

Aufgabe 1:

1. Rollwiderstand: $F = m \cdot g \cdot \mu_r \cdot \cos \alpha$ (1 Punkt)

Hangabtrieb: $F = m \cdot g \cdot \sin \alpha$ (1 Punkt)

Windwiderstand: $F = c_w \cdot A \cdot \frac{\rho_{\text{Luft}}}{2} \cdot v^2$ (1 Punkt)

2. $F = m \cdot g \cdot (\mu_r \cdot \cos \alpha + \sin \alpha) + c_w \cdot A \cdot \frac{\rho_{\text{Luft}}}{2} \cdot v^2 = 750 \text{ N}$

$P = F \cdot v = 27,1 \text{ kW}$ (1 Punkt)

3. $M = F \cdot \frac{d_{\text{Rad}}}{2} = 225 \text{ Nm}$ (1 Punkt)

$n = \frac{v}{\pi \cdot d_{\text{Rad}}} = 1149 \text{ min}^{-1}$ (1 Punkt)

4. $\alpha = \arctan(30 \%) = 0,2915 \text{ rad}$

$F = m \cdot g \cdot (\mu_r \cdot \cos \alpha + \sin \alpha) + c_w \cdot A \cdot \frac{\rho_{\text{Luft}}}{2} \cdot v^2 = 2948 \text{ N}$

$P = F \cdot v = 24,6 \text{ kW}$

$M = F \cdot \frac{d_{\text{Rad}}}{2} = 884 \text{ Nm}$ (1 Punkt)

$n = \frac{v}{\pi \cdot d_{\text{Rad}}} = 265 \text{ min}^{-1}$ (1 Punkt)

5. $F = 2948 \text{ N}$ (s. o.)

$a = \frac{F}{m} = 2,948 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ (1 Punkt)

$v = a \cdot t \Rightarrow t = \frac{v}{a} = 2,83 \text{ s}$ (1 Punkt)

6. Asynchronmotor (besser), fremderregter Gleichstrommotor

Permanentmagnetmotoren wie in EA1 dargestellt fallen wg. mangelnder Feldschwächbarkeit weg (wenn jemand L_1 bei PSM ausreichend groß wählt, wird dies als Begründung anerkannt; analog, wenn jemand offensichtlich elektrisch erregte Synchronmaschinen oder geschaltete Reluktanzantriebe ausreichend kennt); Reihenschlussmotor ist nicht feldschwächbar.

Gründe: z. B. Feldschwächbarkeit, Wartungsarmut, Überlastbarkeit im Grunddrehzahlbereich, Rückwärtsfahren, 4 Quadranten, Fehlerverhalten

Aufgabe 2

$$1. \quad P_{1N} = P_N \cdot \frac{n_0}{n_N} = 30 \text{ kW} \cdot \frac{1500 \text{ min}^{-1}}{1485 \text{ min}^{-1}} = 30,3 \text{ kW}$$

$$S_{1N} = \frac{P_N}{\cos \varphi_N} = \frac{30,3 \text{ kW}}{0,85} = 35,7 \text{ kVA}$$

$$2. \quad \frac{M_N}{M_{\text{Kipp}}} = \frac{2}{\frac{f_{2N}}{f_{2\text{Kipp}}} + \frac{f_{2\text{Kipp}}}{f_{2N}}}$$

$$f_{2\text{Kipp}}^2 - \frac{2M_{\text{Kipp}}}{M_N} \cdot f_{2N} \cdot f_{2\text{Kipp}} + f_{2N}^2 = 0$$

$$f_{2\text{Kipp}} = f_{2N} \cdot \left(\frac{M_{\text{Kipp}}}{M_N} + \sqrt{\left(\frac{M_{\text{Kipp}}}{M_N} \right)^2 - 1} \right) = \frac{1500 \text{ min}^{-1} - 1485 \text{ min}^{-1}}{1500 \text{ min}^{-1}} \cdot 50 \text{ Hz} \cdot \left(2,2 + \sqrt{2,2^2 - 1} \right) = 2,08 \text{ Hz}$$

oder

$$\frac{M_N}{M_{\text{Kipp}}} \approx \frac{2 \cdot f_{2N}}{f_{2\text{Kipp}}} \Rightarrow f_{2\text{Kipp}} \approx 2 \cdot f_{2N} \cdot \frac{M_{\text{Kipp}}}{M_N} = 2 \cdot 0,5 \text{ Hz} \cdot 2,2 = 2,2 \text{ Hz}$$

$$3. \quad M_{\text{Kipp},N} = M_N \cdot \left(\frac{M_{\text{Kipp}}}{M_N} \right) = \frac{P_N}{2\pi \cdot n_N} \cdot \left(\frac{M_{\text{Kipp}}}{M_N} \right) = \frac{30 \text{ kW}}{2\pi \cdot 1485 \text{ min}^{-1} \cdot \frac{\text{min}}{60 \text{ s}}} \cdot 2,2 = 424,4 \text{ Nm}$$

$$P_{\text{Kipp}}(f_1) = 2\pi \cdot n_{\text{Kipp}}(f_1) \cdot M_{\text{Kipp}}(f_1) = 2\pi \cdot \frac{f_1 - f_{2\text{Kipp}}}{p} \cdot M_{\text{Kipp},N} \cdot \left(\frac{f_{1N}}{f_1} \right)^2$$

$$4. \quad f_{1\text{max}}^2 - \frac{f_{1\text{max}} \cdot 2\pi \cdot M_{\text{Kipp},N} \cdot f_{1N}^2}{p \cdot P_{\text{Kipp}}} + \frac{f_{2\text{Kipp}} \cdot 2\pi \cdot M_{\text{Kipp},N} \cdot f_{1N}^2}{p \cdot P_{\text{Kipp}}} = 0$$

$$f_{1\text{max}}^2 - \frac{f_{1\text{max}} \cdot f_{1N} \cdot P_{\text{Kipp},N}}{P_{\text{Kipp}}} + \frac{f_{2\text{Kipp}} \cdot f_{1N} \cdot P_{\text{Kipp},N}}{P_{\text{Kipp}}} = 0$$

$$f_{1\text{max}} = \frac{f_{1N} \cdot P_{\text{Kipp},N}}{2 \cdot P_{\text{Kipp}}} \left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{f_{2\text{Kipp}} \cdot P_{\text{Kipp}} \cdot 4}{f_{1N} \cdot P_{\text{Kipp},N}}} \right)$$

$$\frac{P_{\text{Kipp},N}}{P_{\text{Kipp}}} = \frac{2\pi \cdot M_{\text{Kipp},N} \cdot (f_{1N} - f_{2\text{Kipp}})}{p \cdot P_{\text{Kipp}}} = \frac{2\pi \cdot 424,4 \text{ Nm} \cdot (50 \text{ Hz} - 2,08 \text{ Hz})}{2 \cdot 30 \text{ kW}} = 2,13$$

$$f_{1\text{max}} = \frac{50 \text{ Hz} \cdot 2,13}{2} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{2,08 \text{ Hz} \cdot 4}{50 \text{ Hz} \cdot 2,13}} \right) = 104,4 \text{ Hz}$$

$$n_{\text{max}} = \frac{f_{1\text{max}} - f_{2\text{Kipp}}}{p} = \frac{104,4 \text{ Hz} - 2,08 \text{ Hz}}{2} = 3069 \text{ min}^{-1}$$

Alternativer vereinfachter Ansatz:

$$M_{\text{Kipp}} = \frac{P_{\text{Kipp,N}}}{2\pi n}$$

$$M_{\text{Kipp}} \sim \left(\frac{U_N}{f_{1 \text{ Kipp}}} \right)^2$$

$$\frac{P_{\text{Kipp,N}}}{2\pi n} = c \left(\frac{U_N}{f_{1 \text{ Kipp}}} \right)^2$$

$$n_{\text{max}} = 3061 \text{ min}^{-1}$$

$$5. \quad \ddot{u} = \frac{n_{\text{Rad}}}{n_{\text{max}}} = \frac{1300 \text{ min}^{-1}}{3069 \text{ min}^{-1}} = 0,4236$$

$$6. \quad M_{\text{Motor}} = M_{\text{Kipp,N}} = 424,4 \text{ Nm}$$

$$M_{\text{Rad}} = \frac{M_{\text{Motor}}}{\ddot{u}} \cdot \eta_G = \frac{424,4 \text{ Nm}}{0,4236} \cdot 0,9 = 902 \text{ Nm}$$

7. nein, da $I_1 > I_{1N}$ (Begründung nicht erforderlich)

$$8. \quad U_{1\text{max}} = \frac{U_{\text{BN}}}{\sqrt{2}} = 141,4 \text{ V}$$

$$f_{1\text{max}}' = \frac{U_{1\text{max}}}{U_{1N}} \cdot f_{1N} = 47,1 \text{ Hz}$$

$$n_{1\text{max}}' = \frac{f_{1\text{max}}' - f_{2N}}{p} = \frac{47,1 \text{ Hz} - 0,5 \text{ Hz}}{2} = 1398 \text{ min}^{-1}$$

$$9. \quad n_{1\text{Kipp,Gen}}' = \frac{f_{1\text{max}}' + f_{2\text{Kipp}}}{p} = \frac{47,1 \text{ Hz} + 2,08 \text{ Hz}}{2} = 1475 \text{ min}^{-1}$$

10. ja: der Motor erreicht bei Höchstgeschwindigkeit etwa 27 kW unter Berücksichtigung des Getriebe-Wirkungsgrads (mit leichten Abstrichen wg. der Batteriespannung, die ggfs. erhöht werden müsste), und er kann bei niedrigen Drehzahlen mehr als 900 Nm am Rad erzeugen.

Aufgabe 3

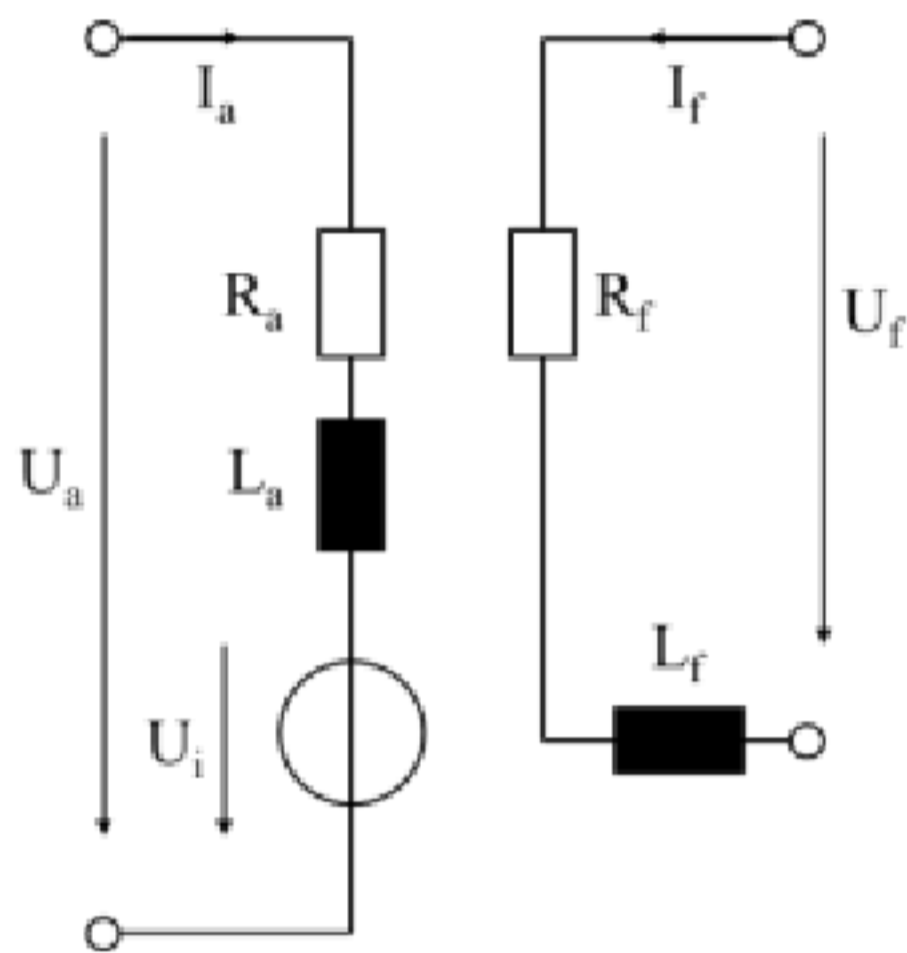
$$1. \quad R_a = \frac{U_{aN} \cdot I_{aN} - P_N}{I_{aN}^2} = \frac{250 \text{ V} \cdot 43 \text{ A} - 10 \text{ kW}}{(43 \text{ A})^2} = 0,4056 \Omega$$

$$R_f = \frac{U_{fN}}{I_{fN}} = \frac{200 \text{ V}}{0,4 \text{ A}} = 500 \Omega$$

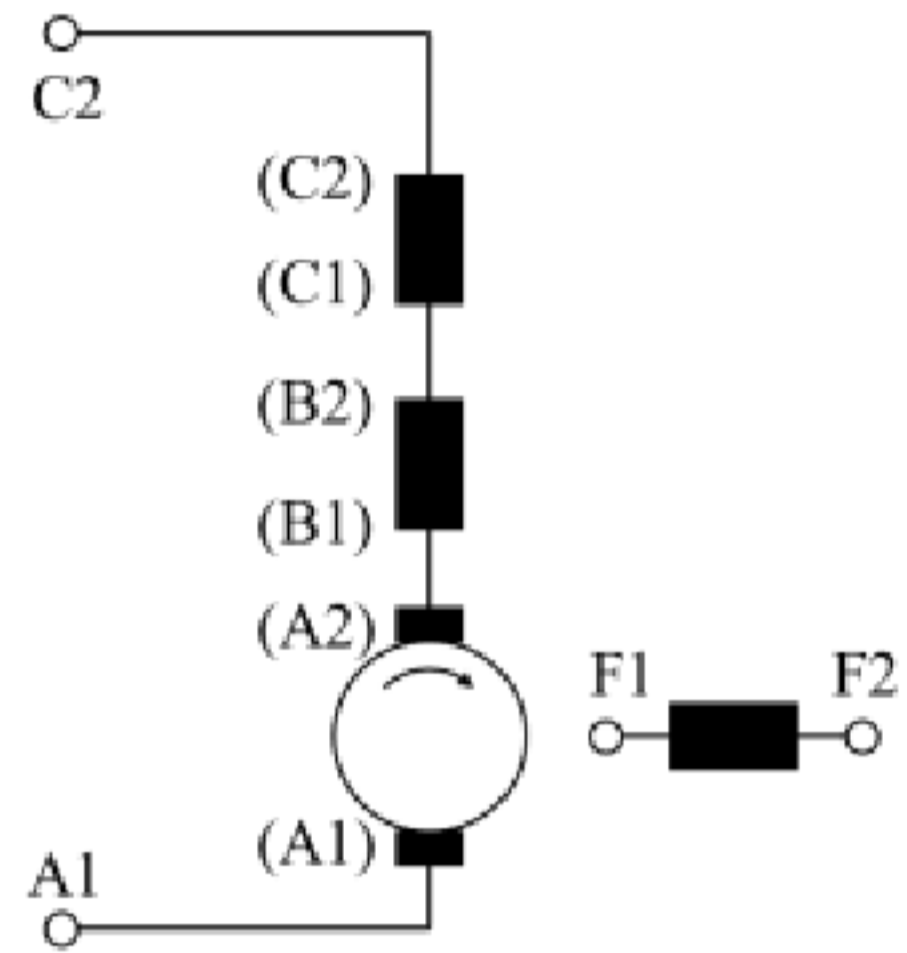
$$2. \quad L_a = T_a \cdot R_a = 5 \text{ ms} \cdot 0,4056 \Omega = 2,03 \text{ mH}$$

$$L_f = T_f \cdot R_f = 500 \text{ ms} \cdot 500 \Omega = 250 \text{ H}$$

3.



oder

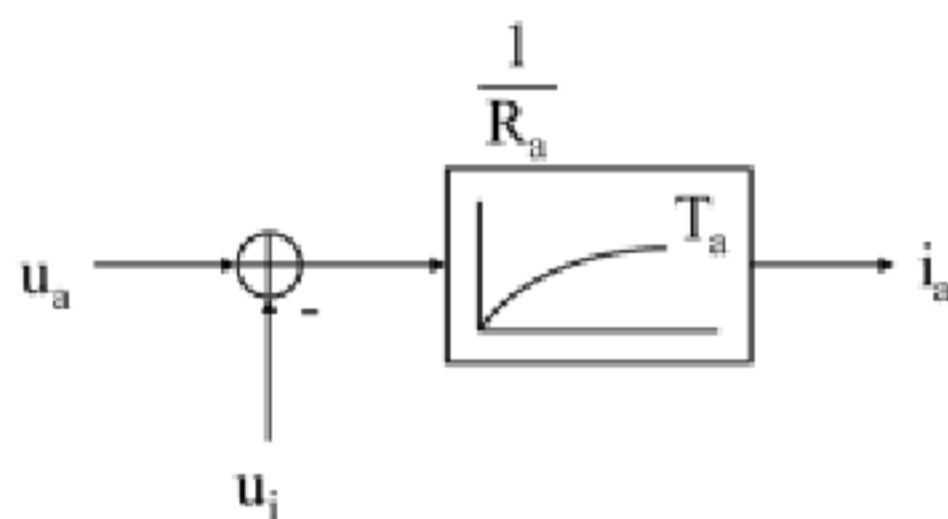


$$4. \quad k\phi_N = \frac{U_{aN} - R_a \cdot I_{aN}}{n_N} = \frac{250 \text{ V} - 0,4056 \Omega \cdot 43 \text{ A}}{1000 \text{ min}^{-1}} \cdot \frac{60 \text{ s}}{\text{min}} = 13,95 \text{ Vs}$$

$$5. \quad u_a = u_i + R_a \cdot i_a + L_a \cdot \frac{di_a}{dt}$$

$$G_a = \frac{I_a}{U_a - U_i} = \frac{1}{R_a + sL_a}$$

6.



7. z. B. nach dem Betragsoptimum

$$T_I = T_a = 5 \text{ ms}$$

$$K_R = \frac{T_{S1}}{2 \cdot V_s \cdot T_{S2}} = \frac{5 \text{ ms}}{2 \cdot \frac{1}{0,4056 \Omega} \cdot 0,5 \text{ ms}} = 2,03 \Omega$$

8. Ohne Feldschwächung würde U_a zu groß werden.

Regelgröße: u_a oder besser u_i

Stellgröße: $k\Phi$, i_f oder u_f (kF : nicht messbar, i_f : nicht direkt einstellbar, u_f am besten geeignet)

9. mögliche Strategien:

- u_i aus Modell berechnen
- u_a aus Modell berechnen

Beispiel für erste Variante: i_f muss auf I_{fN} begrenzt werden, in der Begrenzung darf der Integrator des PI-Reglers nicht weiterlaufen.

