

8 Synchronmaschinen

8.1 Qualitative Betrachtung

8.1.1 Besonderheiten, Anwendung und Aufbau

Die Synchronmaschinen haben den gleichen Ständer wie die Asynchronmaschinen. Er besteht auch bei dreisträngiger Ausführung aus einer Drehstromwicklung, die in den Ständernuten untergebracht ist. Diese beiden Maschinen unterscheiden sich nur im Aufbau des Rotors (bei Synchronmaschinen wegen hier vorhandener Magnetpole auch Polrad genannt). Das Polrad hat gewöhnlich eine Gleichstromwicklung (wird also mit Gleichstrom gespeist) oder wird durch Permanentmagnete erregt. Dabei hat sich bei den Synchrongeneratoren die bürstenlose Erregung mithilfe einer Hilfswicklung im Ständer über einen Spannungsregler durchgesetzt.

Die Synchronmaschinen gehören normalerweise zu den Innenpolmaschinen. Das Hauptfeld wird vom innen liegenden Polrad erzeugt. Die Luftspaltdicke δ ist normalerweise deutlich größer als bei der Drehstromasynchronmaschine. Bei großen Turbogeneratoren beträgt $\delta = 5$ mm bis 150 mm, während die Asynchronmaschinen eine Luftspaltdicke unter 1 mm aufweisen. Bei den elektrischen Maschinen ist man bestrebt, den Magnetisierungsbedarf und damit den Kupferbedarf zu begrenzen. Der Magnetisierungsbedarf (Kupferbedarf) nimmt mit zunehmender Luftspaltdicke zu. Bei den Asynchronmaschinen muss zusätzlich die Blindenergie aus dem Netz geliefert werden, was zur Verschlechterung des Leistungsfaktors führt. Dies kann bei den Synchronmaschinen vermieden werden, indem sie im übererregten Zustand betrieben werden. Die Maschine kann dann sogar als Blindleistungslieferant benutzt werden. Die Luftspaltdicke wird hier mit Rücksicht auf größere Überlastbarkeit relativ groß vorgesehen (mit X als Synchronreaktanz):

$$M_k \sim 1/X \quad \text{und} \quad X \sim 1/\delta \quad \Leftrightarrow \quad M_k \sim \delta$$

Wegen der Gleichstromerregung im Läufer sind hier meistens die Wirbelstromanteile geringer als bei den Asynchronmaschinen. Deshalb wurden früher Massivläufer gebaut oder dickere Blechstärken verwendet. Die neuesten Untersuchungen

zeigen, dass infolge der periodischen Rotation des Läufers unter den Ständerzähnen die sogenannten Zahnpulsationsfelder entstehen, die beachtliche Wirbelströme bzw. Wirbelstromverluste bei den Synchronmaschinen verursachen.

Die Synchronmaschinen können in die zwei Hauptgruppen Vollpol- (VPSM) und Schenkelpol- (SPSM) bzw. Einzelpolmaschinen unterteilt werden (**Bild 8.1**) [90 bis 112]. Weitere wichtige Ausführungen sind Reluktanzmaschinen (Reaktanzmaschinen), Synchronmaschinen mit Dämpferwicklung sowie Schrittmotoren und Klauenpolmaschinen als Kfz-Generator. Die Vollpolmaschinen werden oft als Turbogeneratoren in Kraftwerken eingesetzt. Die üblichen Leistungen liegen bei etwa 10 MVA bis 2 100 MVA bei relativ hohen Drehzahlen von $3\,000\text{ min}^{-1}$ ($p = 1$) bzw. $1\,500\text{ min}^{-1}$ ($p = 2$) und Bemessungsspannungen von 6,3 kV bis 27 kV.

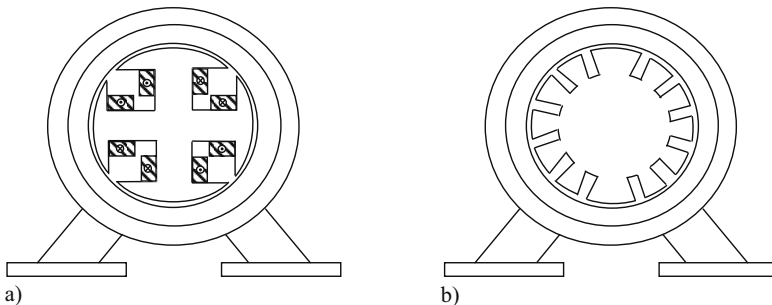


Bild 8.1 Prinzipieller Aufbau des Läufers
a) Schenkelpolmaschine ($p = 2$) b) Vollpolmaschine ($p = 1$)

Die zweipoligen Ausführungen erreichen bei 50 Hz Umfangsgeschwindigkeiten bis 700 km/h. Die gängigen Baureihen sind mit Leistungen von 400 MVA bis 1 000 MVA ausgelegt, bei einer Bemessungsspannung von 21 kV bis 27 kV. In Planung sind Turbogeneratoren bis 2 200 MVA. Bei den großen Turbogeneratoren wird zur Reduzierung der Stromverdrängung in den Nuten der sogenannte Roebel-Stab eingesetzt (**Bild 8.2**). Die Schenkelpolmaschinen werden dagegen für hohe Polpaarzahlen und kleinere Drehzahlen als Hydrogeneratoren in Wasserkraftwerken und als Notstromaggregat verwendet. Die üblichen Leistungen reichen bis etwa 840 MVA (z. B. in Three Gorges, China) bei einer Bemessungsspannung von 20 kV und Drehzahlen von 75 min^{-1} ($p = 40$, $f = 50\text{ Hz}$). Die maximale Leistung bei Motor-Generatoren für Pumpspeicherwerke liegt heute bei etwa 448 MVA (z. B. in Bath County, USA) bei einer Bemessungsspannung von 20,5 kV und Drehzahlen von $257,1\text{ min}^{-1}$ ($p = 14$, $f = 60\text{ Hz}$). Abgesehen von einigen Großprojekten bewegen sich bei den meisten aktuellen Neuanlagen die Generatorleistungen der Schenkelpolmaschinen in der Größenordnung bis etwa 300 MVA.

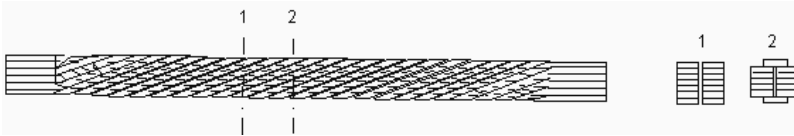


Bild 8.2 Roebel-Stab zur Verminderung der Wirbelstromverluste durch Stromverdrängung

Die Anwendungsmöglichkeiten der Synchronmotoren nehmen ständig zu. Diejenigen mit Frequenzumrichter finden bei drehzahlregelbaren Antrieben zunehmend Verwendung (z. B. als Servomotor und bei Hochofengebläsen, Zementmühlen, Walzgerüsten und Förderanlagen). Während der Synchronmotor mit der Dämpferwicklung mehr für den konventionellen Antrieb geeignet ist, finden der Reluktanz- sowie der Schrittmotor in Büroausstattung, Kommunikations- und Automatisierungstechnik weite Verbreitung. Schrittmotoren sind Unterarten der Synchronmaschine, die im Bereich von Kleinst- und Kleinmaschinen immer häufiger verwendet werden. Die Grundtypen der Schrittmotoren sind: Reluktanzläufer, Permanentmagnetläufer und Hybridläufer. Wegen deren großer Bedeutung werden Schrittmotoren in Kapitel 10 (Abschnitt 10.2.3) zusammen mit anderen Kleinmaschinen separat behandelt. Spezielle Einsatzgebiete sind z. B. Uhren, Tonbandgeräte und die Feinwerktechnik. Die Bezeichnungen der Anschlüsse der klassischen Synchronmaschinen sind im **Bild 8.3** dargestellt.

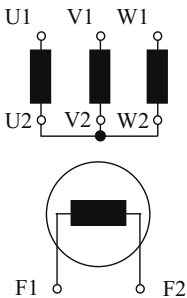


Bild 8.3 Bezeichnung der Anschlüsse bei Drehstromsynchronmaschinen

8.1.2 Betriebsverhalten am starren Netz

8.1.2.1 Leerlauf

Es wird zunächst das Verhalten einer leerlaufenden Synchronmaschine untersucht (Motor bzw. Generator ohne Belastung). Die Ständerwicklung (in Generatoren

meistens die Ankerwicklung) ist an einem Drehstromnetz angeschlossen. Die Läuferwicklung wird mit dem Gleichstrom erregt. Folgende drei Fälle gibt es:

8.1.2.1 Drehfeld infolge des Ständerstroms

Wenn im Betrieb plötzlich die Erregung abgeschaltet wird (I_E bzw. $A_E = 0$), so wird das Drehfeld $B_s(\varphi, t)$ durch den Ständerdrehstrombelag $A_s(\varphi, t)$ erzeugt. Das Polrad rotiert mit gleicher Winkelgeschwindigkeit wie das Drehfeld $\omega_d = \omega/p$ (Bilder 8.4a, b, c).

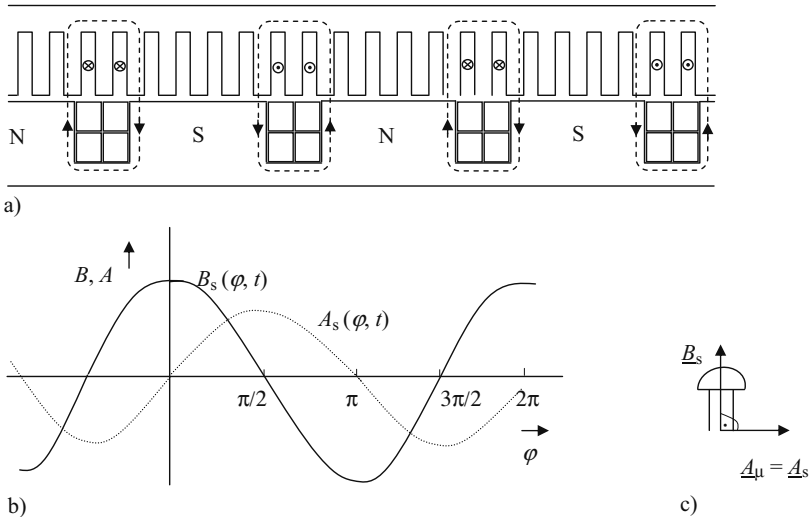


Bild 8.4 Drehfeld infolge des Ständerstroms

In Bild 8.4a ist die Ständerdurchflutung eines Strangs dargestellt. Die Feldlinien koppeln Läufer und Ständer und umschließen die Ständerdurchflutung. Bild 8.4b zeigt die Grundschwingung der Drehstrom- und der zugehörigen Induktionsschwingung in Abhängigkeit der Umfangskoordinate φ . Das dazugehörige Zeigerdiagramm und die Lage des Polrads zu diesen Schwingungen ist im Bild 8.4c dargestellt. Der Ständerstrom (bei Synchrongeneratoren der Ankerstrom) ist gleich dem Magnetisierungsstrom ($A_s = A_{\mu}$), wenn die Verluste vernachlässigbar klein sind.

8.1.2.1.2 Drehfeld infolge des Erregerstroms

Bei den Synchronmaschinen kann der Magnetisierungsstrom auch durch den Läu-

fer zur Verfügung gestellt werden. In diesem Fall erzeugt der Erregerstrom I_E in der Feldwicklung (hier auch Läufer- bzw. Erregerwicklung genannt) den Strombelag $A_E = A_\mu$; es bildet sich ein Drehfeld aus, das mit der Polradwinkelgeschwindigkeit rotiert. Zu bemerken ist, dass wegen des Gleichstroms der Strombelag A_E relativ zum Läufer stillsteht. Der Ständerstrom ist in diesem Falle gleich null. Die induzierte Spannung infolge der Induktionsschwingung ist gleich der Spannung an den Ständerklemmen (Leerlauf). Die **Bilder 8.5a, b** zeigen die dazu gehörende Läuferdurchflutung und die Feldlinien sowie das Zeigerdiagramm (Fall ausreichender Erregung).

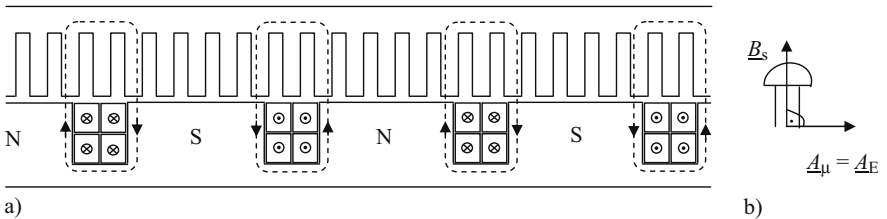


Bild 8.5 Drehfeld infolge des Erregerstroms

8.1.2.1.3 Drehfeld infolge von Ständer- und Erregerstrom

Wird nun der Erregerstrom reduziert, sodass $A_E < A_\mu$ ist, deckt der Ständerstrom das Defizit an Magnetisierungsstrom (**Bild 8.6a**). In Anlehnung an den gewählten Zählpfeil gilt dann:

$$\underline{A}_\mu = \underline{A}_E + \underline{A}_s \quad (8.1)$$

In diesem Fall ist die Maschine weniger als erforderlich erregt. Der Ständerstrombelag \underline{A}_s bzw. der Ständerstrom \underline{I}_s eilen \underline{U}_s zeitlich um 90° nach (induktiv). Umgekehrt, wenn $A_E > A_\mu$ (**Bild 8.6b**), ist der Ständerstrombelag \underline{A}_s gegenphasig zu \underline{A}_E . Dann eilt der Ständerstrombelag \underline{A}_s bzw. der Ständerstrom \underline{I}_s der Ständerspannung \underline{U}_s zeitlich um 90° voraus (kapazitiv). In diesen Fall wird Blindstrom zum Netz zurückgeführt, und die Maschine befindet sich in übererregtem Zustand.

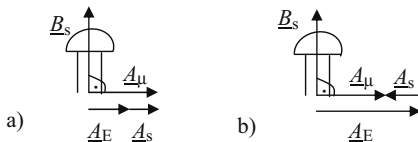


Bild 8.6 Drehfeld infolge von Ständer- und Erregerstrom

Dieser Vorgang kann wie folgt zusammengefasst werden: Die Luftspaltinduktion ist proportional zur magnetischen Energie, die in den Synchronmaschinen durch den Läufer oder Ständer bzw. durch beide aufgebracht wird. Im Falle $A_E > A_\mu$ gibt es einen überflüssigen Reststrom; Blindleistung wird ans Netz zurückgegeben (Übererregung). Im Falle $A_E < A_\mu$ muss das Defizit an magnetischer Energie durch das Netz gedeckt werden. Blindleistung wird aus dem Netz bezogen (Untererregung).

Fazit: Werden die Synchronmaschinen zur Deckung der Blindleistung von Transformatoren, Asynchronmotoren und anderen induktiven Verbrauchern eingesetzt, müssen sie in übererregtem Fall betrieben werden.

8.1.2.2 Lastfall

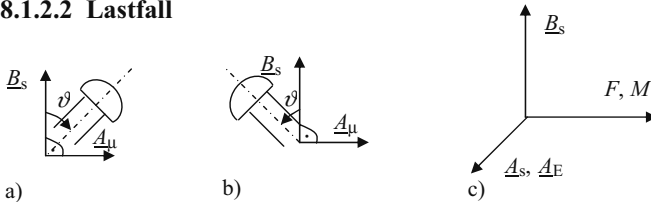


Bild 8.7 Belastete Synchronmaschine

Im Lastfall muss noch sinngemäß der sogenannte Last- bzw. Polradwinkel ϑ berücksichtigt werden. Der infolge der mechanischen Last bzw. der Kraftmaschine entstehende Lastwinkel verursacht das Nacheilen (Motorbetrieb, **Bild 8.7a**) bzw. das Voreilen (Generatorbetrieb, **Bild 8.7b**) des Polrads gegenüber der maximalen Induktion. Dieser Lastwinkel ist auch der Winkel zwischen Polradspannung U_p und Ständerspannung U_s (s. Abschnitt 8.2). Die Ständerspannung U_s wird auch als Primärspannung U_1 bezeichnet. Die Induktions-, Strombelags- und Krafrichtung sind im **Bild 8.7c** dargestellt. Die Phasenlage des Ständerstroms und damit des Ständerstrombelags A_s zu B_s ist vom Läuferstrombelag A_E abhängig (**Bild 8.8**).

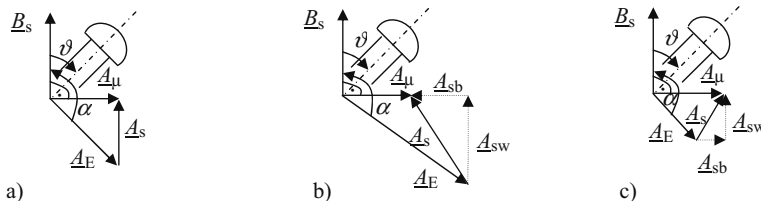


Bild 8.8 Zeigerdiagramm des Motorbetriebs im Lastfall

a) ausreichende Erregung (ohmsch) b) Übererregung (kapazitiv) c) Untererregung (induktiv)

In **Bild 8.8a** sind A_s und B_s in Phase. Aus dem Netz wird nur reine Wirkleistung bezogen. **Bild 8.8b** zeigt den übererregten Fall $A_E > A_{\mu}$, bei dem Blindleistung an das Netz zurückgegeben wird. A_E muss hier den Magnetisierungsstrombelag A_{μ} und A_{sb} die Blind- und A_{sw} die Wirkkomponente des Ständerstrombelags decken.

Bild 8.8c zeigt den untererregten Fall $A_E < A_{\mu}$. Die Beteiligung des Ständers (hier Anker) zur Bereitstellung des Magnetisierungsbedarfs der Synchronmaschine wird auch als Ankerrückwirkung bezeichnet. Entsprechende Zeigerdiagramme des belasteten Synchrongenerators sind in **Bild 8.9** dargestellt.

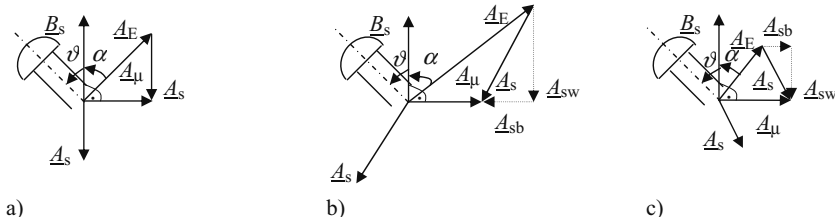
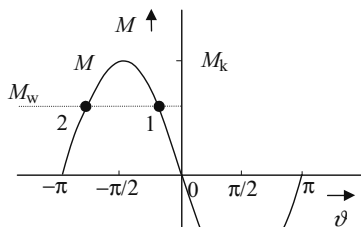


Bild 8.9 Zeigerdiagramm des Generatorbetriebs im Lastfall
 a) ausreichende Erregung (ohmsch)
 b) Übererregung (kapazitiv)
 c) Untererregung (induktiv)

Das Drehmoment der Synchronmaschine kann ähnlich wie bei der Asynchronmaschine bestimmt werden (s. Gl. (5.8)):

$$M = -c \hat{B}_s \hat{A}_E \cos \alpha \quad (8.2)$$

Das negative Vorzeichen in Gl. (8.2) ergibt sich aufgrund der Festlegung der Zählpfeilrichtungen von Bild 8.7c.



$M > 0$, Motorbereich | $M < 0$, Generatorbereich

Bild 8.10 Drehmoment-Lastwinkel-Abhängigkeit

Zwischen dem Winkel α und dem Polradwinkel ϑ gilt nach Bild 8.8 folgende Beziehung für den Motorbetrieb:

$$\alpha = \frac{\pi}{2} + \vartheta \quad (8.3)$$

Somit ergibt sich für die Gl. (8.2)

$$M = c \hat{B}_s \hat{A}_E \sin \vartheta$$

bzw.

$$M = M_k \sin \vartheta \quad (8.4)$$

Das Produkt

$$M_k = c \hat{B}_s \hat{A}_E \quad (8.5)$$

ist der Maximalwert des Drehmoments für eine bestimmte Erregung (Kippmoment). Die Drehmoment-Lastwinkel-Kennlinie ist in **Bild 8.10** dargestellt. Auch ein Widerstandsmoment M_w ist hier eingetragen. Aus Bild 8.10 geht hervor, dass der Punkt 1 ein stabiler Arbeitspunkt ist. Für den Lastwinkel $-\pi/2 \leq \vartheta \leq \pi/2$ ist der Arbeitspunkt stabil. Für $|\vartheta| > \pi/2$ (außerhalb der Stabilitätsgrenze) geht die Maschine in den instabilen Betriebsbereich über, weil mit der zunehmenden Belastung das Drehmoment abnimmt (*Außer-Tritt-Fallen der Synchronmaschine*)!

Nach Gl. (8.4) wird beim voreilenden Polrad (gegenüber Induktion B_s) und bei $\vartheta > 0$ das Drehmoment negativ, und die Synchronmaschine befindet sich im Generatorbetrieb. Das zugehörige Raumzeigerdiagramm wurde in Bild 8.9 dargestellt. Bei der Schenkelpolsynchronmaschine bildet sich zusätzlich ein Reaktionsmoment, das von I_E unabhängig ist. Dieses Moment ist infolge der unterschiedlichen magnetischen Leitwerte der Hauptluftspalt in q- und d-Achse (Quer- und Längsachse). Das Reaktionsmoment beträgt etwa 30 % bis 40 % des Bemessungsmoments (s. Abschnitt 8.1.5).

Eine Synchronmaschine kann nur dann ein Drehmoment entwickeln, wenn $n = n_d$ ist (beim Schlupf $s = 0$)! Das heißt, B_s und A_E müssen synchron laufen ($\alpha = \text{konstant}$). Sonst würde α zeitabhängig sein, und der Mittelwert des Drehmoments würde null ergeben. Die Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie ist in **Bild 8.11**

dargestellt. Zum Vergleich ist auch die Betriebskennlinie der Asynchronmaschine aufgetragen. Daraus geht hervor, dass der Synchronmotor normalerweise kein Anlaufmoment besitzt und durch Zusatzmaßnahmen angelassen werden muss (s. Abschnitt 8.1.4).

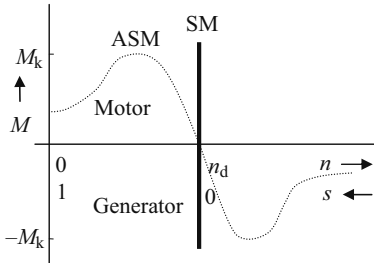


Bild 8.11 Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie der Synchronmaschine im Vergleich zur Asynchronmaschine

8.1.3 Pendelungen der Synchronmaschine

Unter Pendelungen der Synchronmaschine werden ihre Drehzahländerungen, verstanden bezogen auf die synchrone Drehzahl. Diese Drehzahländerungen können nur einmal oder periodisch infolge der Drehmomentänderungen (elektrisch bedingt bzw. durch die Arbeitsmaschine verursacht) zustande kommen. Die elektrisch bedingten Drehmomentänderungen der Synchronmotoren entstehen in der Regel durch Schwankungen der Netzspannung. Die Pendelungen der Synchronmaschine führen zu Schwingungen, deren Amplituden im Resonanzfall unzulässig hohe Werte annehmen können. Für die Änderungen des Drehmoments und des Polradwinkels gilt folgende Differentialgleichung:

$$\Delta M_w = \Delta M - \Theta \frac{d^2 \vartheta}{dt^2} \quad (8.6)$$

wobei:

- ΔM_w Arbeitsmomentänderung
- ΔM Pendelmoment der Maschine
- Θ Massenträgheitsmoment
- $\Delta \vartheta$ Polradwinkeländerung

Die Maschine entwickelt ein Rückstellmoment (zum stationären Zustand) und ist bestrebt, selbst die Pendelungen zu dämpfen. Es gilt:

$$\Delta M = M(\vartheta + \Delta\vartheta) - M(\vartheta) \quad (8.7)$$

Aus der Taylor-Reihenentwicklung folgt:

$$M(\vartheta + \Delta\vartheta) = M(\vartheta) + \frac{\Delta\vartheta}{1!} \frac{dM(\vartheta)}{d\vartheta} + \frac{\Delta\vartheta^2}{2!} \frac{d^2 M(\vartheta)}{d\vartheta^2} + \dots \quad (8.8)$$

Mit der Vernachlässigung der Glieder höherer Ordnung ergibt sich für Gl. (8.7):

$$\Delta M = \Delta\vartheta \frac{dM(\vartheta)}{d\vartheta}$$

Mithilfe der Gl. (8.4) kann dann für Gl. (8.7) geschrieben werden:

$$\Delta M = M_R \Delta\vartheta \quad (8.9)$$

mit dem Rückstellmoment:

$$M_R = M_k \cos \vartheta \quad (8.10)$$

Das Rückstellmoment ist dem Polradwinkel sowie dem Kippmoment proportional und damit vom Betriebsfall abhängig. Zu beachten ist, dass das Rückstellmoment mit zunehmendem Polradwinkel kleiner wird und für $\vartheta = \pi/2$ sein Vorzeichen ändert. Mithilfe der Gl. (8.9) kann für die Differentialgleichung (8.6) geschrieben werden:

$$\Delta M_w = M_R \Delta\vartheta - \Theta \frac{d^2 \Delta\vartheta}{dt^2} \quad (8.11)$$

Mit $\Delta M_w = 0$ folgt für die mechanische Eigenfrequenz der Synchronmaschine:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{M_R}{\Theta}} \quad (8.12)$$

Diese Frequenz beträgt normalerweise nur einige Hertz. In manchen Systemen kann die Trägheitsmasse der Synchronmaschinen durch zusätzliches Gewicht erhöht werden. Hiermit wird genügend Abstand zur elektrischen Erregerfrequenz hergestellt und damit die Resonanz vermieden.