Grundlagen der Energieübertragungstechnik

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.): $U_{\text{eff}} = U = \sqrt{\frac{1}{T}\int\limits_{t_0}^{t_0+T} u^2(\tau)\,\mathrm{d}\tau}$

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

Mindestabstand zum Erdboden (VDE 0210-1):

D_{el}	elektrischer Grundabstand

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

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

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: $R'_{\vartheta} = \frac{1}{K_{20}Q}\left[1 + \alpha(\vartheta - 20K)\right]$

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

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

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

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

2.2.1 Widerstandsbelag R'

2.2.2 Induktivitätsbelag L'

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

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

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): $\underline{Z}_l = Z_w\,\mathrm{j}\sin(\beta l)$

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

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

3.2. Verlustbehaftete Fernleitung

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

3.3. Querkompensation

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

3.4. Längskompensation

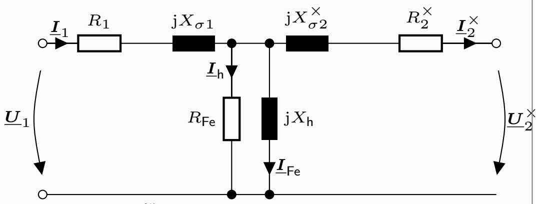
$\frac{P_{\text{natK}}}{P_{\text{nat}}} = \sqrt{\frac{1-k_q}{1-k_l}}$
Faustregel für die optimale Anzahl der Kondensatorbatterien:
$0 < k_l \leq 0,5 \Rightarrow n = 1 \Rightarrow X_k = k_l\cdot 2Z_w\sin(\beta\frac{l}{2})$
$0,5 < k_l \leq 0,67 \Rightarrow n = 2 \Rightarrow X_k = k_l\cdot\frac{3}{2}Z_w\sin(\beta\frac{l}{3})$
$0,67 < k_l \leq 0,75 \Rightarrow n = 3 \Rightarrow X_k = k_l\cdot\frac{4}{3}Z_w\sin(\beta\frac{l}{4})$

Komensationsblindleistung: $Q_K = 3\cdot X_K\cdot I_K^2$
Leistungswinkel der kompensierten Leitung: $\vartheta_k = \beta_k l$
Grenzwinkel für Stabilität der Leitung: $\vartheta_{\text{Grenz}} = 42°$ $\vartheta = (\vartheta_M)_{\text{grenz}} - (\vartheta_M + \vartheta_T)$ mit Transformatorwinkel $\vartheta_T \approx 3,5°$, $\vartheta_M \approx 5,5°$

3.5. Wanderwellen

4. Transformatoren

4.1. Zweiwicklungstransformator



Übersetzung: $ü = \frac{w_1}{w_2}$

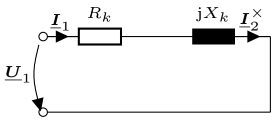
$\underline{I}_2^{\times} = \frac{\underline{I}_2}{ü}$ mit w_1, w_2 sind Windungszahlen
$\underline{U}_2^{\times} = ü\underline{U}_2$
$\underline{Z}_2^{\times} = ü^2\underline{Z}_2$
$\underline{U}_2^{\times}\cdot\underline{I}_2^{\times} = ü\underline{U}_2\cdot\frac{\underline{I}_2}{ü} = \underline{U}_2\cdot\underline{I}_2$
Bemessungsstrom: $\underline{I}_r = \frac{S_{rT}}{\sqrt{3}U_{rT}}$
Kupferverluste: $P_{\text{cu}} = 3U_{R_k}I_1 = 3R_kJ_1^2$

4.1.1 Leerlauf

Leerlaufstrom: $\underline{I}_0 = \underline{I}_{\text{Fe}} + \underline{I}_h$
Hauptreaktanz: $X_h = \operatorname{Im}\left\{\frac{\underline{U}_{r1}}{\underline{I}_h}\right\}$

Eisenverluste (im Einphasentransformator): $R_{\text{Fe}} = \frac{U_{r1}^2}{P_0} = ü^2\cdot\frac{U_{r2}^2}{P_0}$

4.1.2 Kurzschluss

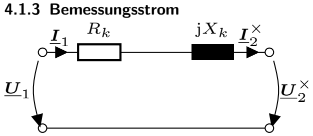


Kurzschlussimpedanz:
$\underline{Z}_k = \frac{\underline{U}_k}{\underline{I}_{r1}} = (R_1 + R_2^{\times}) + \mathrm{j}(X_{\sigma 1} + X_{\sigma 2}^{\times}) = R_k + \mathrm{j}X_k$

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

Bezogener Spannungsfall: $u_x = \frac{X_kS_{rT}}{U_{r1}^2}$

4.1.3 Bemessungsstrom



4.1.4 Übersetzung ü

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

Leerlaufübersetzung $ü_0 = \frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_2} \approx \frac{w_1}{w_2}$

4.2. Drehstromtransformator

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

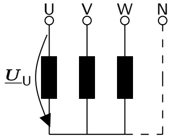
Bemessungsleistung: $S_{rT} = \sqrt{3}\cdot U_{rT}\cdot I_{rT}$

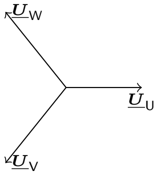
Kurzschlussreaktanz: $X_k = \frac{u_k\cdot U_{rT}^2}{S_{rT}}$

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

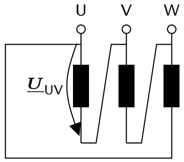
4.3. Wicklungsverschaltung

4.3.1 Sternschaltung





4.3.2 Dreieckschaltung



4.3.3 Zickzachschaltung