

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 mit Hilfe 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 in Folge der periodischen Rotation des Läufers unter den Ständerzähnen die so genannten 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**) ([84 bis 105]). 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 3000 min^{-1} ($p = 1$) bzw. 1500 min^{-1} ($p = 2$) und Bemessungsspannungen von 6,3 kV bis 27 kV.

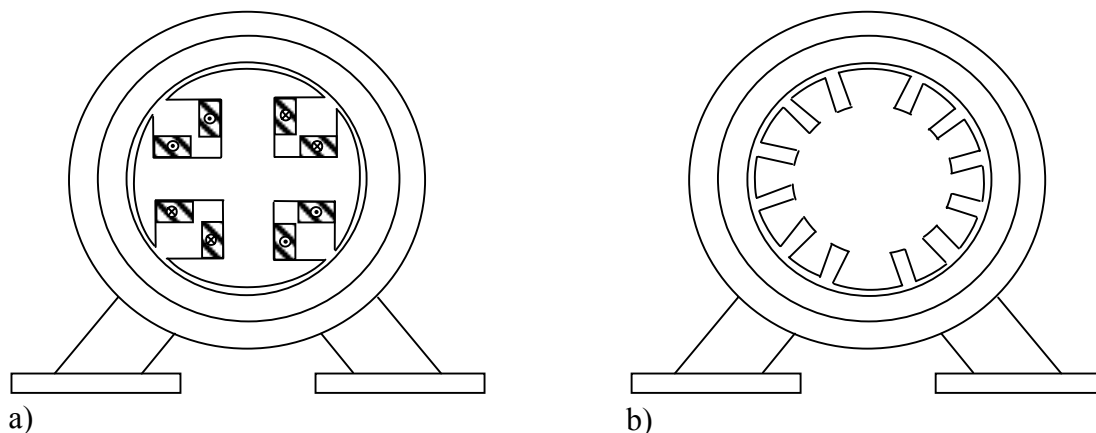


Bild 8.1 Prinzipieller Aufbau des Läufers
a) Schenkelpolmaschine ($p = 2$) b) Vollpolmaschine ($p = 1$)

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 so genannte 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.

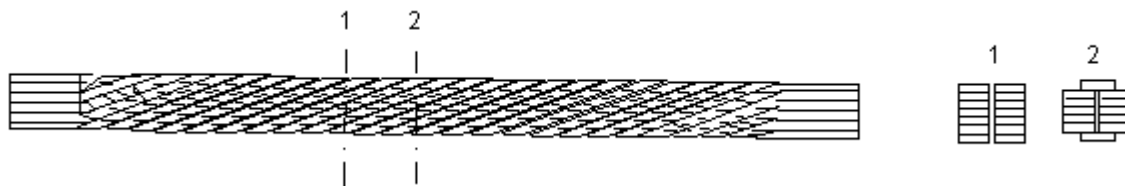


Bild 8.2 Roebel-Stab zur Verminderung der Wirbelstromverluste durch Stromverdrängung

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.

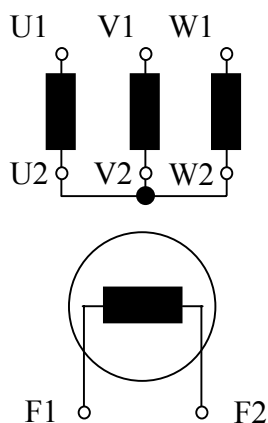


Bild 8.3 Bezeichnung der Anschlüsse bei Drehstromsynchronmaschinen

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 ist an einem Dreh-