Musterlösung EÜN
FACTS-Betriebsmittel

Beiblatt 4

4.1 Paralleles FACTS Bebtriebsmittel: FC-TCR

a) T_1 und T_2 sperren, also ist nur die Kapazität C wirksam. Die gesamte Schaltung ist laut Aufgabenstellung in Sternschaltung ausgeführt. Daher gilt:

$$\underline{S} = 3 \cdot \underline{U}_0 \cdot \underline{I}^*$$
$$\underline{U}_0 = \frac{U_\mathrm{N}}{\sqrt{3}}$$
$$\underline{I} = \frac{\underline{U}_0}{\underline{Z}} \text{ mit } \underline{Z} = \frac{1}{j\omega C} \Rightarrow \underline{I} = \frac{U_\mathrm{N}}{\sqrt{3}} \cdot j\omega C$$
$$\Rightarrow \underline{S} = 3 \cdot \frac{U_\mathrm{N}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{U_\mathrm{N}}{\sqrt{3}} \cdot (-j\omega C) = -j \cdot U_\mathrm{N}^2 \cdot \omega C = j \cdot Q_\mathrm{C}$$

Q_C ist die Blindleistung die die Schaltung bei sperrenden Ventilen aufnimmt. Die Stromrichtung in Bild 1 zeigt, dass die Schaltung im Verbraucherzählsystem zu betrachten ist. Ziel ist es, induktive Blindleistung ins Netz zu liefern, was gleichzeitig heißt, dass kapazitive Blindleistung bezogen wird (kapazitive Last/induktive Quelle). Da der FC-TCR weder Wirkleistung liefert, noch bezieht, sind beide Aussagen gültig. Beide Fälle führen zu der Bedingung $Q < 0$.
Daher muss hier gelten: Q_C=-0,377 MVar.
Somit ergibt sich

$$C = \frac{-Q_\mathrm{C}}{U_\mathrm{N}^2 \cdot \omega} = 3\,\mu F.$$

b) Nun gilt: $\alpha = 0°$, d.h. die Thyristoren wirken wie Dioden und die Induktivität L ist voll wirksam. Somit ergibt sich eine Parallelschaltung von L und C. Es bietet sich an, die Blindleistung der beiden Elemente getrennt zu berechnen und anschließend zu der gemeinsamen Blindleistung $Q_\text{FC-TCR}$ zu addieren:

$$Q_\text{FC-TCR} = Q_\mathrm{C} + Q_\mathrm{L}$$

Aus Aufgabenteil a) ist bekannt: Q_C=-0,377 MVar. Nach außen hin soll nun eine kapazitive Blindleistung von 0,377 MVar abgegeben werden, was der Aufnahme von 0,377 MVar induktiver Blindleistung entspricht. Es gilt also: $Q_\text{FC-TCR}$=+0,377 MVar. Der FC-TCR wirkt nun wie eine induktive Last bzw. eine kapazitive Quelle.
Somit ergibt sich:

$$Q_\mathrm{L} = Q_\text{FC-TCR} - Q_\mathrm{C} = 0,754\,\mathrm{MVar}$$
$$= \frac{U_\mathrm{N}^2}{\omega L}$$

Für die Induktivität ergibt sich damit:

$$L = \frac{U_\mathrm{N}^2}{Q_\mathrm{L} \cdot \omega} = 1,69\,H$$

4.2 Serielles FACTS-Betriebsmittel: TCSC

a) Als Längsspannungsabfall ΔU_l bezeichnet man den Spannungsabfall, der exakt in Richtung der am Ende der Leitung anliegenden Spannung liegt, siehe Abbildung 4.1. Der Längsspannungsabfall hat somit den dominierenden Ein-

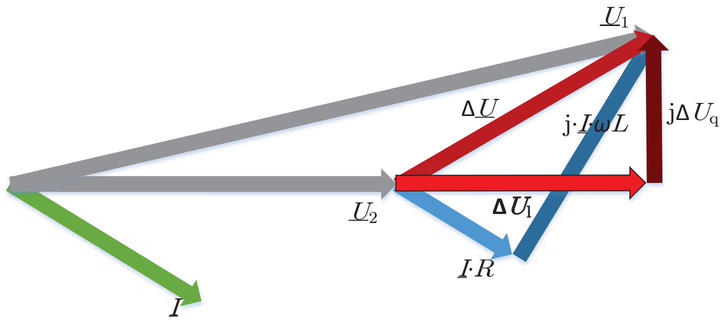

***Abb. 4.1:** Zeigerdiagramm zur Herleitung des Längsspannungsabfalls*

fluss auf den Betrag der Spannung $\underline{U}_1$, wobei sich der orthogonale Querspannungsabfall $\Delta\underline{U}_\mathrm{q}$ vorallem auf den Übertragungswinkel auswirkt. Mit Hilfe des Zeigerdiagramms lässt sich folgender Zusammenhang herstellen.

$$\begin{aligned}\Delta\underline{U} &= R\cdot I\cdot\cos(\phi) - j\cdot R\cdot I\cdot\sin(\phi) + X\cdot I\cdot\sin(\phi) + j\cdot X\cdot I\cdot\cos(\phi)\\ &= I\cdot[(R\cdot\cos(\phi) + X\cdot\sin(\phi)) + j(-R\cdot\sin(\phi) + X\cdot\cos(\phi))]\\ &= \Delta U_\mathrm{l} + j\cdot\Delta U_\mathrm{q}\end{aligned}$$

Abbildung 4.2 erläutert das Auftreten des Minus-Zeichens beim Querspannungsabfall. Damit gilt für den Längsspannungsabfall entsprechend der Aufgabenstellung:

$$\Delta U_\mathrm{l} = I\,(R\cdot\cos(\phi) + X\cdot\sin(\phi)) = 0$$

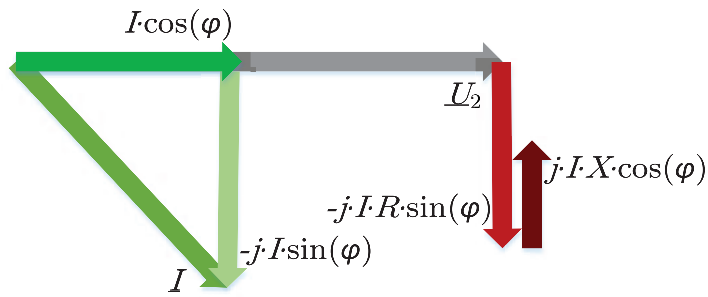

***Abb. 4.2:** Zeigerdiagramm zur Herleitung des Querspannungsabfalls*

In diesem Fall gilt für den ohmschen Widerstand $R = R_\mathrm{L}$. Die Reaktanz setzt sich aus der Reaktanz der Leitung und der Reaktanz des TCSC zusammen.

$$X = X_\mathrm{L} + X_\mathrm{TCSC}$$

Bedingung für die vollständige Kompensation ist damit:

$$\Delta U_\mathrm{l} = I\,(R_\mathrm{L}\cdot\cos(\phi) + (X_\mathrm{L} + X_\mathrm{TCSC})\cdot\sin(\phi)) = 0$$

Daraus folgt für die zu bestimmende Reaktanz des TCSC:

$$X_{\mathrm{TCSC}} = \frac{-R_{\mathrm{L}} \cdot \cos(\phi)}{\sin(\phi)} - X_{\mathrm{L}}$$
$$= \frac{-R_{\mathrm{L}}}{\tan(\phi)} - X_{\mathrm{L}}$$

Die betragsmäßig kleinste negative Reaktanz weist der TCSC auf, wenn nur die Kapazität wirksam ist. Eine kleinere Reaktanz kann kapazitiv nicht erreicht werden, größere Reaktanzen sind über den Steuerwinkel β problemlos realisierbar. Daher muss bei der Auslegung des Kondensators überprüft werden, welche betragsmäßig kleinste negative Reaktanz benötigt wird. Für diese muss dann gelten:

$$X_{\mathrm{TCSC}} = -\frac{1}{\omega C}$$

Daraus folgt:

$$C = \frac{1}{\omega \cdot \frac{R_{\mathrm{L}}}{\tan(\phi)} + X_{\mathrm{L}}}$$

Für den gegebenen Bereich von $\cos(\phi)$ muss nun untersucht werden, wann die betragsmäßig kleinste negative Reaktanz benötigt wird. Diese legt dann den minimalen Wert der Kapazität fest. Hier liegt der Winkel ϕ zwischen 18,19° und 45,57°. In diesem Bereich ist der $\tan(\phi)$ monoton wachsend. Daher ergeben größere Winkel auch größere Kapazitäten. Die größte Kapazität wird also bei einem Leistungsfaktor von 0,7 benötigt, hier gilt C=129 μF. Zum Vergleich, bei einem Leistungsfaktor von 0,95 würde nur eine Kapazität von 41,7 μF benötigt. Allerdings wäre die Reaktanz dieser Kapazität dann zu groß, um die Kompensation des kleineren $\cos(\phi)$ zu realisieren.

b) Bezieht der Verbraucher die maximal mögliche Wirkleistung, so wird auch der Leistungsfaktor sein Maximum erreichen. Dieses beträgt hier 0,95. Nun wird eine höhere Reaktanz zur Kompensation benötigt, daher muss mit Hilfe der Thyristoren ein Teil des Stroms über die parallele Induktivität geleitet werden. Anhand der Dimensionierungsvorschrift wird nun zuerst die Induktivität L bestimmt, gefolgt vom Steuerwinkel β.
Es gilt mit $\cos(\phi)$=0,95:

$$X_{\mathrm{TCSC}} = \frac{-R_{\mathrm{L}}}{\tan(\phi)} - X_{\mathrm{L}} = -110,92\,\Omega$$

Weiterhin gilt:

$$\left|\frac{X_{\mathrm{C}}}{X_{\mathrm{L}}}\right| = \frac{\frac{1}{\omega C}}{\omega L} = 3...6$$

Dies führt auf

$$L = \frac{1}{3...6} \cdot \frac{1}{\omega^2 C}$$

Da eine größere Induktivität stets auch mit höheren Kosten verbunden sein wird, wird hier $\left|\frac{X_\mathrm{C}}{X_\mathrm{L}}\right| = 6$ gewählt, um eine kleinstmögliche Induktivität verwenden zu können. Somit gilt:

$$L = \frac{1}{6} \cdot \frac{1}{\omega^2 C} = 31,3\,mH$$

Aus dem Verhältnis $\frac{X_\mathrm{TCSC}}{X_\mathrm{C}}$ kann nun mit Bild 3 der Winkel β bestimmt werden:

$$\begin{aligned}\frac{X_\mathrm{TCSC}}{X_\mathrm{C}} &= \frac{-110,62\,\Omega}{\frac{1}{\omega C}} \\ &= -1,87\end{aligned}$$

Durch Ablesen aus dem Diagramm in Bild 3 erhält man β=28°.