"Was heisst ...?"

Turboläufer: $X_q = X_d$ $L_d = L_q$

Betriebspunkt = quasistationärer Betrieb = stationärer Betrieb: Lastmoment= innerer Moment, $M_i = M_L$

fremderregt: keine Reihenschlussmaschine, Maschinenkonstante $c\phi$ konstant, üblicher Fall

kompensiert: ist immer so, Vereinfachung

Generatorbetrieb: U_p nach links

Motorbetrieb: U_p nach rechts

untererregt: $U_P < U_S, I_S$ zeigt nach links

übererregt: $U_P > U_S, I_S$ zeigt nach rechts

Gleichstrommaschine

$P = U \cdot I \qquad P_A = U_A \cdot I_A = \underbrace{R_A \cdot I_A^2}_{=P_{el}} + \underbrace{M_i \cdot \Omega}_{=Pmech}$

$U_A = R_A \cdot I_A + c\phi \cdot \Omega \qquad U_{ind} = c\phi \cdot \Omega \qquad M_i = c\phi \cdot I_A$

$\frac{c\phi}{c\phi_N} = \frac{I_f}{I_{fN}}$

Leerlauf: $I_A = 0$ Stillstand: $\Omega = 0$

$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{M}{J} \qquad \frac{d\varphi}{dt} = \Omega \qquad \Omega_0 = \frac{U_A}{c\phi} \quad \Omega = 2\pi \cdot n$

$\Rightarrow \Omega = \frac{M}{J} \cdot t \Rightarrow \varphi - \varphi_0 = \frac{M_i}{J} \cdot \frac{t^2 - t_0^2}{2}$

Kennlinie fremdkompensiert: $\Omega = \frac{U_A}{c\phi} - \frac{R_A}{(c\phi)^2} \cdot M_i$

Reihenschlussmaschine:

$P_{Verl} = R_{ges} \cdot I_A^2 = (R_F + RA) \cdot I_A^2$

$\frac{c\phi_1}{I_{M1}} = \frac{c\phi_N}{I_{MN}} \quad I_f = I_A \quad \frac{c\phi_1}{c\phi_2} = \frac{M_1}{M_2}$

Parallelbetrieb von zwei Maschinen:

$M_i = M_{i1} + M_{i2} \quad U_{A1} = U_{A2} \quad I$ ist unterschiedlich

Reihen / Serienschaltung von zwei Maschinen:

$M_i = M_{i1} + M_{i2} \quad U_{ges} = U_1 + U_2$

$U_A \text{ gleich} \begin{cases} U_{A1} = c\phi_1\Omega + R \cdot I_A \\ U_{A2} = c\phi_2\Omega + R \cdot I_A \end{cases}$

Synchronmaschine

$S_N = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_N \qquad U_N = \sqrt{3} \cdot U_S \quad U_{SN} \hat{=} U_S$

$P_{el} = S \cdot \cos(\varphi) \qquad P_{el} = P_{mech} = M_i \cdot \Omega \qquad Q = S \cdot \sin(\varphi)$

$\Omega = \frac{1}{p} \cdot \omega = \frac{1}{p} \cdot 2\pi f_{Netz} \qquad \Omega = 2\pi \cdot n \quad n = \frac{f}{p}$ Beachte: s $\neq$ min

$\underline{U}_P = \underline{U}_S + j \cdot X_d \cdot \underline{I}_S \qquad \underline{X}_d = j \cdot \omega \cdot L_d \qquad \underbrace{|X_d| = \omega \cdot L_d}_{\text{falls } X_d \text{ gesucht, diese Formel nehmen}}$

$\frac{U_P}{U_S} = \frac{I_f}{I_{f0}} \qquad \frac{I_{f1}}{I_{f2}} = \frac{U_{P1}}{U_{P2}} \qquad \frac{\sin(\vartheta)_1}{\sin(\vartheta)_2} = \frac{M_{i1}}{M_{i2}}$

Generatorbetrieb: U_P zeigt nach links
Motorbetrieb: U_P zeigt nach rechts
Stillstand: U_P zeigt nach oben wie U_S

$X_d \cdot I_S \perp I_S$
$\varphi = \sphericalangle \ I_S, U_S$
$\vartheta = \sphericalangle \ U_S, U_P$

Motor übererregt: $\vartheta < 0, \varphi > 0$ Motor untererregt: $\vartheta < 0, \varphi < 0$
Generator übererregt: $\vartheta > 0, \varphi > 0$ Generator untererregt: $\vartheta > 0, \varphi < 0$
Untererregt: $U_P < U_S, I_S$ zeigt nach links
übererregt: $U_P > U_S, I_S$ zeigt nach rechts

Cosinussatz: $c^2 = a^2 + b^2 - 2 \cdot a \cdot b \cdot \cos(\gamma)$
Sinussatz: $\frac{a}{\sin(\alpha)} = \frac{b}{\sin(\beta)} = \frac{c}{\sin(\gamma)}$

Leerlauf: $U_{PN} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot U_{Lo}$ Kurzschluss: $X_d \cdot I_{SK} = U_{PN}$

Kippmoment: maximales Kippmoment $= \vartheta = 90°$ kein Moment $= \vartheta = 0°$

rein motorischer Betrieb: $\cos(\varphi) = 1 \Rightarrow$ Keine Blindleistung:I_S zeigt nach oben oder unten

Turboläuferformeln:

$\frac{\sin(90° + \varphi)}{U_p} = \frac{\sin(\vartheta)}{X_d \cdot I_N} \quad \frac{\sin(\vartheta_1)}{\sin(\vartheta_2)} = \frac{M_{i1}}{M_{i2}} \quad L_d = \frac{X_d}{2\pi \cdot f_N}$

Generatorbetrieb: $U_P^2 = U_S^2 + (X_d \cdot I_N)^2 - 2 \cdot X_d \cdot I_N \cdot \begin{cases} U_S \cdot \cos(90° + \varphi) & \text{übererregt} \\ U_S \cdot \cos(90° - \varphi) & \text{untererregt} \end{cases}$

KEIN Turboläufer:

Mit Hilfe von Dreiecken kommt man zu: Generator+übererregt $\tan(\vartheta) = \frac{X_q \cdot I_S \cdot \cos(\varphi)}{U_S + X_q \cdot I_S \sin(\varphi)}$

"mit minimalem Ständerstrom": (Script Seite 51)

$I_{Sd} = 0 \qquad M_{el} = 3 \cdot \frac{p}{\omega} \cdot U_p \cdot I_{sq} \qquad M_{el} = 3 \cdot \frac{p}{\omega} \cdot U_s \cdot \frac{U_P}{X_d} \cdot \sin(\vartheta)$

Leerlauf:$I_S = 0 \Rightarrow U_S = U_P \qquad \frac{U_{P1}}{U_{P2}} = \frac{n_1}{n_2}$

$I_S \cdot \cos(\varphi) = \frac{U_P}{X_d} \cdot \sin(\vartheta) \qquad U_S^2 = U_S^2 + (X_d + I_s)^2$

Asynchronmaschine

stabiler Betriebspunkt: $\frac{dM_i}{d\Omega} < \frac{dM_L}{d\Omega}$ $\quad P_{mech} = M_i \cdot \Omega$

Betriebspunkt: $\frac{M_L}{M_K} = \frac{M_i}{M_K}$

$n_{syn} = \frac{f_n}{p}$ für $f_n = f_S$ $\quad \Omega_{syn} = 2\pi \frac{f_n}{p}$

$s = \frac{n_{syn} - n}{n_{syn}} = \frac{f_n - p \cdot n}{f_n} = \frac{f_R}{f_n} = \frac{\omega_R}{\omega_n} \xrightarrow{\cdot 2 \cdot \pi} \frac{\Omega_{syn} - \Omega}{\Omega_{syn}} \Rightarrow \Omega = (1 - s) \cdot \Omega_{syn}$

$f_R = s \cdot f_n \quad f_{RN} = s_N \cdot f_n \quad f_R = f_n - p \cdot n \qquad S_N < S_K$

Stillstand: $s = 1, n = 0$
Maschine läuft synchron: $s = 0, n = n_{syn}$
bei $s = s_K \Rightarrow M = M_K$

Kloss'sche Formel: $\frac{M_i}{M_k} = \frac{2}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}} \Rightarrow s^2 - 2\frac{M_k}{M_i} \cdot s_k \cdot s + s_k^2 = 0$

Maschine fährt an: $\frac{M_A}{M_k} = \frac{2}{\frac{1}{s_K} + \frac{s_K}{1}}$

Schleifringläufer mit Läuferwiderstand: $s' = \frac{R_R + R_V}{R_R} \cdot s$

$P_{el} = P_S = 3 \cdot U_S \cdot I_S \cdot \cos(\varphi) \quad U_N = \sqrt{3} \cdot U_S$

$P_D = P_S - P_{VS} = P_S - 3 \cdot R_S \cdot I_S^2 = M_i \cdot \Omega_{syn} = J \cdot \Omega_{syn} \cdot \frac{d\Omega}{dt}$

$P_{VR} = P_{Vel} = s \cdot P_D = 3 \cdot R_R' \cdot I_R'^2$

$P_N = P_{mech} = P_D - P_{VR} = (1 - s) \cdot P_D = M_i \cdot \Omega$

Von Maschine aufgenommene Lesitung: $P_S = 3 \cdot U_S \cdot I_S \cdot \cos(\varphi)$

Verluste insgesamt: $P_V = P_{VR} + P_{VS}$

Ohmsche Ständerverluste dürfen vernachlässigt werden: $P_{VS} = 0$
falls Reibungsverluste nicht vernachlässigt werden dürfen, beachte P_{Reib}

Netzgeführte Stromrichter

Formeln aus dem Script:

Wechselstrom-Brückenschaltung	Drehstrom-Brückenschaltung
$U_{d0} = \frac{2}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot U_N$	$U_{d0} = \frac{3}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot U_N$
$U_d = U_{d0} \cdot \cos\alpha$	
$I_1 = \frac{2 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot I_d$	$I_1 = \frac{\sqrt{3} \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot I_d$
$\lambda = \frac{2 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot \lvert\cos(\alpha)\rvert$	$\lambda = \frac{3}{\pi} \cdot \lvert\cos(\alpha)\rvert$
$S^2 = P^2 + Q_1^2 + D^2$	
$\cos(\alpha + u_\alpha) = \cos(\alpha) - \frac{2\omega L_k}{\sqrt{2}U} \cdot I_d \quad u_\alpha$: Überlappungsmittel	
$\alpha_{max} + u_{\alpha max} + \gamma = \pi$ Schonzeit: $t_e = \frac{\gamma}{\omega_{N2}}$ γ in Rad	
mit Kommutierungsverlusten: $U_d = U_{d0} \cdot \cos(\alpha) - \frac{2}{\pi} \cdot \omega L_k \cdot I_d$	mit Kommutierungsverlusten: $U_d = U_{d0} \cdot \cos(\alpha) - \frac{3}{\pi} \cdot \omega L_k \cdot I_d$

sonstige Formeln:

Wechselstrombrücke	
vollgesteuert	halbgesteuert
$S = U_S \cdot I_S$	
$I_S = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \cdot \int\limits_{\alpha}^{\pi+\alpha} I_d^2 d\omega t}$	$I_S = \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \int\limits_{\alpha}^{\pi} I_d^2 d\omega t}$
$P_D = P_{ein} = P = U_{d\alpha} \cdot I_d$	
$U_{d\alpha} = U_{d0} \cdot \cos(\alpha)$	$U_{d\alpha} = \frac{\sqrt{2}U_N}{\pi} \cdot 2 \cdot \cos^2(\frac{\alpha}{2})$
$U_{d0} = \frac{2}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot U$	
	$I_1 = \frac{2 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot 2 \cdot \cos^2(\frac{\alpha}{2})$
	$U_{d\alpha} = U_{d0} \cdot \cos^2(\frac{\alpha}{2})$

$U_{Eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int\limits_{0}^{T} u^2(t) dt}$ Amplitude berechnen: $U_{Amp} = U_{Eff} \cdot \sqrt{2}$

Wechselstrom: $\sqrt{2} \cdot U_{Netz} \cdot \sin(\omega t)$ Drehstrom: ??? $\sqrt{3} \cdot U_{Netz} \cdot \sin(\omega t)$

Leistungsfaktor: $\cos(\alpha) = \frac{U_d}{U_{d0}}$

Grundschwingunsblindleistung:
$Q_1 = U_{d0} \cdot I_d \cdot \sqrt{1 - (\frac{U_d}{U_{d0}})^2} = \sqrt{3} U I_1 \sin(\alpha) = S \cdot \sqrt{\frac{9}{\pi^2} - \lambda^2}$

$Q_1 = S_1 \cdot sin(\alpha) \qquad P_1 = S_1 \cdot \cos(\alpha)$

Verzerrungsblindleistung: $D = \sqrt{3} \cdot U \cdot \sqrt{I^2 - I_1^2} = S \cdot \sqrt{1 - \frac{9}{\pi^2}}$ mit $I = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_d$

$S = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I$ mit $I = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_d$

bei Grundschwingng gilt: $\varphi = \alpha$ Sperr-/Blockierungsspannung: $\hat{U}_{Tmax} = \sqrt{2} \cdot U_N$

Wechselstromrichter:
$0 < \alpha < 90° \Rightarrow$ Wechsel zu Gleichstrom $90° < \alpha < \alpha_{max} \Rightarrow$ Gleich zu Wechselstrom

Effektivwert und Mittelwert:
ohmsche Last : $\int\limits_{\alpha}^{\pi}$ induktive Last : $\int\limits_{\alpha}^{2\pi-\alpha}$

Selbstgeführte Stromrichter

$a = \frac{T_e}{T}$

Tiefsetzsteller: $U_d = \frac{T_e}{T} \cdot U_n = a \cdot U_n$

Hochsetzsteller: $U_q = \frac{T}{T - t_e} \cdot U_n = \frac{1}{1-a} \cdot U - n$

Zweiquadrantensteller: $U_d = (2a - 1) \cdot U_n$

nicht linearer Strom, Mittelwert: $I = \frac{1}{T} \cdot \int\limits_0^T i_a(t)dt \; (= \frac{a \cdot U - U_a}{R})$

$I_{eff}(\text{Lastseite}) = \sqrt{\frac{1}{T(=t_e+t_a)} \int\limits_0^{T(=t_e)} i_a^2(t)dt}$

stat. Betrieb: (1) $i_{ein}(t = 0s) = I_{aus}(t - T)$ (2) $i_{ein}(\lim\limits_{t \to T_e -} t) = i_{aus}(\lim\limits_{t \to T_e +} t)$

mit U_a und U_e konstant $\Rightarrow \frac{di}{dt} = \frac{U_e - U_a}{L} \Rightarrow \Delta I = \frac{U_e - U_a}{L} \cdot t_e$

i_a konstant: $\bar{i}_e = i_a \cdot \frac{t_e}{t_e + t_a}$

$\Delta I = \frac{U}{L_A} \cdot \frac{1-a}{f}$

$i_{dmin} \Rightarrow U_{dmax} \Rightarrow U_d = U_N$

Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung

$\frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot U_d = U_{1ab} = U_{1bc} = U_{1ca}$

$U_{p0} = \frac{1}{3}(u_{a0} + u_{b0} + u_{c0})$

$\underline{u} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (u_a + \underline{a}u_b + \underline{a}^2 u_c)$

$\underline{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad \underline{a}^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$

Relative Dauer des Schaltzustands 1 innerhalb von T: $\frac{t_1}{T} = \frac{u^*}{\frac{U_d}{2}} \sin(\frac{\pi}{3} - \gamma)$

Relative Dauer des Schaltzustands 2 innerhalb von T: $\frac{t_2}{T} = \frac{u^*}{\frac{U_d}{2}} \sin(\gamma)$

Relative Dauer der Schaltzustände 7 un 8 innerhalb von T: $\frac{t_7+t_8}{T} = 1 - \frac{t_1}{T} - \frac{t_2}{T}$

maximaler Effektivwert der Grundschwingung der Strangspannung bei Raumzeigermodulation:	$U_{1max} = \frac{U_d}{2} \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} = \frac{U_d}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{3}}$