

Asynchronmaschine

Formelzeichen	Beschreibung
X_h	Hauptreaktanzen [?]
X_k	Streuereaktanz [?]
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 (asynchron) [$\frac{1}{min}$]
s	Schlupf [%]
p	Polpaarzahl
I_μ	?
I_1	?
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

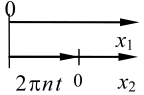
Am Netz

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

Grundfeld einer Drehstromwicklung:

$$b_p(x, t) = B_p \cdot \cos(px - \omega_1 t) \tag{1}$$

Zusammenhang Ständer- und Läuferkoordinaten:



$$x_1 = 2\pi n t + x_2 \tag{2}$$

Frequenz:

$$f_2 = f_1 \cdot (1 - n \cdot p / f_1) = f_1 - p n \tag{3}$$

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

$$n = n_1 = f_1 / p = 1 - \frac{p \cdot n}{f_1} \tag{4}$$

dreht, so ist die Läuferfrequenz Null.

$$f_2 = s \cdot f_1 \tag{5}$$

Schlupf:

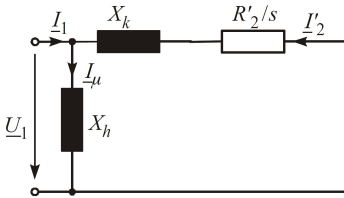
Bei Leerlauf ist $s = 0$, im Stillstand $s = 1$.

$$s = 1 - \frac{p \cdot n}{f_1} = 1 - \frac{n}{n_1} = \frac{n_1 - n}{n_1} \tag{6}$$

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

Ersatzschaltbild

Strangsgröße werden im ESB mit ' gekennzeichnet (sie unterscheiden sich nur durch die Phasenlagen)



$$I_\mu = I_1 + I_2 \tag{7}$$

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

im Läufer **umgesetzte Leistung:** (Läuferverlustleistung)

$$P_\mu = 3 \cdot I_2' \cdot \frac{R_2'}{s} = s \cdot P_\mu + (1 - s) \cdot P_\mu = P_{Cu2} + P_{mech} \tag{8}$$

'Gesetz über die Spaltung der Luftspaltleistung':

Stromwärmeverluste in der Läuferwicklung:

$$P_{Cu2} = 3 \cdot I_2' \cdot R_2' = s \cdot P_\mu \tag{9}$$

mechanische Leistung:

$$P_{mech} = P_\mu - P_{Cu2} = P_\mu \cdot (1 - s) \tag{10}$$

Drehmoment:

$$M = \frac{P_{mech}}{2\pi n} = \frac{P_\mu(1 - s)}{2\pi n_1(1 - s)} = \frac{P_\mu}{2\pi n_1} \tag{11}$$

Wirkungsgrad:

$$\eta = \frac{P_{Welle}}{P_{el}} \tag{12}$$

Stromortskurve

Leitwertstromortskurve(?????)

$$s = 0 : \quad \underline{Y}_0 = \frac{-j}{X_R} \tag{13}$$

$$s = \infty : \quad \underline{Y}_\infty = \frac{-j}{X_R} - \frac{j}{X_K} \tag{14}$$

Kreismitelpunkt:

$$\underline{Y} = \frac{-j}{X_R} - \frac{j}{2X_K} \tag{15}$$

Kreisradius:

$$r = \frac{1}{2X_K} \tag{16}$$

Leerlaufstrom/Magnetisierungsstrom: $I_0 = I_\mu (0|0) - P_0$

Ständerstrom $I_1 (0|0) - P$

Läuferstrom $I_2' P - P_0$

$$\overline{P_k C} \sim (3) \cdot R_2' I_{2k}'^2 (= 2\pi n_1 M_A) \tag{17}$$

*Faktor 3 nur bei Sternschaltung

$$\overline{P_0 B} \sim I_2'^2 \tag{18}$$

$$\overline{P_0 C} \sim I_{2k}'^2 \tag{19}$$

Läuferstromwärmeverluste:

$$\overline{A B} = \frac{\overline{P_0 B}}{\overline{P_0 C}} \cdot \overline{P_k C} \sim \frac{I_2'^2}{I_{2k}'^2} (3) \cdot R_2' I_{2k}'^2 = P_{Cu2} \tag{20}$$

Luftspaltleistung/elektrisch aufgenommene Leistung:

$$\overline{P B} \sim P_{el} = P_\delta \tag{21}$$

mechanische Leistung:

$$\overline{P A} \sim P_{mech} = P_\delta - P_{Cu2} \tag{22}$$

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.

$$M_A = \left(\frac{U_A}{U_A^*}\right)^2 \cdot M_A^* \tag{23}$$

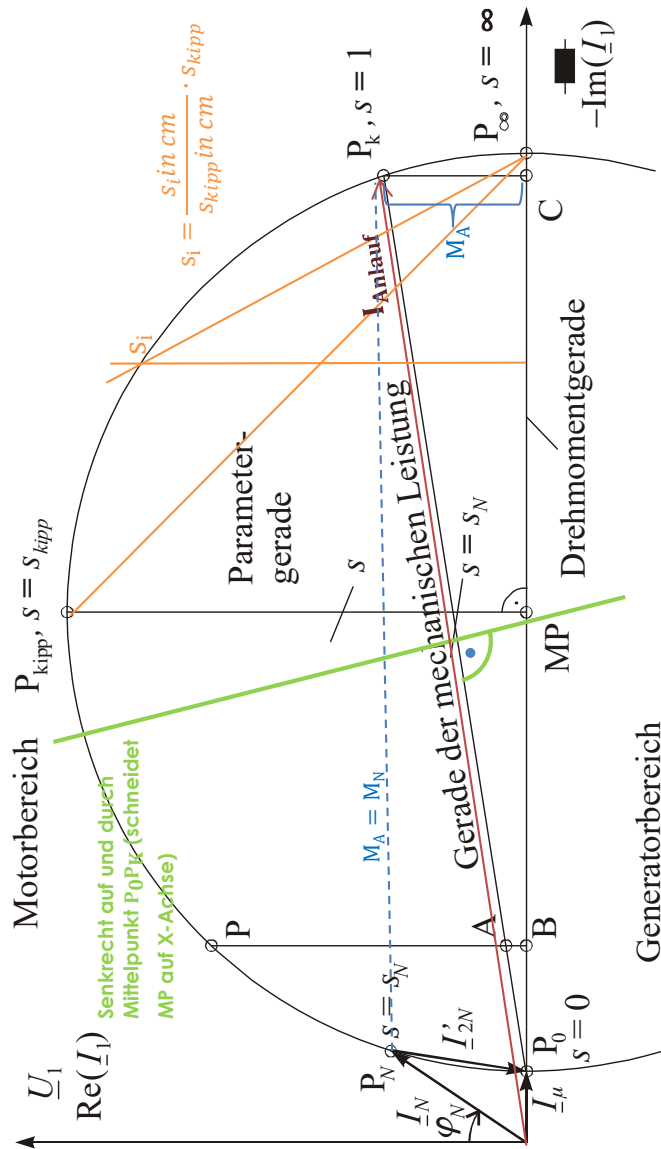
$$I_A = \frac{U_N}{U_N^*} \cdot I_A^* \tag{24}$$

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

ESB von magnetisch gekoppelten Stromkreisen einfügen
Spannungsgleichungen der beiden Stromkreise

$$\underline{U}_1 = (R_1 + j\omega L_{1\sigma}) \cdot \underline{I}_1 + j\omega L_{1h} \cdot \underline{I}_\mu \quad (25)$$

$$\underline{U}'_2 = (R'_2 + j\omega L'_{2\sigma}) \cdot \underline{I}'_2 + j\omega L_{2h} \cdot \underline{I}_\mu \quad (26)$$

ESB zweier magnetisch gekoppelter Stromkreise fehlt noch

Streuzyffler

$$\sigma_1 = \frac{L_{1\sigma}}{L_{1h}} \quad (27)$$

Gesamtstreuung

$$\sigma = 1 - \frac{1}{(1 + \sigma_1) \cdot (1 + \sigma_2)} = 1 - \frac{M^2}{L_1 L_2} = 1 - \frac{M^2}{M(1 + \sigma_1) + M(1 + \sigma_2)} \quad (28)$$

Strangströme für Feldmaxima

$$b_u(t) = B \cdot \cos(\omega t) = \text{Re}(b_u(t) \cdot e^{j\epsilon_0}) \quad (29)$$

$$b_v(t) = B \cdot \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) = \text{Re}(b_v(t) \cdot e^{j\epsilon_0} \cdot e^{j\frac{2\pi}{3}}) \quad (30)$$

$$b_w(t) = B \cdot \cos(\omega t - \frac{4\pi}{3}) = \text{Re}(b_w(t) \cdot e^{j\epsilon_0} \cdot e^{j\frac{4\pi}{3}}) \quad (31)$$

$$b_{res}(t) = \text{Re}(e^{j\epsilon_0} (b_u(t) + b_v(t) \cdot \underbrace{e^{j\frac{2\pi}{3}}}_a + b_w(t) \cdot \underbrace{e^{j\frac{4\pi}{3}}}_{a^2})) \quad (32)$$

Definition des Raumzeigers

$$\vec{B} = \frac{2}{3} (b_u(t) + \underline{a} \cdot b_v(t) + \underline{a}^2 \cdot b_w(t)) \quad (33)$$

Raumzeiger von Strömen

$$\vec{I} = \frac{2}{3} (i_u(t) + \underline{a} \cdot i_v(t) + \underline{a}^2 \cdot i_w(t)) \quad (34)$$

bei symmetrischen Ströme

$$i_u(t) + i_v(t) + i_w(t) = 0 \quad (35)$$

Stromraumzeiger

$$\vec{I}_1 = \frac{2}{3} (i_u(t) + \underbrace{(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2})}_{e^{j\frac{2\pi}{3}}} \cdot i_v(t) + \underbrace{(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2})}_{e^{j\frac{4\pi}{3}}} \cdot i_w(t)) \quad (36)$$

Ersatzströme

$$I_{1\alpha} = \text{Re}(\vec{I}_1) = i_u(t) \quad (37)$$

$$I_{1\beta} = \text{Im}(\vec{I}_1) = \frac{i_v(t) - i_w(t)}{\sqrt{3}} \quad (38)$$

Koordinatentransformation

ständerfeste Koordinaten: Index S

$$\vec{I}_1^S = \hat{I}_1 \cdot e^{j\beta_S} = \vec{I}_1^L \cdot e^{j\beta_L} \quad (39)$$

$$I_{1\alpha} = \hat{I}_1 \cdot \cos\beta_S \quad (40)$$

$$I_{1\beta} = \hat{I}_1 \cdot \sin\beta_S \quad (41)$$

läuferfeste Koordinaten: Index L

$$\vec{I}_1^L = \frac{\hat{I}_1 \cdot e^{j(\beta_S - \beta_L)}}{\vec{I}_1^S \cdot e^{-j\beta_L}} \quad (42)$$

Spannungsgleichung in Raumzeigerdarstellung

$$\vec{U}_1^S = R_1 \cdot \vec{I}_1^S + \frac{d\vec{\phi}_1^S}{dt} \quad (43)$$

.... nachher geht es weiter

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 Winkelgeschwindigkeit [$\frac{rad}{s}$]
ω_{mech}	mechanische Winkelgeschwindigkeit [$\frac{rad}{s}$]
U_{EMF}	induzierte Spannung (EMF = Elektric Motoric Force) [V]
$u_{a,b,c}$	Strangspannungen [V]