Musterlösung EÜN
Energiefernübertragung mit einer HGÜ-Anlage

Beiblatt 3:

a) Zur Bestimmung von I_d Leistungsbilanz aufstellen:

$$P_{2,\mathrm{ab}} = -U_{\mathrm{di}\alpha 2} \cdot I_\mathrm{d} + I_\mathrm{d}^2 \cdot Z_\mathrm{X}$$

$-U_{\mathrm{di}\alpha 2} \cdot I_\mathrm{d}$ ist die Leistung, die die HGÜ übertragen würde, wenn mit Z_X ein Verlust an Wirkleistung verbunden wäre, wie bei einem klassischen ohmschen Widerstand. Z_X modelliert jedoch nur den Verlust an Spannung beim Kommutieren. In $-U_{\mathrm{di}\alpha 2}$ ist der Spannungsabfall über Z_X enthalten. Durch die Multiplikation mit I_d wird aus dem Spannungsabfall eine Verlustleistung. Da diese nicht existiert, wird sie über $I_\mathrm{d}^2 \cdot Z_\mathrm{X}$ wieder hinzu addiert.

Die dadurch entstehende quadratische Gleichung hat folgende Lösungen:

$$I_\mathrm{d} = \frac{1}{2}\frac{U_{\mathrm{di}\alpha 2}}{Z_\mathrm{X}} \pm \sqrt{\left(\frac{1}{2}\frac{U_{\mathrm{di}\alpha 2}}{Z_\mathrm{X}}\right)^2 + \frac{P_{2,\mathrm{ab}}}{Z_\mathrm{X}}}$$

mit

$$U_{\mathrm{di}\alpha 2} = 2 \cdot 1,35 \cdot U_{\mathrm{L2}} \cdot \cos(\alpha_2).$$

Die gültige Lösung ist $I_\mathrm{d} = 3178\,A$.

b) Maschen aufstellen:

$$\begin{aligned} U_{\mathrm{d}\alpha 2} &= U_{\mathrm{di}\alpha 2} - I_\mathrm{d}(Z_\mathrm{X} + R_\mathrm{k}) = -473,0\,kV \\ U_{\mathrm{d}\alpha 1} &= -U_{\mathrm{d}\alpha 2} + I_\mathrm{d}(R_\mathrm{d} + R_\mathrm{L}) = 536,7\,kV \end{aligned}$$

c) Leistungsbilanz aufstellen:

$$\begin{aligned} P_{1,\mathrm{zu}} &= P_{2,\mathrm{ab}} + P_{\mathrm{Verlust}} \\ &= P_2 + I_\mathrm{d}^2 \cdot (R_\mathrm{k} + R_\mathrm{d} + R_\mathrm{L} + R_\mathrm{k}) \\ &= 1708,6\,MW \end{aligned}$$

d) $U_{\mathrm{di}\alpha 1}$ über Masche ausrechnen:

$$\begin{aligned} U_{\mathrm{di}\alpha 1} &= 2 \cdot 1,35 \cdot U_{\mathrm{L1}} \cdot \cos(\alpha_1) \\ &= U_{\mathrm{d}\alpha 1} + I_\mathrm{d} \cdot (R_\mathrm{k} + Z_\mathrm{X}) \\ U_{\mathrm{L1}} &= \frac{U_{\mathrm{d}\alpha 1} + I_\mathrm{d} \cdot (R_\mathrm{k} + Z_\mathrm{X})}{2 \cdot 1,35 \cdot \cos(\alpha_1)} \\ &= 210,6\,kV \end{aligned}$$

e) Blindleistung entsteht bei HGÜ-Anlagen durch die Zündverschiebung, die Kommutierung und die Oberschwingungen. Zündverschiebung und Kommutierung sind in der Grundschwingungsblindleistung Q_1 berücksichtigt. Die Oberschwingungen werden separat in der Verzerrungsblindleistung D berücksichtigt.

<u>Grundschwingungsblindleistung Q_1</u>

$$\begin{aligned} Q_1 &= P_{1,\mathrm{zu}} \cdot \tan(\varphi_1) = 586,2\,\mathrm{MVar} \\ \cos(\varphi_1) &= \cos(\alpha_1) - \frac{Z_\mathrm{X} \cdot I_\mathrm{d}}{U_{\mathrm{di1}}}, \text{ mit } U_{\mathrm{di1}} = 2 \cdot 1,35 \cdot U_{\mathrm{L1}} \\ \varphi_1 &= 18,94^\circ \end{aligned}$$

Verzerrungsblindleistung D

Die Verzerrungsblindleistung wird aus der Differenz zwischen Gesamtleiterstrom und Grundschwingungsleiterstrom berechnet.

$$D = \sqrt{3} \cdot U_{\mathrm{L1}} \cdot \sqrt{I_{\mathrm{L}}^2 - I_{\mathrm{L1}}^2}$$

Wird die Berechnung auf der Unterspannungsseite (US) des Transformators durchgeführt, dann muss $\ddot{u}$ nicht betrachtet werden. Dafür muss jedoch die tatsächliche Spannung U_{L1} betrachtet werden.

$$I_{\mathrm{L1,US}} = \frac{2 \cdot \sqrt{6}}{\pi} \cdot I_{\mathrm{d}} = 4996\,A$$

Für den Gesamtleiterstrom muss beachtet werden, dass die einzelnen Ströme nicht einfach addiert werden ($I = I_1 + I_{11} + I_{13} + ...$) können, da sie Effektivwerte darstellen. Für sinusförmige Ströme wird der Effektivwert wie folgt gebildet:

$$I_{\mathrm{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_t^{t+T} \left(\hat{I} \cdot \sin(\omega t + \varphi)\right)^2 dt}$$

Für die Addition mehrere Oberschwingungen gilt dann:

$$I_{\mathrm{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T_1} \cdot \int_t^{t+T} \left(\hat{I}_1 \cdot \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + \hat{I}_{11} \cdot \sin(\omega_{11} t + \varphi_{11}) + ...\right)^2 dt}$$

Die Multiplikation von verschiedenen Oberschwingungen führt im Integral immer auf den Wert Null, wie ausführlich im Skript begründet. Daher gilt:

$$I_{\mathrm{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T_1} \cdot \int_t^{t+T} \left(\hat{I}_1 \cdot \sin(\omega_1 t + \varphi_1)\right)^2 + \left(\hat{I}_{11} \cdot \sin(\omega_{11} t + \varphi_{11})\right)^2 + ...\, dt}$$

Dies führt dann auf

$$\begin{aligned} I_{\mathrm{eff}} &= \sqrt{\frac{\left(\sqrt{2} \cdot I_1\right)^2}{2\pi} \cdot \int_t^{t+2\pi} \left(\sin(\omega_1 t + \varphi_1)\right)^2 + \left(\frac{1}{11} \cdot \sin(\omega_{11} t + \varphi_{11})\right)^2 + ...\, dt} \\ &= \sqrt{\frac{2I_1^2}{2\pi} \cdot \left(\pi + \frac{1}{11^2} \cdot \pi + ...\right)} \\ &= I_{\mathrm{L1}} \cdot \sqrt{\left(1 + \frac{1}{11^2} + ...\right)}. \end{aligned}$$

Insgesamt folgt dann für die 12-pulsige Anlage:

$$\begin{aligned} I_{\mathrm{L,US}} &= \sqrt{\sum_{\mathrm{i}} I_{\mathrm{Li,US}}^2} \text{ bei 12-pulsiger Anlage: i=1,11,13,23,25,...} \\ &= \sqrt{I_{\mathrm{L1,US}}^2 + I_{\mathrm{L11,US}}^2 + I_{\mathrm{L13,US}}^2 + I_{\mathrm{L23,US}}^2 + I_{\mathrm{L25,US}}^2 + ...} \\ &= I_{\mathrm{L1,US}} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{1}{11}\right)^2 + \left(\frac{1}{13}\right)^2 + \left(\frac{1}{23}\right)^2 + \left(\frac{1}{25}\right)^2 + ...} \\ &\approx 1{,}01 \cdot I_{\mathrm{L1,US}} \end{aligned}$$

Daraus folgt:

$$D = \sqrt{3} \cdot U_{\mathrm{L1,US}} \cdot \sqrt{I_{\mathrm{L,US}}^2 - I_{\mathrm{L1,US}}^2} = 256{,}7\,\mathrm{MVar}.$$

Um die gesamte Blindleistung zu ermitteln müssen die einzelnen Komponenten addiert werden. Auch hier gilt aufgrund der Effektivwerte dass die Addition $Q = Q_1 + D$ ungültigt ist. Vielmehr gilt:

$$Q = \sqrt{Q_1^2 + D^2} = 639{,}94\,\mathrm{MVar}$$

f) Winkelbetrachtung
Kritischer bei Wechselrichter. Wird der Zündwinkel zu groß, so kann der Thyristor die wenig später über ihm anliegende positive Spannung nicht sperren.

Es muss gelten:

$$\begin{aligned} \pi - \alpha - u &> \omega \cdot t_\mathrm{c} \\ \alpha_{\mathrm{max,WR}} &= \pi - u - \omega \cdot t_\mathrm{c} \\ &= \pi - u - \omega \cdot 2t_\mathrm{q} \end{aligned}$$

Nun muss der Überlappungswinkel u berechnet werden:

$$\begin{aligned} I_\mathrm{d} &= \frac{\sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot U_0}{2\,\omega\,L_\mathrm{k}} \cdot [\cos(\alpha) - \cos(\alpha + u)] \\ \Leftrightarrow \cos(\alpha + u) &= \cos(\alpha) - \frac{I_\mathrm{d} \cdot 2\,\omega\,L_\mathrm{k}}{\sqrt{2} \cdot U_\mathrm{L}} \end{aligned}$$

L_k kann aus Z_X berechnet werden:

$$L_\mathrm{k} = \frac{Z_\mathrm{X}}{2 \cdot 6 \cdot f} = 11{,}67\,\mathrm{mH}$$

$$\Rightarrow \cos(\alpha + u) = -0{,}8776 \Rightarrow u = 8{,}27^\circ.$$

$$\Rightarrow \pi - \alpha - u = 0{,}501\,rad > 2 \cdot \omega \cdot t_\mathrm{q}$$

$$t_\mathrm{q} < \frac{0{,}501\,rad}{2 \cdot \omega} = 800\,\mu s$$

Die Thyristoren dürfen also höchstens eine Freiwerdezeit von $800\,\mu$s aufweisen.