Grundlagen der Energieübertragungstechnik

1. Rechnerische Behandlung des Drehstromsystems

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

1.2. 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

1.3. Symmetrische Komponenten

zerlegen eines Dreileiter-Drehstromnetz in unabhängige Systeme (Mit-, Gegen- und Nullsystem)

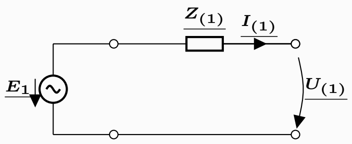
Entsymmetrierungsmatrix $\underset{\sim}{T}$:

$$\begin{pmatrix}\underline{I}_1\\ \underline{I}_2\\ \underline{I}_3\end{pmatrix} = \begin{bmatrix}1 & 1 & 1\\ \underline{a}^2 & \underline{a} & 1\\ \underline{a} & \underline{a}^2 & 1\end{bmatrix}\cdot\begin{pmatrix}\underline{I}_{(1)1}\\ \underline{I}_{(2)1}\\ \underline{I}_{(0)1}\end{pmatrix}$$

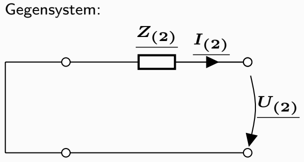
Symmetrierungsmatrix $\underset{\sim}{S}$:

$$\begin{pmatrix}\underline{I}_{(1)1}\\ \underline{I}_{(2)1}\\ \underline{I}_{(0)1}\end{pmatrix} = \frac{1}{3}\cdot\begin{bmatrix}1 & \underline{a} & \underline{a}^2\\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a}\\ 1 & 1 & 1\end{bmatrix}\cdot\begin{pmatrix}\underline{I}_1\\ \underline{I}_2\\ \underline{I}_3\end{pmatrix}$$

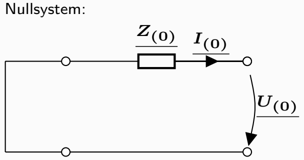
Mitsystem:



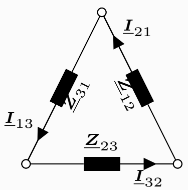
Gegensystem:

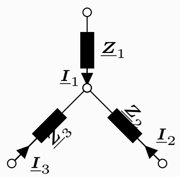


Nullsystem:



1.4. Stern-Dreieck-Umwandlung





$\underline{Z}_1 = \frac{\underline{Z}_{12}\underline{Z}_{31}}{\underline{Z}_{12}+\underline{Z}_{23}+\underline{Z}_{31}}$

$\underline{Z}_2 = \frac{\underline{Z}_{12}\underline{Z}_{23}}{\underline{Z}_{12}+\underline{Z}_{23}+\underline{Z}_{31}}$

$\underline{Z}_3 = \frac{\underline{Z}_{23}\underline{Z}_{31}}{\underline{Z}_{12}+\underline{Z}_{23}+\underline{Z}_{31}}$

$\underline{I}_1 = \underline{I}_{12} - \underline{I}_{31}$
$\underline{I}_2 = \underline{I}_{23} - \underline{I}_{12}$
$\underline{I}_3 = \underline{I}_{31} - \underline{I}_{23}$

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

Material:
z.B. Al/St 240/40:
Querschnitt des Aluminiumleiters 240mm^2, Querschnitt des Stahlleiters 40mm^2

2.1.2 Bündelleiter

r_B	Ersatzradius
n	Anzahl der Teilleiter
r	Seilradius eines Teilleiters
r_T	Teilkreisradius

für einen Bündelleiter mit 4 Teilleitern: $r_T = \sqrt{2}\frac{a}{2}$

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

Abstand zwischen den Außenleitern
Ersatzabstand D_{ers} für Einfachsysteme: $D = \sqrt[3]{D_{12}\cdot D_{23}\cdot D_{31}}$

Ersatzabstand für Doppelsysteme mit γ-Verdrillung:
$D = \sqrt[3]{D_{12}\cdot D_{23}\cdot D_{31}\cdot\frac{D_{12'}\cdot D_{23'}\cdot D_{31'}}{D_{11'}\cdot D_{22'}\cdot D_{33'}}}$
typische Angabe des Werte:
$4\cdot\frac{21{,}7}{400}\,\text{mm} \Rightarrow a = 400\text{mm}, r = \frac{21{,}7}{2}\,\text{mm}$

2.1.3 Widerstandsbelag

Durch Ladungsträgerbewegung bei Stromfluss wird Joule'sche Wärme frei.

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

2.1.4 Induktivitätsbelag

Induktivität einer Leiterschleife mit Hin- und Rückleiter:
$L_{00} = l\frac{\mu_0}{\pi}\cdot(\frac{1}{4} + \ln\frac{d}{r})$

Koppelinduktivitäten:
$M = M_{12} = M_{23} = M_{31} = \frac{\mu_0}{2\pi}l(\frac{1}{4} + \ln\frac{d^2}{rD})$

Betriebsinduktivität:
$L_b\cdot\underline{I}_1 = L_{00}\cdot\underline{I}_1 + M\cdot\underline{I}_2 + M\cdot\underline{I}_3 = (L_{00} - M)\cdot\underline{I}_1$

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

für Bündelleiter: $L'_b = (2\ln\frac{D_{\text{ers}}}{r_B} + \frac{1}{2n})\cdot 10^{-4}\,\frac{\text{H}}{\text{km}}$

2.1.5 Betriebsimpedanzen

Einfachseil: $\underline{Z}'_b = \underline{Z}'_{(1)} = R' + \mathrm{j}\omega\frac{\mu_0}{2\pi}(\ln\frac{D}{r} + \frac{1}{4})$

Bündelleiter: $\underline{Z}'_b = \underline{Z}'_{(1)} = \frac{R'}{n} + \mathrm{j}\omega\frac{\mu_0}{2\pi}(\ln\frac{D}{r_B} + \frac{1}{4n})$

Typische Werte (Al/St 240/40) bei 50Hz:

110kV	Einfachseil	$\underline{Z}'_b = (0{,}12 + \mathrm{j}0{,}4)\,\frac{\Omega}{\text{km}}$
220kV	2er-Bündel	$\underline{Z}'_b = (0{,}06 + \mathrm{j}0{,}3)\,\frac{\Omega}{\text{km}}$
380kV	4er-Bündel	$\underline{Z}'_b = (0{,}03 + \mathrm{j}0{,}25)\,\frac{\Omega}{\text{km}}$

2.1.6 Nullimpedanz

Erdstromtiefe: $\delta = \frac{1{,}85}{\sqrt{\mu_0\cdot\frac{1}{\rho}\cdot\omega}}$

Nullimpedanz für Einfachseile:
$\underline{Z}_{(0)} = \frac{\underline{U}_{(0)}}{\underline{I}_{(0)}} = R' + 3\omega\frac{\mu_0}{8} + \mathrm{j}\omega\frac{\mu_0}{2\pi}(3\ln\frac{\delta}{\sqrt[3]{r\cdot D^2}} + \frac{1}{4})$

Nullimpedanz für Bündelleiter:
$\underline{Z}_{(0)} = \frac{\underline{U}_{(0)}}{\underline{I}_{(0)}} = \frac{R'}{n} + 3\omega\frac{\mu_0}{8} + \mathrm{j}\omega\frac{\mu_0}{2\pi}(3\ln\frac{\delta}{\sqrt[3]{r\cdot D^2}} + \frac{1}{4n})$

2.1.7 Kapazitätsbelag

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

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

2.1.8 Nullkapazität

$C'_{(0)} = \frac{2\pi\epsilon_0}{3\ln\frac{2h}{\sqrt[3]{rD^2}}}$

2.1.9 Ohmscher Querleitwert G'

Verluste durch Ableitströme über Isolatoren und durch Koronaverluste.

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

Eindringtiefe: $\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\kappa}}$

2.2.1 Widerstandsbelag R'

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

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

Stromverdrängung / Skineffekt

für dicke massive Leiter. Erhöhung des ohmschen Widerstandes des Leiters.

y_s	Skineffekt-Korrekturfaktor
R	Wechselstromwiderstand
$R_=$	Gleichstromwiderstand
f	Frequenz

$\frac{R_\approx}{R_=} = 1 + y_s$

$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0,8 \cdot x_s^4}$

$x_s = \sqrt{\frac{2 \cdot \mu \cdot f \cdot k_s}{R'_=}}$ mit $k_s = \begin{cases} 1 & \text{für Rundleiter} \\ 0,5 & \text{für Segmentleiter} \end{cases}$

2.2.2 Induktivitätsbelag L'

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

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

Induktivitätsbelag eines Hohlleiters:

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

2.2.3 Kapazitätsbelag C'

Radialfeldkabel:

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

$C'_L = 0$

Gürtelkabel:

$C'_b = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln\sqrt{\frac{3c^2(R_a^2 - c^2)^3}{R_i^2(R_a^6 - c^6)}}}$

2.2.4 Ohmscher Querleitwert

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

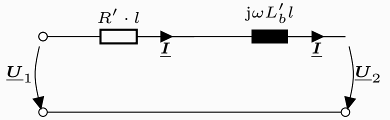
2.2.5 typische Werte

Symbol	Einheit	typische Werte
R'	$[\frac{\Omega}{\mathrm{km}}]$	$0,01 \dots 0,05$
$X' = \omega L'_b$	$[\frac{\Omega}{\mathrm{km}}]$	$0,1 \dots 0,2$
$Y'_b = \omega C'_b$	$[\frac{\mu\mathrm{S}}{\mathrm{km}}]$	$50 \dots 100$
Z_w	$[\Omega]$	$32 \dots 63$

3. Leitung im stationären und nichtstationären Betrieb

3.1. Vereinfachte Leitungsbetrachtung

vernachlässigen von G_b und Y_b



Längsspannungsfall: $\Delta U = R \cdot I_w + \omega L_b \cdot I_b$

Querspannungsfall: $\delta U = \omega L_b \cdot I_w - R \cdot I_b$

3.2. Leitungsgleichung für einphasige Leitung

$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = L' \cdot C' \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + (R' \cdot C' + L' \cdot G') \cdot \frac{\partial u}{\partial t} + R' \cdot G' \cdot u$

$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = L' \cdot C' \cdot \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} + (R' \cdot C' + L' \cdot G') \cdot \frac{\partial i}{\partial t} + R' \cdot G' \cdot i$

Übertragungsmaß:

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

3.3. Leitungsgleichungen für Drehstromleitungen

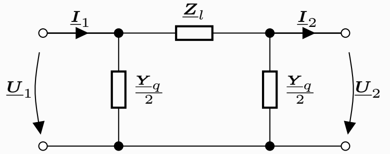
Übertragungsmaß $\underline{\gamma} = \alpha + \mathrm{j}\beta = \sqrt{(R' + \mathrm{j}\omega L') \cdot (G' + \mathrm{j}\omega C')}$

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

Zweitorgleichung der verlustbehafteten Leitung:

$$\begin{pmatrix}\underline{U}_1 \\ \underline{I}_1\end{pmatrix} = \begin{bmatrix}\cosh(\underline{\gamma} \cdot l) & \underline{Z}_w \cdot \sinh(\underline{\gamma} \cdot l) \\ \frac{1}{\underline{Z}_w} \cdot \sinh(\underline{\gamma} \cdot l) & \cosh(\underline{\gamma} \cdot l)\end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix}\underline{U}_2 \\ \underline{I}_2\end{pmatrix}$$

π - Ersatzschaltbild



Längsimpedanz $\underline{Z}_l = \underline{Z}_w \cdot \sinh(\underline{\gamma} \cdot l)$

Queradmittanz $\frac{\underline{Y}_q}{2} = \frac{1}{\underline{Z}_w} \cdot \tanh(\underline{\gamma} \cdot \frac{l}{2})$

3.4. verlustlose Fernleitung

Phasenmaß: $\beta = \omega\sqrt{L'C'}$ $[1/\mathrm{km}]$

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

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

Eine Leitung gilt als elektrisch kurz für $l \leq 200\mathrm{km}$ (Freileitung) bzw. $l \leq 100\mathrm{km}$ (Kabel)

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

Längsimpedanz (elektrisch kurz): $\underline{Z}_l = \mathrm{j}\omega L' \cdot l$

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

Queradmittanz (elektrisch kurz): $\frac{\underline{Y}_q}{2} = \mathrm{j}\omega C' \cdot \frac{l}{2}$

Zweitorgleichung:

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

3.5. Eingangsimpedanz

natürliche Leistung: $P_{\mathrm{nat}} = 3 \cdot \frac{U_1^2}{Z_W} = \frac{U_n^2}{Z_w}$

gibt einen Anhaltswert für die Übertragungsfähigkeit einer Leitung im symmetrischen Drehstromsystem.

3.5.1 Kurzschluss $\underline{Z}_2 = 0$

$\underline{Z}_1 = Z_W \cdot \mathrm{j}\tan(\beta l)$

3.5.2 Leerlauf $\underline{I}_2 = 0$

$\underline{Z}_1 = Z_W \cdot \frac{1}{\mathrm{j}\tan(\beta l)}$

$\underline{U}_1 = \cos(\beta l) \cdot \underline{U}_2$

3.5.3 Abschluss mit der Wellenimpedanz $\underline{Z}_2 = Z_W$

Betrieb mit natürlicher Leistung:

- $|\underline{U}_1| = |\underline{U}_2|$
- $\angle(U, I) = 0$
- Phasendrehung von U und I um βl

3.6. Blindleistungskompensation

k_q	Querkompensationsgrad
k_l	Längskompensationsgrad
C'_w	wirksamer Kapazitätsbelag
L'_w	wirksamer Induktivitätsbelag

wirksamer Wellenwiderstand $Z_{Wk} = \sqrt{\frac{L'_w}{C'_w}} = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \cdot \sqrt{\frac{1 - k_l}{1 - k_q}}$

$\frac{P_{\mathrm{natk}}}{P_{\mathrm{nat}}} = \sqrt{\frac{1 - k_q}{1 - k_l}}$

$\beta_k = \omega\sqrt{L'_w \cdot C'_w} = \omega\sqrt{L' \cdot C'} \cdot \sqrt{(1 - k_l) \cdot (1 - k_q)}$

3.7. Querkompensation

wirksamer Kapazitätsbelag: $C'_w = C' \cdot (1 - k_q) \Rightarrow (1 - k_q) = \frac{C'_w}{C'}$

Kompensationsblindleistung am Leitungsende

$$Q_2 = \frac{P_{\mathrm{nat}}}{\sin(\beta l)}\left[\sqrt{1 - \left(\frac{P_2}{P_{\mathrm{nat}}}\sin(\beta l)\right)^2} - \cos(\beta l)\right]$$

falls Leitung mit Kompensationsinduktivität L_k abgeschlossen ist:

$\underline{I}_2 = \underline{I}_k = \frac{\underline{U}_2}{\mathrm{j}\omega L_k}$

Kompensationsreaktanz: $X_k = \omega L_k = \frac{Z_w \cdot \sin(\beta l)}{1 - \cos(\beta l)}$

3.8. Längskompensation

wirksamer Induktivitätsbelag: $L'_w = L'(1 - k_l)$

Längskompensationsgrad: $k_l = 1 - \frac{L'_w}{L'} = \frac{\omega L' \cdot l - (\omega L' \cdot l - \frac{1}{\omega C_k})}{\omega l' \cdot l}$

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: $\vartheta_{\mathrm{Grenz}} = 42°$ $\vartheta = (\vartheta_M)_{\mathrm{grenz}} - (\vartheta_M + \vartheta_T)$ mit Transformatorwinkel $\vartheta_T \approx 3,5°$, $\vartheta_M \approx 5,5°$

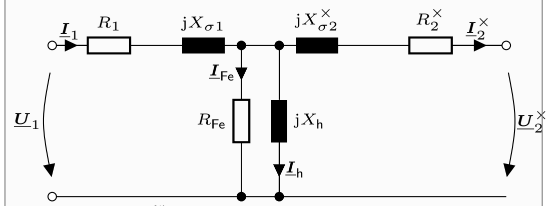
3.9. Übertragungsfähigkeit von Freileitungen

U_n [V]	Leiter	Z_W [Ω]	P_{nat} [MW]	S_{th} [MV A]
10kV	Al/St 50/8	330	0,3	3
30kV	Al/St 95/15	360	2,5	15
110kV	Al/St 240/40	365	33	123
380kV	Al/St 4 · 240/40	240	600	1700
380kV	Al/St 4 · 550/70	240	600	2633
735kV	Al/St 4 · 680/85	260	2080	5860

3.10. Wanderwellen

4. Transformatoren

4.1. Zweiwicklungstransformator



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

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

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

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

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

Bemessungsstrom: $\underline{I}_r = \frac{S_{rT}}{\sqrt{3}U_{rT}}$

Kupferverluste: $P_{\mathrm{cu}} = 3U_{R_k}I_1 = 3R_k J_1^2$

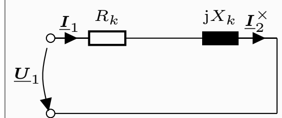
4.1.1 Leerlauf

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

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

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

4.1.2 Kurzschluss



Kurzsschlussimpedanz:

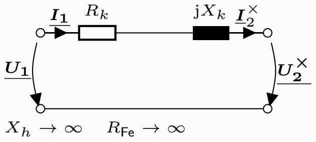
$\underline{Z}_k = \frac{\underline{U}_k}{\underline{I}_{r1}} = (R_1 + R_2^\times) + \mathrm{j}(X_{\sigma 1} + X_{\sigma 2}^\times) = R_k + \mathrm{j}X_k$

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: $u_x = \frac{X_k S_{rT}}{U_{r1}^2}$

4.1.3 Bemessungsstrom



$X_h \to \infty \quad R_{\text{Fe}} \to \infty$

$R_k = R_1 + R_2^\times \quad X_k = X_{\sigma 1} + X_{\sigma 2}^\times \quad \underline{Z}_k = R_k + jX_k$

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

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

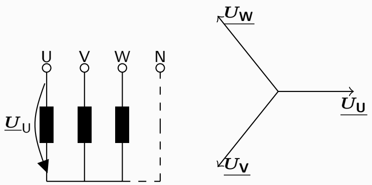
Bezogene Kurzschlussspannung: $\underline{u}_k = u_R + ju_x$

Typische Werte:

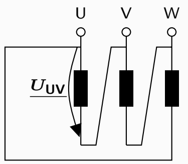
Anwendung	S_r/MVA	$u_R/\%$	$u_x/\%$
Niederspannung	$0,25\dots1,6$	$1,8\dots1,0$	$5,8$
Mittelspannung	$2,5\dots25$	$1,0\dots0,5$	$7\dots8,5$
Hochspannung 110kV	$16\dots63$	$0,7\dots0,6$	12
Hochspannung 220kV	$100\dots400$	$0,5\dots0,3$	$12\dots14$
Hochspannung 380kV	$630\dots1500$	$0,2$	$13\dots16$

4.3. Wicklungsverschaltung

4.3.1 Sternschaltung



4.3.2 Dreieckschaltung



4.3.3 Zickzackschaltung

5. Kurzschlussstromberechnung

I_k''	Anfangskurzschlusswechselstrom
I_k	Dauerkurzschlussstrom
$I_a = I_b$	Ausschaltwechselstrom
i_p	Stoßkurzschlussstrom

5.1. Allgemeines

Kurzschluss ist generatornah falls gilt: $I_k'' \geq 2I_{rG}$

5.1.1 generatorfern

AC Anteil mit konst. Amplitude + auf Null abklingender aperiodischer DC Anteil
es gilt: $I_k'' = I_b = I_k$

5.1.2 generatornah

AC Anteil mit abklingender Amplitude + auf Null abklingender aperiodischer DC Anteil

5.2. Dreipoliger Kurzschluss

unvermaschtes Netz: $i_p = \kappa\sqrt{2} \cdot I_k''$
vemaschtes Netz: $\kappa = 1,02 + 0.98e^{-3 \cdot R/X}$

$$\boxed{I_k'' = \frac{c \cdot \frac{U_{nN}}{\sqrt{3}}}{Z_k}}$$

$i_p = 1,15 \cdot \kappa\sqrt{2} \cdot I_k''$

5.2.1 Symmetrischer Ausschaltwechselstrom

Geilanteil: $I_{dc} = \sqrt{2}I_k'' e^{-2\pi f t R/X}$
Generatorfern: $I_b = I_k''$
Generatornah: $I_b = \mu \cdot I_k''$ mit μ siehe S. 177

5.3. Ersatzschaltungen und Ersatzimpedanzen

5.3.1 Synchrongenerator

$X_d'' = x_d'' \frac{U_{rG}^2}{S_{rG}}$

5.3.2 Netzeinspeisung

$Z_Q = \frac{c \cdot U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I_{kQ}''}$

$X_Q = \frac{Z_Q}{\sqrt{1 + (R_Q/X_Q)^2}}$

5.3.3 Transformator

$Z_T = u_{kr} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}}$

$R_T = u_{Rr} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{P_{krT}}{3I_{rT}^2}$

$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}$

5.4. unsymmetrische Kurzschlüsse

5.4.1 Zweipoliger Kurzschluss ohne Erdberührung

$I_{k2}'' = \frac{c \cdot U_n}{2\left|\underline{Z}_{(1)}\right|} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_k''$

$i_{p2} = \frac{\sqrt{3}}{2} i_p = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_{k2}''$

5.4.2 Zweipoliger Kurzschluss mit Erdberührung

$I_{kE2E}'' = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_n}{\left|\underline{Z}_{(1)} + 2\underline{Z}_{(0)}\right|}$

$i_{p2E} = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_{kE2E}''$

5.4.3 Einpoliger Erdschluss

$I_{k1}'' = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_n}{\left|2\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(0)}\right|}$

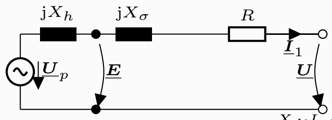
$i_{p1} = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_{k1}''$

6. Synchrongenerator

6.1. stationärerer Betrieb

U	Klemmenspannung
I	Strangstrom
U_p	Polradspannung

$\underline{U} = \underline{U}_p - (R + jX_d) \cdot \underline{I}$
mit $X_d = \omega \cdot (L_h + L_\sigma)$



bezogene synchrone Reaktanz $x_d = \frac{X_d \cdot I_{rG}}{U_{rG}/\sqrt{3}} \approx 2,0$

synchrone Reaktanz: $X_d = \frac{x_d \cdot U_{rG}^2}{S_{rG}}$

$X_d \cdot I_w = U_p \sin\theta_M$ mit θ_M ist elektrischer Polradwinkel

abgegebene Wirkleistung: $P = 3 \cdot U \cdot I_w$

übererregter Betrieb $\left|\underline{U_p}\right| > |\underline{U}|$ Maschine gibt induktive Blindleistung ab (wirkt wie Kapazität)
$\underline{I} = I_w - jI_b \Rightarrow Q > 0$

untererregter Betrieb $\left|\underline{U_p}\right| < |\underline{U}|$ Maschine nimmt induktive Blindleistung auf (wirkt wie Induktivität)
$\underline{I} = I_w + jI_b \Rightarrow Q < 0$

7. Sternpunktbehandlung

7.1. Allgemeines

$U_{\text{LE(F)}}$	Spannung d. fehlerh. Außenleiter bei Erdberührung
$U_{\text{b(F)}}$	Außenleiterspannung wenn kein Fehler wäre
I_{CE}	kapazitiver Erdschlussstrom

Erdfehlerfaktor (Wirksamkeit der Sternpunkterdung): $\delta = \frac{U_{\text{LE(F)}}}{U_{\text{b(F)}}/\sqrt{3}}$

Netz ist wirksam geerdet falls $\delta \leq 1,4$
Bei wirksamer Erdung hohe Erdkurzschlussströme aber geringe betriebsfrequente und transiente Überspannung

7.2. Netz mit isoliertem (freiem) Sternpunkt

Bei einpoligem Erdschluss vergrößern sich die Beträge der Leiter-Erde Spnnungen der gesunden Leiter um $\sqrt{3} \Rightarrow \delta = \sqrt{3}$
Fehlerstrom (bei Erdschluss in L1):
$\underline{I}_1 = \underline{I}_{\text{CE}} = j\sqrt{3} \cdot 1,1 \cdot U_n \omega C_E$

7.3. Netz mit Erdschlusskompensation

wirksamer Nullleitwert: $\underline{Y}_{(0)} = \frac{1}{j3X_{\text{EL}}} + j\omega C_{\text{E}}$

Fehlerstrom: $\underline{I}_{E(F)} = 3 \cdot \underline{I}_{(0)} = 3 \cdot \frac{U_b}{\sqrt{3}} j \cdot (\omega C_E - \frac{1}{3X_{EL}})$

Strom durch die Erdlöschspule: $\underline{I}_{\text{Sp}} = \frac{U_b/\sqrt{3}}{jX_{\text{EL}}}$

7.4. Netz mit niederohmiger Sternpunkterdung

meist in Freileitungsnetzen mit $U_n \geq 220\text{kV}$ bzw. Kabelnetzen mit $U_n \geq 110\text{kV}$

Erdfehlerfaktor: $\delta = \left|\underline{a}^2 + \frac{\underline{Z}_{(1)} - \underline{Z}_{(0)}}{2\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(0)}}\right|$