

Musterlösung zu den Übungen Grundlagen elektrische Antriebe

Teil 2: ASM und SM

2 Asynchronmaschine

2.1 Leistungsdaten

Das Typenschild einer ASM enthält folgende Daten:

$U_N = 400 \text{ V Y} / 230 \text{ V } \Delta$ $f_N = 50 \text{ Hz}$ $\eta_N = 84,5 \%$
 $P_N = 4,0 \text{ kW}$ $N_N = 965 \text{ Upm}$ $\cos \varphi_N = 0,80$

a.) Wie groß ist der Effektivwert der Nenn-Strangspannung U_{SN} ?

Bei Drehstromnetzen gilt allgemein: als Nennspannung wird immer die (verkettete) Außenleiterspannung U_A angegeben. Wir haben hier im Gebäude standardmäßig ein 400 V-Drehstromnetz, wobei wir an der Steckdose 230 V gegen den Neutralleiter (z.B. L1 gegen N) abgreifen.

Die Außenleiterspannung U_A entspricht bei Dreieckschaltung ("Δ") der Strangspannung U_S . Die Strangspannung ist die Spannung, die direkt an der Wicklung anliegt. Sie muss der Nennspannung U_{SN} entsprechen, für welche die Wicklung ausgelegt ist. Im Dreieck ist der Außenleiterstrom im Netz $I_A = \sqrt{3} \cdot I_S$ (mit I_S = Strangstrom der Wicklung).

In Sternschaltung ("Y") hingegen ist die Strangspannung um den Faktor $\sqrt{3}$ kleiner als U_A und entspricht der Spannung gegen den Sternpunkt bzw. Neutralleiter. Dafür entspricht der Strangstrom I_S dem Außenleiterstrom I_A . Bei Drehstrommaschinen haben U_A und I_A nichts mit den Angaben für den Ankerkreis einer GM zu tun! Wie bekannt ist aufgerundet $230\text{V} \cdot \sqrt{3} = 400\text{V}$.

Also gilt hier, egal wie die Maschine verschaltet wird: $U_{SN} = 230 \text{ V}$. Sie kann entweder im Stern an einem 400V-Netz oder im Dreieck an einem 230 V-Netz betrieben werden.

b.) Wie groß sind Synchrondrehzahl N_{Syn} , Polpaarzahl p und Nennschlupf s_N ?

Hier nochmal die gängigen Synchrondrehzahlen bei Betrieb am 50 Hz-Netz:

$p = 1 \Rightarrow N_{Syn} = 3000 \text{ Upm}$, $p = 2 \Rightarrow N_{Syn} = 1500 \text{ Upm}$, $p = 3 \Rightarrow N_{Syn} = 1000 \text{ Upm}$, $p = 4 \dots$

Die Nenndrehzahl liegt mit einigen % Schlupf immer knapp unterhalb der jeweiligen Synchrondrehzahl. Also gibt es hier nur folgende Möglichkeit: $N_{Syn} = 1000 \text{ Upm}$ und $p = 3$.

Damit ist $s_N = \frac{N_{Syn} - N_N}{N_{Syn}} = 0,035 = 3,5 \%$

c.) Wie groß ist die Leistungsabgabe an der Welle sowie das Nennmoment?

Bei elektrischen Antriebsmaschinen gilt immer: Die Nennleistung P_N ist die Leistungsabgabe an der Welle im Motorbetrieb. Ausnahme: Bei Synchrongeneratoren wird die Klemmenscheinleistung S_N in kVA bzw. MVA angegeben.

Also ist im Nennpunkt $P_w = P_N = 4,0 \text{ kW}$ und
$$M_N = \frac{P_N}{N_N [\text{Upm}]} \cdot \frac{30}{\pi} = 39,6 \text{ Nm}$$

d.) Das Kippmoment werde bei $N_k = 830 \text{ Upm}$ erreicht. Berechnen Sie mit der Kloss'schen Formel das Kippmoment M_k sowie das Anlaufmoment M_0 im Stillstand.

die Kloss'sche Formel lautet allgemein
$$\frac{M}{M_k} = \frac{2}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}$$

das heißt: für einen beliebigen Betriebspunkt auf der ASM-Kennlinie mit dem Schlupf s kann das zugehörige Drehmoment M bestimmt werden, wenn M_k und s_k als Maschinenparameter bekannt sind. Typischer Weise liegt das Verhältnis M_k zu M_N im Bereich von 2,0 bis etwa 3,5. Schauen Sie mal in Kapitel 9 nach: im Katalogauszug ist durchgehend (andere Bezeichnung!) $T_{\max}/T_N = M_k/M_n = 2.3$.

zunächst bestimmen wir den Kippschlupf:
$$s_k = \frac{N_{\text{Syn}} - N_k}{N_{\text{Syn}}} = 0,17 = 17 \%$$

Jedoch fehlt uns M_k . Aber wir haben einen Betriebspunkt auf der Kennlinie, nämlich den Nennpunkt mit M_N und s_N . Damit können wir nach Umstellen der Formel M_k bestimmen.

mit dem Punkt $s = s_N$ und $M = M_N$ ist somit:
$$M_k = \frac{M_N}{2} \cdot \left(\frac{s_N}{s_k} + \frac{s_k}{s_N} \right) = 100,2 \text{ Nm}$$

Kontrolle: hier wäre $\frac{M_k}{M_N} = 2,53$ – das liegt im üblichen Bereich.

im Stillstand ist $s = 1$, also ist das Anlaufmoment:
$$M_0 = \frac{2 \cdot M_k}{1/s_k + s_k/1} = 33,1 \text{ Nm}$$

e.) Skizzieren Sie maßstäblich die Kennlinie Drehmoment über Drehzahl von $N = 0$ bis $N = N_{\text{Syn}}$

Maßstäbliches Zeichnen/Skizzieren einer Kennlinie:

1. Maßstab festlegen, z.B. $200 \text{ Upm} = 1 \text{ cm}$ und $20 \text{ Nm} = 1 \text{ cm}$. Für den Wertebereich $1000 \text{ Upm} \times 100 \text{ Nm}$ ergäbe sich hier also eine Diagrammgröße von $5 \times 5 \text{ cm}$. Achsen skalieren und beschriften!
2. Stillstandspunkt, Kippunkt, Nennpunkt und Leerlaufpunkt (bei Synchrondrehzahl) einzeichnen.
3. Im Kippunkt hat die Kurve ihr Maximum und bei Synchrondrehzahl ihren Nulldurchgang.
4. Es ergibt sich hier nach Verbinden der Punkte eine typische ASM-Kennlinie, deren Form Sie bitte den Vorlesungsunterlagen entnehmen!

Wer eine möglichst schöne Kurve zeichnen will, kann sich ja noch folgenden Punkt ausrechnen:

für $N = 500 \text{ Upm}$ und $s = 0,5$ ist das Drehmoment
$$M_{500\text{Upm}} = \frac{2 \cdot M_k}{0,5/s_k + s_k/0,5} = 61,1 \text{ Nm}$$

f.) Welche Stromaufnahme hat die Maschine im Nennpunkt bei Sternschaltung? Berechnen Sie im Nennpunkt die Drehfeldleistung P_D . Wie groß sind die Rotorverluste P_{VR} ?

Für die Stromaufnahme benötigen wir folgenden Rechengang: Die Klemmen-Wirkleistung P_{SN} bestimmen wir aus Wellenleistung P_N und Wirkungsgrad η_N , dann die Scheinleistung S aus der Wirkleistung P_{SN} und dem Grundwellen-Leistungsfaktor $\cos \varphi_N$, sowie abschließend den Strangstrom I_S (=Stromaufnahme am Außenleiter bei Y-Schaltung) aus der Formel für die Scheinleistung.

Wirkleistung an den Klemmen:
$$P_{SN} = \frac{P_N}{\eta_N} = 4,73 \text{ kW}$$

Scheinleistung im Nennpunkt:
$$S_N = \frac{P_{SN}}{\cos \varphi_N} = 5,92 \text{ kVA}$$

entweder für den Strangstrom:
$$S_N = 3 \cdot U_{SN} \cdot I_{SN} \rightarrow I_{SN} = \frac{5,92 \text{ kVA}}{3 \cdot 230\text{V}} = 8,58 \text{ A}$$

oder, mit zulässigem Rundungsfehler:
$$S_N = \sqrt{3} \cdot U_{AN} \cdot I_{AN} \rightarrow I_{SN} = I_{AN} = \frac{5,92 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \cdot 400\text{V}} = 8,54 \text{ A}$$

bei Dreieckschaltung wäre die Stromaufnahme übrigens $I_{AN} = \sqrt{3} \cdot I_{SN} = 14,9 \text{ A}$, weil dann die Maschine bei gleicher Wirk- und Scheinleistung an einem Drehstromnetz mit nur 230 V Außenleiterspannung betrieben würde.

g.) Berechnen Sie im Nennpunkt die Drehfeldleistung P_D . Wie groß sind die Rotorverluste P_{VR} ?

Die Drehfeldleistung P_D ist die Leistung, die magnetisch vom Stator über den Luftspalt in den Rotor übertragen wird. Vom Stator aus betrachtet wäre die Drehfeldleistung $P_D = P_S - P_{VS,CU} - P_{VS,FE}$, also Leistungsaufnahme an den Stator клемmen abzüglich Kupfer- und Eisenverluste des Stators. Das bringt uns hier aber nicht weiter, da wir diese Verluste nicht kennen. Also müssen wir vom Rotor aus rechnen: Die in den Rotor übertragene Drehfeldleistung teilt sich auf in Rotor-Kupferverluste $P_{VR,CU}$ und innere Leistung P_i an der Welle.

Da wir hier den Nennpunkt betrachten und Schleppverluste vernachlässigen (es gibt dazu in der Aufgabenstellung keine Angaben), ist für uns (in diesem Falle!) $s = s_N$ und $P_i = P_{Welle} = P_N$.

$$P_D = P_{VR,CU} + P_N = s_N \cdot P_D + (1 - s_N) \cdot P_D \rightarrow P_D = \frac{P_N}{1 - s_N} = 4,15 \text{ kW}$$

und
$$P_{VR,CU} = s_N \cdot P_D = P_D - P_N = 0,15 \text{ kW}$$

2.2 Vermessung der Ersatzschaltbildparameter

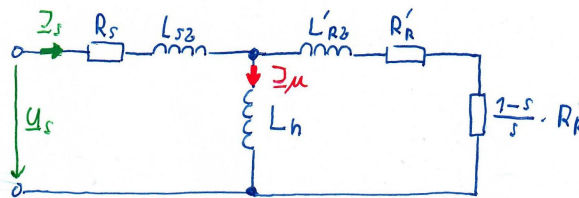
An einem Asynchronmotor werden drei Messungen durchgeführt, wobei sich folgende Werte für Strangspannung und Strangstrom bzw. $\cos \varphi$ ergeben:

i.) Gleichstrommessung Stator: $I_s = 10A$, $U_s = 3.0V$ (Messung Klemme U – Klemme V)

ii.) Maschine festgebremst: $f_s = 50Hz$, $U_s = 50V$, $I_s = 39,5A$, $\cos \varphi = 0,316$

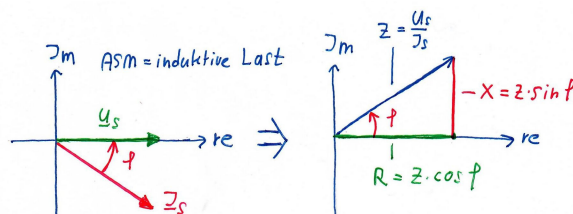
iii.) Synchronbetrieb geschleppt: $f_s = 50Hz$, $U_s = 230V$, $I_s = 11,8A$, $\cos \varphi \approx 0$

a.) Zeichnen Sie das Ersatzschaltbild der ASM und geben Sie die Bezeichnung der einzelnen Bauelemente an. In welchem Zweig fließt der Magnetisierungsstrom?



b.) Bestimmen Sie die Parameter mit Hilfe der Messergebnisse. Nehmen Sie an, dass die beiden Streuinduktivitäten gleich groß sind. Berücksichtigen Sie bei der Bestimmung der Hauptinduktivität auch den Einfluss der Streuinduktivität im Statorkreis

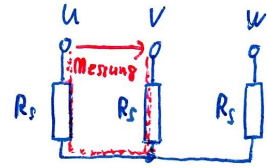
Bevor wir loslegen, erstmal eine kleine Wiederholungsrunde zur komplexen Wechselstromrechnung:



\underline{U}_s und \underline{I}_s sind komplexe Zeiger, welche die Information Länge (Effektivwert) und Phasenlage enthalten. U_s und I_s sind die Beträge (Längen) der Zeiger, welche als Effektivwert mit einem Multimeter oder Leistungsanalysator gemessen werden können. Um zusätzlich die Phasenlage φ bzw. den Leistungsfaktor λ messen zu können, benötigt man einen Leistungsanalysator bzw. "Power Analyzer". Solange die Größen sinusförmig sind, entspricht der angezeigte Leistungsfaktor λ dem hier angegebenen $\cos \varphi$.

Die Impedanz Z kann dann mit diesen Messdaten über das ohm'sche Gesetz bestimmt werden, für den Wirkwiderstand gilt $R = Z \cdot \cos \varphi$ und für die Reaktanz (Blindwiderstand) $X = 2\pi f_{el} \cdot L = Z \cdot \sin \varphi$ bzw. $X = \sqrt{(Z^2 - R^2)}$. Mit diesem Rechengang werden die Ersatzschaltbildparameter Schritt für Schritt bestimmt. Die Kunst besteht darin, die Mathematik an den jeweiligen Systemzustand anzupassen und diesen so zu wählen, dass man die gewünschte Information mit einfacher Rechnung bestimmen kann!

i.) Gleichstrommessung: hier sind alle Reaktanzen gleich Null und stellen im ESB einen Kurzschluss dar. Also misst man von Klemme nach Sternpunkt nur den Widerstand R_S bzw. von Klemme zu Klemme $2 \cdot R_S$, da zwischen den Außenleitern je 2 Stränge in Serie liegen (wir gehen von Sternschaltung aus).



Somit ist $R_S = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_S}{I_S} = 150 \text{ m}\Omega$

ii.) Maschine festgebremst: dann ist der Schlupf 1, womit $\frac{1-s}{s} \cdot R'_R$ Null ergibt. Da die beiden Streuinduktivitäten deutlich kleiner als die Hauptinduktivität sind, kann man den Magnetisierungsstrom I_μ im Querschnitt vernachlässigen. Es sind also lediglich die beiden Streuinduktivitäten ($L_\sigma = L_{S\sigma} + L'_{R\sigma}$) und die beiden Wicklungswiderstände R_S und R'_R wirksam.

Rechengang ohm'scher Anteil:

$$Z = \frac{U_S}{I_S} = 1,266 \Omega \Rightarrow R_S + R'_R = Z \cdot \cos \varphi = 400 \text{ m}\Omega \Rightarrow R'_R = 400 \text{ m}\Omega - R_S = 250 \text{ m}\Omega$$

Anmerkung: die Rechnung wäre korrekt, wenn es nur Kupferverluste in der Maschine gäbe. In der Praxis treten bei dieser Messung aber auch Eisenverluste auf, die durch eine zusätzliche Wirkleistung aus den Stator клемmen gedeckt werden müssen und daher zu einem etwas erhöhten $\cos \varphi$ führen. Daher liefert diese Mess- und Rechenmethode immer einen etwas zu hohen Wert für R'_R . Da wir keine weiteren Informationen haben, müssen wir mit diesem Ergebnis leben – dies aber im Hinterkopf behalten!

Rechengang induktiver Anteil:

$$X = \sqrt{(Z^2 - R^2)} = 1,201 \Omega \quad (\text{oder: } X = Z \cdot \sin \cos^{-1} \varphi) \Rightarrow L_\sigma = \frac{X}{2 \pi \cdot f_s} = 3,823 \text{ mH}$$

Da wir nicht wissen, wie sich die beiden Streuinduktivitäten aufteilen, nehmen wir vereinfachend an, dass beide gleich groß sind. 2 Nachkommastellen sind hier für die Endergebnisse i.O., denn die Messung hat auch nur 3 Digits Auflösung:

$$L_{S\sigma} = L'_{R\sigma} = \frac{L_\sigma}{2} = 1,91 \text{ mH}$$

iii.) Synchronbetrieb geschleppt bzw. idealer Leerlauf: für $N = N_{\text{syn}}$ ist $s = 0$. Also ist der Rotorkreis stromlos, da der Term $\frac{1-s}{s}$ gegen unendlich strebt (oder: kein Induktionsvorgang im Rotor stattfindet). Der Strom fließt also nur durch den Statorzweig und über die Hauptinduktivität zurück. Wegen $\cos \varphi \approx 0$ (Phasenwinkel fast 90°) kann hier mit $X = Z$ gerechnet und R_S vernachlässigt werden:

$$X = Z = \frac{U_S}{I_S} = 19,40 \Omega, \quad L_{S\sigma} + L_h = \frac{X}{(2\pi \cdot f_s)} = 62,0 \text{ mH} \Rightarrow L_h = 62,0 \text{ mH} - L_{S\sigma} = 60,1 \text{ mH}$$

Kontrolle: $X/R_S = 129 \Rightarrow X \gg R_S \Rightarrow R_S$ war in der Rechnung iii.) vernachlässigbar

$L_h/L_{S\sigma} = 31 \Rightarrow L_h \gg L_{S\sigma} \Rightarrow$ Vernachlässigung von I_μ in ii.) war i.O.

c.) Warum wird die Maschine im festgebremsten Zustand nur mit 50 V betrieben?

Weil man sonst einen massiven Überstrom ziehen und sich die Wicklung während der Messung unzulässig erwärmen würde – insofern nicht die Sicherung anspricht und entsprechende Rauchzeichen verhindert. Übrigens: die Stromaufnahme im Synchronbetrieb entspricht dem Leerlaufstrom, der durch L_h begrenzt wird. Daher muss der Eisenkreis inkl. Luftspalt so ausgelegt werden, dass $L_h \gg L_\sigma$ ist!

2.3 Anlaufvorgang und Betrieb der ASM

a.) Nennen Sie 2 Methoden (konstruktiv/schaltungstechnisch), das Anlaufmoment zu erhöhen.

Zum Erhöhen des Anlaufmomentes muss man den Rotorwiderstand R_R erhöhen. Damit vergrößert sich der Kippschlupf, und die ASM-Kennlinie wird so zu großen Schlupfwerten hin gedehnt, dass sich ein hohes Anlaufdrehmoment ergibt. Für $s_K = 1$ liegt das Kippmoment bei Drehzahl Null.

Konstruktiv: Stromverdrängungsläufer. Die besondere Rotornutgeometrie sorgt bei hohen Schlupfwerten bzw. Rotorfrequenzen (also beim Anlaufvorgang) für einen erhöhten Rotorkreiswiderstand.

Konstruktiv + schaltungstechnisch: Schleifringläufer mit Widerständen, die zum Anlaufen in den Rotorkreis geschaltet werden.

b.) Der Anlaufstrom soll durch einen Stern-Dreieck-Hochlauf am 400V-Netz begrenzt werden. Für welche Strangspannung muss die Maschine ausgelegt sein?

Hochlauf im Stern ($U_S = 230\text{ V}$) mit reduzierter Spannung und Stromaufnahme, Dauerbetrieb im Dreieck ($U_S = U_A = 400\text{ V}$). Also muss die Nennstrangspannung 400 V betragen.

c.) Welche weiteren Methoden gäbe es für einen Anlauf mit reduzierter Stromaufnahme?

- *KUSA-Schaltung (Kurzschlussläufer Sanftanlauf) mit Vorschaltwiderständen in einer Phase für kleine ASM mit einigen kW Nennleistung (Sparversion) oder in allen 3 Strängen.*
- *Elektronischer Anlasser: Spannungsreduktion durch Phasenanschnittsteuerung in einer (kleine ASM) oder mehreren Phasen (große Maschinen, über 10 KW)*

Die Reduktion des Anlaufstromes ist natürlich nur machbar, wenn die ASM nicht gegen ein hohes Drehmoment anlaufen soll. Pumpen und Lüfter haben wegen der quadratischen M-N-Kennlinie meist hinreichend kleine Anlaufgegenmomente.

d.) Wozu dient die Ausführung der ASM als Schleifringläufer?

Historisch: Erhöhung des Anlaufmomentes bei Schweranläufen mit Widerständen im Rotorkreis.

Aktuell: wenn man die Drehzahl nur in einen begrenzten Bereich verstellen will. Anstelle von Rotorkreiswiderständen kann die Leistung aus dem Rotorkreis mit Hilfe eines Umrichters ins Netz zurück gespeist werden. Das rechnet sich, wenn der Preis von Schleifringläufer (teuer) + Umrichter (einge 10 % der Statorleistung) günstiger ist als ein Kurzschlussläufer (billiger) + Umrichter (100 % der Statorleistung). Früher sprach man von "untersynchroner Stromrichter-kaskade", heute von "doppelt gespeister ASM". Das wird z.B. bei Windkraftanlagen mit ASM als Generator so gemacht, Leistungsklasse bis einige MW.

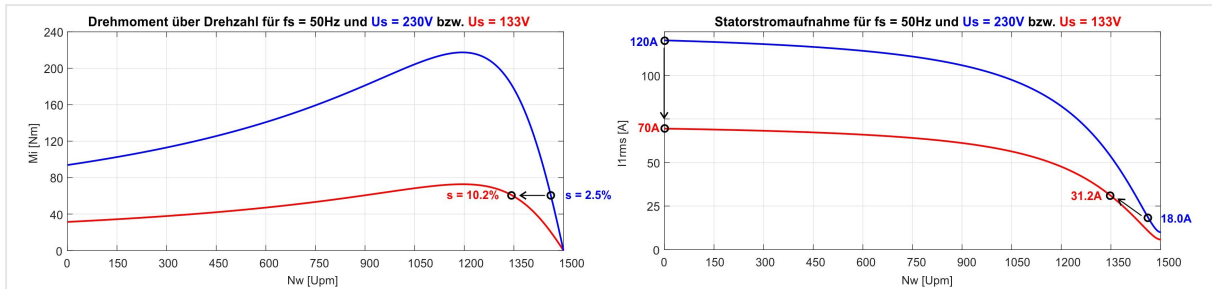
e.) Kann man eine ASM mit der Typenschildangabe "400V Y / 230V Δ " in Sternschaltung an einem 230 V - Drehstromnetz betreiben? Begründen Sie Ihre Antwort!

Neeiiiiin! Diese Maschine wäre für Strangspannung $U_{SN} = 230\text{ V}$ ausgelegt. Betreibt man diese an einem 230 V-Netz im Stern, wäre die Strangspannung nur noch $230\text{V} / \sqrt{3} = 133\text{V}$ 133 V, womit das Kippmoment um den Faktor 3 zu klein wäre. Da die Netzfrequenz nach wie vor 50 Hz betrüge, bliebe die Synchrondrehzahl unverändert, und es würden sich bei Belastung unzulässig hohe Schlupfwerte einstellen (falls die Maschine das Gegenmoment überhaupt aufbringen kann). Da die Rotorkreisverluste $s \cdot P_D$ sind, kann der Rotor unzulässig heiß werden! Nicht gut für das Fett in den Lagern...

Es gilt also nicht, wie aus dem Bauch heraus anzunehmen, dass "zu wenig Spannung" ungefährlich für eine Maschine ist!

Musterlösung

Zusatzinfo: um das zu verifizieren, habe ich mal eine Runde mit Matlab simuliert. Betreibt man die Maschine aus der Simulation im Praktikum Teilversuch 4.3 mit nur 133 anstatt 230 V Strangspannung, könnte sie Ihr Nennmoment von 80 Nm nicht mehr liefern. Betrieb mit 60 Nm Lastmoment wäre noch machbar, allerdings steigt der Schlupf dann von 2.5 auf 10.2 %. Die Stromaufnahme sinkt zwar im Stillstand von 120 auf 70 A, was den Anlaufstrom reduzieren würde; Gegenmoment allerdings < 30 Nm. Aber im Lastpunkt steigt der Statorstrom von 18.0 auf 31.2 A. Da der Statornennstrom (bei Nennmoment 80 Nm) nur 23.2 A beträgt, wird auch die Statorwicklung überlastet. Das führt bei längerem Betrieb zur Überhitzung der Maschine, die dann sehr wahrscheinlich an einem Isolationsfehler in der Statorwicklung stirbt.



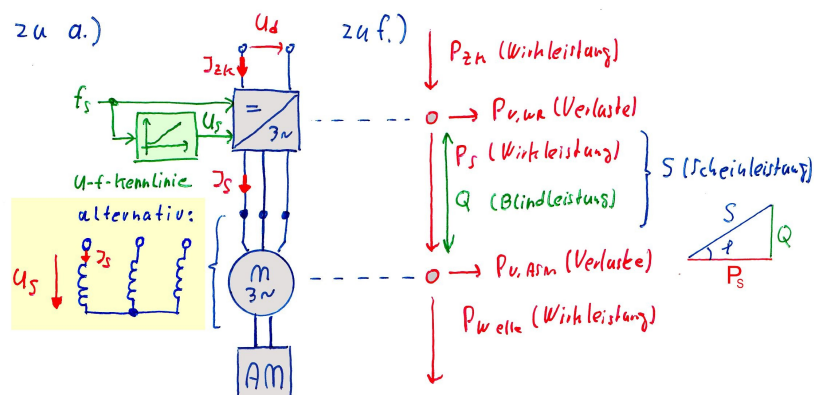
2.4 Systemauslegung drehzahlvariabler Antrieb

Ein elektrischer Antrieb soll folgendes Lastenheft erfüllen:

- i. **Arbeitsmaschine:** - Welleneingangsdrehmoment $M_w = +/-200$ Nm für $N = 0...3600$ Upm für Dauerbetrieb, Wellenkupplung horizontal
- ii. **Maschine:** - fremdbelüftete Kurzschlussläufer-ASM, Sternschaltung
- $\cos \phi_N = 0.85$, $\eta_{ASM} = 95\%$, $s_N = 1\%$, Polpaarzahl $p = 2$
- iii. **Leistungsteil:** - Drehstromwechselrichter, Zwischenkreisspannung $U_d = 560$ V
- $\eta_{WR} = 97\%$, Betrieb bis an die PWM-Aussteuergrenze der linearen PWM
- einfache U-f-Kennliniensteuerung mit Statorfrequenzvorgabe

Für diesen Antrieb müssen die für die Beschaffung von Maschine und Wechselrichter erforderlichen Kennzahlen spezifiziert werden.

a.) Skizzieren Sie den kompletten Antrieb in Blockschaltbildform inklusive der Sollwertvorgabe für den Leistungsteil, leistungselektronisches Stellglied sowie Maschine.



Die Skizze muss mindestens folgende Elemente enthalten:

- Blockschaltbild Frequenzumrichter mit der Wandlung von "=" nach "3 ~"
- Vorgabe Statorfrequenz f_s und Statorspannung U_s (bzw. Aussteuergrad a) aus U-f-KL an Umrichter
- Schaltsymbol Drehstrommaschine oder alternativ Drehstromwicklung (um U_s einzeichnen zu können)

b.) Geben Sie Bauform und Betriebsart für die ASM an

"Wellenkupplung horizontal" \Rightarrow Bauform B3 "Dauerbetrieb" \Rightarrow Betriebsart S1

c.) Auf welchen Strangstrom muss die ASM ausgelegt sein?

Die maximale Leistung ergibt sich bei Maximaldrehzahl und ist für die Auslegung relevant.

Wellenleistung:
$$P_W = M_W \cdot N_{max} / U_{pm} \cdot \frac{\pi}{30} = 75,4 \text{ kW}$$

Wirkleistung Stator:
$$P_S = \frac{P_W}{\eta_{ASM}} = 79,4 \text{ kW}$$

Scheinleistung Stator
$$S = \frac{P_S}{\cos \varphi_N} = 93,4 \text{ kVA} = 3 \cdot U_s \cdot I_s = \frac{3}{2} \cdot \hat{U}_{1S} \cdot \hat{I}_s$$

Nun fehlt uns die Amplitude der Grundwelle der Strangspannung am Wechselrichterausgang \hat{U}_{1S} . Nicht vergessen: am (Puls-) Wechselrichter haben wir eine gepulste Ausgangsspannung, deren Grundwelle für die Erzeugung des Nutzmomentes der Maschine wirksam ist. Bei Maximaldrehzahl wird der Wechselrichter mit seiner maximalen Aussteuerung betrieben, siehe Endwert U-f-Kennlinie bei $f = f_{SN}$.

Bei Blocktakt wäre $\hat{U}_{1S} \approx 0.64 \cdot U_d$, an der PWM-Aussteuergrenze $\hat{U}_{1S} \approx 0.58 \cdot U_d$ bzw. $\hat{U}_{1S} = 1/\sqrt{3} \cdot U_d$.

Ausgangsspannung WR:
$$\hat{U}_{1S} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot U_d = 323,3 \text{ V} \quad \text{bzw.} \quad U_s = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \hat{U}_{1S} = 228,8 \text{ V} \quad (\text{Effektivwert})$$

Stromaufnahme Stator:
$$\hat{I}_s = \frac{S}{3/2 \cdot \hat{U}_{1S}} = 192,6 \text{ A} \quad \text{bzw.} \quad I_s = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \hat{I}_s = 136,2 \text{ A} \quad (\text{Effektivwert})$$

alternativ:
$$I_s = \frac{S}{3 \cdot U_s} = 136,1 \text{ A}$$

Bei der Maschinenauslegung wird normaler Weise der Effektivwert genannt, also muss die ASM auf 136,1 A ausgelegt werden. Die Angabe 136,2 A (Rundungsfehler) wäre ebenso i.O..

d.) Welche Strangspannung ergibt sich damit?

Siehe oben, der Effektivwert wäre $U_s = 228.8 \text{ V}$.

e.) Welche Statorfrequenz wird bei Maximaldrehzahl benötigt?

Jetzt wird's haarig. Wir können nicht einfach unsere Zahlen in vorgebene Formeln einsetzen und müssen das, was wir wissen, für diesen Anwendungsfall kombinieren (**Ingenieurarbeit = "Transferleistung"!**).

Bei $N = 3600 \text{ Upm}$ und $p = 2$ wäre die mech. Drehfrequenz:

$$n = f_{mech} = \frac{N / \text{Upm}}{60} = 60 \frac{1}{s}$$

Da die ASM jedoch einen Schlupf s benötigt, um ein Drehmoment abgeben zu können, muss die einzustellende Statorfrequenz etwas höher als $p \cdot f_{\text{mech}} = 120 \text{ Hz}$ liegen. Wir wissen aus Kapitel 8, Seite 8:

$$f_R = f_S - p \cdot f_{\text{mech}} \quad \text{und} \quad s = \frac{f_R}{f_S} \quad \text{bzw.} \quad f_R = s \cdot f_S$$

Für s können wir den angegebenen Nennschlupf $s_N = 1\%$ ansetzen. Also ergibt sich:

$$s_N \cdot f_S = f_S - p \cdot f_{\text{mech}} \Leftrightarrow p \cdot f_{\text{mech}} = f_S - s_N \cdot f_S \Leftrightarrow f_S = \frac{p \cdot f_{\text{mech}}}{1 - s_N} = 121,2 \text{ Hz}$$

Die Maschine bräuchte also eine Rotorfrequenz $f_R = 1,2 \text{ Hz}$, um das Maximaldrehmoment abgeben zu können. Wenn wir also genau die gewünschte Drehzahl fahren wollen, müssen wir die Statorfrequenz entsprechend anpassen – oder 120 Hz vorgeben und einkalkulieren, dass die Drehzahl wegen des Schlupfes bei Belastung etwas einbricht. Natürlich würde ein moderner Antrieb mit Drehzahlregelung diesen Drehzahleinbruch durch Anheben der Statorfrequenz automatisch kompensieren.

f.) Wo wird die zum Betrieb der ASM erforderliche Blindleistung erzeugt?

Im Wechselrichter. Dieser ist eine aktive Spannungsquelle, womit die abgegebene Blindleistung (bzw. der $\cos \varphi$) frei einstellbar ist, solange die max. zulässige Scheinleistung nicht überschritten wird. Die zum Betrieb der ASM erforderliche Blindenergie pendelt also zwischen Wechselrichterausgang und ASM-Klemmen. Die Blindleistung wäre hier $Q = \sqrt{S^2 - P_s^2} = 49,2 \text{ kvar}$.

Q stammt nicht aus dem Zwischenkreiskondensator und schon gar nicht aus dem DC-Zwischenkreis! Jedoch erzeugt die zusätzliche Blindleistung Verluste, die sich als zusätzlicher Wirkleistungsbedarf am Wechselrichtereingang bzw. im Wirkungsgrad der beteiligten Komponenten bemerkbar macht.

g.) Berechnen Sie den maximalen Zwischenkreisstrom bei Motorbetrieb.

In eine Wirkungsgradbilanz dürfen nur Wirkleistungen eingehen. Bei Motorbetrieb muss die Leistung am Eingang der Energiewandlungskette größer als am Ausgang sein.

$$P_{\text{ZK}} = U_d \cdot I_{\text{ZK}} = \frac{P_W}{\eta_{\text{ASM}} \cdot \eta_{\text{WR}}} = 81,8 \text{ kW} \quad \Rightarrow \quad I_{\text{ZK}} = \frac{P_{\text{ZK}}}{U_d} = 146,1 \text{ A}$$

h.) Berechnen Sie den maximalen Zwischenkreisstrom bei Generatorbetrieb.

Nun kehrt sich der Energiefluss um, und an der Welle werden wie vorgegeben -200 Nm eingeprägt. Der Antrieb bremst also mit identischer Wellenleistung $P_s = -75,4 \text{ kW}$ und speist Energie von der Welle in den Zwischenkreis. Bei Generatorbetrieb muss die Leistung "oben" (elektrische Schnittstelle) kleiner als "unten" (mech. Schnittstelle) sein. Also ergibt sich:

$$P_{\text{ZK}} = U_d \cdot I_{\text{ZK}} = P_W \cdot \eta_{\text{ASM}} \cdot \eta_{\text{WR}} = -69,5 \text{ kW} \quad \Rightarrow \quad I_{\text{ZK}} = \frac{P_{\text{ZK}}}{U_d} = -124,1 \text{ A}$$

Abschließende Bemerkungen: Die Aufgabenstellung geht nur bis zum DC-Zwischenkreis als "Schnittstelle" nach außen. Bei Versorgung des Antriebs durch das 400 V-Drehstromnetz und Gleichrichtung durch eine B6-Diodenbrücke ergäbe sich eine Zwischenkreisspannung von $U_d \approx 560 \text{ V}$ (Zwischenkreiskapazität \Rightarrow Spannung knapp unterhalb des Scheitelwertes). Dann könnte wie hier zu sehen bei max. Aussteuerung gerade noch die Nullpunktspannung von 230 V am Wechselrichterausgang erzeugt werden. Bei knapp 80 kW ergeben sich allerdings erhebliche Netzrückwirkungen durch blockförmige Ströme am netzseitigen Eingang der Diodenbrücke, was ein Netzfilter erforderlich macht.

Da der zu spezifizierende Antrieb aber im Dauerbetrieb -200 Nm einprägen soll (Generatorbetrieb), benötigt er netzseitig einen rückspeisefähigen Stromrichter. Das ist mit aktueller Technik ein als "Active Frontend" bezeichneter Drehstromwechselrichter mit Netzfilter, das aber deutlich kompakter ausfällt als bei einer Diodenbrücke. Die Zwischenkreisspannung U_d ist dann einstellbar und wird meist auf einen Level von ca. 600 V eingestellt, damit der Wechselrichter pulsen und den Netzstrom aktiv regeln kann, dieser ist dann nahezu sinusförmig mit $\cos \varphi = 1$.

2.5 Konfiguration von Antriebssystemen

Für die jeweilige Antriebssystemvariante sollen die erforderlichen Systemkomponenten (Hard- und Software) spezifiziert werden. Kreuzen Sie genau die Komponenten an, die man dazu benötigt. Überspezifikation ist nicht zulässig!

Komponenten →	Netzschütz mit elektron. Anlasser	Netz-Synchronisationseinrichtung	Steuerbarer Gleichrichter (B6c)	Phasenanschnittsteuerung	Drehstromwechselrichter	H-Brücke (Vollbrücke)	Kommütierungslogik	U/f-Kennliniensteuerung	Stromregelung (PI-Regler / FOR)	Stromwandler	Erregerstromrichter
Antriebssystemvariante											
ASM mit fester Drehzahl	X										
ASM drehzahlgesteuert					X			X			
ASM mit Drehmomenteinprägung					X			X	X		
BLDC-Motor drehzahlgesteuert					X		X				
PMSM als Servomotor					X			X	X		
PMSM als Traktionsmotor im Kfz					X			X	X		
drehzahl geregelter, fremderregter Gleichstromantrieb am Drehstromnetz			X					X	X	X	
drehzahl geregelter Gleichstromservomotor an einem DC-Netz						X		X	X		
Universalmotor drehzahlgesteuert in einer Bohrmaschine				X							
SM als Turbogenerator in einem GuD-Kraftwerk		X									X
Schenkelpolmaschine in einem Laufwasserkraftwerk		X									X

Hilfestellung: wir haben im Rahmen der Lehrveranstaltung unterschiedlichste Antriebskonfigurationen behandelt; bereits in Kapitel 1 haben wir uns entsprechende Blockschaltbilder angeschaut. Für GM und ASM haben wir jeweils den Betrieb an einem starren Netz mit fester Leerlaufdrehzahl und Drehzahleinbruch bei Belastung behandelt. Weitere Möglichkeiten sind der Betrieb mit einfacher Drehzahlsteuerung und entsprechender Anpassung von Spannung (und Frequenz) sowie der stromgeregelter Betrieb mit entsprechender Leistungselektronik, Sensorik und Stromregelung. Die Wahl der Antriebskonfiguration hängt vom Lastenheft ab: für eine Pumpe mit fester Drehzahl reicht z.B. eine ASM im Netzbetrieb, für einen drehzahlverstellbaren Lüfter genügt meist eine einfache Drehzahlsteuerung, ein Traktionsantrieb hingegen benötigt eine Stromregelung zur Drehmomenteinprägung.

Wie aus Kapitel 5 bekannt, erfordert eine Drehzahlregelung immer eine unterlagerte Stromregelung; Drehmomenteinprägung erfordert ebenso eine Stromregelung. Bei Drehfeldmaschinen wird die Stromregelung als Vektorregelung = feldorientierte Regelung "FOR" realisiert. Als Sensorik wird dann neben den Stromwandlern ein Drehzahlgeber (ASM) oder eine Pollageerfassung (SM, PMSM) benötigt.

Bei der SM wissen wir, dass diese beispielsweise als fremderregter Kraftwerksgenerator direkt in das Drehstromnetz speist (Kapitel 11), wobei diese Großmaschinen immer fremdregt sind und somit einen Stromrichter für den Erregerkreis benötigen. Oder dass die SM mit Permanenterregung (PMSM) entweder als "BLDC-Motor" betrieben wird, also mit Elektronischer Kommutierung = Wechselrichter + Kommutierungslogik, siehe Kapitel 13. Die PMSM kommt auch als Servomotor bzw. Elektrofahrzeug-Traktionsmotor mit Wechselrichter und Vektorregelung (FOR) zum Einsatz (Kapitel 11/12).

Dieses Wissen soll nun im Antriebskonfigurator von Aufgabe 2.5 angewandt werden. Die Vorlesung soll aber nicht nur Wissen, sondern auch Kompetenz vermitteln – und diese besteht beispielsweise darin, nach Lastenheftvorgabe einen Antrieb auf Systemebene mit seinen Komponenten spezifizieren zu können.

Hier die Übersetzung einiger Fachbegriffe mit der erforderlichen Spezifikation:

Fachbegriff	Übersetzung	Antriebsspezifikation
fremderregt	elektrische Erregung bei GM oder SM	Stromversorgung für Erregerkreis
Drehmomenteinprägung	Drehmoment wird durch Strom eingestellt	Stromregelung bzw. FOR mit Sensorik erforderlich
Stromregelung	Stromeinprägung, Stellgröße = Spannung	leistungselektronisches Stellglied + Reglerhardware
FOR	Feldorientierte Regelung = Vektorregelung	Sensorik und Hardware für Reglerimplementierung
BLDC	Brushless DC-Motor = EC-Motor	Motor + Wechselrichter + Kommutierungslogik
Servoantrieb	Einstellung von Winkellage oder Position	komplette Reglerkaskade, siehe Aufgabe 1.7
Traktionsmotor	Antriebsmotor Schienen- oder Straßen-Fzg	Drehmomenteinprägung zum Betrieb erforderlich
Universalmotor	Reihenschlussmaschine kleiner Baugröße	Betrieb mit Einphasewechselstrom, ggf. mit Phasenanschnittsteuerung zur Drehzahlverstellung
GuD-Kraftwerk	Gas- und Dampfkraftwerk (Combined Cycle)	Turbogenerator für Gas- und Dampfturbine
Turbogenerator	Antriebsmaschine = schnelldrehende Turbine	fremderregte SM mit Polpaarzahl 1 oder 2 Netzsynchrosationseinrichtung, um Maschine an das Netz schalten zu können
Laufwasserkraftwerk	⇒ langsamdrehende Kaplan- oder Rohrturbine	Schenkelpolläufer mit hoher Polpaarzahl, Netzsynchrosationseinrichtung

3 Synchronmaschine

3.1 Grundlagen

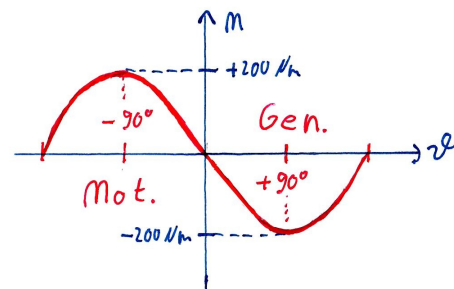
a.) Konstruktiver Aufbau im Vergleich zur ASM: Nennen Sie je einen prinzipiellen Unterschied und eine Gemeinsamkeit.

Gemeinsamkeit: der Stator bzw. Ständer ist mit einer Drehfeldwicklung ausgeführt

Unterschied: der Rotor bzw. Läufer ist ein Polrad mit Erregerwicklung bzw. Permanentmagneten

Die Stromzufuhr zur Erregerwicklung erfolgt bei kleineren Maschinen über Schleifringe.

b.) Skizzieren Sie den Verlauf des Drehmomentes über den Polradwinkel (-180..+180°) für einen Vollpoläufer. Das Kippmoment betrage 200 Nm. Markieren Sie die Bereiche für Motor- und Generatorbetrieb.



c.) Warum kann eine fremderregte SM sowohl induktiv als auch kapazitiv betrieben werden?

Bei der fremderregten SM kann der $\cos \varphi$ mit Hilfe des Erregerstromes eingestellt werden.

Der Erregerstrom erzeugt den Hauptfluss Φ im Eisenkreis, und der Effektivwert von U_p ist $c\Phi \cdot \omega_{el}$

großer Erregerstrom = starke Erregung:

Der Zeiger der Polradspannung U_p ist größer als der Statorspannungszeiger (Übererregung). Aus dem Zeigerdiagramm ergibt sich, dass der Stromzeiger dann entweder im II. Quadranten (Motorbetrieb) bzw. im III. Quadranten (Generatorbetrieb) steht. In beiden Fällen ist der Imaginärteil des Stromes positiv und die Maschine somit kapazitiv. (Der Phasenwinkel φ ist größer 180° , womit Q negativ wird.)

geringer Erregerstrom = schwache Erregung:

Der Zeiger der Polradspannung U_p ist kleiner als der Statorspannungszeiger (Untererregung). Aus dem Zeigerdiagramm ergibt sich, dass der Stromzeiger dann entweder im I. Quadranten (Motorbetrieb) bzw. im IV. Quadranten (Generatorbetrieb) steht. In beiden Fällen ist der Imaginärteil des Stromes negativ und die Maschine somit induktiv. (Der Phasenwinkel φ ist kleiner 180° , womit Q positiv wird.)

Achtung: Da das Synchronmoment proportional zur Polradspannung ist, kann die Maschine bei Untererregung nur ein begrenztes Drehmoment liefern bzw. außer Tritt fallen!

Vorsicht: beim Zeitzeigerdiagramm der SM zeigt die re-Achse nach oben und die im-Achse nach links.

Alternative Erklärung: die Stromkomponente von I_s , die parallel zu \underline{U}_p liegt, erzeugt eine innere Wirkleistung und somit ein Drehmoment. Die senkrecht zu \underline{U}_p stehende Stromkomponente erzeugt Blindleistung, die entweder kapazitiv oder induktiv sein kann. Ist die kapazitive innere Blindleistung größer als der induktive Blindleistungsbedarf der Synchronreaktanz (diesen benötigt man, wenn Strom durch die Induktivität im Statorkreis fließen soll, egal ob Mot.- / Gen.-Betrieb, d.h. Q_x ist immer > 0), dann ist die Maschine auch an den Klemmen kapazitiv, d.h. sie gibt induktive Blindleistung an das Netz ab ($Q < 0$). Damit kann z.B. der Blindleistungsbedarf anderer, induktiver Verbraucher gedeckt werden.

3.2 Zeigerdiagramm

Eine Vollpolmaschine mit den Daten $U_N = 230 \text{ V } \Delta$, $S_N = 12 \text{ kVA}$, $p=2$ und Betrieb in Sternschaltung läuft am 50 Hz / 400 V-Netz in einem Kleinkraftwerk. Die Hauptreaktanz betrage $X_d = 10 \Omega$. Der Wicklungswiderstand im Stator soll vernachlässigt werden.

Die Turbine wird so beaufschlagt, dass die Synchronmaschine generatorisch läuft und 15 A bei einem $\cos \varphi = 0.8$ kap. ins Netz abgibt, d.h. die Maschine ist übererregt.

Das Zeigerdiagramm soll im folgenden maßstäblich mit $100 \text{ V} = 2 \text{ cm}$ für die Spannungszeiger gezeichnet werden. Umseitig ist dazu ein Koordinatensystem vorbereitet. Der Stromzeiger braucht bis auf den Phasenwinkel nicht maßstäblich dargestellt zu werden. Da die Polradspannung zu bestimmen ist, soll die Netzspannung als Bezugsgröße auf die Y-Achse gelegt werden.

a.) Wie groß ist die Strangspannung an der Maschine? Berechnen sie ihre Wirk- und Blindleistungsabgabe.

Natürlich gilt für die Synchronmaschine alles, was wir für die Verschaltung der ASM am Drehstromnetz und die Berechnung von Schein-, Wirk- und Blindleistung gelernt haben!

Die Einheiten für S, P und Q sind mit der im Ingenieurbereich üblichen Konvention anzugeben, sonst weiß der Leser, dass Ihnen essentielles Grundlagenwissen fehlt – auch in meinen Vorlesungsunterlagen gibt es da noch Nachbesserungsbedarf: für Q steht dort noch "VAr" anstelle "var", und oft fehlt ein Abstand zwischen Zahlenwert und Einheit.

Ist die Betriebsart (hier: gen. / kap.) bekannt, müssen die Vorzeichen nicht unbedingt angegeben werden.

Es ist $U_{SN} = 230 \text{ V} = U_{AN}$ bei Dreieckschaltung. Sie muss also am 400 V-Netz im Stern betrieben werden.

Scheinleistung: $S = 3 \cdot U_S \cdot I_S = 10,35 \text{ kVA}$ *nicht vorzeichenbehaftet*

Wirkleistung: $P = S \cdot \cos \varphi = 8,28 \text{ kW}$ *Generatorbetrieb, d.h. P ist negativ¹*

Blindleistung: $Q = S \cdot \sin \varphi = \sqrt{S^2 - P^2} = 6,21 \text{ kvar}$ *kapazitiver Betrieb, d.h. Q ist negativ¹*

¹ *im Verbraucherzählpfeilsystem. In manchen Büchern wird speziell bei der SM im Erzeugerzählpfeilsystem gerechnet, und dann ist das Chaos für jemanden, der sich in den Stoff einarbeiten will, perfekt.*

Bei Kraftwerksgeneratoren wird nicht die Nennleistung an der Welle, sondern die Nennscheinleistung an den Klemmen angegeben. Offenbar wird die Maschine hier aber nicht mit der vollen Nennleistung von 12 kVA betrieben, wie die Rechnung zeigt.

b.) Zeichnen Sie zunächst die Zeiger von Netzspannung und Netzstrom, berechnen Sie den Spannungsabfall an der Reaktanz und bestimmen sie den Zeiger der Polradspannung.

Hinweis: sollte so eine Aufgabe in der Klausur auftauchen, wird dort natürlich keine Anleitung stehen, wie man ein Zeigerdiagramm zeichnet! Das gehört zu dem Grundkompetenzen in diesem Fach.

Vorberechnungen zum Zeichnen des Zeigerdiagramms:

Spannungsfall an X_d : $U_X = X_d \cdot I_S = 150 \text{ V}$ *Länge des komplexen Spannungszeigers \underline{U}_X*

Phasenwinkel: $\varphi_{\text{r}} = \cos^{-1} 0,8 = 36,9^\circ$ *Winkel des Stromzeigers \underline{I}_S gegen die re-Achse.*

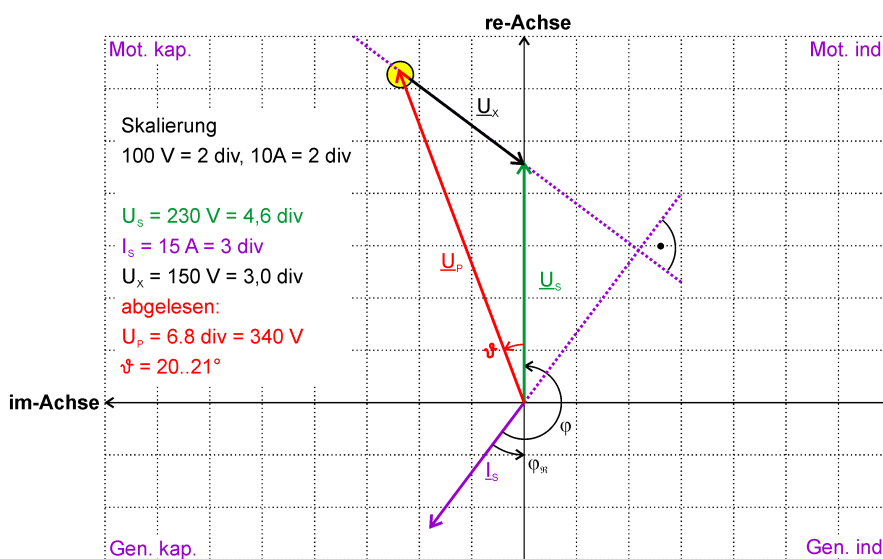
Musterlösung

Angabe "Generatorbetrieb kapazitiv" \Rightarrow der Stromzeiger \underline{I}_S muss im III. Quadranten stehen. Nach der Konvention in Kapitel 11 wäre der linkslaufende Phasenwinkel von \underline{I}_S zum Zeiger der Statorspannung \underline{U}_S dann $\varphi = \varphi_{st} + 180^\circ = 216,9^\circ$. Der Leistungsanalysator in Versuch 5.1 würde diesen Winkel anders herum, also rechtsläufig von \underline{I}_S zur re-Achse ausgeben und somit $\varphi - 360^\circ = -143,1^\circ$ anzeigen.

Grundlagen Elektrotechnik: komplexe Zeitzeiger für Strom und Spannung werden in Großbuchstaben mit Unterstrich gekennzeichnet und enthalten die Information von Effektivwert und Phasenlage einer sinusförmigen Größe in Bezug zu einer Referenzspannung. Das ist in diesem Falle die durch das Netz eingepreßte Statorspannung \underline{U}_S , die auf die re-Achse gelegt wurde. Die Zeigerlänge entspricht dem Effektivwert der Größe, welcher ohne Unterstrich angegeben wird.

Im Gegensatz zur üblichen Konvention ist die komplexe Zahlenebene beim Zeigerdiagramm der SM immer um 90° nach links gedreht, so dass die re-Achse nach oben und die im-Achse nach links zeigt.

Hinweis: in Bild 2 ist 1 Kästchen $\neq 1\text{cm}$, daher ist div (Kästchen) anstatt cm als Einheit angegeben.



Anleitung

1. \underline{U}_S einzeichnen
2. φ und \underline{I}_S einzeichnen
3. \underline{U}_X ist gegenüber \underline{I}_S um 90° vorgedreht
4. Länge U_X berechnen
5. \underline{U}_X einzeichnen
6. \underline{U}_P bestimmen:
Ursprung zu Startpunkt von \underline{U}_X
7. U_P und ϑ ablesen

\underline{U}_P : komplexer Zeitzeiger

U_P : Zeigerlänge = Effektivwert

c.) Wie groß sind Polradspannung und Polradwinkel? Beide Werte können aus dem Zeigerdiagramm graphisch abgelesen werden.

Im Zeigerdiagramm sind graphisch mit hinreichender Genauigkeit ablesbar

$$U_P = 340\text{V und } \vartheta = 20..21^\circ.$$

Übrigens kann man die Aufgabe auch mit Matlab oder Octave lösen. Dazu muss man allerdings den Stromwinkel als linksläufiges Argument von der re-Achse nach \underline{I}_S nach angeben ($+143,1^\circ$) und die Winkel von Degree nach Radian umrechnen (Faktor $\pi/180$). Die komplexe Statorspannungsgleichung $\underline{U}_S = \underline{U}_P + \underline{U}_X$ muss dazu nach \underline{U}_P aufgelöst werden. Eingaben im Matlab-Workspace:

```
>> Us = 230;
```

Spannung liegt auf der re- Achse

```
>> Is = 15*exp(j*143.1*pi/180);
```

Strom ist um $143,1^\circ$ voreilend

```
>> Xd = 10;
```

Synchronreaktanz

$\gg U_x = j \cdot X_d \cdot I_s;$	Spannungsfall an X_d berechnen
$\gg U_p = U_s - U_x;$	Polradspannung bestimmen
$\gg \text{abs}(U_p) \quad \rightarrow \quad \text{ans} = 341.8026$	$\Rightarrow U_p = 341,8V$
$\gg \text{angle}(U_p) \cdot 180/\pi \quad \rightarrow \quad \text{ans} = 20.5449$	$\Rightarrow \vartheta = 20,5^\circ$

d.) Berechnen Sie das innere Drehmoment der Maschine!

Möglichkeit 1: stur die Formel aus dem Skript anwenden. Dabei für ω nicht die mechanische Winkelgeschwindigkeit ω_{mech} des Rotors, sondern natürlich das ω_{el} in der Statorwicklung einsetzen!

Dabei ist zu beachten: $\omega_{el}^2 \cdot L_d = \omega_{el} \cdot X_d$ und $\omega_{el} = 2 \cdot \pi \cdot f_{el}$ mit $f_{el} = f_s = 50\text{Hz}$

Damit erhält man
$$M_i = \frac{3 \cdot p}{\omega_{el} \cdot X_d} \cdot U_s \cdot U_p \cdot \sin \vartheta = 52,7 \text{ Nm}$$

Möglichkeit 2: Da der Wicklungswiderstand im Stator vernachlässigt werden soll und auch nirgendwo von Eisen- oder Erregerkreisverlusten die Rede ist, gilt $\eta_{SM} = 1$. Somit kann man wie folgt rechnen...

Wellenleistung: $P_{\text{Welle}} = P_{\text{Stator}} = 8,28 \text{ kW}$ Drehzahl: $N_{\text{Welle}} = 1500 \text{ Upm}$ wegen $p = 2$

Drehmoment:
$$M_i = \frac{P_{\text{Welle}}}{N_{\text{Welle}}} \cdot \frac{30}{\pi} = 52,7 \text{ Nm}$$

e.) Welche Verluste der Maschine können mit den gegebenen Daten bestimmt werden?

Ohm'scher Wicklungswiderstand nicht gegeben: Kupferverluste im Stator nicht zu bestimmen

Daten der Erregerwicklung nicht genannt: Kupferverluste im Rotor unklar

Schleppmoment nicht angegeben: mech. Schleppverluste und Eisenverluste unbekannt

⇒ Gar keine!

Anmerkung: Beide Rechenwege in Aufgabenteil d.) setzen unter der Vereinfachung $\eta_{SM} = 1$ eine Vernachlässigung aller Verluste voraus, was als Näherungsrechnung nur für sehr große Maschinen mit Wirkungsgraden über etwa 95% zulässig ist. Bei den Synchronmaschinen im Labor mit Nennleistungen im unteren einstelligen kVA-Bereich liegt der Wirkungsgrad zwischen 80 und 90%, so dass dieser Rechengang im Generatorbetrieb ein deutlich zu kleines Drehmoment liefert: zur Deckung der Verluste muss an der Welle ein entsprechend höheres Antriebsmoment aufgebracht werden. Umgekehrt würden wir im Motorbetrieb ein zu hohes Wellenmoment ausrechnen, da dann die Verluste durch die Leistungsaufnahme des Statorkreises gedeckt werden müssen und an der Welle entsprechend weniger zur Verfügung steht.