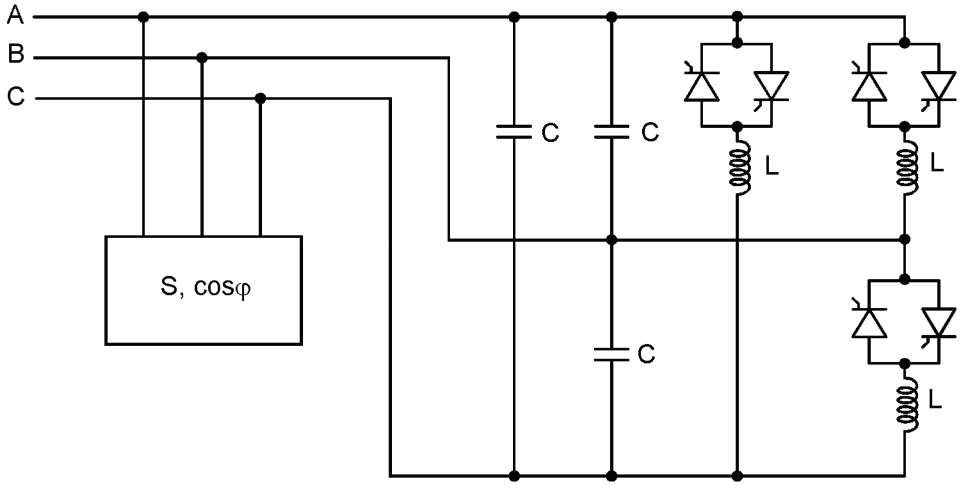
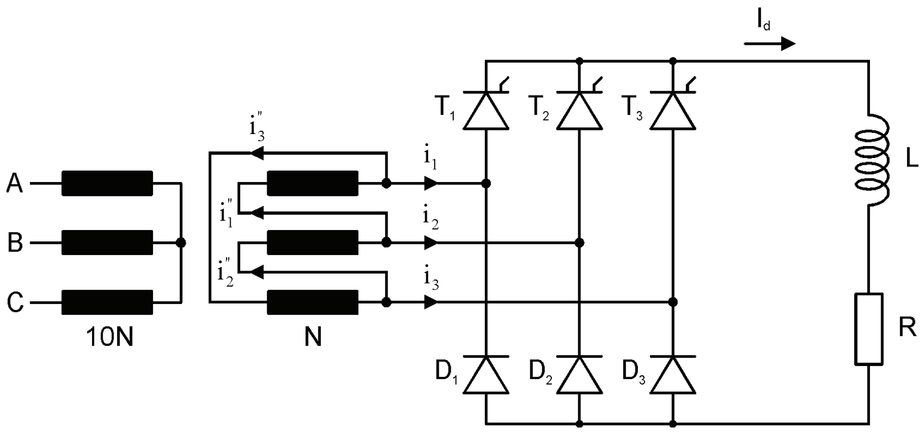
ЕНЕРГЕТСКИ ПРЕТВАРАЧИ 1 октобар 2010. год.

1. Потрошач чија је привидна снага S=1MVA, а фактор снаге cosφ=0.8 (индуктивно) прикључен је на мрежу 3x380V, 50Hz. У циљу компензације реактивне снаге, паралелно са потрошачем прикључена је батерија кондензатора и компензатор реактивне снаге који се састоји од трофазног фазног регулатора са индуктивним оптерећењем L=3.447mH, као на слици. При углу "паљења" тиристора, α=90°, фактор снаге првог хармоника целог постројења био је једнак 1. Ако се привидна снага потрошача повећа на S_1=1.2 MVA а притом његов cosφ остане исти, колики треба да буде угао "паљења" да би фактор снаге првог хармоника целог постројења остао једнак 1 ?



2. Исправљач на слици прикључен је на мрежни напон 3x380V, 50Hz. Отпорност оптерећења је R=0.741Ω, а индуктивност пригушнице L је довољно велика да се може занемарити наизменична компонента струје оптерећења. Одредити ефективну вредност струје примара трансформатора, ако је измерена струја оптерећења I_d=20A.



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 потрошача,
- Q_C - реактивна снага батерије кондензатора,
- Q_K - реактивна снага компензатора

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

Реактивна снага оптерећења је:

$$Q_{opt} = S \cdot \sin\varphi = 1\,\mathrm{MVA} \cdot 0.6 = 600\,\mathrm{kVAr} \tag{1.2}$$

При углу "паљења" тиристора, α=90°, фактор снаге првог хармоника целог постројења је (према услову задатка) једнак 1, тј. при углу "паљења" α=90° важи:

$$Q_{opt} = Q_C - Q_K \tag{1.3}$$

При углу "паљења" од 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 компензатора при углу "паљења" тиристора, α=90°, једнака:

$$Q = \frac{3U^2}{\omega L} = 400\ \mathrm{kVAr} \tag{1.4}$$

То значи да је реактивна снага батерије кондензатора:

$$Q_C = Q_{opt} + Q_K = 1\,\mathrm{MVAr} \tag{1.5}$$

Када се привидна снага потрошача повећа на 1.2 MVA а притом његов cosφ остане исти, реактивна снага потрошача се повећа и износи:

$$Q_{1opt} = S_1 \cdot \sin\varphi = 1.2\,\mathrm{MVA} \cdot 0.6 = 720\,\mathrm{kVAr} \tag{1.6}$$

Да би фактор снаге првог хармоника целог постројења остао једнак 1, реактивна снага компензатора треба да буде:

$$Q_{1K} = Q_C - Q_{1opt} = 280\,\mathrm{kVAr} \tag{1.7}$$

Сада је потребно одредити угао "паљења" тиристора који одговара овој реактивној снази компензатора.

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

$$Q_K = 3UI_1 \tag{1.8}$$

где је:

I_1 - ефективна вредност првог хармоника фазне струје компензатора.

Према томе, потребна ефективна вредност првог хармоника фазне струје компензатора је:

$$I_1 = \frac{Q_{1K}}{3U} = 245.61\,\mathrm{A} \tag{1.9}$$

Сада је потребно одредити зависност првог хармоника фазне струје компензатора од угла "паљења" α, тј. потребно је одредити зависност првог хармоника струје једног монофазног фазног регулатора (јер овај трофазни фазни регулатор може да се посматра као три монофазна) од угла α.

Када проводи један од тиристора, важи једначина:

$$\sqrt{2}U\sin(\omega t) = L\frac{di_{T1,T2}}{dt} \tag{1.10}$$

Решење ове диференцијалне једначине је:

$$i_{T1,T2} = \frac{1}{L}\int\sqrt{2}U\sin(\omega t)\cdot dt + C = -\frac{\sqrt{2}U}{\omega L}\cos(\omega t) + C \tag{1.11}$$

Када проводи T_1 почетни услов је $i(\alpha)=0$, а када проводи T_2 почетни услов је $i(\alpha+\pi)=0$, тј.:

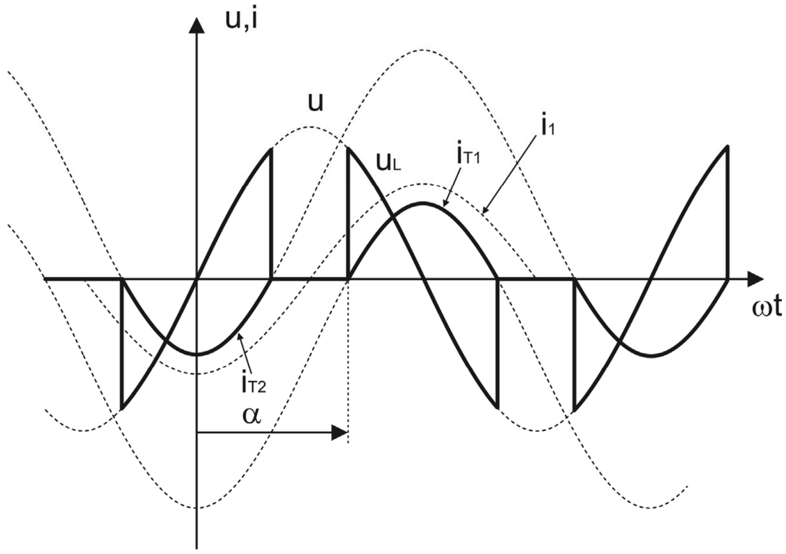
за i_{T1} је

$$i_{T1}(\alpha)=0 \quad\Rightarrow\quad C=\frac{\sqrt{2}U}{\omega L}\cos\alpha \quad\Rightarrow\quad i_{T1}=\frac{\sqrt{2}U}{\omega L}\left(\cos\alpha-\cos(\omega t)\right) \tag{1.12}$$

за i_{T2} је

$$i_{T2}(\alpha+\pi)=0 \quad\Rightarrow\quad C=-\frac{\sqrt{2}U}{\omega L}\cos\alpha \quad\Rightarrow\quad i_{T1}=-\frac{\sqrt{2}U}{\omega L}\left(\cos\alpha+\cos(\omega t)\right) \tag{1.13}$$

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



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:

$$i(t) = I_{AVG} + \sum_{k=1}^{\infty}\left[a_k \cos(k\omega t) + b_k \sin(k\omega t)\right] \tag{1.14}$$

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

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

(1.15)

$$\begin{aligned}
a_1 &= \frac{4\sqrt{2}U}{\pi\omega L}\left[\cos\alpha\int_{\alpha}^{\pi}\cos x\cdot dx - \int_{\alpha}^{\pi}\frac{1+\cos 2x}{2}dx\right] \\
&= \frac{4\sqrt{2}U}{\pi\omega L}\left[-\sin\alpha\cdot\cos\alpha - \frac{\pi-\alpha}{2} - \frac{1}{4}(\sin 2\pi - \sin 2\alpha)\right] \\
&= \frac{4\sqrt{2}U}{\pi\omega L}\left[-\frac{\sin 2\alpha}{2} - \frac{\pi-\alpha}{2} + \frac{\sin 2\alpha}{4}\right] = \frac{2\sqrt{2}U}{\omega L}\left[-\frac{\sin 2\alpha}{2\pi} - \frac{\pi-\alpha}{\pi}\right] \\
&= -\frac{2\sqrt{2}U}{\omega L}\left[1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}\right]
\end{aligned} \tag{1.16}$$

$a_1^{'}$ - је амплитуда основног хармоника струје монофазног фазног регулатора.

Ефективна вредност основног хармоника струје монофазног фазног регулатора је:

$$I_1 = \frac{\left|a_1^{'}\right|}{\sqrt{2}} = \frac{2U}{\omega L}\left[1-\frac{\alpha}{\pi}+\frac{\sin 2\alpha}{2\pi}\right] = 245.61\,\mathrm{A} \tag{1.17}$$

Из претходне једначине добија се трансцедентна једначина:

$$\sin\left(2\alpha\right) = 2\alpha - 4.0842 \tag{1.18}$$

чијим се решавањем добија:

$$\alpha = 1.811 \text{ rad} \Leftrightarrow 103.76^{\circ} \tag{1.19}$$

2. задатак

Да бисмо одредили ефективну вредност струје примара трансформатора, потребно је нацртати одговарајуће таласне облике, за шта нам треба угао паљења тиристора. 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 задтка 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:

$$I_d = \frac{U_d}{R} = \frac{1}{R}\cdot\frac{3\sqrt{6}E}{2\pi}\left(1+\cos\left(\alpha\right)\right) = \frac{1}{R}\cdot\frac{3\sqrt{6}U}{2\pi 10\cdot 3}\left(1+\cos\left(\alpha\right)\right) \tag{2.1}$$

где је:

E- фазни напон у колу секундара трансформатора.

Одавде је угао паљења:

$$\alpha = \arccos\left(\frac{20\pi R I_d}{\sqrt{6}U}-1\right) = 90^{\circ} \tag{2.2}$$

Сада можемо да нацртамо одговарајуће таласне облике напона и линијских струја секундара. Ови таласни облици дати су на слици на следећој страни. Сада је потребно одредити струју кроз секундарне намотаје трансформатора. С обзиром на усвојене референтна смерове, важи:

$$\begin{aligned} i_1^{''} &= i_1 + i_3^{''} \\ i_2^{''} &= i_2 + i_1^{''} \end{aligned} \tag{2.3}$$

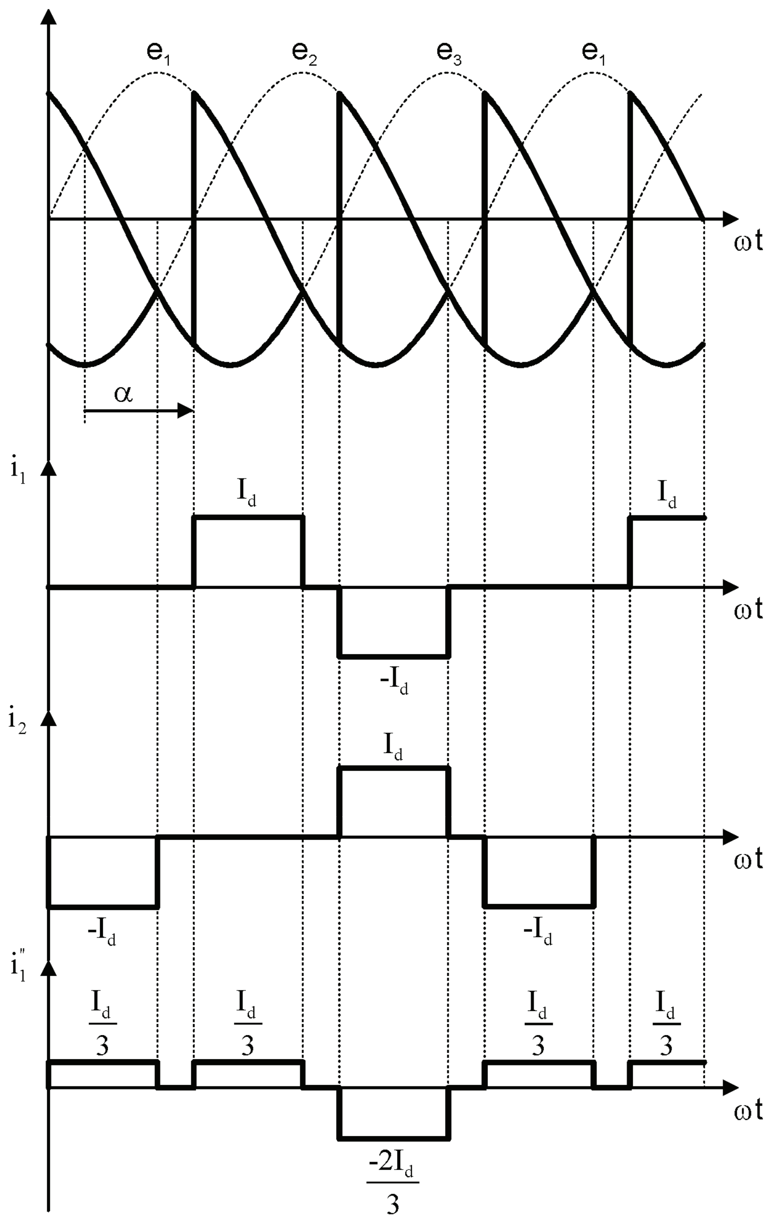
Осим тога, збир струја у троуглу једнак је нули:

$$i_1^{''} + i_2^{''} + i_3^{''} = 0 \tag{2.4}$$

На основу ових једначина добија се:

$$i_1^{''} = \frac{1}{3}\left(i_1 - i_2\right) \tag{2.5}$$

На основу чега се може нацртати таласни облик ове струје, што је приказано на следећој слици.



Ефективна вредност струје кроз секундарне намотаје је (према горњој слици):

$$I^{"} = \sqrt{\frac{1}{T}\left(2\cdot\frac{I_d^2}{9}\frac{T}{4}+\frac{4I_d^2}{9}\frac{T}{4}\right)} = \frac{I_d}{\sqrt{6}} = 8.165\,\mathrm{A} \tag{2.6}$$

Ефективна вредност струје кроз примарне намотаје је:

$$I^{'} = \frac{I^{"}}{m} = 816.5\,\mathrm{mA} \tag{2.7}$$