

5. Synchronmaschine

Die Synchronmaschine ist wie die Asynchronmaschine eine Drehfeldmaschine, wobei ein wesentlicher Unterschied vorliegt: Sie kann nur bei einer synchronen Drehzahl betrieben werden, die durch Netzfrequenz f_1 und Polpaarzahl p zu $n_1 = n_d = \frac{f_1}{p}$ gegeben ist. Diese

Bedingung macht die Synchronmaschine für den Betrieb als Motor (ohne Umrichter zur Frequenzverstellung) weniger geeignet. Es gibt jedoch auch Synchronmaschinen-Antriebe mit Frequenzumrichter [Meyer], die aber hier nicht behandelt werden sollen. Für den Anlauf sind im allgemeinen Zusatzrichtungen erforderlich.

Die Synchronmaschine ohne Frequenzumrichter ist heute als Drehstromgenerator bedeutsam. Alle Drehstromgeneratoren in Dampf- und Wasserkraftwerken und Fahrzeugen sind in der Regel mit Synchronmaschinen ausgerüstet. Sie sind heute mit Nennleistungen bis zu 1300 MW in Betrieb.

5.1 Aufbau und Wirkungsweise

Aufbau

Der Ständer der Synchronmaschine trägt eine Drehstromwicklung (genau wie die Asynchronmaschine). Der Läufer ist mit einer über Schleifringe angeschlossenen Gleichstromwicklung ausgerüstet, die ein relativ zum Läufer konstantes Magnetfeld erzeugt. Die Schleifringe können auch durch Verwendung einer Drehstromerregemaschine mit rotierendem Gleichrichter auf dem Läufer ersetzt werden.

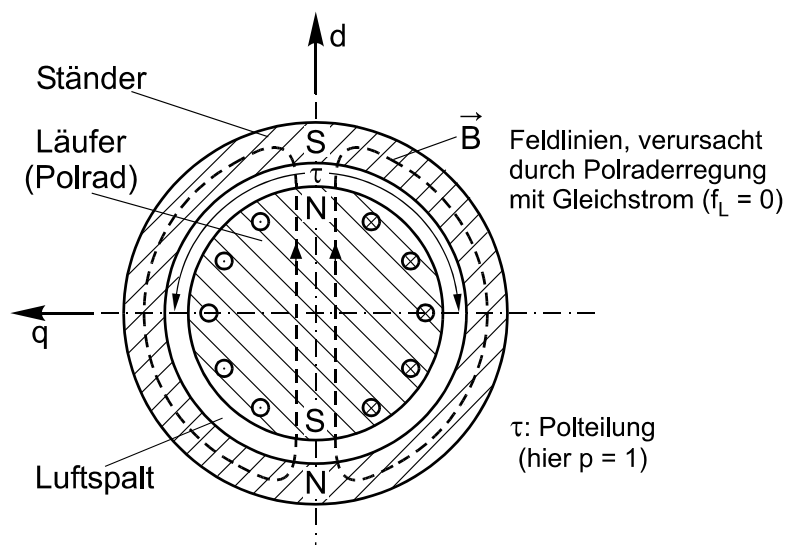


Bild 5.1: Schnitt durch eine Vollpolmaschine (Ständerwicklungen nicht dargestellt)

Da der Läufer mit Synchrondrehzahl rotiert, entsteht relativ zum Ständer ein Drehfeld mit $n_d = n_1$.

Wir unterscheiden zwei Ausführungsformen des Läufers: Vollpol-Läufer und Schenkelpol-Läufer.

Der zylinderförmige Vollpol-Läufer ist aus massiven Eisen, da wegen der synchronen Drehzahl die Frequenz im Läufer Null ist (keine Eisenverluste).

Er hat eingefräste Nuten zur Aufnahme der Wicklungen. Durch die Wicklungsverteilung wird eine räumlich annähernd sinusförmige Induktionsverteilung über den Umfang erzielt.

Vollpolläufer werden bei Maschinen mit hohen Drehzahlen z.B. 3000 U/min eingesetzt. Sie haben kleine Durchmesser, die durch die mechanische Beanspruchung (Fliehkraft) begrenzt sind. ($v_u \approx 200$ m/s)

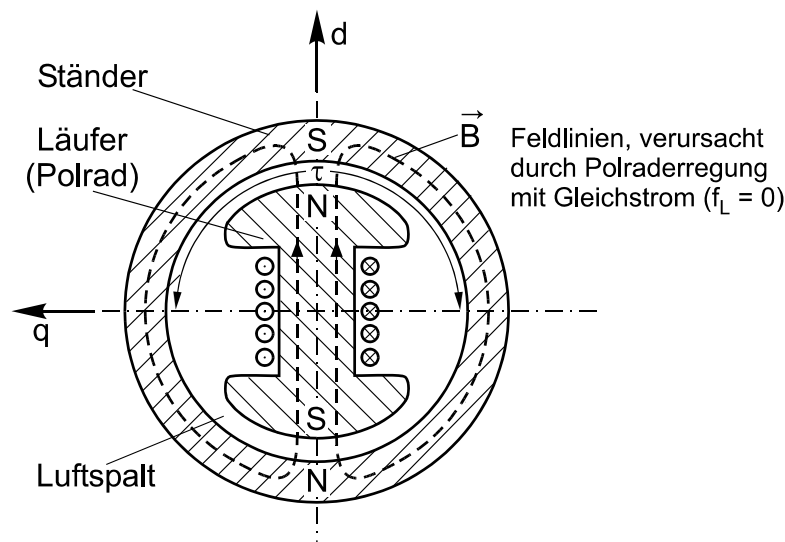


Bild 5.2: Schnitt durch eine Schenkelpolmaschine

Der Schenkelpol-Läufer dagegen hat ausgeprägte Pole. Sie werden bei Maschinen mit niedrigen synchronen Drehzahlen, d.h. bei hohen Polpaarzahlen, eingesetzt (z.B. Wasserkraftgeneratoren). Die mechanischen Belastungen lassen dann große Polraddurchmesser zu (bis zu einigen zehn Metern).

Der üblicherweise vorhandene Dämpferkäfig auf dem Polrad der Voll- und Schenkelpolmaschine wird hier weggelassen, weil er in den betrachteten stationären Betriebszuständen ($s = 0$) keinen Strom führt und daher unwirksam ist.

Wirkungsweise:

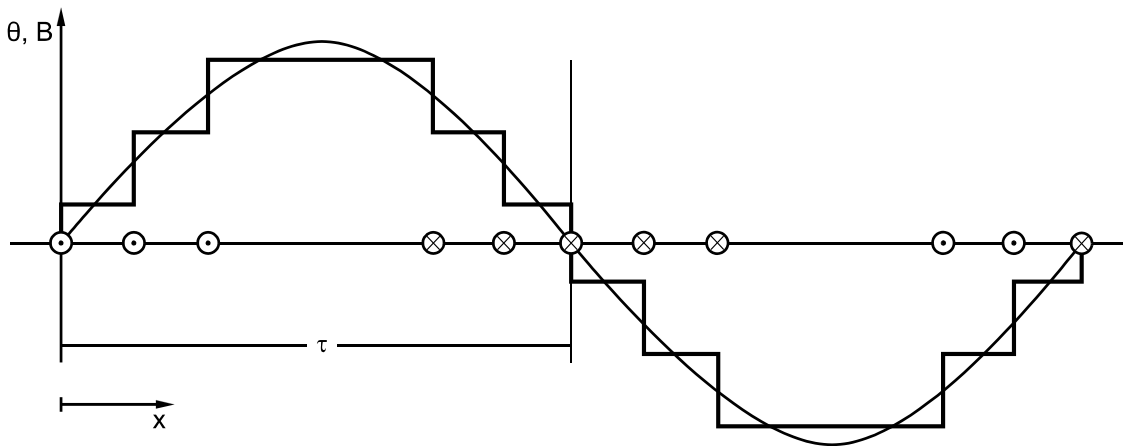


Bild 5.3: Durchflutung über der Abwicklung des Läuferumfangs bei $t = 0$

In beiden Fällen können wir die orts- und zeitabhängige Luftspaltinduktion beschreiben durch:

$$B(x,t) = \hat{B} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{\tau}x - \omega t\right) \quad (5.1)$$

In den Drehstromwicklungen des Ständers mit der Windungszahl N_1 und der Spulenfläche $A = \tau \cdot l$ entsteht ein Fluß Φ_p von

$$\Phi_p = \int_{\tau} \vec{B}(x,t) \cdot \vec{l} \, dx \quad (5.2)$$

(\vec{B} und \vec{l} sind an jeder Stelle gleich gerichtet)

In der Ständerwicklung wird eine Spannung u_p (sog. Polradspannung) induziert:

$$u_p = N_1 \cdot \frac{d\Phi_p(t)}{dt} = \frac{d\psi_p(t)}{dt} \quad (5.3)$$

(vgl. Seite 5.17)

Leerlauf der Synchronmaschine im Generatorbetrieb:

Das Polrad mit der vom Gleichstrom I_f (Erreger bzw. Feldstrom) durchflossenen Wicklung erzeugt eine räumlich sinusförmig verteilte Luftspaltinduktion, die fest mit der räumlichen Stellung des Läufers (Polrad) verknüpft ist. Durch Drehung des Läufers entsteht ein Drehfeld, so daß in der Ständerwicklung die Spannungen eines symmetrischen Dreiphasensystems, die Polradspannung, induziert werden.

Im Leerlauf bei Generatorbetrieb fließt kein Strom in der Ständerwicklung. Es entsteht nur der Fluß Φ_p , der durch I_f hervorgerufen wird (vgl. Bild 5.1 und 5.2). Die induzierte Strangspannung ist daher Φ_p bzw. I_f proportional. Der Zusammenhang ist dargestellt durch die sog. "Leerlaufkennlinie" der Synchronmaschine $U_p = f(I_f)$ (U_p = Polradspannung). Sie ist bei konstanter Generatordrehzahl linear von I_f abhängig, bis sich bei $I_f > I_{f0}$ die Eisensättigung bemerkbar macht.

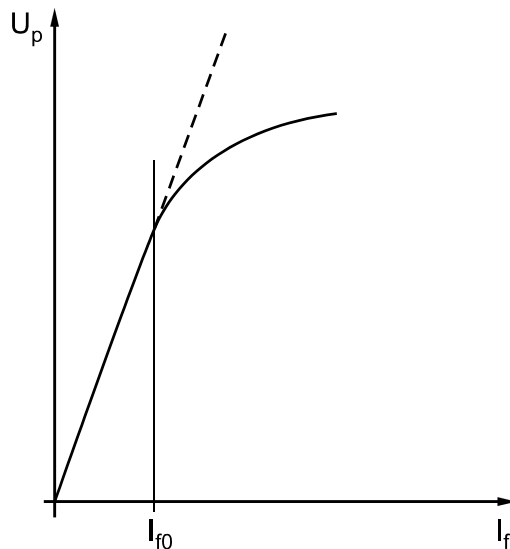


Bild 5.4: Leerlaufkennlinie

Belastete Synchronmaschine als Generator:

Belasteter Synchrongenerator bedeutet:

1. mechanischer Antrieb des Läufers
2. Gleichstrom in der Läuferwicklung und dadurch induzierte Spannungen in der Ständerwicklung (Polradspannung)
3. Anschluß einer elektrischen Last, d.h. Abgabe von elektrischer Leistung

In der Drehstromwicklung des Ständers fließen Ströme eines Drehstromsystems. Sie erzeugen ebenfalls ein Drehfeld (sog. Ankerrückwirkung).

Im Luftspalt der belasteten Synchronmaschine haben wir die Überlagerung zweier Drehfelder:

1. das Läuferdrehfeld $\underline{\Phi}_p$ (durch den Gleichstrom I_f erzeugt)
2. das durch den Belastungsstrom \underline{I}_1 erzeugte Ständerfeld $\underline{\Phi}_a$

Das resultierende Drehfeld induziert in der Ständerwicklung (Anker) eine Spannung.

Die **Polradspannung** ist die vom Polrad (Läuferdrehfeld Φ_p) in der Ständerwicklung induzierte Spannung. Sie kann nur bei Leerlauf (Generator: $I_1 = 0$) an den Klemmen gemessen werden. Bei Last ist sie eine reine Rechengröße. Bei Belastung ($I_1 \neq 0$) tritt zu der Polradspannung die **Ankerrückwirkung**: Die Spannung, die durch den Fluß des Ständerfeldes Φ_a in der Ständerwicklung induziert wird. Je nach Phasenlage von Ständerstrom bzw. zugehörigem Fluß kann die Gesamtspannung kleiner oder größer als die Polradspannung U_p sein.

Hinweis auf den Unterschied gegenüber der Asynchronmaschine und dem Transformator: Dort erzeugt ein Belastungsstrom in der Läufer- bzw. Sekundärwicklung wegen der Hauptflußkonstanz einen entsprechenden Gegenstrom in der Ständer- bzw. Primärwicklung. Dadurch bleiben die resultierenden Durchflutungen und der Hauptfluß auch bei veränderlichem Belastungswiderstand praktisch konstant.

Bei Synchronmaschinen gibt es keine Rückwirkung des Ständerfeldes auf das Polrad, da wegen der synchronen Drehzahl des Polrades in der Polradwicklung im stationären Zustand keine Spannung induziert wird.

5.2 Ersatzschaltbild und Zeigerdiagramm

Die nachfolgende Darstellung beschränkt sich auf die Vollpolmaschine, hat aber näherungsweise auch für die Schenkelpolmaschine Gültigkeit. Bei einer exakten Betrachtung der Schenkelpolmaschine muß berücksichtigt werden, daß der Läufer nicht rotationssymmetrisch ist und daher die Feldgrößen und die Ersatzschaltbilder für die Läuferlängs- und -querachse unterschieden werden müssen.

Eine Schwierigkeit bei der Entwicklung von Ersatzschaltbild und Zeigerdiagramm ist die Tatsache, daß in der Läuferwicklung ein Gleichstrom fließt, der im Zeigerbild nicht darstellbar ist.

Wesentlich für das Ersatzschaltbild ist allein, daß der Läufer ein Drehfeld erzeugt. Dieses Drehfeld kann man sich auch durch eine zusätzliche Drehstromwicklung im Ständer entstanden denken, welche die gleichen Wicklungsdaten hat, wie die tatsächliche Ständerwicklung und von einem symmetrischen Drehstrom durchflossen wird.

Wir definieren einen fiktiven Ständerstrom I_e in der zusätzlichen, fiktiven Drehstromwicklung, der das gleiche Drehfeld - beschrieben durch den Fluß Φ_p - erzeugt, wie der in der tatsächlichen Läuferwicklung fließende Gleichstrom I_f .

Wie bei der Asynchronmaschine entwickeln wir dann ein einphasiges Ersatzschaltbild.

Für die leerlaufende Synchronmaschine gilt:

Der Strom I_e erzeugt den Fluß Φ_p und dieser die Polradspannung u_p .

$$u_p = N_1 \cdot \frac{d\Phi_p(t)}{dt} = L_{1h} \cdot \frac{di_e}{dt} \quad (5.4)$$

$$\underline{U}_p = N_1 \cdot j\omega \underline{\Phi}_p = L_{1h} \cdot j\omega \underline{I}_e \quad (5.5)$$

Bei belasteter Synchronmaschine tritt zusätzlich ein Ständerstrom I_1 auf, der ein Ständerdrehfeld erzeugt, beschrieben durch den Ankerfluß Φ_a . Φ_a induziert in der Ständerwicklung die Spannung u_a (Ankerrückwirkung):

$$u_a = N_1 \cdot \frac{d\Phi_a(t)}{dt} = L_{1h} \cdot \frac{di_1}{dt} \quad (5.6)$$

$$\underline{U}_a = N_1 \cdot j\omega\Phi_a = L_{1h} \cdot j\omega I_1 \quad (5.7)$$

Beide Flüsse Φ_p und Φ_a sind mit der gleichen Hauptinduktivität L_{1h} verknüpft, da, entsprechend der Annahme, die fiktive und tatsächliche Ständerwicklung die gleichen Wicklungsdaten haben.

Bild 5.5 zeigt die vereinfachten Ersatzschaltbilder der Synchronmaschine für Ständerstreuung $X_{1\sigma} = 0$ und Ständerwiderstand $R_1 = 0$ mit Stromquelle I_e und Spannungsquelle \underline{U}_p .

Bei der nach dem VZS in die Ersatzschaltbilder eingetragenen Spannung \underline{U}_1 und dem Strom I_1 wäre die Leistung der Quelle positiv, d.h. sie nimmt Leistung vom Netz auf, die Maschine arbeitet als Motor. Die Zeigerdiagramme Bild 5.5 zeigen aber einen Betriebszustand, in dem Spannung \underline{U}_1 und Strom I_1 entgegengerichtet sind ($\varphi > 90^\circ$). Die Leistung der Quelle ist also negativ, sie gibt Leistung an das Netz ab, die Maschine arbeitet als Generator.

\underline{U}_d ist die durch das resultierende Drehfeld entstehende Spannung.

$$\underline{U}_d = \underline{U}_p + \underline{U}_a \quad (5.8)$$

Sie ist auch darstellbar durch

$$\underline{U}_d = N_1 \cdot j\omega\Phi_h = L_{1h} \cdot j\omega I_\mu \quad (5.9)$$

Mit $\Phi_h = \Phi_p + \Phi_a$; $I_\mu = I_e + I_1$

Φ_h ist der tatsächliche im Luftspalt vorhandene Hauptfluß. (Überlagerung der beiden Drehfelder).

I_μ ist eine fiktive Größe, so wie auch I_e eine fiktive Ersatzgröße ist, die tatsächlich nirgends vorkommt.

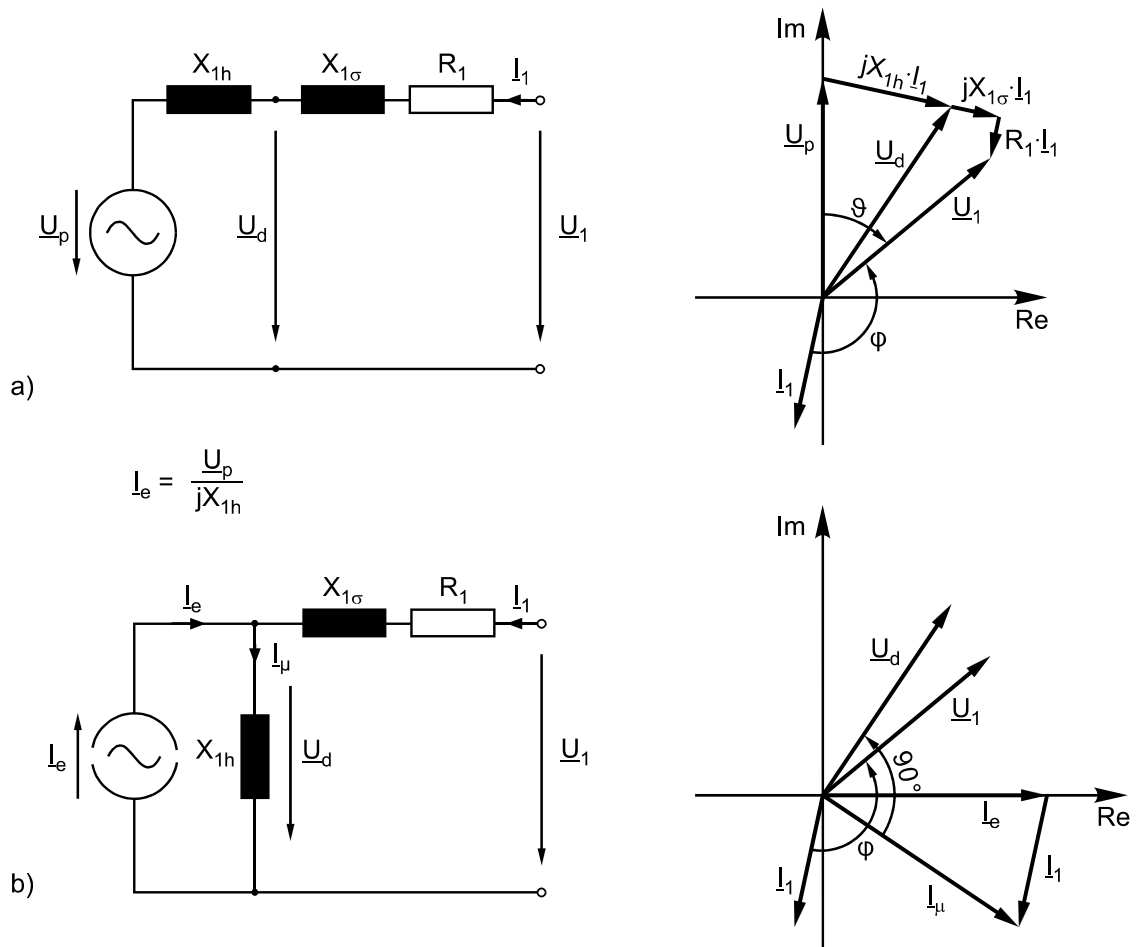


Bild 5.5: Ersatzschaltbilder (im VZS) und Zeigerdiagramme der Synchronmaschine im Generatorbetrieb; a) mit Spannungsquelle \underline{U}_p , b) mit Stromquelle \underline{I}_e

Im Ersatzschaltbild ist weiter zu berücksichtigen, daß der Ständerstrom I_1 ein Streufeld erzeugt, darstellbar durch $L_{1\sigma}$ bzw. $X_{1\sigma} = \omega \cdot L_{1\sigma}$, und einen Spannungsabfall am ohmschen Widerstand der Wicklung, dargestellt durch R_1 . (Bild 5.6)

Am Beispiel der Synchronmaschine wird noch einmal kurz auf die Zählpeilsysteme eingegangen. Bei der Synchronmaschine ist in der Literatur fast ausschließlich das Erzeugerzählpeilsystem (EZS) gebräuchlich. Da bisher nur das VZS behandelt wurde erfolgt hier eine Gegenüberstellung der beiden Systeme für das Ersatzschaltbild der Synchronmaschine im Generatorbetrieb. Der Unterschied von Verbraucherzählpeilsystem (VZS) und Erzeugerzählpeilsystem liegt nur in der Zählrichtung von I_1 . Im VZS ist die aufgenommene Leistung positiv, im EZS ist die abgegebene Leistung positiv.

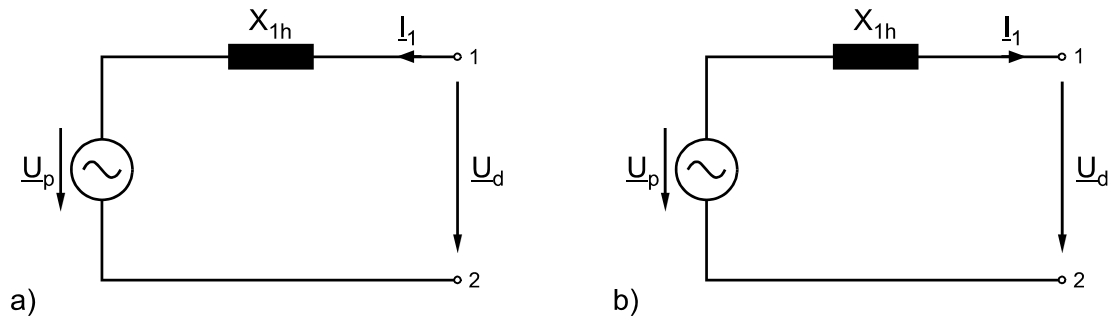


Bild 5.6: Vereinfachte Ersatzschaltbilder der Synchronmaschine im Generatorbetrieb; a) im VZS, b) im EZS

Für den Zusammenhang $\underline{U}_p = f(\underline{I}_e)$ ist das Zählpfeilsystem zu berücksichtigen, daher

$$\underline{U}_p = +j\underline{I}_e \cdot X_{1h} \quad (\text{VZS}) \quad (5.10)$$

$$\underline{U}_p = -j\underline{I}_e \cdot X_{1h} \quad (\text{EZS}) \quad (5.11)$$

Für abgegebene Leistung gilt:

$$P_{ab} = -3 \cdot \operatorname{Re}\{\underline{U}_{Str} \cdot \underline{I}_{1Str}^*\} \quad (\text{VZS}) \quad (5.12)$$

$$P_{ab} = +3 \cdot \operatorname{Re}\{\underline{U}_{Str} \cdot \underline{I}_{1Str}^*\} \quad (\text{EZS}) \quad (5.13)$$

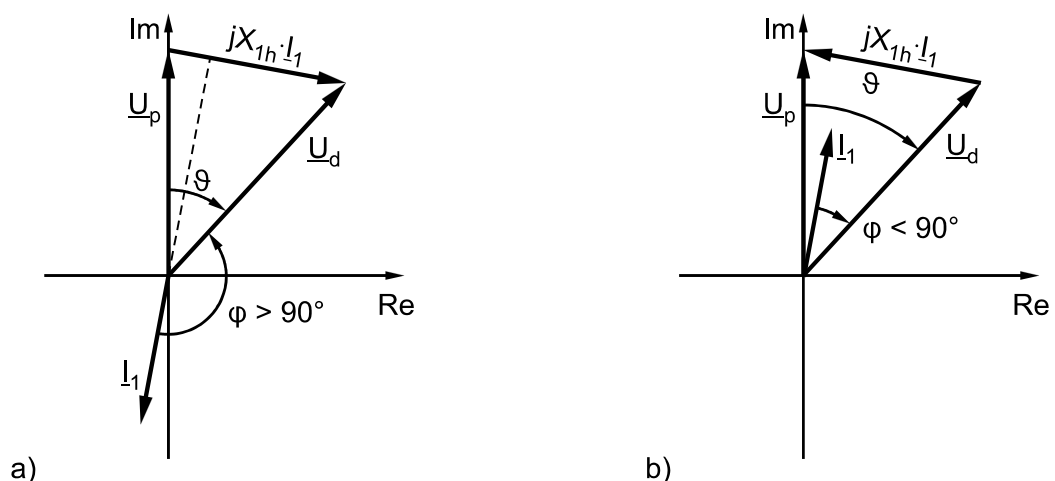


Bild 5.7: Zeigerdiagramme der Synchronmaschine im Generatorbetrieb; a) im VZS, b) im EZS

Winkelbetrachtung im Zeigerbild:

- φ ist der Phasenwinkel zwischen Ständerstrom \underline{I}_1 und Klemmenspannung \underline{U}_1 (von \underline{I}_1 nach \underline{U}_1 gezählt).
- ϑ ist der Phasenwinkel zwischen Polradspannung \underline{U}_p und Klemmenspannung \underline{U}_1 ; er heißt "Polradwinkel" oder "Lastwinkel" (von \underline{U}_p nach \underline{U}_1 gezählt)

Im Leerlauf ist $\vartheta = 0$ ($\underline{U}_1 = \underline{U}_p$). Bei Belastung wächst ϑ . Bei Generatorbetrieb eilt das Polrad vor (ϑ negativ), bei Motorbetrieb bleibt das Polrad zurück (ϑ positiv), jeweils gemessen am Zustand bei Leerlauf. Bei Laständerung ändert sich nur der Betrag von ϑ , die Drehzahl bleibt konstant (synchrone Drehzahl).

5.3 Stationärer Betrieb

Für die folgende Betrachtung machen wir zwei Vereinfachungen:

1. Die Leerlaufkennlinie wird als Gerade angenommen.
2. Der ohmsche Widerstand der Ständerwicklung wird vernachlässigt.

Im Gegensatz zu Ersatzschaltbild 5.6 wird hier die Ständerstreuinduktivität $X_{1\sigma}$ berücksichtigt. Die Zusammenfassung von $X_{1\sigma}$ und X_{1h} führt zu

$$X_S = X_{1\sigma} + X_{1h} \quad (5.14)$$

X_S heißt: "synchrone Reaktanz". Damit ergibt sich das Ersatzschaltbild im VZS nach Bild 5.8a.

Spannungsgleichungen

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_p + j\underline{I}_1 X_S \quad (5.15)$$

wobei sinnvoll gesetzt wird (vgl. Bild 5.8):

$$\begin{aligned} \underline{U}_p &= jU_p, \quad \underline{I}_e = I_e \\ \underline{U}_p &= jU_p = jX_{1h}I_e \end{aligned}$$

In Anlehnung an das ESB der Asynchronmaschine erhält man das ESB der Synchronmaschine nach Bild 5.8 b

Stromgleichungen

$$I_1 + I_e = I_\mu \quad (5.16)$$

mit

$$\underline{U}_d = \underline{U}_{1h} = jX_{1h} I_\mu$$

$$\underline{U}_p = jX_{1h} I_e$$

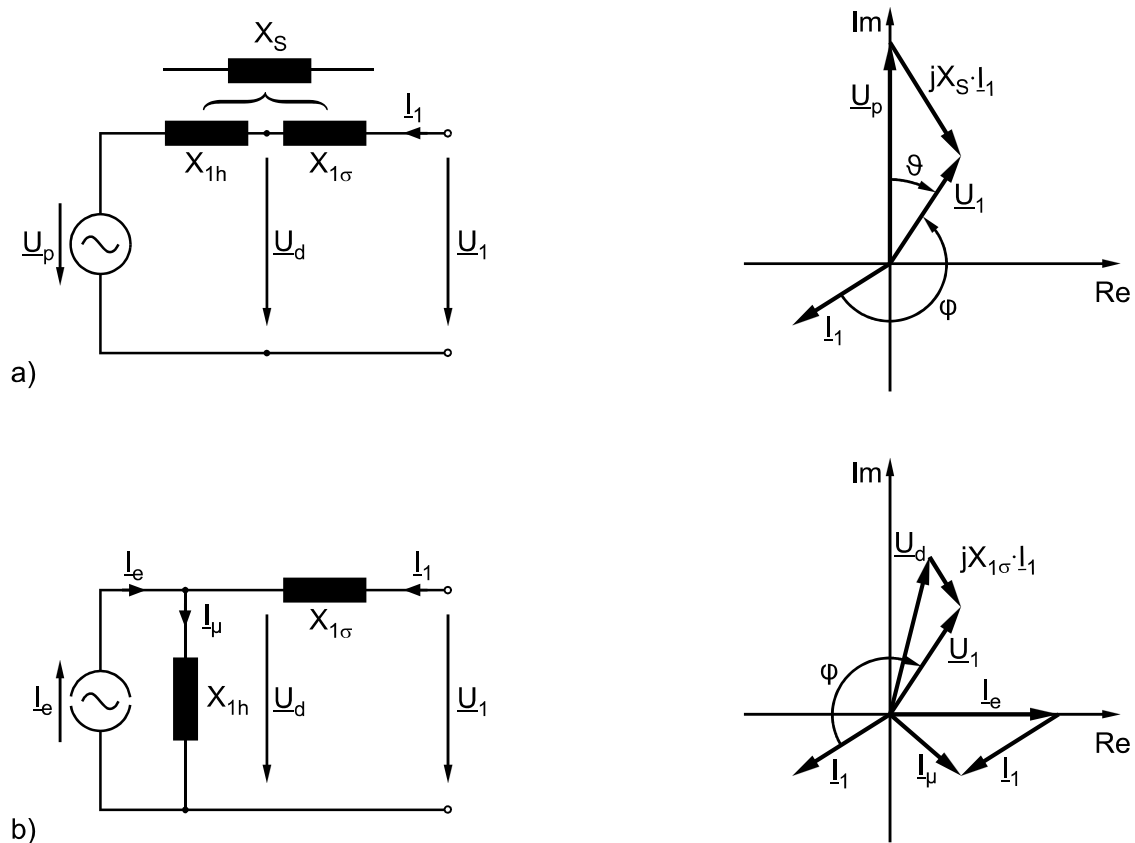


Bild 5.8 Vereinfachte Ersatzschaltbilder der Synchronmaschine im Generatorbetrieb
a) mit Spannungsquelle \underline{U}_p , b) mit Stromquelle I_e

Da sich beim Motor- oder Generatorbetrieb (Wirkleistungsaufnahme d.h. $P > 0$, $\vartheta > 0$, bzw. -abgabe, $P < 0$, $\vartheta < 0$) die Zeiger der Spannungen und Ströme gegenüber den läuferfesten (d-, q)-System verdrehen, ist zur rechnerischen Behandlung eine Zerlegung der komplexen Größen in Real- und Imaginärteil von Vorteil (vgl. Zeigerbild 5.9 b). Die reelle Koordinate der Gauß'schen Zahlenebene legen wir in die Längsachse des Läufers, die imaginäre in seine Querachse.

Es gelten folgende Gleichungen für die d- (längs-) und q- (quer-) Komponenten:

$$\underline{U}_1 = U_d + jU_q \quad , \quad U_1 = \sqrt{U_d^2 + U_q^2} \quad (5.17)$$

$$\underline{I}_1 = I_d + jI_q \quad , \quad I_1 = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \quad (5.18)$$

Im läuferfesten (d, q)-System ergeben sich durch Einsetzen dieser Gleichungen folgende Beziehungen:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= U_d + jU_q = jX_S(I_d + jI_q) + jU_p \\ &= jX_S I_d - X_d I_q + jU_p \end{aligned} \quad (5.19)$$

Eine Aufspaltung in Real- und Imaginärteil ergibt

$$\text{Re}\{\underline{U}_1\} = U_d = -X_S I_q = -U_1 \sin \vartheta \quad (5.20)$$

$$\text{Im}\{\underline{U}_1\} = U_q = X_S I_d + U_p = U_1 \cos \vartheta \quad (5.21)$$

Durch Einsetzen der Gleichungen (5.17) und (5.18) in die Beziehung für die komplexe Scheinleistung \underline{S} im VZS

$$\begin{aligned} \underline{S}_q^* &= P_1 + jQ_1 = 3 \underline{U}_1 \underline{I}_1^* = 3 (U_d + jU_q)(I_d - jI_q) \\ &= 3 [U_d I_d + U_q I_q + j(U_q I_d - U_d I_q)] \end{aligned} \quad (5.22)$$

folgt durch Koeffizientenvergleich für die ständerseitige Wirk- und Blindleistung im (d-, q)-System

$$P_1 = 3(U_d I_d + U_q I_q) \quad (5.23)$$

$$Q_1 = 3(U_q I_d - U_d I_q) \quad (5.24)$$

Durch Einsetzen der Gleichung (5.20) und (5.21) folgt für die Wirkleistung:

$$\begin{aligned}
 P_1 &= 3 \left[U_d \cdot \frac{U_1 \cos \vartheta - U_p}{X_S} + U_q \cdot \frac{U_1 \sin \vartheta}{X_S} \right] \\
 &= \frac{3}{X_S} \left[-U_1^2 \sin \vartheta \cos \vartheta + U_p U_1 \sin \vartheta + U_1^2 \sin \vartheta \cos \vartheta \right] \\
 &= 3 U_p \frac{U_1}{X_S} \sin \vartheta = 3 U_p I_k \sin \vartheta
 \end{aligned} \tag{5.25}$$

und für die Blindleistung:

$$\begin{aligned}
 Q_1 &= 3 \left[U_q \cdot \frac{U_1 \cos \vartheta - U_p}{X_S} - U_d \cdot \frac{U_1 \sin \vartheta}{X_S} \right] \\
 &= \frac{3}{X_S} \left[U_1^2 (\cos \vartheta)^2 - U_p U_1 \cos \vartheta + U_1^2 (\sin \vartheta)^2 \right] \\
 &= 3 \frac{U_1}{X_S} [U_1 - U_p \cos \vartheta] = 3 I_k [U_1 - U_p \cos \vartheta]
 \end{aligned} \tag{5.26}$$

wobei mit $U_1/X_S = I_k$ der meßbare Kurzschlußstrom I_k eingeführt werden kann.

Die Synchronmaschine kann elektrische Leistung aufnehmen ($P_1 > 0$, Motorbetrieb) und abgeben ($P_1 < 0$, Generatorbetrieb). Außerdem kann sie im Motor- und Generatorbetrieb induktive Blindleistung aufnehmen ($Q_1 > 0$, untererregter Betrieb) und abgeben ($Q_1 < 0$, übererregt).

Anhand der wichtigen Gleichungen für die Wirk- und Blindleistung (5.25) und (5.26) lassen sich die vier Betriebsquadranten in Abhängigkeit vom Polradwinkel und der Polradspannung $U_p = X_{lh} I_e$ bzw. dem Erregerstrom I_e definieren.

Eine zweite Möglichkeit die Betriebszustände der Synchronmaschine auf einen Blick zu unterscheiden ist die Phasenlage von \underline{I}_1 und \underline{U}_1 . Hierzu drehen wir unser läuferfestes Koordinatensystem, so daß die Spannung \underline{U}_1 in der Realachse liegt. Dies entspricht einer Drehung um den Winkel $-(90^\circ + \vartheta)$ (vgl. Bild 5.9). Das Koordinatensystem wird, wie bei der Asynchronmaschine, zur anschaulicheren Darstellung um 90° gedreht.

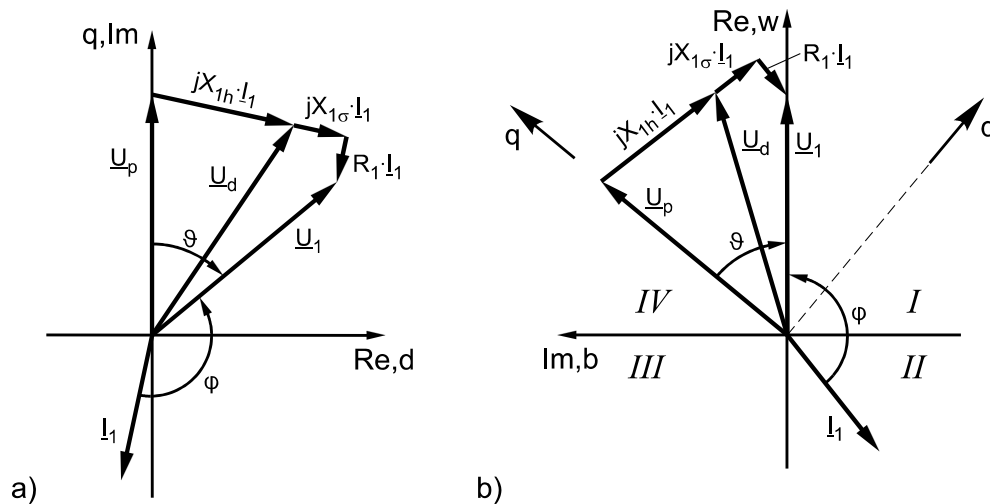


Bild 5.9: Ständer-Strom und -Spannung a) im läuferfesten (d-, q)-System b) im ständerfesten Koordinatensystem

Der Strom I_1 kann mit Gleichung (5.20) und (5.21) im läuferfesten d-, q-System wie folgt dargestellt werden:

$$I_1(d, q) = I_d + jI_q = \frac{U_1}{X_S} \cos \vartheta + j \frac{U_1}{X_S} \sin \vartheta - \frac{U_p}{X_S} \quad (5.27)$$

Mit Hilfe der Euler'schen Formel $e^{j\vartheta} = \cos \vartheta + j \sin \vartheta$ eliminieren wir die Winkelfunktionen:

$$I_1(d, q) = \frac{U_1}{X_S} e^{j\vartheta} - \frac{U_p}{X_S} \quad (5.28)$$

Eine Multiplikation dieser Gleichung mit $-je^{-j\vartheta}$ entspricht der Drehung des (d-, q)-Systems in das in den Bildern 5.9 und 5.10 dargestellte, ständerfeste Koordinatensystem.

$$I_1(w, b) = -j \frac{U_1}{X_S} + j \frac{U_p}{X_S} e^{-j\vartheta} \quad (5.29)$$

Aufgrund des gewählten Koordinatensystems ist die Ständerspannung U_1 reell. Die Wirkkomponente des Stromes I_w ist mit U_1 in Phase, während die Blindkomponente I_b im übererregten Betriebszustand um 90° voreilt. Der Radius des Kreises für den Ständerstrom I_1 ist proportional der Polradspannung und damit eine Funktion des Erregerstromes, während sich der Mittelpunkt bei Betrieb mit konstanter Ständerspannung nicht verschiebt (Bild 5.10).

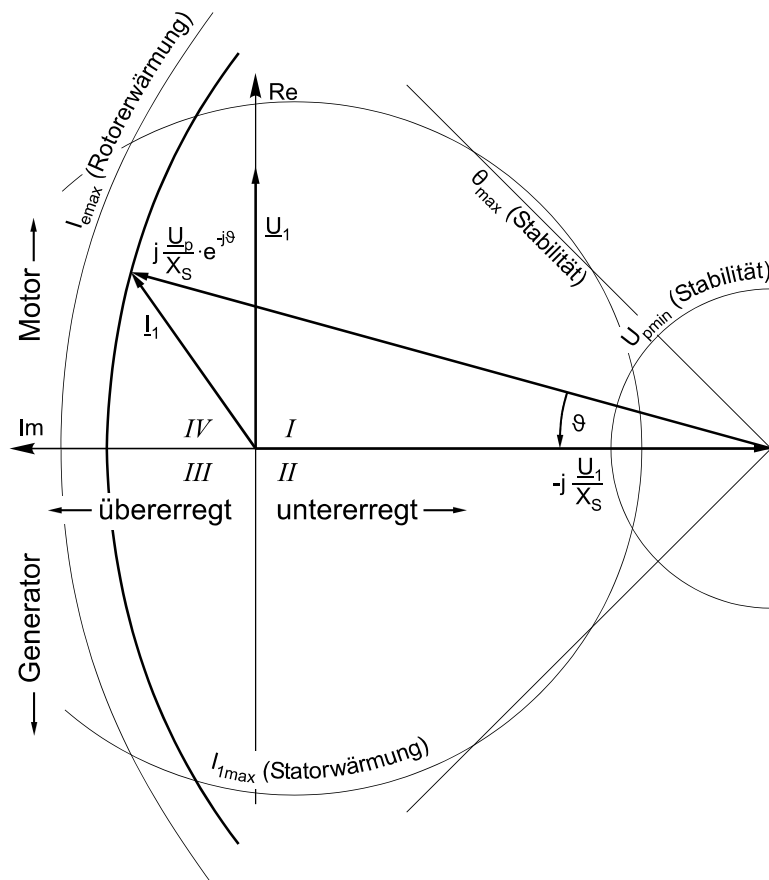


Bild 5.10: Ständer-Strom und -Spannung sowie Betriebsgrenzen der Synchronmaschine

Für einen Dauerbetrieb dürfen die in Bild 5.10 eingetragenen Grenzkurven des Ständerstromes nicht überschritten werden:

- der wegen der Stator-Erwärmung maximal zulässige Ständerstrom ergibt einen Kreis mit dem Radius I_{1max} .
- der wegen der Rotor-Erwärmung maximal zulässige Läuferstrom ergibt einen Halb-kreis mit dem Radius U_{pmax}/X_S .
- der wegen der Stabilität minimale Läuferstrom ergibt einen Halbkreis mit dem Radius U_{pmin}/X_S
- der aus Stabilitätsgründen maximale Polradwinkel (Siehe Kap. 5.4)

Den folgenden Zeigerdiagrammen der vier Betriebsquadranten liegt das Ersatzschaltbild nach Bild 5.5 a zugrunde. Es werden jetzt Ständerstreuspannungsabfälle, sowie die Wicklungsverluste abgebildet. Die Definition der Quadranten bezieht sich auf Bild 5.10 bzw. Bild 5.15.

I. Quadrant: $P_1 \geq 0, Q_1 \geq 0$

In diesem Quadranten beträgt der Polradwinkel ϑ nach Gleichung (5.25) theoretisch $0 \leq \vartheta \leq \pi$. Wie eine Betrachtung in Kapitel 5.5 noch zeigen wird, ist ein Betrieb bei $\pi/2 \leq \vartheta \leq \pi$ aber nicht stabil, so daß aus praktischen Erwägungen ϑ auf das Intervall $0 \leq \vartheta \leq \pi/2$ beschränkt wird.

Für $Q_1 \geq 0$ folgt dann aus Gleichung (5.26) die Bedingung für diese Betriebsart:

$$\left(\frac{U_1}{U_p} \right) \geq \cos \vartheta \quad (5.30)$$

Man nennt diesen Betrieb "untererregt". Die Maschine läuft als Motor ($P_1 \geq 0$) und nimmt induktive Blindleistung aus dem Netz auf. Dies entspricht dem Betrieb der Asynchronmaschine für $0 \leq s \leq 1$ (vgl. Kap. 4).

Das Zeigerdiagramm für einen Betrieb im I. Quadranten zeigt Bild 5.10

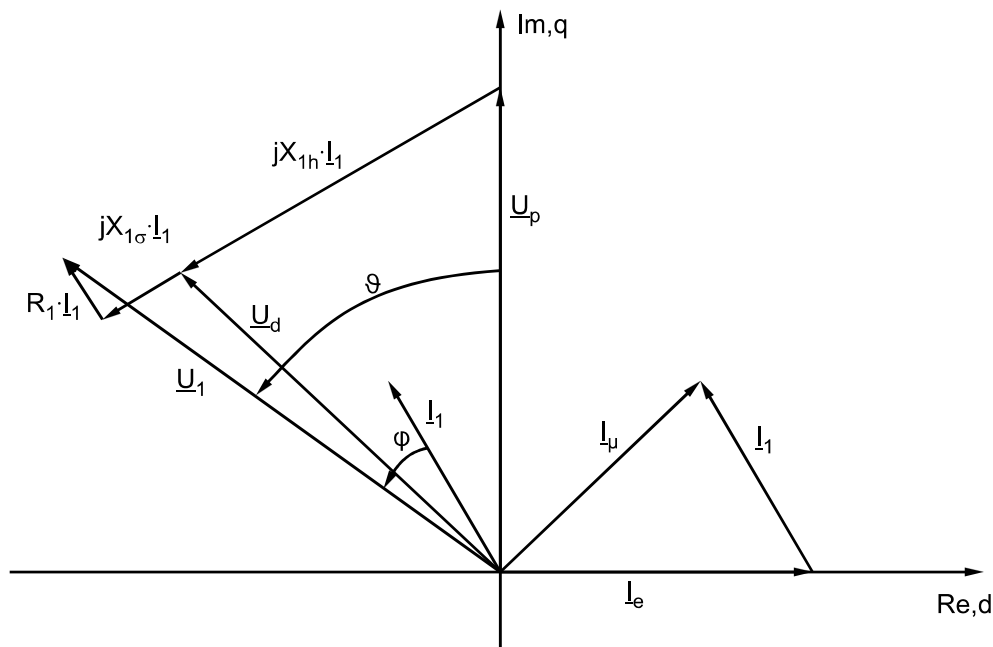


Bild 5.11: Zeigerdiagramm der Vollpol-Synchronmaschine für den motorisch-untererregten Betrieb ($\vartheta, \varphi > 0$)

II. Quadrant: $P_1 \leq 0, Q_1 \geq 0$

In diesem Quadranten beträgt der Polradwinkel nach Gleichung (5.25) theoretisch $-\pi \leq \vartheta \leq 0$, praktisch ist aber wieder nur das Intervall $-\pi/2 \leq \vartheta \leq 0$ von Interesse. Die Spannung \underline{U}_p eilt also gegenüber \underline{U}_1 um ϑ vor (ϑ wird von \underline{U}_p aus gezählt). Da \underline{U}_p mit der Polradstellung fest verknüpft ist, heißt ein Voreilen der Polradspannung \underline{U}_p gegenüber der Ständerspannung \underline{U}_1 , daß auch die entsprechenden magnetischen Verkettungsflüsse $\underline{\Psi}_1, \underline{\Psi}_p$ um den Winkel ϑ zeitlich verschoben sind. Aus der Vorstellung wird klar, daß der Läufer bzw. das Polrad angetrieben werden muß, damit $\underline{\Psi}_p$ gegenüber $\underline{\Psi}_1$ voreilt, d.h. man könnte sich den Ständerverkettungsfluß $\underline{\Psi}_1$ an einer "magnetischen Feder" mit dem "Federweg" ϑ vom Polradverkettungsfluß $\underline{\Psi}_p$ "gezogen" vorstellen. Wegen dieser möglichen physikalischen Interpretation des Polradwinkels ϑ hat dieser für das Verständnis der Betriebszustände von Synchronmaschinen eine zentrale Bedeutung. Wird der untererregte Betrieb vorausgesetzt, gilt wie bei der Asynchronmaschine $Q_1 > 0$. Zu beachten ist allerdings eine Besonderheit der Synchronmaschine. Bei vorgegebenen Polrad- oder Lastwinkel ϑ kann Q_1 auch zu Null eingestellt werden ($\cos \varphi = 1$). Nach Gleichung (5.26) gilt für diesen Fall

$$Q_1 = 0 = 3 \frac{U_1^2}{X_s} \left(1 - \frac{U_p}{U_1} \cos \vartheta \right) \tag{5.31}$$

$$\Rightarrow U_p = X_{1h} I_e = \frac{U_1}{\cos \vartheta}$$

Ein beispielhaftes Zeigerdiagramm für den erläuterten Betriebszustand im II. Quadranten zeigt Bild 5.12

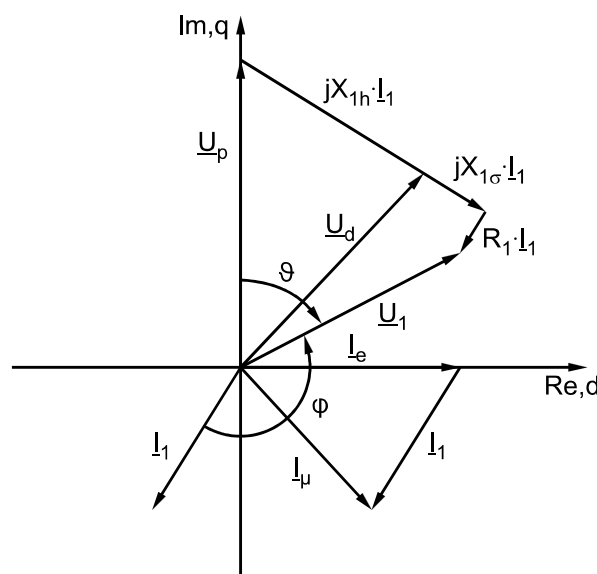


Bild 5.12: Zeigerdiagramm der Vollpol- Synchronmaschine für den generatorisch- untererregten Betrieb ($\vartheta < 0, \varphi > 0$)

III. Quadrant: $P_1 \leq 0, Q_1 \leq 0$

Dieser Quadrant ist typisch für die Synchronmaschine als Stromerzeugungsaggregat. $P_1, Q_1 \leq 0$ bedeutet im VZS, daß Wirk- und Blindleistung erzeugt werden. Dies ist immer dann erforderlich, wenn elektrische Netze gespeist werden sollen. Da Verteilungstransformatoren, Freileitungen und Asynchronmaschinen induktive Blindleistung aufnehmen, müssen hierfür in Netzen auch Erzeuger vorhanden sein. Neben Kondensatoren in Kompensationsanlagen ($Q_C < 0$) und Kabeltrassen bilden übererregt betriebene Synchrongeneratoren in Kraftwerken und Synchronmotoren in Antriebsanlagen die wichtigsten induktiven Blindleistungserzeuger ($Q_1 < 0$).

Für $-\pi/2 \leq \vartheta \leq 0$ muß die Ungleichung $Q_1 < 0$ nach Gleichung (5.26) erfüllt sein.

$$Q_1 = 3 \frac{U_1^2}{X_S} \left(1 - \frac{U_p}{U_1} \cos \vartheta \right) \leq 0 \quad (5.32)$$

Es folgt die Bedingung für die sog. "Übererregung" zu

$$\left(\frac{U_1}{U_p} \right) \leq \cos \vartheta \quad (5.33)$$

Das Zeigerdiagramm für diesen Fall zeigt das Bild 5.13

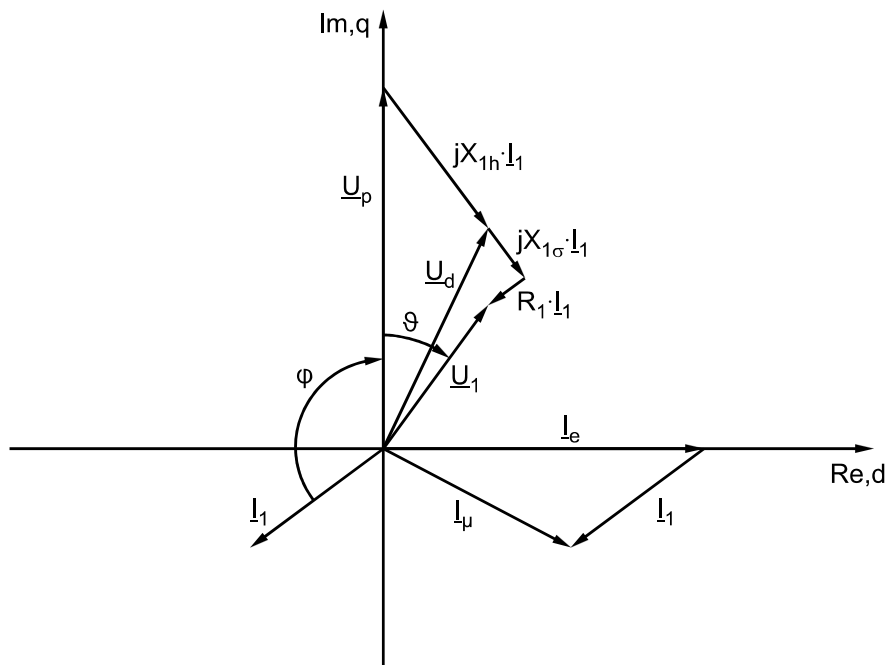


Bild 5.13: Zeigerbild der Vollpol-Synchronmaschine für den generatorisch-übererregten Betrieb ($\vartheta < 0, \varphi < 0$)

IV. Quadrant: $P_1 \geq 0, Q_1 \leq 0$

Dieser Quadrant ist übererregt betriebenen Synchronmotoren vorbehalten, die gelegentlich in elektrischen Netzen vorzufinden sind, um den Blindleistungsbezug am Übergabepunkt (dort wo die Blindleistungsentnahme in Kosten bewertet wird) zu minimieren. Es kann in diesem Fall eine Kondensatorbatterie eingespart werden (sog. "Phasenschieberbetrieb" $P_1 \rightarrow 0, Q_1 = Q_{\text{sol}}$). Auch für manche Umrichter gespeiste Synchronmaschinen ist diese Betriebsart erforderlich. (vgl. "Stromrichter motoren" /Meyer/)

Das Zeigerbild für den Betrieb in diesem Quadranten zeigt Bild 5.14

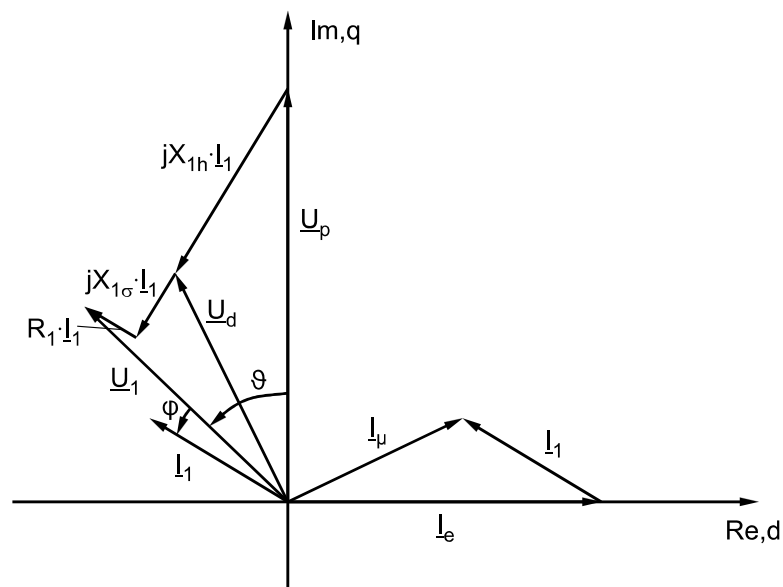


Bild 5.14: Zeigerdiagramm der Vollpol-Synchronmaschine für den motorisch-übererregten Betrieb ($\vartheta > 0, \varphi < 0$)

Im Bild 5.15 sind die in diesem Abschnitt behandelten vier Betriebsarten der Synchronmaschine zusammenfassend in der "komplexen Leistungsebene" dargestellt (vgl. hierzu auch Bild 5.10). Die Grafik soll helfen die für die elektrische Energieerzeugung besonders wichtige Synchronmaschine und deren Betriebsverhalten besser zu verstehen.

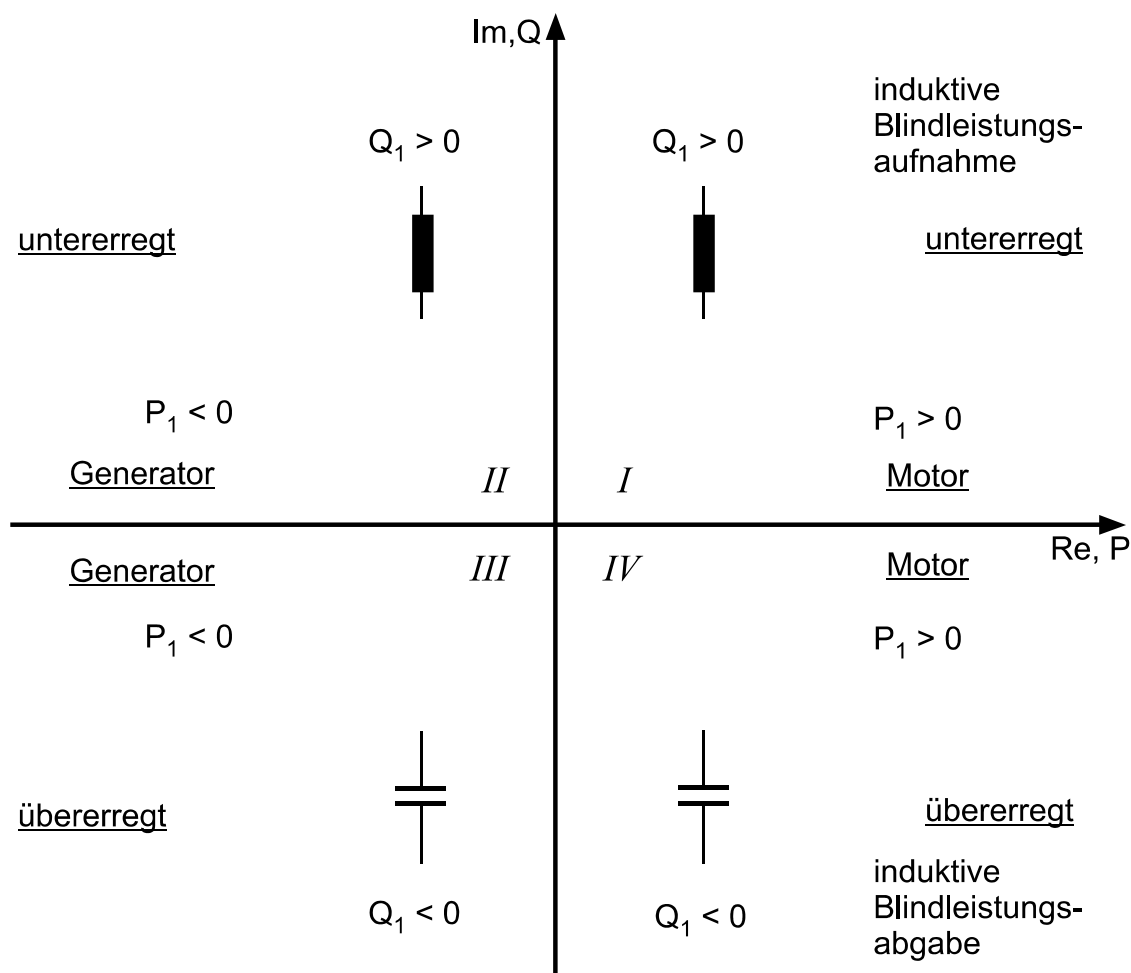


Bild 5.15: Betriebszustände der Synchronmaschine im VZS

5.4 Leistung und Drehmoment

Die im Ständer umgesetzte Drehstromleistung deckt Ständerverluste (Kupfer- und Eisenverluste) und Ständerdrehfeldleistung (über den Luftspalt übertragene Leistung). Der Läufergleichstrom bedingt die Läuferverluste. Ansonsten trägt er zur Magnetisierung der Maschine bei, ist also als "Blindstrom" zu werten und kann hier außer Betracht gelassen werden. Vernachlässigt man Ständer- und Läuferverluste, so ist die aufgenommene elektrische Leistung gleich der mechanischen Leistung. ($s = 0$)

$$P_m = 2\pi n_1 \cdot M_i = 2\pi n_d \cdot M_i \quad (5.34)$$

Damit erhält man mit Gleichung (5.25) für das innere Moment M_i mit $P_1 = P_m$ (Annahme $\eta = 1$)

$$M_i = \frac{P_m}{2\pi n_1} = 3 \cdot \frac{U_1 \cdot U_p}{2\pi n_1 \cdot X_d} \cdot \sin \vartheta \quad (5.35)$$

Damit ist das Moment als Funktion des Polradwinkels für konstante Werte für Strom und Spannung über das Kippmoment darstellbar:

$$M_i = M_K \cdot \sin \vartheta \quad (5.36)$$

Für $|\vartheta| = \frac{\pi}{2}$ wird das maximale Moment, das gleich dem Kippmoment M_K ist, erreicht

$$M_K = \frac{3 \cdot U_1 \cdot U_p}{2\pi n_1 \cdot X_d} \quad (5.37)$$

Entsprechend dem VZS gilt:

$$\begin{aligned} M_i < 0 &\rightarrow \text{Generatorbetrieb} \\ M_i > 0 &\rightarrow \text{Motorbetrieb} \end{aligned}$$

M_i ist vom Polradwinkel abhängig, nicht von der Drehzahl n_1 , die ja durch die Frequenz des angeschlossenen Drehstromsystems vorgegeben ist.
(Synchrondrehzahl $n_1 = n_d = f_1/p$)

Daher ist die Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie ein unendlich steiles Geradenstück.
(Achtung: Dynamische Laständerungen können zu Pendelungen des Polrades führen;
Abhilfe: Zusätzlicher Dämpferkäfig, ähnlich wie bei Asynchronmaschinen)

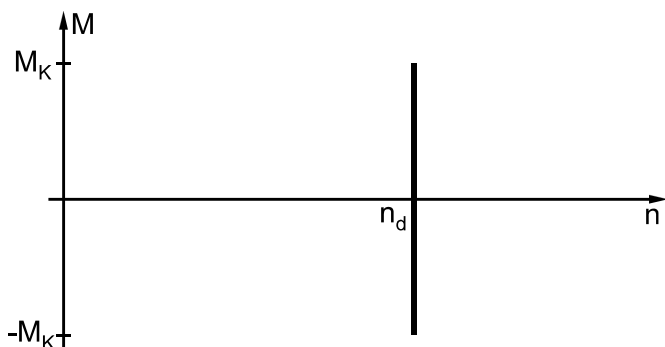
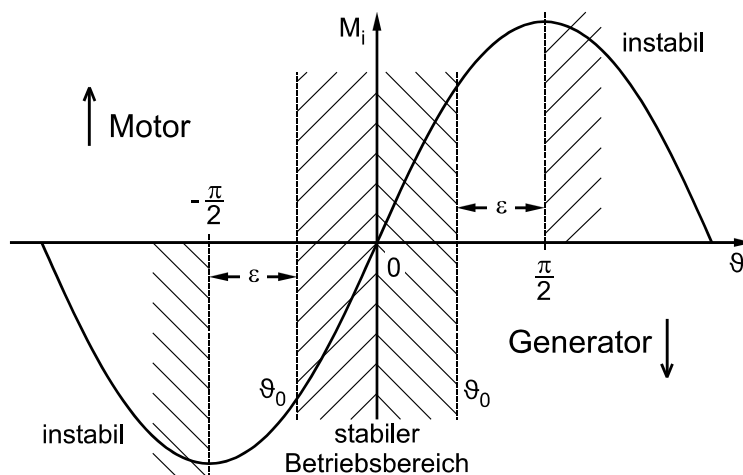


Bild 5.16: Drehzahl / Drehmomentkennlinie

Stabiler Betrieb ist nur im Bereich $-\frac{\pi}{2} < \vartheta < \frac{\pi}{2}$ möglich. Ist $M_i > M_k$, so führt das beim

Motorbetrieb zum Stillstand (die Maschine "kippt"); beim Generatorbetrieb kann das mechanisch angebotene Moment elektrisch nicht abgenommen werden, der Läufer beschleunigt und "geht durch".

Durch Regelung muß sichergestellt werden, daß zu jeder Zeit ein bestimmter Polradwinkel ϑ_0 mit $|\vartheta_0| = \frac{\pi}{2} - \varepsilon$ nicht überschritten wird. Der Winkel ε ist in der Praxis größer 45° .

Bild 5.17: Drehmoment als Funktion von ϑ

5.5 Die Synchronmaschine als motorischer Antrieb

Synchronmaschinen sind durch ihr physikalisches Prinzip mit ihrer Drehzahl starr an die Frequenz des Luftspaltfeldes und damit an die Netzfrequenz gebunden. Wegen des schwierigen Anlaufvorganges und der höheren Kosten im Vergleich zu Asynchronmaschinen werden SYM in industriellen Antrieben selten eingesetzt.

Auf Grund des "Drehzahlzwanges" (Schlupf $s = 0$ im stationären Betrieb) läuft ein Synchronmotor am starren Netz ($U_1 = \text{konst.}$, $f_1 = \text{konst.}$) von sich aus nicht an. Synchronmotoren am Netz werden im Prinzip wie Induktionsmotoren angelassen, wobei die Dämpferstäbe, die zur Dämpfung von Polradwinkelschwingungen erforderlich sind, mit ihren stirnseitig angelöteten Kurzschlußringen als Käfigwicklung (sog. "Anlaufkäfig") wirken. Die Erregerwicklung wird ebenfalls über Schutzwiderstände kurzgeschlossen und hat so eine den Anlaufkäfig unterstützende Wirkung.

Drehzahlverstellung ist bei Synchronmotoren nur über die Veränderung der speisenden Frequenz möglich. Die Lösung der Aufgabe gestaltet sich einfacher und billiger als bei Induktionsmaschinen, da die Magnetisierungsblindleistung nicht über die Umrichter übertragen werden muß, und weil ein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem Betriebszustand und dem Polradwinkel besteht. Obwohl die Maschine selbst teurer ist als ein Asynchronmotor, stellen umrichter gespeiste Synchronmaschinen, insbesondere bei großen Leistungen (Stromrichtermotoren $P > 1 \text{ MW}$), für manche Anwendungsfälle eine konkurrenzfähige Alternative zum umrichter gespeisten Käfigläufer dar. Die Entwicklung bei den Dauermagnetmaterialien hat das Vordringen von umrichter gespeisten Synchronmotoren mit Permanenterregung beschleunigt.

Die Gründe, die zum Einsatz eines Synchronmotors anstelle der billigeren Induktionsmaschine führen, müssen fallweise untersucht werden. Die wichtigsten Beurteilungskriterien sind im folgenden aufgeführt:

Vorteile

- Einstellbarer Leistungsfaktor (z.B. $\cos \varphi = 1$) oder Erzeugung induktiver Blindleistung
- höhere Grenzleistung (bzw. Drehzahlen) möglich durch den Einsatz von Massivläufern ohne nachteilige Wirkung auf die Ausnutzung der Maschine
- wegen größerer Luftspalte geringere Gefahr des Anschlagens bei großen Bauleistungen (max. ca. 1000 MW)

- wegen des größeren Luftspaltes geringere Gefährdung durch magnetisch erzeugten Lärm
- kleinere Empfindlichkeit gegenüber Schwankungen der Netzspannung (SYM: $M_{\text{kip}} \sim U_1$, Induktionsmaschine: $M_{\text{kip}} \sim U_1^2$)
- Bemessung der Anlaufwicklung hat keinen Einfluß auf Betriebsverhalten bei Nennlast
- bei Massivpolläufern größere Wärmekapazität im Läufer
- einfache Stromrichterschaltung und Steuerungselektronik bei Umrichterspeisung (Stromrichtermotor)

Nachteile

- höhere Anschaffungskosten
- wegen des komplizierteren Aufbaus (Erregerwicklung) störanfälliger und erhöhter Wartungsaufwand bei Motoren mit Schleifringen
- Drehmomentsättel und Pendelmomente beim Hochlauf können Anlauf- und Schwingungsprobleme auslösen

Literatur

- [1] Ann / Gölz / Gross / Haase u.a.: Elektrische Energietechnik
Hrsg.: T. Bohn, Verlag TÜV Rheinland
- Übersichtliche, leicht lesbare Einführung
- [2] Lämmerhirt Erich-Herbert: Elektrische Maschinen und Antriebe
Carl-Hanser Verlag, München, Wien
- Empfehlenswerte, leicht lesbare Einführung
- [3] Hosemann, G / Boeck, W.: Grundlagen der elektrischen Energietechnik
Springer - Verlag Berlin Heidelberg
- Empfehlenswerte Einführung in die wissenschaftlichen Grundlagen
- [4] Böhm, Werner: Elektrische Antriebe
Vogel-Verlag 1989 Kamprath-Reihe: Technik
- Übersichtliche Darstellung des gesamten Gebiets der elektrischen Antriebe
- [5] Eckhardt, Hanskarl: Grundzüge der elektrischen Maschinen
Teubner Studienbücher Elektrotechnik/Maschinenbau
- Vertiefte mathematische Darstellung der elektrischen Maschinen
(Grundlage der Vorlesung)
- [6] Hütte - Taschenbücher der Technik: Elektrische Energietechnik (Band 1, 2, 3)
Springer - Verlag Berlin Heidelberg New York
- Vertiefte Darstellung aus der Sicht des Elektromaschinenbaus (Bd. 1), der
Leistungselektronik (Bd. 2) und der elektrischen Energieverteilung (Bd.
3)
- [7] Meyer, Manfred: Elektrische Antriebstechnik (Band 1, 2)
Springer - Verlag Berlin Heidelberg New York Tokyo
- Umfassende Darstellung des Standes der Technik aus wissenschaftlicher
Sicht
- [8] Nelles, B., Tuttas, CH: Elektrische Energietechnik
Teubner Verlag, Stuttgart, 1998
- Gutes Begleitbuch zur Vorlesung mit weiteren Vertiefungen

S8803 Elektrische Energietechnik

- Deckblatt und Inhaltverzeichnis
- Kapitel 1
- Kapitel 2
- Kapitel 3
- Kapitel 4 Seite 1 bis 10
- Kapitel 4 Seite 11 bis 46
- Kapitel 5 und Literatur