Hilfsblatt zur VO „Energieversorgung“

Version 1.1

Drehstromsysteme

Drehoperatoren

$$\underline{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}} = \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) + j\sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$\underline{a}^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}} = \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) + j\sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

$\underline{a}^2 = \underline{a}^* = \underline{a}^{-1}$ $\quad$ $\underline{a}^3 = 1$ $\quad$ $\underline{a}^4 = \underline{a}$ $\quad$ $\underline{a}^5 = \underline{a}^2$

$1 + \underline{a} + \underline{a}^2 = 0$ $\quad$ $\underline{a} - \underline{a}^2 = j\sqrt{3}$ $\quad$ $1 - \underline{a}^2 = \sqrt{3}\, e^{j\frac{\pi}{3}}$

Symmetrische Drehstrom-Komponenten

$$\underline{V}_{012} = \underline{T}.\underline{V}_{abc} \qquad \underline{V}_{abc} = \underline{T}^{-1}.\underline{V}_{012}$$

$$\underline{T} = \frac{1}{3}\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{pmatrix} \qquad \underline{T}^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{pmatrix}$$

$\underline{V}_0 = \frac{1}{3}(\underline{V}_a + \underline{V}_b + \underline{V}_c)$ $\quad$ $\underline{V}_1 = \frac{1}{3}(\underline{V}_a + \underline{a}\,\underline{V}_b + \underline{a}^2\,\underline{V}_c)$ $\quad$ $\underline{V}_2 = \frac{1}{3}(\underline{V}_a + \underline{a}^2\,\underline{V}_b + \underline{a}\,\underline{V}_c)$

$\underline{V}_a = (\underline{V}_0 + \underline{V}_1 + \underline{V}_2)$ $\quad$ $\underline{V}_b = (\underline{V}_0 + \underline{a}^2\,\underline{V}_1 + \underline{a}\,\underline{V}_2)$ $\quad$ $\underline{V}_c = (\underline{V}_0 + \underline{a}\,\underline{V}_1 + \underline{a}^2\,\underline{V}_2)$

Kurz- und Erdschlüsse

Netzimpedanz

$$Z_N = c_{S_k''} \cdot \frac{U_n^2}{S_k''}$$

Generatorimpedanz

$$X_d'' = \frac{x_d''(pu\%)}{100\%}\, Z_B$$

Trafo-Kurzschluss-Impedanz

$$Z_T = u_k \frac{U_n^2}{S_n}$$

Ersatzspannung an der Fehlerstelle

$$\underline{E}_1 = c\,\frac{U_n}{\sqrt{3}}$$

Kurzschlussberechnung Stoßfaktor

$$i_p = \sqrt{2}\left(1 + e^{-t\frac{R}{L}}\right) I_k'' = \sqrt{2}\,\kappa\, I_k''$$

Leitungsgleichungen

Ausbreitungskonstante der Leitung

$$\underline{\gamma} = \alpha + j\beta = \pm\sqrt{(R' + j\omega L')(G' + j\omega C')}$$

Dämpfungs- und Phasenkonstante (Näherungen gelten für $R' \ll \omega L', G' \ll \omega C'$)

$$\alpha \approx \frac{R'}{2}\sqrt{\frac{C'}{L'}} + \frac{G'}{2}\sqrt{\frac{L'}{C'}} \qquad \beta = \frac{\omega}{v} = \frac{2\pi}{\lambda} \approx \omega\sqrt{L'C'}$$

Leitungsgleichungen

$$\begin{pmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{Z}_W \underline{I}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh(\underline{\gamma} x) & \sinh(\underline{\gamma} x) \\ \sinh(\underline{\gamma} x) & \cosh(\underline{\gamma} x) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{U}(x) \\ \underline{Z}_W \underline{I}(x) \end{pmatrix}$$

Wellenwiderstand

$$\underline{Z}_W = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}}$$

Winkel- und Hyperbelfunktionen

$$\cos(x) = \frac{e^{jx} + e^{-jx}}{2} \qquad \cosh(x) = \frac{e^{x} + e^{-x}}{2}$$

$$\sin(x) = \frac{e^{jx} - e^{-jx}}{2j} \qquad \sinh(x) = \frac{e^{x} - e^{-x}}{2}$$

Betriebsinduktivität der symmetrischen Freileitung

$$L'_B = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} ln\left(\frac{D}{r_{äq}}\right) = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi}\left(\frac{1}{4} + ln\frac{D}{r}\right)$$

Betriebskapazität einer Freileitung

$$C'_B \approx \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r}{ln\left(\frac{D}{r_L}\right)}$$

Ersatzradius des Bündelleiters

$$r_B = \sqrt[n]{n \cdot r \cdot r_T^{n-1}}$$

Betriebsinduktivität eines Bündelleiters

$$L'_B = \frac{\mu_0}{2\pi}\left[ln\left(\frac{D}{r_B}\right) + \frac{1}{4n}\right]$$

Spezifischer Wärmewiderstand

$$R'_w = \frac{\rho_w}{2\pi} ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right)$$

Wasserkraft

$$E = m \cdot g \cdot \Delta h = \rho \cdot V \cdot g \cdot \Delta h$$

$$P = \frac{dE}{dt} = \dot{m} \cdot g \cdot \Delta h = \rho \cdot Q \cdot g \cdot \Delta h$$

$$P_{el} = \eta . P$$

$$\eta = \eta_H \, \eta_T \, \eta_G \, (1 - \varepsilon)$$

$$\frac{1}{2} m \cdot c_1^2 = m \cdot g \cdot \Delta h$$

$$c_1 = \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h}$$

Windenergie

$$P_W = \frac{1}{2} \rho_L \cdot A \cdot v^3$$

$$c_p = \frac{1}{2}\left(1 + \frac{v_2}{v_1}\right)\left[1 - \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2\right]$$

$$\overline{v}_H = \overline{v}_{ref} \left(\frac{H}{H_{ref}}\right)^{\alpha}$$

$$\rho_L = 1{,}2 kg/m^3$$

$$\int e^{a \cdot x} \, dx = \frac{1}{a} \cdot e^{a \cdot x}$$

Wirtschaftlichkeit

$$B_{0+} = Z \beta_+$$

$$\beta_+ = \frac{(q^m - 1) \cdot q}{q - 1}$$

$$B_{0-} = Z \beta_-$$

$$\beta_- = \frac{q^n - 1}{(q - 1) \cdot q^n}$$

$$K = \alpha \cdot A_0 + Z$$

$$\alpha = 1/\beta_-$$