

Beispiel für parallele FACTS: FC-TCR (Thyristor Controlled Reactor)

Ein FC-TCR wird parallel zum 20-kV-Netz (50 Hz) geschaltet. Der FC-TCR ist als Sternschaltung ausgeführt. **Bild 1** zeigt das einphasige Schaltbild.

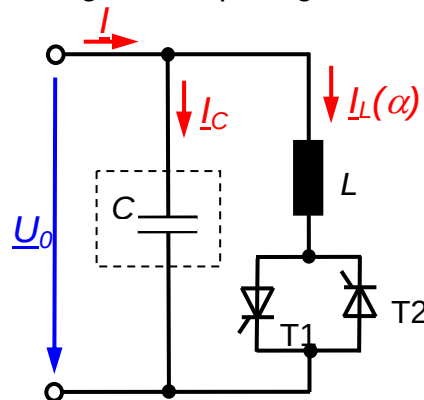


Bild 1: Schaltung des FC-TCR

- Bestimmen Sie die Kapazität C so, dass bei sperrenden Ventilen $T1$ und $T2$ eine induktive Blindleistung von $-0,377$ MVar durch den 3-phasigen FC-TCR geliefert werden kann.
- Für den Fall, dass der FC-TCR mit einem Steuerwinkel von $\alpha = 0^\circ$ betrieben wird, soll die erreichbare kapazitive Kompensationsleistung $0,377$ MVar betragen. Bestimmen Sie die erforderliche Induktivität der Drossel L .

Beispiel für serielle FACTS: TCSC (Thyristor Controlled Series Capacity)

Eine 100 km lange 110-kV-Freileitung soll einen Verbraucher versorgen, dessen Leistungsfaktor $\cos(\varphi)$ zwischen 0,7 (ind.) und 0,95 (ind.) variieren kann. Um die Stabilität der Leitung zu erhöhen, soll die Blindleistung der Leitung mit einem TCSC kompensiert werden.

Folgende Daten der Anlage sind bekannt:

Netz:	$f = 50$ Hz	$U_N = 110$ kV
Leitung :	$R' = 0,25$ Ω/km	$L' = 1,1$ mH/km

- Bestimmen Sie die notwendige Kapazität des TCSC, um eine vollständige Kompensation des Längsspannungsabfalls an der Leitung mit dem gegebenen $\cos(\varphi)$ der Last zu ermöglichen.
- Welche Induktivität ist erforderlich, damit der Längsspannungsabfall an der Leitung vollständig kompensiert wird für den Fall, dass der Verbraucher die maximal mögliche Wirkleistung aufnimmt? Das Verhältnis X_C/X_L soll dabei in einem Wertebereich zwischen 3 und 6 liegen und die Induktivität soll möglichst kostengünstig in der Herstellung sein. Bestimmen Sie mit Hilfe von **Bild 3** den Steuerwinkel β , mit dem die Thyristoren des TCSC angesteuert werden müssen.

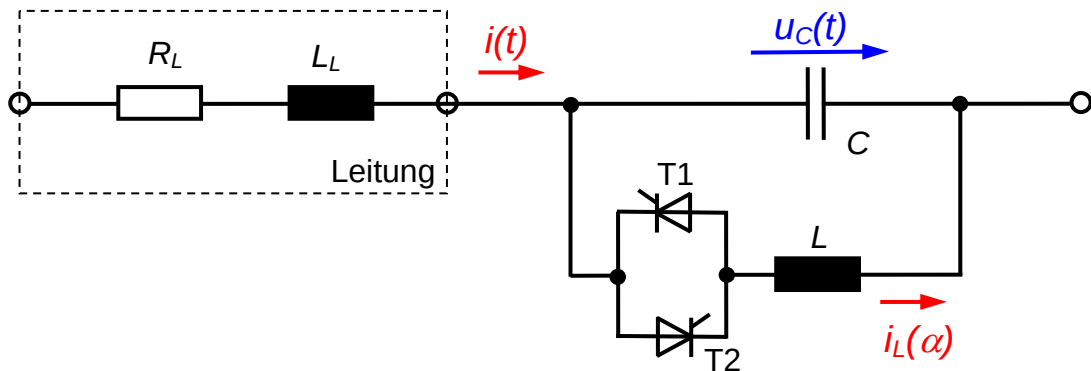


Bild 2: Schaltung eines TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor)

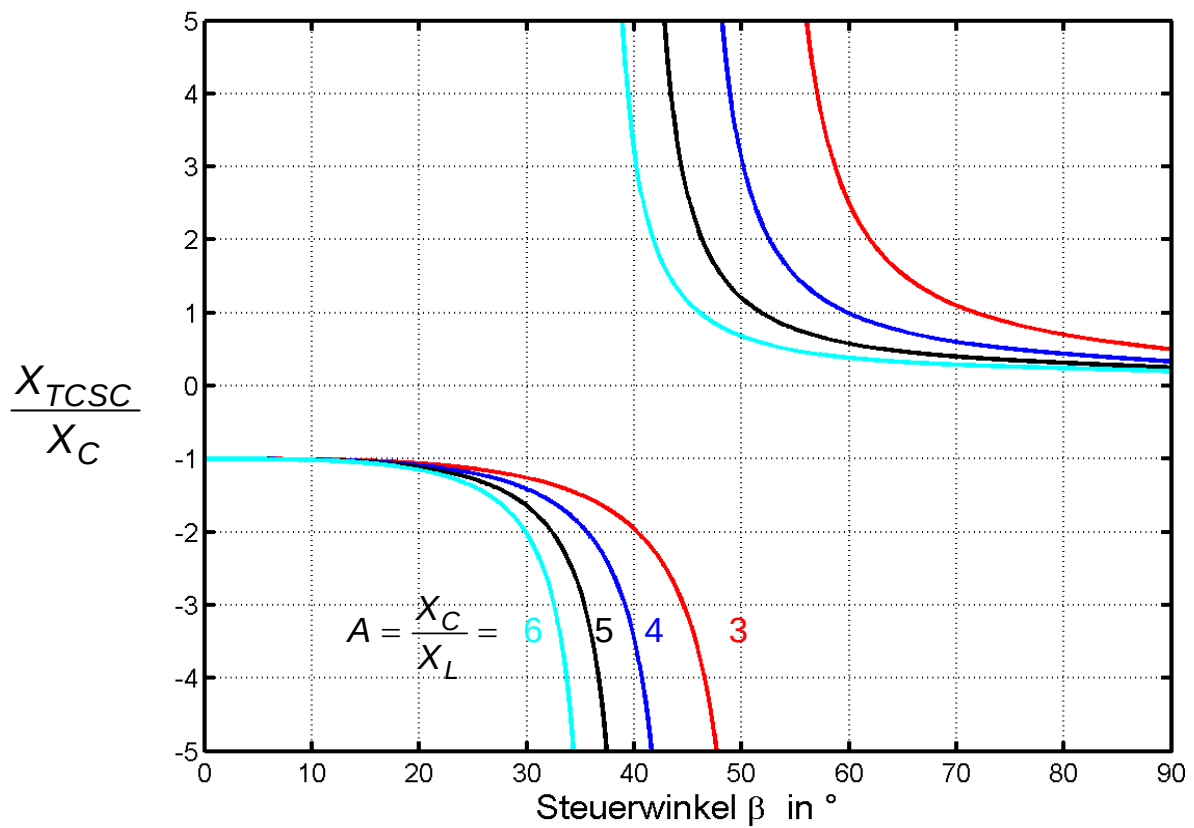


Bild 3: Werte der Funktion X_{TCSC}/X_C zur Bestimmung des Steuerwinkels β eines TCSC

Musterlösung EÜN

FACTS-Betriebsmittel

Beiblatt 3:

3.1 Paralleles FACTS Betriebsmittel: 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:

$$\begin{aligned}\underline{S} &= 3 \cdot \underline{U}_0 \cdot \underline{I}^* \\ \underline{U}_0 &= \frac{U_N}{\sqrt{3}} \\ \underline{I} &= \frac{\underline{U}_0}{\underline{Z}} \text{ mit } \underline{Z} = \frac{1}{j\omega C} \Rightarrow \underline{I} = \frac{U_N}{\sqrt{3}} \cdot j\omega C \\ \Rightarrow \underline{S} &= 3 \cdot \frac{U_N}{\sqrt{3}} \cdot \frac{U_N}{\sqrt{3}} \cdot (-j\omega C) = -j \cdot U_N^2 \cdot \omega C = j \cdot Q_C\end{aligned}$$

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: $Q_C = -0,377 \text{ MVar}$.

Somit ergibt sich

$$C = \frac{-Q_C}{U_N^2 \cdot \omega} = 3 \mu F.$$

- b) Nun gilt: $\alpha = 0^\circ$, 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:

$$Q_{\text{FC-TCR}} = Q_C + Q_L$$

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

Somit ergibt sich:

$$\begin{aligned}Q_L &= Q_{\text{FC-TCR}} - Q_C = 0,754 \text{ MVar} \\ &= \frac{U_N^2}{\omega L}\end{aligned}$$

Für die Induktivität ergibt sich damit:

$$L = \frac{U_N^2}{Q_L \cdot \omega} = 1,69 \text{ H}$$

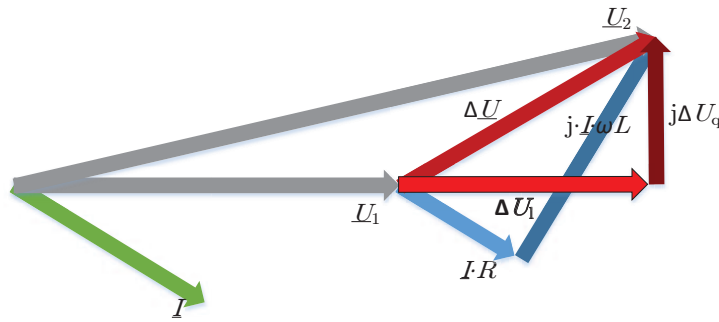


Abb. 3.1: Zeigerdiagramm zur Herleitung des Längsspannungsabfalls

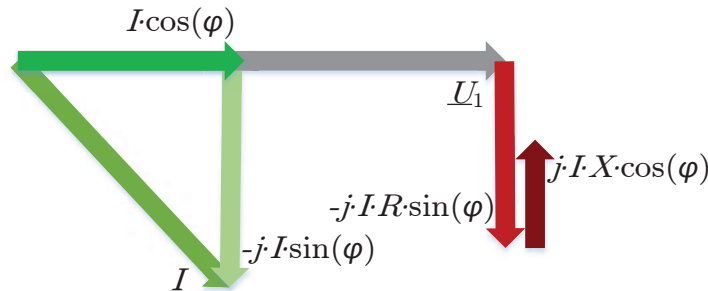


Abb. 3.2: Zeigerdiagramm zur Herleitung des Querspannungsabfalls

3.2 Serielles FACTS-Betriebsmittel: TCSC

- a) Als Längsspannungsabfall ΔU_1 bezeichnet man den Spannungsabfall, der exakt in Richtung der am Anfang der Leitung anliegenden Spannung liegt, siehe Abbildung 3.1. Für den gesamten Spannungsabfall gilt folgender Zusammenhang. Abbildung 3.2 erläutert das Auftreten des Minus-Zeichens beim Querspannungsabfall.

$$\begin{aligned}\Delta \underline{U} &= R \cdot I \cdot \cos(\phi) - j \cdot R \cdot I \cdot \sin(\phi) + X \cdot I \cdot \sin(\phi) + j \cdot X \cdot I \cdot \cos(\phi) \\ &= I \cdot [(R \cdot \cos(\phi) + X \cdot \sin(\phi)) + j(-R \cdot \sin(\phi) + X \cdot \cos(\phi))] \\ &= \Delta U_1 + j \cdot \Delta U_q\end{aligned}$$

Damit gilt für den Längsspannungsabfall:

$$\Delta U_1 = I (R \cdot \cos(\phi) + X \cdot \sin(\phi))$$

In diesem Fall gilt für den ohmschen Widerstand $R = R_L$. Die Reaktanz setzt sich aus der Reaktanz der Leitung und der Reaktanz des TCSC zusammen.

$$X = X_L + X_{\text{TCSC}}$$

Bedingung für die vollständige Kompensation ist damit:

$$\Delta U_1 = I (R_L \cdot \cos(\phi) + (X_L + X_{\text{TCSC}}) \cdot \sin(\phi)) = 0$$

Daraus folgt für die zu bestimmende Reaktanz des TCSC:

$$\begin{aligned}X_{\text{TCSC}} &= \frac{-R_L \cdot \cos(\phi)}{\sin(\phi)} - X_L \\ &= \frac{-R_L}{\tan(\phi)} - X_L\end{aligned}$$

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:

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

Daraus folgt:

$$C = \frac{1}{\omega \cdot \frac{R_L}{\tan(\phi)} + X_L}$$

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 $18,19^\circ$ und $45,57^\circ$. 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 $C=53,9 \mu\text{F}$. Zum Vergleich, bei einem Leistungsfaktor von 0,95 würde nur eine Kapazität von $28,78 \mu\text{F}$ 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 $\cos(\phi)=0,95$:

$$X_{\text{TCSC}} = \frac{-R_L}{\tan(\phi)} - X_L = -110,92 \Omega$$

Weiterhin gilt:

$$\left| \frac{X_C}{X_L} \right| = \frac{\frac{1}{\omega C}}{\omega L} = 3 \dots 6$$

Dies führt auf

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

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

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

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

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

Durch Ablesen aus dem Diagramm in Bild 3 erhält man $\beta=28^\circ$.