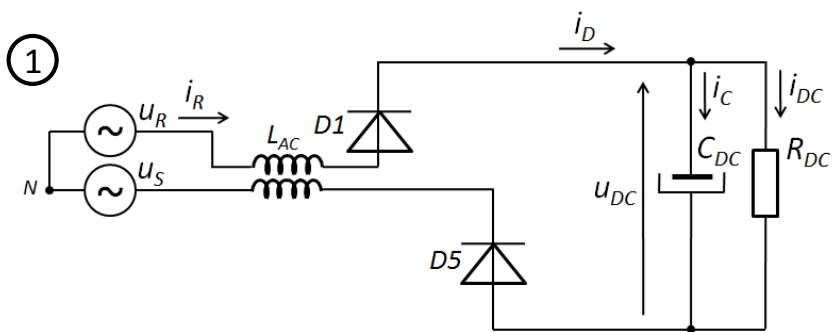
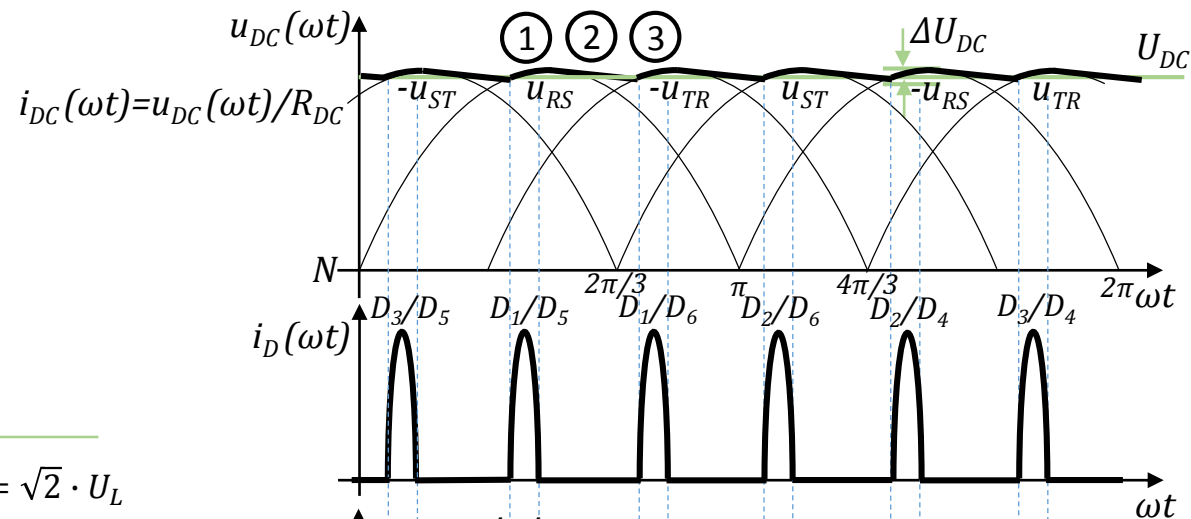
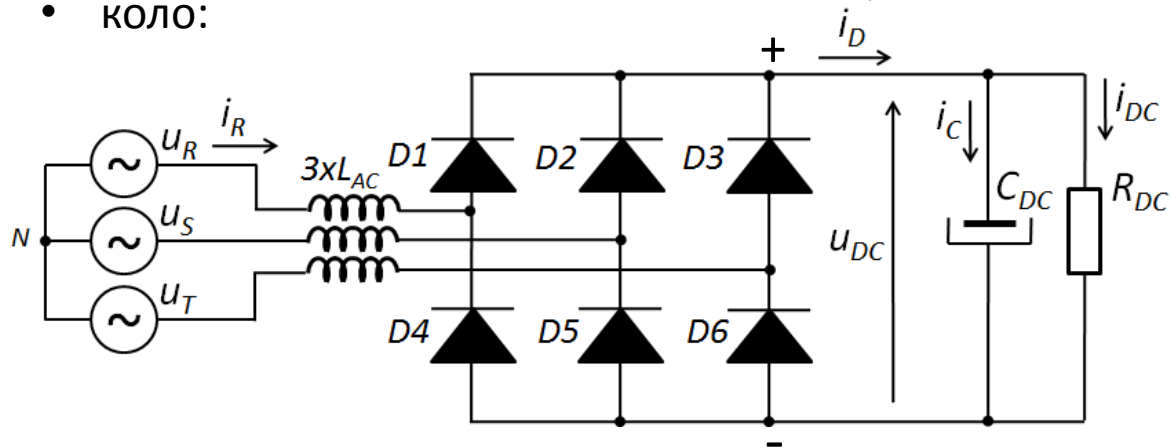


ТРОФАЗНИ ИСПРАВЉАЧИ

ТРОФАЗНИ ДИОДНИ ИСПРАВЉАЧ СА КАПАЦИТИВНИМ ОПТЕРЕЂЕЊЕМ - неуправљив

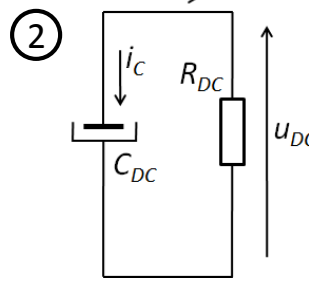
КОЛО:



$$u_{DC} \approx u_{RS}, U_{DCmax} = \sqrt{2} \cdot U_L$$

$$i_C = i_D - i_{DC}$$

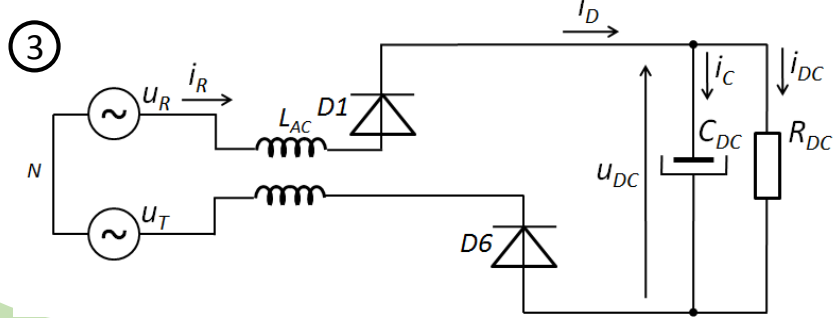
$$i_R = i_D = -i_S$$



$$i_C = -i_{DC}$$

$$i_R = 0A$$

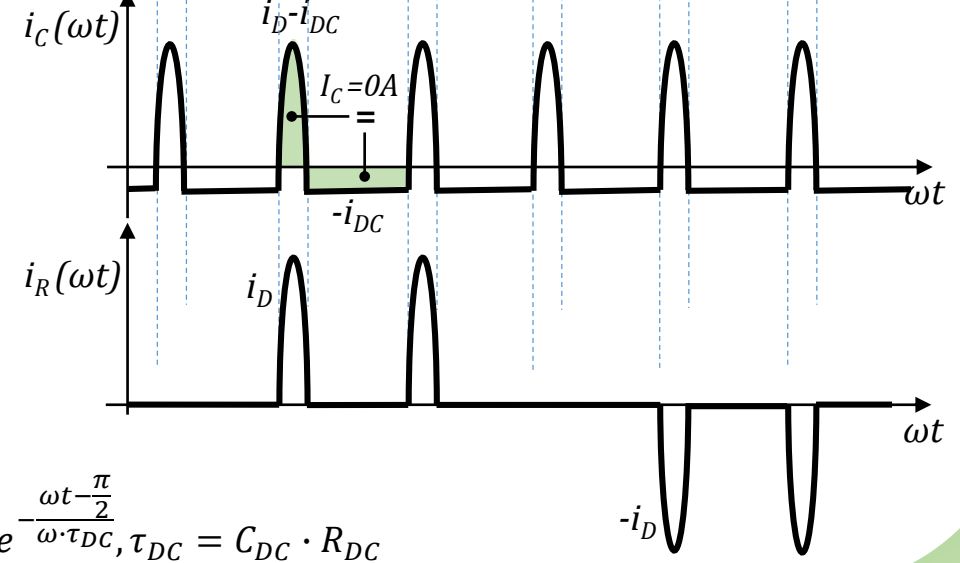
$$u_{DC} \approx U_{DCmax} \cdot e^{-\frac{\omega t - \frac{\pi}{2}}{\omega \cdot \tau_{DC}}}, \tau_{DC} = C_{DC} \cdot R_{DC}$$



$$u_{DC} \approx -u_{TR}$$

$$i_C = i_D - i_{DC}$$

$$i_R = i_D$$



- прорачун елемената кола:

- упрошћења:

ако је задовољено $\Delta U_{DC} \ll U_{DC} \Rightarrow$

1. $i_{DC} \approx I_{DC}$

2. период ② траје $\approx \pi/3 \text{ rad } (3,33\text{ms})$

- прорачун ΔU_{DC} , C_{DC} :

$$\Delta U_{DCmax} = \frac{Q}{C_{DC}} = \frac{I_{DC} \cdot 3,33\text{ms}}{C_{DC}} \quad \text{или} \quad C_{DC} = \frac{I_{DC} \cdot 3,33\text{ms}}{\Delta U_{DC}}$$

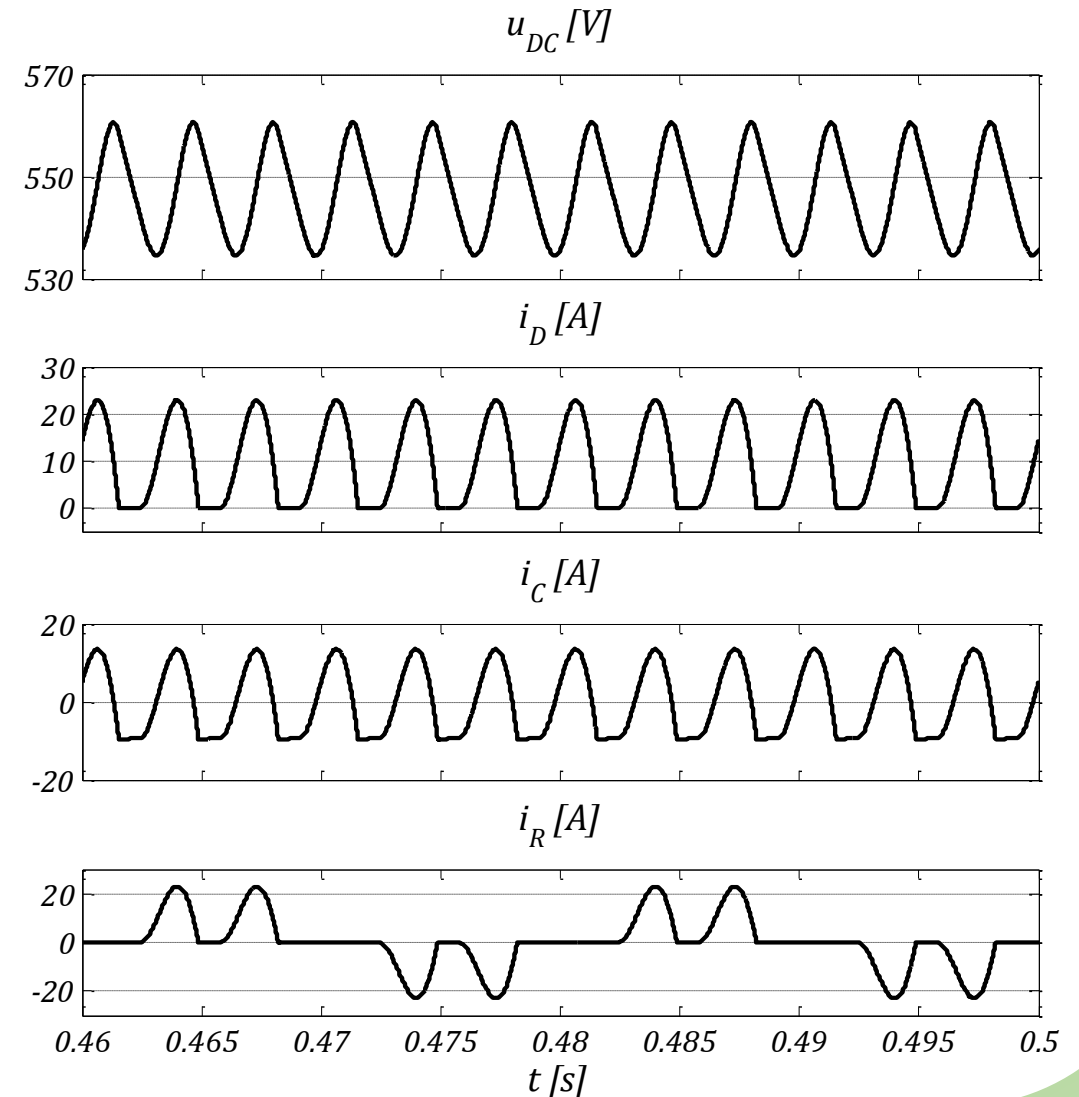
Пример: $U_L = 400\text{V}$, $P_{DC} = 5\text{kW}$, захтев $\Delta U_{DC} \leq 10\% \cdot U_{DC}$

$$U_{DC} \approx U_{DCmax} = \sqrt{2} \cdot U_L = \sqrt{2} \cdot 400 = 566\text{V}$$

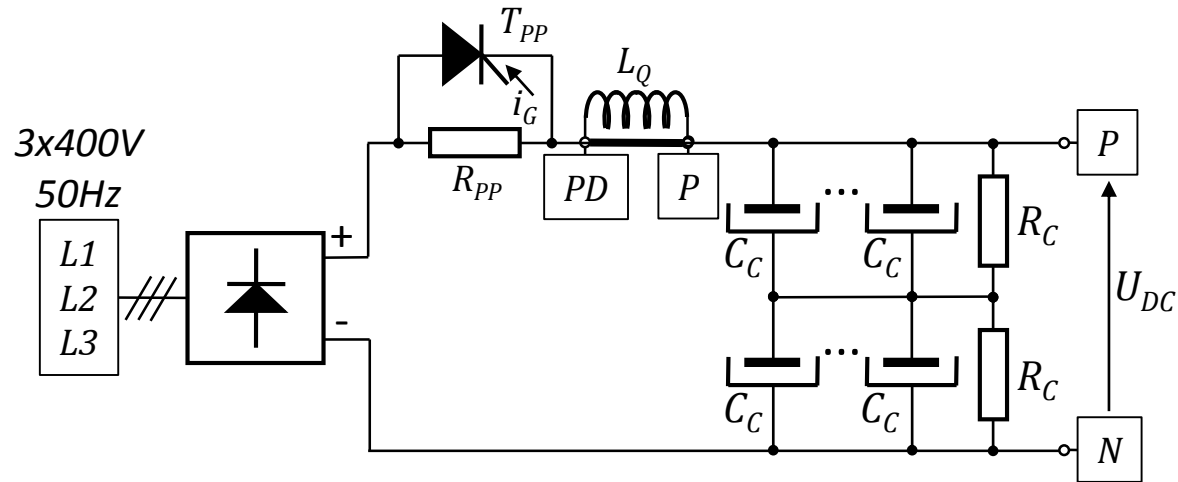
$$I_{DC} = \frac{5\text{kW}}{566\text{V}} = 8,84\text{A}, \quad \Delta U_{DC} = 57\text{V} \Rightarrow$$

$$C_{DC} = \frac{8,84 \cdot 3,33\text{ms}}{57} = 516\mu\text{F}$$

- резултати симулације рада кола:



- поставка исправљачког степена:



R_{PP} – отпор за предпуњење капацитивности

T_{PP} – тиристор за преспајање R_{PP}

L_Q – индуктивност за поправку фактора снаге и смањење ΔU_{DC}

R_C – отпорници за уравнотежење напона на C_{DC}

- поступак избора C_{DC} :

i. $U_{DC(max)} = \sqrt{2} \cdot U_{L(max)} = \sqrt{2} \cdot 400 \cdot 1.1 = 623V$

ii. широко доступни електролитски кондензатори се израђују за називне напоне до 400V или 450V;

=> потребно је повезати два кондензатора редно да би се подржао напон U_{DC} .

iii. широко доступне вредности капацитивности су:

$1x, 2,2x, 3,3x, 4,7x \dots 1/10/100/1000 \mu F$

Потребно је остварити укупну капацитивност $C_{DC}=516\mu F$

- Ако се примене кондензатори $C_C=470\mu F$, капацитивност гране је $470\mu F/2=235\mu F$ па је потребно поставити 3 гране (6 кондензатора).

- Ако се примене кондензатори $C_C=330\mu F$, капацитивност гране је $165\mu F$ па је потребно поставити 4 гране (8 кондензатора).

- R_C - отпорници за уравнотежење напона на C_C :

Електролитски кондензатори не могу самостално разделити напон U_{DC} . Разлике у струјама цурења и њихова временска зависност се премошћује додавањем отпорника R_C .

i. вредност R_C се уобичајено креће у опсегу $20k\Omega \div 30k\Omega$

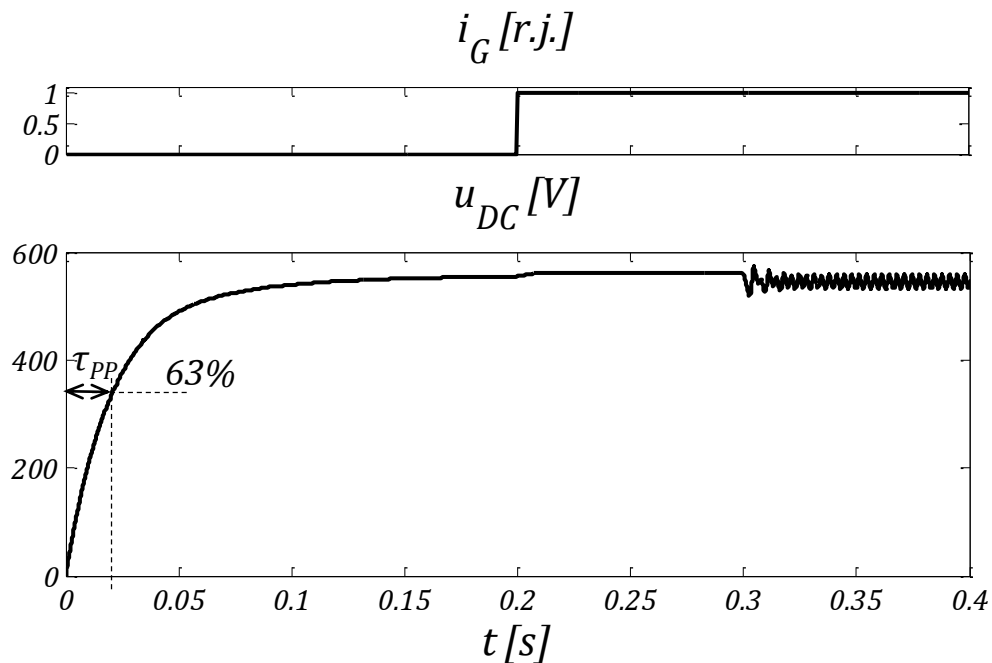
=> потребна снага R_C је:

$$P_{RC} = \left(\frac{U_{DC}}{2}\right)^2 \cdot \frac{1}{R_C} \text{ за } R_C = 20k\Omega \Rightarrow P_{RC(max)} = \left(\frac{623}{2}\right)^2 \cdot \frac{1}{20k} = 4,85W$$

ii. напонско напрезање R_C : $U_{DC(max)}/2 = 312V$

- поставка исправљачког степена:

период првобитног пуњења за $R_{PP}=40\Omega$:



3. поступак избора R_{PP} :

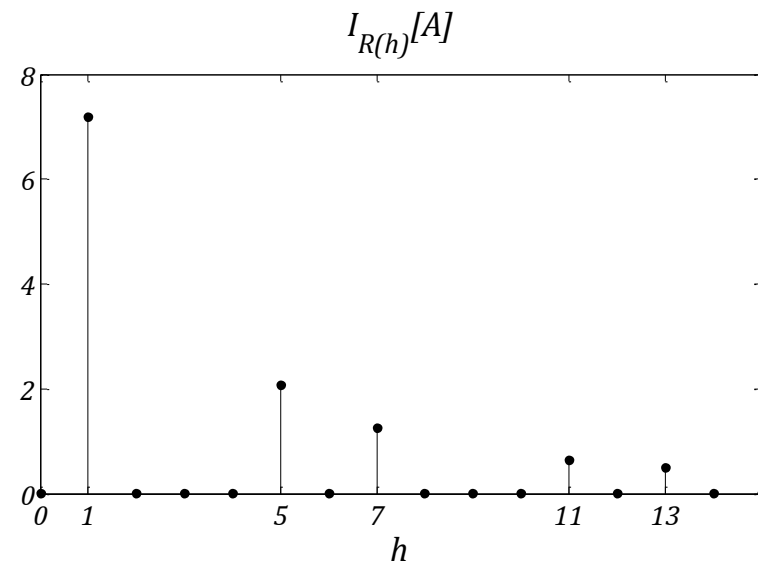
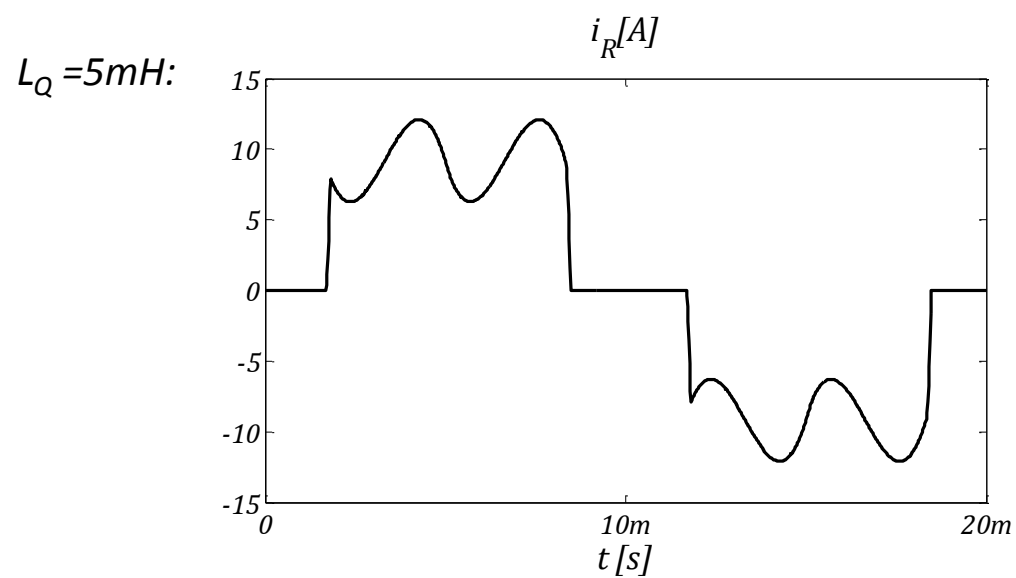
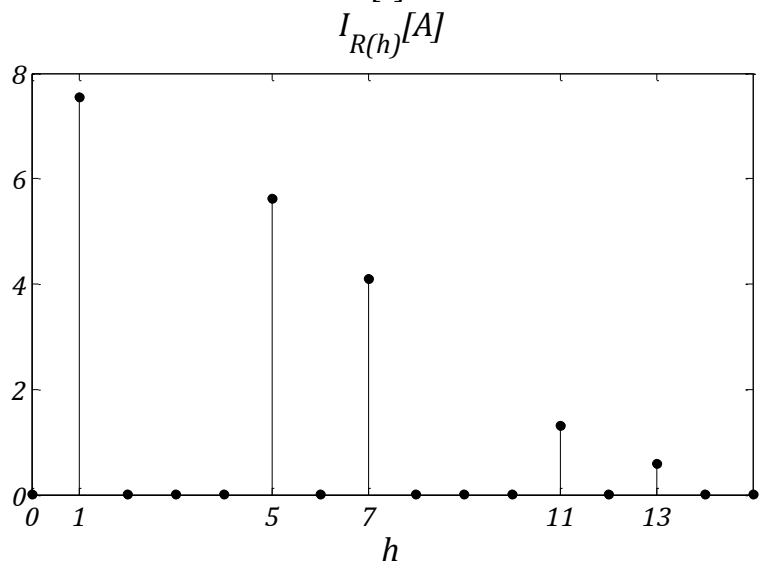
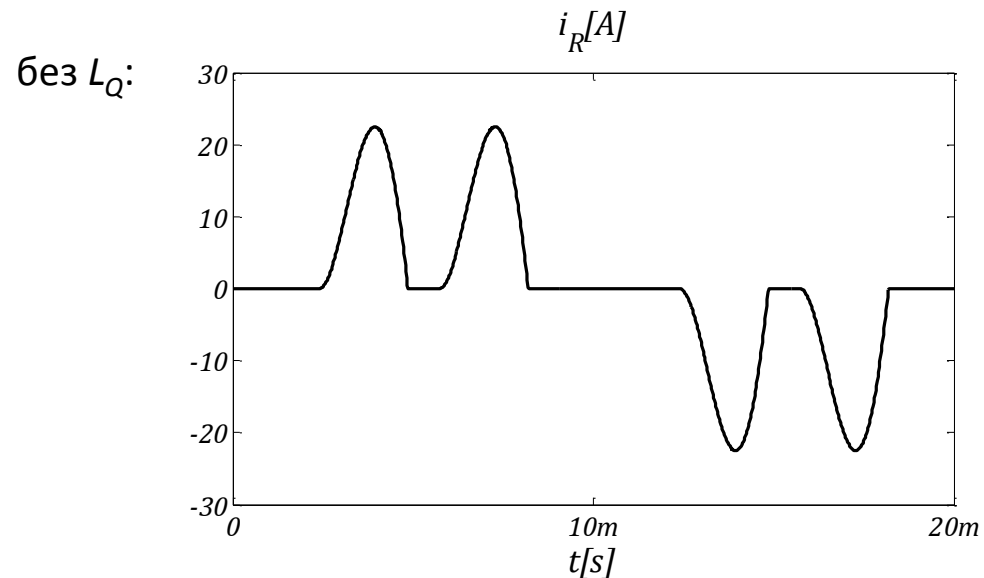
i. највећа тренутна вредност струје мреже на почетку периода пуњења C_{DC} :

$$\widehat{I_{R(max)}} = \sqrt{2} \cdot U_{L(max)} / R_{PP} \quad \text{за } R_{PP} = 40\Omega \Rightarrow \widehat{I_{R(max)}} = 15,6A$$

ii. временска константа пуњења C_{DC} :

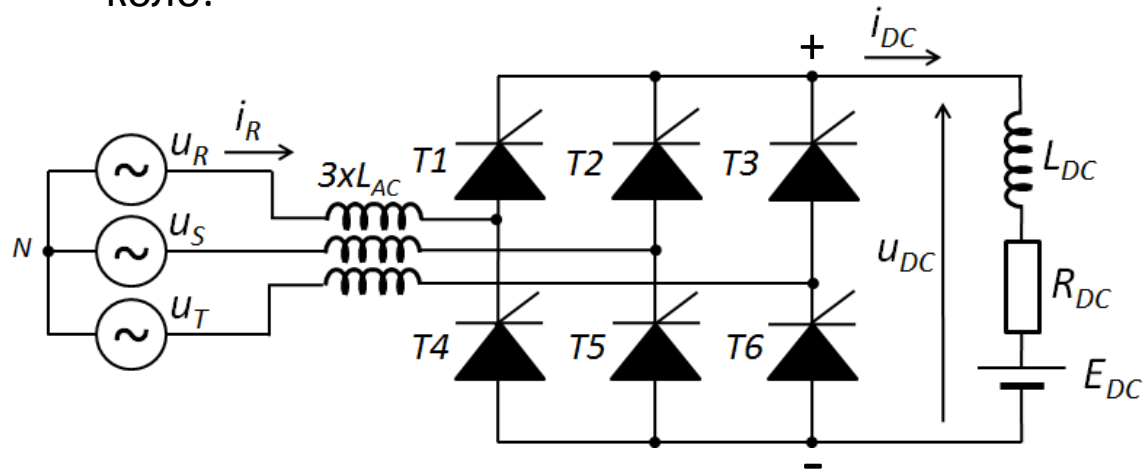
$$\tau_{PP} = C_{DC} \cdot R_{PP} = 516\mu \cdot 40 = 21ms$$

4. смањење изобличења струје мреже повезивањем L_Q :



ТРОФАЗНИ ТИРИСТОРСКИ ИСПРАВЉАЧ СА ИНДУКТИВНИМ ОПТЕРЕЋЕЊЕМ - пуноуправљив

- КОЛО:

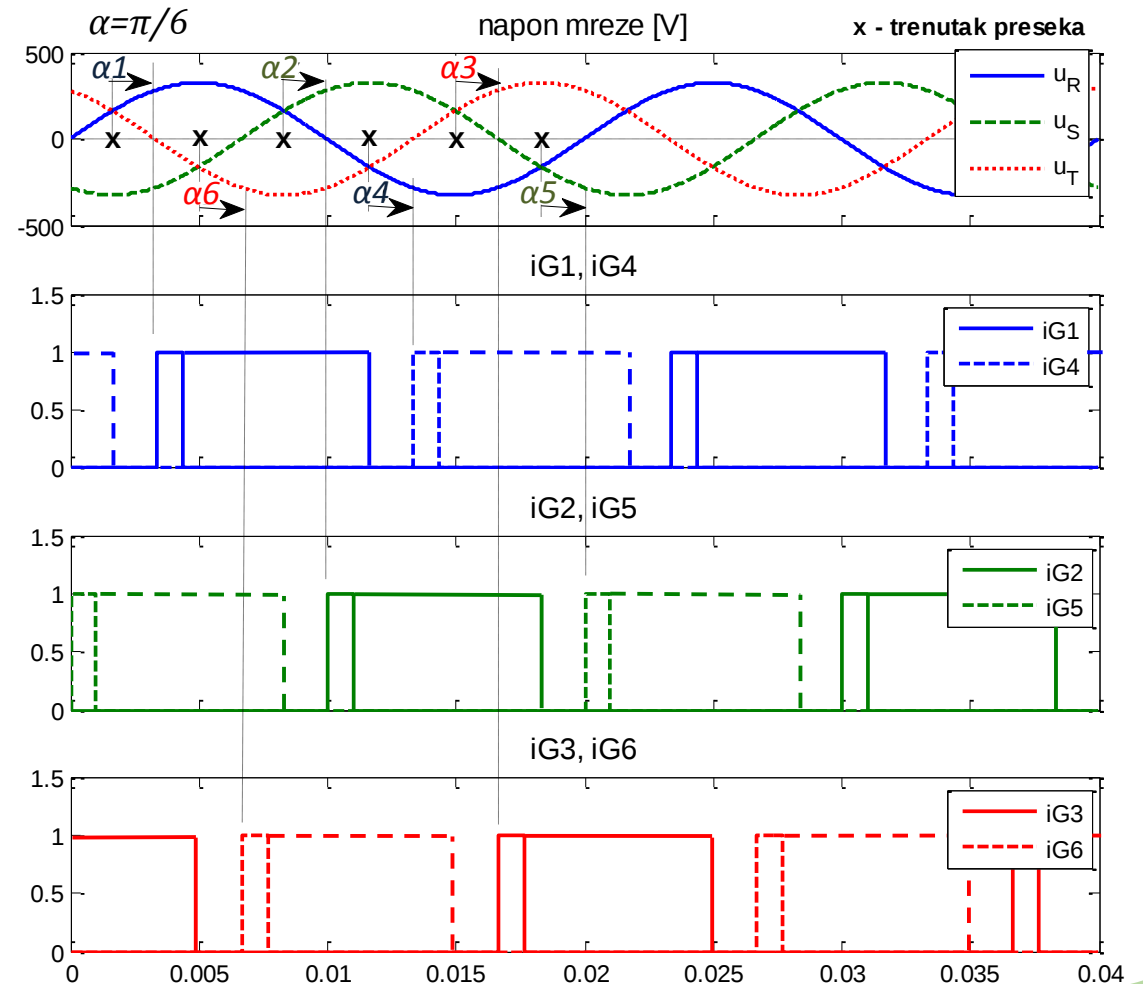


Опсег промене α је одређен временом у ком је тиристор који се укључује позитивно поларисан у односу на тиристор који је претходно проводио, а повезан је на исти излазни крај (+/-). Овде:
 $\alpha \in [0 \div \pi]$

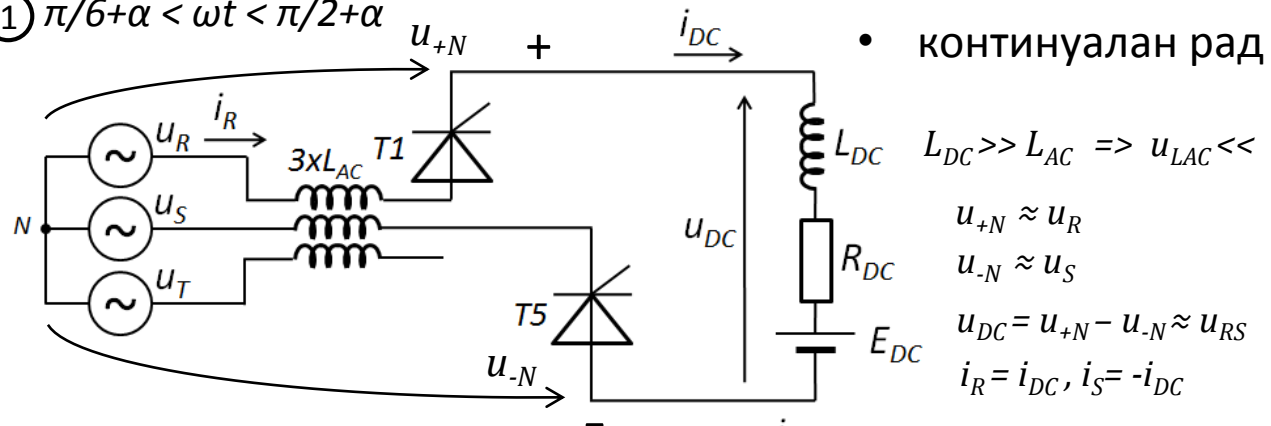
Поступак синхронизације се може остварити по угледу на онај код једнофазног тиристорског исправљача.

Задатак: осмислите поставку кола за синхронизацију и задавање угла α по угледу на коло разматрано код једнофазног исправљача.

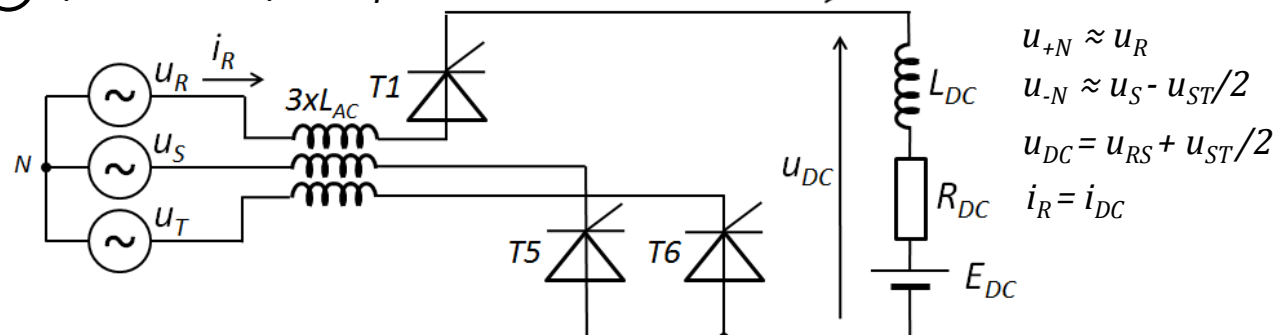
- управљање: синхронизација са мрежним напоном + мерење угла укључења α



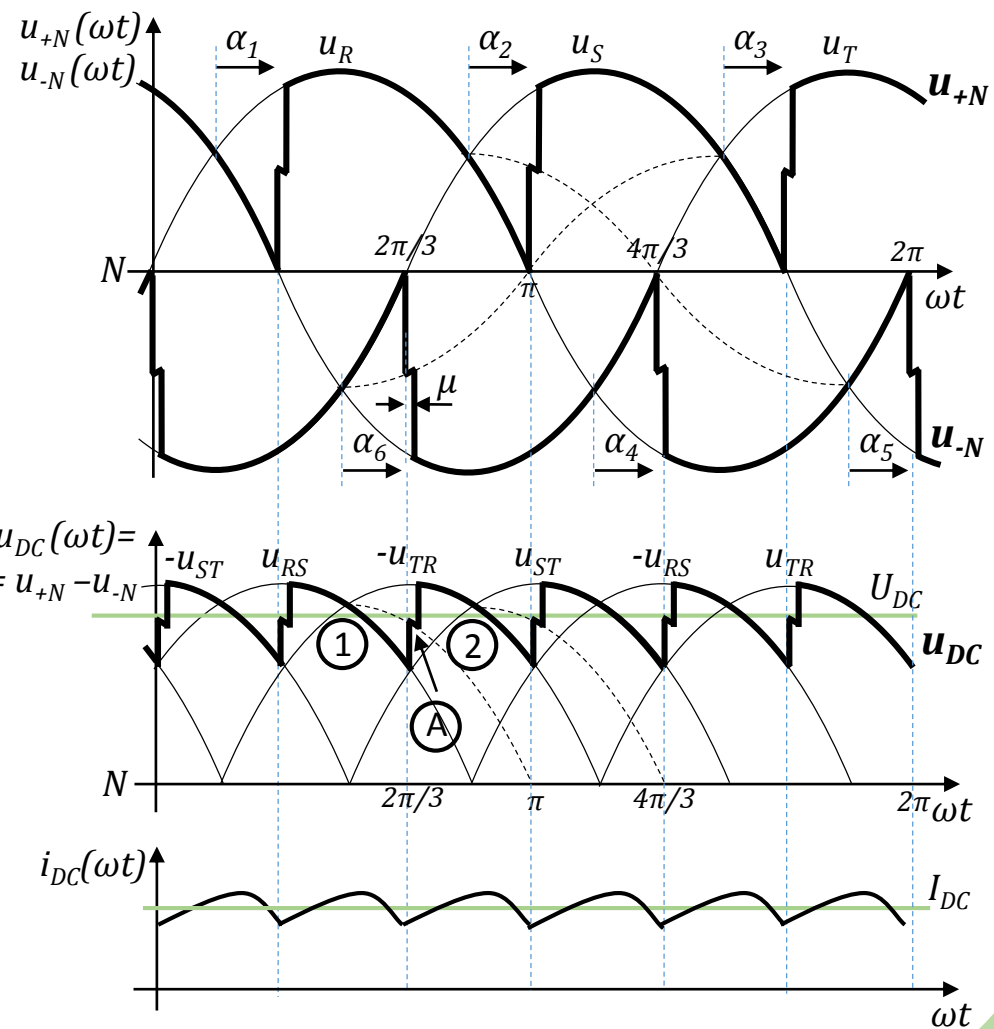
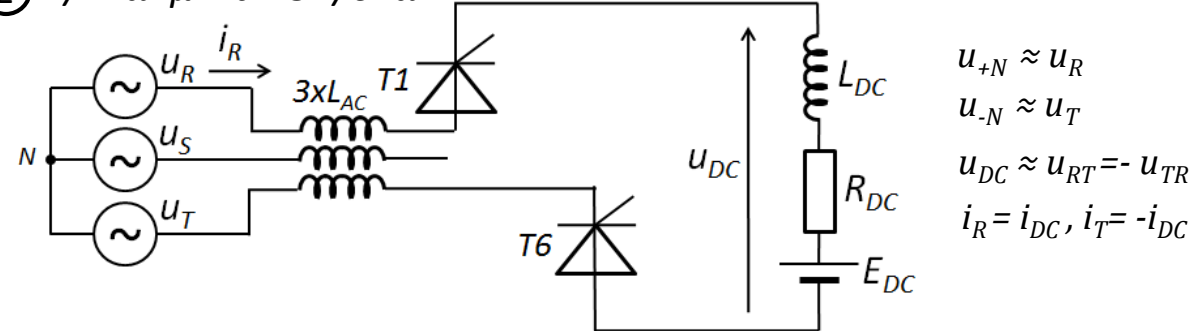
① $\pi/6 + \alpha < \omega t < \pi/2 + \alpha$



Ⓐ $\pi/2 + \alpha < t < \pi/2 + \alpha + \mu$



② $\pi/2 + \alpha + \mu < t < 5\pi/6 + \alpha$

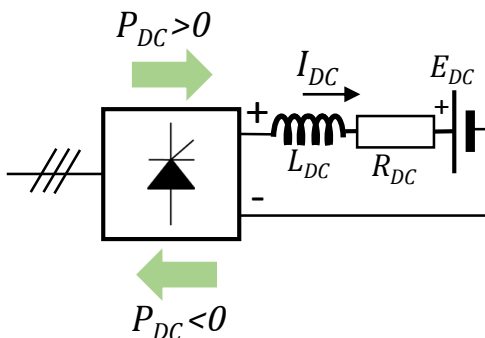
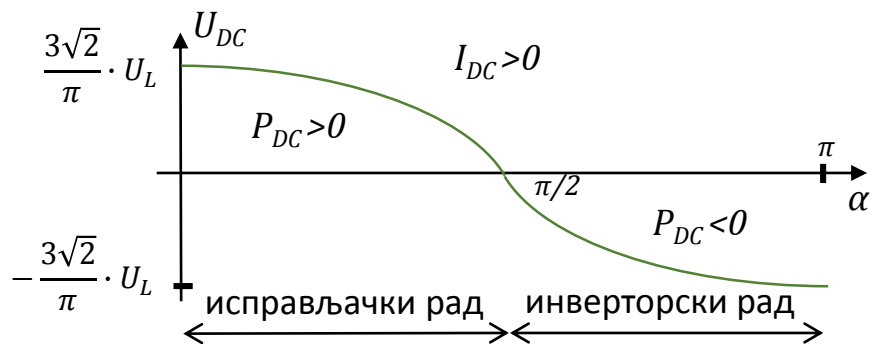


- континуалан рад

- средња вредност u_{DC} :

$$U_{DC} = \frac{1}{\pi/3} \int_{\pi/6+\alpha}^{\pi/6+\pi/3+\alpha} \sqrt{2} \cdot U_L \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) \cdot d(\omega t) =$$

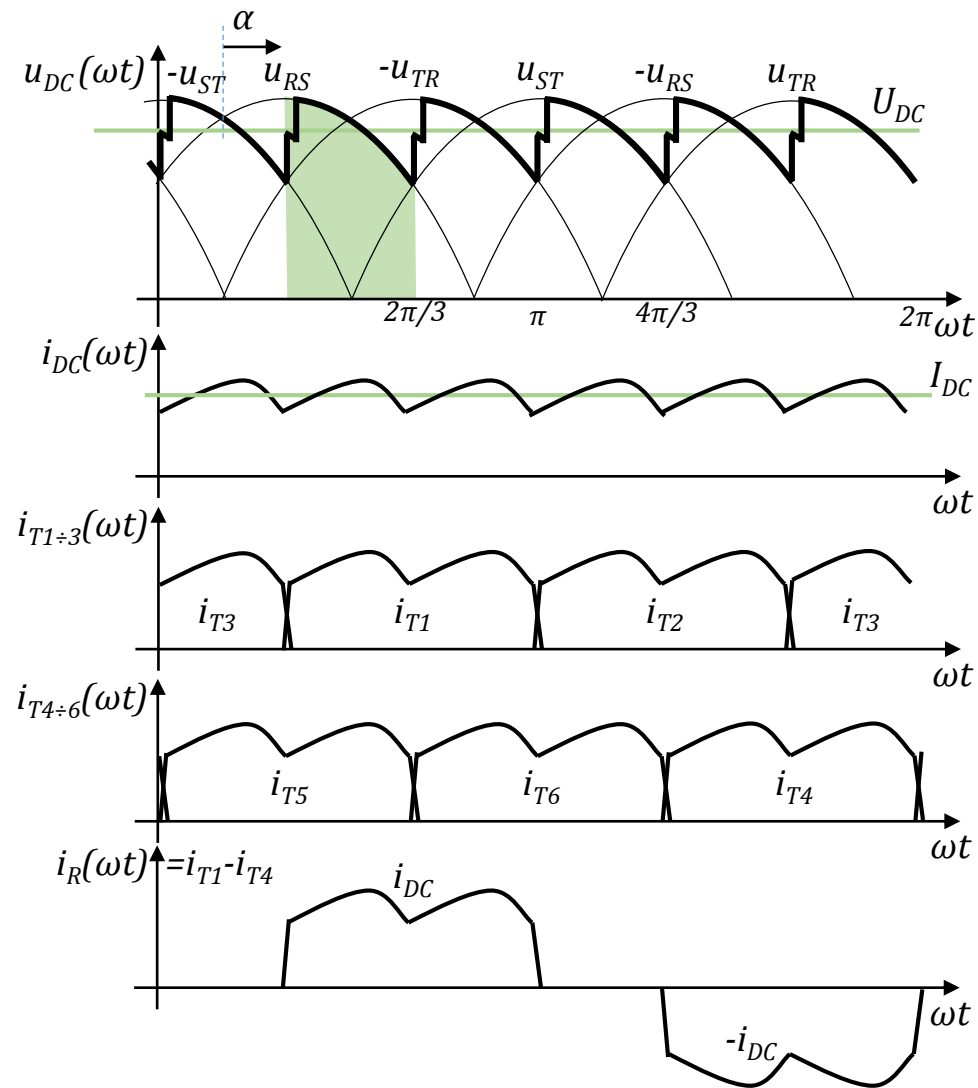
$$= \frac{3\sqrt{2} \cdot U_L}{\pi} \cdot \cos\alpha$$



Тиристорски исправљач је пуноуправљиви претварач

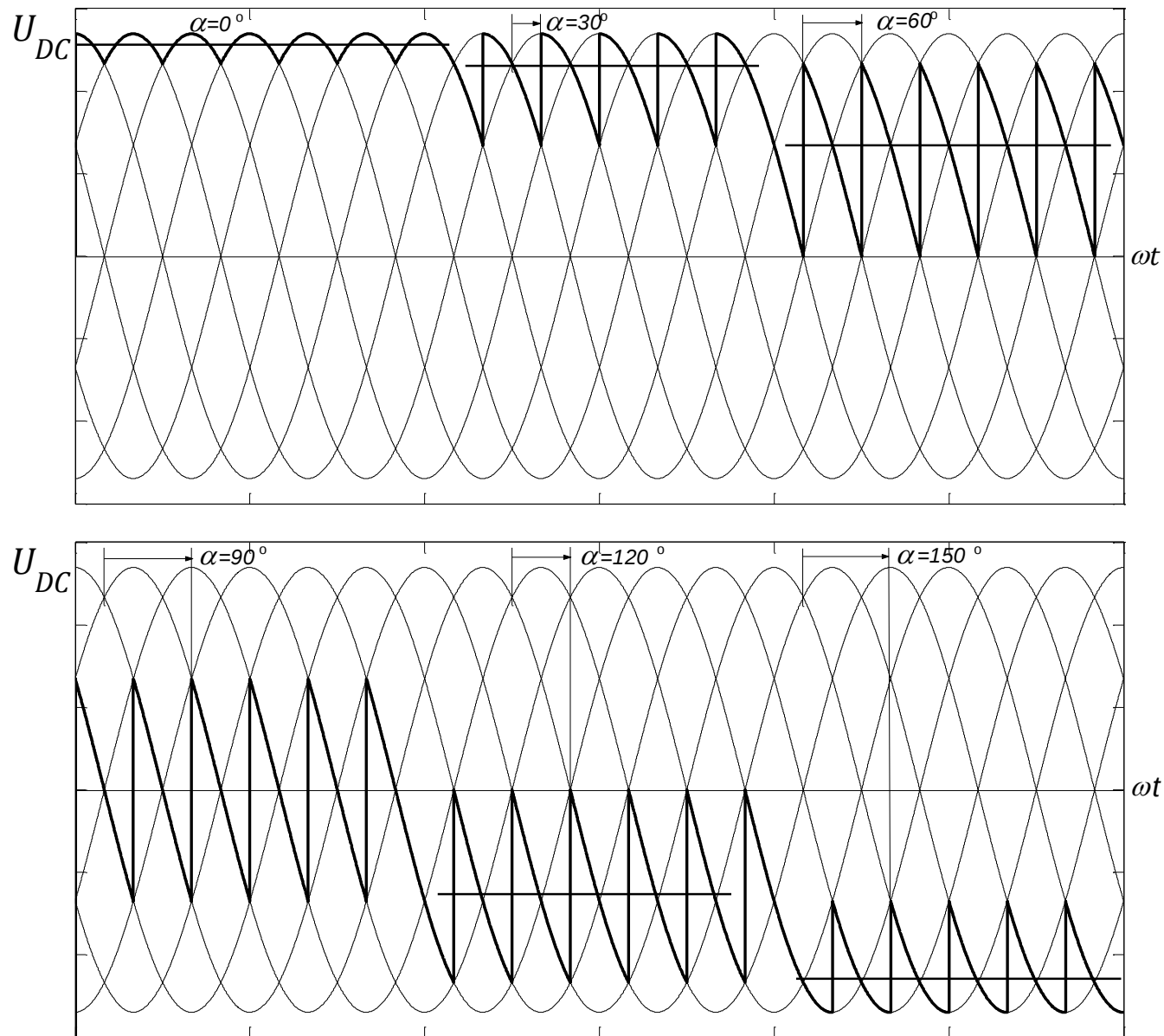
- средња вредност i_{DC} :

$$U_{DC} = U_{Ldc=0} R_{DC} \cdot I_{DC} + E_{DC} \Rightarrow I_{DC} = \frac{U_{DC} - E_{DC}}{R_{DC}}$$



- континуалан рад

средња вредност $u_{DC} = f(\alpha)$:



- континуалан рад

- пример прорачуна:

подаци о колу:

$$U_L = 3 \times 400V, f = 50Hz, L_{AC} = 100\mu H,$$

$$E_{DC} = 417,8V, R_{DC} = 1\Omega, L_{DC} = 30mH$$

управљање: $\alpha = \pi/6$

$$U_{DC} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_L \cdot \cos\alpha = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot 400 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) = 467,8V$$

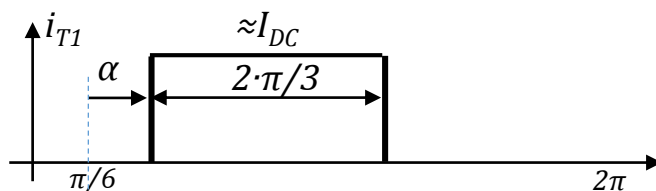
$$I_{DC} = \frac{U_{DC} - E_{DC}}{R_{DC}} = \frac{467,8 - 417,8}{1} = 50A$$

- оптерећење тиристора:

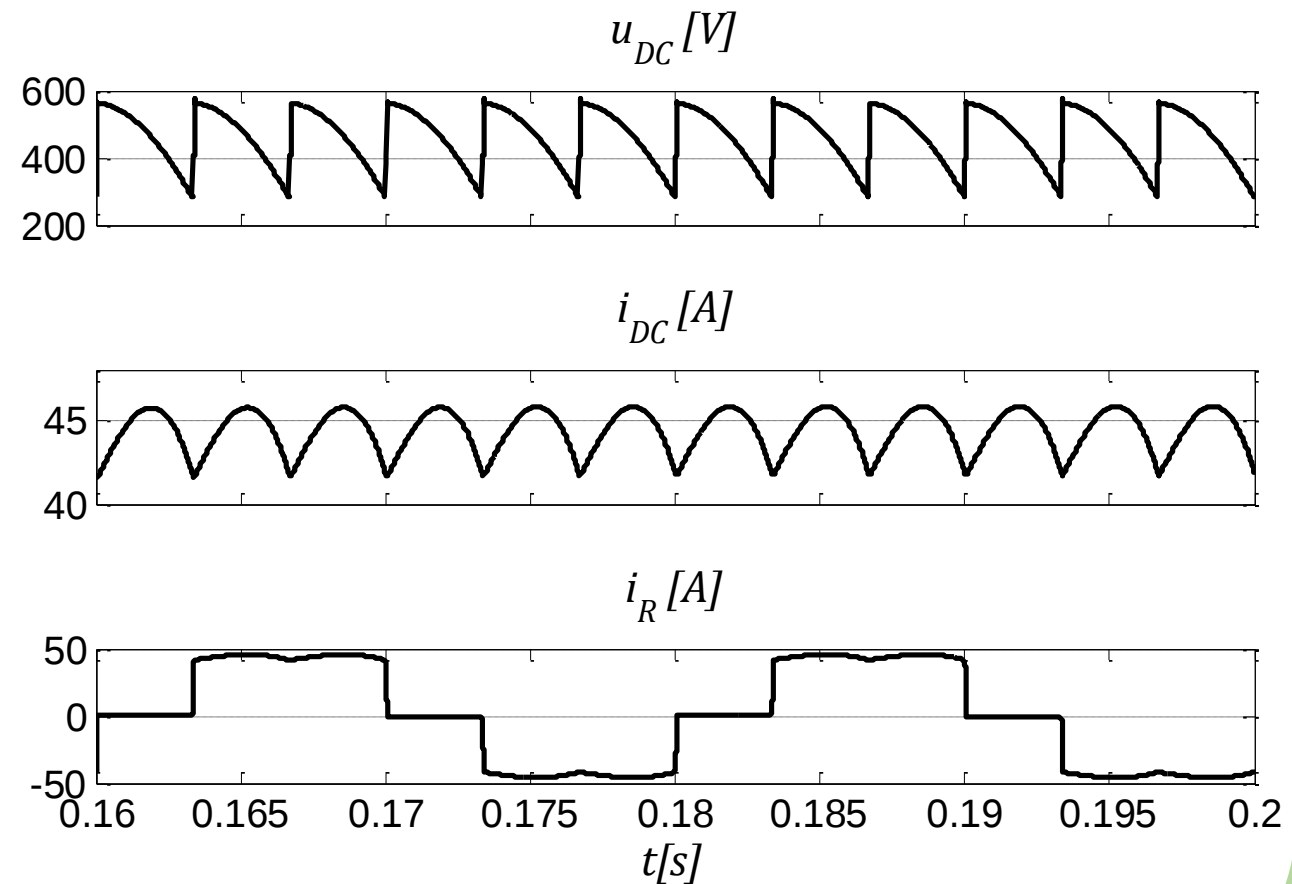
$$U_{TPmax} = U_{TNmax} = \sqrt{2} \cdot U_{Lmax}$$

$$I_{T(sr)} = I_{DC}/3$$

$$I_{T(ef)} = I_{DC}/\sqrt{3}$$



- резултати симулације:



- дисконтинуалан рад

подаци о колу:

$$U_L = 3 \times 400V, f = 50Hz, E_{DC} = 417,8V, R_{DC} = 1\Omega, L_{DC} = 30mH$$

управљање: $\alpha = \pi/3$

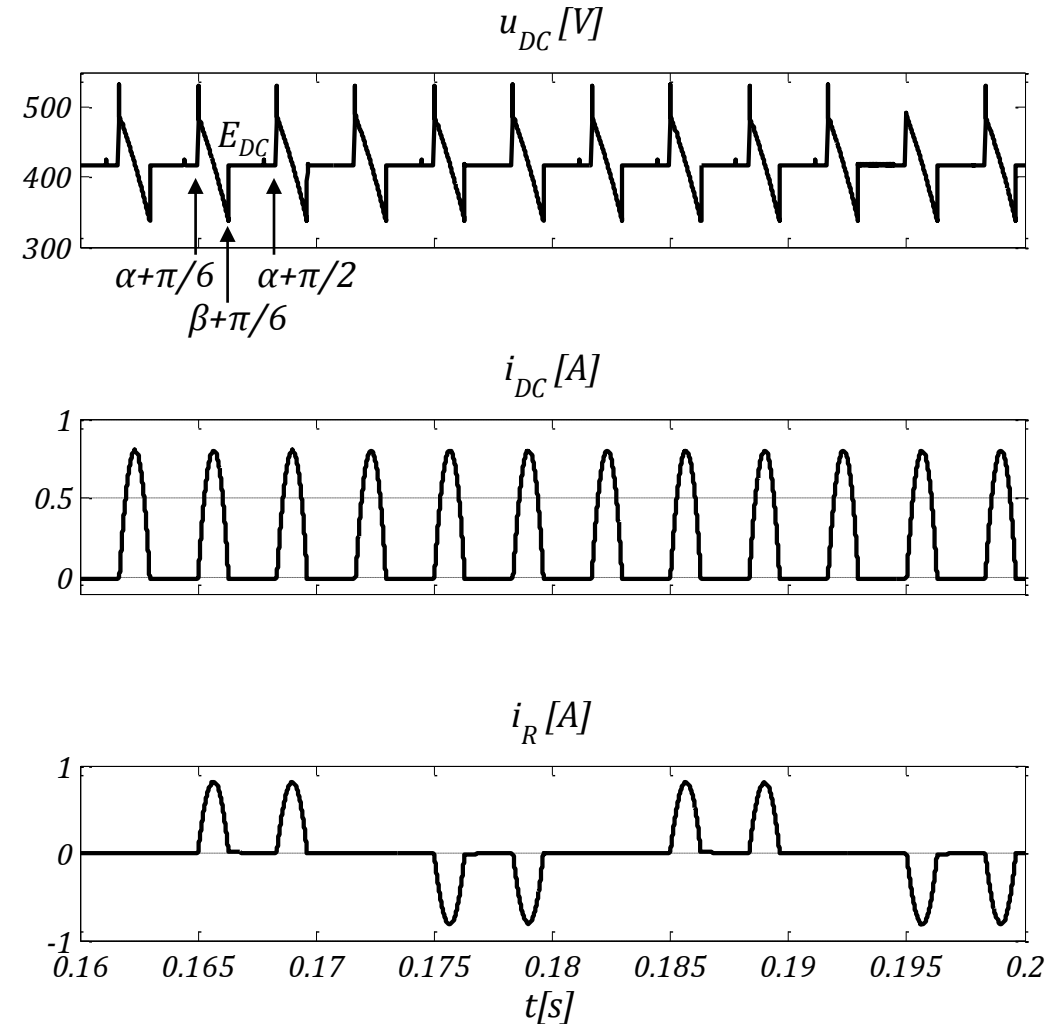
- средња вредност u_{DC} :

$$U_{DC} = \frac{1}{\pi/3} \left[\int_{\pi/6 + \alpha}^{\pi/6 + \beta} \sqrt{2} \cdot U_L \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) \cdot d(\omega t) + \int_{\pi/6 + \beta}^{\pi/2 + \alpha} E_{DC} \cdot d(\omega t) \right]$$

- средња вредност i_{DC} :

$$U_{DC} = U_{Ldc=0} R_{DC} \cdot I_{DC} + E_{DC} \Rightarrow I_{DC} = \frac{U_{DC} - E_{DC}}{R_{DC}}$$

• резултати симулације рада кола:



- струја мреже

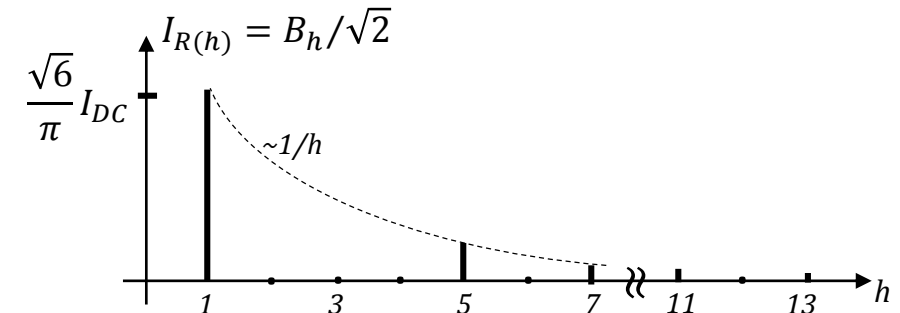
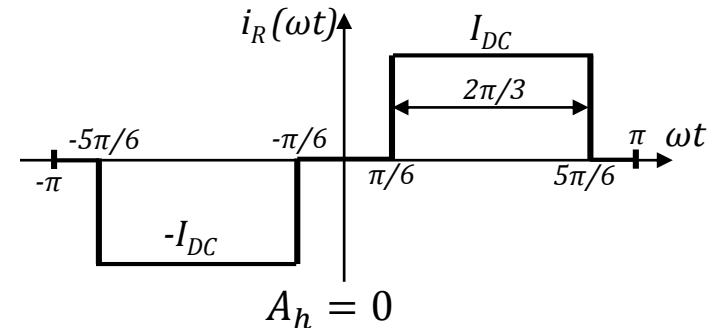
- ефективна вредност :

$$I_R = \sqrt{\frac{2}{3}} I_{DC}$$

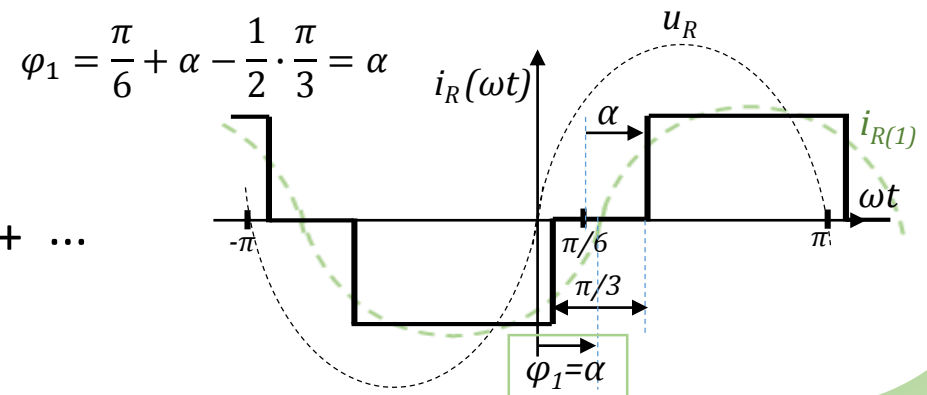
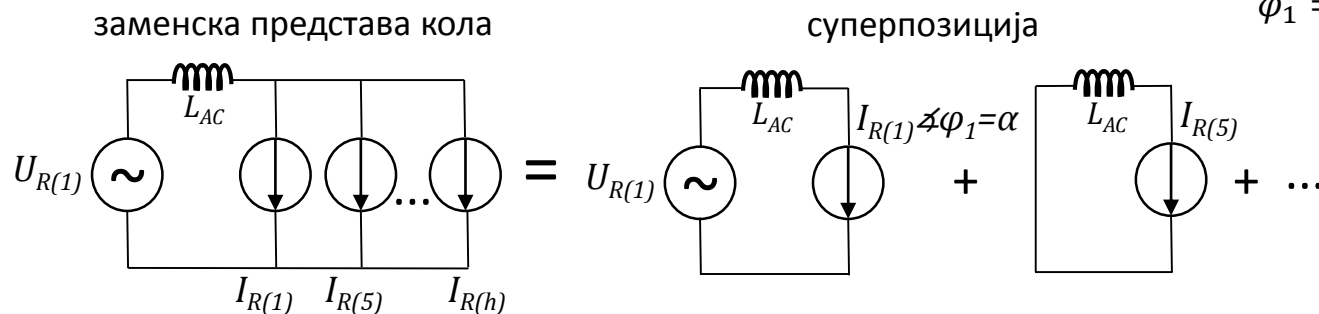
- хармонијски спектар :

$$B_h = \frac{1}{\pi} \left[\int_{-5\pi/6}^{-\pi/6} -I_{DC} \cdot \sin(h\omega t) \cdot d(\omega t) + \int_{\pi/6}^{5\pi/6} I_{DC} \cdot \sin(h\omega t) \cdot d(\omega t) \right]$$

$$= \frac{2 \cdot I_{DC}}{\pi \cdot h} \cdot \left[\cos\left(\frac{\pi}{6} \cdot h\right) - \cos\left(\frac{5\pi}{6} \cdot h\right) \right]$$



- тиристорски исправљач је извор виших хармоника струје у мрежи:



- снаге на мржном прикључку

- активна снага претварача:

$$\text{деф.: } P_{AC} = 3 \cdot \sum_h U_{R(h)} \cdot I_{R(h)} \cdot \cos \varphi_h$$

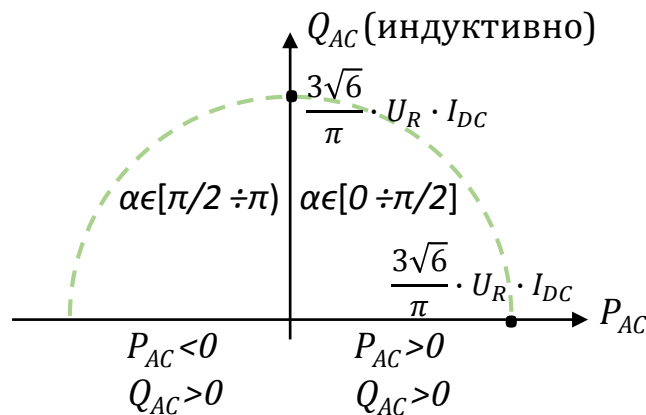
$$\xrightarrow{U_{R(1)} \neq 0} P_{AC} = 3 \cdot U_R \cdot I_{R(1)} \cdot \cos \varphi_1 = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} \cdot U_R \cdot I_{DC} \cdot \cos \alpha$$

$$= P_{DC} = U_{DC} \cdot I_{DC} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_L \cdot I_{DC} \cdot \cos \alpha$$

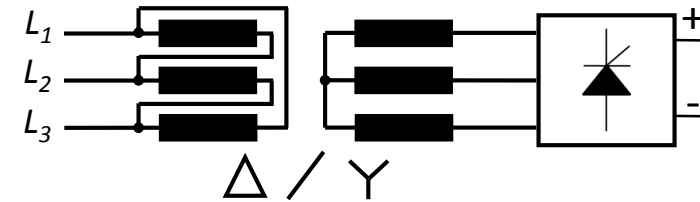
- реактивна снага претварача:

$$\text{деф.: } Q_{AC} = 3 \cdot \sum_h U_{R(h)} \cdot I_{R(h)} \cdot \sin \varphi_h$$

$$\xrightarrow{U_{R(1)} \neq 0} Q_{AC} = U_R \cdot I_{R(1)} \cdot \sin \varphi_1 = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} \cdot U_R \cdot I_{DC} \cdot \sin \alpha$$



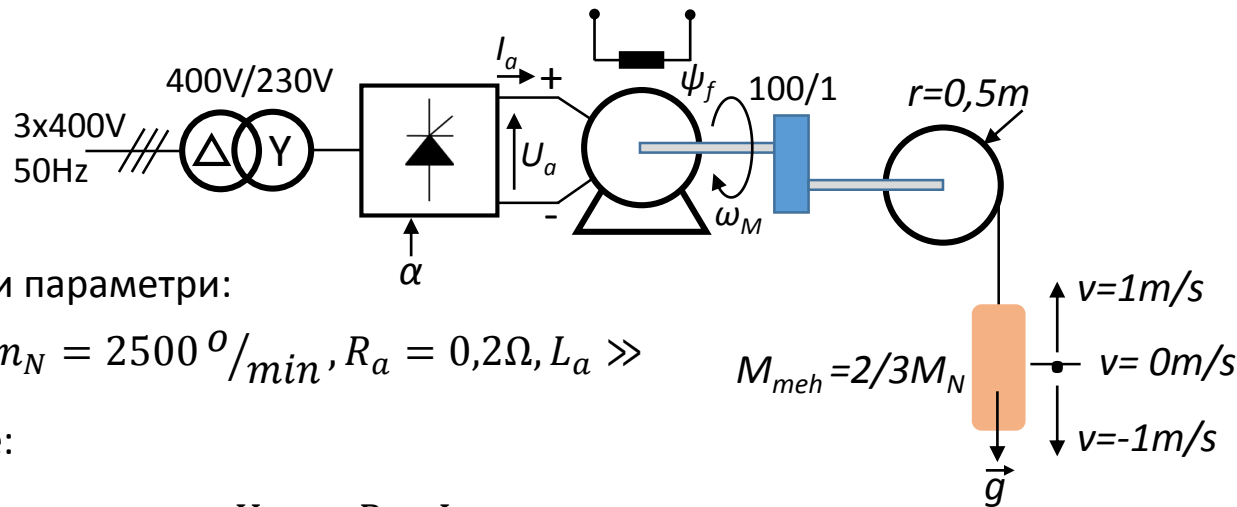
- мрежни трансформатор:



Снажни тиристорски и диодни исправљачи се повезују на електричну мрежу најчешће преко D/Y трансформатора. Основни разлог је што он омогућује једноставну поставку заштите са примарне и секундарне стране у случају појаве тока струје ка земљи. Праг реаговања заштите може бити врло низак. То је први од разлога и зашто се трансформатори ове спреге најшире користе у дистрибутивној мрежи за напајање станбених, пословних и индустријских потрошача. Остале предности су:

- обезбеђује нулти прикључак и прикључак за уземљење који су одвојени од примарног кола
- дозвољава повезивање значајног несиметричног оптерећења на секундару
- трећи хармоник струје примара, који је присутан као део струје магнећења трансформатора, кружи унутар D намотаја. Тиме је обезбеђено да се она не пресликава на секундарни намотај и не тече у нулти вод. Исто важи и за остале непарне хармонике умношка 3.

- пример управљивости - дизалица



$$\omega_M = N \cdot \frac{v}{r} = 200 \text{ rad/s}$$

- називни подаци машине и параметри:

$$U_{aN} = 200V, I_{aN} = 113A, n_N = 2500 \text{ }^{\circ}/\text{min}, R_a = 0,2\Omega, L_a \gg$$

- изведени подаци машине:

$$\omega_N = n_N \cdot \frac{2\pi}{60} = 261,8 \text{ rad/s} \quad \psi_{fN} = \frac{U_{aN} - R_a \cdot I_{aN}}{\omega_N} = 0,68 \text{ Wb}$$

- представа машине једносмерне струје:

$$u_a(t) = R_a \cdot i_a + L_a \cdot \frac{di_a}{dt} + e_a, \quad e_a = \omega_m \cdot \psi_f$$

$$m_{el}(t) = i_a \cdot \psi_f$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = m_{el} - m_{meh}$$

- усрењена представа машине једносмерне струје:

$$U_a = R_a \cdot I_a + E_a, \quad E_a = \omega_m \cdot \psi_f$$

$$M_{el} = I_a \cdot \psi_f$$

$$M_{el} = M_{meh}$$

• пример управљивости - дизалица

- радне тачке машине:

$$1) \uparrow \omega_{m(1)} = +200 \text{ rad/s}, \quad M_{meh} = \frac{2}{3} M_N$$

$$\xrightarrow{\psi_f = \psi_{fN}} I_{a(1)} = \frac{2}{3} I_{aN} = 75,3 \text{ A}$$

$$U_{a(1)} = 0,2 \cdot 75,3 + 200 \cdot 0,68 = 151,1 \text{ V}$$

$$2) \div \omega_{m(2)} = 0 \text{ rad/s}, \quad M_{meh} = \frac{2}{3} M_N$$

$$\xrightarrow{\psi_f = \psi_{fN}} I_{a(2)} = \frac{2}{3} I_{aN} = 75,3 \text{ A}$$

$$U_{a(2)} = 0,2 \cdot 75,3 = 15,1 \text{ V}$$

$$3) \downarrow \omega_{m(3)} = -200 \text{ rad/s}, \quad M_{meh} = \frac{2}{3} M_N$$

$$\xrightarrow{\psi_f = \psi_{fN}} I_{a(3)} = \frac{2}{3} I_{aN} = 75,3 \text{ A}$$

$$U_{a(3)} = 0,2 \cdot 75,3 - 200 \cdot 0,68 = -121,0 \text{ V}$$

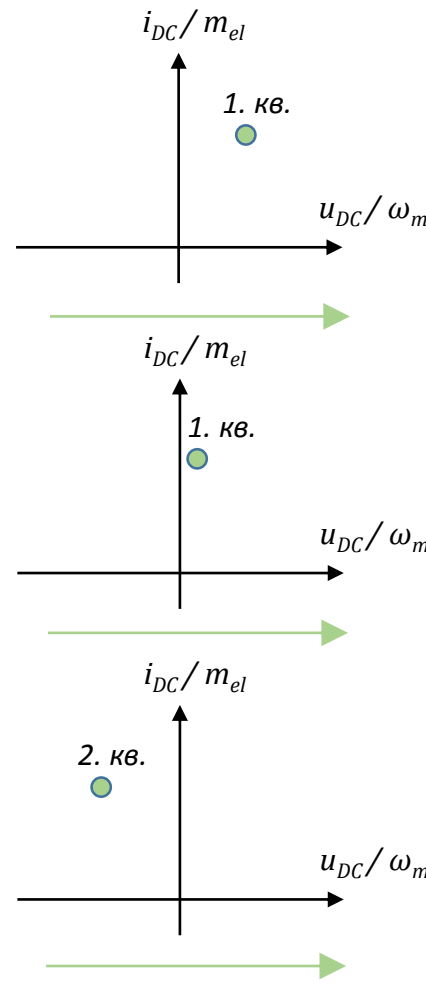
- радне тачке исправљача:

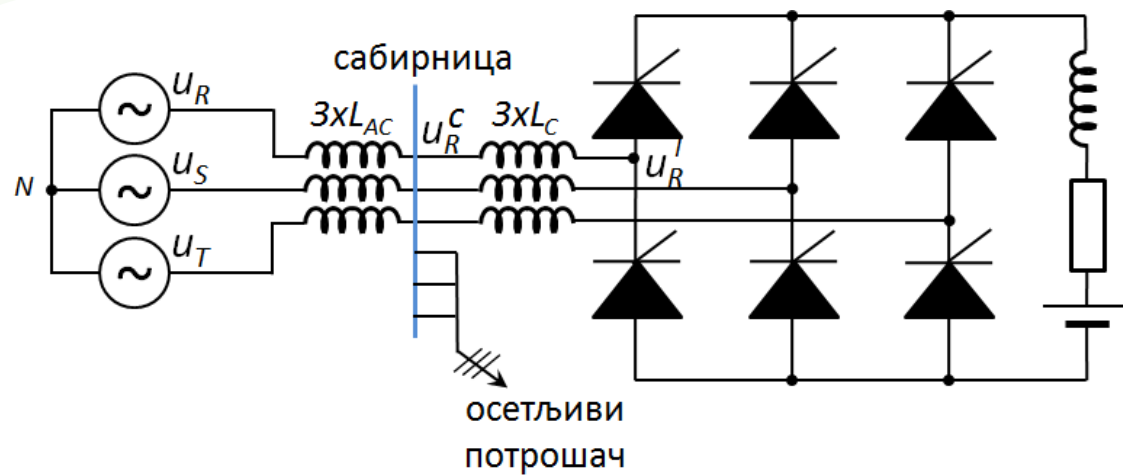
$$U_a = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_l^S \cdot \cos \alpha \Rightarrow \alpha = \arccos \left(\frac{\pi \cdot U_a}{3\sqrt{2} \cdot U_l^S} \right)$$

$$\alpha_{(1)} = \arccos \left(\frac{\pi \cdot 151,1}{3\sqrt{2} \cdot 230} \right) = 1,063 \text{ rad} = 61^\circ$$

$$\alpha_{(2)} = \arccos \left(\frac{\pi \cdot 15,1}{3\sqrt{2} \cdot 230} \right) = 1,522 \text{ rad} = 87^\circ$$

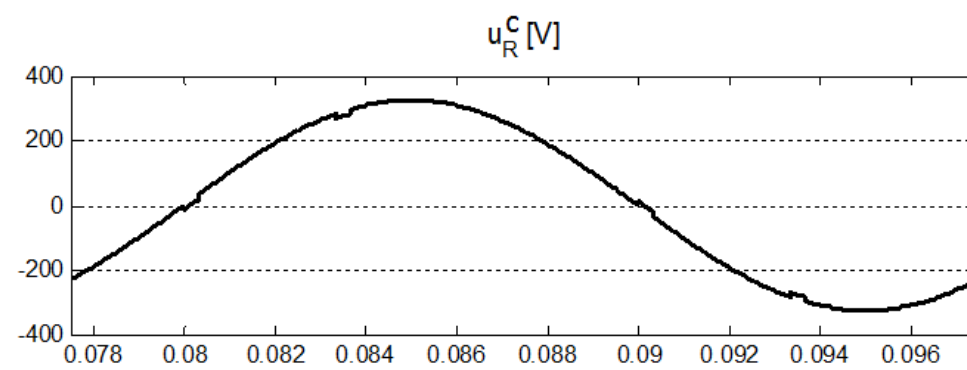
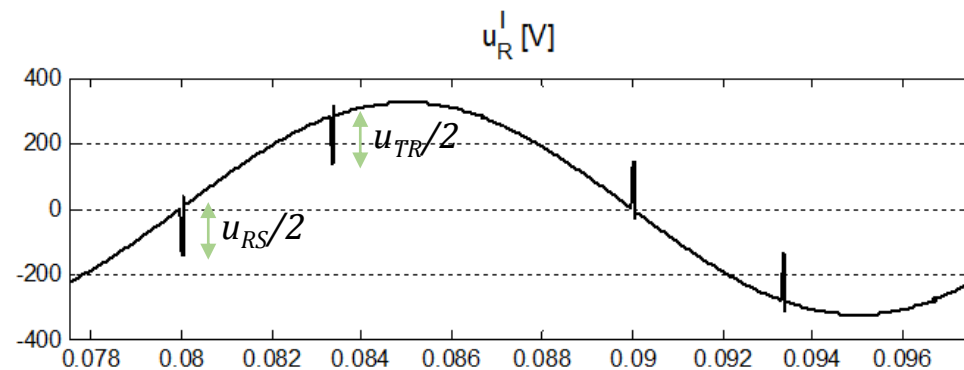
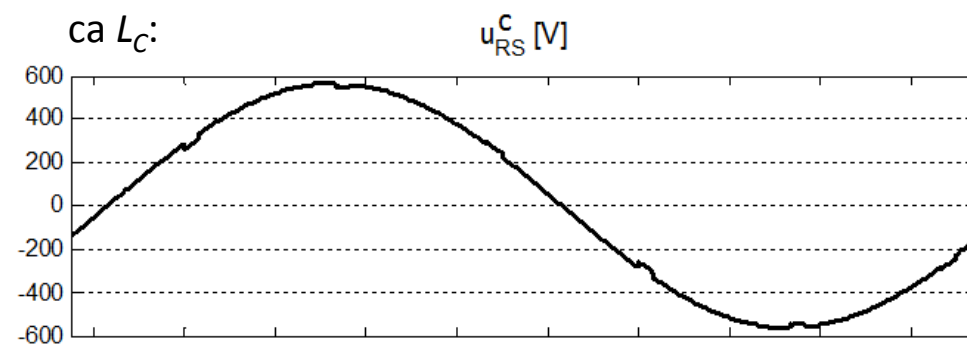
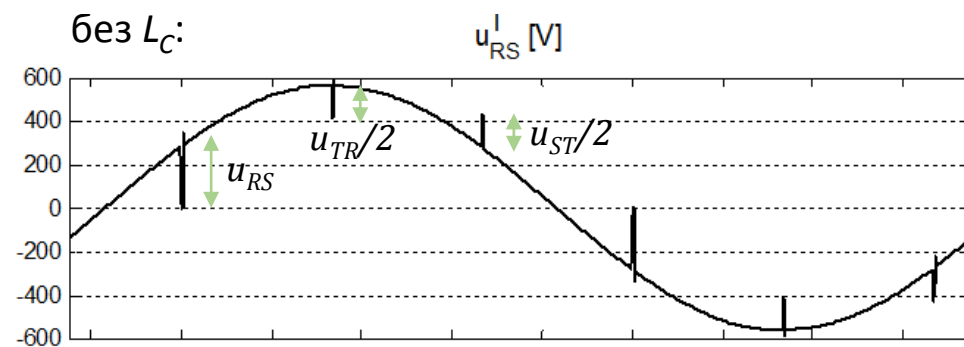
$$\alpha_{(3)} = \arccos \left(-\frac{\pi \cdot 121}{3\sqrt{2} \cdot 230} \right) = 1,971 \text{ rad} = 113^\circ$$



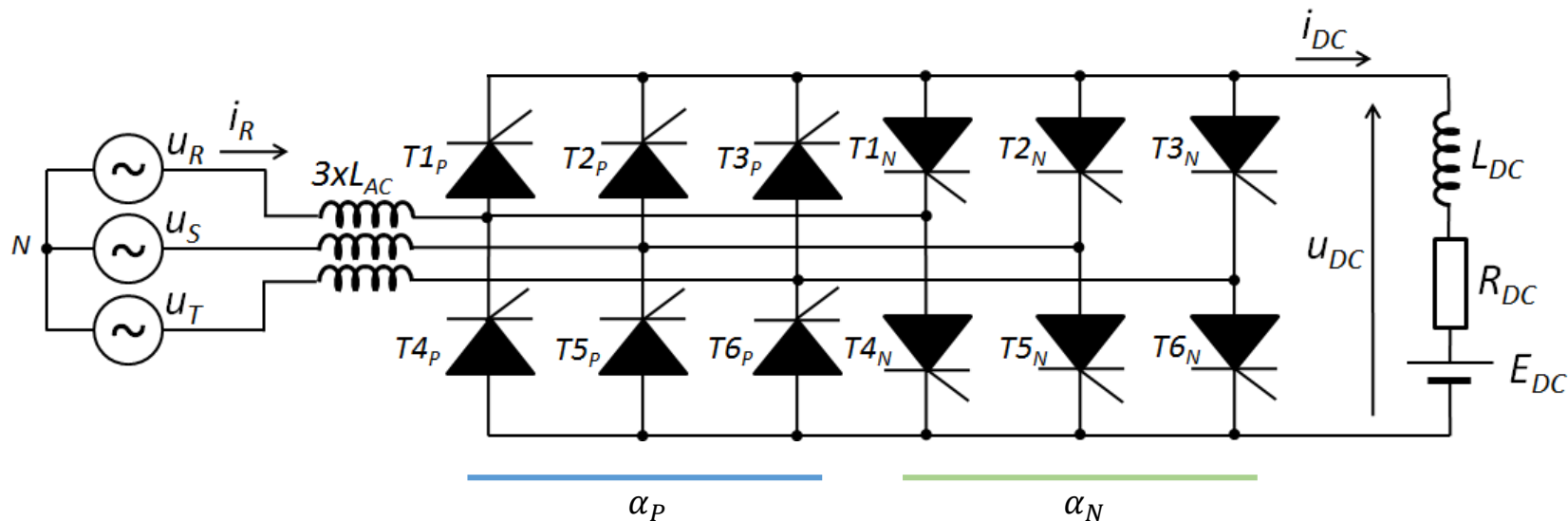


- утицај преклапања и комутационе индуктивности L_C

Индуктивним разделником L_{AC} и L_C дубина пропада је смањена $(L_{AC} + L_C) / L_{AC}$ пута.



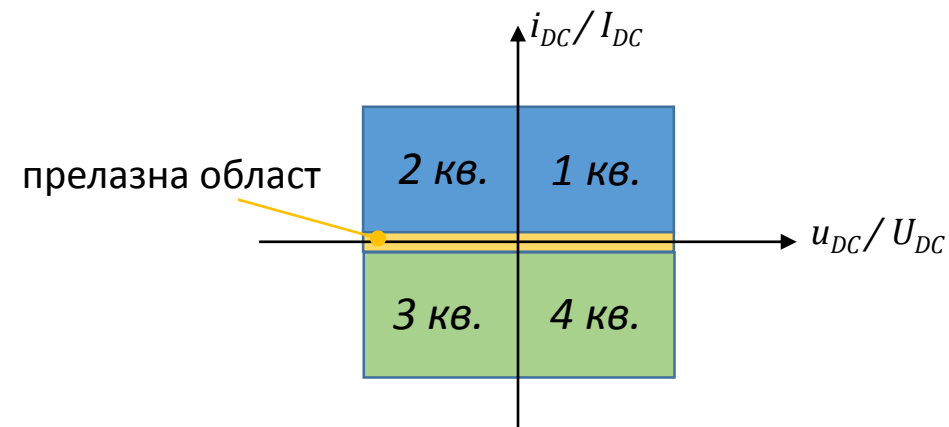
- четвороквадрантни исправљач



Део претварача P ради док је струја потрошача i_{DC} позитивна; део претварача N је неактиван. Када је негативна струја потрошача део N ради, а P део је неактиван.

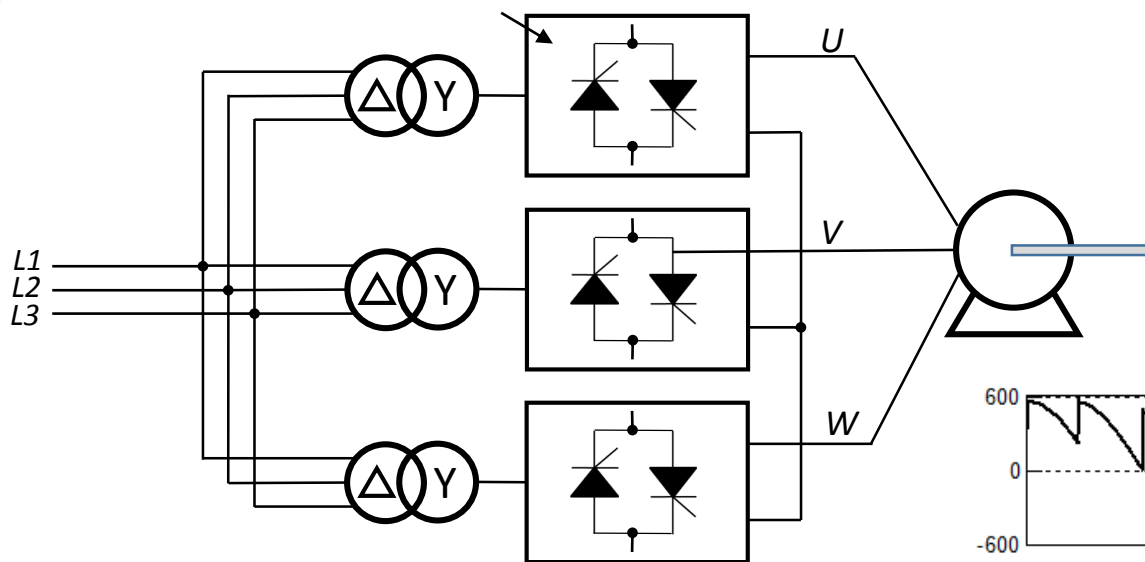
У **прелазној области**, када струја мења знак, потребно је сачекати да се искључи пар тиристора једног од делова, који је проводио, да би се прешло на побуду тиристора другог дела.

У супротном јавља се подржан кратак спој на прикључцима мреже, нпр кроз $T1_P$ и $T2_N$.



4. квадрантни претварач

• циклоконвертор (АС/АС претварач)



Примењују се у погонима великих снага. Када се напаја напоном учестаности 50 Hz, циклоконвертор има горњу граница излазне учестаност око 25Hz.

напајање: $U_L = 3 \times 400V$, $f = 50Hz$; потрошач: $R_U = 1\Omega$, $L_U = 30mH$, $E_U = 212V \angle 0^\circ$ (20Hz)
управљање: $f_\alpha = 20Hz$, $\alpha_{min} = \pi/3$

• управљање U фазом циклоконвертора:

