

Energiefernübertragung mit einer HGÜ-Anlage

Es soll eine HGÜ-Anlage zur Energieübertragung über eine Entfernung von 1300 km projektiert werden. Die Anlage ist beidseitig als 12-pulsiger Stromrichter aufgebaut. **Bild 1** zeigt die Ersatzschaltung der Übertragungsstrecke. Der Stromrichter 2 soll eine Leistung von $P_{2,ab} = 1500$ MW in das Drehstromnetz übertragen.

Die folgenden Daten der Anlage sind bekannt:

$$Z_X = 7 \, \Omega$$

$$L_d = 300 \, \text{mH}$$

$$R_L = 20 \, \Omega$$

$$R_d = 50 \, \text{m}\Omega$$

$$R_k = 0,3 \, \Omega$$

$$L_L = 1 \, \text{mH/km}$$

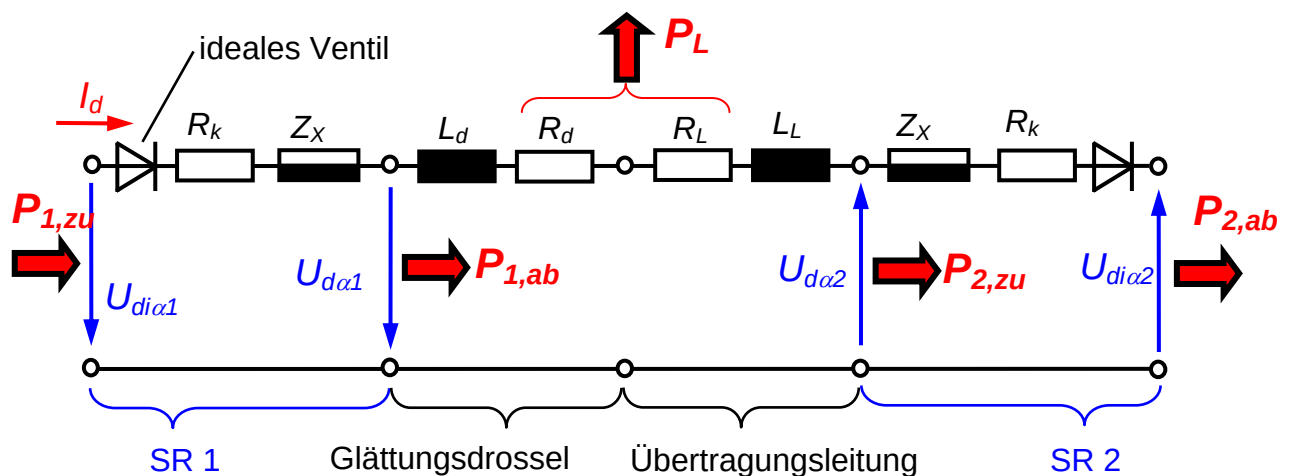


Bild 1: Ersatzschaltung der HGÜ

- Berechnen Sie den erforderlichen Gleichstrom I_d wenn der Wechselrichter (SR2) mit einem Steuerwinkel von $\alpha_2 = 143^\circ$ arbeitet und die Leiterspannung auf der Drehstromseite $U_L = 208,6$ kV beträgt.
- Berechnen Sie die Spannung $U_{d\alpha 2}$ an den Gleichstromklemmen des Stromrichters SR2 und wie groß ist die notwendige Ausgangsspannung $U_{d\alpha 1}$ des Gleichrichters?
- Welche Ausgangsleistung $P_{1,zu}$ muss der Gleichrichter liefern, damit 1500 MW in das Drehstromnetz der Station 2 eingespeist werden können?
- Welche Netzspannung müssen die Stromrichtertransformatoren auf der Gleichrichterseite liefern, wenn der Gleichrichter mit einem Steuerwinkel von $\alpha_1 = 10^\circ$ betrieben wird?
- Welche Blindleistung benötigt der Gleichrichter im o.g. Betriebspunkt?
- Welche Freierdezeit dürfen die Thyristoren des Wechselrichters höchstens aufweisen um im o.g. Betriebspunkt eingesetzt werden zu können?

Musterlösung EÜN

Energiefernübertragung mit einer HGÜ-Anlage

Beiblatt 3:

- a) Zur Bestimmung von I_d Leistungsbilanz aufstellen:

$$P_{2,ab} = -U_{di\alpha 2} \cdot I_d + I_d^2 \cdot Z_X$$

$-U_{di\alpha 2} \cdot I_d$ 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 $-U_{di\alpha 2}$ 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 $I_d^2 \cdot Z_X$ wieder hinzu addiert.

Die dadurch entstehende quadratische Gleichung hat folgende Lösungen:

$$I_d = \frac{1}{2} \frac{U_{di\alpha 2}}{Z_X} \pm \sqrt{\left(\frac{1}{2} \frac{U_{di\alpha 2}}{Z_X}\right)^2 + \frac{P_{2,ab}}{Z_X}}$$

mit

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

Die gültige Lösung ist $I_d = 3178 \text{ A}$.

- b) Maschen aufstellen:

$$U_{d\alpha 2} = U_{di\alpha 2} - I_d(Z_X + R_k) = -473,0 \text{ kV}$$

$$U_{d\alpha 1} = -U_{d\alpha 2} + I_d(R_d + R_L) = 536,7 \text{ kV}$$

- c) Leistungsbilanz aufstellen:

$$\begin{aligned} P_{1,zu} &= P_{2,ab} + P_{\text{Verlust}} \\ &= P_2 + I_d^2 \cdot (R_k + R_d + R_L + R_k) \\ &= 1708,6 \text{ MW} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} U_{di\alpha 1} &= 2 \cdot 1,35 \cdot U_{L1} \cdot \cos(\alpha_1) \\ &= U_{d\alpha 1} + I_d \cdot (R_k + Z_X) \\ U_{L1} &= \frac{U_{d\alpha 1} + I_d \cdot (R_k + Z_X)}{2 \cdot 1,35 \cdot \cos(\alpha_1)} \\ &= 210,6 \text{ kV} \end{aligned}$$

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

Grundschiwungsblindleistung Q_1

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

Verzerrungsblindleistung D

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

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

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

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

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

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

Für die Addition mehrere Oberschwingungen gilt dann:

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

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

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

Dies führt dann auf

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

Insgesamt folgt dann für die 12-pulsige Anlage:

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

Daraus folgt:

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

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

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

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:

$$\begin{aligned}\pi - \alpha - u &> \omega \cdot t_c \\ \alpha_{\max, \text{WR}} &= \pi - u - \omega \cdot t_c \\ &= \pi - u - \omega \cdot 2t_q\end{aligned}$$

Nun muss der Überlappungswinkel u berechnet werden:

$$\begin{aligned}I_d &= \frac{\sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot U_0}{2 \omega L_k} \cdot [\cos(\alpha) - \cos(\alpha + u)] \\ \Leftrightarrow \cos(\alpha + u) &= \cos(\alpha) - \frac{I_d \cdot 2 \omega L_k}{\sqrt{2} \cdot U_L}\end{aligned}$$

L_k kann aus Z_X berechnet werden:

$$\begin{aligned}L_k &= \frac{Z_X}{2 \cdot 6 \cdot f} = 11,67 \text{ mH} \\ \Rightarrow \cos(\alpha + u) &= -0,8776 \Rightarrow u = 8,27^\circ \\ \Rightarrow \pi - \alpha - u &= 0,501 \text{ rad} > 2 \cdot \omega \cdot t_q \\ t_q &< \frac{0,501 \text{ rad}}{2 \cdot \omega} = 800 \mu\text{s}\end{aligned}$$

Die Thyristoren dürfen also höchstens eine Freiwerdezeit von $800 \mu\text{s}$ aufweisen.