

1. Rechnerische Behandlung des Drehstromsystems

1.1. Grundlagen

1.1.1 Spannung u

Augenblickswert: $u(t) = \hat{u} \cos(\omega t + \varphi_u) = U\sqrt{2} \cos(\omega t + \varphi_u)$

Scheitelwert / Amplitude: \hat{u}

Effektivwert (allg.): $U_{\text{eff}} = U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(\tau) d\tau}$

→ bei sinusförmigen Größen: $U = \frac{\hat{u}}{\sqrt{2}}$

Phasenwinkel: $\varphi(t) = \omega t + \varphi_u$ mit $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$

Nullphasenwinkel: φ_u

1.1.2 Stromstärke i

Augenblickswert: $i(t) = \hat{i} \cos(\omega t + \varphi_i) = I\sqrt{2} \cos(\omega t + \varphi_i)$

Scheitelwert / Amplitude: \hat{i}

Effektivwert (bei sinusförmigen Größen): $I = \frac{\hat{i}}{\sqrt{2}}$

Phasenwinkel: $\varphi(t) = \omega t + \varphi_i$ mit $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$

Nullphasenwinkel: φ_i

Phasenverschiebungswinkel:

$\varphi = \varphi_{ui} = \varphi_u - \varphi_i$

$0 < \varphi \leq \pi$: Strom eilt der Spannung nach
 $-\pi \leq \varphi < 0$: Strom eilt der Spannung vor

2. Freileitungen und Kabel

2.1. Freileitungen

2.1.1 Durchhang der Freileitungsseile

$f(x)$	Durchhang an der Stelle x
G'	Gewichtskraft des Leiterseils pro Längeneinheit
F_H	Horizontalzugkraft
h	mittlere Höhe der Leiterseile

Durchhang: $f(x) = f_{\max} - \frac{G'}{2F_H} x^2$ mit $f_m a x = \frac{G'}{8F_H} a^2$
 mittlere Höhe: $h = h_{\text{Mast}} - 0,7 \cdot f_{\max}$

Mindestabstand zum Erdboden (VDE 0210-1):

D_{el}	elektrischer Grundabstand
-----------------	---------------------------

Mindestabstand: $h_{\min} = 5\text{m} + D_{\text{el}}$

Bündelleiter

Ersatzradius r_b : $r_n = \sqrt[n]{r \cdot r^{n-1}}$

Abstand zwischen den Außenleitern

Ersatzabstand D : $D = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{31}}$

2.1.2 Widerstandsbelag

Q	Querschnitt
α	Temperaturkoeffizient
ϑ	Celsiustemperatur

Widerstand pro Längeneinheit: $R'_{20} = \frac{1}{\kappa_{20} Q}$

mit Temperaturabhängigkeit: $R'_{\vartheta} = \frac{1}{\kappa_{20} Q} [1 + \alpha(\vartheta - 20K)]$

im Bündelleiter: $R_B = \frac{1}{n} \cdot R$ mit R ist Widerstand des Teilleiters

2.1.3 Induktivitätsbelag

Betriebsinduktivitätsbelag: $L'_b = (2 \ln \frac{D_{\text{ers}}}{r} + \frac{1}{2}) \cdot 10^{-4} \frac{\text{H}}{\text{km}}$

2.1.4 Kapazitätsbelag

$$C'_b = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\left(\frac{D_{\text{ers}}}{r_B \sqrt{1 + \left(\frac{D_{\text{ers}}}{2h}\right)^2}}\right)}$$

$$D \ll 2h \quad C'_b = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\left(\frac{D_{\text{ers}}}{r_B}\right)}$$

2.1.5 Ohmscher Querleitwert G'

spezifische Arbeitsverluste: $P'_V = 3 \cdot \left(\frac{U_n}{\sqrt{3}}\right)^2 \cdot G'_b = U_n^2 \cdot G'_b$

Betriebsableitbelag: $G'_b = \frac{P'_V}{U_n^2}$

2.2. Kabel

Querschnitt: $Q = (\pi a^2 - \pi r_i^2) \pi$

2.2.1 Widerstandsbelag R'

2.2.2 Induktivitätsbelag L'

Betriebsinduktivitätsbelag: $L'_b = \frac{L_B}{l} = \left(2 \ln \frac{D}{r} + \frac{1}{2}\right) \cdot 10^{-4} \frac{\text{H}}{\text{km}}$

Betriebsreaktanzenbelag: $X'_b = \omega L'_b$

Induktivitätsbelag eines Hohlleiters:

$\omega L'_{b\text{HL}} = (0,96 + 0,051 \frac{r_a - r_i}{r_a})$ für $0 < \frac{r_a - r_i}{r_a} < 0,6$

2.2.3 Kapazitätsbelag C'

Radialfeldkabel: $C'_b = \frac{2\pi\epsilon}{\ln\left(\frac{R_a}{R_i}\right)}$

2.2.4 Ohmscher Querleitwert

$G'_b = \tan \delta \cdot \omega C'_b$

3. Leitung im stationären und nichtstationären Betrieb

3.1. verlustlose Fernleitung

$\beta = \sqrt{L'C'}$

$\vartheta_{\text{nat}} = \beta l$

Wellenwiderstand für verlustlose Leitungen: $Z_W = \sqrt{\frac{\omega L'}{\omega C'}}$

Längsimpedanz (elektrisch lang): $\underline{Z}_l = Z_W \sin(\beta l)$

Queradmittanz (elektrisch lang): $\frac{Y_q}{2} = \frac{1}{Z_W} \tan\left(\frac{\beta l}{2}\right)$

natürliche Leistung: $P_{\text{nat}} = \frac{U_2^2}{Z_W}$

3.2. Verlustbehaftete Fernleitung

Zweitorgleichung: $\begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\beta l) & Z_W \sin(\beta l) \\ \frac{1}{Z_W} \sin(\beta l) & \cos(\beta l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_2 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix}$

3.3. Querkompensation

$$Q_2 = \frac{P_{\text{nat}}}{\sin(\beta l)} \left[\sqrt{1 - \left(\frac{p_2}{P_{\text{nat}}} \sin(\beta l)\right)^2} - \cos(\beta l) \right]$$

3.4. Längskompensation

$$\frac{P_{\text{natK}}}{P_{\text{nat}}} = \sqrt{\frac{1 - k_q}{1 - k_l}}$$

Faustregel für die optimale Anzahl der Kondensatorbatterien:

$0 < k_l \leq 0,5 \Rightarrow n = 1 \Rightarrow X_k = k_l \cdot 2Z_W \sin(\beta \frac{l}{2})$

$0,5 < k_l \leq 0,67 \Rightarrow n = 2 \Rightarrow X_k = k_l \cdot \frac{3}{2} Z_W \sin(\beta \frac{l}{3})$

$0,67 < k_l \leq 0,75 \Rightarrow n = 3 \Rightarrow X_k = k_l \cdot \frac{4}{3} Z_W \sin(\beta \frac{l}{4})$

Kompensationsblindleistung: $Q_K = 3 \cdot X_K \cdot I_K^2$

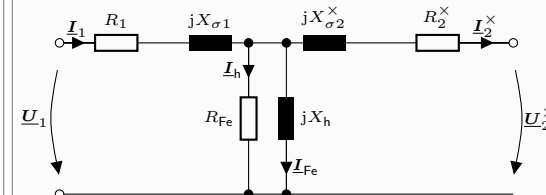
Leistungswinkel der kompensierten Leitung: $\vartheta_k = \beta_k l$

Grenzwinkel für Stabilität der Leitung: $\vartheta_{\text{Grenz}} = 42^\circ$ $\vartheta = (\vartheta_M)_{\text{Grenz}} - (\vartheta_M + \vartheta_T)$ mit Transformatorwinkel $\vartheta_T \approx 3,5^\circ$, $\vartheta_M \approx 5,5^\circ$

3.5. Wanderwellen

4. Transformatoren

4.1. Zweiwicklungstransformator



Übersetzung: $\hat{u} = \frac{w_1}{w_2}$

$\underline{I}_2^\times = \frac{\underline{I}_2}{\hat{u}}$ mit w_1, w_2 sind Windungszahlen

$\underline{U}_2^\times = \hat{u} \underline{U}_2$

$\underline{Z}_2^\times = \hat{u}^2 \underline{Z}_2$

$\underline{U}_2^\times \cdot \underline{I}_2^\times = \hat{u} \underline{U}_2 \cdot \frac{\underline{I}_2}{\hat{u}} = \underline{U}_2 \cdot \underline{I}_2$

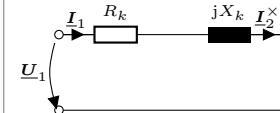
4.1.1 Leerlauf

Leerlaufstrom: $\underline{I}_0 = \underline{I}_{Fe} + \underline{I}_h$

Hauptreaktanzen: $X_h = \text{Im} \left\{ \frac{\underline{U}_{r1}}{\underline{I}_h} \right\}$

Eisenverluste (im Einphasentransformator): $R_{Fe} = \frac{U_{F0}^2}{P_0} = \hat{u}^2 \cdot \frac{U_{F0}^2}{P_0}$

4.1.2 Kurzschluss



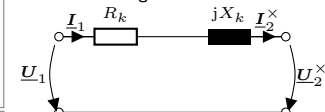
Kurzschlussimpedanz:

$\underline{Z}_k = \frac{\underline{U}_k}{\underline{I}_{r1}} = (R_1 + R_2) + j(X_{\sigma 1} + X_{\sigma 2}) = R_k + jX_k$

relative Kurzschlussleistung:

$u_k = \frac{U_k}{U_{r1}} = \frac{I_{r1} \cdot X_k}{U_{r1}} \cdot \left(\frac{U_{r1}}{U_{r1}} \right) = \frac{S_r \cdot X_k}{U_{r1}^2}$

4.1.3 Bemessungsstrom



4.1.4 Übersetzung \hat{u}

Übersetzung: $\hat{u} = \frac{w_1}{w_2}$ mit w_1 := Primärwicklung, w_2 := Sekundärwicklung

Leerlaufübersetzung $\hat{u}_0 = \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{w_1}{w_2}$

4.2. Drehstromtransformator

Kurzschlussleistung: $u_k = \frac{U_{kT}}{U_{rT}} = \frac{\frac{U_{kT}}{\sqrt{3}}}{\frac{U_{rT}}{\sqrt{3}}} = \frac{X_k \cdot I_{rT}}{U_{rT}}$

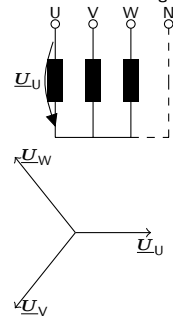
Bemessungsleistung: $S_{rT} = \sqrt{3} \cdot U_{rT} \cdot I_{rT}$

Kurzschlussreaktanzen: $X_k = \frac{u_k \cdot U_{rT}^2}{S_{rT}}$

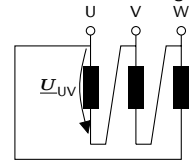
$X_{k(Y)} = \frac{X_k(\Delta)}{3}$

4.3. Wicklungsverschaltung

4.3.1 Sternschaltung



4.3.2 Dreieckschaltung



4.3.3 Zickzachschtaltung