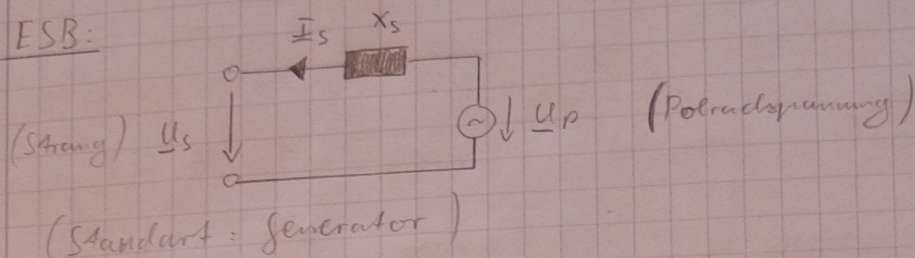


7) Drehstrommaschine: Synchronmaschine

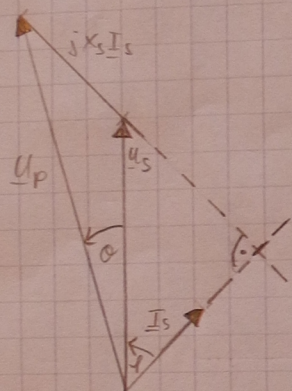
$$\underline{R}_{syn} = \frac{\omega_s (Netz)}{p} \quad n_{syn} = \frac{f_s (Netz)}{p}$$

ESB:



Rotationssymmetrisch: ($X_s = X_d = X_q$)

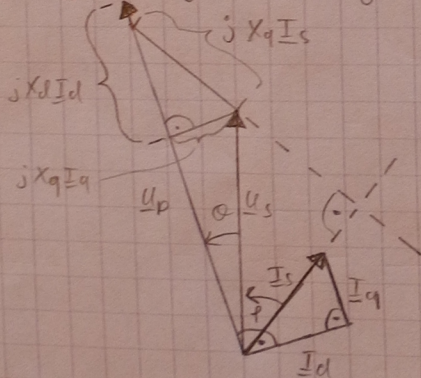
$$\underline{U}_p - \underline{U}_s = j X_s \cdot \underline{I}_s$$



f Phasenwinkel
 @ Polradwinkel (Lastabh.)
 (z.B. Turbogenerator)

Nicht Rot. Symm.: ($X_d \neq X_q$)

$$\underline{U}_p - \underline{U}_s = j X_d \underline{I}_d + j X_q \underline{I}_q$$



$$M_{el} = M_K \cdot \sin \theta$$

$$M_K = 3p \frac{U_s \cdot U_p}{\omega_{Netz} X_s} \quad (\text{starrs Netz})$$

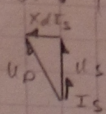
$$M_{el} = 3 \cdot \frac{p}{\omega_s} \cdot U_p \cdot I_q \quad (\text{Drehmomentsteuerung})$$

Betriebszustände: (Ship4)

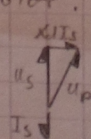
Leerlauf: ($U_s = U_p$)



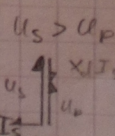
Generator: ($\theta > 0$)



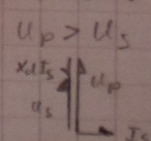
Motor: ($\theta < 0$)



untererr.



übererr.



Tricks:

Sinussatz:

$$\frac{a}{\sin(\alpha)} = \frac{b}{\sin(\beta)} = \frac{c}{\sin(\gamma)}$$

Cosinussatz:

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos(\gamma)$$

Leerlauf:

$$\underline{I}_S = 0$$

$$\underline{U}_{p0} = \underline{U}_S \quad \text{bei } \underline{I}_{f0}$$

$$\underline{U}_{pN}$$

$$\text{bei } \underline{I}_{fN}$$

$$\frac{\underline{U}_{p0}}{\underline{I}_{f0}} = \frac{\underline{U}_{pN}}{\underline{I}_{fN}}$$

$$M_i = 0 \text{ Nm}$$

$$\underline{U}_p \sim \underline{I}_f$$

Drehmomentänderung:

Quasistat.

$$M_L = M_{el} \sim \sin(\theta) \quad (\text{alles andere const.})$$

Zus. Betriebszustände:

$$\begin{aligned} \ddot{\theta} &\Rightarrow \theta > 0 \\ \dot{\theta} &\Rightarrow \theta < 0 \\ \dot{\theta} &\Rightarrow \theta < 0 \\ \dot{\theta} &\Rightarrow \theta > 0 \end{aligned}$$

	unter	über
Gen	$\theta \in [-90, 0]$ $\theta > 0$	$\theta \in [0, 90]$ $\theta > 0$
Motor	$\theta \in [-180, -90]$ $\theta < 0$	$\theta \in [90, 180]$ $\theta < 0$

$$U_S > U_p$$

$$U_S < U_p$$

Stabilität:

$$\frac{M_{el}}{M_N} = \sin(\theta)$$

$$\frac{d \frac{M_{el}}{M_N}}{d\theta} > 0 \quad (\text{stabil})$$

8) Drehstrom: Asynchronmaschine:

$$(p_R = p_s - p \cdot n_R)$$

$$s = \frac{p_R}{p_s} = \frac{p_s - p \cdot n_R}{p_s} = \frac{\omega_s - \dot{\gamma}}{\omega_s} = \frac{n_{syn} - n_R}{n_{syn}}$$

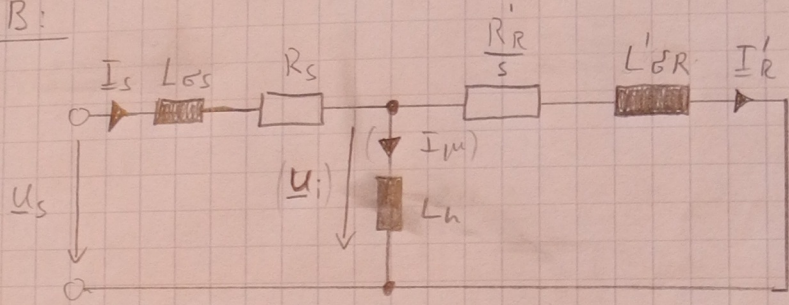
s: (Schlupf) γ : (Hinterstellungswinkel)

$$\text{Stator: } \underline{U}_s = (R_s + j\omega_s L_{s\sigma}) \cdot \underline{I}_s + \underline{U}_i$$

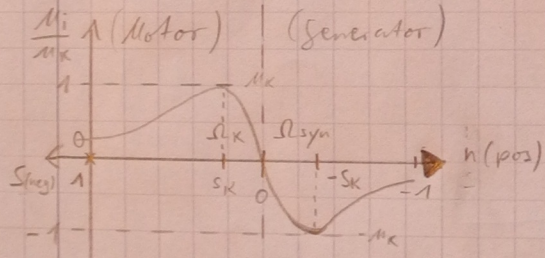
$$\text{Rotor: } \underline{U}_R' = 0 = -(R_R' + j\omega_s L_{R\sigma}') \cdot \underline{I}_R' + s \cdot \underline{U}_i$$

$$\underline{U}_i = j\omega_s L_{sh} (\underline{I}_s - \underline{I}_R')$$

ESB:



Drehzahl-Drehmoment:



s_K = Kippmoment

$s=1$: Anlaufmoment / Stillstand

$s=0$: Idealer Leerlauf / Synchronumlauf

$s < 0$: Generator / übersynchron

$0 < s < 1$: Motor / unterschynchron

$s > 1$: Gegenstrombremsen / gegensynchron. Betr.

Kloss'sche Formel ($p_s = 0, \frac{L_{s\sigma}}{L_{sh}} \ll 1, \dots$)

$$\frac{M_i}{M_K} = \frac{2}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}} \quad (\text{mit stat. in.})$$

Leistung:

$$P_{s/ee} \Rightarrow \boxed{P_{\text{Stator}}} \Rightarrow P_D \Rightarrow \boxed{P_{\text{Rotor}}} \Rightarrow P_{\text{mech}}$$

$$P_D = P_{el/s} - P_{vs} = P_{ee} - 3 R_s I_s^2 = M_i \cdot \Omega_{syn}$$

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

$$P_{mech} = P_D - P_{VR} = (1-s) \cdot P_D \quad (\text{Nur für reibungsfreie (Nech) Maschinen})$$

Anlauf und Bremsverhalten:

Stabiler Betriebspunkt: 1) $M_B = M_i - M_L \stackrel{!}{=} 0$

2) $\frac{dM_B}{d\omega} < 0$ (wenn $M_L = \text{const} \Rightarrow \text{zw. } M_K$)

Selbstständiger Anlauf:

wenn: $M_B(s=1) = M_i(s=1) - M_L(s=1) \begin{cases} > 0 \\ < 0 \end{cases} \quad (?)$

Vernachlässigung: Ständerwiderstand Reibungsverluste Stromverdrängung

$$P_{Vs} = 0$$

Energiedifferenz / Energie:

$$\Delta W = W_E - W_A$$

$$W = \int_{A_u}^{A_e} P(A) dA$$

Kippmomentbedingung:

$$S_R \stackrel{!}{>} S_N$$

Schleifengläufer mit R_v

$$\frac{S^*}{S} = \frac{R_R + R_v}{R_R} \quad (\text{zwei bekannte gleiche } S)$$

Trick: S_n und S_n^* bestimmen

Reibungsverluste:

$$P_{el} \Rightarrow \boxed{\text{Stator}} \Rightarrow P_D \Rightarrow \boxed{\text{Rotor}} \Rightarrow P_i \Rightarrow \boxed{\text{Reib}} \Rightarrow P_{mech}$$

$\Downarrow$ P_{Vs} $\Downarrow$ P_{vR} $\Downarrow$ P_{reib}

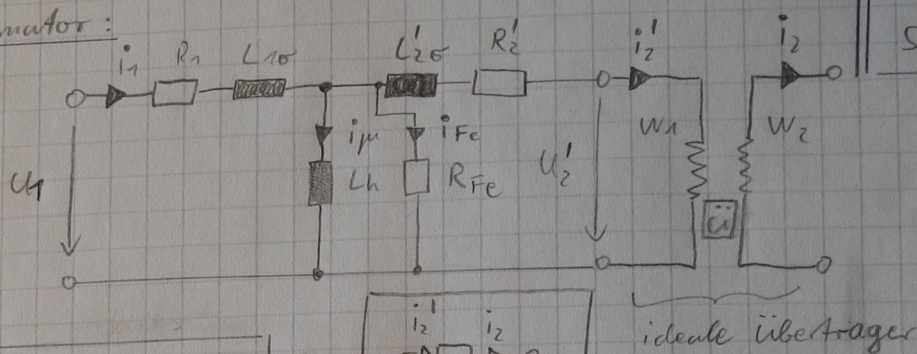
$$P_D = P_{el} - P_{Vs}$$

$$P_i = P_D - P_{vR}$$

$$P_{mech} = P_i - P_{reib}$$

9) Transformator:

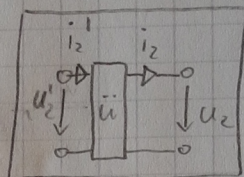
ESB:



Immer:

$$S_{1N} = S_{2N}$$

$$\ddot{u} = \frac{w_1}{w_2} = \frac{U_2'}{U_2} = \frac{i_2}{i_2'}$$



ideale Übertrager

Größen umrechnen: $P_{R2} = P_{R2'}$ und $P_{L2\sigma} = P_{L2\sigma'}$

$$\Rightarrow R_2' = \ddot{u}^2 \cdot R_2 \quad L_{2\sigma}' = \ddot{u}^2 \cdot L_{2\sigma}$$

Kurzschluss und große Trrafos:

$$\text{Kurzschluss: } I_\mu = 0$$

Großer Trrafo: $I_\mu = 0$ auch im Nennbetrieb

rel Ks.Sp.

$$u_K = \frac{U_{1K}}{U_{1N}} = \frac{Z_{1K} \cdot I_{1N}}{U_{1N}} = \frac{Z_{1K}}{Z_{1N}} = \left(\frac{Z_{2K} \cdot I_{2N}}{U_{2N}} = \dots \right)$$

Nennspannung

$$Z_{1N} = \frac{U_{1N}}{I_{1N}}$$

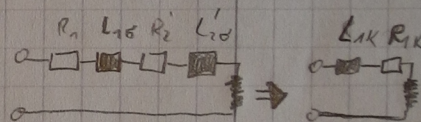
$$I_{1K} = \frac{I_{1N}}{u_K}$$

$$I_{1K} = I_{1N} \cdot \frac{1}{u_K}$$

KS-ESB:

$$R_{1K} = R_1 + R_2' \quad L_{1K} = L_{1\sigma} + L_{2\sigma}'$$

$$Z_{1K} = R_{1K} + j\omega L_{1K}$$



$$\Rightarrow u_K = \sqrt{u_r^2 + u_x^2}$$

mit

$$u_r = \frac{R_{1K} I_{1N}}{U_{1N}} \text{ (auch?)}$$

$$\ddot{u} = \frac{U_{1N}}{U_{2N}} \text{ (Immer?)}$$

$$u_x = \frac{X_{1K} \cdot I_{1N}}{U_{1N}} \text{ (auch?)}$$

Wichtig:

Auch Last kann auf andere Seite verschoben werden:
gleiche Umrechnung!

Stromrichter:

Gleichstromsteller: $DC \rightarrow DC$

Wechselstromsteller: $1AC \rightarrow 1AC$

Drehstromsteller: $3AC \rightarrow 3AC$

keine Frequenzänderung

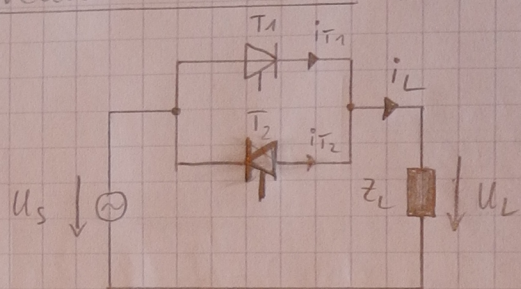
Gleichrichter: $1AC / 3AC \rightarrow DC$

Wechselrichter: $DC \rightarrow 1AC / 3AC$

Umrichter: $3AC \rightarrow 3AC$

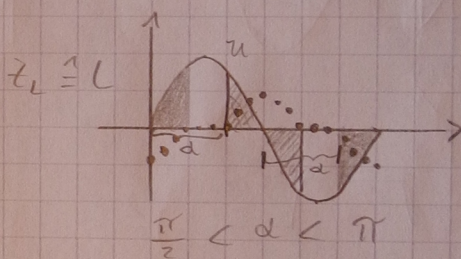
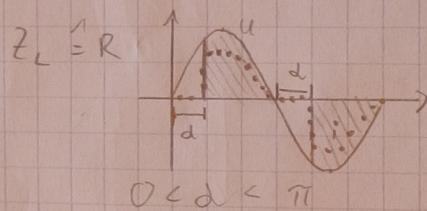
Zwischenkreisumrichter: $3AC \rightarrow DC \rightarrow 3AC$

10) Wechselstromsteller: (Dimmer) $AC \rightarrow AC$ und $f_1 = f_2$

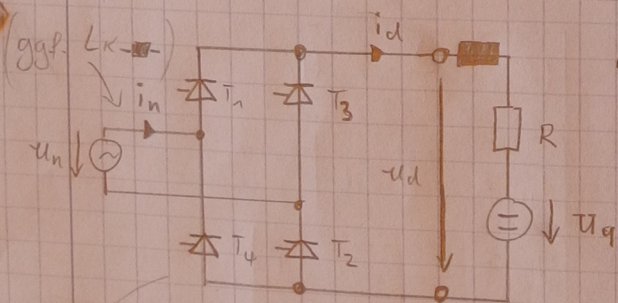


Steuerwinkel: α

(Nulldurchgang bis Zündimpuls)



11) Netzgeführte Wechselstrombrückenschaltung:

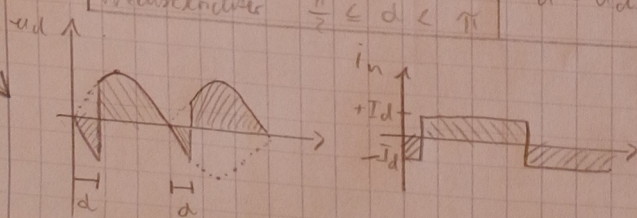


$L_d \rightarrow \infty \Rightarrow i_d = I_d = \text{const.}$

$u_n > 0$	$T_1 + T_2$
$u_n < 0$	$T_3 + T_4$

Lückender Betrieb: $i_L(t) < 0 \Rightarrow$ dann gelten Formeln nicht mehr!

AC $\rightarrow$ DC	Gleichrichter: $0 \leq \alpha < \frac{\pi}{2}$	$P_d = U_{dis} \cdot I_d$	> 0
DC $\rightarrow$ AC	Wechselrichter: $\frac{\pi}{2} \leq \alpha < \pi$		
			< 0



Allg. Formeln (Wechsel + Drehstrom)

$$P = U_{di} \cdot I_d$$

$$U_{di} = U_{di} \cdot \cos(\alpha)$$

totaler Leistungsfaktor:

(ähnlich $\cos(\phi)$)

$$\lambda = \frac{|P|}{S}$$

$$\phi_1 = \alpha$$

(Phasenwinkel von I_{un}) nur Vollgesteuert

$$S^2 = Q^2 + P^2$$

$$Q^2 = Q_1^2 + D^2$$

↓
Verzerrungsblindleist.
Grundschwingungsblindleist.

Maximaler Steuerwinkel:

$$\alpha_{max} + \mu|_{\alpha=\alpha_{max}} + \gamma \leq T$$

$$\text{mit } \gamma = \omega \cdot t_s \quad (\text{Löschwinkel Thyristor})$$

↳ Schwingzeit

Speziell Wechselstrombrücke:

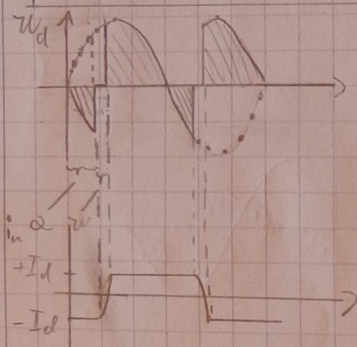
$$U_{di} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_n$$

$$I_n = I_d$$

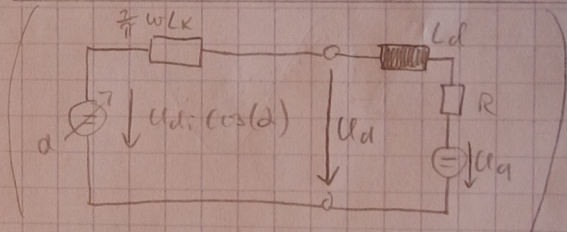
$$I_{un} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_d$$

Kommütierungschlossel: (L_k)

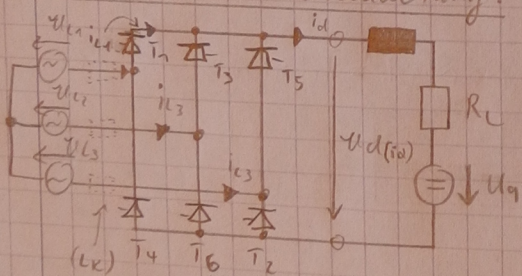
$$\cos(\alpha + \mu) = \cos(\alpha) - \frac{2\omega L_k \cdot I_d}{\sqrt{2} U_n}$$



$$U_d = U_{di} \cdot \cos(\alpha) - \frac{2}{\pi} \omega L_k \cdot I_d$$



12) Drehstrombrückenschaltung:



$$U_{di} = \frac{3}{\pi} \sqrt{2} \cdot U_L$$

$$I_n = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d$$

$$I_{un} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d$$

$$\lambda = \frac{3}{\pi} \cdot |\cos(\alpha)|$$

Kommütierung:

$$U_d = U_{di} \cdot \cos(\alpha) - \frac{3}{\pi} \omega L_k I_d$$

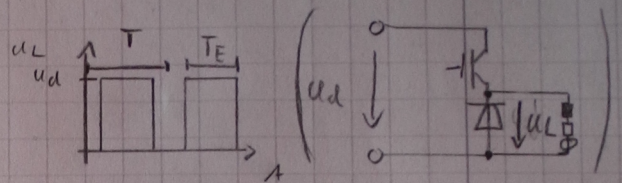
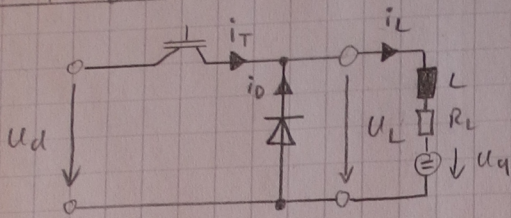
$$\cos(\alpha + \mu) = \cos(\alpha) - \frac{2\omega L_k I_d}{\sqrt{2} U_L}$$

13) Tiefsetzsteller:

allg. Gleichstromst

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

$$\alpha \in [0, 1]$$



$$U_L = \alpha \cdot U_d$$

1) T_r leitet

$$i_L' = \frac{U_d - U_q - R \cdot i_L}{L}$$

2) T_r sperrt

$$i_L' = \frac{-U_q - R \cdot i_L}{L}$$

$$\bar{i}_L = \frac{U_L - U_q}{R}$$

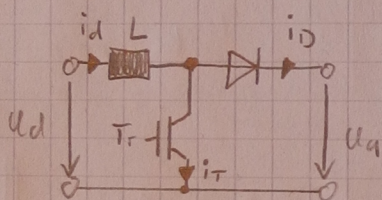
(Näherung durch geraden)

Beschrieben durch Dgl:

$$U_L = U_{sp} + U_R + U_q \quad \text{bzw.} \quad i' = \frac{U_L - U_q - R \cdot i}{L}$$

mit Lsg: $i(t) = i_0 \cdot e^{-\frac{R}{L} \cdot t} + \frac{U_L - U_q}{R}$

14) Hochsetzsteller:



1) T_r leitet

$$\Delta i_{L1} = \frac{U_d}{L} \cdot T_e$$

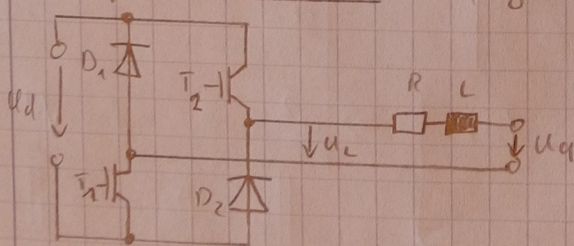
2) T_r aus

$$\Delta i_{L2} = -\frac{U_d - U_q}{L} \cdot (T - T_e)$$

$$U_q = \frac{T}{T - T_e} U_d = \frac{1}{1 - \alpha} \cdot U_d$$

15) Zweiquadrantensteller

(gleichzeitige Takung)



1) T_1, T_2 ein $U_L = U_d$

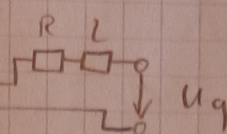
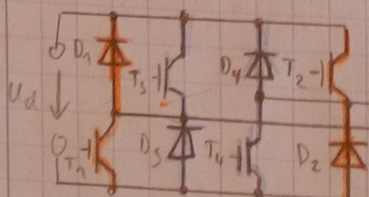
($i_L > 0$ bleiben)

2) T_1, T_2 aus $U_L = -U_d$

$$U_L = (2\alpha - 1) \cdot U_d$$

16) Vierquadrantensteller:

$$i_L > 0 \quad i_L < 0 \quad \text{und} \quad -U_d \leq U_L \leq U_d$$



$T_1 T_3$ und $T_2 T_4$
werden jeweils komplementär bed.
(sonst. KS)

U_L	T_1	T_2	T_3	T_4
U_d	x	x	-	-
$-U_d$	-	-	x	x
0	-	x	x	-
0	x	-	-	x