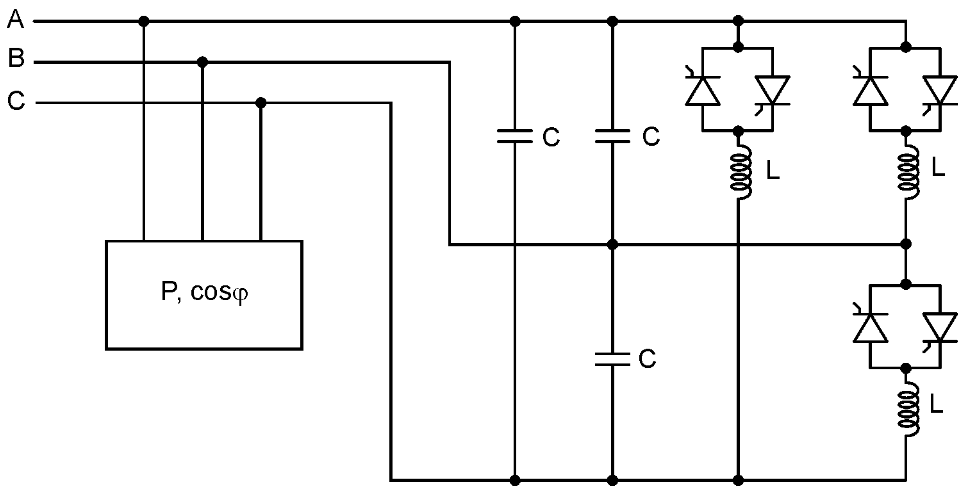
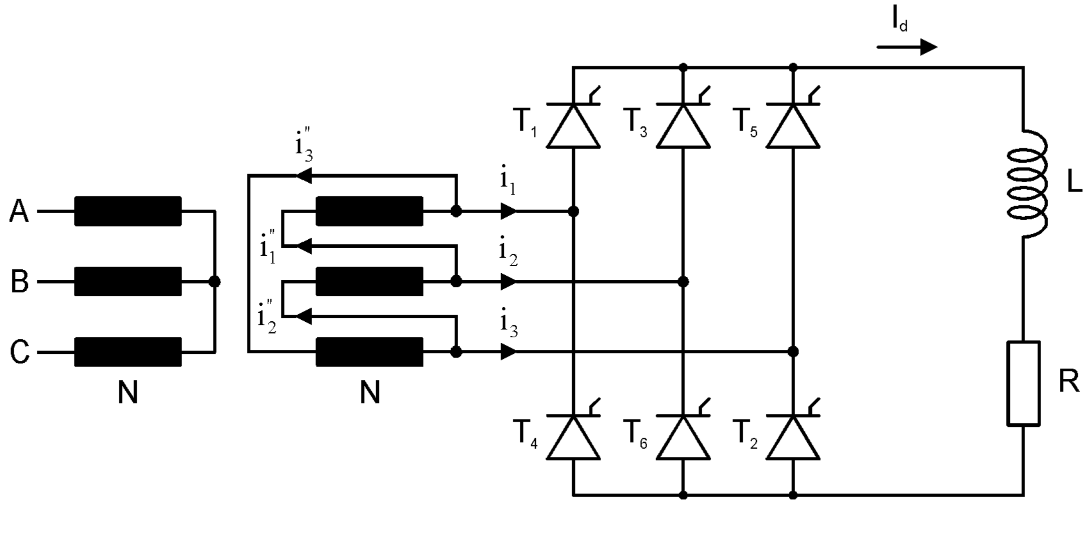
ЕНЕРГЕТСКИ ПРЕТВАРАЧИ 1 фебруар 2014. год.

1. Потрошач снаге $P = 200\text{kW}$ и фактора снаге $cos\varphi = 0.8$ (индуктивно) прикључен је на мрежу 3 x 380 V, 50 Hz. У циљу компензације реактивне снаге, паралелно са потрошачем прикључена је батерија кондензатора капацитивности $C = 3000\ \mu\text{F}$ и компензатор реактивне снаге који се састоји од трофазног фазног регулатора са индуктивним оптерећењем, као на слици. Претходно је само овај компензатор био прикључен на исту мрежу и тада је, при углу управљања $\alpha = 90°$, на његовим крајевима измерена реактивна снага $Q = 353.5$ kvar. Израчунати фактор снаге првог хармоника целог постројења за угао управљања $\alpha = 100°$.



2. Исправљач са слике прикључен је на мрежу, напона 3 x 380 V, 50 Hz. Ефективна вредност струје примара трансформатора је 20 A. На отпорнику R измерена је снага $P = 7.21$ kW, а индуктивност пригушнице L је довољно велика да се може занемарити наизменична компонента струје оптерећења. Одредити угао управљања тиристорима.



Испит траје 2 сата

1. задатак

Фактор снаге првог хармоника целог постројења дат је једначином:

$$\cos\varphi_1 = \frac{P}{\sqrt{\left(Q_{opt} - Q_C + Q_K\right)^2 + P^2}} \tag{1.1}$$

где су:

- Q_{opt} - реактивна снага оптерећења,
- Q_C - реактивна снага батерије кондензатора,
- Q_K - реактивна снага компензатора

При том $\cos\varphi_1$ је индуктиван ако је $Q_{opt} - Q_C + Q_K > 0$, а капацитиван ако је $Q_{opt} - Q_C + Q_K < 0$.

Реактивна снага оптерећења је:

$$Q_{opt} = P \cdot tg\varphi = 200\,\mathrm{kW} \cdot 0.75 = 150\,\mathrm{kVAr} \tag{1.2}$$

Реактивна снага батерије кондензатора је:

$$Q_C = 3\omega CU^2 = 3 \cdot 100\pi \cdot 3 \cdot 10^{-3} \cdot 380^2 = 408.281\,\mathrm{kVAr} \tag{1.3}$$

Реактивна снага компензатора (трофазног фазног регулатора) дата је са:

$$Q_K = 3UI_1 \tag{1.4}$$

где је

I_1 - ефективна вредност првог хармоника фазне струје компензатора.

Потребно је, дакле, одредити први хармоник фазне струје компензатора, тј. потребно је одредити први хармоник струје једног монофазног фазног регулатора (јер овај трофазни фазни регулатор може да се посматра као три монофазна).

Када проводи један од тиристора, важи једначина:

$$\sqrt{2}U\sin\left(\omega t\right) = L\frac{di_{T1,T2}}{dt} \tag{1.5}$$

Решење ове диференцијалне једначине је:

$$i_{T1,T2} = \frac{1}{L}\int\sqrt{2}U\sin\left(\omega t\right)\cdot dt + C = -\frac{\sqrt{2}U}{\omega L}\cos\left(\omega t\right) + C \tag{1.6}$$

Када проводи T$_1$ почетни услов је $i(\alpha)=0$, а када проводи T$_2$ почетни услов је $i(\alpha+\pi)=0$, тј.:

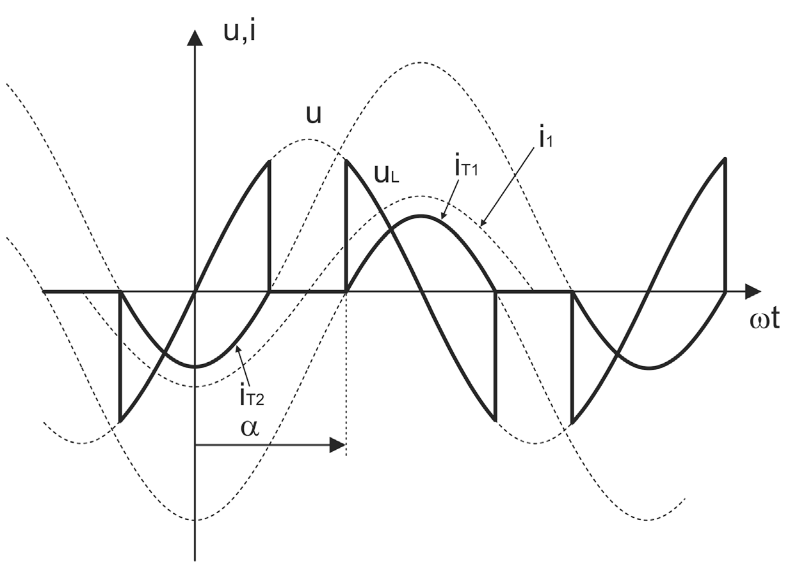
за i_{T1} је

$$i_{T1}(\alpha)=0 \quad \Rightarrow \quad C=\frac{\sqrt{2}U}{\omega L}\cos\alpha \quad \Rightarrow \quad i_{T1}=\frac{\sqrt{2}U}{\omega L}\left(\cos\alpha-\cos(\omega t)\right) \tag{1.7}$$

за i_{T2} је

$$i_{T2}(\alpha+\pi)=0 \quad \Rightarrow \quad C=-\frac{\sqrt{2}U}{\omega L}\cos\alpha \quad \Rightarrow \quad i_{T1}=-\frac{\sqrt{2}U}{\omega L}\left(\cos\alpha+\cos(\omega t)\right) \tag{1.8}$$

Струја фазног регулатора једнака је збиру струја појединих тиристора, што је приказано на доњој слици.



Струје појединих тиристора временски су померене за половину периоде мрежног напона и супротног су знака, што значи да су основни хармоници ових струја фазно померени за 180° и супротног су знака, што значи да су у фази. Због тога је основни хармоник струје једног монофазног фазног регулатора једнак двострукој вредности основног хармоника струје једног тиристора. Струју тиристора можемо представити Фуријеовим редом:

$$i(t)=I_{AVG}+\sum_{k=1}^{\infty}\left[a_k\cos(k\omega t)+b_k\sin(k\omega t)\right] \tag{1.9}$$

Пошто је таласни облик струје тиристора парна функција, сви коефицијенти уз синусни члан су једнаки нули ($b_k=0,\ (k\in N)$). Даље је:

$$a_1=\frac{\sqrt{2}U}{\pi\omega L}\cdot 4\int_{\alpha}^{\pi}(\cos\alpha-\cos x)\cos x\cdot dx=\frac{4\sqrt{2}U}{\pi\omega L}\left[\int_{\alpha}^{\pi}\cos\alpha\cdot\cos x\cdot dx-\int_{\alpha}^{\pi}\cos^2 x\cdot dx\right] \tag{1.10}$$

$$
\begin{aligned}
a_1 &= \frac{4\sqrt{2}U}{\pi\omega L}\left[\cos\alpha\int_{\alpha}^{\pi}\cos x\cdot dx - \int_{\alpha}^{\pi}\frac{1+\cos 2x}{2}dx\right] \\
&= \frac{4\sqrt{2}U}{\pi\omega L}\left[-\sin\alpha\cdot\cos\alpha - \frac{\pi-\alpha}{2} - \frac{1}{4}\left(\sin 2\pi - \sin 2\alpha\right)\right] \\
&= \frac{4\sqrt{2}U}{\pi\omega L}\left[-\frac{\sin 2\alpha}{2} - \frac{\pi-\alpha}{2} + \frac{\sin 2\alpha}{4}\right] = \frac{2\sqrt{2}U}{\omega L}\left[-\frac{\sin 2\alpha}{2\pi} - \frac{\pi-\alpha}{\pi}\right] \\
&= -\frac{2\sqrt{2}U}{\omega L}\left[1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}\right]
\end{aligned}
\tag{1.11}
$$

Ефективна вредност основног хармоника струје монофазног фазног регулатора је:

$$
I_1 = \frac{|a_1|}{\sqrt{2}} = \frac{2U}{\omega L}\left[1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}\right] \tag{1.12}
$$

Потребно је још одредити индуктивност пригушнице, L. Њу одређујемо из услова да је при углу управљања 90° када је само компензатор био прикључен на мрежу, на крајевима компензатора измерена реактивна снага Q = 353.5 kvar. При углу управљања 90°, код фазног регулатора са чисто индуктивним оптерећењем, струја пригушнице постаје непрекидна, тј. имамо ситуацију као да је пригушница директно прикључена на мрежни напон. Због тога је реактивна снага која је измерена на крајевима компензатора при углу управљања 90° једнака:

$$
Q = \frac{3U^2}{\omega L} = 353.5\ \text{kvar} \tag{1.13}
$$

Одавде је:

$$
L = \frac{3U^2}{\omega Q} = 3.9\ \text{mH} \tag{1.14}
$$

Сада је:

$$
I_1 = 241.92\ \text{A} \quad \text{tj.} \quad Q_K = 3UI_1 = 275.79\ \text{kvar} \tag{1.15}
$$

па је коначно:

$$
\cos\varphi_1 = \frac{P}{\sqrt{\left(Q_{opt} - Q_C + Q_K\right)^2 + P^2}} = \frac{200\ \text{kW}}{\sqrt{\left(17.509\ \text{kvar}\right)^2 + \left(200\ \text{kW}\right)^2}} = 0.996\left(ind\right) \tag{1.16}
$$

2. задатак

Пошто је средња вредност напона на пригушници, у устаљеном стању, једнака нули, средња вредност напона на оптерећењу (отпорнику) једнака је средњој вредности напона на излазу исправљача. У поставци задатка је наведено да је индуктивност пригушнице L довољно велика да се може занемарити наизменична компонента струје оптерећења, што значи да је струја кроз оптерећење константна, и једнака количнику средње вредности напона на излазу исправљача и отпорности отпорника:

$$I_d = \frac{U_d}{R} \tag{1.17}$$

Снага која се дисипира на отпорнику је:

$$P = \frac{U_d^2}{R} = I_d \cdot U_d = I_d \cdot \frac{3\sqrt{6}E}{\pi}\cos(\alpha) = I_d \cdot \frac{3\sqrt{6}}{\pi}\frac{U}{3}\cos(\alpha) \tag{1.18}$$

Да би се одредио угао управљања, потребно је прво одредити вредност константне струје оптерећења, јер је снага на отпорнику дата у тексту задатка. Струја оптерећења одређује се помоћу ефективне вредности струје примара трансформатора, која је такође дата у тексту задатка. За одређивање везе између ових струја неопходно је нацртати одговарајуће таласне облике струја. Имајући у виду да однос између ефективне вредности струје примара трансформатора и константне струје оптерећења не зависи од угла управљања, одговарајући таласни облик можемо да нацртамо за било који угао управљања. На следећој страни приказани су таласни облици струја i_1 и i_2, као и струје секундара, $i_1^{''}$, за усвојени угао управљања 30°. Сада је потребно одредити струју кроз један од секундарних намотаја (рецимо, кроз први намотај). С обзиром на усвојене референтне смерове, важи:

$$\begin{aligned} i_1^{''} &= i_1 + i_3^{''} \\ i_2^{''} &= i_2 + i_1^{''} \end{aligned} \tag{1.19}$$

Осим тога, збир струја у троуглу једнак је нули:

$$i_1^{''} + i_2^{''} + i_3^{''} = 0 \tag{1.20}$$

На основу ових једначина добија се:

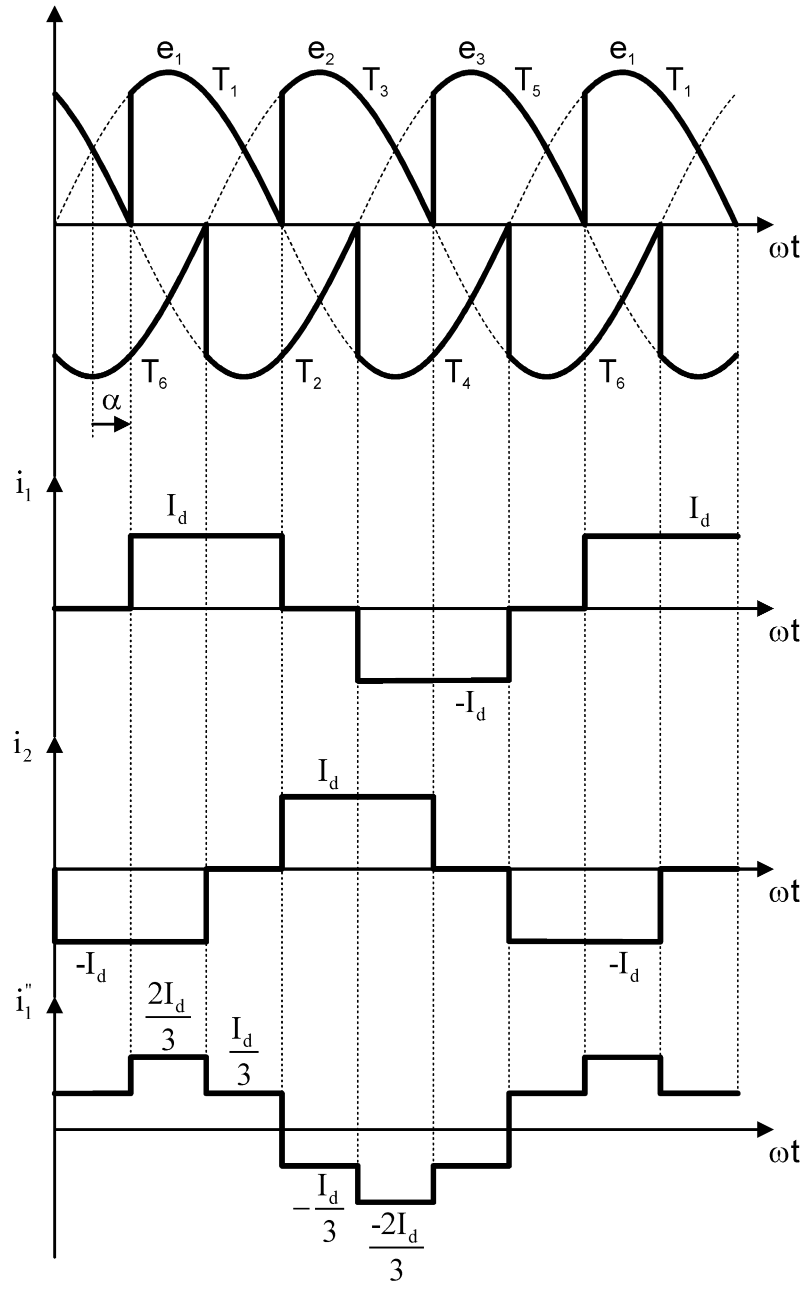
$$i_1^{''} = \frac{1}{3}(i_1 - i_2) \tag{1.21}$$

На основу чега се може нацртати таласни облик ове струје, што је такође приказано на слици на следећој страни. Ефективна вредност струје кроз секундарне намотаје је (према таласном облику):

$$I^{"} = \sqrt{\frac{2}{T}\left(2 \cdot \frac{I_d^2}{9}\frac{T}{6} + \frac{4I_d^2}{9}\frac{T}{6}\right)} = \frac{\sqrt{2}I_d}{3} \tag{1.22}$$

Струја примара, $i_1^{'}$, има исти таласни облик као струја $i_1^{"}$, јер струја $i_1^{"}$ немаједносмерну компоненту, а преносни однос је 1. Према томе, ефективна вредност струје кроз примарне намотаје је:

$$I^{'} = \frac{I^{"}}{m} = \frac{I^{"}}{1} = I^{"} = \frac{\sqrt{2}I_d}{3} \tag{1.23}$$



Струја оптерећења сада је:

$$I_d = \frac{3I^{'}}{\sqrt{2}} = 42.426\,\mathrm{A} \tag{1.24}$$

Коначно, из једначине (2.2) следи:

$$\alpha = \arccos\left(\frac{\pi P}{U I_d \sqrt{6}}\right) = 55^\circ \tag{1.25}$$