

Inhaltsverzeichnis

I Elektrische Energietechnik	1
1 Wechselstromsystem	1
1.1 Effektivwert	1
1.2 Phasenverschiebungswinkel	1
1.3 Elektrische Leistung	1
1.4 Drehstromsystem	1
1.4.1 Symmetrisches Drehstromsystem	1
1.4.2 Drehoperatoren	1
1.4.3 Leistung	2
1.4.4 Sternschaltung	2
1.4.5 Dreieckschaltung	2
1.4.6 Kopplung der Leiter untereinander und zur Erde	2
2 Elektrische Maschinen	3
2.1 Transformator	3
2.1.1 Einphasiges ESB eines Transformators	3
2.1.2 Leerlauf	3
2.1.3 Dauerkurzschluss	3
2.1.4 Belastung mit Bemessungsstrom	3
2.1.5 Drehstromtransformator	3
2.2 Gleichstrommaschine (GMA)	3
2.2.1 Grundgleichungen für den stationären Betrieb	4
2.2.2 GMA mit Fremderregung/Nebenschluss	4
2.2.3 Wirkungsgrad	4
2.3 Synchronmaschine (SMA)	4
2.4 Asynchronmaschine (AMA)	5
3 Übertragung elektrischer Energie	5
3.1 Vereinfachte Leitungsbetrachtung	5
3.2 Leitung als Vierpol	6
3.3 Übertragung der natürlichen Leistung	6
3.3.1 Übertragung der natürlichen Leistung $P_2 = P_{\text{nat}}$	6
3.3.2 Übertragung von $P_2 < P_{\text{nat}}$	7
3.3.3 Übertragung von $P_2 > P_{\text{nat}}$	7
4 Hochspannungstechnik	8
4.1 Gasdurchschlag	8
4.1.1 Homogenes oder schwach inhomogenes Feld	8
4.1.2 Stark inhomogenes Feld	8
4.2 Lichtbogen	8
4.3 Versuchsaufbau	8
4.4 Kennlinie	8
4.4.1 Ayrton-Gleichung	8
4.5 Löschung	9

Teil I

Elektrische Energietechnik

1 Wechselstromsystem

1.1 Effektivwert

$$U_{\text{eff}} = U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_T u^2(\tau) d\tau}$$

$$U = \frac{\hat{u}}{\sqrt{2}} \text{ für sinusförmige Größen}$$

1.2 Phasenverschiebungswinkel

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

1.3 Elektrische Leistung

Komplexe Leistung

$$\underline{S} = \underline{U} \cdot \underline{I}^* = \frac{1}{2} \hat{u} \cdot \hat{i}^* = P + jQ$$

Komplexe Wechselleistung

$$\tilde{S} = \underline{U} \cdot \underline{I} = \frac{1}{2} \hat{u} \cdot \hat{i}$$

Momentanwert der Wechselleistung

$$\tilde{p}(t) = \text{Re}\{\tilde{S} \cdot e^{j2\omega t}\}$$

Leistungsfaktor

$$\lambda = \frac{|P|}{S} = |\cos(\varphi)|$$

Wirkfaktor

$$\cos(\varphi) = \frac{P_W}{S}$$

Blindfaktor

$$\sin(\varphi) = \frac{Q}{S}$$

1.4 Drehstromsystem

1.4.1 Symmetrisches Drehstromsystem

$$U_1 = U_2 = U_3$$

$$U_{12} = U_{21} = U_{23} = U_{32} = U_{31} = U_{13}$$

$$U_{12} = \sqrt{3} \cdot U_1$$

$$\underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_3 = 0$$

$$\underline{U}_{12} + \underline{U}_{23} + \underline{U}_{31} = 0$$

1.4.2 Drehoperatoren

$$\underline{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}}$$

$$\underline{U}_2 = \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_1$$

$$\underline{U}_3 = \underline{a} \cdot \underline{U}_1$$

$$1 + \underline{a} + \underline{a}^2 = 0$$

1.4.3 Leistung

Komplexe Leistung

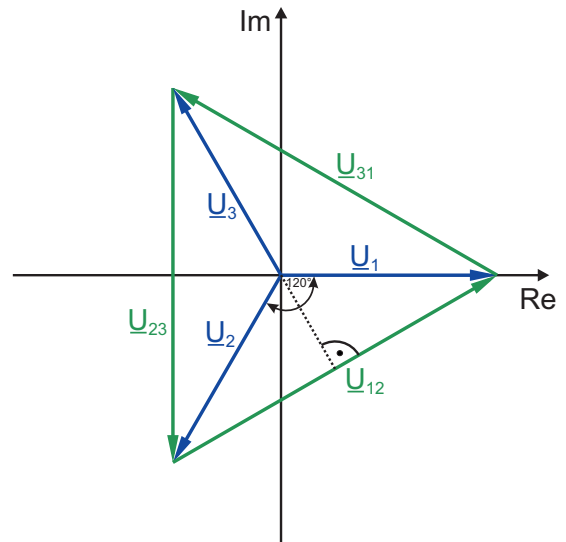
$$\underline{S} = \underline{U}_1 \cdot \underline{I}_1^* + \underline{U}_2 \cdot \underline{I}_2^* + \underline{U}_3 \cdot \underline{I}_3^*$$

$$\underline{S} = 3\underline{U}_1 \cdot \underline{I}_1^* \text{ falls symmetrisch}$$

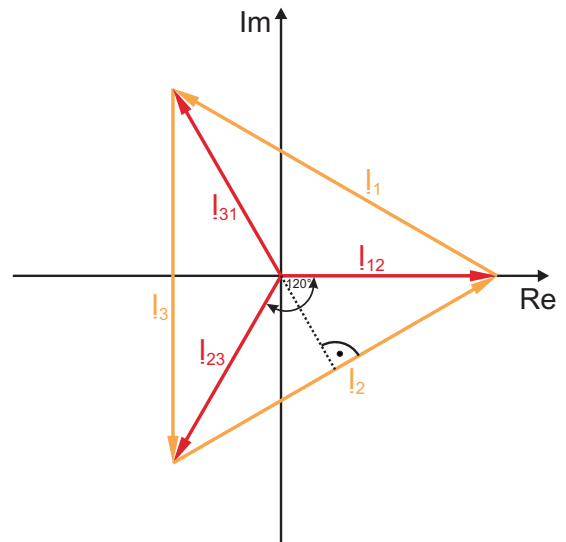
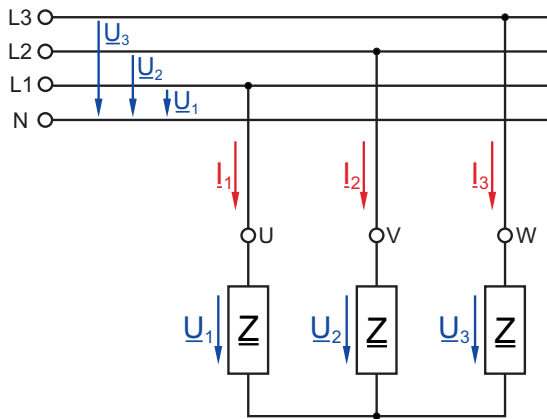
Komplexe Wechselleistung

$$\underline{\tilde{S}} = \underline{U}_1 \cdot \underline{I}_1 + \underline{U}_2 \cdot \underline{I}_2 + \underline{U}_3 \cdot \underline{I}_3$$

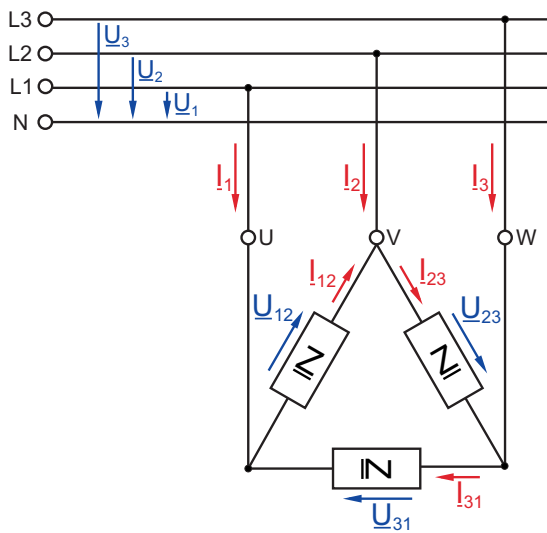
$$\underline{\tilde{S}} = 0$$



1.4.4 Sternschaltung



1.4.5 Dreieckschaltung



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

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

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

Für ein symmetrisches System gilt außerdem:

$$\underline{I} = |\underline{I}_1| = |\underline{I}_2| = |\underline{I}_3|$$

$$I_\Delta = |\underline{I}_{12}| = |\underline{I}_{23}| = |\underline{I}_{31}|$$

$$I = \sqrt{3} \cdot I_\Delta$$

$$U_\Delta = |\underline{U}_{12}| = |\underline{U}_{23}| = |\underline{U}_{31}|$$

1.4.6 Kopplung der Leiter untereinander und zur Erde

Die Kopplung kann wie folgt beschrieben werden:

$$\begin{pmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \\ \underline{U}_3 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{A} & \underline{B} & \underline{B} \\ \underline{B} & \underline{A} & \underline{B} \\ \underline{B} & \underline{B} & \underline{A} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \\ \underline{I}_3 \end{pmatrix}$$

A: Eigenimpedanz längs des Leiters
B: Koppelimpedanz zwischen den Leitern

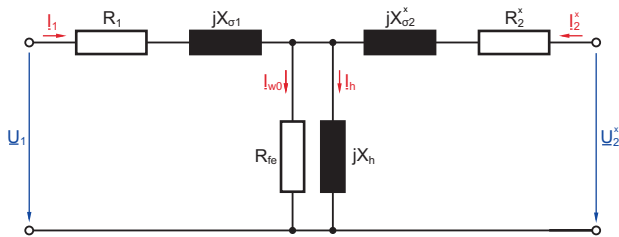
Für den symmetrischen Fall vereinfacht sich dies zu:

$$\begin{pmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \\ \underline{U}_3 \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \underline{A} & \underline{B} \\ \underline{B} & \underline{A} \end{bmatrix}}_{\underline{Z}_b} \begin{pmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \\ \underline{I}_3 \end{pmatrix}$$

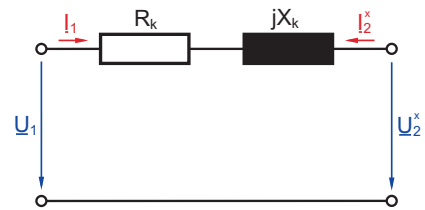
2 Elektrische Maschinen

2.1 Transformator

2.1.1 Einphasiges ESB eines Transformators



2.1.4 Belastung mit Bemessungsstrom



- $\ddot{u} = \frac{w_1}{w_2}$ Übersetzung
- $\ddot{u} = \frac{U_{r1T}}{U_{r2T}} \approx \frac{U_{n1}}{U_{n2}}$ Übersetzung (bessere Definition)
- R_1 Ohmscher Widerstand der OS-Wicklung
- $R_2^x = \ddot{u}^2 \cdot R_2$ Ohmscher Widerstand der US-Wicklung auf OS-Seite bezogen
- $X_{\sigma 1}$ Streureaktanz der OS-Wicklung
- $X_{\sigma 2}^x = \ddot{u}^2 \cdot X_{\sigma 2}$ Streureaktanz der US-Wicklung auf OS-Seite bezogen
- R_{Fe} Eisenwiderstand
- X_h Hauptreaktanz
- \underline{U}_1 Spannung auf der OS-Seite
- $\underline{U}_2^x = \ddot{u} \cdot \underline{U}_2$ Spannung auf der US-Seite auf OS-Seite bezogen
- \underline{I}_1 Strom auf der OS-Seite
- $\underline{I}_2^x = \frac{\underline{I}_2}{\ddot{u}}$ Strom auf der US-Seite auf OS-Seite bezogen
- S_{rT} Bemessungsleistung
- U_{r1T} Außenleiter-Bemessungsspannung

$$R_k = R_1 + R_2^x$$

$$X_k = X_{\sigma 1} + X_{\sigma 2}^x$$

2.1.5 Drehstromtransformator

Die Ersatzschaltbilder entsprechen den oben genannten, jedoch müssen die Spannungen durch $\sqrt{3}$ geteilt werden.

$$S_{rT} = \sqrt{3} \cdot U_{r1T} \cdot I_r$$

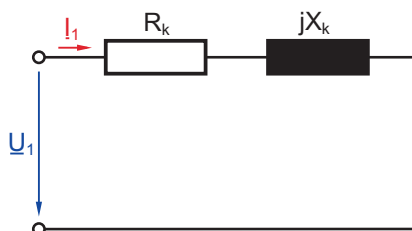
$$Z_k = \frac{U_k}{I_r} = u_k \cdot \frac{U_{r1T}^2}{S_{rT}}$$

2.1.2 Leerlauf

Im Leerlauf ($I_2^x = 0$) können der Widerstand R_1 und die Streureaktanz $X_{\sigma 1}$ vernachlässigt werden. Für den Leerlaufstrom ergibt sich dann:

$$I_{10} = \sqrt{I_{m0}^2 + I_{w0}^2} \quad \text{mit} \quad I_{m0} = I_h = \frac{U_1}{jX_h}$$

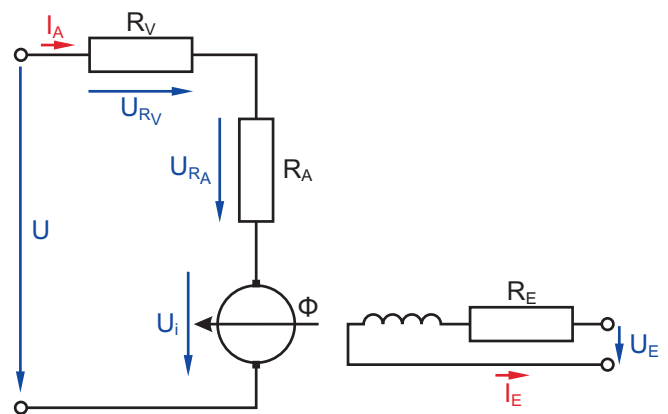
2.1.3 Dauerkurzschluss



$$u_k = \frac{U_k}{U_r} = \frac{U_{kT}}{U_{r1T}}$$

- U_k : Kurzschlussspannung (= U_1 bei Bemessungsstrom)
- U_{kT} : Kurzschlussspannung (Außenleiterspannung bei Bemessungsstrom)
- U_r : Bemessungsspannung (Leiter-Erde-Spannung)
- u_k : Relative Kurzschlussspannung

2.2 Gleichstrommaschine (GMA)



- U Klemmenspannung
- U_i Im Anker induzierte Spannung
- I_A Ankerstrom
- I_E Erregerstrom
- R_A Widerstand des Ankerkreises
- R_V Vorwiderstand
- Φ Wirksamer magn. Fluss bei el. Erregung

2.2.1 Grundgleichungen für den stationären Betrieb

3) Bestimme alle R_{A0} bis R_{Az^*} :

- K_1, K_2 Maschinenkonstanten
- M Drehmoment
- n Drehzahl
- n_0 Leerlaufdrehzahl
- v Geschwindigkeit
- r Radius
- Ω Winkelgeschwindigkeit

$$\lambda^* = \frac{M_{\max}}{M_{\min}} = \frac{I_{\max}}{I_{\min}} = \frac{R_{A0}}{R_{A1}} = \frac{R_{A1}}{R_{A2}} = \dots = \frac{R_{Az^*-1}}{R_{Az^*}}$$

$$R = R_A + R_V$$

$$U = U_i + R \cdot I_A = U_i + (R_A + R_V)I_A$$

$$U_i = K_1 \cdot \Phi \cdot n$$

$$M = F \cdot r$$

$$M = K_2 \cdot \Phi \cdot I_A$$

$$K_1 = 2\pi K_2$$

$$n = \frac{1}{T} = \frac{v}{2\pi r}$$

$$n = \frac{U}{\underbrace{K_1 \cdot \Phi}_{n_0}} - \frac{R}{K_1 \cdot K_2 \cdot \Phi^2} \cdot M$$

$$n_0 = \frac{U}{K_1 \cdot \Phi} = \frac{U \cdot n}{U_i} = \frac{U \cdot n}{U - R \cdot I_A}$$

$$\Omega = 2\pi n = \frac{v}{r}$$

$$P_{\text{mech}} = M \cdot \Omega = F \cdot v = U_i \cdot I_A = P_{\text{el,A}}$$

$$P_{\text{el}} = U \cdot I_A$$

$$P_R = P_{\text{el}} - P_{\text{mech}} = I_A^2 \cdot R$$

4) Bestimme die in Reihe geschalteten Vorwiderstände:

$$R_A = R_{Az^*}$$

$$R_{V1} = R_{Az^*-1} - R_{Az^*}$$

$$\dots$$

$$R_{Vz^*} = R_{A0} - R_{A1}$$

2.2.2 GMA mit Fremderregung/Nebenschluss

2.2.3 Wirkungsgrad

- a Beschleunigung
- m Masse

$$M_{\min} = M + M_{a_{\min}} = M + F_{\min} \cdot r = mr(g + a_{\min})$$

$$M_{\max} = \frac{M \cdot I_{\max}}{I_A}$$

$$n_0 = \frac{n_1 - n_2 \frac{M_1}{M_2}}{1 - \frac{M_1}{M_2}}$$

$$R_{A0} = R_{V,\max} + R_A = \frac{U}{I_{\max}}$$

$$\lambda = \frac{M_{\max}}{M_{\min}} = \frac{I_{\text{an,max}}}{I_{\text{an}}}$$

$$\eta_M = \frac{P_{\text{mech}}}{P_{\text{el}}} = \frac{U_i}{U} \quad \text{Motorbetrieb}$$

$$\eta_G = \frac{P_{\text{el}}}{P_{\text{mech}}} = \frac{U}{U_i} \quad \text{Generatorbetrieb}$$

Berechnung der Stufenanzahl z und der Vorwiderstände R_{Vi} :

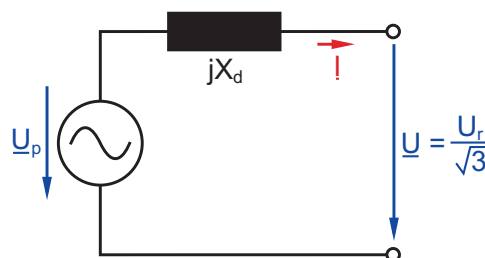
2.3 Synchronmaschine (SMA)

1) Berechne z^* :

$$z^* = \lceil z \rceil = \left\lceil \frac{\ln\left(\frac{R_{A0}}{R_A}\right)}{\ln(\lambda)} \right\rceil$$

2) Berechne λ^* :

$$\lambda^* = \exp\left(\frac{\ln\left(\frac{R_{A0}}{R_A}\right)}{z^*}\right)$$



U	Klemmenspannung
U_r	Bemessungsspannung (Außenleiterspannung)
I	Strangstrom
U_p	Polradspannung
X_d	Synchrone Reaktanz
S_r	Bemessungsscheinleistung (an Klemmen)
P	Wirkleistung
P_{VS}	Verlustleistung
P_{VE}	Leistungsbedarf für die Erregung
$\cos(\varphi)$	Leistungsfaktor
x_d	Bezogene synchrone Reaktanz
Z_r	Bemessungsimpedanz
n	Synchrone Drehzahl
p	Anzahl der Polpaare
ϑ_M	Maschinenwinkel
ω	Winkelgeschwindigkeit der Spannung
Ω	Mechanische Winkelgeschwindigkeit

U_r	Bemessungsspannung (Außenleiterspannung)
U_1	Ständerspannung
I_h	Magnetisierungsstrom
X_σ	Streureaktanz
X_h	Hauptreaktanz
R_L	Läuferwiderstand
f_0	Netzfrequenz
n_0	Synchrone Drehzahl
n_r	Drehzahl bei Nennbetrieb
p	Polpaarzahl
s	Schlupf
s_r	Bemessungsschlupf
s_k	Kippschlupf
f_{SL}	Frequenz der im Läufer induzierten Spannung
M_r	Bemessungsmoment
M_{an}	Anlaufmoment
M_k	Kippmoment
P_r	Bemessungsleistung (= P_{ab} , falls Motor)
S	Scheinleistung
η	Wirkungsgrad

$$S_r = \sqrt{3} \cdot U_r \cdot I_r$$

$$P = S_r \cdot \cos(\varphi) = 3 \cdot U \cdot I_w = \frac{3 \cdot U \cdot U_p}{X_d} \cdot \sin(\vartheta_M)$$

$$P_T = P + P_{VS} + P_{VE}$$

$$x_d = \frac{X_d}{Z_r} = \frac{\sqrt{3} \cdot X_d \cdot I_r}{U_r}$$

$$n = \frac{f}{p}$$

$$\underline{U} = \frac{U_r}{\sqrt{3}} = \underline{U}_p - jX_d I$$

$$\cos(\vartheta_M) = \frac{\operatorname{Re}\{\underline{U}_p\}}{|\underline{U}_p|}$$

$$\omega = p \cdot \Omega$$

$$I_w = I_r \cdot \cos(\varphi)$$

$$I_b = I_r \cdot \sin(\varphi)$$

Übererregter Synchrongenerator:

$$\underline{I} = I_w - jI_b$$

⇒ wirkt im Netz wie eine Kapazität

Untererregter Synchrongenerator:

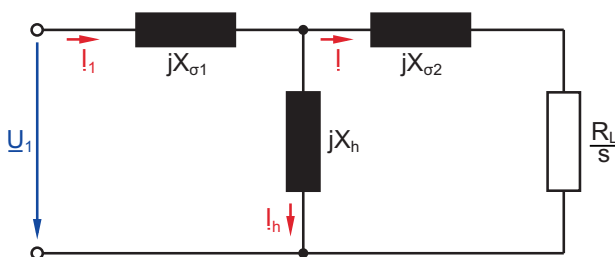
$$\underline{I} = I_w + jI_b$$

⇒ wirkt im Netz wie eine Induktivität

Phasenschieberbetrieb:

Im Falle eines Phasenschieberbetriebs gilt: $I_w = 0$

2.4 Asynchronmaschine (AMA)



Im Normalfall kann $jX_{\sigma 1}$ vernachlässigt werden.
 ⇒ $X_{\sigma 2} = X_\sigma$

In der Regel gilt: $p \approx \frac{f_0}{n_r}$

$$n_0 = \frac{f_0}{p}$$

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0}; \quad s_r = \frac{n_0 - n_r}{n_0}$$

$$s_k = \frac{R_L}{X_\sigma}$$

$$f_{SL} = s \cdot f_0$$

$$P_r = 2\pi \cdot n_r \cdot M_r$$

$$M = \frac{2M_K \cdot s_k \cdot s}{s_k^2 + s^2} \quad (\text{Kloss'sche Gleichung})$$

$$M_k = \frac{M_r \cdot (s_k^2 + s_r^2)}{2 \cdot s_k \cdot s_r} = \frac{3p \cdot U_1^2}{2\omega \cdot X_\sigma} = \frac{3p \cdot U_1^2}{8\pi^2 \cdot L_\sigma \cdot f_1^2}$$

$$M_{an} = \frac{2M_K \cdot s_k}{s_k^2 + 1}; \quad (n = 0 \rightarrow s = 1)$$

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} = (1 - s)$$

$$P_{Verl} = P_{zu} - P_{ab}$$

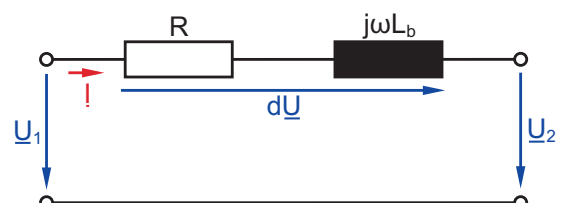
Falls Motorbetrieb und $X_h = 0$:

$$P_{zu} = 3I_r^2 \cdot \frac{R_L}{s} = \sqrt{3} \cdot U_r I_r \cos(\varphi) = S_{zu} \cdot \cos(\varphi)$$

$$S_{zu} = 3 \cdot I_r^2 \cdot Z; \quad Z^2 = X_\sigma^2 + \left(\frac{R_L}{s}\right)^2$$

3 Übertragung elektrischer Energie

3.1 Vereinfachte Leitungsbetrachtung



Vernachlässigung der Queradmittanzen bei hoher Belastung und kurzen Leitungen erlaubt (Freileitung: $l < 200$ km; Kabel: $l < 100$ km).

Für Hoch- und Mittelspannungsleitungen wird i.d.R. der ohmsche Längswiderstand R vernachlässigt.

$$\omega L_b = \omega L'_b \cdot l$$

$$R = R' \cdot l$$

$$d\underline{U} = \underline{U}_1 - \underline{U}_2 = \Delta U + j\delta U$$

$$\Delta U = \text{Re}\{d\underline{U}\}$$

$$\delta U = \text{Im}\{d\underline{U}\}$$

$$\underline{U}_2 = |\underline{U}_2| \cdot e^{j\varphi} \Rightarrow \underline{U}_1 = |\underline{U}_1| \cdot e^{j(\varphi+\vartheta)}$$

$$\tan(\vartheta) = \frac{\delta U}{\Delta U + |\underline{U}_2|}$$

$$\sin(\vartheta) = \frac{\delta U}{|\underline{U}_1|}$$

$$P_1 = 3 \cdot |\underline{U}_1| \cdot |\underline{I}| \cdot \cos(\varphi_{U_1 I}) = 3 \cdot |\underline{U}_1| \cdot I_w$$

$$P_2 = 3 \cdot |\underline{U}_2| \cdot |\underline{I}| \cdot \cos(\varphi_{U_2 I}) = 3 \cdot |\underline{U}_2| \cdot I_w$$

$$Q_1 = 3 \cdot |\underline{U}_1| \cdot |\underline{I}| \cdot \sin(\varphi_{U_1 I}) = 3 \cdot |\underline{U}_1| \cdot I_b$$

$$Q_2 = 3 \cdot |\underline{U}_2| \cdot |\underline{I}| \cdot \sin(\varphi_{U_2 I}) = 3 \cdot |\underline{U}_2| \cdot I_b$$

$$P_{\text{Ltg}} = P_1 - P_2 = 3|\underline{I}|^2 \cdot R$$

$$Q_{\text{Ltg}} = Q_1 - Q_2 = 3|\underline{I}|^2 \cdot \omega L_b$$

\underline{U}_2 wird in die reelle Achse gelegt (Konvention).

Für ohmsch-induktive Verbraucher gilt:

$$d\underline{U} = (I_w - jI_b)(R + j\omega L_b)$$

$$\underline{dU} = \underbrace{R \cdot I_w + \omega L_b \cdot I_b}_{\Delta U} + j \underbrace{(\omega L_b \cdot I_w - R \cdot I_b)}_{\delta U}$$

Für ohmsch-kapazitive Verbraucher gilt:

$$d\underline{U} = (I_w + jI_b)(R + j\omega L_b)$$

$$\underline{dU} = \underbrace{R \cdot I_w - \omega L_b \cdot I_b}_{\Delta U} + j \underbrace{(\omega L_b \cdot I_w + R \cdot I_b)}_{\delta U}$$

Der Längsspannungsfall ΔU ist maßgebend für die Spannungshaltung längs der Leitung, während der Querspannungsfall δU vorwiegend den Leitungswinkel ϑ und damit die Stabilität bestimmt.

Konstruktion des Zeigerdiagramms:

Gegeben seien $|\underline{U}_1|, |\underline{U}_2|, \vartheta$.

1) \underline{U}_2 einzeichnen (reelle Achse)

2) \underline{U}_1 einzeichnen

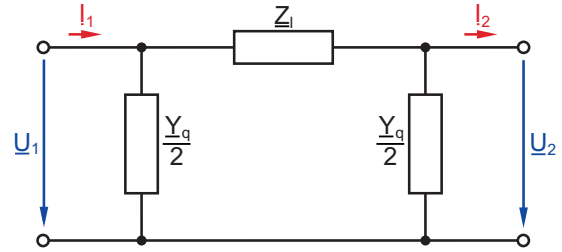
3) $d\underline{U} = \underline{U}_1 - \underline{U}_2$ einzeichnen

4) ΔU und δU einzeichnen mit $d\underline{U} = \Delta U + j\delta U$

5) \underline{I} einzeichnen mit $|\underline{I}| = \frac{|d\underline{U}|}{\omega L_b}$ und $\underline{I} \perp d\underline{U}$ falls $R = 0$

6) I_w und I_b einzeichnen mit $\underline{I} = I_w + jI_b$

3.2 Leitung als Vierpol



$\underline{U}_1, \underline{U}_2$	Sternspannungen
Z_w	Betriebswellenwiderstand
β	Phasenkonstante
ϑ	Leitungswinkel

Für lange Leitungen genügt die vereinfachte Leitungsbeachtung nicht mehr, da der Wellencharakter der Leitung berücksichtigt werden muss.

Leitungsgleichungen für verlustlose Leitung:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\beta l) & jZ_w \sin(\beta l) \\ jZ_w \sin(\beta l) & \cos(\beta l) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_2 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix}$$

$$Z_w = \sqrt{\frac{\omega L'_b}{\omega C'_b}}$$

$$\beta = \sqrt{\omega L'_b \cdot \omega C'_b} = \omega \sqrt{L'_b \cdot C'_b}$$

$$\vartheta = \beta \cdot l$$

$$Z_l = jZ_w \cdot \sin(\beta l)$$

$$\frac{Y_q}{2} = \frac{\cos(\beta l) - 1}{Z_l} = \frac{\cos(\beta l) - 1}{jZ_w \sin(\beta l)}$$

Speziell für kurze Leitungen (Freileitung: $l \leq 200$ km bzw. Kabel: $l \leq 100$ km) gilt:

$$Z_l = j\omega L'_b l$$

$$\frac{Y_q}{2} = \frac{j\omega C'_b l}{2}$$

3.3 Übertragung der natürlichen Leistung

Natürliche Leistung ist die Leistung, die über eine Leitung übertragen werden kann, wenn sie mit dem Betriebswellenwiderstand Z_w abgeschlossen ist.

3.3.1 Übertragung der natürlichen Leistung $P_2 = P_{\text{nat}}$

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_2}{Z_w}$$

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 e^{j\beta l}$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_2 \cdot e^{j\beta l}$$

$$\frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_1} = \frac{\underline{U}_2}{\underline{I}_2} = Z_w$$

$$P_{\text{nat}} = 3 \cdot \frac{|\underline{U}_2|^2}{Z_w} = \frac{U_r^2}{Z_w}$$

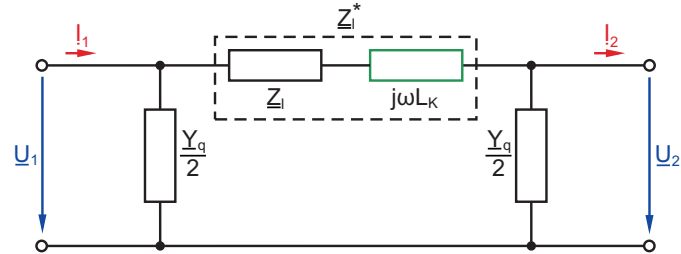
Es wird somit nur Wirkleistung übertragen.

3.3.2 Übertragung von $P_2 < P_{nat}$

$P_2 < P_{nat} \Rightarrow Z_W \uparrow \Rightarrow L'_b \uparrow$ oder $C'_b \downarrow$

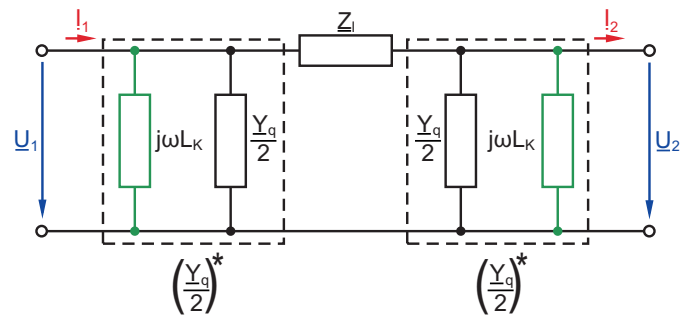
Ziel: $|\underline{U}_1| = |\underline{U}_2|, |\underline{I}_1| = |\underline{I}_2|$

Längskompensation: $L'_b \uparrow \Rightarrow \beta l \uparrow \Rightarrow$ Stabilität \downarrow



Querkompensation: $C'_b \downarrow \Rightarrow \beta l \downarrow \Rightarrow$ Stabilität \uparrow

Variante 1:



Vorgehensweise zum Berechnen von L_K :

1) Berechne

$$Z_w^* = \frac{U_r^2}{P}$$

2) Berechne

$$(\beta l)^* = \arcsin\left(\frac{Z_l}{jZ_w^*}\right)$$

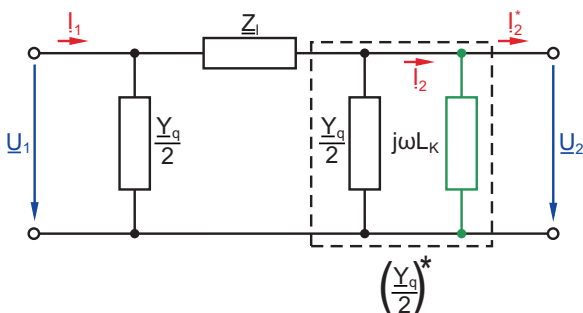
3) Berechne

$$\left(\frac{Y_q}{2}\right)^* = \frac{\cos((\beta l)^*) - 1}{Z_l}$$

4) Berechne L_K mit

$$\frac{1}{j\omega L_K} = \left(\frac{Y_q}{2}\right)^* - \frac{Y_q}{2}$$

Variante 2:

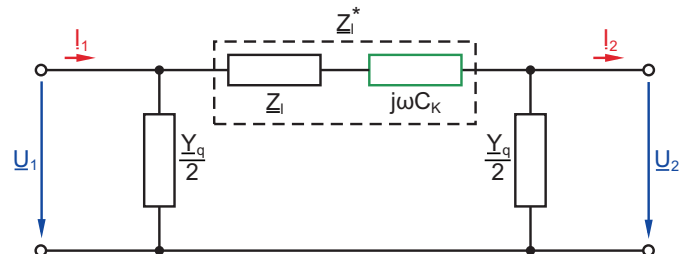


3.3.3 Übertragung von $P_2 > P_{nat}$

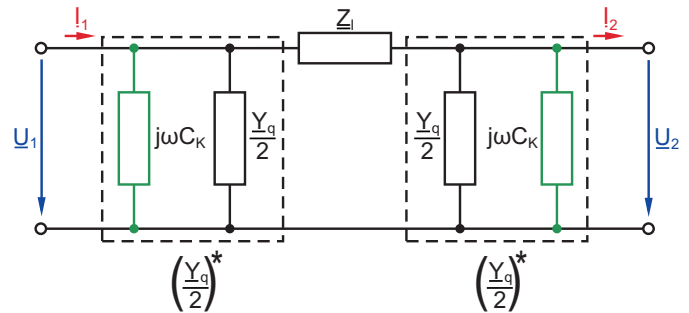
$P_2 > P_{nat} \Rightarrow Z_W \downarrow \Rightarrow L'_b \downarrow$ oder $C'_b \uparrow$

Ziel: $|\underline{U}_1| = |\underline{U}_2|, |\underline{I}_1| = |\underline{I}_2|$

Längskompensation: $L'_b \downarrow \Rightarrow \beta l \downarrow \Rightarrow$ Stabilität \uparrow



Querkompensation: $C'_b \uparrow \Rightarrow \beta l \uparrow \Rightarrow$ Stabilität \downarrow



Vorgehensweise zum Berechnen von C_K :

1) Berechne

$$Z_w^* = \frac{U_r^2}{P}$$

2) Berechne

$$(\beta l)^* = \arcsin\left(\frac{Z_l}{jZ_w^*}\right)$$

3) Berechne

$$\left(\frac{Y_q}{2}\right)^* = \frac{\cos((\beta l)^*) - 1}{Z_l}$$

4) Berechne C_K mit

$$j\omega C_K = \left(\frac{Y_q}{2}\right)^* - \frac{Y_q}{2}$$

4 Hochspannungstechnik

4.1 Gasdurchschlag

- E_0 Innere elektrische Festigkeit von Luft
- E_{dh} Durchschlaghöchstfeldstärke
- E_S Spezifischer Spannungsbedarf einer Streamerentladung
- U^* Spannungsbedarf der Streamerentladung
- U_i TE-Einsatzspannung
- η Homogenitätsgrad
- s Elektrodenabstand

$$E_0 = 25 \frac{kV}{cm} \quad (\text{in Luft})$$

$$E_S = 4,5 \frac{kV}{cm} \quad (\text{pos. Gleichspannung in Luft})$$

$$E_S = 5 - 10 \frac{kV}{cm} \quad (\text{neg. Gleichspannung in Luft})$$

$$U^* = E_S \cdot s$$

$$U_i = E_{dh} \cdot s \cdot \eta$$

$$\eta = \frac{E_{\text{mittel}}}{E_{\text{max}}} = \frac{U}{E_{\text{max}} \cdot s}$$

- $\eta = 1$ Homogenes Feld
- $\eta < 1$ Schwach inhomogenes Feld
- $\eta \ll 1$ Stark inhomogenes Feld

4.1.1 Homogenes oder schwach inhomogenes Feld

$$U^* < U_i$$

$$U_d = U_i = E_{dh} \cdot s \cdot \eta$$

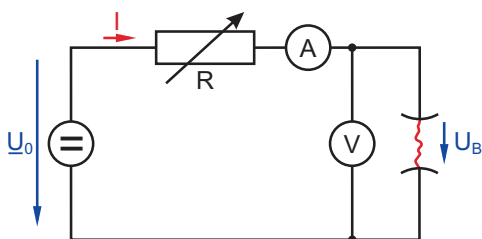
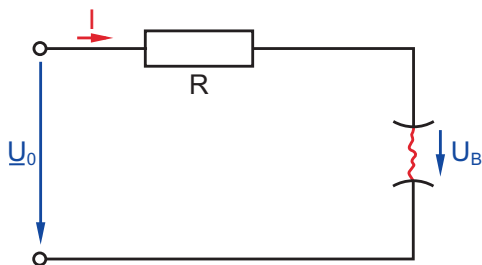
4.1.2 Stark inhomogenes Feld

$$U^* > U_i$$

$$U_d = U^* = E_S \cdot s$$

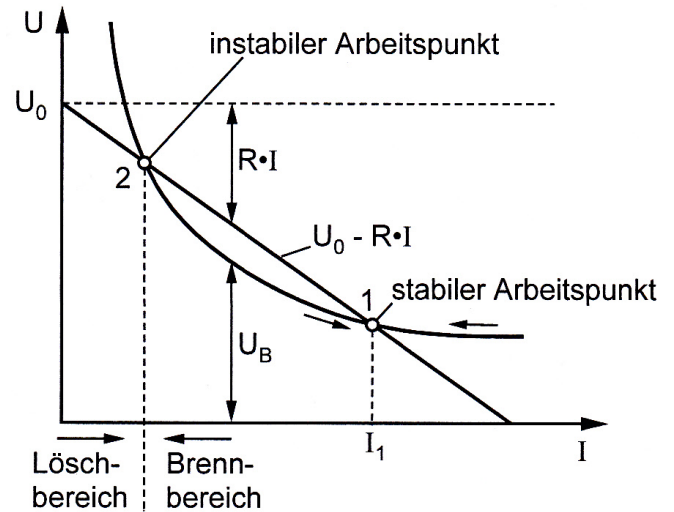
4.2 Lichtbogen

4.3 Versuchsaufbau



- U_B Lichtbogenspannung
- R Vorwiderstand
- U_0 Konstante Gleichspannung

4.4 Kennlinie



$$n \cdot U_B > U_{\text{Netz}} \quad (\text{Löschbedingung})$$

• Instabiler AP:

- Auslenkung nach links:
 - erhöhter Spannungsbedarf (kann nicht aus Schaltung gedeckt werden)
 - Lichtbogen erlischt
- Auslenkung nach rechts:
 - Strom wird größer
 - Lichtbogen läuft in den stabilen AP

• Stabiler AP:

- Auslenkung nach rechts:
 - Strom wird kleiner
 - Lichtbogen läuft in den stabilen AP zurück

4.4.1 Ayrton-Gleichung

- l Lichtbogenlänge
- a, b, c, d Materialabhängige Konstanten
- n Anzahl der Teillichtbögen

$$n \cdot U_B > U_{\text{max}} \quad (\text{Löschbedingung})$$

$$U_B = a + b \cdot l + \frac{c + d \cdot l}{I} = U_0 - R \cdot I$$

$$\Rightarrow l = \frac{U_B - a - \frac{c}{I}}{b + \frac{d}{I}}$$

$$\Rightarrow I_{1,2} = \frac{-(a + bl - U_0) \pm \sqrt{(a + bl - U_0)^2 - 4R(c + dl)}}{2R}$$

Für $R_{\text{max}}, U_{0\text{min}}$ und l_{max} muss die Diskriminante gleich Null gesetzt werden:

$$(a + bl - U_0)^2 - 4R(c + dl) \stackrel{!}{=} 0$$

• R_{max} :

$$\Rightarrow R_{\text{max}} = \frac{(a + bl - U_0)^2}{4(c + dl)}$$

- $U_{0\min}$:

$$U_0^2 + \underbrace{[-2(a+bl)]}_B U_0 + \underbrace{[a^2 + (bl)^2 + 2abl - 4R(C+dl)]}_C = 0$$

$$\Rightarrow U_{0\min_{1/2}} = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4C}}{2}$$

- l_{\max} :

$$\underbrace{b^2}_A l^2 + \underbrace{(2ab - 2bU_0 - 4Rd)}_B l + \underbrace{(a^2 - 2aU_0 + U_0^2 - 4Rc)}_C = 0$$

$$\Rightarrow l_{\max_{1/2}} = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$$

4.5 Löschung

n Anzahl der Teillichtbögen

$$n \cdot U_B > U_{\max} \quad (\text{Löschbedingung})$$

Bei einem Blechabstand von wenigen Millimetern gilt:
 $U_B \approx 20V$.

Lizenz: CC BY-NC-SA 3.0

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/de/>