

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

$$P_1 = P_2 = \frac{U_P \cdot U_2}{Z_0 \cdot \sin(2\pi \frac{l}{\lambda}) + X_d \cdot \cos(2\pi \frac{l}{\lambda})} \cdot \sin(\vartheta) \quad (1)$$

$$Q_1 = \frac{U_P^2 \cdot \cos(2\pi \frac{l}{\lambda}) - U_P U_2 \cdot \cos(\vartheta)}{Z_0 \cdot \sin(2\pi \frac{l}{\lambda}) + X_d \cdot \cos(2\pi \frac{l}{\lambda})} \quad (2)$$

$$Q_2 = \frac{U_P U_2 \cdot \cos(\vartheta) + U_2^2 \cdot \frac{X_d}{Z_0 \cdot \sin(2\pi \frac{l}{\lambda})}}{Z_0 \cdot \sin(2\pi \frac{l}{\lambda}) + X_d \cdot \cos(2\pi \frac{l}{\lambda})} - \frac{U_2^2 \cdot \cos(2\pi \frac{l}{\lambda})}{Z_0 \cdot \sin(2\pi \frac{l}{\lambda})} \quad (3)$$

- Energiefernübertragung im Hoch- und Höchstspannungsnetz

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

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

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

- Einspeisung in ein starres Netz über eine kurze Leitung

$$P_1 = P_2 = \frac{U_P \cdot U_2}{X} \cdot \sin(\vartheta) = \frac{U_P \cdot U_2}{X_d + X_L} \cdot \sin(\vartheta_G + \vartheta_L) \quad (7)$$

$$Q_1 = \frac{U_P^2}{X} - \frac{U_P \cdot U_2}{X} \cdot \cos(\vartheta_G + \vartheta_L) \quad (8)$$

$$Q_2 = \frac{U_P \cdot U_2}{X} \cdot \cos(\vartheta_G + \vartheta_L) - \frac{U_2^2}{X} \quad (9)$$

Stationäre Stabilität im AC-Netz

- Maximal übertragbare Leistung

$$P_{\max} = \begin{cases} \frac{U_1 \cdot U_2}{Z_0 \cdot \sin(2\pi \frac{L}{\lambda})}, & \text{Einspeisung von Netz zu Netz, lange Leitung} \\ \frac{U_P \cdot U_2}{Z_0 \cdot \sin(2\pi \frac{L}{\lambda}) + X_d \cdot \cos(2\pi \frac{L}{\lambda})}, & \text{Einspeisung Generator, lange Leitung} \\ \frac{U_P \cdot U_2}{X_d + X_L}, & \text{Einspeisung Generator, kurze Leitung} \\ \frac{U_P \cdot U_2}{X_d}, & \text{Direkte Einspeisung Synchrongenerator} \end{cases} \quad (10)$$

- Zeitfunktion des Polradwinkels

$$\vartheta(t) = \vartheta_0 + \frac{\Delta P_T}{P_{\max} \cdot \cos(\vartheta_0)} \cdot [1 - e^{-\frac{t}{\tau}} (\cos(\omega_1 t) + \frac{1}{\omega_1 \cdot \tau} \cdot \sin(\omega_1 t))] \quad (11)$$

- Schwingungsparameter

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

Transiente Stabilität im AC-Netz

- Zeitfunktion des Polradwinkels, kritischer Polradwinkel und kritische Dauer

$$\vartheta(t) = \vartheta_0 + \frac{P_m}{2J \cdot \frac{\Omega_0}{p}} \cdot t^2 \quad (13)$$

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

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

Hochspannungsgleichstromübertragung (netzgeführt)

- Ausgangsspannung der 6-pulsigen Drehstrombrückenschaltung bei idealer Kommutierung

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

$$I_d = \frac{\sqrt{2} \cdot U_L}{2 \cdot \omega L_k} \cdot [\cos(\alpha) - \cos(\alpha + u)] \quad (17)$$

- Impedanz

$$Z_X = p \cdot f \cdot L_k \quad , \quad p = \text{Pulszahl} \quad (18)$$

- Scheinleistung

$$S_L = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_{L(\text{eff})} = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (19)$$

$$S_{L1} = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_{L1} = \sqrt{P^2 + Q_1^2} \quad (20)$$

- Blindleistung

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

$$\text{Verschiebungsfaktor } \cos(\varphi) \approx \cos(\alpha) - \frac{Z_X \cdot I_d}{U_{\text{di}}} \quad (22)$$

$$\text{Verzerrungsblindleistung } D = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot \sqrt{I_L^2 - I_{L1}^2} \quad (23)$$

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

- Leiterströme

$$I_{L_n,US} = \frac{2\sqrt{6}}{\pi} \cdot I_d \cdot \frac{1}{n} \quad (25)$$

$$I_{L(eff)} = \sqrt{I_{L1}^2 + I_{L2}^2 + I_{L3}^2 + \dots} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_{L_n}^2} \quad (26)$$

- Zündverzögerungswinkel

$$\alpha_{\max} = \pi - u - \gamma_{\min} \quad (27)$$

Hochspannungsgleichstromübertragung (selbstgeführt)

- Raumzeigermodulation

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

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

$$\underline{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (29)$$

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

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

- Modularer Multi-Level-Umrichter (MMC)

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

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

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

Flexible AC Transmission Systems

- FC-TCR

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

Netzregelung

- Frequenzabhängige Lasten

$$G_N = \frac{P_0}{Df_0} \quad (34)$$

- Primärregelung

$$\Delta P_R = -(f - f_0) \cdot V_R \cdot \frac{P_0}{f_0} = -(f - f_0) \cdot K \quad (35)$$

$$S = -\frac{f - f_0}{f_0} \cdot \frac{P_0}{P - P_0} = -\frac{\Delta f}{\Delta p_R} = \frac{1}{V_R} \quad (36)$$

$$\Delta f(\infty) = -\frac{G_N}{1 + V_R \cdot G_N} \cdot \Delta p_{V0} \quad (37)$$

- Primärregelung im Verbund

$$\Delta f = -\frac{\sum_{j=1}^N \Delta P_{Vj}}{\sum_{j=1}^N K_j} \quad (38)$$

$$\Delta P_{Tj} = K_j \cdot \frac{\sum_{j=1}^N \Delta P_{Vj}}{\sum_{j=1}^N K_j} \quad , \quad T = \text{Turbine} \quad (39)$$