Gleichstrommaschinen

Allgemeine Formeln :

Kraft : $\boxed{\vec{F} = (\vec{B} \times \vec{I}) \cdot l}$; $[B] = magn. Flußdichte = 1T = \frac{1Vs}{m^2}$

Spannung: $\boxed{\vec{U} = (\vec{B} \times \vec{v}) \cdot l}$

Induz. Spannung: $\boxed{U_q = c \cdot \Phi \cdot n}$; c: Maschinenkonstante

$[\Phi] = magn. Fluß = 1Wb = 1Vs$

$\boxed{U_q = -L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}}$; $[L] = Induktivität = 1H = \frac{Vs}{A}$

Maschinenkonstante: $\boxed{c = 4\, p \cdot N}$; p = Polpaare ; N = Windungszahl

Zeit T für Umdrehung um Polteilung: $\boxed{T = \frac{1}{n} = \frac{1}{2 \cdot p}}$

Moment : $\boxed{M = \frac{U_q \cdot I_A}{2 \cdot \pi \cdot n}}$

Betrieb am Drehstromnetz (α = Steuer∠):

$$\boxed{U_{di\alpha} = U_{di0} \cdot \cos\alpha = S \cdot \frac{\sqrt{2}}{\frac{\pi}{q}} \cdot U_S \cdot \sin\frac{\pi}{q} \cdot \cos\alpha}$$

Drehzahl : $\boxed{n = \frac{U_A - I_A \cdot R_A}{c \cdot \Phi}}$

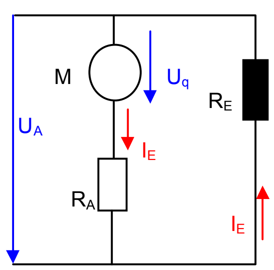
Verluste : $\boxed{P_v = I_A^2 \cdot R_A}$

$S = \begin{cases} 1 \ldots Mittelp.-Schltg. \\ 2 \ldots Brückenschltg. \end{cases}$ q = Anzahl der Kommutierungen; q = 3...DB6; q = 2...DB2

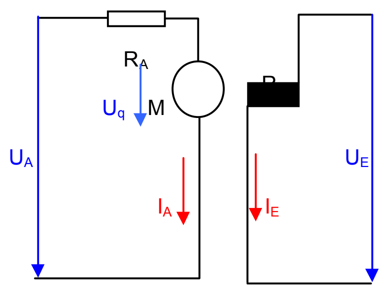
a)Nebenschlußverhalten (Nebenschluß- und fremderregte Maschinen)

Ersatzschaltbild :

1) Nebenschlußmaschine



2) fremderregte Maschine



Ankerspannung : $\boxed{U_A = U_E = U_q \pm I_A \cdot R_A}$ (fremderregt)+: Motor - :Generator

$\boxed{U_A = U_E = U_q \pm I_E \cdot R_A}$ (Nebenschluß)

Leistung : $\boxed{P = U_q \cdot I_A = M_A \cdot \omega \quad ; \omega = 2 \cdot \pi \cdot n}$

Drehzahl : $\boxed{n = \frac{U_A}{c \cdot \Phi} - \frac{2 \cdot \pi \cdot R_A}{(c \cdot \Phi)^2} \cdot M = n_0 - \Delta n}$; n_0 = Leerlaufdrehzahl

$$\boxed{\frac{n}{n_N} = \frac{U_q \cdot \Phi}{U_{qN} \cdot \Phi_N}}$$

(Anlauf: n = 0)
Moment : $\boxed{M = \frac{c \cdot \Phi \cdot U_A}{2 \cdot \pi \cdot R_A} - \frac{c^2 \cdot \Phi^2}{2 \cdot \pi \cdot R_A} \cdot n}$

$$\boxed{\frac{M_A}{M_N} = \frac{I_A}{I_{AN}}}$$

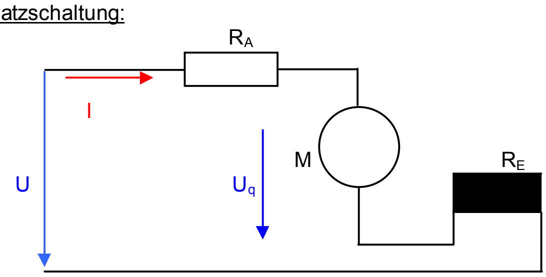
$\boxed{\Phi = const. \ wenn \ I_E = const.}$

Drehzahlsteuerung durch Feldschwächung :

- Drehzahl n läßt sich anhand I_E beeinflussen durch einen Vorwiderstand
- Dadurch ändert sich auch $\Phi = f(I_E)$
- $U_q = c \cdot \Phi \cdot n$ = const. , da P = $U_q \cdot I_A$ = const. bleibt !!
- Magnetisierungskennlinie $\frac{\Phi}{\Phi_N} = f\left(\frac{I_E}{I_{EN}}\right) = \frac{n_N}{n}$

b) Reihenschlußmaschinen (Reihenschlußverhalten) :

Ersatzschaltung:



Spannung : $\boxed{U = (R_A + R_E) \cdot I + U_q}$

Magn. Flußdichte : $\boxed{\Phi = K \cdot I}$ K: Steigung der Magnetisierungs-Kennlinie Im ungesättigten Bereich

Drehzahl : $\boxed{n = \frac{U}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot c \cdot K}} \cdot \frac{1}{\sqrt{M}} - \frac{R_A + R_E}{c \cdot K}}$

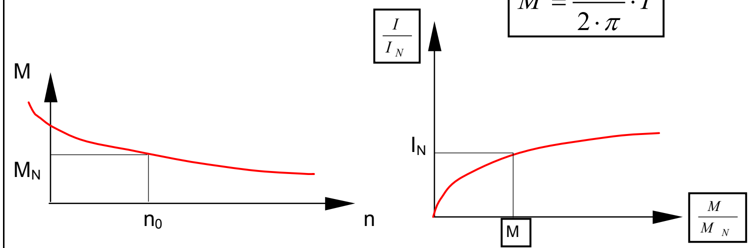
$\boxed{n = \frac{U}{c \cdot \Phi} - \frac{R_A + R_E}{c \cdot \Phi} \cdot I}$

$\boxed{\frac{I}{I_N} = \sqrt{\frac{M_A}{M_{AN}}}}$

$\boxed{\frac{U_q}{U_{qN}} = \frac{n}{n_0} \cdot \frac{\Phi}{\Phi_N}}$

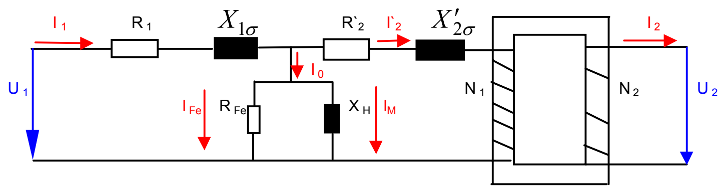
Moment : $\boxed{M = \frac{c \cdot K}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{U}{c \cdot K \cdot n + R_A + R_E}\right)^2}$

$\boxed{M = \frac{c \cdot \Phi}{2 \cdot \pi} \cdot I}$



Einphasen- Transformator

Ersatzschaltbild :

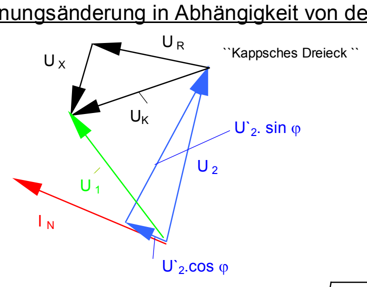


$\boxed{\frac{N_1}{N_2} = ü}$ $\boxed{\frac{U_1}{U_2} = ü}$ $\boxed{\frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{ü}}$ $\boxed{\frac{R_1}{R_2} = ü^2}$

$\boxed{R_2' = ü^2 \cdot R_2}$ $\boxed{X_{2\sigma}' = ü^2 \cdot X_{2\sigma}}$ $\boxed{I_2' = \frac{1}{ü} \cdot I_2}$

$\boxed{U_2' = ü \cdot U_2}$

Spannungsänderung in Abhängigkeit von der Belastung :



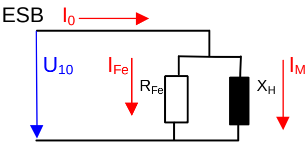
kapazativ : sin φ_L = -y

induktiv : sin φ_L = y

$$U_{1/2}' = -(U_R \cdot \cos\varphi_L - U_X \cdot \sin\varphi_L) \pm \sqrt{(\quad)^2 + U_1^2 - U_R^2 - U_X^2}$$

Einphasen- Transformator

Leerlauf- Versuch : ($I'_2 = 0$; $R_2' = \infty$; R_1 und X_{1s} vernachlässigbar)



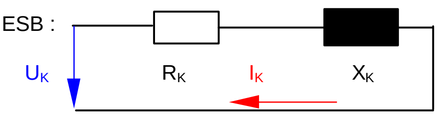
Leerlaufspannung $U_{10} = U_{1N}$

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_o}{U_0 \cdot I_0}$$

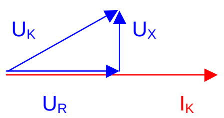
$$I_{Fe} = I_{10} \cdot \cos\varphi_0 \qquad R_{Fe} = \frac{U_{10}}{I_{Fe}}$$

$$I_M = I_{10} \cdot \sin\varphi_0 \qquad X_H = \frac{U_{10}}{I_M}$$

Kurzschluß- Versuch : (R_{Fe} und X_H können vernachlässigt werden)



Kappsches Dreieck



Kurzschlußstrom $I_{1K} = I_{1N}$

$$R_K = R_1 + R_2' \qquad X_K = X_{1s} + X'_{2s}$$

$$\cos\varphi_K = \frac{P_K}{U_K \cdot I_K} \qquad U_R = U_K \cdot \cos\varphi_K \qquad U_X = U_K \cdot \sin\varphi_K$$

$$R_1 = R_2' = \frac{R_K}{2} = \frac{U_R}{2 \cdot I_K} \qquad X_{1s} = X'_{2s} = \frac{X_K}{2} = \frac{U_X}{2 \cdot I_K}$$

Relative Kurzschlußspannung : $u_K[\%] = \frac{U_K}{U_N} \cdot 100\ \%$

Scheinleistung : $S_N = U_{20N} \cdot I_{2N}$

Verluste : $P_{vCu} = I_{1N}^2 \cdot R$ $\qquad P_{v\,fe} = \frac{U_{1N}^2}{R}$ $\qquad \eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{vCu} + P_{v\,fe}}$

Verluste bei Nennbetrieb : $P_v = I_{1N}^2 \cdot R_1 + I_{2N}^2 \cdot R_2$

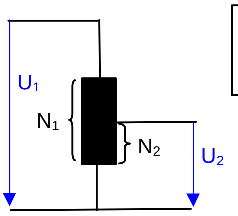
Drehstromtransformator:

- Angegebene Größen = Leitergrößen ⇒ Umrechnen auf Stranggrößen
- Berechnung der einzelnen Strangwerte (Kurzschluß;Leerlauf)
- Ergebnisse umrechnen auf Leiterwerte

Schaltung	Primärseite	Sekundärseite	Phasenverschiebung
YY 0 Stern / Stern	$U_{Str} = U_L/\sqrt{3}$ $I_{Str} = I_L$	$U_{Str} = U_L/\sqrt{3}$ $I_{Str} = I_L$	φ = 0 • 30° = 0°
DY 5 Dreieck / Stern	$U_{Str} = U_L$ $I_{Str} = I_L/\sqrt{3}$	$U_{Str} = U_L/\sqrt{3}$ $I_{Str} = I_L$	φ = 5 • 30° = 150°
YD 5 Stern / Dreieck	$U_{Str} = U_L/\sqrt{3}$ $I_{Str} = I_L$	$U_{Str} = U_L$ $I_{Str} = I_L/\sqrt{3}$	φ = 5 • 30° = 150°
YZ 5 Stern / Zickzack	$U_{Str} = U_L/\sqrt{3}$ $I_{Str} = I_L$	$U_{Str} = 2 \cdot U_L/3$ $I_{Str} = I_L$	φ = 5 • 30° = 150°

Übersetzung ü : $\ddot{u} = \frac{U_{1Str}}{U_{2Str}}$ $\qquad P = 3 \cdot U_{Str} \cdot I_{Str} \cdot \cos\varphi$

Spartransformator :



$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

Durchgangsleistung:

$$S_B = U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2$$

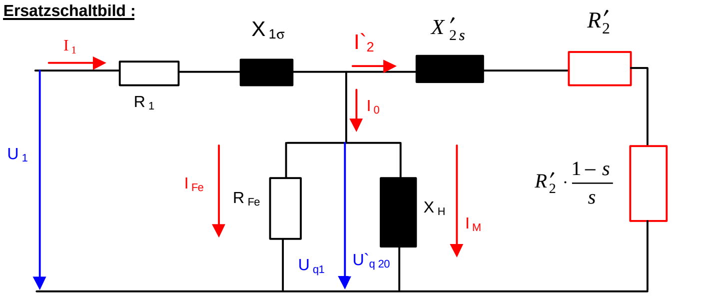
$$S_B / S_D = 1 - \ddot{u}$$

Bauleistung :

$$S_B = I_1 \cdot (U_1 - U_2) = U_2 \cdot (I_2 - I_1)$$

Asynchronmotor

Ersatzschaltbild :



Die Widerstände R_2' und $R_2' \cdot \frac{1-s}{s}$ lassen sich zusammenfassen zu $\frac{R_2'}{s}$.

Schlupf s : $s = \frac{n_d - n}{n_d}$ n : Drehzahl des Läufers

Drehfeld- Drehzahl : $n_d = \frac{Frequenz}{Polpaare} = \frac{f}{p}$ mit $f = 50Hz = 50 \cdot \frac{1}{s} = 3000 \cdot \frac{1}{\min}$

Nennschlupf S_N [%]	3	4	5	6	7	8	
n_N [1 / min]	2910	2880	2850	2820	2790	2760	Für p= 1
n_N [1 / min]	1455	1440	1425	1410	1395	1380	Für p= 2

Läufernenndrehzahl : $n_N = n_d \cdot (1 - s)$

Übersetzung : $\ddot{u} = \frac{U_1}{U_{20}}$

U_1 : Ständerstrangspannung
U_{20} : Läuferstillstandspannung (s=1)
$U_2 = s \bullet U_{20}$ = Läuferstrangspannung

Transformierte Größen :

$$I_2' = I_2 \cdot \frac{1}{\ddot{u}} \qquad R_2' = R_2 \cdot \ddot{u}^2 \qquad X'_{2s} = X_{2s} \cdot \ddot{u}^2 \qquad U'_{20} = U_{20} \cdot \ddot{u} = U_1$$

Sonderfälle : 1) **Leerlauf** (s = 0) : $R_2' = \infty$; $I_2' = 0$
Berechenbare Größen : R_{Fe} und X_M (wie Drehstromtransformator)

2) **Kurzschluß** (s =1) : Verhalten wie Drehstromtransformator (mit R_K und X_K)
wichtig : Umrechnen auf Strangwerte !!!

Normalbetrieb : $I_2 = \frac{U_2}{R_2 + jX_{2s} \cdot s} = \frac{U_{20}}{\frac{R_2}{s} + jX_{2s}}$

Verluste :

1)Stromwärmeverluste $\quad P_{2v} = m_s \cdot I_2'^2 \cdot R_2'$ $\quad$ mit m_s = Anzahl der Wicklungsstränge m_s = 3 (meist)

2)mechanische Leistung : $P_m = m_s \cdot I_2'^2 \cdot R_2' \cdot \frac{1-s}{s}$

3)Luftspaltleistung : $P_d = m_s \cdot I_2'^2 \cdot \frac{R_2'}{s} = P_{2v} + P_m$

4)Statorverluste : $P_{1v} = m_s \cdot I_2'^2 \cdot R_1$

5)Gesamtleistung : $P = P_{1v} + P_d$

Strom I'_2 :

$$I_2'^2(s) = \frac{U_1^2}{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X^2} \qquad I_2'(s) = \frac{U_{1Str}}{R_1 + \frac{R_2'}{s} + jX}$$

$$I_2'(s) = \frac{U_1 \cdot \left(\frac{R_2'}{s} + R_1\right)}{\left(\frac{R_2'}{s} + R_1\right)^2 + X^2} - j \cdot \frac{U_1 \cdot X}{\left(\frac{R_2'}{s} + R_1\right)^2 + X^2}$$

$$X = X_{1s} + X'_{2s}$$

Strom I_1 : $\quad I_1 = \frac{U_1 + I_2' \cdot jX_H}{R_1 + jX_{1\sigma} + jX_H}$ für $R_{Fe} = \infty$

Asynchronmotor

Moment :

$$M(s)=\frac{P_\delta}{\omega_d}=\frac{m_s\cdot I_2'^2\cdot\frac{R_2'}{s}}{2\cdot\pi\cdot n_d}$$

$$M_K=\frac{m_s\cdot U_1^2}{2\cdot\pi\cdot n_d\cdot 2\cdot\left[R_1-\sqrt{R_1^2+X^2}\right]}$$

$$M(s)=\frac{m_s\cdot U_1^2}{2\cdot\pi\cdot n_d}\cdot\frac{R_2'}{s\cdot\left(R_1+\frac{R_2'}{s}\right)^2+s\cdot X^2}$$

$$s_K=\frac{\pm R_2'}{\sqrt{R_1^2+X^2}}$$

Wirkungsgrad :

$$\eta=\frac{P_N}{\sqrt{3}\cdot U_N\cdot I_N\cdot\cos\varphi_N}$$

$$X=X_{1\sigma}+X_{2\sigma}'$$

Komplexe Rechnung :

$$\underline{Z}=R+jX_L-jX_C=\sqrt{R^2+(X_L-X_C)^2}\cdot e^{j\cdot\arctan\frac{X_L-X_C}{R}}$$

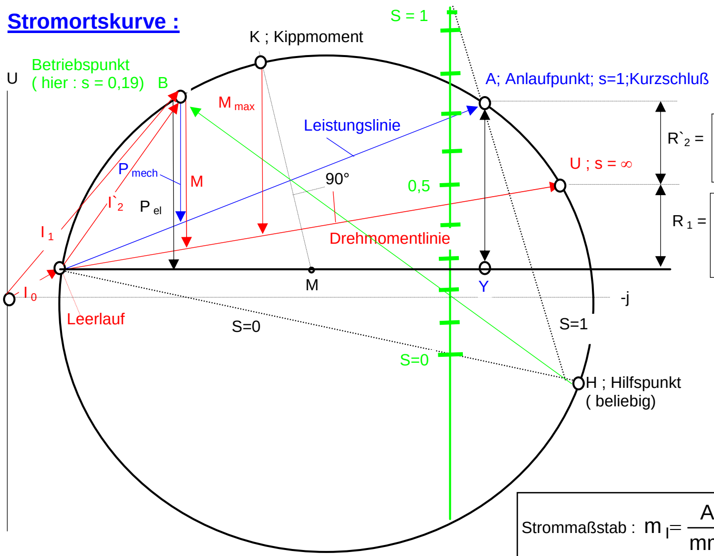
$$X_L=j\omega\cdot L$$

$$\underline{Z}=Z\cdot\cos\varphi+j\cdot Z\cdot\sin\varphi$$

$$(jA)\cdot(jB)=-1\cdot(A\cdot B)$$
$$A\cdot(jB)=j(A\cdot B)$$

$$X_C=-j\cdot\frac{1}{\omega\cdot C}$$

Stromortskurve :



$$R_2'=\frac{\overline{AY}}{1+X}\qquad R_1=\frac{\overline{AY}}{1+\frac{1}{x}}\qquad x=\frac{R_1}{R_2'}$$

Strommaßstab : $m_I=\frac{A}{mm}$

Leistungsmaßstab : $m_P=m_s*U_{str}*m_I$

Drehmomentmaßstab : $m_M=\frac{m_P}{2*\pi*n_d}$

Kloss`sche Formel :

$$\frac{M(s)}{M_{KM}}=\frac{2}{\frac{s}{s_{KM}}+\frac{s_{KM}}{s}}$$

Antriebstechnik

Translation	Rotation
$F=F-F_l=m*\ddot{x}$	$M_a=M-M_L=J*\ddot{\varphi}$
$W=\int F*ds$	$J=\int r^2*dm$
$W_{kin}=\frac{1}{2}*m*\dot{x}^2$	$W=\int M*d\varphi$
$P=F*\dot{x}$	Kreiszylinder : $J=\frac{1}{2}*m*r^2$
$c=\frac{dF}{dx}$	$\sum M_i=J*\ddot{\varphi}$
$F_d=d_{Dämpfer}*\dot{x}$	$P=M*\dot{\varphi}$
$\sum F_i=m*\ddot{x}$	Hohlzylinder : $J=\frac{1}{2}*m*(R^2-r^2)$
	$\dot{\varphi}=2*\pi*n$
	$W_{kin}=\frac{1}{2}*J*\dot{\varphi}^2$
	$c_t=\frac{dM_t}{d\varphi}$
	$M_d=d_{Dämpfer}*\dot{\varphi}$

Parallelschaltung von Federn Und Dämpfern

$$c_{res}=c_1+c_2\qquad d_{res}=d_1+d_2$$

Reihenschaltung von Federn und Dämpfern

$$\frac{1}{c_{res}}=\frac{1}{c_1}+\frac{1}{c_2}\qquad\frac{1}{d_{res}}=\frac{1}{d_1}+\frac{1}{d_2}$$

Antriebstechnik

Umrechnen : linear ⇒ Drehung :

Masse in Drehmasse : $J=m*r^2$

Feder in Torsionsfeder : $c_t=c*r^2$

Dämpfer in Torsionsdämpfer : $d_t=d*r^2$

Beziehungen zwischen Eingangsgröße und Ausgangsgröße am Getriebe :

$$i=\frac{\omega_E}{\omega_A}\qquad\frac{J_E}{J_A}=\frac{1}{i^2}\qquad\frac{c_{tE}}{c_{tA}}=\frac{1}{i^2}$$

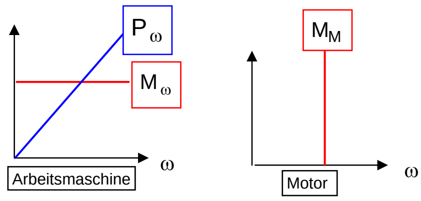
Übersetzung bei Zahnrädern :

$$i=\frac{\omega_E}{\omega_A}=\frac{z_A}{z_E}\qquad v=\frac{D}{2}*\omega=\frac{U}{2*\pi}*\omega=\frac{z*t}{2*\pi}*\omega$$

mit : t = Zahnteilung ; D = Teilkreisdurchmesser
z = Zähnezahl ; t = Zahnteilung

Betriebskennlinien von Motoren und Arbeitsmaschinen :

Typ 1 :



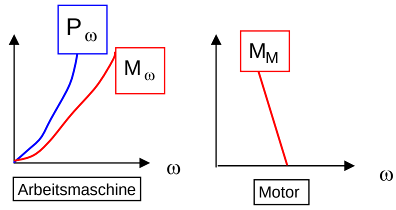
Arbeitsmaschine :

- Widerstandsmoment ist unabhängig von der Winkelgeschwindigkeit
- Die Leistung steigt linear mit der Winkelgeschwindigkeit an ⇒ Schweranläufer
- Beispiele :
  Walzwerkantriebe ; Hebezeuge ; Krananlagen ...

Motor :

- Starre oder Synchronkennlinie
- Die Winkelgeschwindigkeit ist unabhängig vom Drehmoment ⇒ Synchronmaschine

Typ 2 :



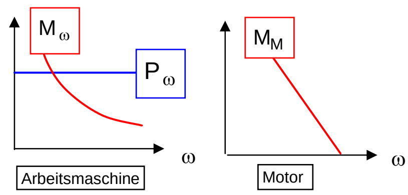
Arbeitsmaschine :

- Das Widerstandsmoment steigt quadratisch mit der Winkelgeschwindigkeit an , die Leistung mit der 3. Potenz ⇒ Leichtanläufer !!
- Beispiele :
  Überwinden von Luft- und Flüssigkeitsreibung ; Pumpen ; Fahrzeuge ; Rührwerke ; Verdicher

Motor :

- Harte oder Nebenschlußkennlinie
- Die Winkelgeschwindigkeit sinkt nur um wenige Prozent ab
- Fremderregte Gleichstrommaschine ; Asynchronmaschine im Nennbetriebsbereich

Typ 3 :



Arbeitsmaschine :

- Die Leistung ist konstant , das Drehmoment fällt hyperbolisch ab
- Beispiele :
  Winkelantriebe mit konstantem Zug und konstanter Winkelgeschwindigkeit

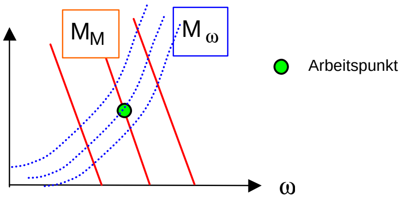
Motor :

- Weiche oder Reihenschlußkennlinie
- Die Winkelgeschwindigkeit sinkt bei Belastung stark ab
- Reihenschlußmotor ; Universalmotor

Antriebstechnik

Stabilität des Arbeitspunktes :

- Bei einem stabilem Arbeitspunkt stellt sich nach dem Abklingen einer Störung der ursprüngliche Arbeitspunkt wieder her .
- Bei einem stabilem Arbeitspunkt muß die Steigung der Motorkennlinie kleiner sein als die Steigung der Widerstands- Kennlinie !



Ändern der Motorkennlinie :

- Ändern der Ankerspannung bei einem fremderregten Gleichstrommotor
- Ändern von Spannungen und Frequenz bei einem Drehstrommotor

Ändern der Widerstandskennlinie :

- Durch mechanische Drehmoment- Wandler (Schaltgetriebe)

Ändern von Motor- und Widerstandskennlinien :

- Durch große Parabolantennen (z.B. bei Kraftfahrzeugen)

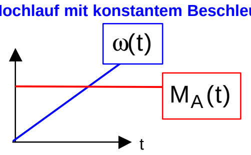
Langsame Drehzahländerungen :

- Mechanische Zeitkonstanten sind gegenüber elektrische groß
- Keine Rückwirkung des mechanischen Systems auf elektr. Mechanismus
- Mechanisches und elektrisches System sind entkoppelt

Beschleunigungsmoment : $M_A = M_M - M_\omega = J * \alpha$

Mit $\alpha = \dfrac{\partial \omega}{\partial t} = \ddot{\varphi}$

Hochlauf mit konstantem Beschleunigungsmoment :

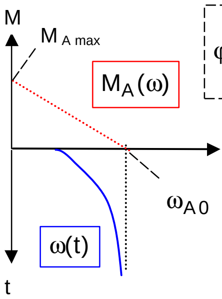


$$\omega = \frac{M_A}{J} * t \qquad t = \frac{J * \omega}{M_A}$$

Drehwinkel : $\varphi(t) = \dfrac{M_A * t^2}{2 * J}$ $\qquad \varphi(\omega) = \dfrac{J * \omega^2}{2 * M_A}$

$$1 \text{ Umdrehung} = \frac{\varphi(t)}{2 * \pi}$$

Hochlauf mit linear abnehmendem Beschleunigungsmoment :



$$\varphi(\omega) = T * \left[-\omega + \omega_{a0} * \ln \frac{\omega_{a0}}{\omega_{a0} - \omega} \right]$$

$$M_A(\omega) = M_{A\,max} * \left(1 - \frac{\omega}{\omega_{a0}}\right)$$

$$t = \frac{J * \omega_{a0}}{M_{amax}} * \ln \frac{\omega_{a0} - \omega_1}{\omega_{a0} - \omega}$$

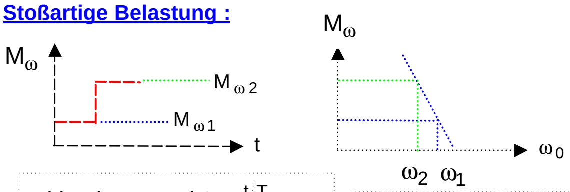
$$\omega(t) = \omega_{a0} * \left(1 - e^{-t/T}\right) \quad \text{mit} \quad T = \frac{J * \omega_{a0}}{M_{amax}}$$

$$M_a(t) = M_a(t = 0) * \left[1 - \frac{\omega_1}{\omega_{a0}}\right] * e^{-t/T}$$

$$\varphi(t) = \omega_{a0} * \left[t - T * \left(1 - e^{-t/T}\right)\right]$$

Antriebstechnik

Stoßartige Belastung :



$$\omega(t) = (\omega_A - \omega_E) * e^{-t/T} + \omega_E$$

(bei Nebenschlußcharakteristik)

$$M_M(t) = \frac{M_{M\,max}}{\omega_0} \cdot \left[\omega_0 - (\omega_A - \omega_E) \cdot e^{-t/T} - \omega_E\right]$$

$$M_{M\,max} = M_N * \frac{\omega_0}{\omega_0 - \omega_N} = M_N * \frac{1}{s_N}$$

Dimensionieren eines Antriebsmotors :

- Maximalmoment : bei Geichstrom durch Kommutierung begrenzt (bis 4 M_N)
  Bei Asynchronmotoren durch Kippmoment begrenzt (bis 3 M_N)
  Bei Synchronmaschine durch Kippmoment begrenzt (bis 2,5 M_N)
- Thermische Belastung : kritische Stelle : Installation der Wicklung
  Ursache : Leerlauf- und Stromwärme- Verluste

$$\frac{P_1}{\alpha * A} = \underbrace{\frac{m * c}{\alpha * A}}_{T} * \frac{d\Delta\vartheta}{dt} + \Delta\vartheta \qquad [c] = \frac{J}{kg * K} \qquad [\alpha] = \frac{J}{K * m^2 * s}$$

T = Zeitkonstante in s ; P_1 = zugeführte Wärmeleistung

$$\Delta\vartheta(t) = \Delta\vartheta_E \cdot \left(1 - e^{-t/T}\right) + \Delta\vartheta_A \cdot e^{-t/T} \quad \text{mit} \quad \Delta\vartheta_E = \frac{P_1}{\alpha \cdot A}$$

Abkühlen : $\Delta\vartheta(t) = \Delta\vartheta_A \cdot e^{-t/T}$

Betriebsarten :

Dauerbetrieb S 1 :

$$\Delta\vartheta_{zul} = \Delta\vartheta_{S1} \qquad p = \frac{P_{V0}}{P_N}$$

$$P_{V\,S1} = p \cdot P_N + q \cdot P_N \qquad q = \frac{P_{Vk}}{P_N}$$

P_{V0} = Leerlaufverluste
P_{VK} = Stromwärmeverluste
P_N = Bemessungsleistung
Endtemperatur nach 3 –4 T erreicht

Kurzzeitbetrieb S 2: Betriebszeit : $t_B \prec 3 \cdot T_B \;;\; t_p \prec 3 \cdot T_p$ B : Betriebs- ; P : Pause -

Im Abschaltzeitpunkt : $\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_{S1} = \dfrac{P_{V0} + P_{Vk}}{\alpha \cdot A}$

$$\Delta\vartheta_{S2} = \Delta\vartheta_{S2E} \cdot \left(1 - e^{-t_B/T_B}\right) \qquad \Delta\vartheta_{S2}(t = t_B) = \Delta\vartheta_{S1}$$

theoretische Endtemperatur

$$P_{S2} = P_N \cdot \sqrt{\frac{1 + \frac{p}{q}}{1 - e^{-t_B/T_B}} - \frac{p}{q}}$$

Aussetzbetrieb S 3 :

$$P_{S3} = P_N \cdot \sqrt{\left(1 + \frac{p}{q}\right) \cdot \left[1 - \frac{t_p}{T_p} + \frac{t_p \cdot T_B}{t_B \cdot T_p}\right] - \frac{p}{q}}$$