

Aufgabe 37: ASM - Motorbetrieb

Eine Asynchronmaschine wird im Motorbetrieb untersucht. Die bekannten Daten sind
Nenn Drehzahl: $n_N = 980 \text{ min}^{-1}$, Kippschlupf: $s_K = 10\%$, Leistungsfaktor im Nennbetrieb: $\cos \varphi_N = 0.95$, Polpaarzahl: 3, Wirkungsgrad im Nennbetrieb: $\eta_N = 94\%$
sowie das Stillstandsmoment $M_{el,st} = 22 \text{ Nm}$.

Es werden stationäre Verhältnisse vorausgesetzt. Stator und Rotorverlust sind zu berücksichtigen. Reibungsverluste können vernachlässigt werden.

Netzdaten: $f_{\text{Netz}} = 50 \text{ Hz}$, $U_L = 400 \text{ V}$

37.1 Skizzieren Sie die Kennlinie $M(s)$ und $M(n)$ im relevanten Bereich.

Bestimmen Sie

37.2 die Synchron Drehzahl n_{sync}
($n_{\text{sync}} = 1000 \text{ min}^{-1}$)

37.4 das Kippmoment M_K
($M_K = 111 \text{ Nm}$)

37.3 den Nennschlupf s_N ($s_N = 2\%$)

37.5 das Nennmoment M_N ($M_N = 42.7 \text{ Nm}$)

Die Maschine ist jetzt im Nennbetrieb. Berechnen Sie

37.6 die Nennleistung P_N ($P_N = 4.39 \text{ kW}$) **37.11** den Leiterstrom I_L ($I_L = 7.1 \text{ text A}$)

37.7 die Gesamtleistung P_{el} ($P_{el} = 4.67 \text{ kW}$) **37.12** die Blindleistung ($Q = 1.5 \text{ kvar}$)

37.8 die Luftspaltleistung ($P_\delta = 4.47 \text{ kW}$) **37.13** die Scheinleistung ($S = 4.9 \text{ kVA}$)

37.9 die Statorverlustleistung $P_{V,\text{Stator}}$ ($P_{V,\text{Stator}} = 190 \text{ W}$)

37.10 die Rotorverlustleistung $P_{V,\text{Rotor}}$ ($P_{V,\text{Rotor}} = 89 \text{ W}$)

Die Maschine wird jetzt mit $M = 10 \text{ Nm}$ belastet.

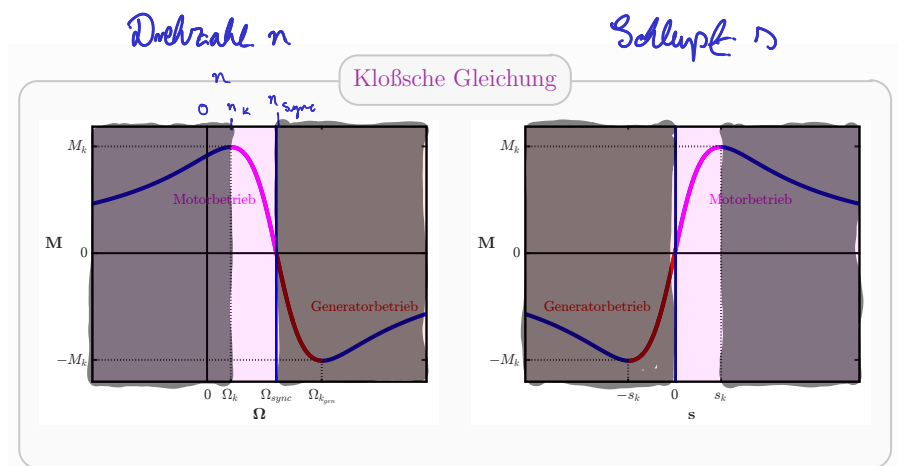
37.14 Bestimmen Sie die sich einstellenden Drehzahl n ($n = 995 \text{ min}^{-1}$)

37.15 Welchen Wirkungsgrad hätte die AS-Maschine, wenn sich weder U_L , I_L noch der Leistungsfaktor ändern würde? ($\eta_N = 22\%$)

Lösung

① Steine Klosssche Gleichung

$$M \approx \frac{2M_K}{\frac{D}{D_K} + \frac{D_K}{D}}$$



② Synchrondrehzahl

aus $n_{sync} = \frac{60}{p}$

$$\rightarrow n_{sync} = \frac{50 \text{ Hz}}{3} = 16,7 \frac{1}{s}$$

$$\rightarrow n_{sync} = 1000 \text{ min}^{-1}$$

③ Nennschlupf

aus $s \approx \frac{n_{sync} - n}{n_{sync}}$

$$\rightarrow s_N = \frac{1000 - 980}{1000} \approx 2\%$$

④ Steppmoment

aus $M \approx \frac{2M_K}{\frac{D}{D_K} + \frac{D_K}{D}}$

mit Stillstandsmoment M_{still} und

Stillstands-schlupf: $s_{still} = \frac{n_{sync} - 0}{n_{sync}} \approx 1$

$$\rightarrow M_K \approx \frac{1}{2} M_{still} \left(\frac{D_{still}}{D_K} + \frac{D_K}{D_{still}} \right) \approx \frac{1}{2} 22 \text{ Nm} \left(\frac{1}{0,1} + 0,1 \right)$$

$$M_K \approx 111,1 \text{ Nm}$$

⑤ Nennmoment

$$\text{Aus } M = \frac{2 M_K}{\frac{p}{n_K} + \frac{p_B}{n}} \quad \rightarrow \quad M_N = \frac{2 \cdot 111,1}{\frac{0,02}{0,1} + \frac{0,1}{0,02}} \quad \rightarrow \quad M_N = 42,7 \text{ Nm}$$

⑥ Nennleistung

$$\text{Aus } P_N = \Omega_N \cdot M_N \quad \rightarrow \quad P_N = 2\pi \cdot n_N \cdot M_N = 2\pi \cdot 380 \cdot \frac{1}{60s} \cdot 42,7 \text{ Nm}$$

$$\rightarrow P_N = 4,39 \text{ kW}$$

⑦ Gesamte elektrische Leistung

$$\text{Aus } \eta = \frac{\text{Gesamte (mech.) Leistung}}{\text{Gesamte elektrische Leistung}} \quad \rightarrow \quad \eta = \frac{P_N}{P_{el}}$$

$$\rightarrow P_{el} = \frac{P_N}{\eta} = 4,67 \text{ kW}$$

⑧ Luftspaltleistung

$$\text{Aus } P_\delta = \Omega_{\text{Spa}} \cdot M \quad \rightarrow \quad P_\delta = 2\pi \cdot 1000 \cdot \frac{1}{60s} \cdot 42,7 \text{ Nm}$$

$$\rightarrow P_\delta = 4,47 \text{ kW}$$

⑨ Statorverluste

$$\text{Aus } P_{V, \text{Stator}} = P_{el} - P_\delta \quad \rightarrow \quad P_{V, \text{Stator}} = 190 \text{ W}$$

Man rechnet mit genauen Zahlenwerte aus ⑦ und ⑧

⑩ Rotorverluste

$$\text{Aus } P_{V, \text{Rotor}} = P_\delta - P_N \quad \rightarrow \quad P_{V, \text{Rotor}} = 89 \text{ W}$$

⑪ Leitstrom

Für das Drehfeld gilt

$$P_{el} = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos \varphi$$

$$\rightarrow I_L = \frac{P_{el}}{\sqrt{3} \cdot U_L \cdot \cos \varphi}$$

also $I_L = 7,1 \text{ A}$

⑫ Blindleistung

Aus $Q = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \sin \varphi$

$\rightarrow Q = 1,5 \text{ kvar}$

⑬ Scheinleistung

$$S = \sqrt{P_{el}^2 + Q^2}$$

$\rightarrow S = 4,81 \text{ kVA}$

Geht Belastung mit $M = 10 \text{ nN}$

⑭ Drehzahl

Aus $M = \frac{2 M_K}{\frac{n}{n_K} + \frac{n_K}{n}}$ folgt Schleppf

$$\rightarrow M \cdot (n^2 + n_K^2) = 2 M_K \cdot n_K \cdot n$$

$$n^2 - 2 \frac{M_K}{M} n_K \cdot n + n_K^2 = 0$$

$$\rightarrow n_{1,2} = \frac{M_K}{M} \cdot n_K \pm \sqrt{\left(\frac{M_K}{M} \cdot n_K\right)^2 - n_K^2}$$

Wähle „Minus“, da im Motorbetrieb: $0 < n < n_K$ gilt

$$n = 0,45$$

Geht Drehzahl aus $n = \frac{n_{\text{Sync}} - n}{n_{\text{Sync}}}$

$$\rightarrow n = n_{\text{Synch}} (1 - D) = n_{\text{Synch}} \left(\frac{M_K}{M} D_K - \sqrt{\left(\frac{M_K}{M} D_K \right)^2 - D_K^2} \right)$$

also $n = 995 \text{ min}^{-1}$

⑮ Wirkungsgrad bei diesem Betrieb

$$\text{Aus } \eta = \frac{P_{\text{mech}}}{P_{\text{el}}} \rightarrow \eta = \frac{2\pi n \cdot M}{P_{\text{el}}} = \frac{2\pi \cdot 995 \cdot \frac{1}{60 \text{ s}} \cdot 10 \text{ Nm}}{4,67 \text{ kW}}$$

$\rightarrow \eta = 22,3 \%$

Aufgabe 38: *ASM - Stern/Dreieck-Anlauf*

Ein Drehstrom-Asynchronmotor mit Käfigläufer hat auf dem Leistungsschild folgende Angaben: 3 kW, Schaltung Δ , 400 V, 6,5 A, $\cos \varphi = 0,84$, 955 min^{-1} , 50 Hz.

38.1 Erläutern Sie alle Angaben auf dem Typenschild.

38.2 Berechnen Sie die Schein-, Blind- und Wirkleistung sowie die Verlustleistung.

$$(S = 4500 \text{ VA}, Q = 2440 \text{ var}, P = 3780 \text{ W}, P_V = 780 \text{ W})$$

38.3 Geben Sie den Wirkungsgrad, den Strang- und Leiterstrom, die Strang- und Leiterspannung und das Nennmoment an.

$$(\eta = 0,8, I_L = 6,5 \text{ A}, I_{str} = 3,75 \text{ A}, U_L = U_{str} = 400 \text{ V}, M_N = 30 \text{ Nm})$$

38.4 Geben Sie die maximale Polpaarzahl an. Verwenden Sie diese, um die Synchron-drehzahl und den Schlupf zu bestimmen. ($p = 3$, $n_{sync} = 1000 \text{ min}^{-1}$, $s = 0,045$)

38.5 Das Kippmoment ist nun $M_k = 2,67 \cdot M_N$. Welchen Wert hat der Kippschlupf s_k ?

$$(M_k = 80 \text{ Nm}, s_k = 0,23)$$

Jetzt wird der Anlauf der Maschine betrachtet

38.6 Die Maschine wird mit einem Lastmoment $M_L = \left((0,004 \text{ min} \cdot n)^2 + 5\right) \text{ Nm}$ belastet. Skizzieren Sie die Momentenkennlinie für die Dreieck- und Sternschaltung und das Lastmoment M_L in eine Grafik ($M - n$ -Diagramm).

38.7 Bei welcher Drehzahl n_u sollte beim Anfahren die Umschaltung von Stern- auf Dreieckschaltung erfolgen, wenn der Motor durch die Arbeitsmaschine mit dem obigen Lastmoment M_L belastet wird? Welche stationäre Betriebsdrehzahl n_N stellt sich ein? ($n_u = 910 \text{ min}^{-1}$, $n_N = 970 \text{ min}^{-1}$)

38.8 Wie groß sind im Stillstand die Außenleiter- und Strangströme bei direktem Einschalten und bei Stern-Dreieck-Anlauf, wenn der Stillstandstrom des Motors $6 \cdot I_N$ beträgt? (Δ : $I_L = 39 \text{ A}$, $I_S = 22,5 \text{ A}$, Δ : $I_L = I_S = 13 \text{ A}$)

Lösung

① Alle Angaben sind Angaben für den Nennbetrieb

$P_N = 3 \text{ kW}$ Nennleistung (hier nutzbare mechanische Leistung)

Δ / λ ... Motor wird im Nennbetrieb im Dreieckschaltung betrieben

Anlauf im λ -Betrieb, der bestimmten Drehzahl wird auf Δ umgeschaltet

$U_N = U_L = 400 \text{ V}$... Außenleiterspannung

$I_N = I_L = 6,5 \text{ A}$... Außenleiterstrom

$\cos \varphi = 0,84$... Leistungsfaktor (immer positiv)

$n_N = 855 \text{ min}^{-1}$... Nenndrehzahl

$f = 50 \text{ Hz}$... Frequenz Drehfeld

② Scheinleistung: $S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I = \sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 6,5 \text{ A}$

$$\rightarrow S = 4500 \text{ VA}$$

Blindleistung: $Q = S \cdot \sin \varphi = \sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 6,5 \text{ A} \cdot \sin(\arccos 0,84)$

$$Q = 2440 \text{ var}$$

Wirkleistung: $P = S \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 6,5 \cdot 0,84$

$$\rightarrow P = 3780 \text{ W}$$

Verlustleistung: $P_V = P - P_N = 3780 \text{ W} - 3000 \text{ W}$

$$\rightarrow P_V = 780 \text{ W}$$

③ Wirkungsgrad: $\eta = \frac{P_N}{P} = \frac{3000 \text{ W}}{3780 \text{ W}} \rightarrow \boxed{\eta = 80\%}$

$I_L = 6,5 \text{ A} \rightarrow \text{bei } \Delta \quad I_{\text{Str}} = \frac{I_L}{\sqrt{3}} \rightarrow \boxed{I_{\text{Str}} = 3,75 \text{ A}}$

Für Δ -Schaltung ist $U_{\text{Str}} = U_L \rightarrow \boxed{U_L = 400 \text{ V}} \quad \boxed{U_{\text{Str}} = 400 \text{ V}}$

Nennmoment: $P_N = \Omega \cdot M_N \rightarrow M_N = \frac{P_N}{\Omega} = \frac{3000 \text{ W}}{2 \cdot \pi \cdot 955 / 60}$

$\boxed{M_N = 30 \text{ Nm}}$

④ Im Motorbetrieb ist n_N immer kleiner als n_{Syn}

aus $n_{\text{Syn}} = \frac{k}{p}$ mit $n_{\text{Syn}} > n_N \rightarrow n_N < \frac{k}{p}$

$\rightarrow p < \frac{k}{n_N} = 3,14 \rightarrow \boxed{p_{\text{max}} = 3}$

Somit folgt für $n_{\text{Syn}} = \frac{k}{p} \rightarrow \boxed{n_{\text{Syn}} = 1000 \text{ min}^{-1}}$

Sehlf: $\rho_N = \frac{n_{\text{Syn}} - n_N}{n_{\text{Syn}}} = \frac{1000 - 955}{100} \rightarrow \boxed{\rho_N = 0,045}$

⑤ Das Zippmoment M_k ist laut Aufgabe gegeben durch

$M_k = 2,67 \cdot M_N$ mit Teil ③ $M_k = 2,67 \cdot 30 \text{ Nm} \rightarrow \boxed{M_k = 80 \text{ Nm}}$

Der Zippsehlf ρ_k ergibt sich aus der Sehlfbedingung

$M = \frac{2 M_k}{\frac{\rho}{\rho_k} + \frac{\rho_k}{\rho}}$ speziell ist bekannt $\rho_N = 0,045, M_N = 30 \text{ Nm}$

also folgt: $(\rho_N^2 + \rho_k^2) = 2 \frac{M_k}{M_N} \cdot \rho_N \cdot \rho_k$

$\rightarrow \rho_k = \frac{M_k}{M_N} \cdot \rho_N \pm \sqrt{\left(\frac{M_k}{M_N} \cdot \rho_N\right)^2 - \rho_N^2}$

nur positive Lösung, da im Motorbetrieb immer $0 < D < D_k$

$$D_k = \underbrace{2,67 \cdot 0,045}_{0,12} + \underbrace{\sqrt{(2,67 \cdot 0,045)^2 - 0,045^2}}_{0,11}$$

$$D_k = 0,23$$

fehlt im Anlauf

⑥ Für Dreieckschaltung gilt folgende Gleichung von oben

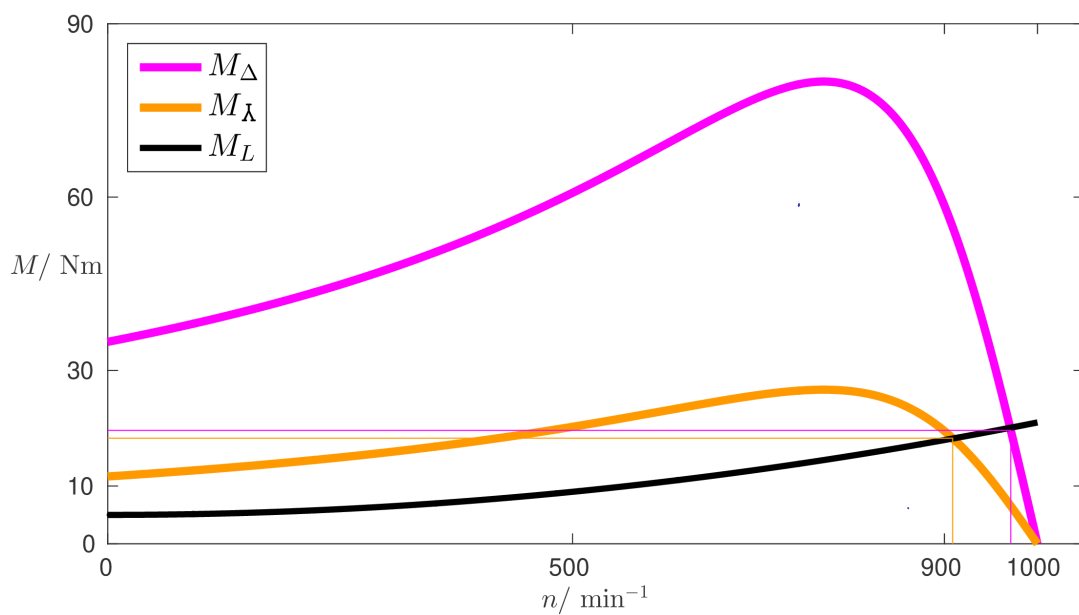
$$M = \frac{2 M_k}{\frac{D}{D_k} + \frac{D_k}{D}} \quad \text{umrechnen auf } n \quad \text{mit} \quad D = \frac{n_{\text{Syn}} - n}{n_{\text{Syn}}}$$

$$\text{also } \frac{D}{D_k} + \frac{D_k}{D} = \frac{1 - \frac{n}{n_s}}{D_k} + \frac{D_k}{1 - \frac{n}{n_s}} = \frac{(1 - \frac{n}{n_s})^2 + D_k^2}{D_k \cdot (1 - \frac{n}{n_s})}$$

$$M(n) = \frac{2 M_k}{(1 - \frac{n}{n_s})^2 + D_k^2} \cdot D_k \cdot (1 - \frac{n}{n_s})$$

Es gilt für Sternschaltung: $M_L(n) = \frac{1}{3} M_\Delta$

also können diese geplottet werden



⑦ Umschaltzeitpunkt von λ auf Δ bei

Schnittpunkt von M_L und M_λ also

$$n_{\text{Umschalt}} = 910 \frac{1}{\text{min}}$$

($M \approx 18 \text{ Nm}$)

Stationären Δ -Betriebs bei

Schnittpunkt von M_L und M_Δ also

$$n_N = 970 \frac{1}{\text{min}}$$

($M_N = 20 \text{ Nm}$)

⑧ Direkter Anlauf im Δ -Schaltung

Außenleiterstrom Δ ($I_L = I_N$) :

$$I_L = 6 \cdot I_N \leadsto$$

$$I_L = 39 \text{ A}$$

also Strangstrom: $I_S = \frac{I_L}{\sqrt{3}}$

$$I_S = 22,5 \text{ A}$$

Anlauf im λ -Schaltung

Außenleiterstrom: $I_{L\lambda} = \frac{1}{3} I_L$

$$I_L = 13 \text{ A}$$

Strangstrom: $I_L = I_S$

$$I_S = 13 \text{ A}$$