Asynchronmaschine

Formelzeichen	Beschreibung
X_h	Hauptreaktanz [?]
X_k	Streureaktanz [?]
R_2' 1)	Läuferwiderstand [Ω]
P_δ	Luftspaltleistung $= P_{el}$ [W]
P_{Cu2}	Stromwärmeverluste/ohmsche Läuferverluste [W]
P_{mech}	mechanische Leistung [W]
f_1 2)	Ständerfrequenz [Hz]
f_2	Läuferfrequenz [Hz]
$\omega_{1/2}$	Sänder-/Läuferkreisfrequenz [$\frac{1}{s}$]
n_1	Läuferdrehzahl (synchron) [$\frac{1}{min}$]
$n = n_N$	Ständerdrehzahl (asyncrhon) [$\frac{1}{min}$]
s	Schlupf [%]
p	Polpaarzahl
$\underline{I}_\mu$	?
$\underline{I}_1$	?
$\underline{I}_2$	?
M_A	?
U_A	?
I_A	?
ϕ_N	?

1) ' heißt die Läufergröße ist auf Ständer umgerechnet
2) Index 1 immer Ständergröße, Index 2 immer Läufergröße
3) * heißt reduziert

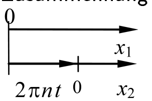
Am Netz

Voraussetzung für ein zeitlich konstantes Drehmoment ist ein mit konstanter Winkelgeschwindigkeit im Luftspalt umlaufendes, räumlich möglichst sinusförmig verteiltes magnetisches Feld.

Grundfeld einer Drehstromwicklung:

$$b_p(x,t) = B_p \cdot cos(px - \omega_1 t) \tag{3.2.1}$$

Zusammenhang Ständer- und Läuferkoordinaten:



$$x_1 = 2\pi nt + x_2 \tag{3.3.1}$$

Frequenz:

$$f_2 = f_1 \cdot (1 - n \cdot p/f_1) = f_1 - pn \tag{3.3.2}$$

Bei stillstehendem Läufer (n = 0) sind Sänder- und Läuferfrequenz gleich ($f_2 = f_1$). Wenn sich der Läufer mit der synchronen Drehzahl

$$n = n_1 = f_1/p = 1 - \frac{p \cdot n}{f_1} \tag{3.2.3}$$

dreht, so ist die Läuferfrequenz Null.

$$f_2 = s \cdot f_1 \tag{3.3.3}$$

Schlupf:

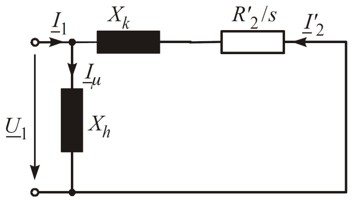
Bei Leerlauf ist s = 0, im Stillstand s = 1.

$$s = 1 - \frac{p \cdot n}{f_1} = 1 - \frac{n}{n_1} = \frac{n_1 - n}{n_1} \tag{3.3.4}$$

Prozentuale/relative Abweichung der Läuferdrehzahl von der synchronen Drehzahl n_1 (bei Synchronmaschinen ist s = 0, bei ASM möglichst klein)

Ersatzschaltbild

Strangsröme werden im ESB mit ' gekennzeichnet (sie unterscheiden sich nur duch die Phasenlagen)



$$\underline{I}_\mu = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 \tag{3.3.6}$$

Kanns sein, dass in der Formel die ' nicht passen?

im Läufer umgesetzte Leistung: (Läuferverlustleistung)

$$P_\delta = 3 \cdot I_2' \cdot \frac{R_2'}{s} = s \cdot P_\delta + (1-s) \cdot P_\delta = P_{Cu2} + P_{mech} \tag{3.3.7}$$

'Gesetz über die Spaltung der Luftspaltleitung':

Stromwärmeverluste in der Läuferwicklung:

$$P_{Cu2} = 3 \cdot I_2' \cdot R_2' = s \cdot P_\delta \tag{3.3.9}$$

mechanische Leistung:

$$P_{mech} = P_\delta - P_{Cu2} = P_\delta \cdot (1-s) \tag{3.3.10}$$

Drehmoment:

$$M = \frac{P_{mech}}{2\pi n} = \frac{P_\delta(1-s)}{2\pi n_1(1-s)} = \frac{P_\delta}{2\pi n_1} \tag{3.3.11}$$

Wirkungsgrad:

$$\eta = \frac{P_{Welle}}{P_{el}} \tag{1}$$

Stromortskurve

Leitwertstromortskurve(?????)

$$s = 0: \quad \underline{Y}_0 = \frac{-j}{X_R} \tag{2}$$

$$s = \infty: \quad \underline{Y}_\infty = \frac{-j}{X_R} - \frac{j}{X_K} \tag{3}$$

Kreismittelpunkt:

$$\underline{Y} = \frac{-j}{X_R} - \frac{j}{2X_K} \tag{4}$$

Kreisradius:

$$r = \frac{1}{2X_K} \tag{5}$$

Leerlaufstrom/Magnestisierungsstrom: $I_0 = I_\mu$ (0|0)-P_0
Ständerstrom I_1 (0|0) - P
Läuferstrom I_2' P - P_0

$$\overline{P_kC} \sim (3)^* R_2' I_{2k}' (= 2\pi n_1 M_A) \tag{6}$$

*Faktor 3 nur bei Sternschaltung

$$\overline{P_0B} \sim I_2'^2 \tag{7}$$

$$\overline{P_0C} \sim I_{2k}'^2 \tag{8}$$

Läuferstromwärmeverluste:

$$\overline{AB} = \frac{\overline{P_0B}}{\overline{P_0C}} \cdot \overline{P_kC} \sim \frac{I_2'^2}{I_{2k}'^2} (3)^* R_2' I_{2k}' = P_{Cu2} \tag{9}$$

Luftspaltleistung/elektrisch aufgenommene Leistung:

$$\overline{PB} \sim P_{el} = P_\delta \tag{10}$$

mechanische Leistung:

$$\overline{PA} \sim P_{mech} = P_\delta - P_{Cu2} \tag{11}$$

Y-Schaltung: $P_{Cu2} = 3R_2' I_2'^2$

Δ-Schaltung: $P_{Cu2} = R_2' I_{2L}'^2$

Parameterbeiche:

motorischer Beiche: $s \leq s \leq 1$
$s = 0$: Synchronismus, Leerlauf
$s = 1$: Stillstand, Kurzschluss

generatorischer Bereich: $s < 0$
Luftspaltleistung wird negativ, Asynchronmaschine geht ohne Schaltungsänderung in Generatorbetrieb

Gegenstrombremsbereich: $s > 1$
Drezahl n wird negativ ($n = n_1(1-s)$)

- Läufer dreht entgegen der Umlaufrichtung des Luftspaltfeldes.
- In diesem Bereich nimmt die ASM mechanische Leistung über die Welle und elektrische Leistung aus dem Netz auf.
- Gesamte aufgenommene Leistung wird in Stromwärme umgesetzt.

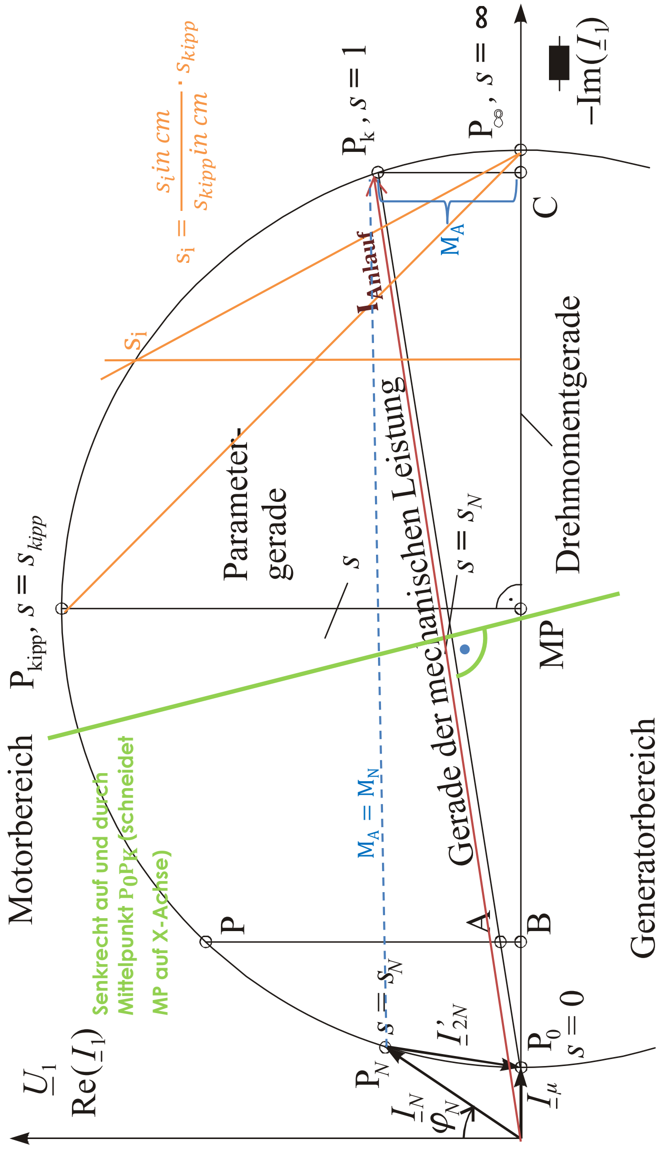
$$M_A = (\frac{U_A}{U_A^*})^2 \cdot M_A^* \tag{12}$$

$$I_A = \frac{U_N}{U_N^*} \cdot I_A^* \tag{13}$$

Maßstäbe:

Strom: m_I gewählt (Leiterstrom) Einheit: A/cm
Leistung: $m_P = \sqrt{3} U_N m_I$ Einheit: W/cm

Drehmoment: $m_M = m_P/(2\pi n_1)$ Einheit: Nm/cm



Stationär

ToDo: Eintragen der Abkürzungen in das Abkürzungsverzeichnis!!!

ESB von magnetisch gekoppelten Stromkreisen einfügen
Spannungsgleichungen der beiden Stromkreise

$$\underline{U_1} = (R_1 + jwL_{1\sigma}) \cdot \underline{I_1} + jwL_{1h} \cdot \underline{I_\mu} \tag{14}$$

$$\underline{U_2'} = (R_2' + jwL_{2\sigma}') \cdot \underline{I_2'} + jwL_{2h} \cdot \underline{I_\mu} \tag{15}$$

ESB zweier magnetisch gekoppelter Stromkreise fehlt noch

Streuziffer

$$\sigma_1 = \frac{L_{1\sigma}}{L_{1h}} \tag{16}$$

Gesamtstreuung

$$\sigma = 1 - \frac{1}{(1+\sigma_1)\cdot(1+\sigma_2)} = 1 - \frac{M^2}{L_1 L_2} = 1 - \frac{M^2}{M(1+sigma_1) + M(1+\sigma_2)} \tag{17}$$

Strangströme für Feldmaxima

$$b_u(t) = B \cdot cos(wt) = Re(b_u(t) \cdot e^{j\epsilon_0}) \tag{18}$$

$$b_v(t) = B \cdot cos(wt - \frac{2\pi}{3}) = Re(b_v(t) \cdot e^{j\epsilon_0} \cdot e^{j\frac{2\pi}{3}}) \tag{19}$$

$$b_w(t) = B \cdot cos(wt - \frac{4\pi}{3}) = Re(b_w(t) \cdot e^{j\epsilon_0} \cdot e^{j\frac{4\pi}{3}}) \tag{20}$$

$$b_r es(t) = Re(e^{j\epsilon_0}(b_u(t) + b_v(t) \cdot \underbrace{e^{j\frac{2\pi}{3}}}_{a} + b_w(t) \cdot \underbrace{e^{j\frac{4\pi}{3}}}_{a^2}) \tag{21}$$

Definition des Raumzeigers

$$\vec{B} = \frac{2}{3}(b_u(t) + \underline{a} \cdot b_v(t) + \underline{a^2} \cdot b_w(t)) \tag{22}$$

Raumzeiger von Strömen

$$\vec{I} = \frac{2}{3}(i_u(t) + \underline{a} \cdot i_v(t) + \underline{a^2} \cdot i_w(t)) \tag{23}$$

bei symmetrischen Ströme

$$i_u(t) + i_v(t) + i_w(t) = 0 \tag{24}$$

Stromraumzeiger

$$\vec{I_1} = \frac{2}{3}(i_u(t) + \underbrace{(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2})}_{e^{j\frac{2\pi}{3}}} \cdot i_v(t) + \underbrace{(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2})}_{e^{j\frac{4\pi}{3}}} \cdot i_w(t)) \tag{25}$$

Ersatzströme

$$I_{1\alpha} = Re(\vec{I_1}) = i_u(t) \tag{26}$$

$$I_{1\beta} = Im(\vec{I_1}) = \frac{i_v(t) - i_w(t)}{\sqrt{3}} \tag{27}$$

Koordinatentransformation
ständerfeste Koordinaten: Index S

$$\vec{I}_1^S = \hat{I}_1 \cdot e^{j\beta_S} = \vec{I}_1^L \cdot e^{j\beta_L} \tag{28}$$

$$I_{1\alpha} = \hat{I}_1 \cdot cos\beta_S \tag{29}$$

$$I_{1\beta} = \hat{I}_1 \cdot sin\beta_S \tag{30}$$

läuferfeste Koordinaten: Index L

$$\vec{I}_1^L = \frac{\hat{I}_1 \cdot e^{j(\beta_S - \beta_L)}}{\vec{I}_1^S \cdot e^{-j\beta_L}} \tag{31}$$

Spannungsgleichung in Raumzeigerdarstellung

$$\vec{U}_1^S = R_1 \cdot \vec{I}_1^S + \frac{d\vec{\psi}_1^S}{dt} \tag{32}$$

Allgemein Flussverkettung

$$\psi = N \cdot \phi \tag{33}$$

Flussverkettung im Ständer

$$\vec{\psi}_1^S = l_1 \cdot \vec{I}_1^S + M \cdot \vec{I}_2^S \tag{34}$$

Flussverkettung des Ständers im rotierenden Koordinatensystem

$$\vec{\psi}_1^k = \vec{\psi}_1^S \cdot e^{j\beta k} \tag{35}$$

Flussverkettung des Ständers im ständerfesten Koordinatensystem

$$\vec{\psi}_1^S = \vec{\psi}_1^k \cdot e^{j\beta_k} \tag{36}$$

Flussverkettung im Läufer

$$\vec{\psi}_2^S = l_2 \cdot \vec{I}_2^S + M \cdot \vec{I}_1^S \tag{37}$$

Ständerstromraumzeiger

$$\vec{I}_1^S = \frac{\vec{\psi}_1^S}{\sigma L1} - \frac{M}{\sigma L_1 L_2} \cdot \vec{\psi}_2^S \tag{38}$$

Läuferstromraumzeiger

$$\vec{I}_2^S = \frac{\vec{\psi}_2^S}{\sigma L2} - \frac{M}{\sigma L_1 L_2} \cdot \vec{\psi}_1^S = \frac{\vec{I}_\mu^S - \vec{I}_1^S}{1 + \sigma_2} \tag{39}$$

Ständerspannungsgleichung

$$\vec{U}_1^k = R_1 \cdot \vec{I}_1^k + \frac{d\vec{\psi}_1^k}{dt} + j\omega_k \cdot \vec{\psi}_1^k \tag{40}$$

Ständerspannungsgleichung in Raumzeigerdarstellung

$$\vec{U}_1^S = R_1 \cdot \vec{I}_1^S + \frac{d\vec{\psi}_1^S}{dt} = R_1 \cdot \vec{I}_1^S + i_1 \cdot \frac{d\vec{I}_1^S}{dt} + M \cdot \frac{d\vec{I}_2^S}{dt} \tag{41}$$

Läuferspannungsgleichung

$$\vec{U}_2^k = R_2 \cdot \vec{I}_2^k + \frac{d\vec{\psi}_2^k}{dt} + j(\omega_k - \omega_L) \cdot \vec{\psi}_2^k \tag{42}$$

Läuferspannungsgleichung in Raumzeigerdarstellung

$$\vec{U}_2^L = R_2 \cdot \vec{I}_2^L + \frac{d\vec{\psi}_2^L}{dt} = 0 \tag{43}$$

Läuferspannungsgleichung im Ständerkoordinatensystem

$$\vec{U}_2^S = R_2 \cdot \frac{\vec{I}_\mu^S - \vec{I}_1^S}{1 + \sigma_2} - j\omega_L \cdot M \cdot \vec{I}_\mu^S + M \frac{d\vec{I}_\mu^S}{dt} \tag{44}$$

???

$$\vec{I}_1^k = I_\mu(1 - j(\omega_L - \omega_K)\cdot T_2) + T_2 \cdot \frac{dI_\mu}{dt} \quad (45)$$

mit T_2

$$T_2 = \frac{M\cdot(1+\sigma_2)}{R_2} = \frac{L_2}{R_2} \quad (46)$$

Längskomponente (flussbildend): Feldbildung folgt mit Zeitkonstante T_2

$$Re(\vec{I}_1^k) = I_{1d} = I_\mu + T_2\frac{dI_\mu}{dt} \quad (47)$$

Querkomponente (drehmomentbildend): Feldbildung folgt unverzögert

$$Im(\vec{I}_1^k) = I_{1q} = (\omega_K - \omega_L)\cdot T_2 \cdot I_\mu \quad (48)$$

Drehmoment

ToDo: Herausfinden welche Formeln relevant sind

Numerische Feldberechnung

Magnetische Feldstärke = Magnetische Erregung

$$H = \frac{I}{l}[\frac{A}{m}] \quad (49)$$

Maxwellsche Gleichungen in differentieller Form

Durchflutungsgesetz

$$rot\vec{H} = \vec{S} \quad (50)$$

Induktionsgesetz

$$rot\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} \quad (51)$$

Materialgesetz

$$\vec{B} = \vec{J} + \mu_0\cdot\vec{H} \quad (52)$$

Strömungsfeld für elektrische Leiter

$$\vec{S} = k\cdot\vec{E} \quad (53)$$

Quellenfreiheit

$$div\vec{B} = 0 \quad (54)$$

Grundprinzip FEM

- Diskretisierung der Feldgebiete (mit Dreiecken 2D oder Tetraeder 3D)
- iterative Lösung
- magnetische Feldberechnung: magnetische Feldenergie unterschreitet vorgegeben Grenzwert

Da die Rotation für alle wirbelfreien Felder = 0 ist gilt:

magnetische Flussdichte

$$\vec{B} = rot\vec{A} \quad (55)$$

kartesische Koordinaten

$$rot\vec{A} = \frac{\partial\vec{A}}{\partial y}\cdot\vec{i} - \frac{\partial\vec{A}}{\partial x}\cdot\vec{j} \quad (56)$$

Zylinderkoordinaten

$$rot\vec{A} = \frac{1}{r}\frac{\partial\vec{A}}{\partial y}\cdot\vec{e}_r - \frac{\partial\vec{A}}{\partial r}\cdot\vec{e}_\varphi \quad (57)$$

Magnetische Vektorpotential/ magnetische Feldstärke

kartesische Koordinaten

$$\vec{H} = -grad_{\varphi m} = -(\frac{\partial\varphi m}{\partial x}\cdot\vec{i} + \frac{\partial\varphi m}{\partial y}\cdot\vec{j}) \quad (58)$$

Zylinderkoordinaten

$$\vec{H} = -grad_{\varphi m} = -(\frac{\partial\varphi m}{\partial r}\cdot\vec{e}_r + \frac{1}{r}\frac{\partial\varphi m}{\partial\varphi}\cdot\vec{e}_\varphi) \quad (59)$$

Magnetische Energiedichte je Längeneinheit

$$\frac{dW_{mag}}{l} = \frac{1}{2}\mu H^2 dA \quad (60)$$

Betrag der magnetischen Feldstärke

$$H^2 = (\frac{\partial\varphi m}{\partial x})^2 + (\frac{\partial\varphi m}{\partial y}) \quad (61)$$

partielle Ableitungen des Skalarprodukts

$$\frac{\partial\varphi m}{\partial x} = \frac{1}{2A}[(y_2-y_3)\varphi_{m1} + (y_3-y_1)\varphi_{m2} + (y_1-y_2)\varphi_{m3}] \quad (62)$$

$$\frac{\partial\varphi m}{\partial y} = \frac{1}{2A}[(x_3-x_2)\varphi_{m1} + (x_1-x_3)\varphi_{m2} + (x_2-x_1)\varphi_{m3}] \quad (63)$$

Minimum magnetische Feldenergie

$$\frac{\partial W_{mag}/l}{\partial\varphi_m} = 0 \quad (64)$$

Mathematisches Konzept der FEM ßtarke Formulierung"

$$Res = rot\vec{H} - \vec{S} = \frac{1}{\mu}rotrot\vec{A} - \vec{S} \quad (65)$$

ßchwache Formulierung "????

Flussdichte

$$B = J + \mu_0 H = \mu_0\mu_r H \quad (66)$$

aus den gemessenen Kennliniepunkten Geradengleichung

$$\frac{1}{\mu_r - 1} = a^* + b^*\cdot H \quad (67)$$

Permeabilität

$$\mu_r = f(H) = 1 + \frac{1}{a^* + b^*\cdot H} \quad (68)$$

induzierte Spannung

$$|u_{ind}| = w\cdot\frac{d\phi}{dt} = \omega\cdot w\cdot\phi \quad (69)$$

magnetische Spannung

$$V_m = H_\delta\cdot\delta \quad (70)$$

Strombelag

$$A = \quad (71)$$

Grundwelle

$$B_1(\theta) = \mu_0\frac{2\omega}{\pi\delta}\cdot cos(\theta)\cdot i(t) \quad (72)$$

Zonungsfaktor

$$\xi_{Z,1} = \frac{|\vec{U}_{res}|}{|\vec{U}_1| + |\vec{U}_2| + |\vec{U}_3|} \quad (73)$$

Sehnungsfaktor

$$\xi_{S,1} = sin(\frac{\tau_\omega}{\tau_p}) \quad (74)$$

Wicklungsfaktor

$$\xi_1 = \xi_{Z,1}\cdot\xi_{S,1} \quad (75)$$

Wirksame Windungszahl

$$w_1 = N\cdot\xi_1 \quad (76)$$

Grundstrombelag

$$a_p(x,t) = A_p\cdot cos(px - \omega_1 t - \varphi_1) \quad (77)$$

Amplitude der Grundwelle

$$A_p = \frac{3}{\pi}\cdot A = \frac{3\cdot N_1\xi_p\cdot}{\pi\cdot R} \quad (78)$$

Magnetische Spanung über dem Luftspalt

$$V(x,t) = \frac{1}{p}\cdot A_p\cdot R\cdot sin(px - \omega_1 t - \varphi_1) \quad (79)$$

Amplitude B-Feld Grundwelle

$$B_p = \frac{\mu_0}{\delta''}\frac{3\cdot N_1\xi_p}{p\cdot\pi}\cdot\sqrt{2}\cdot I_\mu \quad (80)$$

Synchronmaschine

Formelzeichen	Beschreibung
I_{KS}	Kurzschlussstrom [A]
U_{DC}	Batteriegleichspannung bzw. Zwischenkreisspannung auch U_{Bat} [V]
ψ	Statorfluss [Vs]
ψ_d	d-Komponente des Statorflusses [Vs]
ψ_q	q-Komponente des Statorflusses [Vs]
ψ_{PM}	Permanent Magnetfluss [Vs]
p	Polpaarzahl [-]
$U_{ph,max}$	maximale Phasenspannung [V]
U_{ph}	Phasenspannung [V]
U_d	d-Komponente der Statorspannung [V]
U_q	q-Komponente der Statorspannung [V]
I_d	d-Komponente des Statorstrom [A]
I_q	q-Komponente des Statorstrom [A]
m_o	Modulations Index [-]
M	Drehmoment [Nm]
M_{Ref}	Referenzdrehmoment [Nm]
n	mechanische Drehzahl [rpm]
L_d	d-Komponente der Induktivität der Statorwicklung [H]
L_q	q-Komponente der Induktivität der Statorwicklung [H]
R_s	Statorwiderstand [Ω]
I_{max}	maximaler Phasenstrom [A]
ω_{el}	elektrische Winkelgeschwindgkeit [$\frac{rad}{s}$]
ω_{mech}	mechanische Winkelgeschwindgkeit [$\frac{rad}{s}$]
U_{EMF}	induzierte Spannung (EMF = Elektric Motoric Force) [V]
$u_{a,b,c}$	Strangspannungen [V]