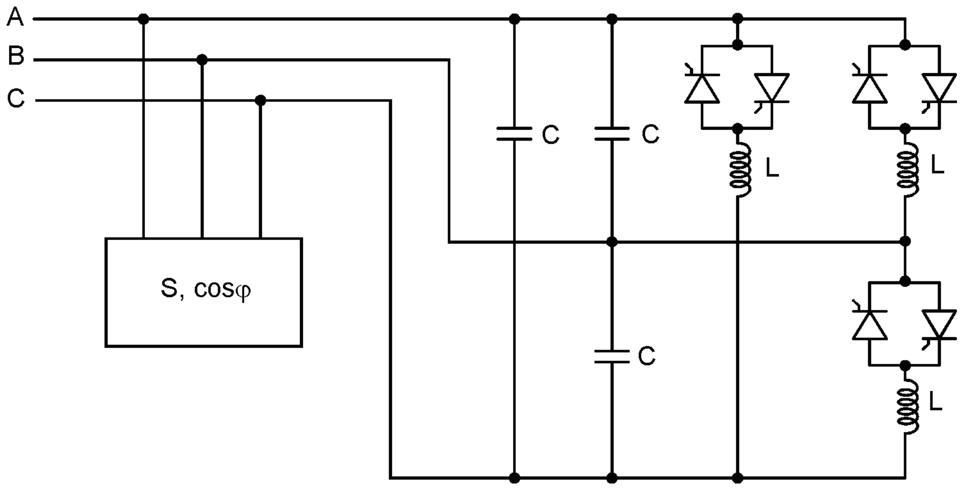
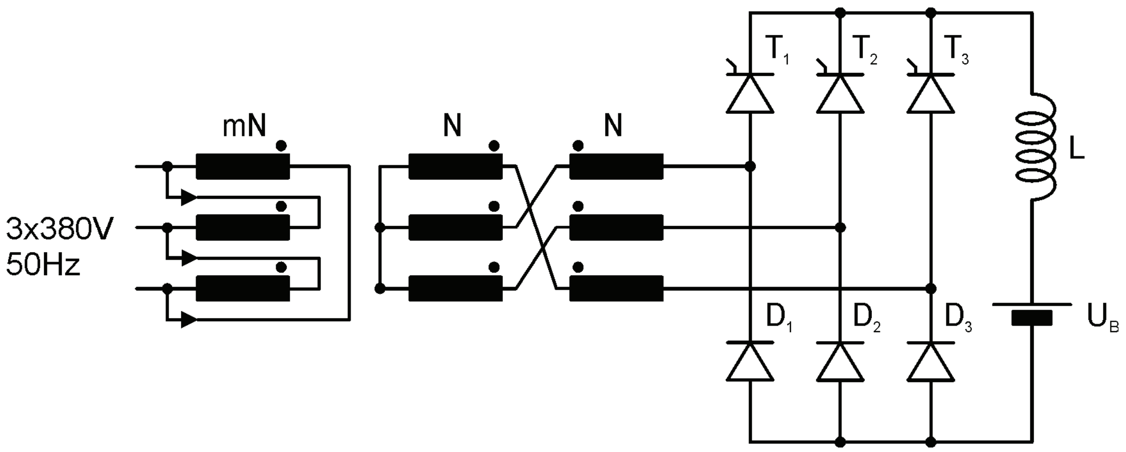
ЕНЕРГЕТСКИ ПРЕТВАРАЧИ 1 јануар 2011. год.

1. Потрошач чија је привидна снага S_1=500kVA и фактор снаге cosφ=0.8 (индуктивно) прикључен је на мрежу 3x380V, 50Hz. У циљу компензације реактивне снаге, паралелно са потрошачем прикључена је батерија кондензатора капацитета C=6000μF и компензатор реактивне снаге који се састоји од трофазног фазног регулатора са индуктивним оптерећењем, 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_2=900kVA, а његов cosφ остане исти, колики треба да буде угао "паљења" тиристора да би фактор снаге првог хармоника целог постројења остао једнак 1?



2. Акумулаторска батерија чији се напон мења у границама од U_{Bmin}=45V до U_{Bmax}=65V пуни се помоћу исправљача приказаног на слици. Струја пуњења батерије је I_d=100A, а индуктивност расипања трансформатора је L_k=2mH. Одредити преносни однос трансформатора, m, ако је познато да је трансформатор димензионисан на минимално потребну снагу.



Испит траје 2 сата

1. задатак

Фактор снаге првог хармоника целог постројења дат је једначином:

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

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 $Q_{opt} - Q_C + Q_K > 0$, 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:

$$Q_{1opt} = S_1 \cdot \sin\varphi = 500\,\text{kVA} \cdot 0.6 = 300\,\text{kVAr} \qquad (1.2)$$

Реактивна снага батерије кондензатора је:

$$Q_C = 3\omega CU^2 = 3 \cdot 100\pi \cdot 6 \cdot 10^{-3} \cdot 380^2 = 816.563\,\text{kVAr} \qquad (1.3)$$

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:

$$Q_{1K} = Q_C - Q_{1opt} = 516.563\,\text{kVAr} \qquad (1.4)$$

При углу "паљења" α=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:

$$Q_{1K} = \frac{3U^2}{\omega L} = 516.563\,\text{kVAr} \qquad (1.5)$$

Одавде се може добити индуктивност пригушнице L фазног регулатора:

$$L = 2.67\,\text{mH} \qquad (1.6)$$

Ако се привидна снага потрошача повећа на S_2=900kVA, а његов cosφ остане исти, реактивна снага потрошача ће да се повећа и биће:

$$Q_{2opt} = S_2 \cdot \sin\varphi = 900\,\text{kVA} \cdot 0.6 = 540\,\text{kVAr} \qquad (1.7)$$

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

$$Q_{2K} = Q_C - Q_{2opt} = 276.563\ \mathrm{kVAr} \tag{1.8}$$

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

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

$$Q_K = 3UI_1 \tag{1.9}$$

где је:

I_1 - ефективна вредност првог хармоника фазне струје компензатора.

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

$$I_1 = \frac{Q_{2K}}{3U} = 242.6\ \mathrm{A} \tag{1.10}$$

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:

$$\sqrt{2}U\sin(\omega t) = L\frac{di_{T1,T2}}{dt} \tag{1.11}$$

Решење ове диференцијалне једначине је:

$$i_{T1,T2} = \frac{1}{L}\int \sqrt{2}U\sin(\omega t)\cdot dt + C = -\frac{\sqrt{2}U}{\omega L}\cos(\omega t) + C \tag{1.12}$$

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

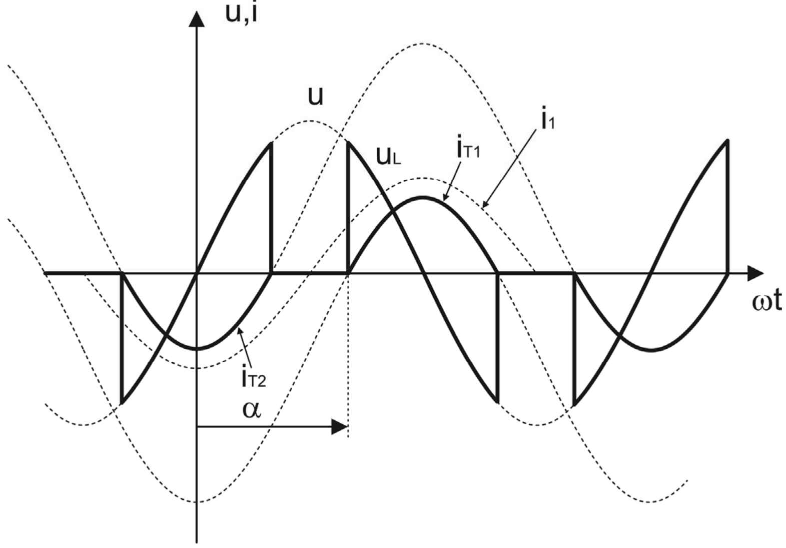
за i_{T1} је

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

за i_{T2} је

$$i_{T2}(\alpha + \pi) = 0 \quad\Rightarrow\quad C = -\frac{\sqrt{2}U}{\omega L}\cos\alpha \quad\Rightarrow\quad i_{T1} = -\frac{\sqrt{2}U}{\omega L}\left(\cos\alpha + \cos(\omega t)\right) \tag{1.14}$$

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:

$$i(t) = I_{AVG} + \sum_{k=1}^{\infty} \left[a_k \cos(k\omega t) + b_k \sin(k\omega t) \right] \tag{1.15}$$

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

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

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{4\sqrt{2}U}{\pi\omega L}\left[\cos\alpha\int_{\alpha}^{\pi}\cos x \cdot dx - \int_{\alpha}^{\pi}\frac{1+\cos 2x}{2}dx\right] \\ &= \frac{4\sqrt{2}U}{\pi\omega L}\left[-\sin\alpha\cdot\cos\alpha - \frac{\pi-\alpha}{2} - \frac{1}{4}(\sin 2\pi - \sin 2\alpha)\right] \\ &= \frac{4\sqrt{2}U}{\pi\omega L}\left[-\frac{\sin 2\alpha}{2} - \frac{\pi-\alpha}{2} + \frac{\sin 2\alpha}{4}\right] = \frac{2\sqrt{2}U}{\omega L}\left[-\frac{\sin 2\alpha}{2\pi} - \frac{\pi-\alpha}{\pi}\right] \\ &= -\frac{2\sqrt{2}U}{\omega L}\left[1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}\right] \end{aligned} \tag{1.17}$$

a_1 - је амплитуда основног хармоника струје монофазног фазног регулатора.
Ефективна вредност основног хармоника струје монофазног фазног регулатора је:

$$I_1 = \frac{|a_1|}{\sqrt{2}} = \frac{2U}{\omega L}\left[1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}\right] = 242.6\,\mathrm{A} \tag{1.18}$$

Из претходне једначине добија се трансцедентна једначина:

$$\sin\left(2\alpha\right) = 2\alpha - 4.6 \tag{1.19}$$

чијим се решавањем добија:

$$\alpha \approx 1.9535\ \mathrm{rad} \Leftrightarrow 111.92^{\circ} \tag{1.20}$$

2. задатак

Имајући у виду да у овом случају пуњач ради у непрекидном режиму рада, средња вредност напона на излазу исправљача мора у устаљеном стању да буде једнака напону батерије:

$$U_B = \frac{3\sqrt{6}E}{2\pi}\left(1+\cos\alpha\right) - \frac{3X_k I_d}{\pi} \tag{2.1}$$

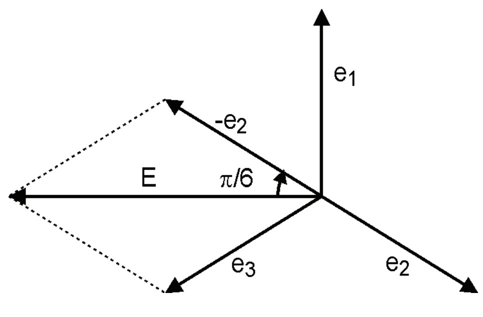
Односно:

$$E\left(1+\cos\alpha\right) = \left(U_B + \frac{3X_k I_d}{\pi}\right)\frac{2\pi}{3\sqrt{6}} \tag{2.2}$$

Када се батерија максималног напона пуни максималном струјом, тада пуњач ради са минималним углом паљења, α_{min}. Из претходног израза се види да ће усвајањем веће вредности за угао α_{min}, за исти напон батерије бити потребан већи напон на секундару трансформатора, а самим тим и већа снага трансформатора. Према томе, потребна снага трансформатора је минимална ако се усвоји да је α_{min}=0. У том случају фазни напон на крајевима секундара је:

$$E = \left(U_{B\max} + \frac{3X_k I_d}{\pi}\right)\frac{\pi}{3\sqrt{6}} = 53.44 \text{ V} \tag{2.3}$$

Веза између ефективне вредности напона на једном полунамотају секундара трансформатора, E_s, и ефективне вредности фазног напона секундара, E, може да се одреди помоћу фазорског дијаграма на следећој слици.



Са претходне слике се види да важи:

$$E = 2E_S \cdot \cos\frac{\pi}{6} = \sqrt{3}E_S \quad \Rightarrow \quad E_S = \frac{E}{\sqrt{3}} = 30.85 \text{ V} \tag{2.4}$$

Према томе, тражени преносни однос је:

$$m = \frac{380 \text{ V}}{30.85 \text{ V}} = 12.31 \tag{2.5}$$