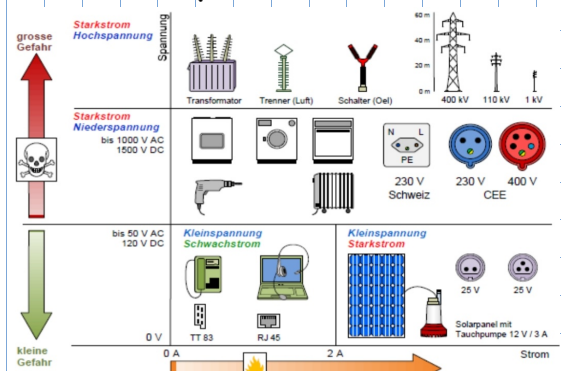


Zusammenfassung ETEC

Stromstärke $I = \frac{dQ}{dt}$ - Ladung - Zeit $[A] = \frac{Coulomb}{s}$ $I = \frac{U}{R}$

Spannung U (getrennte Ladung) V $U = R \cdot I$

Potentialdifferenz φ



Antennen, elektrische Armbanduhr	ca. 0,001 mA
Kopfhörer	1 mA
lebensgefährliche Stromstärke	mehr als 25 mA
Haushaltsgeräte	0,1 A - 10 A
Energieversorgung Zugwagen (Reisezugwagen)	30 A - 50 A
Straßenbahnmotoren (beim Anfahren einer Straßenbahn ca. 400 A)	bis 600 A
Antenne bei Rundfunkempfang	0,1 mV
Monozelle, Taschenrechner, el. Thermometer	1,5 V
Batterie PKW	12 V
Spannung im Haushalt	230 V
Straßenbahn	500 V
Überlandleitung	15 kV-380 kV
Spannung zwischen Wolken und Erde bei Gewitter	bis 1 000 kV

Grösse	Formelzeichen	Einheit	Definition	Umrechnungen
Energie	E, W	J, Ws	Joule, Wattsekunde: SI-Grundeinheit	1 kJ = 1000 J
		Cal	Kalorie: Energiemenge, um 1 g Wasser um 1 °C zu erwärmen. (Für Nahrung wird oft Kalorie gesagt, aber kCal gemeint!)	1 Cal ≈ 4,18 J 1 kCal ≈ 4187 J ≈ 4,18 kJ
		kWh	Kilowattstunde : Energiemenge, die einer Leistung von 1 kW während einer Stunde entspricht. Vielfache: MWh, GWh, TWh.	1 kWh = 3,6 MJ
		oe	Öleinheit: Heizwert von 1 kg Erdöl. Auch gebräuchlich toe für «ton of oil equivalent» (41,9 GJ), sowie Mtoe (41,9 PJ)	1 oe = 41,9 MJ = 11,6 kWh

Widerstand R [Ω] Ohm $R = \frac{U}{I}$ Leitwert $G = R^{-1}$ (Siemens) = Ω^{-1}

Momentane Leistung $p = u(t) \cdot i(t)$ **Mittlere Leistung am Widerstand:** $P = U \cdot I = R \cdot I^2 = \frac{U^2}{R} \leq P_{max}$

Mittlere Leistung $P = \frac{dW}{dt} = U \cdot I$

Energie $W = U \cdot Q$ $W: [J] = [Ws]$

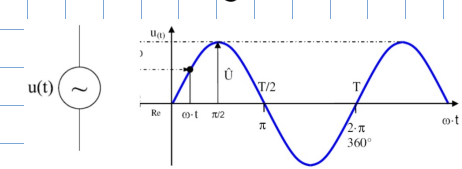
Widerstand eines geraden Leiters

$R = R_{20} = \rho \cdot \frac{l}{A}$ $R = R_{20}$ Widerstand des Leiters bei Raumtemperatur (20°C) in Ω
 ρ spezifischer Widerstand des Leitermaterials bei 20°C in Ωm oder $\Omega \cdot mm^2/m$
 l Länge des Leiters in m
 A Querschnittsfläche des Leiters m^2 oder mm^2

Leitfähigkeit γ eines Materials: $\gamma = \frac{1}{\rho}$ $[\gamma] = \frac{1}{\Omega m}$ bzw. $\frac{m}{\Omega mm^2}$

Leitwert G eines Bauteils: $G = \frac{1}{R} = \gamma \cdot \frac{A}{l}$ $[G] = S = \frac{1}{\Omega}$

Wechselspannungsquellen (AC-Quelle)



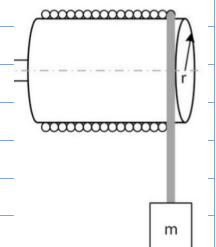
$U_{eff} = U = \frac{U_{spitzenwert}}{\sqrt{2}}$

Einschaltstrom $I_E = \frac{U}{R_{20}}$, $P_E = U \cdot I_E$
Lampe ist kalt

$\frac{S}{V \cdot t}$

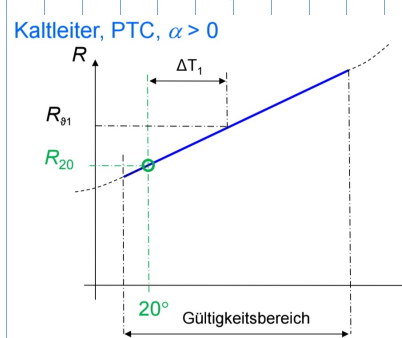
$W = m \cdot g \cdot h$

$P = \frac{W}{t}$

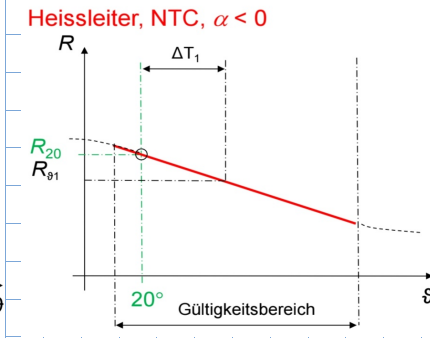


Verlustenergie $W = P \cdot t$

Temperaturabhängigkeit

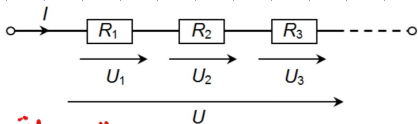


Widerstand steigt mit Temperatur
 $R_\theta = R_{20} \cdot (1 + \alpha_{20} \cdot \Delta T)$



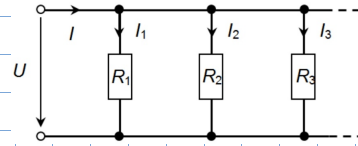
Widerstand sinkt bei erwärmung
 $R_\theta = R_{20} \cdot (1 + \alpha_{20} \cdot \Delta T)$

Serieschaltung



Überall gleicher Strom, Spannungen teilen sich auf
 $R = \frac{U}{I} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$

Parallelschaltung



$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots$
 $\rightarrow \frac{1}{R_{ges}} = \frac{R_{ges}}{1}$ Kehrwert

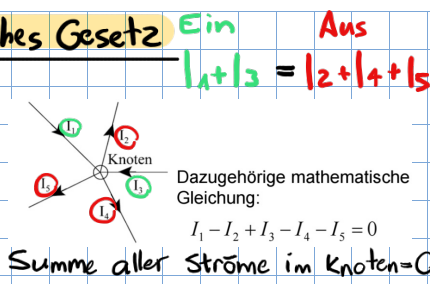
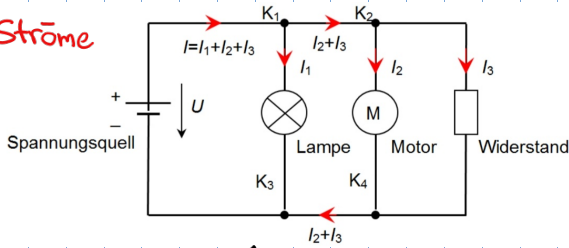
Bei 2 Parallelen Widerständen

$R_{ges} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$

In allen Widerständen gleiche Spannung, Strom teilt sich auf

Knotenregel (Strom) 1. Kirchhoffsches Gesetz

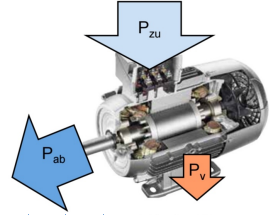
Ströme



Wirkungsgrad

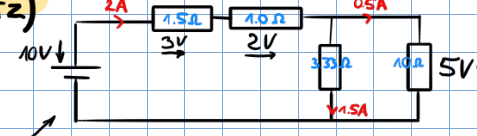
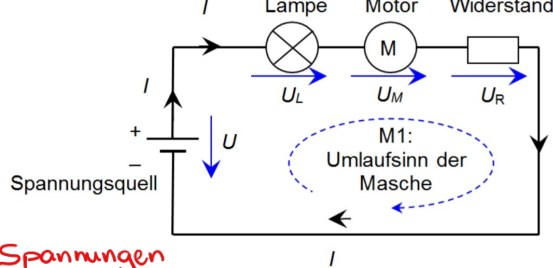
$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} = 1 - \frac{P_v}{P_{zu}}$$

Beispiel: Motor mit $P_{ab} = 1000 \text{ W}$, $\eta = 88\%$
 $\rightarrow P_{zu} = 1136 \text{ W}$, $P_v = 136 \text{ W}$



Maschenregel (2. Kirchhoff Gesetz)

Maschenregel (Spannungen)

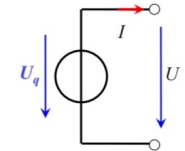


Reale Spannungsquelle

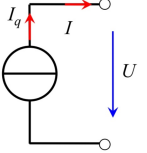
$$U = U_q - U_{Ri} = U_q - R_i \cdot I$$

- Leerlaufspannung U_0 (bei $I=0$)
- Ideale Quelle im Ersatzschaltbild: U_q mit $U_q = U_0$
- Kurzschlussstrom I_k (bei $U=0$) $= I_k = \frac{U_0}{R_i}$
- Innenwiderstand $R_i = U_0 / I_k$

Ideale Spannungsquelle



Ideale Stromquelle



Spannungen

$$U_L + U_M + U_R - U = 0$$

Summe aller Spannungen in Stromkreis = 0

Mechanische Grundlagen

$$J = \text{kg} \cdot \text{m}^2$$

$$M_M - M_L = \frac{J \cdot \Delta \Omega}{\Delta t}$$

Hochlaufzeit

$$\Delta t = \frac{J_{tot} \cdot \Delta \Omega}{M_M - M_L}$$

$$J_{welle} = \frac{m \cdot d^2}{8}$$

$$\Omega = \frac{n \cdot 2\pi}{60}$$

$$\omega = 2\pi f$$

$$n = \frac{\Omega}{2\pi} \cdot 60$$

Leistung

$$P_{mech} = M \cdot \Omega = M \cdot 2\pi n$$

Arbeit

$$W = M \cdot \Omega \cdot t$$

$$J_{tot} = 2 \cdot J_R + m \cdot r^2$$

$$\Omega = \frac{v}{r} \rightarrow \dot{\Omega} = \frac{1}{r} \cdot \frac{v_e}{t_B}$$

Umfangsgeschw: $v = \omega \cdot r = 2\pi n r$

Beschleunigungsmoment: $M_B = J_{tot} \cdot \dot{\Omega} = \left(\frac{2 \cdot J_R}{r} + m \cdot r \right) \cdot \frac{v_e}{t_B}$

Magnetfeld

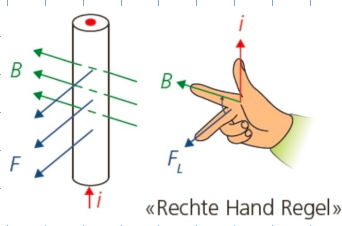
Lorenz-Kraft

$$F_L = i \cdot B \cdot L$$

i = Strom

$$M = F_L \cdot r$$

$$P = F_L \cdot v$$



«Rechte Hand Regel»

Flussdichte des Magnetfelds
 $B: T = \frac{Vs}{m^2}$

Induzierte Spannung

$$U = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{d(B \cdot A)}{dt}$$

Flussänderung über Zeit

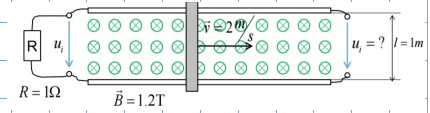
Transformatorische Spannung

$$U = N \cdot A \cdot \frac{dB}{dt}$$

N = Windungszahl

Bewegungsspannung

$$U = B \cdot l \cdot v$$



Gleichstrommaschine

Induzierte Spannung

$$U_i = k \cdot \Phi \cdot \Omega$$

Inneres Drehmoment

$$M_i = k \cdot \Phi \cdot I_A$$

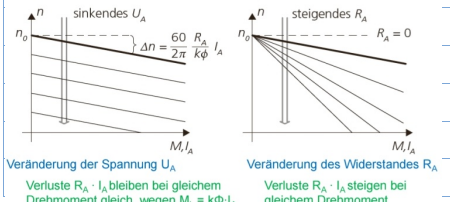
$k\Phi$: Maschinenkonstante
 $V/rad/s = Nm/A$

Generator

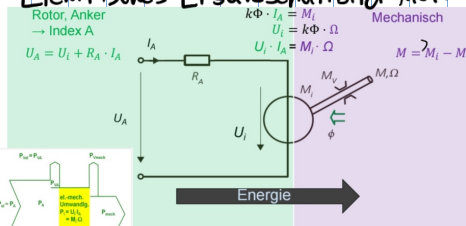
$$U_A = U_i - R_A \cdot I_A$$

$$I_A = \frac{M_i}{k\Phi}$$

$$n = \frac{1}{k\Phi} \cdot \frac{60}{2\pi} \cdot U_A - \frac{1}{k\Phi} \cdot \frac{60}{2\pi} \cdot R_A \cdot I_A$$



Elektrisches Ersatzschaltbild Motor



$$U_A = U_i + R_A \cdot I_A$$

UA: Ankerspannung

RA: Ankerwiderstand

$$M_i = M - M_v$$

$$P = M \cdot \Omega$$

$$\Omega = \frac{U_i}{k\Phi}$$

$$M_i = M + M_v$$

$$U_i = U_A - R_A \cdot I_A$$

$$k\Phi = \frac{U_i}{\Omega} = \frac{M_i}{I_A}$$

Mv: Reibung

ML: Last

Mi: Inneres moment

Ankerverlust/Kupferverluste (Anker): $P_v = P_A - P_i = I_A^2 \cdot R_A$

Mechanische Verluste (Reibung): $P_{vmech} = P_i - P_{ab} = M_v \cdot \Omega$

Erregerverlustleistung $P_{ve} = U_e \cdot I_e$

$$\eta_{N} = \frac{P_N}{P_{AN} + P_{EN}}$$

$$M_B = J \cdot \dot{\Omega} = J \cdot \frac{\Delta \Omega}{\Delta t}$$

Nenngrößen Index UN

$$P_N = M_N \cdot \Omega_N$$

$$P_N = I_{AN} \cdot U_N$$

Reihenschluss-Gleichstrommaschine

$$\Phi = B \cdot A, B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am}$$

$$M_i = k_e \cdot I_A^2, U_i = k_e \cdot I_A \cdot \Omega$$

$$U_A = R_{tot} \cdot I_A + U_i$$

$$\Omega = \frac{U_i}{k_e \cdot I_A} = \frac{P_{tot}}{k_e \cdot I_A}$$

Muss immer an Last hängen, Leerlauf $\rightarrow \infty$ (Boom)

EC Motoren

$$\text{Frequenz } f = \frac{n \cdot p}{60}$$

p: Polpaaranz.

$$\text{Spannungskonstante } k_u = \frac{U_i}{n} \left[\frac{V}{U/min} \right]$$

$$\text{Drehzahlkonstante } k_n = \frac{n}{U_i} \left[\frac{U/min}{V} \right]$$

$$\text{Drehmomentkonstante } k_T = k_M = \frac{M}{I} \left[\frac{Nm}{A} \right]$$

$$\text{Zugeführte elektrische Leistung (Anker)} P_A = U_A \cdot I_A$$

$$\text{Innere mechanische Leistung: } P_i = M_i \cdot \Omega = U_i \cdot I_A$$

$$\text{Abgegebene mech. Leistung: } P_{ab} = M \cdot \Omega$$

$$R_A = \frac{P_v}{I_A^2}$$

Kondensator Kapazität C in Farad [F] = $\frac{As}{V}$
 $Q = C \cdot U_C$ Plattenkondensator $C = \epsilon \cdot \frac{A}{d}$
 $\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$ [ϵ] = F/m = As/(Vm) mit
 ϵ_0 : Permittivität des Vakuums (Naturkonstante), [ϵ_0] = F/m = As/(Vm),
 ϵ_r : Permittivitätszahl [ϵ_r] = -
 U_C kann sich nicht sprunghaft ändern

Gespeicherte Energie $W = \frac{C}{2} (U_2^2 - U_1^2)$ $i_C = \frac{dQ}{dt} = C \cdot \frac{dU_C}{dt}$
 Serieschaltung $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots$ Parallel $C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots$
 $C = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$ $U_C = \frac{1}{C} \int i_C dt + U_{C0}$

Spule Induktivität L in Henry [H]

$\Psi = N \cdot \Phi = L \cdot I_L$
 Mag. Fluss
 Mag. Flussverlektung

$i_L = \frac{1}{L} \int U_L dt + i_{L0}$ $U_L = L \cdot \frac{di_L}{dt}$ Gespeicherte Energie
 Serieschaltung $L = L_1 + L_2 + L_3 + \dots$ Parallel $\frac{1}{L} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \dots$ $L = \frac{L_1 \cdot L_2}{L_1 + L_2}$
 $W = \frac{L}{2} (I_2^2 - I_1^2)$ I_L kann sich nicht sprunghaft ändern

Stationär bei DC-System $\rightarrow$ Kurzschluss: Spule $u_L = L \cdot \frac{di_L}{dt} \rightarrow u_L = 0$, Kondensator bei DC: Leerlauf $i_C = 0$

Wechselstromlehre Phasenverschiebung $\varphi = \varphi_U - \varphi_I$ Zeitliche Verschiebung zwischen Spannung und Strom

Sinusförmige Spannung $u(t) = \hat{U} \cdot \sin(\omega t)$, $\omega = 2\pi f$, Maximalwert: $\hat{U} = \sqrt{2} \cdot U$

Widerstand $R = \frac{U_R}{I_R}$, $\varphi = 0$, Wirkleistung: $P_R = U_R \cdot I_R = R \cdot I_R^2$

Kapazitiver Blindwiderstand: $X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{U_C}{I_C}$, $\varphi = -90^\circ$, $P_C = 0$ Induktiver Blindwiderstand: $X_L = \omega \cdot L = \frac{U_L}{I_L}$

Netzwerke: Ersatzimpedanz (Scheinwiderstand Z): $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ $X = X_C$ oder X_L , $I = \frac{U}{Z}$, $\varphi = \pm \arctan\left(\frac{X}{R}\right)$

Leistungsarten: Scheinleistung $S = U \cdot I$ [VA], Wirkleistung $P = U \cdot I \cdot \cos(\varphi) = S \cdot \cos(\varphi)$ [W]

Blindleistung $Q = U \cdot I \cdot \sin(\varphi) = S \cdot \sin(\varphi)$ [VAR], Momentanleistung $p(t) = P - S \cdot (2\omega t + \varphi_U + \varphi_I)$

Asynchronmaschine

$I_{N\Delta} = 3 \cdot I_{NY}$ $M_{\Delta} = 3 \cdot M_Y$

Synchrondrehzahl

$n_s = \frac{60 \cdot f_s}{p}$

$p = \frac{60 \cdot f_N}{n_s}$

Kippschlupf bei Freq.

$S_{KX} = S_{KN} \cdot \frac{f_N}{f_X}$

Rotorfrequenz f_r

$f_r = S_N \cdot f_N$

Rotorverlustleistung

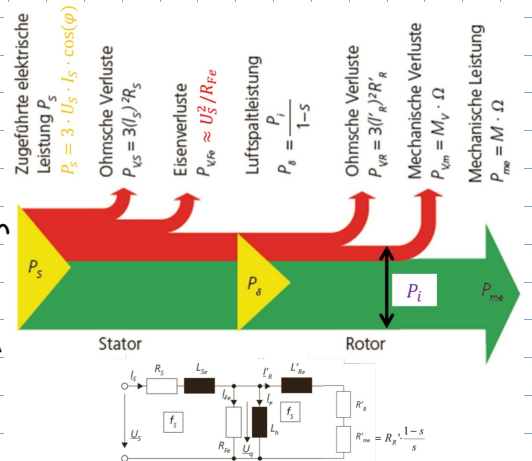
$P_{V,RV} = P_N \cdot \frac{S_N}{1 - S_N}$

Bezogener Rotorstrom

$I'_{RV} = \sqrt{\frac{P_{V,RV}}{3 \cdot R_R}}$

Magnetisierungsstrom

$I_M = \sqrt{I_s^2 - I_r^2}$



Schlupf

$S_N = \frac{n_s - n}{n_s}$

Stillstand $s=1$ ($n=0$)
 Leerlauf: $s=0$ ($n=n_s$)
 n_s = Synchrondrehzahl

Kippmoment $f < f_N$ $M_K = M_{KV}$ konst.
 $f > f_N$ sinkt quadr. $M_K = M_{KV} \left(\frac{f_N}{f}\right)^2$

$\Delta n_{OK} = S_{KN} \cdot n_s$

Grenzdrehzahl
 $n_H^2 + \left(2 \cdot \Delta n_{OK} - \frac{M_{KV} \cdot n_{sy}^2}{M_v \cdot n_v}\right) \cdot n_H + \Delta n_{OK}^2 = 0$

Netz Rotor

Mechanisches Moment

$M_N = \frac{P_N}{\Omega} = \frac{60 \cdot P_N}{2\pi \cdot n_N}$

$P_N = M_N \cdot \Omega$

Grenzdrehzahl

$M_H = M_v \cdot \frac{n_N}{n_H}$

Anlaufmoment M_A

Kloss'sche Gleichung
 $M_i = M_K \cdot \frac{2}{\frac{s}{S_N} + \frac{S_N}{s}}$

Kippmoment

$M_K = M_v \cdot \frac{S_K + \frac{S_N}{S_K}}{2}$

S_K = Kippschlupf

$S_K^2 - \left(2 \cdot \frac{M_K}{M_N} \cdot S_N\right) S_K + S_N^2 = 0$

Kippmoment im Feldstellbereich $M_K = \frac{1}{f^2} \cdot \frac{J \cdot \Omega_B}{M_L}$

Näherung konstantes Moment
 $t_A = \frac{J \cdot \Omega_B}{M_{me} - M_L}$

$I_N = \frac{P_N}{\sqrt{3} \cdot U_N \cdot \cos(\varphi) \cdot n \cdot \eta}$

Mitternachtsformel

$S_N = 0.032$, $\frac{M_K}{M_N} = 2.9$
 $2.9 = \frac{S_K + \frac{S_N}{S_K}}{2}$

$S_N \cdot S_K \cdot 5.8 = S_N^2 + S_K^2$

$S_K^2 - (5.8 \cdot 0.032) S_K + 0.032^2 = 0$

$S_{K1} = 0.1799$, $S_{K2} = 0.0057$
 $S_K > S_N \rightarrow S_{K1}$

$\Omega = \frac{n \cdot 2\pi}{60}$ $\omega = \frac{2\pi f}{n} = \frac{2\pi \cdot 60}{n}$

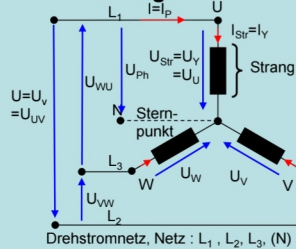
Frequenz um Faktor $\frac{150\text{Hz}}{100\text{Hz}} = 1.5$ erhöht, Strangspannung muss auch um 1.5 erhöht werden

Anlauf Δ vs. Y

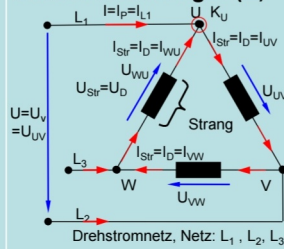
Elektrische / Mechanische Grösse	Direktanlauf (Dreieck Δ)	Sanftanlauf (Stern Y)	Das Verhältnis (Y im Vergleich zu Δ)
Spannung an der Spule (U_{Str})	$U_{Str} = U_{Netz}$	$U_{Str} = \frac{U_{Netz}}{\sqrt{3}}$	Die Spule sieht $\frac{1}{\sqrt{3}}$ der Spannung ($\approx 58\%$).
Strom aus dem Netz (I_{Netz})	I_{Δ} (sehr hoch)	$I_Y = \frac{I_{\Delta}}{3}$	Der Netzstrom sinkt auf $\frac{1}{3}$ ($33,3\%$). ☹
Anlaufdrehmoment (M_{Anl})	M_{Δ} (sehr hart)	$M_Y = \frac{M_{\Delta}}{3}$	Die Anlaufkraft sinkt auf $\frac{1}{3}$ ($33,3\%$). ☹

Drehstrom

Sternschaltung Y



Dreieckschaltung D (Δ)



Polradspannung

$$U_p = \sqrt{U_{SN}^2 + \Delta U^2}$$

q-Strom

$$U_s = \sqrt{U_x^2 + (U_r + U_p)^2}$$

$\cos(\varphi)$ Verkettete Spannung immer 30° gegenüber normaler Sternspannung

Strangspannung U_{Str} ↔ Verkettete Spannung U

$$U_{Str} = U_Y = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot U = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot U$$

$$U_{Str} = U_D = U_V = U$$

Strangstrom I_{Str} ↔ Polleiterstrom I

$$I_{Str} = I_Y = I_P = I$$

$$I_{Str} = I_D = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot I_P = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot I$$

Scheinleistung S

$$S_Y = 3 \cdot U_Y \cdot I_Y = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$$

$$S_D = 3 \cdot U_D \cdot I_D = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$$

Wirkleistung $P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos(\varphi)$ Blindleistung $Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin(\varphi)$

Klemmenwiderstand zu Strangwiderstand

Sternschaltung: $R = 2 \cdot R_{STR} \rightarrow R_{STR} = \frac{R}{2}$

Dreieckschaltung: $R = \frac{2 \cdot R_{STR} \cdot R_{STR}}{3 \cdot R_{STR}} = \frac{2}{3} R_{STR} \rightarrow R_{STR} = \frac{3}{2} \cdot R$

Wirkleistung über Strang: $P = 3 \cdot \frac{U_{STR}^2}{R_{STR}}$

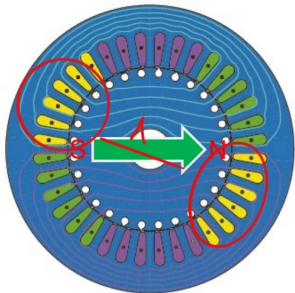
Vereinfacht

Momentanleistung $= P(t) = 3 \cdot U_{str} \cdot I_{str}$ Bei egal wieviel ms P ist immer gleich

$$P(t) = \hat{U}_{str} \cdot \hat{I}_{str} \cdot [\sin^2(\omega t - 0^\circ) + \sin^2(\omega t - 120^\circ) + \sin^2(\omega t - 240^\circ)]$$

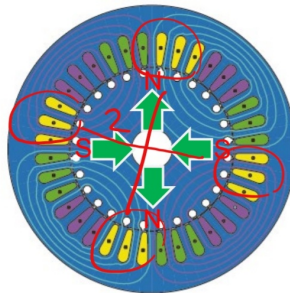
1.5

Drehfeld und Synchronmaschine



Polpaarzahl $p=1$
Pole $2p=2$

zweipoligen Asynchronmaschine



$p=2$
 $2p=4$

vierpoligen Asynchronmaschine

Synchrondrehzahl

$$n_s = \frac{60 \cdot \Omega_s}{2\pi \cdot p} = \frac{60 \cdot f_s}{p} \text{ 1/min}$$

p : Polpaarzahl

Mechanisches Nennmoment

$$M_N = \frac{P_N}{\Omega} = \frac{60 \cdot P_N}{2\pi \cdot n_N}$$

Spannungsabfall über Synchrone Reaktanz

$$\Delta U_N = I_{str} \cdot X_d$$

$$X_d = 2\pi \cdot f \cdot L$$

Leistungsfaktor

$$\cos(\varphi) = \frac{P_N}{S_N} \rightarrow \varphi = \arccos\left(\frac{P_N}{S_N}\right)$$

Blindleistung $Q < 0 \rightarrow \varphi < 0$

$$\sin(\varphi) = \sqrt{1 - \cos^2(\varphi)}$$

Synchronmaschine

$$\text{Kippmoment: } M_K = \frac{3 \cdot 60 \cdot U_s \cdot U_p}{2\pi \cdot n_s \cdot X_d}$$

U_s : Strang-Netzspannung
 U_p : Strang-Polradspannung
 X_d : Synchrone Reaktanz

Synchrongenerator

$$I_N = \frac{S_N}{\sqrt{3} \cdot U_N} \rightarrow I_{str} = \frac{I_N}{\sqrt{3}}$$

Polradwinkel

$$\tan(\vartheta) = \frac{\Delta U \cdot \cos(\alpha)}{U_s + \Delta U \cdot \sin(\alpha)} \rightarrow \arctan(\) = \circ$$

$$\vartheta_N = -\arctan\left(\frac{\Delta U_N}{U_{str}}\right)$$

Leerlaufstrom = 0

Drehzahl bei Lastmoment = 0

Drehmoment

$$M_i = k_T \cdot I$$

k_T : Drehmomentkonst.

Spannung

$$U_i = k_u \cdot n$$

k_u : Spannungskonst.

$$k_T = \sqrt{3} \cdot k_u \cdot \frac{60}{2\pi}$$

g) den Polradwinkel im Nennbetrieb (fakultativ).

Hinweis: Lösung mit grafischer Unterstützung aus Zeigerdiagramm ist zulässig

°

Berechnen Sie zudem

h) (fakultativ) das Kippmoment M_K Nm

i) den Leerlaufstrom I_0 A

j) die Drehzahl, die sich bei einem Last-Moment von $1.2 \cdot M_K$ einstellt. Nm

$$a) n_N = \frac{60 \cdot f_N}{p} = \frac{60 \cdot 50 \text{ Hz}}{3} = 1000 \text{ min}^{-1}$$

$$b) U_{SN} = U_N = 400 \text{ V}$$

$$c) I_{SN} = \frac{I_N}{\sqrt{3}} = 5.77 \text{ A}$$

$$d) P_N = 3 \cdot U_{SN} \cdot I_{SN} \cdot \varphi_N$$

$$e) M_N = \frac{P_N}{\Omega} = \frac{60 \cdot P_N}{2\pi \cdot n_N}$$

$$f) \Delta U_N = I_{SN} \cdot X_d$$

$$g) \vartheta_N = -\tan^{-1} \frac{\Delta U_N}{U_{str}} = -24.4^\circ (<0 \text{ wegen Motorbetrieb})$$

$$h) M_K = -\frac{M_N}{\sin \vartheta_N}$$

i) $Q=0 \rightarrow$ Aus $P=0$ folgt $I=0$.

j) $n=0$ (da $M > M_K$)

Ein symmetrischer, ohmscher Verbraucher ist an einem 3-Phasen-System mit der verketteten Spannung $U = 400\text{ V}$ und Frequenz $f = 50\text{ Hz}$ angeschlossen. Sie messen den Widerstand zwischen zwei Phasen $R_{Ph-Ph} = 64\Omega$ (z.B. zwischen U und V). Sie wissen jedoch nicht, ob die einzelnen Widerstände in Stern oder Dreieck geschaltet sind.

a) Nehmen Sie an, dass die Last aus in Stern geschalteten Strangwiderständen R_Y besteht.

Wie gross wäre der Strangwiderstand R_Y ? Ω

Wie gross wäre die Gesamtleistung P_Y ? W

b) Nehmen Sie an, dass die Last aus in Dreieck geschalteten Strangwiderständen R_Δ besteht.

Wie gross wäre der Strangwiderstand R_Δ ? Ω

Wie gross wäre die Gesamtleistung P_Δ ? W

c) Vergleichen Sie die Leistung P_Y und P_Δ . $P_Y/P_\Delta =$

d) Berechnen Sie die Momentanleistung $p(t)$ die der Verbraucher (insgesamt) in Wärme umsetzt für folgende Zeitpunkte: $t = 0, 5, 10$ und 15 ms .

$p(0) =$ W;

$p(5\text{ ms}) =$ W;

$p(10\text{ ms}) =$ W;

$p(15\text{ ms}) =$ W

e) Berechnen Sie die den Leiterstrom I in jeder Phase und die Phasenverschiebung zwischen der verketteten Spannung U_{12} und den dem Leiterstrom I_1 .

$I = I_1 = I_2 = I_3 =$ A

$\varphi_{U_{12}I_1} =$

f) Berechnen Sie die Wirkleistung P die vom Netz bezogen wird.

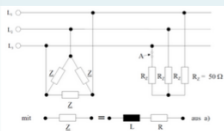
W

Ein symmetrischer Verbraucher ist an das Drehstromnetz ($U=400\text{V}$, $f=50\text{Hz}$) angeschlossen. Die aus dem Netz entnommene Wirkleistung P beträgt 7680 W bei einem Leistungsfaktor $\cos(\varphi) = 0,8$.

a) Berechnen Sie die Komponenten des Ersatzschaltbildes in Dreieckschaltung, wenn die Impedanzen Z des Verbrauchers zwischen jeweils zwei Leitern des Netzes durch die Reihenschaltung einer Induktivität L und eines ohmschen Widerstand R gebildet werden.

$R =$ Ω und $L =$ mH

b) Ein symmetrischer dreiphasiger Widerstand R_Z wird zusätzlich an die Netzzuleitung angeschlossen, so dass sich das unten stehende Schaltbild ergibt:



Wie groß ist der Leistungsfaktor $\cos(\varphi_G)$ der gesamten Schaltung?

c) Der Leistungsfaktor des Systems aus symmetrischem Verbraucher mit zusätzlichem ohmschen Widerstand soll auf $\cos(\varphi_{GC}) = 0,9546$ verbessert werden. Bestimmen Sie die Kapazitätswerte C für Kondensatoren in Sternschaltung, die an die Netzzuleitung angeschlossen werden müssen, damit die gewünschte Blindleistungskompensation erreicht wird.

$C =$ μF

d) Wie groß sind die Ströme in den drei Netzzuleitungen (nur Beträge) für den Schaltungszustand, der sich bei Berücksichtigung der Aufgabenteile a), b) und c) ergibt?

$I = I_1 = \dots =$ A

e) Am Punkt A der abgebildeten Schaltung entsteht durch einen Fehler während des Betriebs eine Leitungsunterbrechung. Berechnen Sie die nun aus dem Netz entnommene Wirkleistung.

$P =$ W

$$a) n_N = \frac{60 \cdot f_N}{p} = \frac{60 \cdot 50 \text{ Hz}}{2} = 1500 \text{ min}^{-1}$$

$$M_N = \frac{P_N}{\Omega} = \frac{60 \cdot P_N}{2\pi \cdot n_N} = \frac{60 \cdot -400000 \text{ W}}{2\pi \cdot 1500 \text{ min}^{-1}} = -2546,5 \text{ Nm}$$

$$b) S_N = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_N \rightarrow I_N = \frac{S_N}{\sqrt{3} \cdot U_N} = \frac{450000 \text{ VA}}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V}} = 649,5 \text{ A} \rightarrow I_{SN} = \frac{I_N}{\sqrt{3}} = 375 \text{ A}$$

$$U_{SN} = U_N = 400 \text{ V}$$

$$c) \cos(\varphi_N) = \frac{P_N}{S_N} = \frac{-400 \text{ kW}}{450 \text{ kVA}} = -0,889$$

$$\varphi_N = \cos^{-1}(-0,889) = \pm 152,7^\circ \text{ Generator} \rightarrow \varphi_N = -152,7^\circ + 360^\circ = +207,2^\circ$$

$$d) \Delta U_N = I_{SN} \cdot X_d = 375 \text{ A} \cdot 0,6 \Omega = 225 \text{ V}$$

$$\alpha = \varphi - 180^\circ = 27,27^\circ$$

$$\Delta U \cdot \cos \alpha = 200 \text{ V}$$

$$\Delta U \cdot \sin \alpha = 103,1 \text{ V}$$

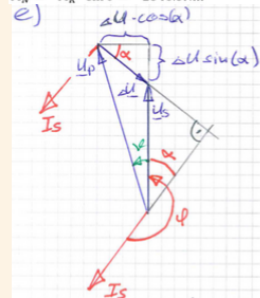
$$\tan(\theta) = \frac{\Delta U \cdot \cos \alpha}{U_S + \Delta U \cdot \sin \alpha} = \frac{200 \text{ V}}{400 \text{ V} + 103,1 \text{ V}} = 0,3975$$

$$\theta = \tan^{-1}(0,3975) = 21,68^\circ$$

$$U_P = \sqrt{200^2 + 503,1^2} = 541,4 \text{ V}$$

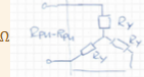
$$M_k = \frac{3 \cdot 60 \cdot U_S \cdot U_P}{2\pi \cdot n_N \cdot X_d} = 6893 \text{ Nm}$$

$$M_N = -M_k \cdot \sin \theta = -2546,5 \text{ Nm}$$



a) Gegeben: $U = 400\text{ V}$, $f = 50\text{ Hz}$, $R_{Ph-Ph} = 64\Omega$

$$R_{Ph-Ph} = 2 R_Y \Rightarrow R_Y = 32\Omega$$



$$P_Y = 3 \cdot I^2 \cdot R_Y = 3 \cdot \frac{U^2}{R_Y} = \frac{U^2}{R_{Ph-Ph}} = 2 \cdot \frac{400^2}{64} \text{ W} = 5000 \text{ W}$$

$$b) R_{Ph-Ph} = R_\Delta \parallel 2R_\Delta = \frac{2R_\Delta^2}{3R_\Delta} = \frac{2}{3}R_\Delta \Rightarrow R_\Delta = \frac{3}{2}R_{Ph-Ph} = 96\Omega$$

$$P_\Delta = 3 \cdot \frac{U^2}{R_\Delta} = 3 \cdot \frac{U^2}{\frac{3}{2}R_{Ph-Ph}} = 2 \cdot \frac{U^2}{R_{Ph-Ph}} = 2 \cdot \frac{400^2}{64} \text{ W} = 5000 \text{ W}$$

c) $P_\Delta = P_Y$ falls R_{Ph-Ph} gleich ist bzw. falls $R_\Delta = 3R_Y$

$$d) p = \hat{U}_{Str} \hat{I}_{Str} [\sin^2(\omega t - 0^\circ) + \sin^2(\omega t - 120^\circ) + \sin^2(\omega t - 240^\circ)]$$

mit

$$\left. \begin{aligned} \hat{U}_{Str} &= \sqrt{2} \cdot 400 \text{ V} = 565,7 \text{ V} \\ \hat{I}_{Str} &= \frac{\hat{U}_{Str}}{R_\Delta} = 5,893 \text{ A} \end{aligned} \right\} \hat{U}_{Str} \hat{I}_{Str} = 3,3 \text{ kVA} = \hat{p}_{Str}$$

• $t = 0\text{ ms} \rightarrow \omega t = 0^\circ$

$$p(0\text{ s}) = \hat{p}_{Str} [\sin^2(\omega t - 0^\circ) + \sin^2(\omega t - 120^\circ) + \sin^2(\omega t - 240^\circ)] = 5000 \text{ W}$$

• $t = 5\text{ ms}$ etc. analog

$$\rightarrow p(5\text{ ms}) = p(10\text{ ms}) = p(15\text{ ms}) = p(0\text{ ms})$$

$$e) I = \sqrt{3} \cdot \frac{U}{R_\Delta} = \frac{\sqrt{3}}{96} \cdot 400 \text{ V} = 7,217 \text{ A}$$

$$I = \frac{U}{R_Y \sqrt{3}} = \frac{400 \text{ V}}{32 \sqrt{3}} = 7,217 \text{ A}$$

$$\varphi_{U_{12}I_1} = \varphi + 30^\circ = 30^\circ$$

f) Wirkleistung vom Netz = Wirkleistung im Verbraucher. Zum Beispiel über e). Achtung:

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos(\varphi) = \sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 7,217 \text{ A} \cdot \cos(0^\circ) = \sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot \frac{12 \text{ A}}{\sqrt{3}} = 5000 \text{ W}$$

$$a) \cos(\varphi) = 0,8 \rightarrow \varphi = 36,87^\circ$$

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \rightarrow I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi} = \frac{7680}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,8} \text{ A} = 13,856 \text{ A}$$

$$I_{Str} = \frac{I}{\sqrt{3}} = \frac{13,856 \text{ A}}{\sqrt{3}} = 8 \text{ A}$$

Serieschaltung RL

$$\rightarrow \text{Wirkleistung } P \text{ nur in } R: P = 3 \cdot R \cdot I_{Str}^2 \rightarrow R = 40\Omega$$

$$\rightarrow \text{Blindleistung } Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi = 5760 \text{ Var nur in } L:$$

$$Q = 3 \cdot X_L \cdot I_{Str}^2 = 3 \cdot 2\pi f \cdot L \cdot I_{Str}^2 \rightarrow X_L = \omega L = 30\Omega \quad L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{30\Omega}{2\pi \cdot 50 \text{ Hz}} = 95,5 \text{ mH}$$

$$b) P_{R_Z} = 3 \cdot \frac{U_{Str}^2}{R_Z} = 3 \cdot \frac{(\frac{U}{\sqrt{3}})^2}{R_Z} = \frac{U^2}{R_Z} = \frac{400^2}{50} \text{ W} = 3200 \text{ W}$$

$$P_G = P + P_{R_Z} = 7620 \text{ W} + 3200 \text{ W} = 10880 \text{ W}$$

$$S_G = \sqrt{P_G^2 + Q_L^2} = 12311 \text{ VA}$$

$$Q_L = S \sin \varphi = \frac{P}{\cos \varphi} \sin \varphi = \frac{7680}{0,8} \cdot 0,6 \text{ Var} = 5760 \text{ Var}$$

$$\cos \varphi_G = \frac{P_G}{S_G} = \frac{10880}{12311} = 0,884$$

$$c) Q_C = Q_{GC} - Q_L$$

$$Q_{GC} = S_{GC} \sin \varphi_{GC} = \frac{P_{GC}}{\cos \varphi_{GC}} \sin \varphi_{GC} \quad \text{mit } \varphi_{GC} = \cos^{-1}(0,9546) = 17,331^\circ$$

$$\rightarrow Q_{GC} = \frac{10880 \text{ Var}}{0,9546} \sin 17,331^\circ = 3395,2 \text{ Var}$$

$$\rightarrow Q_C = 3395,2 \text{ Var} - 5760 \text{ Var} = -2364,8 \text{ Var}$$

$$Q_C = 3 \cdot \frac{U_{Str}^2}{X_C} = 3 \cdot \frac{(\frac{U}{\sqrt{3}})^2}{X_C} = \frac{U^2}{X_C}$$

$$X_C = -\frac{U^2}{Q_C} = -\frac{400^2}{-2364} \Omega = -67,658 \Omega$$

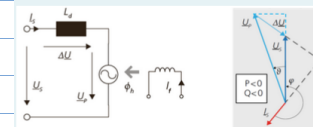
$$X_C = -\frac{1}{2\pi f C} \rightarrow C = -\frac{1}{2\pi f X_C} = 47,05 \mu\text{F}$$

$$d) S_{GC} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I = \frac{P_G}{\cos \varphi_{GC}} = \frac{10880}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,9546} \text{ A} = 16,451 \text{ A}$$

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi_C} = \frac{7680}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,9546} \text{ A} = 16,451 \text{ A}$$

$$P_A = P + \frac{P_G}{2} = 7680 \text{ W} + \frac{400^2}{2 \cdot 50} \text{ W} = 9280 \text{ W}$$

In einem Kleinwasserkraftwerk wird ein elektrisch erregter Generator zur Stromerzeugung eingesetzt.



Nennscheinleistung: $S_N = 450 \text{ kVA}$

Nennspannung: $U_N = 400 \text{ V}$ bei $f_N = 50 \text{ Hz}$

Dreieckschaltung (A)

Polpaarzahl: $p = 2$

Synchrone Reaktanz: $X_d = 0,6 \Omega$

Idealisierte Betrachtung, d.h. keine Verlustleistung in der Maschine.

Die Maschine soll bei Betrieb mit Nennstrom eine elektrische Wirkleistung von $P_N = -400 \text{ kW}$ abgeben, sie arbeitet übererregt, gibt also Blindleistung ans Netz ab ($\alpha < 0$).

a) Berechnen Sie die Nendrehzahl n_N und das Nennmoment M_N .

$$n_N =$$
 U/min und $M_N =$ Nm

b) Berechnen Sie den Strangstrom I_{SN} und die Strangspannung U_{SN} im Nennbetrieb der Maschine.

$$I_{SN} =$$
 A und $U_{SN} =$ V

c) Berechnen Sie den $\cos(\varphi)$ und die Phasenverschiebung φ zwischen U_S und I_S im Nennbetrieb?

$$\cos(\varphi) =$$
 U/min und $\varphi =$ °

d) Berechnen Sie die Spannung ΔU über der Synchrone Reaktanz X_d .

$$\Delta U =$$
 V

e) Fakultativ: Wie gross ist der Polardrehwinkel θ im Nennbetrieb?

(Hinweis: Lösung mit grafischer Unterstützung aus Zeigerdiagramm ist zulässig)

$$\theta =$$
 °

Asynchronmaschine am Netz

Von einem Asynchronmotor mit Käfigläufer sind aus den Laborunterlagen folgende Daten bekannt:

- Nennmoment $M_N = 24,2 \text{ Nm}$
- Nenndrehzahl $n_N = 940 \text{ min}^{-1}$
- Wirkungsgrad $\eta_N = 76 \%$
- Leistungsfaktor $\cos(\varphi)_N = 0.69$
- Nennspannung $U_N = 380 \text{ V}$ (Stator ist im Stern geschaltet)
- Nennfrequenz $f_N = 50 \text{ Hz}$
- Kippschlupf $s_K = 26 \%$

a) Berechnen Sie die Nennleistung P_N und die aufgenommene Wirkleistung P_S .

$$P_N = \text{ } \text{ kW und } P_S = \text{ } \text{ kW}$$

b) Berechnen Sie den Nennstrom I_N und den Nennschlupf s_N .

$$I_N = \text{ } \text{ A und } s_N = \text{ } \%$$

c) Berechnen Sie die Polpaarzahl p und Rotorfrequenz f_R .

$$p = \text{ } \text{ und } f_R = \text{ } \text{ Hz}$$

d) Berechnen Sie das Kippmoment M_K und das stationäre Anlaufmoment M_A .

$$M_K = \text{ } \text{ Nm und } M_A = \text{ } \text{ Nm}$$

a) Berechnen Sie die Polpaarzahl p , Nennschlupf s_N und die Rotorverlustleistung im Nennbetrieb $P_{V,RN}$

Hinweis: Ersatzschaltbild nutzen und sowohl $P_{V,RN}$ als auch P_N in Abhängigkeit von I'_{RN} ausdrücken.

$$p = \text{ } , s_N = \text{ } \% \text{ und } P_{V,RN} = \text{ } \text{ W}$$

b) Berechnen Sie den auf den Stator bezogene Rotorstrom I'_{RN} .

$$I'_{RN} = \text{ } \text{ A}$$

c) Fakultativ: Berechnen Sie den Magnetisierungsstrom I_μ und die

Hauptinduktivität L_h . Hinweis: $I_\mu = \sqrt{I_S^2 - I_R'^2}$

$$I_\mu = \text{ } \text{ A und}$$

$$L_h = \text{ } \text{ mH}$$

d) Berechnen Sie den Leistungsfaktor $\cos(\varphi_N)$ und den Wirkungsgrad η_N im Nennbetrieb.

$$\cos(\varphi_N) = \text{ } \text{ kW und } \eta_N = \text{ } \%$$

a) Berechnen Sie das Nennmoment M_N und den Nennstrom I_N .

$$M_N = \text{ } \text{ Nm und } I_N = \text{ } \text{ A.}$$

b) Berechnen Sie den Kippschlupf s_K und das Kippmoment M_K .

$$s_K = \text{ } \% \text{ und } M_K = \text{ } \text{ Nm.}$$

c) Bestimmen Sie den Arbeitspunkt (M_L , n_L und P_L) des Lüfters (rechnerisch oder graphisch).

$$M_L = \text{ } \text{ Nm, } n_L = \text{ } \text{ U/min und } P_L = \text{ } \text{ kW}$$

d) Auf welchen Wert müssen Sie die Statorspannung U reduzieren, damit der Lüfter eine Leistung von $P_L = 20 \text{ kW}$ aufnimmt?

$$U = \text{ } \text{ V}$$

$$a) P_N = M_N \cdot \Omega = 24.2 \cdot \frac{940 \cdot 2\pi}{60} \text{ W} = 2.38 \text{ kW}$$

$$P_S = \frac{P_N}{\eta_N} = \frac{2382}{0.76} \text{ W}$$

$$b) P_S = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_N \cdot \cos(\varphi_{sN})$$

$$\rightarrow I_N = \frac{P_S}{\sqrt{3} \cdot U_N \cdot \cos(\varphi_{sN})} = \frac{3134}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0.69} \text{ A}$$

$$s_N = \frac{n_s - s}{n_s} = 1000 - 940 \cdot 1000 = 0.06 = 6$$

$$c) p = \frac{60 \cdot f_N}{n_s} \text{ und } f_{RN} = s_N \cdot f_{SN} = 0.06 \cdot 50 \text{ Hz}$$

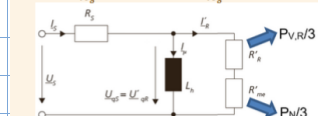
$$d) \text{ Allgemein: } M_i = \frac{2 \cdot M_k}{\frac{s_K}{s} + \frac{s}{s_K}}$$

$$\text{Nennpunkt: } M_{iN} = \frac{2 \cdot M_k}{\frac{s_K}{s_N} + \frac{s_N}{s_K}}$$

$$\rightarrow M_k = M_{iN} \cdot \frac{2}{\frac{s_K}{s_N} + \frac{s_N}{s_K}}$$

$$\text{Anlauf, d.h. } s=1: M_A = \frac{2 \cdot M_k}{\frac{s_K}{1} + \frac{1}{s_K}}$$

$$a) p = \frac{60 \cdot f_N}{n_s} \text{ und } s_N = \frac{n_s - s}{n_s} = 1000 - 925 \cdot 1000 = 0.075 = 7.5$$



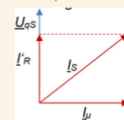
$$P_{V,RN} = 3 \cdot R'_R \cdot I_{RN}^2 \text{ und } P_N = 3 \cdot R'_{me} \cdot I_{RN}^2 = 3 \cdot R'_R \cdot \frac{1 - s_N}{s_N} \cdot I_{RN}^2$$

$$\rightarrow P_{V,RN} = \frac{P_N}{\frac{1 - s_N}{s_N}} = P_N \cdot \frac{s_N}{1 - s_N}$$

$$b) P_{V,RN} = 3 \cdot R'_R \cdot I_{RN}^2$$

$$\rightarrow I'_{RN} = \sqrt{\frac{P_{V,RN}}{3 \cdot R'_R}}$$

$$c) I_{\mu N} = \sqrt{I_{SN}^2 - I_{RN}^2}$$



$$U_{qSN} = (R'_R + R'_{me}) \cdot I'_{RN} = (R'_R + R'_R \cdot \frac{1 - s_N}{s_N}) \cdot I'_{RN} = \frac{R'_R}{s_N} \cdot I'_{RN}$$

$$\text{Zudem } U_{qS} = \omega_N \cdot L_h \cdot I_{\mu N} \rightarrow L_h = \frac{R'_R \cdot I'_{RN}}{s_N \cdot \omega_N \cdot I_{\mu N}}$$

$$d) \cos(\varphi_N) = \frac{P_{SN}}{S_{SN}} = \frac{P_N + P_{VN}}{\sqrt{3} \cdot U_{SN} \cdot I_{SN}}$$

$$\text{mit } P_{VN} = P_{V,RN} + P_{V,SN} = P_{V,RN} + 3 \cdot I_{SN}^2 \cdot R_S$$

$$\eta_N = \frac{P_N}{P_N + P_{VN}}$$

Die Statorverluste ($P_{V,SN}$) berechnen wir schnell:

$$P_{V,SN} = 3 \cdot I_S^2 \cdot R_S = 3 \cdot 9,3^2 \cdot 0,3 \Omega = 77,8 \text{ W}$$

Gesamte aufgenommene Wirkleistung (P_{in}):

$$P_{in} = 5000 + 405,4 + 77,8 = 5483,2 \text{ W}$$

fallen die letzten beiden Ergebnisse einfach heraus:

Wirkungsgrad (η_N): Was kommt raus, geteilt durch was stecke ich rein?

$$\eta_N = \frac{P_N}{P_{in}} = \frac{5000 \text{ W}}{5483,2 \text{ W}} \approx 0,9118 \text{ (bzw. } 91,2\%)$$

Leistungsfaktor ($\cos \varphi_N$): Wirkleistung geteilt durch Scheinleistung (Achtung: Es ist eine Sternschaltung, aber bei der Gesamt-Scheinleistung ist das dank dem Faktor $\sqrt{3}$ egal).

$$\cos(\varphi_N) = \frac{P_{in}}{\sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_N} = \frac{5483,2 \text{ W}}{\sqrt{3} \cdot 325 \text{ V} \cdot 9,3 \text{ A}} = \frac{5483,2}{5456,7} \approx 0,648$$

$$a) M_N = \frac{P_N}{\Omega_N}$$

$$I_N = \frac{P_{SN}}{\sqrt{3} \cdot U_N \cdot \cos(\varphi_N)} \text{ mit } P_{SN} = \frac{P_{meN}}{\eta_N} = \frac{P_N}{\eta_N}$$

$$b) M_{iN} \approx M_{iN} = \frac{2 \cdot M_k}{\frac{s_K}{s_N} + \frac{s_N}{s_K}} \text{ mit } s_N = \frac{n_s - n}{n_s} = 3.333\%$$

$$\text{Umstellen: } \frac{1}{s_N} \cdot s_K^2 - 2 \cdot \frac{M_k}{M_N} \cdot s_K + s_N = 0$$

$$\text{Solver liefert Lösungen } \rightarrow s_{K1} = 0.6\%, s_{K2} = 18.05\%$$

$$\text{Aus physikalischen Gründen muss } s_K > s_N \text{ gelten}$$

$$\rightarrow \text{Lösung } s_K = s_{K2} = 18.05 \text{ ist die richtige Lösung}$$

$$M_k = M_{iN} \cdot \frac{\frac{s_K}{s_N} + \frac{s_N}{s_K}}{2}$$

Spannungsbereich (konstantes Drehmoment): (Bereich: Stillstand - Nenndrehzahl/bis f_{eck})

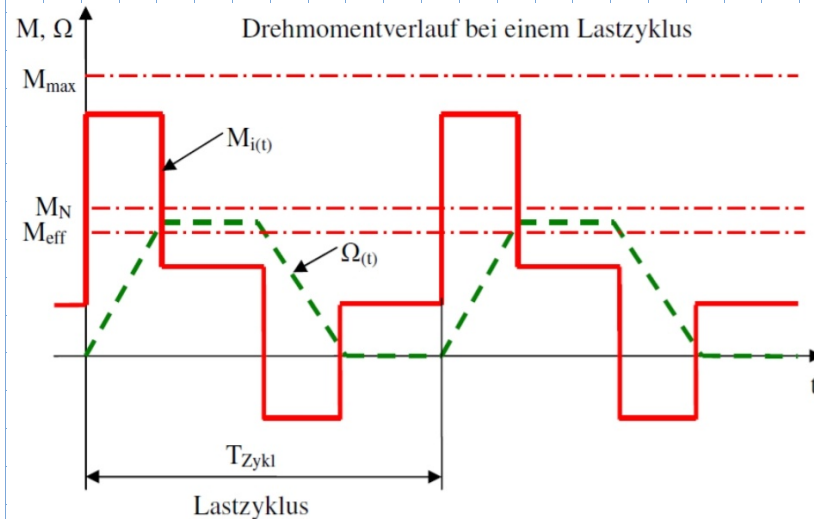
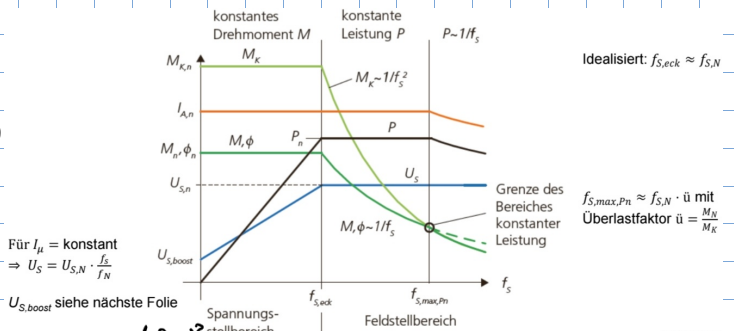
$\frac{U_s}{f_s} = \text{konstant (Linear)}$, M_k , Magnetisierungsstrom I_m , Φ_h konstant

Boost-Spannung (Spannungsanhebung bei kleinen Drehzahlen)
Spannung bei $f \approx 0$ wird angehoben $\Delta U = R_s \cdot I_s$

Feldstellbereich (konstante Leistung): Konstante Statorspannung (Bereich: oberhalb Nenndrehzahl)

U_s, P konstant, Fluss nimmt ab $\Phi_h \sim \frac{1}{f_s}$, M_k sinkt Quadratisch $M_k(f_s) = M_{k,N} \cdot \left(\frac{f_{eck}}{f_s}\right)^2$, Dauermoment sinkt $M \sim \frac{1}{f_s}$

Getriebeübersetzung $i = \frac{n_M}{n_L}$, Trägheitsmoment $J_{tot} = J_M + \frac{J_L}{i^2}$ $M_M = \frac{M_L}{i}$



$$M_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T_{Zykl}} \cdot (M_1^2 \cdot t_1 + M_2^2 \cdot t_2 + M_3^2 \cdot t_3 + \dots)}$$

Dreiphasiger Diodengleichrichter
Mit Glättungskondensator (Spitzenwert)

$$U_{d,max} = \sqrt{2} \cdot U_N$$

Ohne Glättung/voll belastet (Mittelwert)

$$U_{d,avg} \approx 1.35 \cdot U_N$$

Gleichstrommaschine mit Feldwicklung, Motorbetrieb:

Der Stator trägt die [Feld]-Wicklung, der Rotor die [Anker]-Wicklung. Die Maschine ist [fremd-erregt].
Beim Einschalten der Maschine muss zuerst die [Feld]-Wicklung eingeschaltet werden.
Sobald Ankerstrom fließt, entsteht [Moment]; sobald der Rotor dreht, entsteht [Spannung].

Fall 1: Bei Entlastung ($M \rightarrow 0$) wird der Ankerstrom [sinken] und die Drehzahl [steigen].

Fall 2: Wenn im Leerlauf der Feldstrom steigt, wird die Drehzahl [sinken].

Ergänzen Sie die folgenden Aussagen zu einer 1.5 V-Batterie:

- Eine 1.5 V-Batterie ist eine [lineare] [Spannungs]quelle.
- Sie messen die Quellenspannung bei [Leerlauf]
- Sie messen den maximalen Strom, wenn der Lastwiderstand [0] ist.
- Bei Belastung ist die Klemmenspannung [kleiner] als die Quellenspannung, der Klemmenstrom [kleiner] als der Kurzschlussstrom
- Der Innenwiderstand ist [Leerlauf]-[Spannung] [geteilt durch] [Kurzschluss]-[Strom]

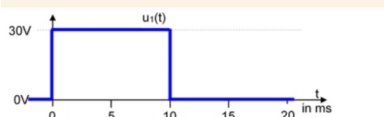
Bei Parallelschaltung addieren sich die Leitwerte.: Wahr

Wird der Querschnitt eines Drahtes verdoppelt, halbieren sich seine Verluste bei gleichem Strom.: Wahr
Das Verhältnis Strom zu Spannung ist konstant.: Wahr

Bei doppelter Spannung wird die Leistung doppelt so gross.: Falsch

Bei einer Erhöhung der Spannung wird bei einem Kondensator die gespeicherte Energie [zunehmen].

- Die mittlere Leistung an einer Induktivität [kann nicht] 12 W betragen.
- Die mittlere Leistung an einer Induktivität [kann nicht] 12 W betragen.
- Der unten gezeigte Spannungsverlauf [kann] an einem idealen Widerstand auftreten.
- Der unten gezeigte Spannungsverlauf [kann] an einer idealen Spule ($\rightarrow$ Induktivität) auftreten.
- Der unten gezeigte Spannungsverlauf [kann nicht] an einem idealen Kondensator ($\rightarrow$ Kapazität) auftreten.



Der Strom in einer Spule kann in einem realen System nicht springen.: Wahr

Bei einer Verdoppelung der Kondensatorspannung wird auch die gespeicherte Energie verdoppelt.: Falsch

Bei einem Kondensator mit $C=1\text{mF}$ benötigt man für die Spannungsänderung von 10V auf 20V eine Energie von 50mWs.: Falsch

Bei Gleichstrom kann eine Induktivität durch einen Kurzschluss ersetzt werden.: Wahr

Bei einer Parallelschaltung von zwei gleichen Induktivitäten L gilt für die Gesamt-Induktivität L_{tot} : $L_{tot} = \frac{1}{2} L$: Wahr

Für die Induktivität gilt: Je grösser der Strom, desto grösser die Spannung.: Falsch

Während dem Abbremsen ist die Klemmenleistung immer negativ: Falsch.

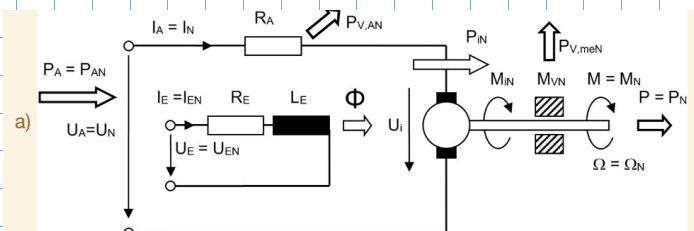
Gegenbeispiel: Lift wird beim Runterfahren gebremst.

An den Klemmen einer induktiven Last ist die Leistung immer positiv.: Falsch

Bei einer Halbierung der Drehzahl muss das Trägheitsmoment viermal grösser werden, um die gleiche kinetische Energie zu speichern.: Wahr

Während dem Abbremsen ist die Klemmenleistung immer negativ.: Falsch

Ein verlustfreies System benötigt während einer Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit keine Leistung von aussen.: Wahr



$$b) M_N = \frac{P_N}{\Omega_n} = \frac{P_N \cdot 60 \frac{s}{min}}{2\pi \cdot n}$$

$$c) M_{iN} = M_N + M_{VN}$$

$$d) P_{AN} = U_N \cdot I_N$$

$$e) P_{iN} = M_{iN} \cdot \Omega_N$$

$$f) P_{CuN} = P_{AN} - P_{iN}$$

$$g) P_{EN} = U_{EN} \cdot I_{EN}$$

$$h) P_{V,meN} = M_{VN} \cdot \Omega_N$$

$$i) \eta_{AN} = \frac{P_N}{P_{AN}}$$

$$j) \eta_N = \frac{P_N}{P_{AN} + P_{EN}}$$

$$k) P_{V,AN} = R_A \cdot I_N^2 \Rightarrow R_A = \frac{P_{V,AN}}{I_N^2} \quad \text{Achtung: } R_A \neq \frac{U_{AN}}{I_{AN}}!!!!$$

$$l) U_{iN} \cdot I_N = M_{iN} \cdot \Omega_N \Rightarrow U_{iN} = \frac{M_{iN} \cdot \Omega_N}{I_N}$$

$$m) M_{iN} = k\phi \cdot I_N \Rightarrow k\phi = \frac{M_{iN}}{I_N} \quad \text{oder}$$

$$U_{iN} = k\phi \cdot \Omega_N \Rightarrow k\phi = \frac{U_{iN}}{\Omega_N}$$

$$n) U_{EN} = R_E \cdot I_{EN} \Rightarrow R_E = \frac{U_{EN}}{I_{EN}}$$

Spickzettel: ASM am Frequenzumrichter (Motor 132C32)

Nennwerte: $M_N = 61 \text{ Nm}$, $M_{KN} = 150 \text{ Nm}$, $n_N = 1450 \text{ min}^{-1}$, $f_N = 50 \text{ Hz}$, $n_S = 1500 \text{ min}^{-1}$

Teil a) Grundkenngrößen

Polpaarzahl:

$$p = \frac{60 \cdot f_N}{n_S} = \frac{60 \cdot 50}{1500} = 2$$

Nennschlupf:

$$s_N = \frac{n_S - n_N}{n_S} = \frac{1500 - 1450}{1500} = 3,33\%$$

Kippschlupf (Kloss umgestellt):

$$s_{kN} = s_N \cdot \left(\frac{M_{KN}}{M_N} + \sqrt{\left(\frac{M_{KN}}{M_N} \right)^2 - 1} \right) = 15,69\%$$

Teil b) Variable Frequenzen f_x

Leerlaufdrehzahl: $n_{0x} = \frac{60 \cdot f_x}{p}$

Kippschlupf: $s_{Kx} = s_{kN} \cdot \frac{f_N}{f_x}$

Kippdrehmoment M_{Kx} :

- Grundstellbereich ($f_x \leq f_N$): $M_{Kx} = M_{KN}$
- Feldschwächbereich ($f_x > f_N$): $M_{Kx} = M_{KN} \cdot \left(\frac{f_N}{f_x} \right)^2$

Drehzahlverlust (Konstante):

$$\Delta n_{0k} = s_{kN} \cdot n_S \approx 235,3 \text{ min}^{-1}$$

Teil c) Grenzdrehzahl & -moment

Schnittpunkt über Mitternachtsformel bestimmen:

$$a \cdot n_H^2 + b \cdot n_H + c = 0 \rightarrow a = 1, c = \Delta n_{0k}^2$$

$$b = 2 \cdot \Delta n_{0k} - \frac{M_{KN} \cdot n_S^2}{M_N \cdot n_N} = -3345,11$$

$$n_H = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4 \cdot c}}{2} = 3329 \text{ min}^{-1}$$

Grenzdrehmoment:

$$M_H = M_N \cdot \frac{n_N}{n_H} = 61 \cdot \frac{1450}{3329} = 26,57 \text{ Nm}$$

Teil d) Ersatzschaltbild (ESB)

Strangspannung: $U_{SN} = \frac{400 \text{ V}}{\sqrt{3}} \approx 230 \text{ V}$

Kreisfrequenz: $\omega_{sN} = 2\pi \cdot 50 \approx 314,16 \text{ s}^{-1}$

Streuinduktivitäten:

$$L_{S\sigma} = L'_{R\sigma} = \frac{3 \cdot p \cdot U_{SN}^2}{4 \cdot \omega_{sN}^2 \cdot M_{KN}} = 5,36 \text{ mH}$$

Wicklungswiderstände:

$$R_S = R'_R = s_{kN} \cdot \omega_{sN} \cdot (2 \cdot L_{S\sigma}) = 527 \text{ m}\Omega$$

1. Ausgangslage & Nennwerte (Teil a)

Daten: $P_N = 30 \text{ kW}$, $n_N = 2900 \text{ min}^{-1} \rightarrow n_s = 3000 \text{ min}^{-1}$ ($p = 1$), $U_N = 380 \text{ V}$, $\cos(\varphi)_N = 0,90$, $\eta_N = 0,88$, $M_K/M_N = 2,8$, $M_L = 10^{-5} \cdot n_L^2$

Nennmoment M_N :

$$\Omega_N = \frac{2900 \cdot 2\pi}{60} = 303,69 \text{ rad/s} \rightarrow M_N = \frac{30000}{303,69} = 98,78 \text{ Nm}$$

Nennstrom I_N (Wirkungsgrad beachten!):

$$P_{\text{Netz}} = \frac{30000}{0,88} = 34090,91 \text{ W}$$

$$I_N = \frac{34090,91}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,90} = 57,56 \text{ A}$$

2. Kippgrößen via Kloss (Teil b)

Kippmoment M_K :

$$M_K = 2,8 \cdot 98,78 \text{ Nm} = 276,58 \text{ Nm}$$

Kippschlupf s_K : Nennschlupf $s_N = \frac{3000-2900}{3000} = 3,333\%$

Kloss-Formel nach s_K umgestellt (quadratische Gleichung):

$$s_K^2 - \left(2 \cdot \frac{M_K}{M_N} \cdot s_N \right) \cdot s_K + s_N^2 = 0$$

$$s_K^2 - (2 \cdot 2,8 \cdot 0,03333) \cdot s_K + 0,03333^2 = 0$$

$$\rightarrow s_K^2 - 0,18666 \cdot s_K + 0,001111 = 0 \xrightarrow{\text{Solver}} s_K = 18,05\%$$

3. Arbeitspunkt & Regelung (Teil c & d)

Teil c) AP via Linearisierung ($M_{\text{Motor}} = M_L$):

$$M_N \cdot \frac{n_s - n_L}{n_s - n_N} = c \cdot n_L^2 \rightarrow 98,78 \cdot \frac{3000 - n_L}{100} = 10^{-5} \cdot n_L^2$$

$$\xrightarrow{\text{Solver}} n_L = 2914 \text{ min}^{-1} \rightarrow M_L = 10^{-5} \cdot 2914^2 = 84,91 \text{ Nm}$$

$$P_L = M_L \cdot \frac{n_L \cdot 2\pi}{60} = 84,91 \cdot \frac{2914 \cdot 2\pi}{60} = 25,9 \text{ kW}$$

Teil d) Spannungsabsenkung auf $P_{L,\text{neu}} = 20 \text{ kW}$: 1. Neue Kinematik aus kubischer Leistungskurve ($P_L \sim \Omega^3$):

$$\Omega_L = \sqrt[3]{\frac{20000 \cdot 4\pi^2}{10^{-5} \cdot 3600}} = 279,9 \text{ s}^{-1} \rightarrow n_L = 2673 \text{ min}^{-1}$$

$$\rightarrow M_L = 10^{-5} \cdot 2673^2 = 71,45 \text{ Nm} \rightarrow s_L = \frac{3000 - 2673}{3000}$$

2. Neues fiktives Kippmoment (Kloss mit konstantem $s_K = 18,05\%$):

$$M_{K,\text{neu}} = M_L \cdot \frac{s_L + s_K}{2} = 71,45 \cdot \frac{18,05 + 10,9}{2} = 80,73 \text{ Nm}$$

3. Neue Spannung aus $M_K \sim U^2$:

$$U_s = U_N \cdot \sqrt{\frac{M_{K,\text{neu}}}{M_{K,\text{alt}}}} = 380 \cdot \sqrt{\frac{80,73}{276,58}} = 205,3 \text{ V}$$