

# Die Asynchronmaschine

## Theorie Teil 2

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Ortskurve des Ständerstromes</b> .....	<b>3</b>
1.1	Ossanna-Kreis der Ströme .....	4
1.2	Ossanna-Kreis der Leistungen .....	5
1.3	Messtechnische Erfassung des Ossanna-Kreises .....	5
1.4	Abweichungen zwischen Berechnung und Messung .....	7
<b>2</b>	<b>Selbsterregte Asynchrongeneratoren</b> .....	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>12</b>

## 1 Ortskurve des Ständerstromes

Unter der Ortskurve des Ständerstromes, auch Ossanna-Kreis genannt, verstehen wir den geometrischen Ort der Endpunkte des komplexen Stromzeigers  $I_1$  in der Gauss'schen Zahlenebene in Abhängigkeit des Schlupfes  $s$  ( $-\infty \leq s \leq \infty$ ). Im ersten Teil der Theorie zur Asynchronmaschine wurde das Ersatzschaltbild nach Abb. 1 mit den zugehörigen Spannungsgleichungen 1.1 und 1.2 hergeleitet.

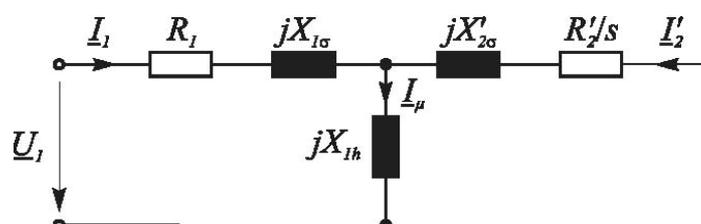


Abb. 1: T-Ersatzschaltbild der ASM im stationären Betrieb

$$\underline{U}_1 = \underline{I}_1(R_1 + jX_1) + \underline{I}'_2 jX_{1h} \quad (1.1)$$

$$0 = \underline{I}_1 jX_{1h} + \underline{I}'_2 \left( \frac{R'_2}{s} + jX'_2 \right) \quad (1.2)$$

Daraus lässt sich nun die Ortskurve direkt berechnen:

$$\underline{I}_1 = \underline{U}_1 \cdot \frac{1}{R_1 + j(X_{1\sigma} + X_{1h}) + \frac{X_{1h}^2}{R'_2/s + j(X_{2\sigma} + X_{1h})}} = \underline{U}_1 \cdot \frac{1}{R_1 + jX_1 + \frac{X_{1h}^2}{R'_2/s + jX_2}} = \underline{U}_1 \cdot \frac{1}{\underline{Z}(s)} = \underline{U}_1 \cdot \underline{Y}(s) \quad (1.3)$$

Legen wir den Strangspannungszeiger  $U_1$  in die reelle Achse der Gauss'schen Zahlenebene, so entspricht die Ortskurve des Ständerstromes  $I_1$  gerade der Ortskurve der Admittanz  $\underline{Y}(s)$ , die aus der Inversion der Ortskurve der Impedanz  $\underline{Z}(s)$  hervorgeht.



## 1.2 Ossanna-Kreis der Leistungen

Mit der Definition der komplexen Scheinleistung gemäss

$$\underline{S}_1 = P_1 + jQ_1 = 3 \cdot \underline{U}_1 \cdot \underline{I}_1^* \quad (1.4)$$

erhalten wir unter der Voraussetzung  $\underline{U}_1 = U_1$  die Ortskurve der Scheinleistung aus der konjugiert-komplexen Ortskurve der Ständerströme zu:

$$\underline{S}_1 = 3 \cdot U_1 \cdot I_1^* . \quad (1.5)$$

In der Praxis genügt es dabei, die negative imaginäre Achse mit der positiven im Kreisdiagramm der Ströme zu tauschen. Bei der genannten Definition der Scheinleistung wird induktive Blindleistung mit positivem und kapazitive mit negativem Vorzeichen aufgetragen. Abb. 2 entnehmen wir, dass die Asynchronmaschine stets ein Verbraucher induktiver Blindleistung ist. Für die in Abb. 2 eingezeichneten Betriebsbereiche gilt im einzelnen:

- |    |  |  |
|----|--|--|
| a) | Motorbetrieb ( $0 \leq s \leq 1$ ):        | Elektrische Leistung wird aufgenommen, mechanische Leistung wird abgegeben.  |
| b) | Generatorbetrieb ( $s'' \leq s \leq s'$ ): | Mechanische Leistung wird aufgenommen, elektrische wird abgegeben.   |
| c) | Bremsbetrieb ( $1 \leq s < \infty$ ):      | Elektrische und mechanische Leistung werden aufgenommen, die gesamte Leistung wird in der Maschine in Wärme umgesetzt. |

## 1.3 Messtechnische Erfassung des Ossanna-Kreises

Die exakte Konstruktion des Ossanna-Kreises bei bekannten Maschinenparametern unter Vernachlässigung der Eisenverluste ist in der entsprechenden Literatur, beispielsweise in [3] ausführlich erläutert. Im Folgenden wird eine vereinfachte Konstruktion vorgestellt, die im Rahmen der Mess- und Zeichengenauigkeiten praktisch sehr brauchbare Ergebnisse liefert und für die Versuchsauswertung empfohlen wird (vgl. Abb. 3).

Die Strangspannung legen wir in die reelle Achse der Gauss'schen Zahlenebene und zeichnen die mittels Leerlauf- und Kurzschlussversuch gemessenen Zeiger des Leerlaufstromes  $\underline{I}_{1,0}$  und des Kurzschlussstromes  $\underline{I}_{1,K}$ . Hieraus erhalten wir die beiden Punkte  $P_0$  und  $P_K$ . Der Mittelpunkt des Kreises liegt nun näherungsweise auf einer Parallelen zur imaginären Achse



woraus der Rotorwiderstand  $R_2'$  bestimmt werden kann. Dabei gilt für den Rotorkurzschlussstrom:

$$I'_{2,K} = m_I \cdot \overline{P_0 P_K} \quad (1.8)$$

Die Massstäbe werden im einzelnen wie folgt ermittelt:

- Strommassstab:

$$m_I = \frac{I_{1,K}}{0P_K} \quad (1.9)$$

- Leistungmassstab:

$$m_P = 3 \cdot U_1 \cdot m_I \quad (1.10)$$

- Drehmomentmassstab:

$$m_M = \frac{m_P}{\Omega_S} = 60 \cdot \frac{\text{min}^{-1}}{s^{-1}} \cdot \frac{m_P}{2\pi n_S} \quad (1.11)$$

Das Kippmoment  $M_{\text{Kipp}}$  im motorischen Betrieb entspricht der Strecke  $P_{\text{Kipp}}B$ , der maximalen mechanischen Leistung  $P_{m,\text{max}}$  die Strecke  $P_{\text{max}}A$  und dem Anlaufmoment  $M_A$  die Strecke  $P_KC$ . Die Konstruktion der Betriebspunkte  $P_{\text{Kipp}}$  und  $P_{\text{max}}$  erfolgt entsprechend der Darstellung in Abb. 3. Um den einzelnen Betriebspunkten konkrete Schlupfwerte zuzuordnen kann die Schlupfgerade konstruiert werden. Hierzu wählen wir zunächst auf dem unteren Halbkreis einen beliebigen Bezugspunkt  $S$  und zeichnen die Verbindungslinien  $P_0S$  und  $P_\infty S$ . Parallel zur letzteren wird die Schlupfgerade gelegt, wobei der Schnittpunkt mit der Strecke  $P_0S$  dem Schlupf  $s = 0$  und der Schnittpunkt mit der Geraden durch  $S$  und  $P_K$  dem Schlupf  $s = 1$  entspricht. Vom Bezugspunkt  $S$  ausgehende Strahlen kennzeichnen auf dem Kreis jene Schlupfwerte, die durch die Schnittpunkte auf der Schlupfgeraden bestimmt sind. Die Skalierung der Schlupfwerte auf der Schlupfgeraden erfolgt dabei linear.

## 1.4 Abweichungen zwischen Berechnung und Messung

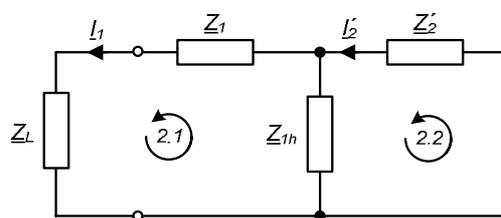
...

## 2 Selbsterregte Asynchrongeneratoren

Rotiert der Läufer einer Asynchronmaschine durch einen entsprechenden Antrieb (z.B. Turbine) schneller als das Ständerdrehfeld wird die Asynchronmaschine vom Verbraucher zum Generator. Der Schlupf der Maschine nimmt dabei negative Werte an ( $s < 0$ ). Die Umkehr der Energierichtung zeigt sich in der Ersatzschaltung dadurch, dass  $R'_2/s < 0$  und damit vom Verbraucher zur Energiequelle wird.

Die Richtung der Blindkomponente des Ständerstromes bleibt allerdings unverändert: Die Asynchronmaschine kann ihren Magnetisierungsstrom nicht selber erzeugen! Im Netzbetrieb kann sie den benötigten Magnetisierungsstrom über die Zuleitung beziehen, da das Netz hauptsächlich durch Synchrongeneratoren gespeist wird und diese induktive Ströme liefern können. Das Betriebsverhalten im Generatorbetrieb am Drehstromnetz folgt aus der unteren Hälfte des Kreisdiagramms.

Soll jedoch ein Asynchrongenerator ohne Netzanschluss alleine ein Inselnetz versorgen, muss ihm die notwendige Blindleistung z.B. mit einer Kondensatorbatterie zur Verfügung gestellt werden. Die sättigungsabhängige Maschinenhauptinduktivität  $L_{1h}$  und die Kondensatoren bilden zusammen einen Schwingkreis, der bei angetriebenem Läufer durch einen Stromstoß oder den Restmagnetismus (Remanenz) zu aufklingenden Schwingungen angeregt werden kann. Die benötigte Kapazität lässt sich aus dem Ersatzschema der Asynchronmaschine nach Abb. 4 berechnen. Im Ersatzschema sind die Stator- und Rotorwiderstände zu den Impedanzen  $Z_1$  und  $Z_2'$  zusammengefasst und  $Z_L$  stellt die Lastimpedanz dar.

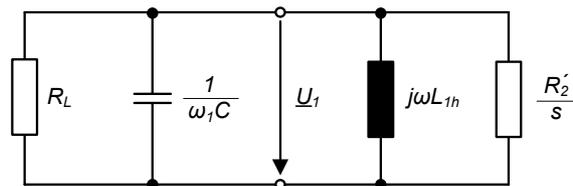


**Abb. 4:** Asynchronmaschine als Inselgenerator

$$\underline{I}_1 \cdot (\underline{Z}_L + \underline{Z}_1 + \underline{Z}_h) - \underline{I}'_2 \cdot \underline{Z}_h = 0 \quad (2.1)$$

$$-\underline{I}_1 \cdot \underline{Z}_h + \underline{I}'_2 \cdot (\underline{Z}_h + \underline{Z}'_2) = 0 \quad (2.2)$$

Damit das Gleichungssystem 2.1 /2.2 von Null verschiedene Lösungen aufweist, muss die Koeffizientendeterminante  $|\mathbf{A}|$  Null sein. (Dies ist die Selbsterregungsbedingung, d.h. das Gleichungssystem  $\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} = 0$  hat in diesem Fall unendlich viele Lösungen). Werden die Längsimpedanzen der Maschine vernachlässigt, so erhalten wir bei einer ohmsch-kapazitiven Last das in Abb. 5 gezeichnete Ersatzschema.



**Abb. 5:** Einfache Ersatzschaltung der ASM im Inselbetrieb

Durch Ausmultiplizieren und Nullsetzen der Koeffizientendeterminante  $|\mathbf{A}|$  erhalten wir folgende Gleichung:

$$j\omega L_{1h} R_L + R_L \cdot R'_2 / s + j\omega L_{1h} \cdot R'_2 / s - \omega^2 R_L C L_{1h} \cdot R'_2 / s = 0. \quad (2.3)$$

Durch Koeffizientenvergleich folgt:

$$\text{Im: } L_{1h} R_L + L_{1h} \cdot R'_2 / s = 0 \quad \Rightarrow R_L = -R'_2 / s \quad (2.4)$$

$$\text{Re: } R_L \cdot R'_2 / s = \omega^2 R_L C L_{1h} \cdot R'_2 / s \quad \Rightarrow \omega = \pm 1 / \sqrt{C \cdot L_{1h}} \quad (2.5)$$

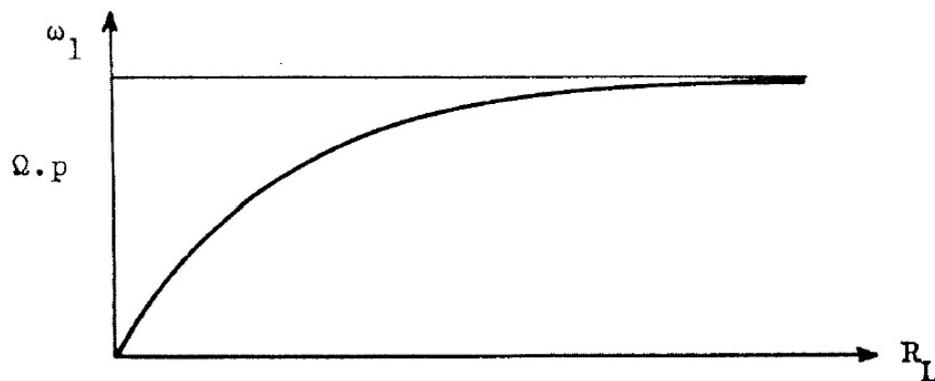
Gl. 2.4 bedeutet nun nichts anderes, als dass sich der Schwingkreis bei negativen Schlupfwerten entdämpft. Ausserdem lässt sich bei gegebener Drehzahl  $\Omega$  der Maschine die Statorfrequenz  $\omega_1$  der Maschine bestimmen: Sie wird mit Hilfe der Schlupfdefinition einer  $2p$ -poligen Maschine

$$p \cdot \Omega = \omega_1 \cdot (1 - s) \quad (2.6)$$

zu:

$$\omega_1 = p \cdot \Omega \cdot \frac{R_L}{R_L + R'_2} \quad (2.7)$$

Üblicherweise wird bei Leerlauf ( $R_L \rightarrow \infty$ )  $\omega_1 = 50$  Hz gewählt.



**Abb. 6:** Statorfrequenz als Funktion des Lastwiderstandes

Aus Gl. 2.5 lässt sich die benötigte Kapazität  $C$  berechnen:

$$C = \frac{1}{\omega_1^2 \cdot L_{1h}}. \quad (2.8)$$

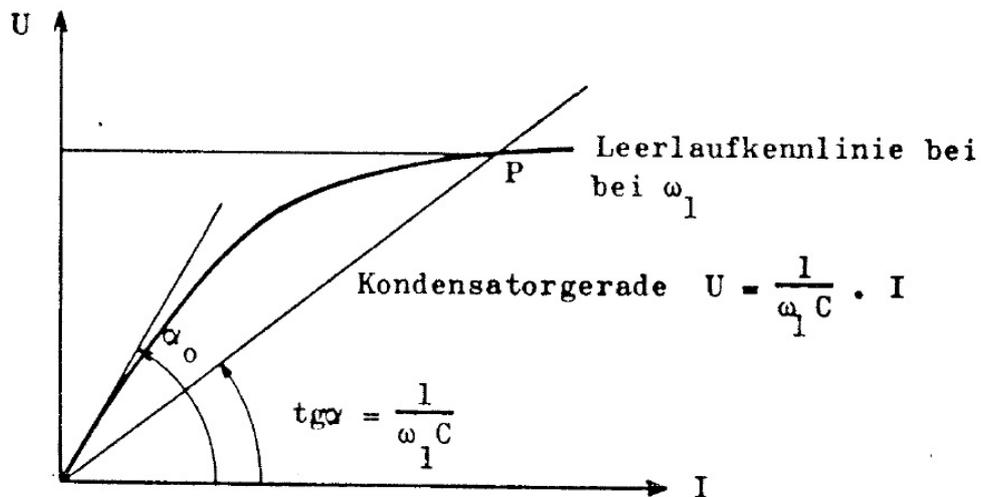
Der Wert der Maschinenhauptinduktivität  $L_{1h}$  wird der Leerlaufkennlinie entnommen:

$$L_{1h} = \frac{U_{10}}{\omega_1 \cdot I_{10}}. \quad (2.9)$$

Da  $L_{1h}$  stark sättigungsabhängig ist, muss zur Berechnung von  $C$  für  $U_{10}$  die beim Generatorbetrieb maximal auftretende Klemmenspannung gewählt werden. Für eine ohmsch induktive Last entspricht sie gerade der gewünschten Leerlaufspannung des Generators. D.h. die Wahl der Kapazität  $C$  bestimmt die Leerlaufspannung des Inselnetzes. Die Leerlaufkennlinie ist dabei natürlich bei der später gewünschten Frequenz  $\omega_1$  des Inselnetzes aufzunehmen. Mit Gl. 2.9 folgt  $C$  zu:

$$C = \frac{I_{10}}{\omega_1 \cdot U_{10}}. \quad (2.10)$$

Wird der Generator hochgefahren schaukelt sich die Spannung solange auf bis sich ein stabiler Gleichgewichtszustand einstellt, welcher durch den Schnittpunkt der Leerlaufkennlinie mit der Kondensatorgeraden festgelegt ist.



**Abb. 7:** Grafische Ermittlung der Leerlaufspannung

Bei Belastung der Maschine nimmt die Netzfrequenz gemäss Abb. 6 ab. Die neue Frequenz in Abb. 7 eingetragen (gestrichelte Linie), ergibt eine Schrumpfung der Leerlaufkennlinie in y-Richtung einerseits (stärkerer Sättigungseffekt aufgrund der geringeren Frequenz) und eine Zunahme der Kondensatorgeraden andererseits. Dies bewirkt schlussendlich eine schnelle Abnahme der Spannung im Betriebspunkt.

### 3 Literaturverzeichnis

- [1] Saniter, C. Skript zum Laborversuch Asynchronmaschine  
TU Berlin, 2000
- [2] Vogel, J. Elektrische Antriebstechnik  
Verlag Technik, Berlin, 1991
- [3] Nürnberg, W.; Hanitsch, R. Die Prüfung elektrischer Maschinen  
Springer-Verlag, Berlin, 1987
- [4] Müller, G. Elektrische Maschinen  
Grundlagen, Aufbau und Wirkungsweise  
Verlag Technik, Berlin; 1990
- [5] Müller, G. Betriebsverhalten rotierender elektrischer  
Maschinen  
Verlag Technik, Berlin; 1990
- [6] Bödefeld, Th.; Sequenz, H. Elektrische Maschinen  
Springer-Verlag, Berlin; 1971
- [7] Fischer, R. Elektrische Maschinen  
Carl Hanser Verlag, München; 10. Auflage, 1999
- [8] Taegen, F. Einführung in die Theorie der elektrischen  
Maschinen II  
Vieweg, Braunschweig; 1971