1 Physikalische Grundlagen

$P = M \cdot \omega$
$\omega = 2\pi n$

2 Lastganglinien

T_n: Nennbetriebsdauer
T_a Ausnutzungsadauer
T_{ben}: Benutzungsdauer
P_{max}: Höchstalast
$W = \int_0^{T_n} P(t)\,\mathrm{d}t = P_{mittel} T_n = P_n T_a = P_{max} T_{ben}$

3 Wechel-/Drehstromsystem

3.1 Wechselstromsystem

Phasenwinkel $\varphi = \varphi_u - \varphi_i$ Kreisfrequenz: $\omega = 2\pi f$

Physikalische Zeitsignale:
$u(t) = \hat{u}\cos(\omega t + \varphi_u) = U\sqrt{2}\cos(\omega t + \varphi_u)$
$i(t) = \hat{\imath}\cos(\omega t + \varphi_i) = I\sqrt{2}\cos(\omega t + \varphi_i)$

Komplexes Zeitsignal(Drehzeiger): $\underline{\boldsymbol{u}}(t) = \hat{u}\exp\left(\mathrm{j}(\omega t + \varphi_u)\right)$, $u(t) = \Re(\underline{\boldsymbol{u}}(t))$

Scheitelwert $\hat{u}$, Effektivwert $U = \sqrt{\frac{1}{T}\int_{t_0}^{t_0+T} u^2(\tau)\,\mathrm{d}\tau}$, bei Sinus $U = \frac{\hat{u}}{\sqrt{2}}$
Effektiver Zeiger: $\underline{\boldsymbol{U}} = U\exp(\mathrm{j}\varphi_u)$

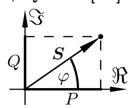
$$\underline{\boldsymbol{U}} \cdot \sqrt{2}\exp(\mathrm{j}\omega t) = \underline{\boldsymbol{u}}(t)$$

3.2 Komplexe Leistung

$P = \frac{1}{T}\int_0^T p(t)\,\mathrm{d}t = \frac{1}{T}\int_0^T u(t) \cdot i(t)\,\mathrm{d}t$

Wirkleistung	$P = \Re(\underline{\boldsymbol{S}}) = UI \cdot \cos(\varphi)$	[W]
Blindleistung	$Q = \Im(\underline{\boldsymbol{S}}) = UI \cdot \sin(\varphi)$	[Var]
Scheinleistung	$S = U \cdot I = \sqrt{P^2 + Q^2}$	[VA]

Scheinleistung: $\underline{\boldsymbol{S}} = \underline{\boldsymbol{U}} \cdot \underline{\boldsymbol{I}}^*$
$\|\underline{\boldsymbol{S}}\| = S = \sqrt{P^2 + Q^2}$
Leistungsfaktor $\lambda = \frac{|P|}{S} = \cos(\varphi)$



Scheinleistung schwingt mit doppelter Netzfrequenz! $p(t) = P + S \cdot \cos(2\omega t + \varphi_u + \varphi_i)$
$\underline{\tilde{\boldsymbol{S}}} = \underline{\boldsymbol{U}} \cdot \underline{\boldsymbol{I}}$

Impedanz(Scheinwiderstand)	Admittanz(Scheinleitwert)
$\underline{\boldsymbol{Z}} = R + \mathrm{j}X = \exp(\mathrm{j}\varphi_Z)$	$\underline{\boldsymbol{Y}} = G + \mathrm{j}B = \exp(\mathrm{j}\varphi_Y)$
$\underbrace{Z(j\omega)}_{\text{Impedanz}} = \underbrace{R(j\omega)}_{\text{Resistanz}} + j\underbrace{X(j\omega)}_{\text{Reaktanz}}$	$\underbrace{Y(j\omega)}_{\text{Admittanz}} = \underbrace{G(j\omega)}_{\text{Konduktanz}} + j\underbrace{B(j\omega)}_{\text{Suszeptanz}}$
$\underline{\boldsymbol{U}} = \underline{\boldsymbol{Z}} \cdot I$	$\underline{\boldsymbol{I}} = \underline{\boldsymbol{Y}} \cdot \underline{\boldsymbol{U}}$

3.3 Drehstromsystem

Drehoperator: $\underline{\boldsymbol{a}} = \exp\left(\mathrm{j}\frac{2}{3}\pi\right)$ $\underline{\boldsymbol{a}}^0 = \underline{\boldsymbol{a}}^3 = 1$ $\underline{\boldsymbol{a}}^* = \underline{\boldsymbol{a}}^2$

Effektive Leiter-Erdspannungen: $\underline{\boldsymbol{U}}_1, \underline{\boldsymbol{U}}_2, \underline{\boldsymbol{U}}_3$
Effektive Außenleiterspannungen: $\underline{\boldsymbol{U}}_{12}, \underline{\boldsymbol{U}}_{23}, \underline{\boldsymbol{U}}_{31}$
symmetrischer Betrieb:
$U = |U_1| = |U_2| = |U_3|$
Netznennspannung: $U_n = |U_{12}| = |U_{23}| = |U_{32}| = \sqrt{3}U$
Gesamte Leistung: $\underline{\boldsymbol{S}} = \sqrt{3} \cdot \underline{\boldsymbol{U}}_n \cdot \underline{\boldsymbol{I}}^\star$
bei symmetrischem Betrieb: $\underline{\boldsymbol{S}} = 3 \cdot \underline{\boldsymbol{U}} \cdot \underline{\boldsymbol{I}}$
bei unsymmetrischem Betrieb:

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

Komplexe Wechselleistung:

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

Tatsächlicher Leistungsfluss:

$$p(t) = \mathrm{Re}\left\{\underline{\boldsymbol{S}}\right\} + \mathrm{Re}\left\{\underline{\tilde{\boldsymbol{S}}}e^{j2\omega t}\right\}$$

4 Elektrische Energieübertragung

4.1 Drehstromleitung

$$\begin{pmatrix} \underline{\boldsymbol{U}}_1 \\ \underline{\boldsymbol{U}}_2 \\ \underline{\boldsymbol{U}}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{\boldsymbol{Z}}_d & \underline{\boldsymbol{Z}}_k & \underline{\boldsymbol{Z}}_k \\ \underline{\boldsymbol{Z}}_k & \underline{\boldsymbol{Z}}_d & \underline{\boldsymbol{Z}}_k \\ \underline{\boldsymbol{Z}}_k & \underline{\boldsymbol{Z}}_k & \underline{\boldsymbol{Z}}_d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{\boldsymbol{I}}_1 \\ \underline{\boldsymbol{I}}_2 \\ \underline{\boldsymbol{I}}_3 \end{pmatrix}$$

Im symmetrischen Betrieb kann im einphasigen ESB Z_b als Leitungsimpedanz eingesetzt werden: $\underline{\boldsymbol{Z}}_b = \underline{\boldsymbol{Z}}_d - \underline{\boldsymbol{Z}}_k$

5 Elektrische Maschinen

können als Motoren oder Generatoren benutzt werden. ($\eta > 90\%$)
Besteht aus Stator(Ständer),Rotor(Läufer), Anker und Welle.
n : Drehzahl; M : magn. Moment

5.1 Der Transformator

ü	Übersetzung
$\ddot{u}_r$	Bemessungsübersetzung
U_{r1T}, U_{r2T}	Bemessungsspannungen
S_{rT}	Bemessungsleistung
U_K	Kurzschlussspannung
u_k	bezogene Kurzschlussspannung
u_r	bezogener Wirkspannungsabfall
P_{Cu}	Kupferverluste
P_{Fe}	Eisenverluste
Z_k	Kurzschlussimpedanz

Zur Berechnung wird oft $\ddot{u}_r$ anstelle von $\ddot{u}$ eingesetzt, da ersteres meist unbekannt ist. Die Bemessungsübersetzung findet sich aber auf dem Typenschild.
$\underline{\boldsymbol{U}}^b = \ddot{u}\underline{\boldsymbol{U}}$
$\underline{\boldsymbol{I}}^b = \frac{1}{\ddot{u}}\underline{\boldsymbol{I}}$
$\underline{\boldsymbol{Z}}^b = \ddot{u}^2\underline{\boldsymbol{Z}}$
$\ddot{u} = \frac{W_1}{W_2}$
$\ddot{u}_r = \frac{U_{r1T}}{U_{r2T}}$
$u_k = \frac{U_K}{U_{r1T}}$
$Z_k = u_k \frac{U_{r1T}^2}{S_{rT}}$
$u_r = \frac{U_{rT}}{U_{r1T}}$
$R_k = P_{Cu}\left(\frac{U_{r1T}}{S_{rT}}\right)^2$
$R_k = u_r \frac{U_{r1T}^2}{S_{rT}}$
$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2}$
$R_{Fe} = \frac{U_{r1T}^2}{P_{Fe}}$
$I_{W0} = \frac{P_{Fe}}{\sqrt{3}U_{r1T}}$
$I_h = \sqrt{I_{10}^2 - I_{W0}^2}$
$X_h = \frac{U_{r1T}}{\sqrt{3}I_h}$

5.2 Gleichstrommaschine

p	Polpaarzahl
z	Anzahl der Schaltstufen
λ	Schaltverhältnis
U	Ankerklemmenspannung
U_i	Im Anker induzierte Spannung
K_1, K_2	Maschinenkonstanten
Φ	magnetischer Fluss durch den Anker
I_A	Ankerstrom
R_A	Widerstand der Ankerwicklungen
I_E	Erregerstrom

5.2.1 Grundgleichungen

$U = U_i + (R_A + R_v)I_A = U_i + RI$
$U_i = K_1\Phi n$
$M = K_2\Phi I_A$
$\Phi = f(I_E)$
falls verlustfrei: $K_1 = 2\pi K_2$
$n = \frac{U}{K_1 \cdot \Phi} - \frac{R}{K_1 \cdot K_2 \cdot \phi^2}M$

5.2.2 Anlaufen mit Vorwiderständen

$R_{A,z-1} = R_A + R_{V1}$, $R_{A,z-1} = R_A + R_{V1} + R_{V2}$, ...,
$R_{A,0} = R_A + R_{V1} + \ldots + R_{Vz}$
$\lambda = \frac{M_{max}}{M_{min}} = \frac{R_{A,Z-1}}{R_{A,Z}}$
$z = \log_\lambda \frac{R_{A0}}{R_A}$

5.2.3 Fremderregt

$n_0 = \frac{U}{K_1\Phi}$
$M_A = \frac{UK_2\Phi}{R}$
$n = n_0 - n_0\frac{M}{M_A}$

5.2.4 Reihenschluss

$M = \frac{K_2}{K_3}\Phi^2$
$n = \frac{U}{\sqrt{2\pi K_1 K_2}}\frac{1}{\sqrt{M}} - \frac{R}{K_1 K_2}$

5.3 Synchronmaschine

Synchrone Reaktanz $X_d = \omega \cdot (L_h + L_\sigma)$
$X_d \cdot I_w = U_p \sin(\vartheta_M)$
$X_d = x_d \frac{U_r^2}{S_r}$

Übererregung	Untererregung
SMA wirkt wie Kapazität	SMA wirkt wie Induktivität
gibt induktive Blindleistung ab	nimmt induktive Blindleistung auf

5.4 Asynchronmaschine

Bemessungsmoment $M_r = \frac{P_r}{2\pi n_r}$
Kloss'sche Gleichung $M = \frac{2M_k \cdot s \cdot s_k}{s^2 + s_k^2}$

Kippmoment M_k; Betrieb bei ca. $\frac{2}{3}M_k \Rightarrow \vartheta_M < 42^\circ$

5.5 Asynchronmaschine

$s = \frac{n_0 - n}{n_0}$
$M = \frac{3}{2\pi n_0}\frac{I^2 R_l}{s}$
$n_0 = \frac{f}{p}$
$M = \frac{2M_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}$
Anlauf nur möglich falls $M_A < M_{an}$

Feldschwächung: $\Phi_M \propto \frac{U_{st,r}}{f_{st,r}}$
U kann nicht beliebig erhöht werden $\Rightarrow$ Fluss wird kleiner $\Rightarrow$ Moment wird kleiner.

5.6 elektrische Energieübertragung

Freileiter oder Erdleiter:

- Erdkabel-Isolierung: Papier mit Öl getränkt oder vernetztes PE
- Erdakabel bei gleicher Übertragung etwa 4 – 7 mal teuerer.
- Störungen bei Freileitern leichter lokalisierbar und behebbar.

Längsimpedanzen (KS) und Queradmittanzen (LL)

U_n	Leitung	Leiter	R	$X_b' = \omega L_b'$	$Y_b = \omega C$
30kV	FL	Al/St 95/15	0.30	0.37	

$\underline{\boldsymbol{U}}_{12} = \Delta U + \mathrm{j}\delta U$
meist $R << \omega L_b$ $\Rightarrow \underline{\boldsymbol{U}}_{12} = \omega L_b(I_w + I_b)$

Phasenkonstante $\beta = 2\pi f\frac{\sqrt{\varepsilon_r}}{c_0}$ $\beta(FL) \approx \frac{6^\circ}{100km}$

	$\underline{\boldsymbol{Z}}_l$	$\frac{\underline{\boldsymbol{Y}}_q}{2}$
el. lange Leitung	$\mathrm{j}\underline{\boldsymbol{Z}}_w\sin(\beta l)$	$\frac{\cos(\beta l) - 1}{\mathrm{j}\underline{\boldsymbol{Z}}_w\sin(\beta l)}$
el. kurze Leitung	$\mathrm{j}\omega L_b' I$	$\frac{\mathrm{j}\omega C_b' l}{2}$

natürlicher Betrieb($\underline{\boldsymbol{Z}}_2 = \underline{\boldsymbol{Z}}_w$): Blindleistungsggw

5.7 Vereinfachte Leitungsbetrachtung

Vernachlässigung von Queradmittanzen $\Rightarrow I_{in} = I_{out}$
Längsspannungsabfall: $\Delta U = R \cdot I_w + \omega L_b I_b$
Querspannungsabfall: $\delta U = \omega L_b I_w - RI_b$
Leitungswinkel: $\vartheta = \varphi_{U1} - \varphi_{U2}$