

EAT – Inhaltsverzeichnis

1. Gleichstrommaschine

1.1 Aufbau und prinzipielle Wirkungsweise

- Asynchronmotor
- Reihenschlussmotor
- Fremderregte Gleichstrommaschine

2. Transformator

2.1 Aufbau und prinzipielle Wirkungsweise

- Idealer Transformator
- Realer Transformator
- Leerlauf- bzw. Kurzschlussversuch
- Einphasentransformator: Kurzschlussversuch, Wirkungsgrad
- Drehstromtransformator: Dreieck-, Sternschaltung
- Spartransformator
- Stelltransformator
- Parallelbetrieb

3. Asynchronmaschine

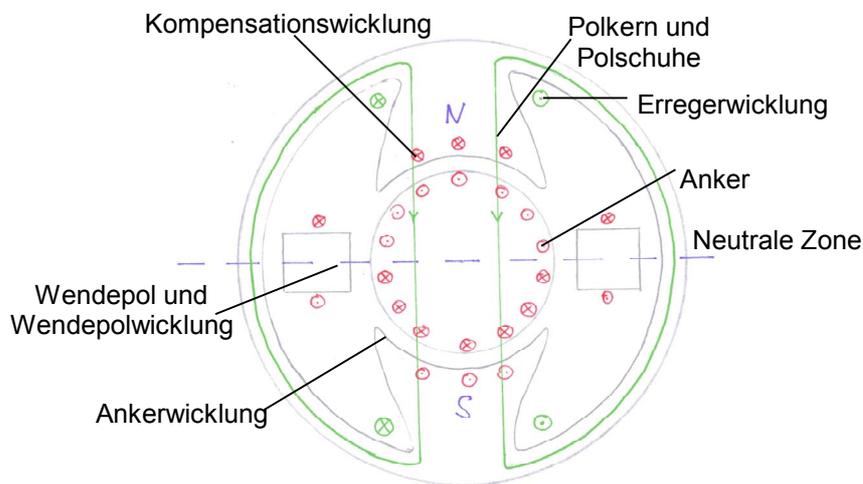
EAT

1. Einführung

2. Gleichstrommaschine

2.1. Aufbau und prinzipielle Wirkungsweise

$$\vec{F} = \vec{I} \times \vec{B} \cdot l$$

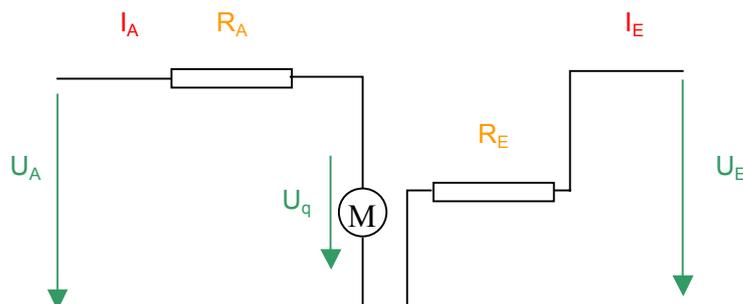


$$U = \vec{B} \times \vec{v} \cdot l$$

v = Geschwindigkeit

l = Leiterlänge

Ersatzschaltbild:



U_A = Ankerspannung

I_A = Ankerstrom

R_A = Ankerwiderstand

U_q = induzierte

Spannung

U_E = Erregerspannung

I_E = Erregerstrom

R_E = Widerstand der
Erregerwicklung

Spannungs- und Drehmomentgleichung

Wir betrachten eine Spule mit N_s Wicklungen und den Mittelwert der induzierten Spannung.

T_v ist die benötigte Zeit für eine volle Umdrehung:

$$T_v = \frac{1}{n} \quad [n] = \text{sec}^{-1}$$

Beispiel:

$$n = 25 \text{ sec}^{-1}$$

$$T_v = \frac{1}{25 \text{ sec}^{-1}} = 40 \text{ m sec}$$

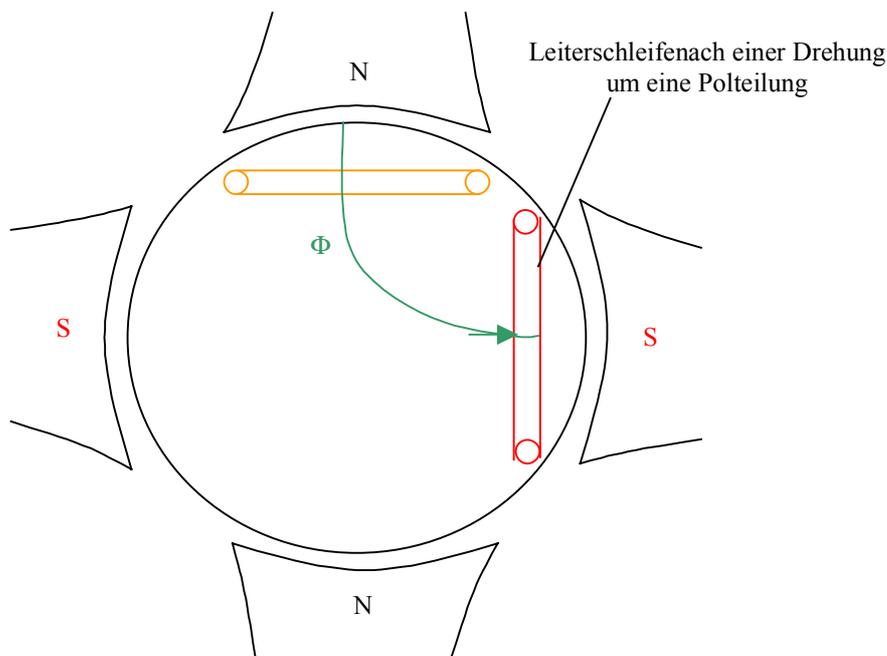
Für eine Drehung um eine Polleitung benötigt der Anker die Zeit T .

$$T = \frac{1}{p \cdot n} \quad p = \text{Anzahl der Polpaare}$$

$$U_{qsp} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T U_q \cdot dt$$

$$U_{qsp} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T N_s \cdot \frac{d\phi}{dt} \cdot dt$$

$$U_{qsp} = \frac{N_s}{T} \cdot \int_{\phi(t=0)}^{\phi(t=T)} d\phi = N_s \cdot p \cdot n \cdot 2 \cdot \phi$$



$$U_q = c \cdot \phi \cdot n \quad c = \text{Maschinenkonstante}$$

$$\begin{aligned} P_m &= U_q \cdot I_A = c \cdot \phi \cdot n \cdot I_A \\ &= M \cdot \omega \\ &= M \cdot 2 \cdot \pi \cdot n \end{aligned}$$

$$M = \frac{c}{2 \cdot \pi} \cdot \phi \cdot I_A \quad M = \text{Drehmoment}$$

Moment ist abhängig vom Ankerstrom I_A , nicht von der Drehzahl!

2.2. Drehzahl – Drehmoment – Verhalten

2.2.1. Fremderregte Gleichstrommaschine

$$U_A = R_A \cdot I_A + U_q = R_A \cdot I_A + c \cdot \phi \cdot n$$

$$n = \frac{U_A}{c \cdot \phi} - \frac{R_A}{c \cdot \phi} \cdot I_A$$

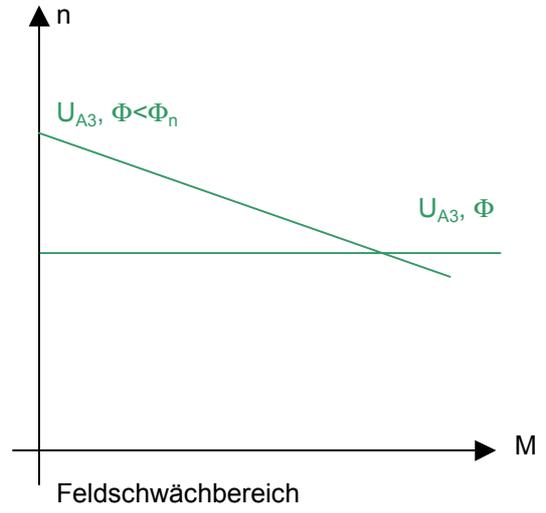
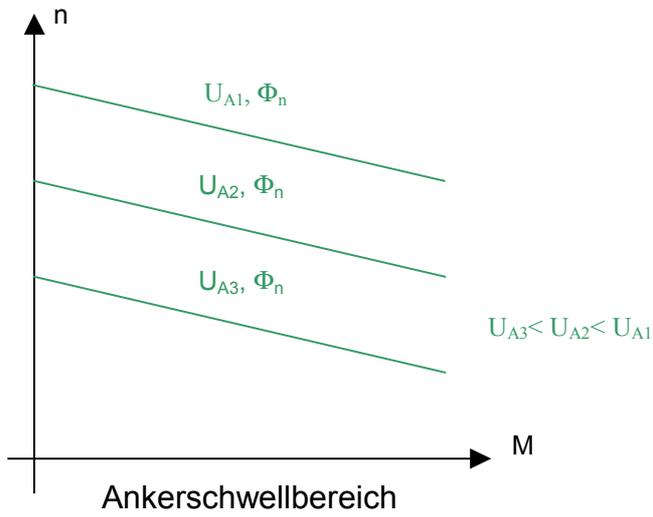
$$M = \frac{c}{2 \cdot \pi} \cdot \phi \cdot I_A$$

$$n = \frac{U_A}{c \cdot \phi} - \frac{2 \cdot \pi \cdot R_A}{(c \cdot \phi)^2} \cdot M$$

$$n = n_0 - \Delta n$$

$$n_0 = \frac{U_A}{c \cdot \phi} \quad \rightarrow \text{Leerlaufdrehzahl}$$

$$\Delta n = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_A}{(c \cdot \phi)^2} \cdot M \quad \rightarrow \text{Drehzahländerung}$$



$$[R_A] = \frac{V}{A}$$

$$[c \cdot \phi] = \frac{V}{\text{sec}^{-1}} = V \text{ sec}$$

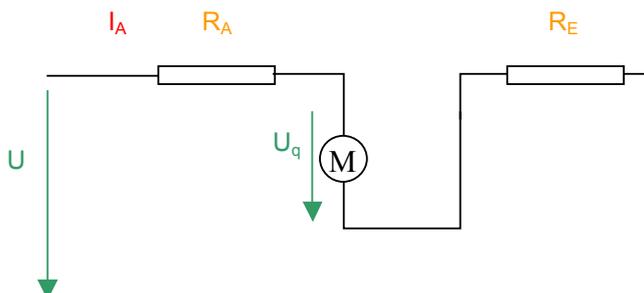
$$U_q = c \cdot \phi \cdot n$$

$$[M] = V \cdot A \cdot \text{sec}$$

$$1Nm = 1W \text{ sec}$$

$$\left[\frac{2 \cdot \pi \cdot R_A \cdot M}{(c \cdot \phi)^2} \right] = \frac{V \cdot V \cdot A \cdot \text{sec}}{V^2 \cdot \text{sec}^2 \cdot A}$$

2.2.2. Reihenschlussmaschine

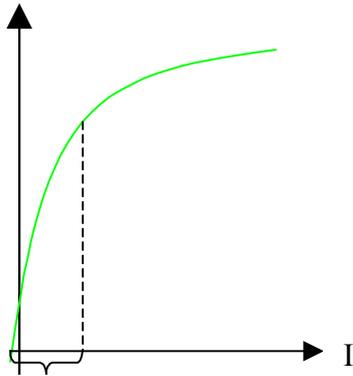


$$U = (R_A + R_E) \cdot I + U_q$$

$$= (R_A + R_E) \cdot I + c \cdot \phi \cdot n$$

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

$$\phi = f(I)$$



ungesättigter
Bereich

$$\phi = k \cdot I$$

k = Steigung

$$M = \frac{c \cdot \phi}{2 \cdot \pi} \cdot I = \frac{c \cdot \phi}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{\phi \cdot c}{k \cdot c}$$

$$\frac{1}{c \cdot \phi} = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot c \cdot k}} \cdot \frac{1}{\sqrt{M}}$$

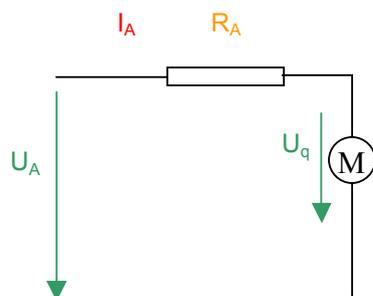
$$n = \frac{U}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot c \cdot k}} \cdot \frac{1}{\sqrt{M}} - \frac{R_A + R_E}{c \cdot k}$$

$$[R_1] = \frac{V}{A} \quad [c \cdot \Phi] = \frac{V}{\text{sec}^{-1}} = V \cdot \text{sec}$$

$$U_q = c \cdot \Phi \cdot n \quad [M] = V \cdot A \cdot \text{sec}$$

$$1 \text{ Nm} = 1 \text{ W sec}$$

$$\left[\frac{2\pi \cdot R_1}{(c \cdot \Phi)^2} \cdot M \right] = \frac{V \cdot V \cdot A \cdot \text{sec}}{V^2 \cdot \text{sec}^2 \cdot A}$$



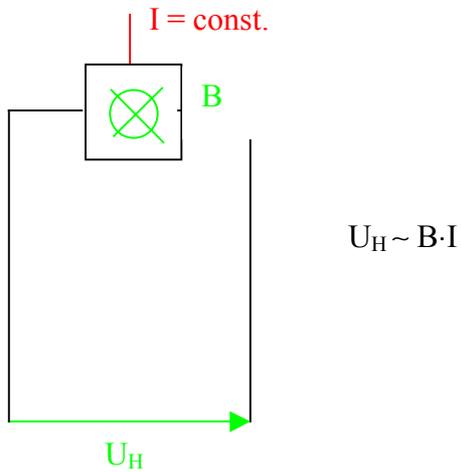
$$U_A = R_A \cdot I_A + c \cdot \Phi \cdot n$$

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

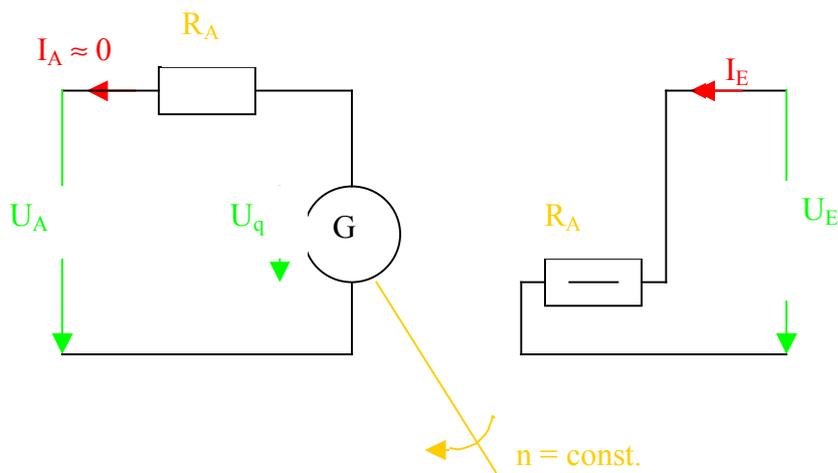
$$M = \frac{c \cdot \Phi}{2\pi} \cdot I_A$$

$$n = \frac{U_A}{c \cdot \Phi} - \frac{2\pi \cdot R_A}{(c \cdot \Phi)^2} \cdot M$$

Hallsonde:



Aufnahmen der Magnetisierungskurve



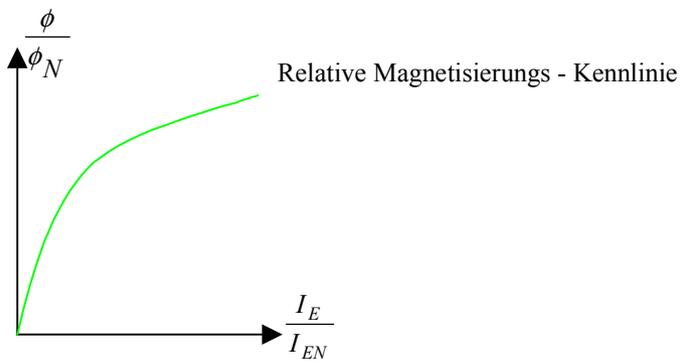
$$U_q = c \cdot \phi \cdot n$$

$$U_{qN} = c \cdot \phi_N \cdot n$$

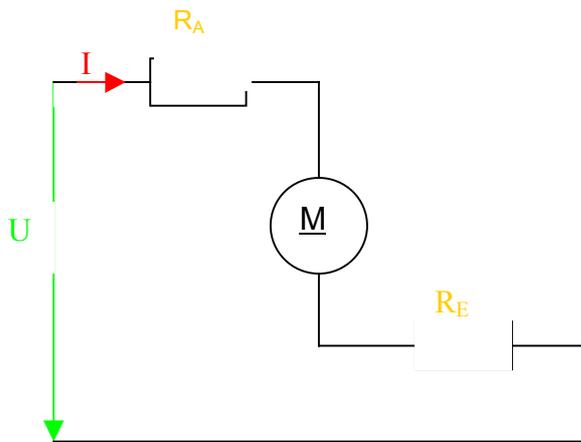
bei I_E = I_{EN}

U_{qN} = Nennspannung

$$\frac{U_q}{U_{qN}} = \frac{\phi}{\phi_N} = f\left(\frac{I_E}{I_{EN}}\right)$$



Drehzahl – Drehmoment – Verhalten der Gleichstrom – Reihenschlussmaschine



$$U = (R_A + R_E) \cdot I + U_q = (R_A + R_E) \cdot I + c \cdot \phi \cdot n$$

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

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

Für den ungesättigten Bereich der Magnetisierungs – Kennlinie gilt:

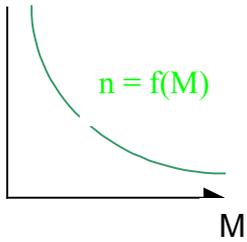
$$\phi = K \cdot I$$

$$M = \frac{c^2 \cdot \phi^2}{2 \cdot \pi \cdot K \cdot c}$$

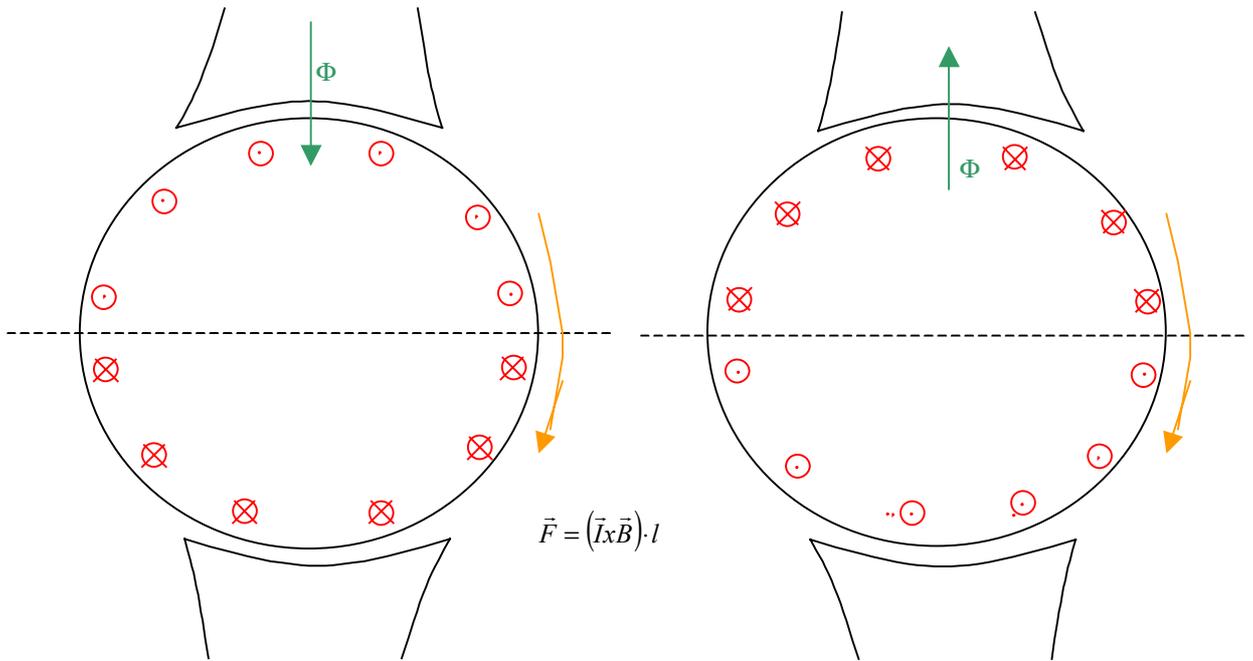
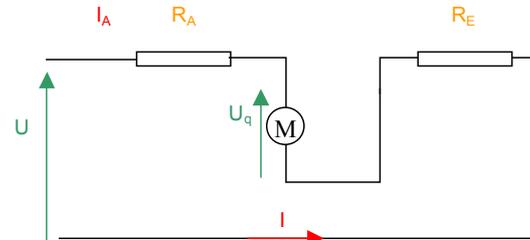
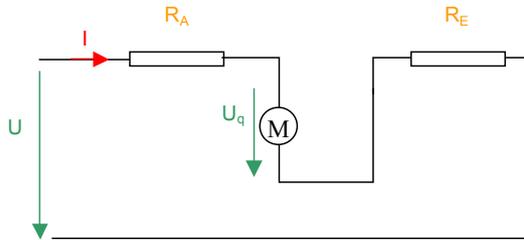
$$\frac{1}{c \cdot \phi} = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot K \cdot c}} \cdot \frac{1}{\sqrt{M}}$$

$$M = \frac{U}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot K \cdot c}} - \frac{R_A + R_E}{c \cdot K}$$

n



- starker Drehzahl – Abfall bei Belastung
- keine endliche Leerlauf – Drehzahl
- großes Anlaufmoment



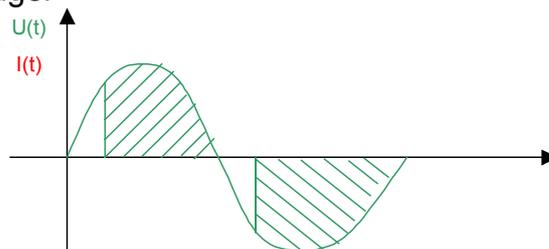
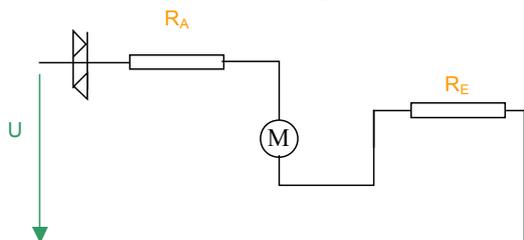
- Drehrichtung bleibt erhalten

- ein Reihenschlussmotor kann mit Wechselspannung betrieben werden

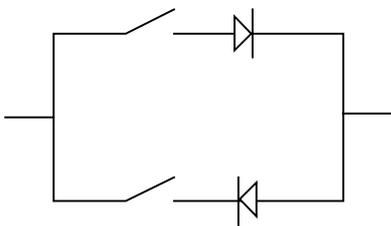
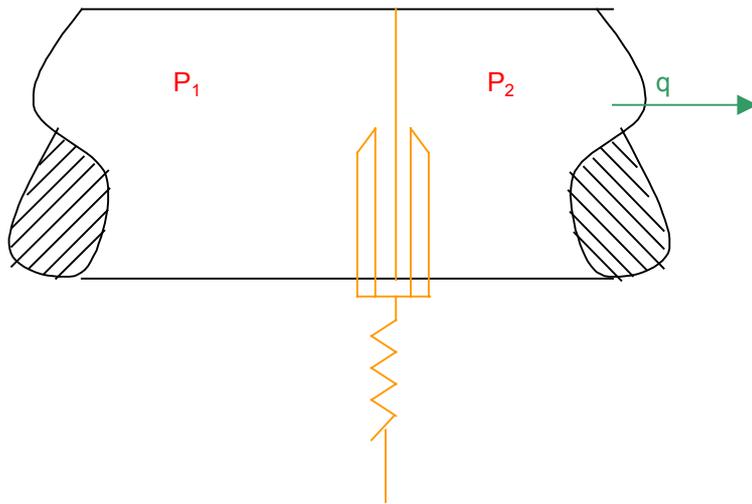
Universalmaschinen:

Antriebe für Handbohrmaschinen, Winkelschleifer, Stichsägen, Handkreissäge

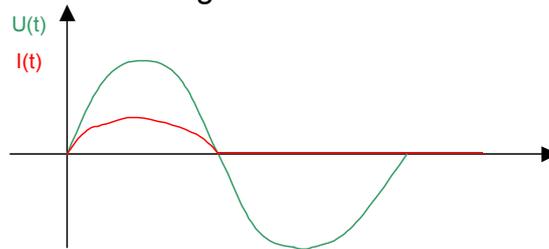
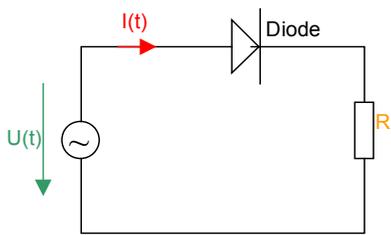
Antriebe für Haushaltsgeräte: Staubsauger



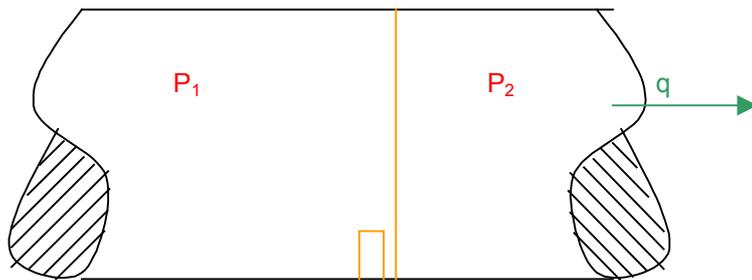
Triac- Wechselstromschalter



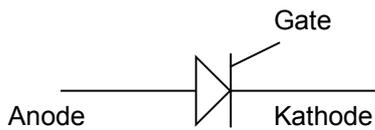
Gleichrichter – Schaltungen

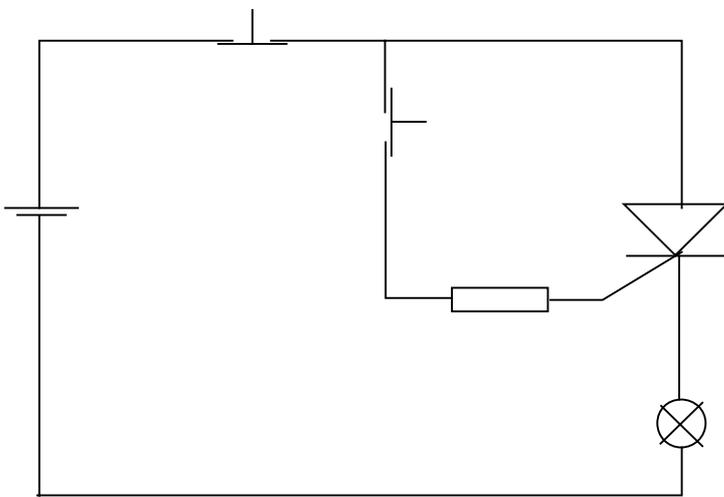
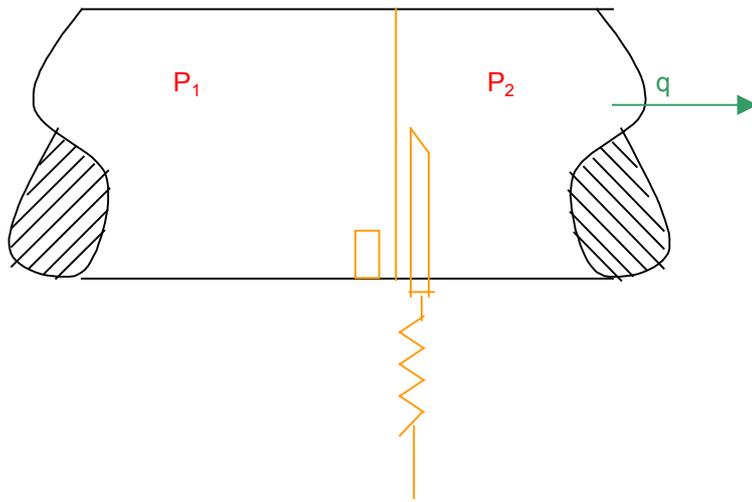


Diode:

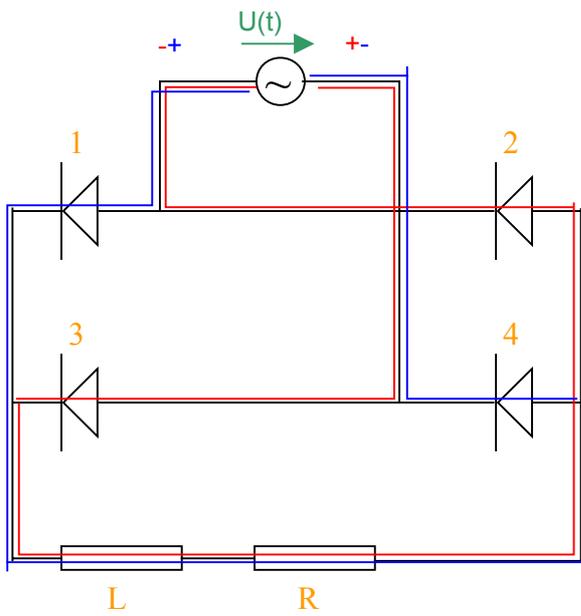


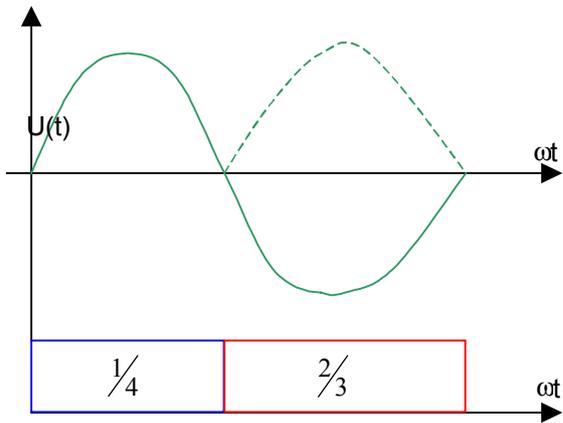
Thyristor:



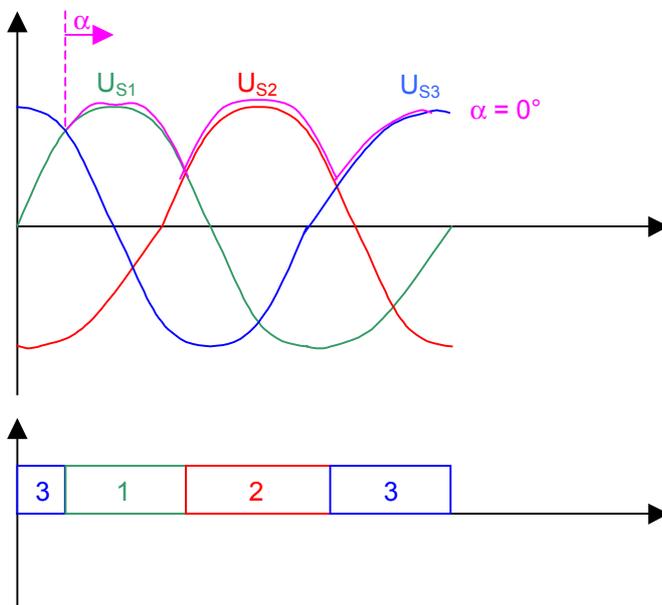
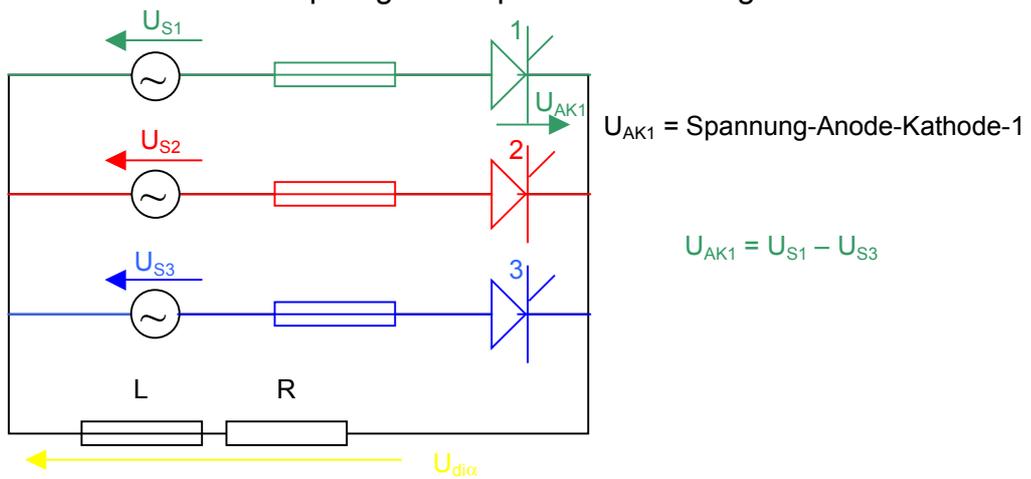


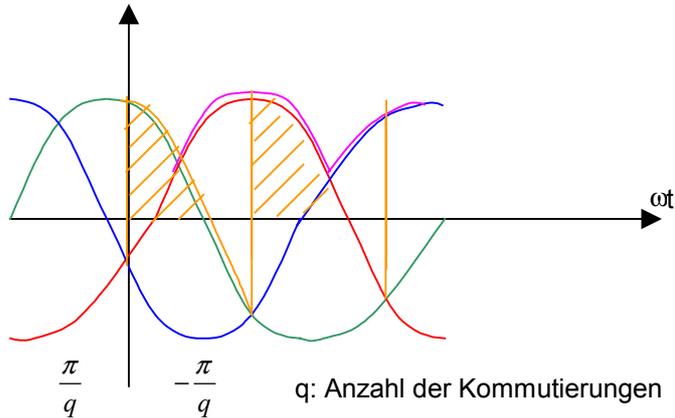
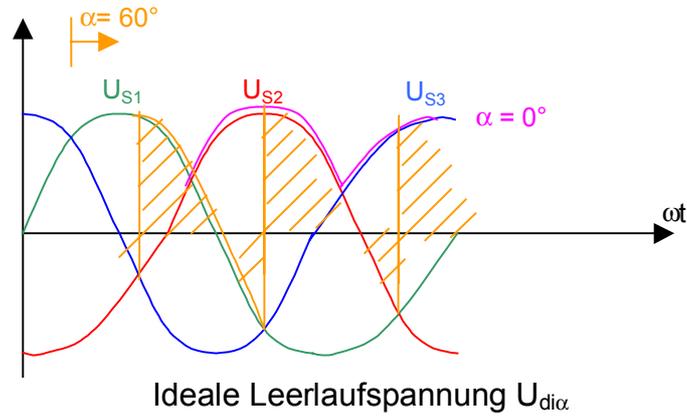
Zweipulsige Brückenschaltung





Dreipulsige Mittelpunkt – Schaltung





$$\begin{aligned}
 U_{di\alpha} &= \frac{1}{\frac{2 \cdot \pi}{q}} \cdot \int_{-\frac{\pi}{q}}^{\frac{\pi}{q} + \alpha} \sqrt{2} \cdot U_s \cdot \cos \omega t \cdot d\omega t = \frac{\sqrt{2}}{\frac{2 \cdot \pi}{q}} \cdot \sin \omega t \Big|_{-\frac{\pi}{q}}^{\frac{\pi}{q} + \alpha} \\
 &= \frac{\sqrt{2}}{\frac{2 \cdot \pi}{q}} \cdot U_s \cdot \left[\sin \left(\frac{\pi}{q} + \alpha \right) - \sin \left(-\frac{\pi}{q} + \alpha \right) \right] \\
 &= \frac{\sqrt{2}}{\frac{2 \cdot \pi}{q}} \cdot U_s \cdot \sin \frac{\pi}{q} \cdot \cos \alpha
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \sin(\alpha + \beta) &= \sin \alpha \cdot \cos \beta + \cos \alpha \cdot \sin \beta \\
 \sin(\alpha - \beta) &= \sin \alpha \cdot \cos \beta - \cos \alpha \cdot \sin \beta \\
 \sin(\alpha + \beta) + \sin(\alpha - \beta) &= 2 \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta
 \end{aligned}$$

Beispiel:
 $q = 3$

$$U_{di\alpha} = \frac{\sqrt{2}}{\frac{\pi}{3}} \cdot U_s \cdot \sin \frac{\pi}{3} \cdot \cos \alpha = 1,17 U_s \cos \alpha$$

Allgemein

$$U_{\text{di}\alpha} = S \cdot \frac{\sqrt{2}}{\frac{\pi}{q}} \cdot U_s \cdot \sin \frac{\pi}{q} \cdot \cos \alpha$$

2.3. Ladegerät für 12 V-Autobatterie

$$U_{\text{di}\alpha} = 15\text{V}$$

2- pulsige Brückenschaltung mit $q = 2$ $s=2$ $\alpha = 0^\circ \rightarrow$ Dioden

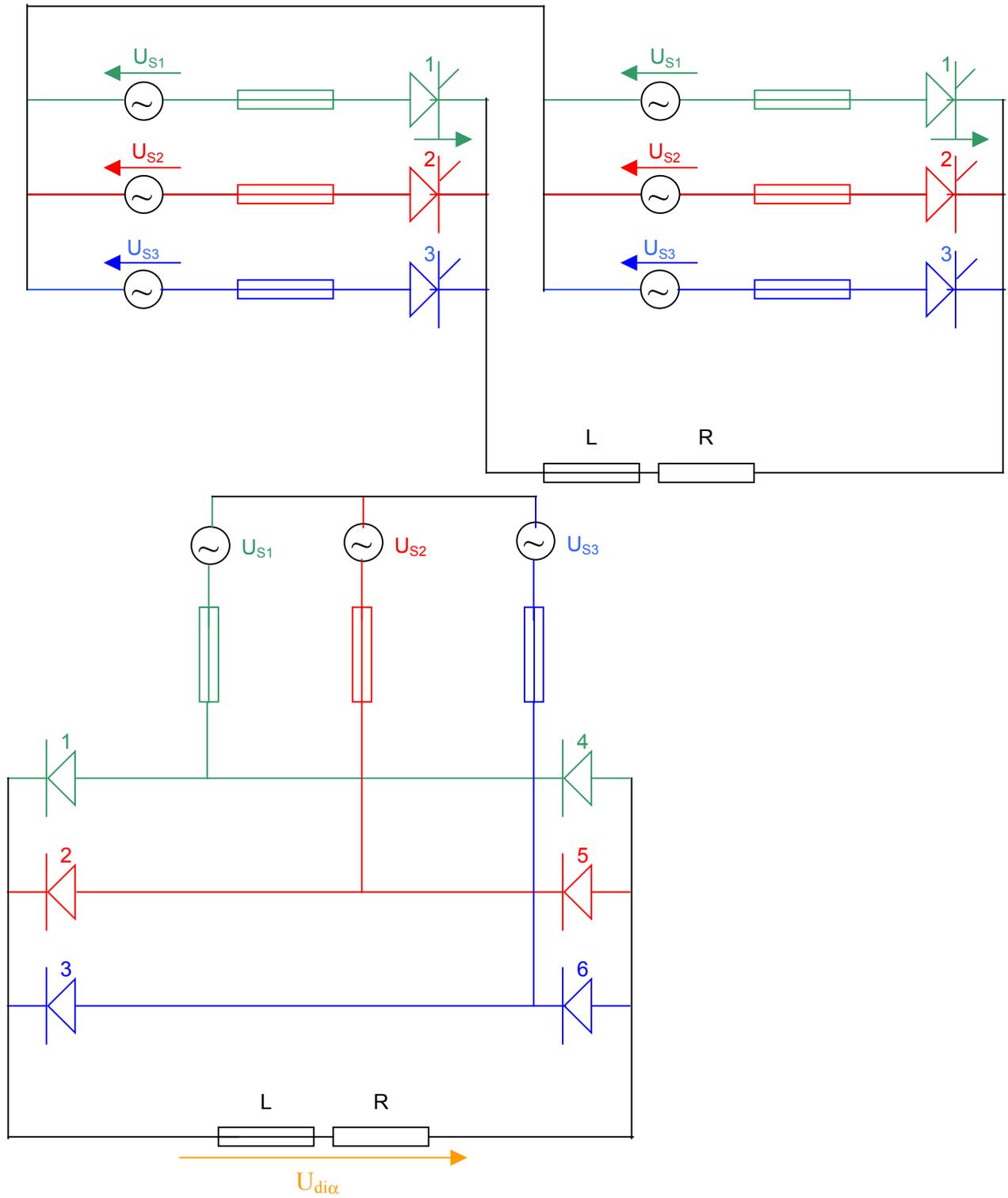
$$U_{\text{di}\alpha} = 2 \cdot \frac{\sqrt{2}}{\frac{\pi}{2}} \cdot U_s \cdot \sin \frac{\pi}{2} \cdot \cos \alpha$$

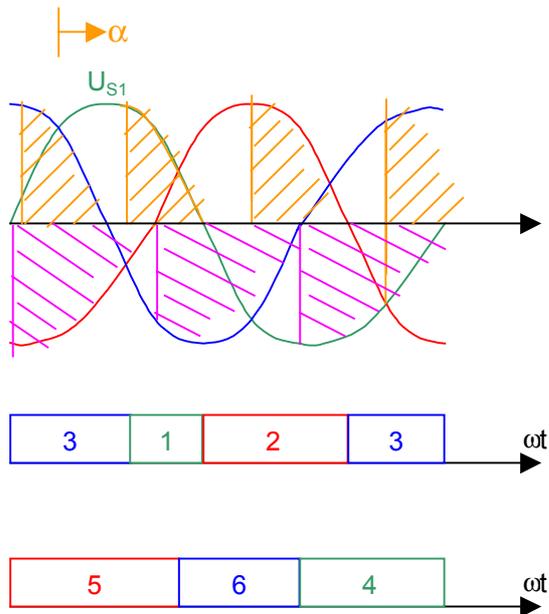
$$U_{\text{di}\alpha} = 1,8 \cdot U_s \cdot \cos \alpha$$

$$U_s = \frac{U_{\text{di}\alpha}}{1,8} = \frac{15\text{V}}{1,8} = 8,3\text{V}$$

Bei einer Spannungsquelle 16,6 V

2.4. Drehstrom – Brückenschaltung





$30^\circ \leq \omega t \leq 90^\circ$	$U_{S1} - U_{S2}$
$90^\circ \leq \omega t \leq 150^\circ$	$U_{S1} - U_{S2}$
$150^\circ \leq \omega t \leq 210^\circ$	$U_{S1} - U_{S2}$
$210^\circ \leq \omega t \leq 270^\circ$	$U_{S1} - U_{S2}$
$270^\circ \leq \omega t \leq 330^\circ$	$U_{S1} - U_{S2}$
$330^\circ \leq \omega t \leq 30^\circ$	$U_{S1} - U_{S2}$

Beispiel:

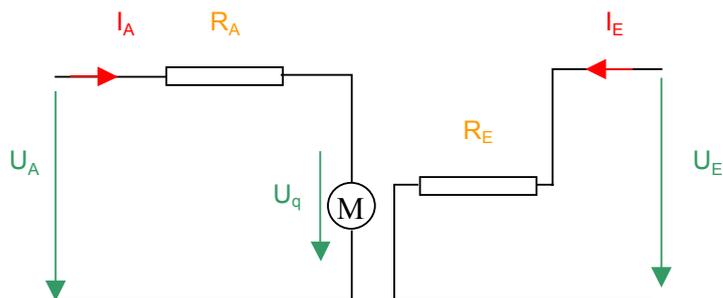
Kompensierter, fremderregter Gleichstrommotor

$$U_{AN} = 440 \text{ V} \quad I_{AN} = 250 \text{ A} \quad R_A = 160 \text{ m}\Omega$$

$$n_N = 1600 \frac{1}{\text{min}} \quad U_{EN} = 250 \text{ V} \quad I_{EN} = 5 \text{ A}$$

Drehstrombrücke DB6 $U_S = 230 \text{ V}$

1. Leerlaufdrehzahl und Steuerwinkel α



$$U_{qN} = U_{AN} - R_A \cdot I_{AN} = 440 \text{ V} - 0,16 \Omega \cdot 250 \text{ A} = 400 \text{ V}$$

$$U_q = c \cdot \phi \cdot n$$

$$c \cdot \phi_N = \frac{U_{qN}}{n_N} = \frac{400 \text{ V}}{\frac{1600}{60} \frac{1}{\text{sec}}} = 15 \text{ V sec}$$

Leerlauf:

$$U_{q0} = U_{AN}$$

$$n_0 = \frac{U_{q0}}{c \cdot \phi_N} = \frac{440 \text{ V}}{15 \text{ V sec}} = 29,3 \frac{1}{\text{sec}} \hat{=} 1760 \frac{1}{\text{min}}$$

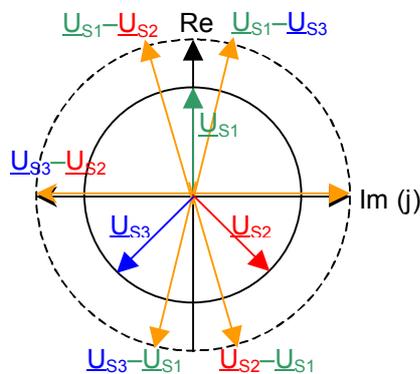
allgemein:

$$U_{S1} = \sqrt{2} \cdot U_S \cdot \cos \omega t$$

$$U_{S2} = \sqrt{2} \cdot U_S \cdot \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{q} \right)$$

$$U_{S3} = \sqrt{2} \cdot U_S \cdot \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{q} \right)$$

$$U_{1,2} = U_{S1} - U_{S2} = \sqrt{2} \cdot U_S \cdot [\cos \omega t - \cos(\omega t - 120^\circ)]$$



$$\begin{aligned} \underline{U}_{S1} - \underline{U}_{S2} &= U \cdot e^{j0^\circ} - U \cdot e^{-j120^\circ} \\ &= U \cdot \left(1 - \left(-\frac{1}{2} - j \frac{1}{2} \cdot \sqrt{3} \right) \right) \\ &= U \cdot \left(\frac{3}{2} - j \frac{1}{2} \cdot \sqrt{3} \right) \\ &= \sqrt{3} \cdot U_S \cdot e^{j30^\circ} \end{aligned}$$

$$\underline{U}_{S1} = U_S \cdot e^{j0^\circ}$$

$$\underline{U}_{S2} = U_S \cdot e^{-j120^\circ}$$

$$\underline{U}_{S3} = U_S \cdot e^{-j140^\circ}$$

$$\begin{aligned}\underline{U}_{S1} - \underline{U}_{S2} &= U_S \cdot (e^{j0^\circ} - U \cdot e^{-j120^\circ}) = U_S \cdot \left[1 - \left(-\frac{1}{2} - j\frac{1}{2} \cdot \sqrt{3} \right) \right] \\ &= U_S \cdot \left(\frac{3}{2} - j\frac{1}{2} \cdot \sqrt{3} \right) \\ &= \sqrt{3} \cdot U_S \cdot e^{-j30^\circ}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}U_{di\alpha} &= \frac{s \cdot \sqrt{2} \cdot U_S}{\frac{\pi}{q}} \cdot \sin \frac{\pi}{q} \cdot \cos \alpha \\ &= \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot 230 \text{ V}}{\frac{\pi}{3}} \cdot \sin \frac{\pi}{3} \cdot \cos \alpha \\ &= 538 \text{ V} \cdot \cos \alpha\end{aligned}$$

$$\cos \alpha = \frac{U_{di\alpha}}{U_{di0}} = \frac{440 \text{ V}}{538 \text{ V}} = 0,817$$

$$\alpha_0 = 35,1^\circ$$

Der Erregerkreis wird aus einer zweispuligen Brückenschaltung gespeist.

$$U_S = 230 \text{ V} \quad \alpha = ?$$

$$U_{di\alpha} = \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot 230 \text{ V}}{\frac{\pi}{2}} \cdot \sin \frac{\pi}{2} \cdot \cos \alpha = 414,6 \text{ V}$$

$$\cos \alpha = \frac{U_{di\alpha}}{U_{di0}} = \frac{250 \text{ V}}{414,6 \text{ V}} = 0,603$$

$$\alpha = 53^\circ$$

$$\alpha_0 = 35,1^\circ$$

2. Welche Spannung ist an den Ankerkreis zu legen, um bei Ankernennstrom eine Drehzahl von $n=1760 \text{ 1/min}$ zu erreichen?

$$U_{A2} = U_{q0} + R_A \cdot I_{AN} = 440 \text{ V} + 0,16 \Omega \cdot 250 \text{ A} = 480 \text{ V}$$

3. Welche Erregerspannung und welcher Erregerstrom sind einzustellen, um bei Ankernennspannung und Ankernennstrom eine Drehzahl $n=1760 \text{ 1/min}$ zu erreichen?

$$U_{q3} = 400 \text{ V} = c \cdot \phi_3 \cdot n_3$$

$$c \cdot \phi_3 = \frac{U_{q3}}{n_3} = \frac{400 \text{ V}}{\frac{1760}{60} \frac{1}{\text{sec}}} = 13,636 \text{ V sec}$$

$$\frac{\phi_3}{\phi_N} = \frac{13,636 \text{ V sec}}{15 \text{ V sec}} = 0,91$$

aus Magnetisierungs – Kennlinie

$$\frac{I_{E3}}{I_E} = 0,84$$

$$U_{E3} = 210 \text{ V}$$

4. Wie groß sind Leerlauf- und Vollastdrehzahl bei $U_{A4} = 200 \text{ V}$ und $I_{E4} = 3,5 \text{ A}$?

$$\frac{I_{E3}}{I_{EN}} = \frac{3,5 \text{ A}}{5 \text{ A}} = 0,7$$

aus Magnetisierungs – Kennlinie

$$\frac{c \cdot \phi_4}{c \cdot \phi_N} = 0,81$$

Leerlauf:

$$U_{q4} = 200 \text{ V}$$

$$n_{04} = \frac{U_{q04}}{c \cdot \phi_4} = \frac{200 \text{ V}}{15 \text{ V sec} \cdot 0,81} = 987 \frac{1}{\text{min}}$$

Vollast:

$$I_{A4} = 250 \text{ A} \quad U_{q4} = 160 \text{ V}$$

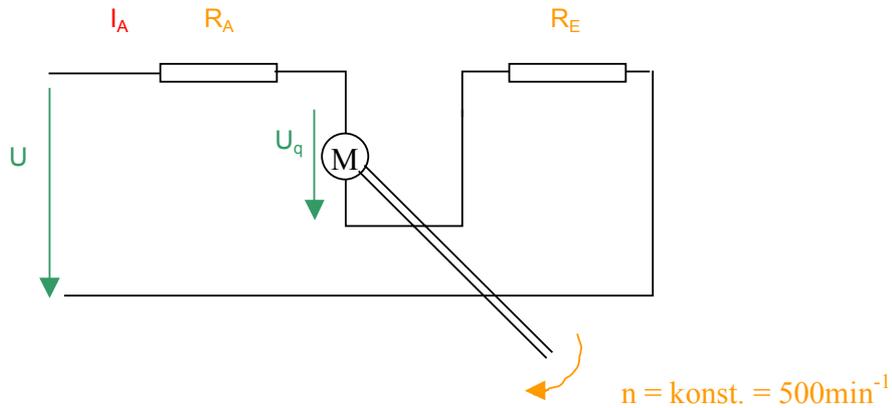
$$n_4 = \frac{U_{q4}}{c \cdot \phi_4} = \frac{160 \text{ V}}{15 \text{ V sec} \cdot 0,84} = 762 \frac{1}{\text{min}}$$

2.5.Reihenschlussmotor

$$U_N = 250 \text{ V} \quad R_A + R_E = 1,2 \Omega$$

Die folgende Magnetisierungskennlinie wurde im motorischen Betrieb bei konstanter Drehzahl $n = 500 \text{ min}^{-1}$ und variabler Speiserspannung U aufgenommen.

- Bestimmen Sie $M_M = f(n)$ und $P_{\text{mech}} = f(n)$
- Wie groß ist Moment M und die mechanische Leistung P_{mech} bei $n = 600 \text{ min}^{-1}$



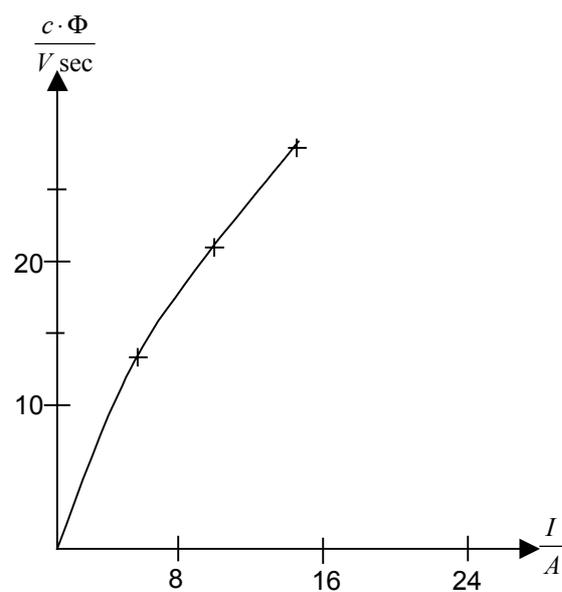
U/V	114	164	209	237	259	278
I/A	8	12	16	20	24	28
U_q /V	104,4	149,6	185,8	213	230,2	244,4
$c \cdot \phi$ / Vs	12,5	17,95	22,3	25,6	27,6	29,3
U_{q250} /V	240,4	235,6	230,8	226	221	216
n_{250}/min^{-1}	1157	787	621	530	481	443
M/Nm	16	34,3	56,8	81,4	105,4	130,6
P_{mech} /kW	1,923	2,83	3,69	4,52	5,3	6,0

$$U_q = U - (R_A + R_E) \cdot I$$

$$U_q = U - 1,2\Omega \cdot I$$

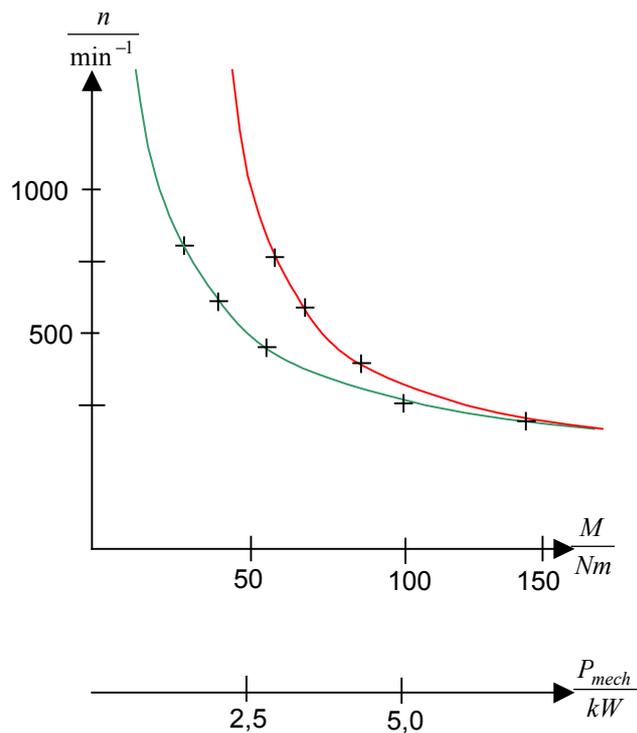
$$U_q = c \cdot \phi \cdot n$$

$$c \cdot \phi = \frac{U_q}{n_{500}}$$



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

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



2.

$$n = 600 \text{ min}^{-1}$$

$$M_{600} = 60 \text{ Nm}$$

$$P_{mech600} = 3,8 \text{ kW}$$

$$\text{Wirkungsgrad } \eta = \frac{P_{Mech}}{P_{zu}} \quad \eta = \frac{6 \text{ kW}}{U_N \cdot I} \quad \eta = 0,86$$

3.

Wie groß ist der Vorwiderstand R_V zu wählen, um das Anlaufmoment M_A auf 120 Nm zu begrenzen?

$$\frac{28 \text{ A} - 24 \text{ A}}{130,6 \text{ Nm} - 105,5 \text{ A}} = 0,158 \frac{\text{A}}{\text{Nm}}$$

$$14,6 \text{ Nm} \cdot 0,158 \frac{\text{A}}{\text{Nm}} = 23 \text{ A}$$

$$I = 26,3 \text{ A}$$

$$\frac{U}{I} = R_A + R_E + R_V = \frac{250 \text{ V}}{26,3 \text{ A}} = 9,5 \Omega$$

$$R_V = 8,3 \Omega$$

Gesucht: Drehzahl für $I = 1 \text{ A}$ und $U = 250 \text{ V}$

$$U_{q1,0} = 16 \text{ V}$$

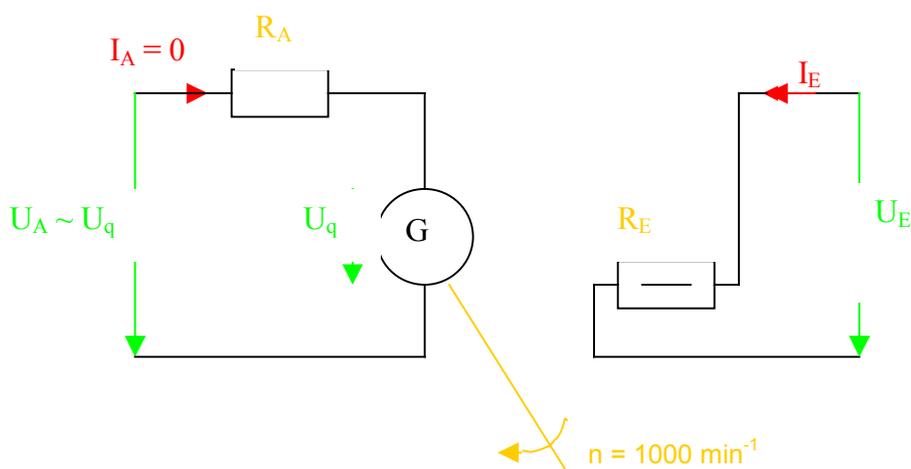
$$c \cdot \phi_{1,0} = \frac{U_{q1,0}}{n} = \frac{16 \text{ V}}{16,66} = 0,96 \text{ Vs}$$

$$U_q = U - (R_A + R_E) \cdot I = 250 \text{ V} - 0,5 \Omega \cdot 1 \text{ A} = 249,9 \text{ V}$$

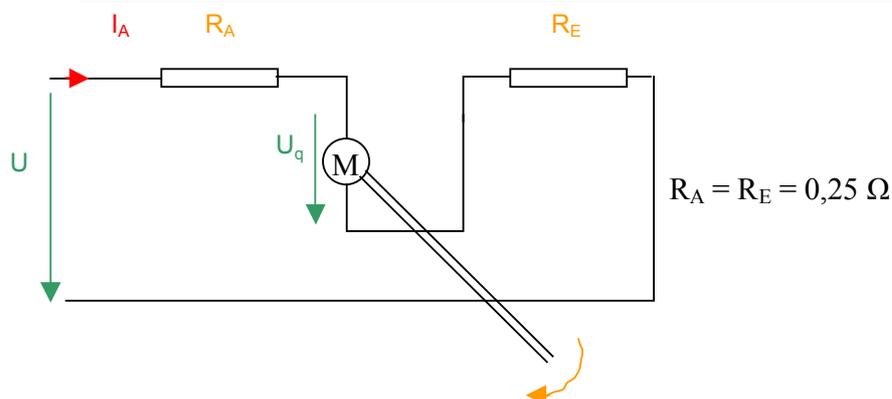
$$n = \frac{U_q}{c \cdot \phi_{1,0}} = \frac{249,5 \text{ V}}{0,96 \text{ Vs}}$$

2.6. Gleichstrom - Reihenschlussmotor

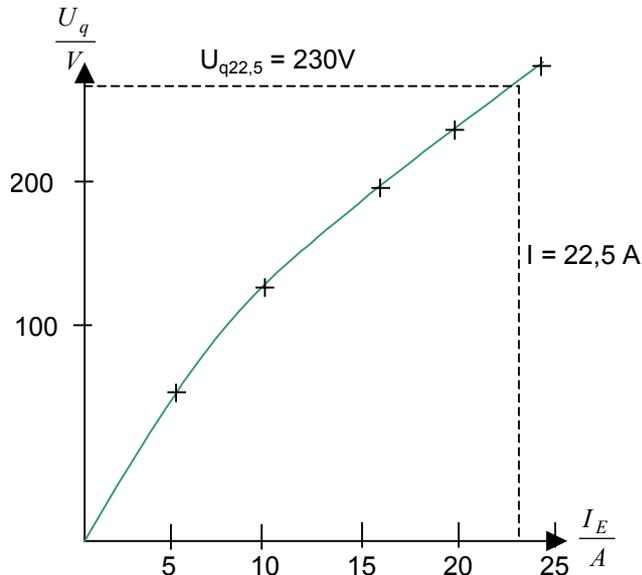
Bei einer Drehzahl $n = 1000 \text{ min}^{-1}$ wird folgende Leerlauf - Kennlinie aufgenommen



I_E/A	5	10	15	20	25	30
U_q/V	80	160	22	222	236	244



Anschließend wird die ursprüngliche Reihenschlussmotor - Schaltung wieder hergestellt. Bestimmen Sie die Drehzahl n bei $I = 22,5 \text{ A}$ und $U = 200 \text{ V}$



$$c \cdot \phi_{22,5} = \frac{U_{q22,5}}{n} = \frac{230 \text{ V}}{16,66 \text{ s}^{-1}} = 13,8$$

$$U_q = U - (R_A + R_E) \cdot I = 200 \text{ V} - 0,5 \Omega \cdot 22,5 \text{ A} - 188,75$$

$$n = \frac{U_q}{c \cdot \phi_{22,5}} = \frac{188,75 \text{ V}}{13,8 \text{ Vs}} = 6,4 \text{ s}^{-1} = 821 \text{ min}^{-1}$$

2) $U = 250 \text{ V}$ $I = 15 \text{ A}$ $n = ?$

$$U_q = U - (R_A + R_E) \cdot I = 250 \text{ V} - 0,5 \Omega \cdot 15 \text{ A} = 242,5$$

$$c \cdot \phi_{15} = \frac{U_{q15}}{n} = \frac{202}{16,66} = 12,1 \text{ Vs}$$

$$n = \frac{U_{q250}}{c \cdot \phi_{15}} = \frac{242,5}{12,1} = 19,8 \text{ s}^{-1} = 1191 \text{ min}^{-1}$$

$$\text{Drehmoment } M = \frac{c \cdot \phi_{15}}{2 \cdot \pi \cdot I} = \frac{12,1 \text{ Vs}}{2 \cdot \pi \cdot 15 \text{ A}} = 28,9 \text{ Nm}$$

Gesucht: Drehzahl für $I = 1 \text{ A}$ und $U = 250 \text{ V}$

$$U_{q1,0} = 16 \text{ V}$$

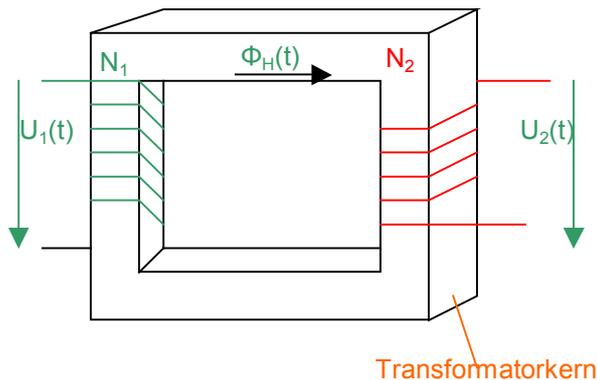
$$c \cdot \phi_{1,0} = \frac{U_{q1,0}}{n} = \frac{16 \text{ V}}{16,66} = 0,96 \text{ Vs}$$

$$U_q = U - (R_A + R_E) \cdot I = 250 \text{ V} - 0,5 \Omega \cdot 1 \text{ A} = 249,9 \text{ V}$$

$$n = \frac{U_q}{c \cdot \phi_{1,0}} = \frac{249,5 \text{ V}}{0,96 \text{ Vs}}$$

3. Transformatoren

3.1. Aufbau und prinzipielle Wirkungsweise



Transformator Kern:
Dynamoblech, Dicke 0,1 - 0,3mm
Bleche sind über Oxidschicht gegeneinander isoliert

Induktionsgesetz:

$$U_1(t) = N_1 \cdot \frac{d\phi_H(t)}{dt}$$

$$U_2(t) = N_2 \cdot \frac{d\phi_H(t)}{dt}$$

$$\frac{U_1(t)}{U_2(t)} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$U_1(t) \cdot i_1(t) = U_2(t) \cdot i_2(t)$$

$$\frac{i_1(t)}{i_2(t)} = \frac{U_2(t)}{U_1(t)} = \frac{N_2}{N_1}$$

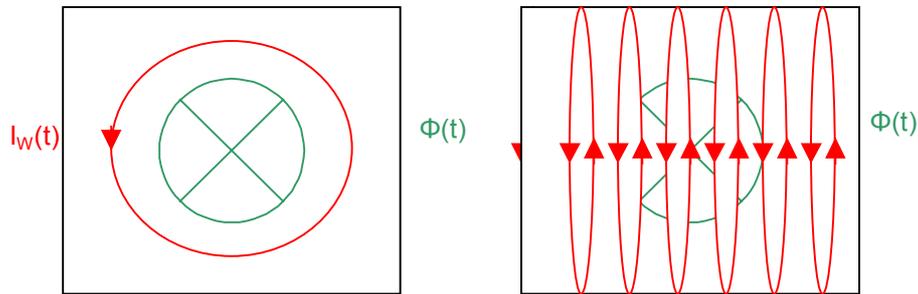
Die Spannungen verhalten sich wie die Windungszahlen, die Ströme umgekehrt wie die Windungszahlen.

3.2. Realer Transformator

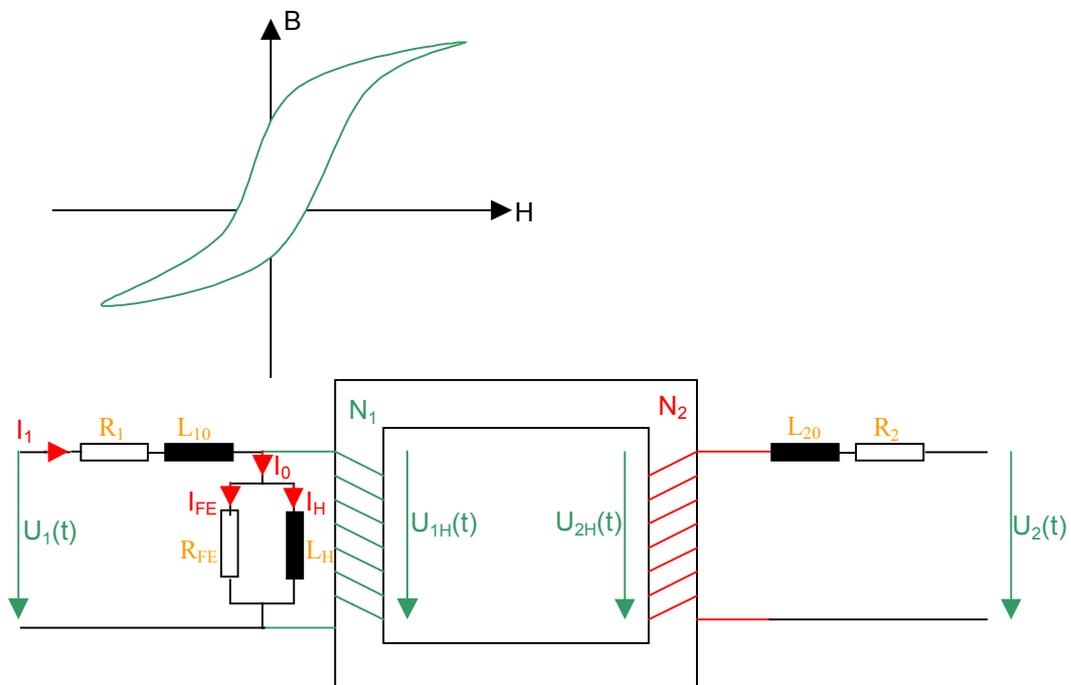
- Wicklungswiderstand der Primär- und Sekundärwicklung R_1 und R_2
- Magnetische Streuflüsse $\phi_{1\sigma}$ und $\phi_{2\sigma}$

$$U_{\sigma} = N \cdot \frac{d\phi_{\sigma}}{dt} = L_{\sigma} \cdot \frac{di}{dt}$$

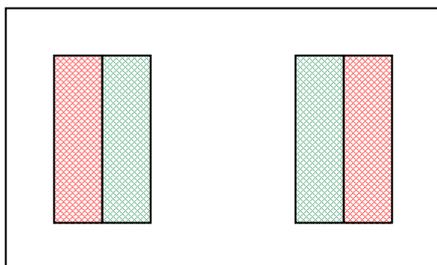
- Magnetisierungsstrom $i_M(t)$ wird benötigt, um das magnetische Feld im Eisen aufzubauen
- Eisenverluste: Wirbelstrom- und Hystereseverluste

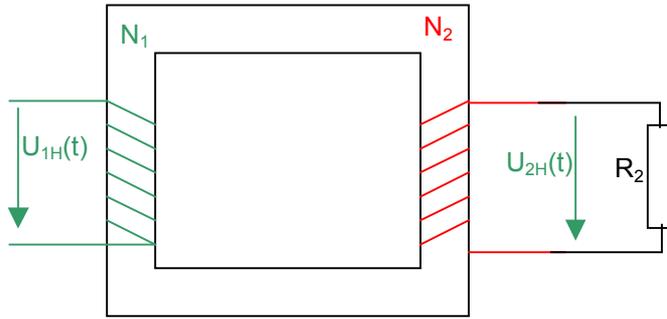


Durch Brechung des Eisenquerschnittes wird der ohmsche Widerstand erhöht und damit die Wirbelströme verringert.



$$U_H(t) = N \cdot \frac{d\phi_H}{dt} = L_H \cdot \frac{di_H}{dt}$$





$$\frac{i_1(t)}{i_2(t)} = \frac{N_2}{N_1} \quad i_1(t) = \frac{N_2}{N_1} \cdot i_2(t)$$

$$\frac{U_{1H}(t)}{U_{2H}(t)} = \frac{N_1}{N_2} \quad U_{1H}(t) = \frac{N_1}{N_2} \cdot U_{2H}(t)$$

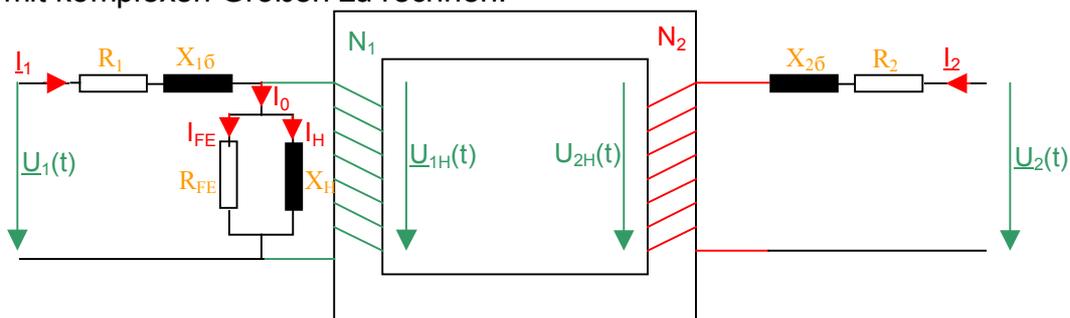
$$R_2' = \frac{U_{1H}(t)}{i_1(t)} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \cdot \frac{U_{2H}(t)}{i_2(t)} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \cdot R_2$$

Beispiel:

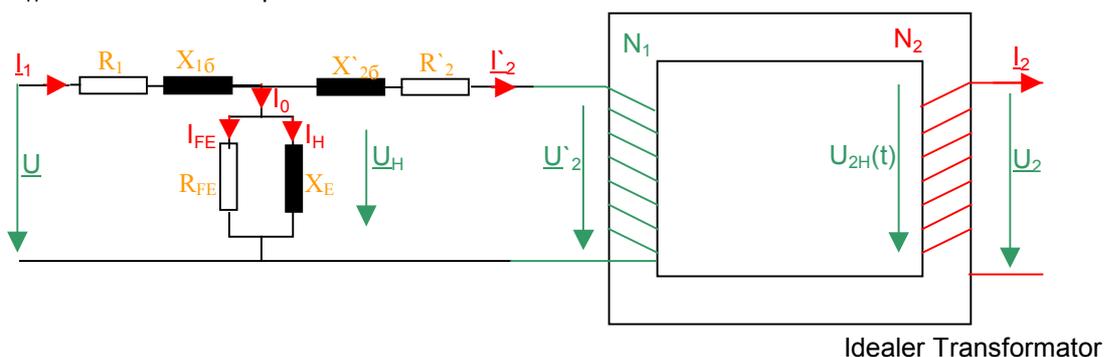
$$\frac{U}{I} = \frac{230 \text{ V}}{16 \text{ A}} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \cdot R_2 = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \cdot 1 \Omega$$

$$\frac{N_1}{N_2} = \sqrt{\frac{230 \text{ V}}{16 \text{ A} \cdot 1 \Omega}} = 3,8$$

Bei sinusförmigen Spannungen ist es üblich nicht mit Augenblickswerten, sondern mit komplexen Größen zu rechnen.



X_{10}, X_{16} : Streureaktanz
 X_H : Hauptreaktanz



Idealer Transformator

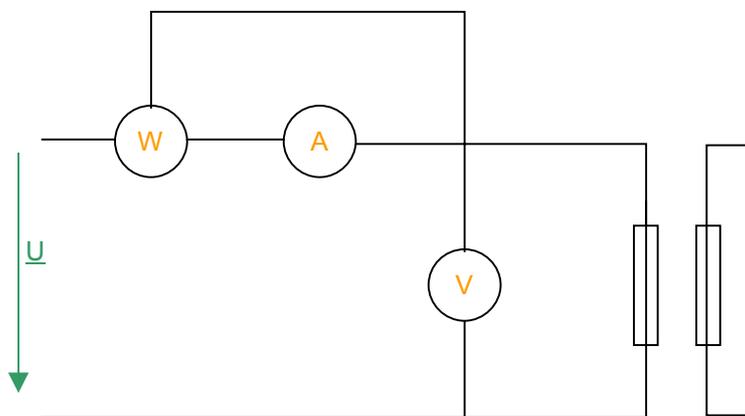
$$X_{2\sigma}' = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \cdot X_{2\sigma}$$

$$R_2' = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \cdot R_2$$

$$U_2' = \frac{N_1}{N_2} \cdot U_2$$

Bestimmen der Parameter des Ersatzschaltbildes

Leerlauf – Versuch:

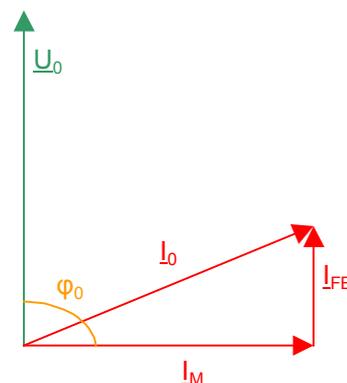
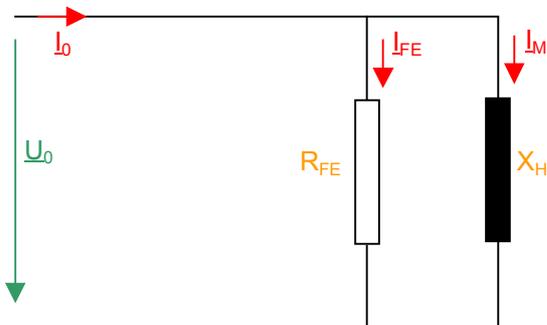


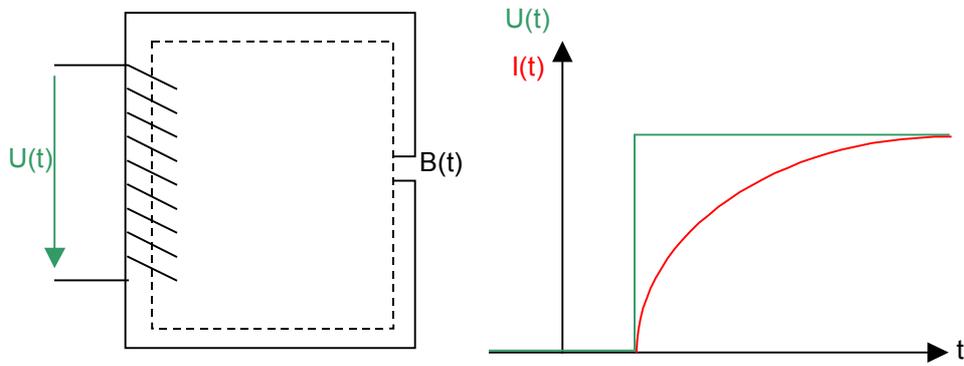
Gemessen werden:

- Aufgenommene Wirkleistung P_0
- Leerlaufstrom I_0
- Spannung U_0

Im Leerlauf – Versuch werden die Spannungsabfälle über den Widerstand R_1 der Primärwicklung und der Streureaktanz $X_{1\sigma}$ vernachlässigt.

$$X_H \gg R_1 \cdot X_{1\sigma}; R_{FE} \gg R_1 \cdot X_{1\sigma}$$





$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{U_0 \cdot I_0}$$

Wirkleistung $P_0 = \text{Spannung } U_0 + \text{Wirkstrom } I_0 \cos \varphi_0$

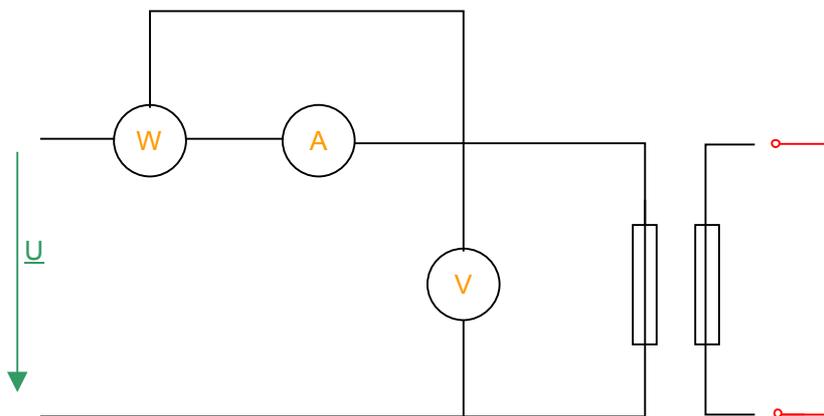
$$I_{FE} = I_0 \cdot \cos \varphi_0$$

$$R_{FE} = \frac{U_0}{I_{FE}} = \frac{U_0}{I_0 \cdot \cos \varphi_0}$$

$$I_M = I_0 \cdot \sin \varphi_0$$

$$X_H = \frac{U_0}{I_M} = \frac{U_0}{I_0 \cdot \sin \varphi_0}$$

Kurzschluss – Versuch

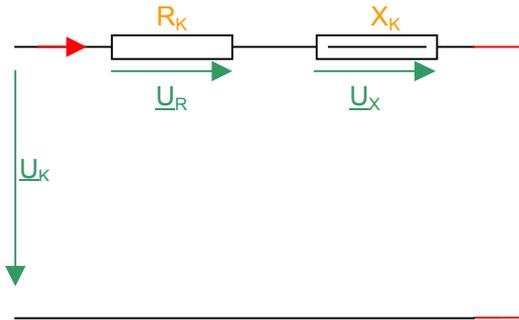


Die Kurzschluss – Spannung wird so gewählt, dass möglichst der Nennstrom I_N fließt.

Gemessen werden:

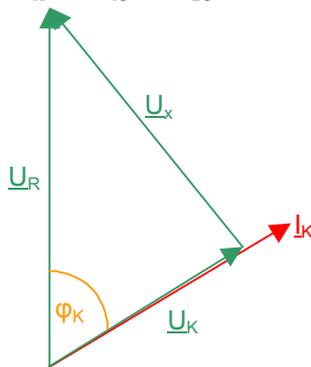
- Aufgenommene Wirkleistung P_K
- Kurzschluss - Strom I_K
- Kurzschluss - Spannung U_K

Im Kurzschluss – Versuch wird der Querzweig R_{FE} II X_H gegenüber dem Längsweg $R_1, R_2, X_{1\sigma}, X_{2\sigma}$ vernachlässigt.



$$R_K = R_1 + R_2'$$

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



$$P_K = U_K \cdot I_K \cdot \cos \varphi_K$$

$$\cos \varphi_K = \frac{P_K}{U_K \cdot I_K}$$

$$U_R = U_K \cdot \cos \varphi_K$$

$$R_K = \frac{U_R}{I_K} = \frac{U_K \cdot \cos \varphi_K}{I_K}$$

$$U_X = U_K \cdot \sin \varphi_K$$

$$X_K = \frac{U_X}{I_K} = \frac{U_K \cdot \sin \varphi_K}{I_K}$$

Relative Kurzschluss – Spannung

$$U_K = \frac{U_{KN}}{U_N} \cdot 100\%$$

Kurzschluss – Dauerstrom I_{Kd}

$$I_{Kd} = \frac{U_N}{Z_K}$$

$$I_{KN} = \frac{U_{KN}}{Z_K}$$

$$Z_K = \sqrt{R_K^2 + X_K^2}$$

$$\frac{I_{Kd}}{I_{KN}} = \frac{U_N}{U_{KN}} \cdot \frac{100\%}{U_K[\%]}$$

$$U_{KN} = \frac{U_K[\%] \cdot U_N}{100\%}$$

Beispiel:

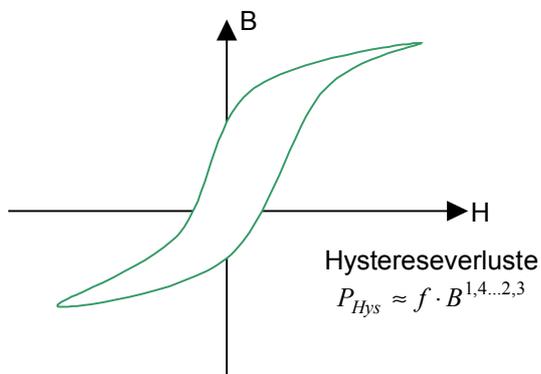
$$U_K = 5\% \quad \frac{I_{Kd}}{I_{KN}} = 20$$

$$U_K = 12\% \quad \frac{I_{Kd}}{I_{KN}} = 8,33$$

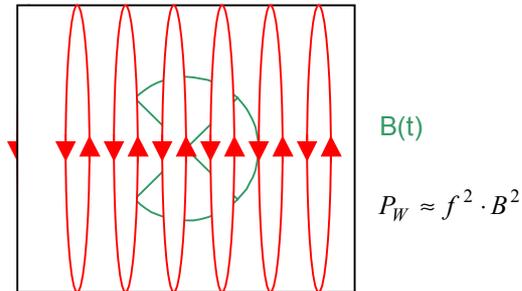
Verlust und Wirkungsgrad

Leerlauf – Verlust P_0

Hysterese - Verluste:



Wirbelstrom – Verluste:



Eisen – Verluste:

$$P_0 = P_{FE} = P_{Hys} - P_W$$

Stromwärme – Verluste:

$$P_K = R_K \cdot I^2$$

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} = \frac{P_{zu} - P_0 - P_K}{P_{zu}}$$

$$\eta = \frac{U \cdot I \cdot \cos \varphi - P_0 - P_K}{U \cdot I \cdot \cos \varphi} = 1 - \frac{P_0}{U \cdot I \cdot \cos \varphi} - \frac{R_K \cdot I}{U \cdot \cos \varphi}$$

Maximaler Wirkungsgrad:

$$\frac{d\eta}{dI} = \frac{P_0}{U \cdot I^2 \cdot \cos \varphi} - \frac{R_K}{U \cdot \cos \varphi} = 0$$

$$R_K \cdot I = P_0$$

$$U_H = N \cdot \frac{d\phi}{dt} = N \cdot A \cdot \frac{dB}{dt}$$

Aufgabe:

Einphasen – Transformator

$$S_N = 10 \text{ kVA} \quad U_{1N} = 6 \text{ kV} \quad U_{2N} = 230 \text{ V}$$

Leerlauf – Versuch:

$$U_{20} = 250 \text{ V} \quad I_{20} = 0,45 \text{ A} \quad P_{20} = 70 \text{ W}$$

Kurzschluss – Versuch:

$$U_{1K} = 120 \text{ V} \quad I_{1K} = 4,5 \text{ A} \quad P_{1K} = 240 \text{ W}$$

1. ESB (Ersatzschaltbild) primärseitig
2. Verhältnis Magnetisierungsstrom I_M zu Nennstrom I_N
3. Strom I , bei dem der Wirkungsgrad η maximal wird
4. Berechnen Sie den Wirkungsgrad η bei diesem Strom und $\cos \varphi = 0,85$

Lösung:

1.

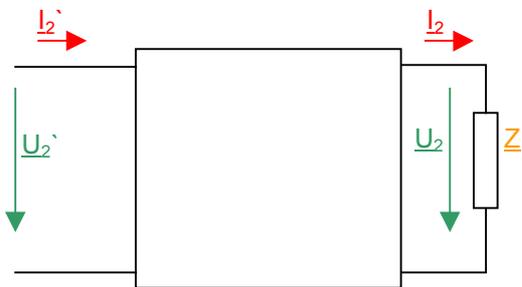
$$\cos \varphi_0 = \frac{P_{20}}{U_{20} \cdot I_{20}} = \frac{70 \text{ W}}{230 \text{ V} \cdot 0,45 \text{ A}} = 0,676$$

$$\sin \varphi_0 = 0,737$$

$$I_{2FE} = I_{20} \cdot \cos \varphi_0 = 0,45 \text{ A} \cdot 0,676 = 0,304 \text{ A}$$

$$R_{2FE} = \frac{U_{20}}{I_{2FE}} = \frac{230 \text{ V}}{0,304 \text{ A}} = 756 \Omega$$

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{U_{1N}}{U_{2N}} = \frac{6000 \text{ V}}{230 \text{ V}} = 26$$



$$U_2' = \frac{N_{1N}}{N_{2N}} \cdot U_2 \quad I_2' = \frac{N_2}{N_1} \cdot I_2$$

$$\underline{Z}' = \frac{U_2'}{I_2'} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \cdot \frac{U_2}{I_2}$$

$$R_{FE} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \cdot R_{2FE} = 26^2 \cdot 756 \Omega = 511 \text{ k}\Omega$$

$$I_M = I_{10} \cdot \sin \varphi$$

Entweder:

$$I_{10} = \frac{N_2}{N_1} \cdot I_{20} = \frac{1}{26} \cdot 0,45 \text{ A} = 0,01731$$

$$I_M = 0,01731 \text{ A} \cdot 0,737 = 0,013 \text{ A}$$

$$X_H = \frac{U_{1N}}{I_M} = \frac{6000 \text{ V}}{0,013 \text{ A}} = 469 \text{ k}\Omega$$

oder:

$$I_{2M} = I_{20} \cdot \sin \varphi_0 = 0,45 \text{ A} \cdot 0,737 \\ = 0,33 \text{ A}$$

$$X_{2H} = \frac{U_{20}}{I_{2M}} = \frac{230 \text{ V}}{0,33 \text{ A}} = 694 \Omega$$

$$X_H = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \cdot X_{2H} = 26^2 \cdot 694 \Omega = 469 \text{ k}\Omega$$

$$\cos \varphi_K = \frac{P_K}{U_K \cdot I_K} = \frac{240 \text{ W}}{120 \text{ V} \cdot 4,5 \text{ A}} = 0,44$$

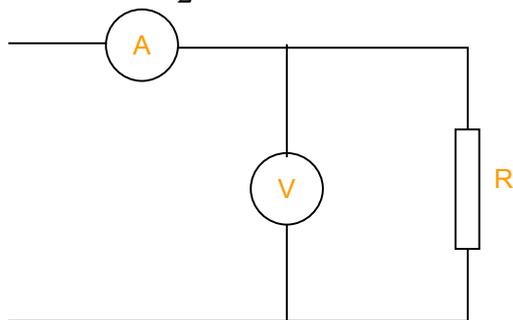
$$U_R = U_K \cdot \cos \varphi_K = 120 \text{ V} \cdot 0,44 = 52,8 \text{ V}$$

$$R_K = \frac{U_R}{I_K} = \frac{52,8 \text{ V}}{4,5 \text{ A}} = 11,7 \Omega$$

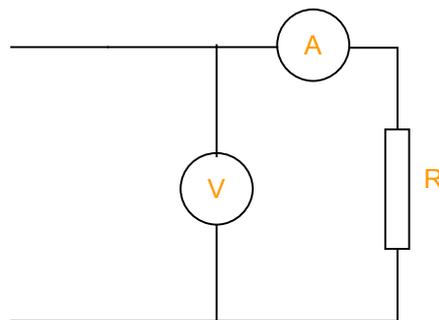
$$U_X = U_K \cdot \sin \varphi_K = 120 \text{ V} \cdot 0,898 = 107,8 \text{ V}$$

$$X_K = \frac{U_X}{I_K} = \frac{107,8 \text{ V}}{4,5 \text{ A}} = 23,96 \Omega$$

$$X_{1\sigma} = X'_{2\sigma} = \frac{X_K}{2}$$



Klein
Spannungsrichtig



groß
Stromrichtig

$$R_1 = R_2 = \frac{R_K}{2}$$

2.

$$\frac{I_M}{I_N} = \frac{0,013 \text{ A}}{1,667 \text{ A}} = 7,8 \cdot 10^{-3} \approx 0,8 \%$$

$$S_N = U_{1N} \cdot I_{1N}$$

$$I_{1M} = \frac{S_N}{U_{1N}} = \frac{10 \text{ kVA}}{6 \text{ kV}} = 1,667 \text{ A}$$

$$I_M = I_{2M} \cdot \frac{1}{\frac{N_1}{N_2}} = \frac{0,33 \text{ A}}{26} = 0,013 \text{ A}$$

3.

$$\eta = 1 - \frac{P_0}{U \cdot I \cdot \cos \varphi} - \frac{R_K \cdot I}{U \cdot \cos \varphi}$$

$$\frac{d\eta}{dI} = \frac{P_0}{U \cdot I^2 \cdot \cos \varphi} - \frac{R_K}{U \cdot \cos \varphi} = 0$$

$$P_0 = R_K \cdot I^2$$

$$I = \sqrt{\frac{P_0}{R_K}} = \sqrt{\frac{70 \text{ W}}{11,7 \Omega}} = 2,45 \text{ A}$$

4.

$$\begin{aligned} \eta &= 1 - \frac{P_0}{U \cdot I \cdot \cos \varphi} - \frac{R_K \cdot I}{U \cdot \cos \varphi} \\ &= 1 - \frac{70 \text{ W}}{6000 \text{ V} \cdot 2,45 \text{ A} \cdot 0,85} - \frac{11,7 \Omega \cdot 2,45 \text{ A}}{6000 \text{ V} \cdot 0,85} \\ &= 98,9 \% \end{aligned}$$

Ausgangsspannung in Abhängigkeit von der Belastung

Zeichnung

$$\underline{U}_{1N} = \underline{U}_R + \underline{U}_X + \underline{U}_2'$$

$$\underline{U}_2' = \underline{U}_{1N} - \underline{U}_R - \underline{U}_X$$

Zeichnung

$$Z_L = R_L + jxL \quad \text{ohmsch-induktive Belastung}$$

Zeichnung

$$Z_L = R_L - jxC \quad \text{ohmsch-kapazitive Belastung}$$

Zeichnung

$$Z_L = R_L \quad \text{ohmsche Belastung}$$

Die Ausgangsspannung \underline{U}_2 ist nicht nur abhängig vom Laststrom, sondern auch von der Lastart. Bei ohmsche-induktiver Belastung kommt es zu einer Spannungsabsenkung. Bei ohmsch-kapazitiver Belastung zu einer Spannungserhöhung.

Zeichnung

$$\underline{U}_2 \cos \varphi_L \quad ?? \quad \underline{U}_R$$

$$\underline{U}_2 \sin \varphi_L \quad ?? \quad \underline{U}_X$$

Zeichnung

$$(\underline{U}_2 \cos \varphi_L + \underline{U}_R)^2 + (\underline{U}_2 \sin \varphi_L - \underline{U}_X)^2 = U_{1N}^2$$

$$\underline{U}_2^2 \cos^2 \varphi_L + 2 \underline{U}_2 \cos \varphi_L \underline{U}_R + \underline{U}_R^2 + \underline{U}_2^2 \sin^2 \varphi_L - 2 \underline{U}_2 \underline{U}_X \sin \varphi_L + \underline{U}_X^2 = U_{1N}^2$$

$$\underline{U}_2^2 + 2 \underline{U}_2 (\underline{U}_R \cos \varphi_L - \underline{U}_X \sin \varphi_L) - (U_{1N}^2 - \underline{U}_R^2 - \underline{U}_X^2) = 0$$

$$\underline{U}_2 = -(\underline{U}_R \cos \varphi_L - \underline{U}_X \sin \varphi_L) \pm \sqrt{(\underline{U}_R \cos \varphi_L - \underline{U}_X \sin \varphi_L)^2 + U_{1N}^2 - \underline{U}_R^2 - \underline{U}_X^2}$$

Einphasen-Transformator

$$U_{1N} = 6,35 \text{ kV}$$

$$U_{2N} = 660 \text{ V}$$

$$S_N = 200 \text{ kVA}$$

$$R_1 = 1,56 \text{ } \Omega$$

$$R_2 = 0,016 \text{ } \Omega$$

$$X_{1\sigma} = 4,67 \text{ } \Omega$$

$$X_{2\sigma} = 0,048 \text{ } \Omega$$

Bestimmen Sie die Sekundärspannung U_2 bei Belastung mit Nennstrom und $\cos\varphi_L = 0,8$ induktiv bzw. kapazitiv.

$$S = U_{1N} \cdot I_{1N} \quad I_{1N} = \frac{S_N}{U_{1N}} = \frac{200 \text{ kVA}}{6,35 \text{ kV}} = 31,5 \text{ A}$$

$$\frac{U_{1N}}{U_{2N}} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{6350}{660} = 9,621$$

$$R_2' = R_2 \cdot \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 = 0,016 \Omega \cdot 9,621^2 = 1,48 \Omega$$

$$X_{2\sigma}' = X_{2\sigma} \cdot \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 = 0,048 \Omega \cdot 9,621^2 = 4,44 \Omega$$

$$R_x = R_1 + R_2' = 1,56 \Omega + 1,48 \Omega = 3,04 \Omega$$

$$X_k = X_{1\sigma} + X_{2\sigma}' = 4,67 \Omega + 4,44 \Omega = 9,11 \Omega$$

$$U_R = R_x \cdot I_N = 3,04 \Omega \cdot 31,5 \text{ A} = 95,8 \text{ V}$$

$$U_x = X_k \cdot I_N = 9,11 \Omega \cdot 31,5 \text{ A} = 287 \text{ V}$$

ohmsche Belastung: $\cos\omega_L = 1,0$ $\sin\omega_L = 0$

$$U_{2 \text{ } 1/2} = -(U_R \cdot \cos\varphi_L - U_x \cdot \sin\varphi_L) \pm \sqrt{(\sim) + (U_{1N}^2 - U_R^2 - U_x^2)}$$

$$U_{2 \text{ } 1/2} = -95,8 \text{ V} \cdot 1,0 \pm \sqrt{(95,8)^2 + (6350 \text{ V})^2 - (95,8 \text{ V})^2 - (287 \text{ V})^2}$$

$$U_{2 \text{ } 1/2} = 6247$$

$$U_2 = \frac{U_{2 \text{ } 1/2}}{\frac{N_1}{N_2}} = \frac{6247}{9,621} = 649 \text{ V}$$

ohmsch-induktiv: $\cos\omega_L = 0,8$ $\sin\omega_L = -0,6$

$$U_{2\ 1/2} = -(95,8V \cdot 0,8 - 287V(-0,6) \pm \sqrt{(\sim)^2 + (6350V)^2 - (95,8V)^2 - (287V)^2}$$

$$U_{2\ 1/2} = 6098V$$

$$U_2 = 633V$$

ohmsch-kapazitiv: $\cos\omega_L = 0,8$ $\sin\omega_L = +0,6$

$$U_{2\ 1/2} = -(95,8V \cdot 0,8 - 287V \cdot 0,6 \pm \sqrt{(\sim)^2 + (6350V)^2 - (95,8V)^2 - (287V)^2}$$

$$U_{2\ 1/2} = 6439V$$

$$U_2 = 669,3V$$

Drehstrom-
Transformat
oren

Skizze

Systematischer Drehstrom-Transformator

$$\underline{U}_H = j \cdot \omega \cdot N \cdot \Phi_H$$

$$\Phi_H = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot N} \cdot \underline{U}_H$$

$$\underline{U}_U = U \cdot e^{j0^\circ}$$

$$\underline{U}_V = U \cdot e^{j-120^\circ}$$

$$\underline{U}_W = U \cdot e^{j-240^\circ}$$

$$\sum \Phi_H = \frac{\underline{U}_H}{j \cdot \omega \cdot N} (e^{j0^\circ} + e^{j-120^\circ} + e^{j-240^\circ}) = 0$$

$$e^{j0^\circ} = 1$$

$$e^{j-120^\circ} = -\frac{1}{2} - j \frac{1}{2} \sqrt{3}$$

$$e^{j-240^\circ} = -\frac{1}{2} + j \frac{1}{2} \sqrt{3}$$

Skizze

Dreischenkeltransformator

Skizze

Fünfschenkeltransformator

3.3. Schaltgruppen und Kennzahl

Primärseite D, Y

Sekundärseite d, y, z

Skizze

Die gegenseitige Phasenlage der Drehspannungs-Systeme auf der Primär- und Sekundärseite wird durch eine Kennzahl ausgedrückt. Die Kennzahl gibt an, um welches Vielfache von 30° die Sekundärspannungen gegenüber der zugehörigen Primärspannung nacheilt. Es werden die Spannungen zwischen dem reellen oder fiktiven Sternpunkt und den Aussenanschlüssen betrachtet

Skizzen

Yz-Schaltung kann unsymmetrisch einphasig mit Nennstrom belastet werden.

3.4. Drehstromsystem

3.5. Sternschaltung

Skizze

$$U_L = \sqrt{3}U_{St} \quad I_L = I_{St}$$

$$S = 3 \cdot U_{St} \cdot I_{St} = 3 \cdot \frac{U_L}{\sqrt{3}} \cdot I_L$$

$$S = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L$$

Dreickschaltung

Skizze

$$U_L = U_{St}$$

$$S = 3 \cdot U_{St}$$

$$I_L = \sqrt{3} \cdot I_{St}$$

$$S = 3 \cdot U_{St} \cdot I_{St} = 3 \cdot U_L \cdot \frac{I_L}{\sqrt{3}}$$

$$S = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L$$

Beispiel: Drehstrom-Transformator

$$S_N = 600 \text{ kVA} \quad U_{1N} = 11 \text{ kV} \quad U_{2N} = 660 \quad \text{Yd5}$$

Leerlauf-Versuch

$$U_{20} = 660 \text{ V} \quad I_{20} = 16 \text{ A} \quad P_{20} = 4,8 \text{ kW}$$

Kurzschluß-Versuch

$$U_{1K} = 660 \text{ V} \quad I_{1K} = 16 \text{ A} \quad P_{1K} = 4,8 \text{ kW}$$

1) Ersatzschaltbild primärseitig

$$P_{20} = \sqrt{3} \cdot U_{20} \cdot \cos \varphi_0$$

$$\cos \varphi_0 = \frac{\text{Wirkleistung}}{\text{Scheinleistung}} = \frac{P_{20}}{U_{20} \cdot I_{20} \cdot \sqrt{3}} = \frac{4,8 \text{ kW}}{\sqrt{3} \cdot 660 \text{ V} \cdot 16 \text{ A}} = 0,262$$

$$\sin \varphi_0 = 0,965$$

$$I_{2FE} = \frac{I_{20}}{\sqrt{3}} \cdot \cos \varphi_0 = 2,42 \text{ A}$$

$$I_{2FE} = \frac{I_{20}}{\sqrt{3}} \cdot \sin \varphi_0 = 8,91 \text{ A}$$

$$R_{2FE} = \frac{U_{20St}}{I_{2FE}} = \frac{660}{2,42} = 272,7 \approx 273$$

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{U_{1St}}{U_{2St}} = \frac{11000 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 660 \text{ V}} = 9,62$$

$$R_{1FE} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \cdot R_{2FE} = 25,265 \text{ k}\Omega$$

$$X_{2H} = \frac{U_{20St}}{I_{2M}} = \frac{660}{8,91} = 74,1\Omega$$

$$X_{1H} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \cdot X_{2H} = 9,622 \cdot 74,1\Omega = 6,8k\Omega$$

$$\cos \varphi_K = \frac{P_{1K}}{\sqrt{3} \cdot U_{1K} \cdot I_{1K}} = \frac{8,2kW}{\sqrt{3} \cdot 500 \cdot 30} = 0,3156$$

$$\sin \varphi_K = 0,948$$

$$U_R = \frac{U_{1K}}{\sqrt{3}} \cdot \cos \varphi_K = \frac{500}{\sqrt{3}} \cdot 0,3156 = 91,1V$$

$$R_K = \frac{U_R}{I_{KStr}} = \frac{91,1V}{30A} = 3,03A$$

$$U_X = \frac{U_{1K}}{\sqrt{3}} \cdot \sin \varphi_K = \frac{500}{\sqrt{3}} \cdot 0,948 = 273,6$$

$$X_K = \frac{U_X}{I_{KStr}} = \frac{273,6V}{30A} = 9$$

2) Bestimmen Sie die Sekundärspannung U_2 bei Belastung mit Nennstrom und $\cos \varphi_L = 0,8$ induktiv.

$$S_N = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_N$$

$$I_N = \frac{S_N}{\sqrt{3} \cdot U_N} = \frac{600kVA}{\sqrt{3} \cdot 11kV} = 31,49A$$

$$U_{RN} = U_R \cdot \frac{I_{1N}}{I_{1K}} = 91,1 \cdot \frac{31,49}{30} = 95,6A$$

$$U_{XN} = U_X \cdot \frac{I_{1N}}{I_1} = 273,6 \cdot \frac{31,49A}{30A} = 287,2V$$

$$U_{2'1/2} = -(U_{RN} \cdot \cos \varphi_L - U_{XN} \cdot \sin \varphi_L) \pm \sqrt{(\sim)^2 + U_{1N}^2 - U_{RN}^2 - U_{XN}^2}$$

$$U_{2'1/2} = -(95,6 \cdot 0,8 - 287,2 \cdot (-0,6)) \pm \sqrt{(248)^2 + \left(\frac{11000}{\sqrt{3}}\right)^2 - (95,6)^2 - (287,2)^2}$$

$$U_{2'1/2} = 6100 \text{ V}$$

$$U_2 = U' \cdot \frac{1}{\frac{N_1}{N_2}} = 6100 \text{ V} \cdot \frac{1}{9,62} = 6,34 \text{ V}$$

2.2.3. Spartransformator

Werden Primär- und Sekundärwicklung eines Volltransformators in Reihe geschaltet, bekommt man einen Spartransformator!

Skizze

Skizze

$$U_1 = U_p + U_s$$

$$U_2 = U_s$$

$$I_1 = I_p$$

$$I_2 = I_p + I_s$$

$$S_D = U_1 \cdot I_1 = U_p \cdot I_p + U_s \cdot I_p$$

$$S_D = U_2 \cdot I_2 = U_s \cdot I_s + U_s \cdot I_p$$

Die Durchgangsleistung besteht aus 2 Anteilen, der transformatorische übertragenen Leistung $S_T = U_p \cdot I_p = U_s \cdot I_s$ und der aufgrund der galvanischen Leistung direkt übertragenen Leistung $S = U_s \cdot I_p$.

3.6. Drehstrom – Transformator

Aufgabe:

$$U_{1N} = 6600 \text{ V} \quad U_{2N} = 440 \text{ V} \quad Yd5 \quad S_N = 150 \text{ kVA}$$

Kurzschluss – Versuch:

$$U_{1K} = 315 \text{ V} \quad I_{1K} = 12,5 \text{ A} \quad P_{1K} = 2,7 \text{ kW}$$

1. Bestimmen Sie die Daten des Längszweiges.
2. Sekundärspannung U_2 bei I_N und $\cos\varphi_L = 0,8$ kapazitiv

Lösung:

$$S_N = \sqrt{3} \cdot U_{1N} \cdot I_{1N}$$

$$I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3} \cdot U_{1N}} = \frac{150 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \cdot 6,6 \text{ kV}} = 13,12$$

$$\cos \varphi_K = \frac{P_{1K}}{\sqrt{3} \cdot U_{1K} \cdot I_{1K}} = \frac{2,7 \text{ W}}{\sqrt{3} \cdot 315 \text{ V} \cdot 12,5 \text{ A}} = 0,396$$

$$\sin \varphi_K = 0,918$$

$$U_R = \frac{U_{1N}}{\sqrt{3}} \cdot \cos \varphi_K = \frac{315 \text{ V}}{\sqrt{3}} \cdot 0,396 = 72,02 \text{ V}$$

$$R_K = \frac{U_R}{I_{1K \text{ St}}} = \frac{72,02 \text{ V}}{12,5 \text{ A}} = 5,76 \Omega$$

$$U_X = \frac{U_{1K}}{\sqrt{3}} \cdot \sin \varphi_K = \frac{72,02 \text{ V}}{\sqrt{3}} \cdot 0,918 = 166,95 \text{ V}$$

$$X_K = \frac{U_X}{I_{1K \text{ St}}} = \frac{166,95 \text{ V}}{12,5 \text{ A}} = 13,36 \Omega$$

$$U_{RN} = U \cdot \frac{I_{1N}}{I_K} = 72,02 \text{ V} \cdot \frac{13,12 \text{ A}}{12,5 \text{ A}} = 75,6 \text{ V}$$

$$U_{XN} = U_X \cdot \frac{I_{1N}}{I_K} = 166,95 \text{ V} \cdot \frac{13,12 \text{ A}}{12,5 \text{ A}} = 175,3 \text{ V}$$

$$\begin{aligned} U'_{21,2} &= -(U_{RN} \cdot \cos \varphi - U_{XN} \cdot \sin \varphi) \pm \sqrt{(U_{RN} \cdot \cos \varphi - U_{XN} \cdot \sin \varphi)^2 + U_{1N \text{ St}}^2 - U_{RN}^2 - U_{XN}^2} \\ &= -(75,6 \text{ V} \cdot 0,8 - 175,3 \text{ V} \cdot 0,6) \pm \sqrt{(75,6 \text{ V} \cdot 0,8 - 175,3 \text{ V} \cdot 0,6)^2 + \left(\frac{6600 \text{ V}}{\sqrt{3}}\right)^2 - (75,6 \text{ V})^2 - (175,3 \text{ V})^2} \\ &= -(-44,685) \pm \sqrt{14485552,6 \text{ V}^2} \\ &= 3850,7 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\frac{U_{1N \text{ St}}}{U_{2N \text{ St}}} = \frac{6600 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 440 \text{ V}} = 8,66$$

$$U_2 = \frac{U_2'}{\frac{N_1}{N_2}} = \frac{3850,7 \text{ V}}{8,66} = 444 \text{ V}$$

4. Asynchronmotor

4.1. Aufbau und prinzipielle Wirkungsweise

Zeichnung: Asynchronmotor

4.2. Kurzschlussläufer

In die Nuten des Läuferblechpaketes wird in Druckguss – Verfahren eine Alu – Wicklung eingespritzt und an der Stirnseite über Kurzschlussringe verbunden.

Zeichnung: Kurzschlussläufer, ESB

4.3. Magnetisches Wechselfeld und magnetisches Drehfeld

Die 3 Statorwicklungen werden aus einem symmetrischen Drehstrom – System gespeist. Die Ströme in den Wicklungen sind um 120° phasenverschoben.

$$i_u(t) = \sqrt{2} \cdot I \cdot \cos \omega t$$

$$i_v(t) = \sqrt{2} \cdot I \cdot \cos(\omega t - 120^\circ)$$

$$i_w(t) = \sqrt{2} \cdot I \cdot \cos(\omega t - 240^\circ)$$

Jede Wicklung bildet eine Wechseldurchflutung aus, die zwischen einen positiven und negativen Maximalwert schwankt. Der räumliche Scheitelwert der Wechseldurchflutung befindet sich immer in der gleichen Achse.

Jede Wechseldurchflutung kann in eine im mathematisch positiven bzw. negativen Sinn umlaufende Drehdurchflutung aufgespalten werden.

$$e^{j\omega t} = \cos \omega t + j \sin \omega t$$

$$e^{-j\omega t} = \cos \omega t - j \sin \omega t$$

$$\cos \omega t = \frac{1}{2} e^{j\omega t} + \frac{1}{2} e^{-j\omega t}$$

Zeichnung: Asynchronmotor

$$\phi = \frac{1}{2} \cdot \phi \cdot e^{j\alpha} \cdot e^{j0^\circ} + \frac{1}{2} \cdot \phi \cdot e^{-j\alpha} \cdot e^{j0^\circ}$$

$$\phi = \frac{1}{2} \cdot \phi \cdot e^{j(\alpha-120^\circ)} \cdot e^{j120^\circ} + \frac{1}{2} \cdot \phi \cdot e^{-j(\alpha-120^\circ)} \cdot e^{j120^\circ}$$

$$\phi = \frac{1}{2} \cdot \phi \cdot e^{j(\alpha-240^\circ)} \cdot e^{j240^\circ} + \frac{1}{2} \cdot \phi \cdot e^{-j(\alpha-240^\circ)} \cdot e^{j240^\circ}$$

----- ϕ -----> ?

Bilden wir die Summe der Drehdurchflutung, die sich im mathematisch positiven bzw. negativen Sinn drehen, ergibt sich:

$$\sum \phi_+ = \frac{1}{2} \cdot \phi \cdot e^{j\omega t} \cdot [1 + 1 + 1] = \frac{3}{2} \cdot \phi \cdot e^{j\omega t}$$

$$\sum \phi_- = \frac{1}{2} \cdot \phi \cdot e^{-j\omega t} \cdot [1 + e^{j240^\circ} + e^{j120^\circ}] = 0$$

$$e^{j120^\circ} = \cos 120^\circ + j \sin 120^\circ = -\frac{1}{2} + j \frac{1}{2} \cdot \sqrt{3}$$

$$e^{j240^\circ} = -\frac{1}{2} - j \frac{1}{2} \cdot \sqrt{3}$$

----- ϕ -----> ?

Die Überlagerung der 3 Wechseldurchflutungen ergibt eine Drehdurchflutung konstanter Amplitude, die sich mit konstanter Winkelgeschwindigkeit ω dreht. Die Drehdurchflutung erzeugt ein magnetisches Drehfeld. Die Drehrichtung kann durch Vertauschen von 2 Phasen geändert werden.

$$\phi_u = \frac{1}{2} \cdot \phi \cdot e^{j\alpha} \cdot e^{j0^\circ} + \frac{1}{2} \cdot \phi \cdot e^{-j\alpha} \cdot e^{j0^\circ}$$

$$\phi_v = \frac{1}{2} \cdot \phi \cdot e^{j(\alpha-120^\circ)} \cdot e^{j240^\circ} + \frac{1}{2} \cdot \phi \cdot e^{-j(\alpha-120^\circ)} \cdot e^{j240^\circ}$$

$$\phi_w = \frac{1}{2} \cdot \phi \cdot e^{j(\alpha-240^\circ)} \cdot e^{j120^\circ} + \frac{1}{2} \cdot \phi \cdot e^{-j(\alpha-240^\circ)} \cdot e^{j120^\circ}$$

$$\sum \phi_+ = \frac{1}{2} \cdot \phi \cdot e^{j\alpha} \cdot (1 + e^{j120^\circ} + e^{j240^\circ}) \quad ; e^{-j120^\circ} = e^{j240^\circ}$$

$$\sum \phi_- = \frac{1}{2} \cdot \phi \cdot e^{-j\alpha} \cdot [1 + 1 + 1] = \frac{3}{2} \cdot \phi \cdot e^{-j\alpha}$$

Es ist auch möglich mit 2 Phasen ein magnetisches Drehfeld zu erzeugen.

Zeichnung: Magnet. Drehfeld

$$i_1(t) = \sqrt{2} \cdot I \cdot \cos \omega t$$

$$i_2(t) = \sqrt{2} \cdot I \cdot \cos(\omega t - 90^\circ)$$

$$\phi_1(t) = \frac{1}{2} \cdot \phi \cdot e^{j\alpha} \cdot e^{j0^\circ} + \frac{1}{2} \cdot \phi \cdot e^{-j\alpha} \cdot e^{j0^\circ}$$

$$\phi_2(t) = \frac{1}{2} \cdot \phi \cdot e^{j(\alpha-90^\circ)} \cdot e^{j90^\circ} + \frac{1}{2} \cdot \phi \cdot e^{-j(\alpha-90^\circ)} \cdot e^{j90^\circ}$$

$$\sum \phi_+ = \frac{1}{2} \cdot \phi \cdot e^{j\alpha} \cdot (1 + 1) = \frac{2}{2} \cdot \phi \cdot e^{j\alpha}$$

$$\sum \phi_- = \frac{1}{2} \cdot \phi \cdot e^{-j\alpha} \cdot [1 - 1] = 0$$

Das magnetische Drehfeld überläuft die Läuferwicklung mit der Schlupfgeschwindigkeit v_s und induziert im Läufer eine Spannung.

$$U_g = (\vec{B}_x \times \vec{v}_s) \cdot l \quad B_x : \text{magnetische Flussdichte an der Stelle } x$$

Im Läufer fließen Ströme und erzeugen Kräfte, die dem Läuferstrom und der magnetischen Flussdichte proportional sind.

$$\vec{F} = (\vec{I} \times \vec{B}_x) \cdot l$$

Der Läufer wird auf bis nahezu Drehfeldzahl n_1 beschleunigt.

2 Zeichnungen: Läufer

$$n_1 = \frac{d}{p} \quad ; \quad p = \text{Polpaarzahl}$$

p	1	2	3	4	5
$n_1 [\text{min}^{-1}]$	3000	1500	1000	750	600

Betriebsbereiche:

$$\text{Schlupf} : s = \frac{\text{Drehfelddrehzahl } n_1 - \text{Läuferdrehzahl } n}{\text{Drehfelddrehzahl } n_1}$$

$$s = \frac{n_1}{n_1} - \frac{n}{n_1} = 1 - \frac{n}{n_1}$$

Stillstand s=1

- das magnetische Drehfeld überläuft die Läuferwicklung mit der Drehfelddrehzahl n_1
- die magnetische Flussverketzung der Läuferwicklung ändert sich sinusförmig
- die Wicklung von Stator und Rotor können als Primär- und Sekundärwicklung eines Drehstrom-Transformators aufgefasst werden
- es gilt das gleiche Ersatzschaltbild
- bedingt durch den Luftspalt fließt ein größerer Magnetisierungsstrom als bei einem Drehstrom-Transformator gleicher Scheinleistung

Synchronlauf s=0

- der Läufer wird mit der Drehfeldzahl n_1 angetrieben
- der Läufer steht relativ zum umlaufenden Drehfeld still
- es wird keine Spannung im Läufer induziert
- dieser Betriebszustand entspricht beim Transformator dem Leerlauf
- zum Aufbau des magnetischen Drehfeldes wird der Magnetisierungsstrom benötigt

untersynchroner Lauf $0 < s < 1$

- der Läufer bleibt gegenüber dem umlaufenden Drehfeld zurück
- das ist gleichbleibend mit einer Drehung des Läufers durch ein stillstehendes Magnetfeld mit der Schlupfdrehzahl n_2
- die im Läufer induzierte Spannung ist dem Schlupf proportional

$$\underline{U}_H = N \cdot \frac{d\phi_H}{dt}$$

$$\underline{U}_H = j \cdot \omega \cdot N \cdot \phi_H$$

$$s = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1} = \frac{\omega_2}{\omega_1}; \omega_2 = s \cdot \omega_1$$

$$\underline{U}_{2H}(s) = j \cdot \omega_2 \cdot N_2 \cdot \phi_H = j \cdot \omega_1 \cdot N_1 \cdot \phi_H$$

$$\underline{U}_{2H}(s) = s \cdot \underline{U}_{2H}(s=1)$$

- die im Läufer induzierte Spannung läuft relativ zum Läufer mit der Schlupfdrehzahl n_2 um, relativ zum Stator mit der Drehfelddrehzahl n_1

$$n_2 + n = n_1$$

übersynchroner Lauf

- der Läufer wird mit Drehzahl angetrieben, die größer ist als die Drehfelddrehzahl.
- die Läuferspannung und der Läuferstrom haben umgekehrte Richtung wie im Untersynchronlauf.
- das innere Drehmoment wirkt der Drehrichtung entgegen
- die Asynchronmaschine arbeitet als Generator (speist Wirkleistung ins Netz zurück)

Gegenlauf $s > 1$

- Antrieb des Läufers in Gegenrichtung zum umlaufenden Drehfeld
- Die Asynchronmaschine verhält sich ähnlich wie im Untersynchronlauf
- Sie arbeitet als Bremse

Ersatzschaltbild

Skizze

$$\underline{U}_{2H}(s) = s \cdot \underline{U}_{2H}(s=1) = s \cdot \underline{U}_{2HK}$$

\underline{U}_{2HK} = die im Stillstand induzierte Läuferspannung (K steht für Kurzschluß)

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_{2H}(s)}{R_2 + j \cdot \omega \cdot L_{2\sigma}} = \frac{s \cdot \underline{U}_{2HK}}{R + j \cdot s \cdot \omega_1 \cdot L_{2\sigma}} = \frac{\underline{U}_{2HK}}{\frac{R_2}{s} + j \cdot \omega_1 \cdot L_{2\sigma}}$$

Durch diese Umformung kann der Läufer durch ein einfacheres Ersatzschaltbild mit konstanter Spannung und konstanter Frequenz nachgebildet werden. Die im Läufer induzierte Spannung hat den gleichen Betrag und die gleiche Frequenz wie die im Stillstand induzierte Spannung.

$$\underline{U}_H = j \cdot \omega \cdot N \cdot \phi_H$$

$$\underline{U}_{2H} = j \cdot \omega_2 \cdot N_2 \cdot \phi_H = j \cdot s \cdot \omega_1 \cdot N_2 \cdot \phi_H$$

$$s = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1} = \frac{\omega_2}{\omega_1}$$

$$\omega_2 = s \cdot \omega_1$$

$$\underline{I}_2 = \frac{j \cdot s \cdot \omega_1 \cdot N_2 \cdot \phi_H}{R_2 + j \cdot \omega_1 \cdot L_{2\sigma}} = \frac{j \cdot \omega_1 \cdot N_2 \cdot \phi_H}{\frac{R_2}{s} + j \cdot \omega_1 \cdot L_{2\sigma}}$$

UWE

4.4.

Zeichnung: Kondensator - Motor

$$\underline{U_C = -jX_C \cdot \underline{I_H}}$$

Zeichnung: Zeigerdiagramm

$$\tan \varphi = \frac{U_H}{U_1} = \frac{U_H}{U_A} = \frac{I_A}{I_H} = \frac{N_H \cdot \varphi_H}{N_A \cdot \varphi_A} \quad \varphi = \text{Wicklungsfaktor} ; N = \text{Windungszahl}$$

Gleiche Scheinleistung für Haupt- und Hilfsphase:

$$U_A \cdot I_A = U_H \cdot I_H$$

$$I_H = \frac{I_A}{\tan \varphi}$$

$$\cos \varphi = \frac{U_A}{U_C} \quad ; \quad U_C = \frac{U_A}{\cos \varphi}$$

$$X_C = \frac{U_C}{I_H} = \frac{U_A \cdot \tan \varphi}{I_A \cdot \cos \varphi} = \frac{U_A}{I_A} \cdot \tan \varphi \cdot \sqrt{1 + \tan^2 \varphi} = \frac{1}{\omega \cdot C} \quad \sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi = 1$$

$$\frac{\sin^2 \varphi}{\cos^2 \varphi} + 1 = \frac{1}{\cos^2 \varphi} = \tan^2 \varphi + 1$$

$$C = \frac{1}{\omega \cdot \frac{U_A}{I_A} \cdot \tan \varphi \cdot \sqrt{1 + \tan^2 \varphi}}$$

Für einen Arbeitspunkt ist die Symmetrierung möglich.

Beispiel:

Kondensator – Motor

$$U_A = 230 \text{ V} \quad I_A = 1,7 \text{ A} \quad N_A = 164 \quad \cos\varphi_N = 0,6$$

Bestimmen Sie die Daten der Hilfswicklung

$$\varphi_N = 53,1^\circ \quad \tan\varphi_N = 1,33$$

$$\tan\varphi = \frac{N_H \cdot \varphi_H}{N_A \cdot \varphi_A}$$

Die Wicklungsfaktoren für Haupt- und Hilfswicklung sollen gleich sein

$$N_H = N_A \cdot \tan\varphi = 164 \cdot 1,33 = 218$$

$$X_C = \frac{U_A}{I_A} \cdot \tan\varphi \cdot \sqrt{1 + \tan^2\varphi} = \frac{230 \text{ V}}{1,7 \text{ A}} \cdot 1,33 \cdot \sqrt{1 + 1,33^2} = 299,4 \text{ } \Omega = \frac{1}{\omega \cdot C}$$

$$C = \frac{1}{\omega \cdot X_C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ sec}^{-1} \cdot 299,4 \text{ } \Omega} = 10,6 \text{ } \mu\text{F}$$

$$U_C = \frac{U_A}{\cos\varphi_N} = \frac{230 \text{ V}}{0,6} = 383,3 \text{ V}$$

$$I_H = \frac{I_A}{\tan\varphi} = \frac{1,7 \text{ A}}{1,33} = 1,28 \text{ A}$$

$$I_1 = \sqrt{I_A^2 + I_H^2} = \sqrt{(1,7 \text{ A})^2 + (1,28 \text{ A})^2} = 2,13 \text{ A}$$

Beispiel:

Asynchronmotor

$$U_N = 400 \text{ V} \quad I_N = 22,6 \text{ A} \quad P_N = 11 \text{ kW} \quad R_1 = 0,295 \text{ } \Omega$$

2 Zeichnungen: Spannungsrichtig und Stromrichtig

Leerlaufversuch:

$$U_0 = 400 \text{ V} \quad I_0 = 8,2 \text{ A} \quad P_0 = 530 \text{ W}$$

Kurzschluss - Versuch:

$$U_K = 69 \text{ V} \quad I_K = 21,3 \text{ A} \quad P_N = 934 \text{ W}$$

1.SOK

$$P_0 = \sqrt{3} \cdot U_0 \cdot I_0 \cdot \cos \varphi_0$$

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} \cdot U_0 \cdot I_0} = \frac{530 \text{ W}}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 8,2 \text{ A}} = 0,093$$

$$I_{FE} = I_0 \cdot \cos \varphi_0 = 8,2 \text{ A} \cdot 0,093 = 0,76 \text{ A}$$

$$I_M = I_0 \cdot \sin \varphi_0 = 8,2 \text{ A} \cdot 0,996 = 8,16 \text{ A}$$

$$\cos \varphi_K = \frac{P_K}{\sqrt{3} \cdot U_K \cdot I_K} = \frac{934 \text{ W}}{\sqrt{3} \cdot 69 \text{ V} \cdot 21,3 \text{ A}} = 0,367$$

$$\frac{I_{KN}}{I_K} = \frac{U_N}{U_K}$$

$$I_{KN} = \frac{U_N}{U_K} \cdot I_K = \frac{400 \text{ V}}{69 \text{ V}} \cdot 21,3 \text{ A} = 123,5 \text{ A}$$

$$I_{KNW} = I_{KN} \cdot \cos \varphi_K = 123,5 \text{ A} \cdot 0,367 = 45,3 \text{ A}$$

$$I_{KNb} = I_{KN} \cdot \sin \varphi_K = 123,5 \text{ A} \cdot 0,99 = 114,9 \text{ A}$$

2 Zeichnungen: Zeigerbild, ESB, Zeigerdiagramm

$$R_K = R_1 + R_2 = \frac{U_K \cdot \cos \varphi_K}{\sqrt{3} \cdot I_K} = \frac{69 \text{ V} \cdot 0,367}{\sqrt{3} \cdot 21,3 \text{ A}} = 0,391 \Omega$$

$$R_2 = R_K - R_1 = 0,686 \Omega - 0,295 \Omega = 0,391 \Omega$$

$$\frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{l_1}{23}$$

$$l_1 = \frac{0,295 \Omega}{0,686} \cdot 23 = 12,5$$

$$I_2(s \rightarrow \infty) = \frac{U_{1st}}{R_1 + jX}$$

Zeichnung: ESB

$$\begin{aligned} \underline{I}'_2 &= \frac{\underline{U}_1}{R_1 + \frac{R'_2}{s} + jX} \cdot \frac{R_1 + \frac{R'_2}{s} - jX}{R_1 + \frac{R'_2}{s} - jX} \\ &= \frac{\underline{U}_1 \cdot \left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)}{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + X^2} - j \frac{\underline{U}_1 \cdot X}{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + X^2} \end{aligned}$$

$$I'_{2W} = \frac{\underline{U}_1 \cdot \left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)}{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + X^2}$$

$$I'_{2b} = j \frac{\underline{U}_1 \cdot X}{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + X^2} \quad \rightarrow \text{Blindstrom}$$

$$\frac{I'_{2WI}}{I'_{2b}} = \frac{R_1 + \frac{R'_2}{s}}{X}$$

Strommaßstab:

$$m_I = \frac{2 \text{ A}}{\text{cm}}$$

Leistungsmaßstab:

$$m_P = I \cdot U_{St} \cdot m_I = 3230 \text{ V} \cdot \frac{2 \text{ A}}{\text{cm}} = 1,38 \frac{\text{kW}}{\text{cm}}$$

Drehmomentmaßstab:

$$m_M = \frac{I \cdot U_{St} \cdot m_I}{2 \cdot \pi \cdot n_1} = \frac{1380 \text{ W}}{157 \text{ sec}^{-1} \cdot \text{cm}} = 8,8 \frac{\text{Nm}}{\text{cm}}$$

$$p = 2 \quad S_N = 4\% \quad M_N = ?$$

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot n}$$

$$M = \frac{P_N}{2 \cdot \pi \cdot n} = \frac{11000 \text{ W}}{2 \cdot \pi \cdot 24 \text{ sec}^{-1}} = 73 \text{ Nm}$$

4.5. Umrichter

Zeichnung: Umrichter

Durch ein Schalten (Takten) zwischen der positiven und negativen Spannung im Kilo - Hertz – Bereich wird eine nahezu sinusförmige Ausgangsspannung erreicht.

Zeichnung: Sinuskurve

4.6. Spaltpolmotor

Zeichnung: Spaltpolmotor

Die Polschuhe sind gespalten und tragen eine Kurzschlusswicklung (Hilfswicklung). Die Hauptwicklung wird mit Wechselspannung gespeist. Haupt- und Hilfswicklung verhalten sich wie ein sekundärseitig kurzgeschlossener Transformator. Der magnetische Fluss im Bereich der Hilfswicklung wird zeitlich verzögert. Es bildet sich ein elliptisches Drehfeld aus. Der Spaltpolmotor ist auf kleine Leistungen beschränkt.

Drehzahl – Drehmoment – Verhalten:

Zeichnung: Diagramm

4.7. Synchronmotor

2 Zeichnungen: Synchronmotor, Diagramm

Konstruktion von Stromortskurve

Bestimmen der Punkte P_0 , P_k und P_∞ durch Ermittlung von Betrag und Winkel mit nachstehenden Formeln

$$I_0 = \frac{U_1}{\sqrt{R_1^2 + X_1^2}} \quad \tan \varphi_0 = \frac{X_1}{R_1}$$

$$I_k = \frac{U_1}{\sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \quad \tan \varphi_k = \frac{X_k}{R_k}$$

$$I_\infty = \frac{U_1}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}} \quad \tan \varphi_0 = \frac{X_k}{R_1}$$

Ströme und Widerstände in Abhängigkeit von s

$$I_1(s) = \frac{\frac{R'_2 + j \cdot X'_2}{s}}{(R_1 + j \cdot X_1) \cdot \left(\frac{R'_2 + j \cdot X'_2}{s} \right) + X_H^2}$$

Achtung !!!!! alle mit:

$$X_1 = X_H + X_{1\sigma} \quad X'_2 = X_H + X_{2\sigma}$$

Gleichstrommaschinen

Drehzahlsteuerung von GM

1. Ankerspannung (Ankerstellbereich) mit $U_A \leq U_{AN}$ bei Erregerfeld Φ_N für Drehzahlen $0 \leq n \leq n_N$.
2. Feldschwächung (Feldstellbereich) mit $\Phi \leq \Phi_N$ bei Ankerspannung U_{AN} für Drehzahlen $n_N \leq n \leq n_{max}$. Möglich durch Veränderung von U_{EN} , I_{EN} (z. B. durch Brückenschaltung).
3. Ankervorwiderstand, verändert Leerlaufdrehzahl nicht, Kennlinie wird flacher. Unwirtschaftlich wegen den hohen Stromwärmeverlusten im Vorwiderstand und Wirkungsgrad fällt proportional der Drehzahl (bei gleicher Drehzahl kleineres Moment).

Diode = Gleichrichter

Lässt Strom nur in eine Richtung fließen.

Thyristor

Thyristoren sind nach ihrer Wirkung einschaltbare Dioden (lässt Strom nur in eine Richtung fließen), die durch einen Stromimpuls auf die Steuerelektrode während der positiven Halbschwingung der Netzspannung in den leitenden Zustand gebracht werden. Da dieser nur bis zum nächsten Stromnulldurchgang besteht, muss ein Thyristor netzsynchron gezündet werden, was die Möglichkeit der Spannungssteuerung (über den Steuerungswinkel α) ergibt.

Sechspuls-Brückenschaltung (Drehstrombrückenschaltung)

= Stromrichterschaltung, d. h. Schaltung wird als Leistungsteil des Gleichrichters eingesetzt. Für hohe Leistungen geeignet. Aus Wechselstrom wird Gleichstrom erzeugt. Reihenschaltung zwei 3-pulsiger Brückenschaltungen. 3-pulsige Brückenschaltungen werden nur bis Leistungen von 10kW eingesetzt.

$$U_{di}(\alpha) = \frac{s \cdot \sqrt{2} \cdot U_{Str}}{\frac{\pi}{q}} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{q}\right) \cdot \cos \alpha$$

s = 1 Mittelpunktschaltung

s = 2 Brückenschaltung

q = Anzahl der Kommutierungen pro Kommutierungsgruppe

α = Steuerungswinkel

Gleichrichterbetrieb $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$

Energiefluss ist von der Wechselspannungsseite auf die Gleichspannungsseite gerichtet.

Wechselrichterbetrieb $90^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$

Energiefluss ist von der Gleichspannungsseite auf die Wechselspannungsseite gerichtet.

Steuerwinkel α

Steuerwinkel beeinflusst U_{Str} . Berechnung: $U_{id}(\alpha) = U_{EN}$ und α einsetzen und nach U_{Str} auflösen. Drehzahlsteuerung über Steuerwinkel α möglich.

Transformatoren

Kennzahl gibt an, um welches Vielfache von 30° die zugehörige Leiterspannung auf der Sekundärseite nacheilt. Bei Parallelschaltung muss Kennzahl gleich sein.

Normale Haushaltsgeräte werden nur einphasig betrieben (außer Herd). Deswegen ist ein Trafo nötig, der auch 100% 1-phasig belastet werden kann. Yy0 ist nicht geeignet.

Asynchronmaschinen

Magnetisches Wechselfeld und magn. Drehfeld

Die drei Statorwicklungen werden aus einem symmetrischen Drehstromsystem gespeist. Die Ströme der einzelnen Wicklungen sind um 120° zeitlich versetzt. Jede Wicklung bildet eine Wechseldurchflutung aus. Die Überlagerung der Wechseldurchflutungsanteile ergeben eine Drehdurchflutung konstanter Amplitude die sich mit der Winkelgeschwindigkeit dreht. Diese Drehdurchflutung erzeugt ein magnetisches Drehfeld.

Antriebstechnik

Stabilität des Arbeitspunktes

Bei einem stabilen Arbeitspunkt stellt sich nach abklingen der Störung der ursprüngliche Arbeitspunkt wieder ein.

Ändern des Arbeitspunktes

1. Ändern der Kennlinie
 - Ändern der Ankerspannung bei fremderregten GM
 - Ändern von Spannung und Frequenz bei ASM
2. Ändern der Widerstandskennlinie
 - Getriebe = mechanische Drehmomentwandler
3. Ändern von beidem, z. B. bei Kraftfahrzeugen