EÜN Formelsammlung Sommersemester 2017

Energieübertragung im AC-Netz

- Vorzeichenkonvention von Wirk- und Blindleistung bei induktiven und kapazitiven Quellen und Lasten

Last / Quelle	VZS	EZS
induktive Last	$P > 0$, $Q > 0$	$P < 0$, $Q < 0$
kapazitive Last	$P > 0$, $Q < 0$	$P < 0$, $Q > 0$
induktive Quelle	$P < 0$, $Q < 0$	$P > 0$, $Q > 0$
kapazitive Quelle	$P < 0$, $Q > 0$	$P > 0$, $Q < 0$

- Einspeisung in ein starres Netz über eine lange Leitung

$$P_1 = P_2 = \frac{U_\mathrm{P} \cdot U_2}{Z_0 \cdot \sin(2\pi \frac{l}{\lambda}) + X_\mathrm{d} \cdot \cos(2\pi \frac{l}{\lambda})} \cdot \sin(\vartheta) \tag{1}$$

$$Q_1 = \frac{U_\mathrm{P}^2 \cdot \cos(2\pi \frac{l}{\lambda}) - U_\mathrm{P} U_2 \cdot \cos(\vartheta)}{Z_0 \cdot \sin(2\pi \frac{l}{\lambda}) + X_\mathrm{d} \cdot \cos(2\pi \frac{l}{\lambda})} \tag{2}$$

$$Q_2 = \frac{U_\mathrm{P} U_2 \cdot \cos(\vartheta) + U_2^2 \cdot \frac{X_\mathrm{d}}{Z_0 \cdot \sin(2\pi \frac{l}{\lambda})}}{Z_0 \cdot \sin(2\pi \frac{l}{\lambda}) + X_\mathrm{d} \cdot \cos(2\pi \frac{l}{\lambda})} - \frac{{U_2}^2 \cdot \cos(2\pi \frac{l}{\lambda})}{Z_0 \cdot \sin(2\pi \frac{l}{\lambda})} \tag{3}$$

- Energiefernübertragung im Hoch- und Höchstspannungsnetz

$$P_1 = P_2 = \frac{U_1 \cdot U_2}{Z_0 \cdot \sin(2\pi \frac{l}{\lambda})} \cdot \sin(\vartheta) \tag{4}$$

$$Q_1 = \frac{U_1^2 \cdot \cos(2\pi \frac{l}{\lambda}) - U_1 \cdot U_2 \cdot \cos(\vartheta)}{Z_0 \cdot \sin(2\pi \frac{l}{\lambda})} \tag{5}$$

$$Q_2 = \frac{U_1 \cdot U_2 \cdot \cos(\vartheta) - U_2^2 \cdot \cos(2\pi \frac{l}{\lambda})}{Z_0 \cdot \sin(2\pi \frac{l}{\lambda})} \tag{6}$$

- Einspeisung in ein starres Netz über eine kurze Leitung

$$P_1 = P_2 = \frac{U_\mathrm{P} \cdot U_2}{X} \cdot \sin(\vartheta) = \frac{U_\mathrm{P} \cdot U_2}{X_\mathrm{d} + X_\mathrm{L}} \cdot \sin(\vartheta_\mathrm{G} + \vartheta_\mathrm{L}) \tag{7}$$

$$Q_1 = \frac{U_\mathrm{P}^2}{X} - \frac{U_\mathrm{P} \cdot U_2}{X} \cdot \cos(\vartheta_\mathrm{G} + \vartheta_\mathrm{L}) \tag{8}$$

$$Q_2 = \frac{U_\mathrm{P} \cdot U_2}{X} \cdot \cos(\vartheta_\mathrm{G} + \vartheta_\mathrm{L}) - \frac{U_2^2}{X} \tag{9}$$

Stationäre Stabilität im AC-Netz

- Maximal übertragbare Leistung

$$P_{\text{max}} = \begin{cases} \frac{U_1 \cdot U_2}{Z_0 \cdot \sin(2\pi \frac{l}{\lambda})}, & \text{Einspeisung von Netz zu Netz, lange Leitung} \\ \frac{U_\text{P} \cdot U_2}{Z_0 \cdot \sin(2\pi \frac{l}{\lambda}) + X_\text{d} \cdot \cos(2\pi \frac{l}{\lambda})}, & \text{Einspeisung Generator, lange Leitung} \\ \frac{U_\text{P} \cdot U_2}{X_\text{d} + X_\text{L}}, & \text{Einspeisung Generator, kurze Leitung} \\ \frac{U_\text{P} \cdot U_2}{X_\text{d}}, & \text{Direkte Einspeisung Synchrongenerator} \end{cases} \tag{10}$$

- Zeitfunktion des Polradwinkels

$$\vartheta(t) = \vartheta_0 + \frac{\Delta P_\text{T}}{P_\text{max} \cdot \cos(\vartheta_0)} \cdot [1 - \mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}} \left(\cos(\omega_1 t) + \frac{1}{\omega_1 \cdot \tau} \cdot \sin(\omega_1 t)\right)] \tag{11}$$

- Schwingungsparameter

$$\tau = \frac{2J \cdot \frac{\Omega_0}{\text{p}}}{\text{D}} \quad , \quad \omega_1 = \sqrt{\frac{P_\text{max} \cdot \cos(\vartheta_0)}{J \cdot \frac{\Omega_0}{p}} - \left(\frac{1}{\tau}\right)^2} \tag{12}$$

Transiente Stabilität im AC-Netz

- Zeitfunktion des Polradwinkels, kritischer Polradwinkel und kritische Dauer

$$\vartheta(t) = \vartheta_0 + \frac{P_\text{m}}{2\text{J} \cdot \frac{\Omega_0}{\text{p}}} \cdot \text{t}^2 \tag{13}$$

$$\vartheta_{1,\text{krit}} = \arccos[(\pi - 2\vartheta_0) \cdot \sin(\vartheta_0) - \cos(\vartheta_0)] \tag{14}$$

$$t_\text{krit} = \sqrt{\frac{2\text{J} \cdot \frac{\Omega_0}{\text{p}}}{P_\text{m}} \cdot (\vartheta_{1,\text{krit}} - \vartheta_0)} \tag{15}$$

Hochspannungsgleichstromübertragung (netzgeführt)

- Ausgangsspannung der 6-pulsigen Drehstrombrückenschaltung bei idealer Kommutierung

$$U_{\text{di}\alpha} \approx 1,35 \cdot U_\text{L} \cdot \cos(\alpha) = U_\text{di} \cdot \cos(\alpha) \tag{16}$$

$$I_\text{d} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_\text{L}}{2 \cdot \omega L_\text{k}} \cdot [\cos(\alpha) - \cos(\alpha + \text{u})] \tag{17}$$

- Impedanz

$$Z_\text{X} = \text{p} \cdot f \cdot L_\text{k} \quad , \quad p = \text{Pulszahl} \tag{18}$$

- Scheinleistung

$$S_\text{L} = \sqrt{3} \cdot U_\text{L} \cdot I_{\text{L(eff)}} = \sqrt{P^2 + Q^2} \tag{19}$$

$$S_{\text{L1}} = \sqrt{3} \cdot U_\text{L} \cdot I_{\text{L1}} = \sqrt{P^2 + Q_1^2} \tag{20}$$

- Blindleistung

$$\text{Grundschwingungsblindleistung } Q_1 = \sqrt{3} \cdot U_\text{L} \cdot I_{\text{L1}} \cdot \sin(\varphi) = P \cdot \tan(\varphi) \tag{21}$$

$$\text{Verschiebungsfaktor } \cos(\varphi) \approx \cos(\alpha) - \frac{Z_\text{x} \cdot I_\text{d}}{U_\text{di}} \tag{22}$$

$$\text{Verzerrungsblindleistung } D = \sqrt{3} \cdot U_\text{L} \cdot \sqrt{I_\text{L}^2 - I_{\text{L1}}^2} \tag{23}$$

$$\text{gesamte Blindleistung } Q = \sqrt{Q_1^2 + D^2} \tag{24}$$

- Leiterströme

$$I_{\mathrm{L_{n,US}}} = \frac{2\sqrt{6}}{\pi} \cdot I_{\mathrm{d}} \cdot \frac{1}{n} \tag{25}$$

$$I_{\mathrm{L(eff)}} = \sqrt{I_{\mathrm{L1}}^2 + I_{\mathrm{L2}}^2 + I_{\mathrm{L3}}^2 + ...} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_{\mathrm{Ln}}^2} \tag{26}$$

- Zündverzögerungswinkel

$$\alpha_{\mathrm{max}} = \pi - \mathrm{u} - \gamma_{\mathrm{min}} \tag{27}$$

Hochspannungsgleichstromübertragung (selbstgeführt)

- Raumzeigermodulation

$$\underline{u} = \frac{1}{3}\left(\underline{u}_1 + \underline{a}\underline{u}_2 + \underline{a}^2\underline{u}_3\right) \tag{28}$$

$$= \frac{1}{3}\widehat{U}_{ac,Y}\left(e^{j\gamma} + e^{j\gamma - \dfrac{2\pi}{3}} \cdot e^{j\dfrac{2\pi}{3}} + e^{j\gamma - \dfrac{4\pi}{3}} \cdot e^{j\dfrac{4\pi}{3}}\right)$$

$$\underline{a} = e^{j\dfrac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \tag{29}$$

$$t_1 = \frac{|\underline{u}| \cdot T_0}{U_d} \cdot \sqrt{3} \cdot sin\left(60^\circ - \gamma\right)$$

$$t_2 = \frac{|\underline{u}| \cdot T_0}{U_d} \cdot \sqrt{3} \cdot sin\left(\gamma\right)$$

- Modularer Multi-Level-Umrichter (MMC)

$$u_R = \frac{U_{DC}}{2}\left(1 - \frac{2 \cdot N_p}{m}\right) = \frac{U_{DC}}{2}\left(-1 + \frac{2 \cdot N_n}{m}\right) \tag{30}$$

$$U_{AC,Y} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot A \cdot \frac{U_{DC}}{2} \tag{31}$$

$$C_{E,min} = \frac{2 \cdot m}{3 \cdot \omega \cdot \epsilon \cdot A} \cdot \frac{S}{U_{DC}^2} \tag{32}$$

Flexible AC Transmission Systems

- FC-TCR

$$\underline{Z}(\alpha) = \frac{\underline{U}_0}{\underline{I}(\alpha)} = \frac{j\omega_0 L}{1 - \frac{2\alpha}{\pi} - \frac{1}{\pi} \cdot \sin(2\alpha) - \omega_0^2 LC} \tag{33}$$

Netzregelung

- Frequenzabhängige Lasten

$$G_{\mathrm{N}} = \frac{P_0}{Df_0} \tag{34}$$

- Primärregelung

$$\Delta P_{\mathrm{R}} = -(f - f_0) \cdot V_{\mathrm{R}} \cdot \frac{P_0}{f_0} = -(f - f_0) \cdot K \tag{35}$$

$$S = -\frac{f - f_0}{f_0} \cdot \frac{P_0}{P - P_0} = -\frac{\Delta f}{\Delta p_{\mathrm{R}}} = \frac{1}{V_{\mathrm{R}}} \tag{36}$$

$$\Delta f(\infty) = -\frac{G_{\mathrm{N}}}{1 + V_{\mathrm{R}} \cdot G_{\mathrm{N}}} \cdot \Delta p_{\mathrm{V0}} \tag{37}$$

- Primärregelung im Verbund

$$\Delta f = -\frac{\sum_{j=1}^{N} \Delta P_{\mathrm{Vj}}}{\sum_{j=1}^{N} K_{\mathrm{j}}} \tag{38}$$

$$\Delta P_{\mathrm{Tj}} = K_{\mathrm{j}} \cdot \frac{\sum_{j=1}^{N} \Delta P_{\mathrm{Vj}}}{\sum_{j=1}^{N} K_{\mathrm{j}}} \quad , \quad T = \text{Turbine} \tag{39}$$