

7. Synchronmaschinen

Synchronmaschinen wurden zunächst als Einphasengeneratoren gebaut, die etwa ab der Mitte des 19. Jahrhunderts zur Versorgung von Beleuchtungsanlagen Anwendung fanden. Den ersten dreiphasigen Synchrongenerator entwickelten 1887 unabhängig voneinander Bradley und Haselwander. In der Folgezeit bildeten sich mit der Schenkelpolmaschine und dem Turbogenerator die typischen Bauformen aus. Die weitere Entwicklung der Synchronmaschine ist eng mit dem Ausbau der elektrischen Energieversorgung zu immer größeren Generator-Einheitsleistungen verbunden.

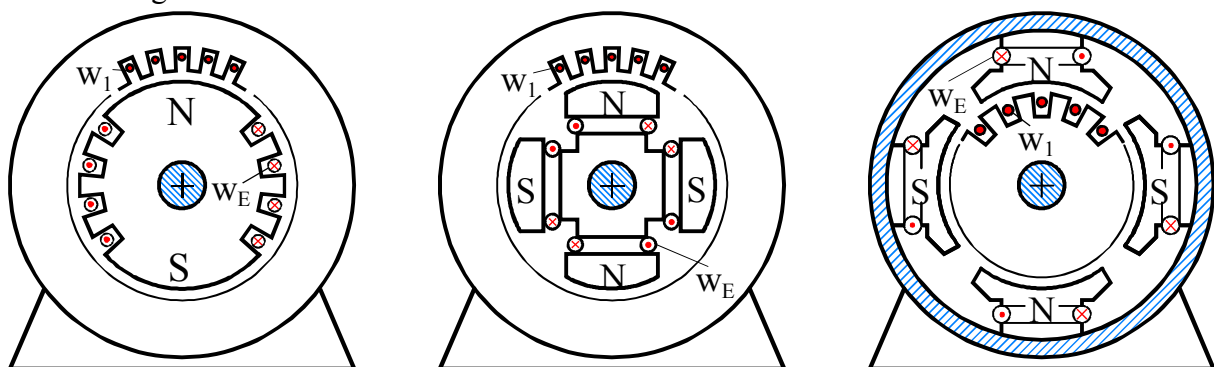
Synchronmotoren wurden schon immer als Industrieantriebe eingesetzt, wenn man eine konstante Antriebsdrehzahl benötigte oder wenn man die Möglichkeit des Phasenschieberbetriebs nutzen wollte.

Drehstrom-Synchrongeneratoren besitzen die größten Einheitsleistungen elektrischer Maschinen. Als Turbogeneratoren für Wärmekraftwerke werden derzeit zweipolige Generatoren mit Leistungen von rd. 1200 MVA bei 50 Hz und 21 kV Nennspannung gefertigt. Bei vierpoligen Maschinen liegen die Daten sogar bei rd. 1700 MVA und 27 kV. Die größten Schenkelpolmaschinen für Wasserkraftwerke erreichen über 800 MVA mit bis zu 80 Einzelpolen.

Als Industrieantrieb hat die Synchronmaschine durch die Entwicklung der Frequenzumrichter stark an Bedeutung gewonnen. Sie steht dadurch als drehzahlregelbarer Antrieb vom Bereich des Servomotors mit permanenter Erregung durch Dauermagnete bis zu den größten Leistungen (30 MW) zur Verfügung.

Die wesentlichen Unterschiede im Aufbau gleichstromerregter Synchronmaschinen bestehen in der Konstruktion zur Erzeugung des Erregergleichfeldes.

Der Läufer der Vollpolmaschine besteht aus einer massiven Stahlwalze, in der radial über 2/3 der Polteilung Nuten eingefräst sind. Diese nehmen die Erregerwicklung w_E auf, die auf mehrere konzentrisch zur Polachse liegende Spulen verteilt ist. In dieser Bauform werden 2- und 4polige Maschinen ausgeführt.



Vollpolmaschine
(Turbogenerator)

Innenpol-
Schenkelpolmaschine

Außenpol-
Schenkelpolmaschine

Bauformen der Synchronmaschine

Innenpol-Schenkelpolmaschinen besitzen den gleichen Ständeraufbau wie Vollpolmaschinen, im Läufer dagegen ausgeprägte Einzelpole zur Erzeugung des Gleichfeldes. Wie bei Gleichstrommaschinen liegt um jeden Polkern eine Erregerwicklung w_E , während zum Luftspalt hin durch den Polschuh eine möglichst sinusförmige Feldform angestrebt wird.

Die Außenpol-Schenkelpolmaschine ist ähnlich einer Gleichstrommaschine aufgebaut, nur trägt der Läufer eine Drehstromwicklung w_1 , deren Anschlüsse über Schleifringe zugänglich sind.

Der Ständer der Synchronmaschine besteht wie bei der Asynchronmaschine aus einer geschweißten Tragkonstruktion zur Aufnahme des geschichteten Blechpaketes. Die meist offenen Nuten entlang der Ständerbohrung nehmen die Drehstromwicklung auf, die bei größeren Leistungen als Hochspannungswicklung ausgeführt ist.

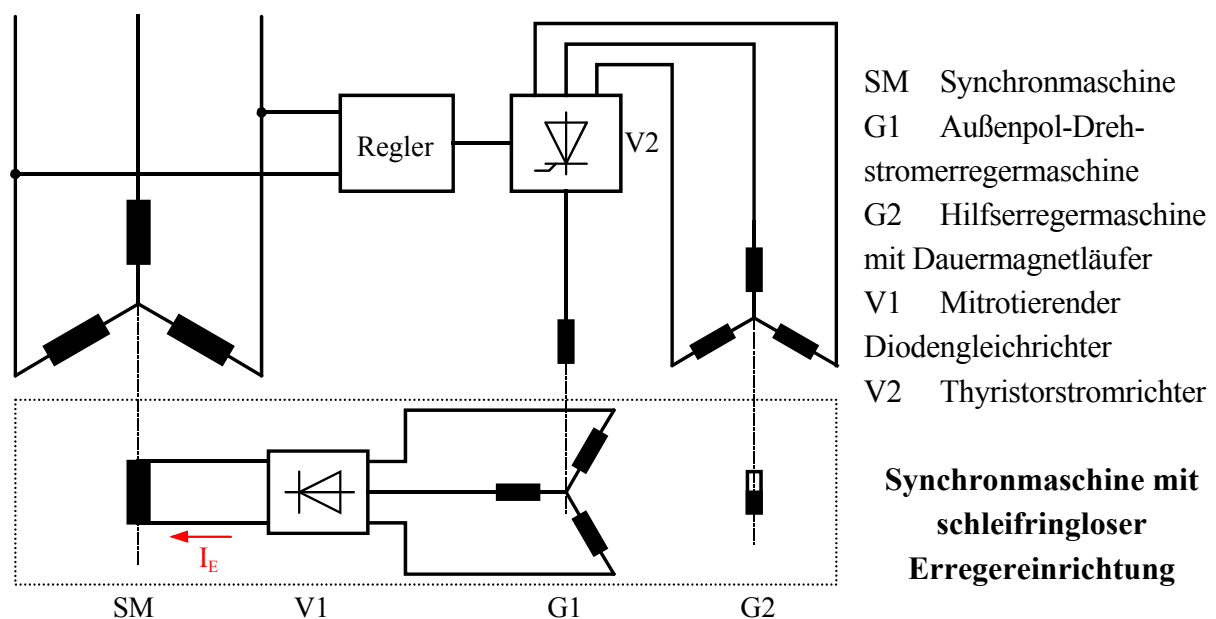
Mit Rücksicht auf einen guten Wirkungsgrad verwendet man bei Generatoren Dynamobleche mit niedrigen Verlustziffern bis hinab zu $v_{10} = 1 \text{ W/kg}$. Auch kornorientierte Bleche werden bereits eingesetzt.

Für den Betrieb einer elektrisch erregten Synchronmaschine und speziell im Einsatz als Drehstromgenerator benötigt man für die Läuferwicklung einen einstellbaren Gleichstrom. Dieser wird durch das Erregersystem geliefert, dessen Regeleinrichtungen vor allem die Spannungshaltung und die Blindlaststeuerung im stationären und dynamischen Betrieb (Laststöße) übernehmen.

Die erforderlichen Erregerleistungen erstrecken sich für zweipolige Turbogeneratoren von rd. 3 kW bei 100 kW bis 4 MW bei einer 1000-MVA-Maschine.

Je nach Leistung der Synchronmaschine, haben sich für das Erregersystem verschiedene Techniken herausgebildet. Die früher allgemein angewandte Erregertechnik, eine direkt angekuppelte Gleichstromhaupt- mit Hilferregermaschine, lässt sich mit Rücksicht auf die mechanische und elektrische Belastung des Ankers nur bis zu Einheitsleistungen der Synchronmaschine von rd. 150 MVA ausführen. Dem Spannungsregler steht die konstante Ankerspannung des Hilfs-generators, der selbsterregt ist, hierbei zur Verfügung.

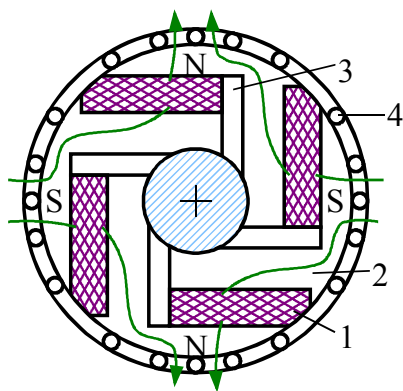
Modernere Erregersysteme basieren auf Schaltungen der Leistungselektronik und stehen bis zu den höchsten Leistungen zur Verfügung. Heute wird vorwiegend in allen Leistungsbereichen der schleifringlose Außenpol-Drehstromerregergenerator mit rotierendem Diodengleichrichter eingesetzt.



Der Synchrongenerator kann sich auch selbst erregen, wenn man seine Klemmenspannung über Gleichrichter zur Erzeugung des Erregerstromes heranzieht. Darüber hinaus kann auch die zur Spannungshaltung erforderliche verstärkte Erregung bei Belastung selbsttätig durch eine Kompoundierung bereitgestellt werden. Synchronmaschinen mit einem derartigen Erregersystem

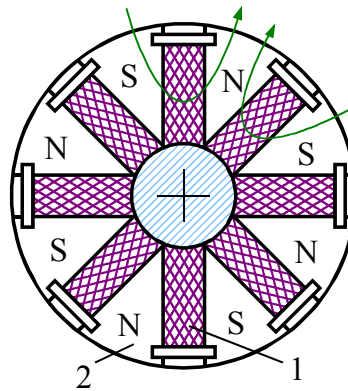
werden als "Konstantspannungsgeneratoren" bezeichnet und beispielsweise zur Versorgung von Schiffsbordnetzen eingesetzt.

Die Fortschritte in der Dauermagnettechnik haben die Entwicklung dauermagneterregter Synchronmotoren gefördert. In Verbindung mit Zwischenkreisumrichtern werden sie als Einzel- und Gruppenantriebe im unteren Leistungsbereich (bis 100 kW) sowie zu Positionieraufgaben eingesetzt. Verschiedene Läuferkonstruktionen mit Ferrit- oder auch Seltenerd-Kobaltmagneten sind bereits realisiert worden. Dauermagneterregte Synchronmaschinen mit kleinem Trägheitsmoment werden bei Antrieben mit kurzen Stellzeiten (Servoantrieben) eingesetzt.



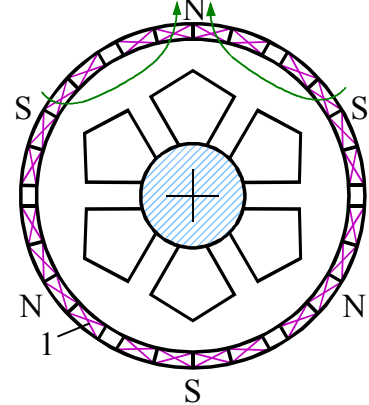
Vierpoliger Läufer
mit Dämpferkäfig

1 Rechteckmagnete, 2 Weicheisen
3 Luftspalt, 4 Dämpferkäfig



Achtpoliger Läufer

1 Rechteckmagnete
2 Weicheisenpole



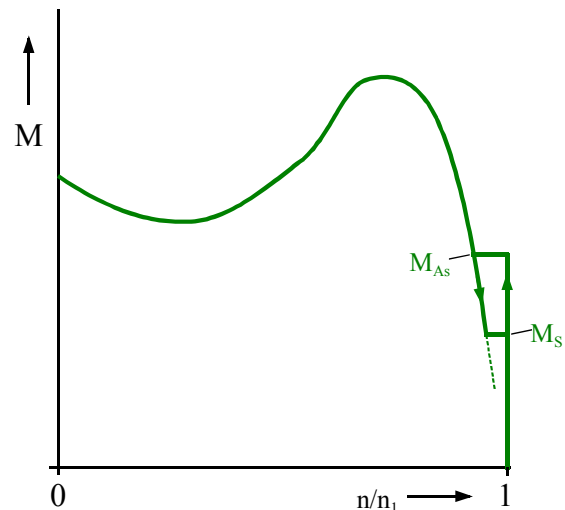
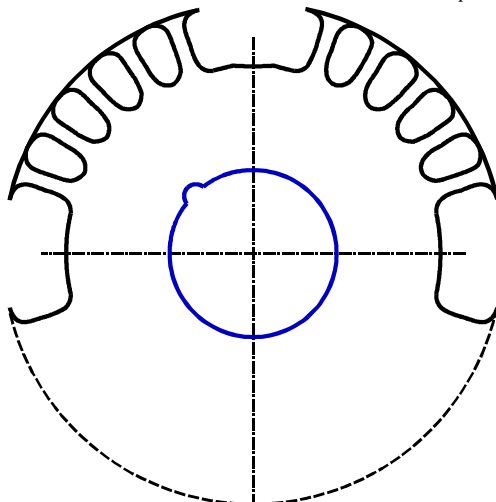
Sechspoliger Läufer mit
geringem Trägheitsmoment

1 Seltenerd-Kobaltmagnete

Konstruktion dauermagneterregter Läufer von Synchronmotoren

Reluktanzmotoren

Die Schenkelpolmaschine entwickelt ohne Gleichstromerregung das Reaktionsmoment M_R mit der sie als Motor belastet werden kann. Diese Erscheinung wird zum Bau von Reluktanzmotoren ausgenutzt, die man aus normalen Asynchronmaschinen mit Kurzschlussläufern entwickelt hat. Durch Aussparungen im Läufer Eisen erhält der magnetische Widerstand (Reluktanz) längs des Umfangs verschiedene Werte, so dass je eine Achse maximalen und minimalen Leitwertes und damit zwei Ständerreaktanzen X_d und $X_q < X_d$ entstehen.



Läuferblechschnitt und Drehmomentkennlinie eines Reluktanzmotors

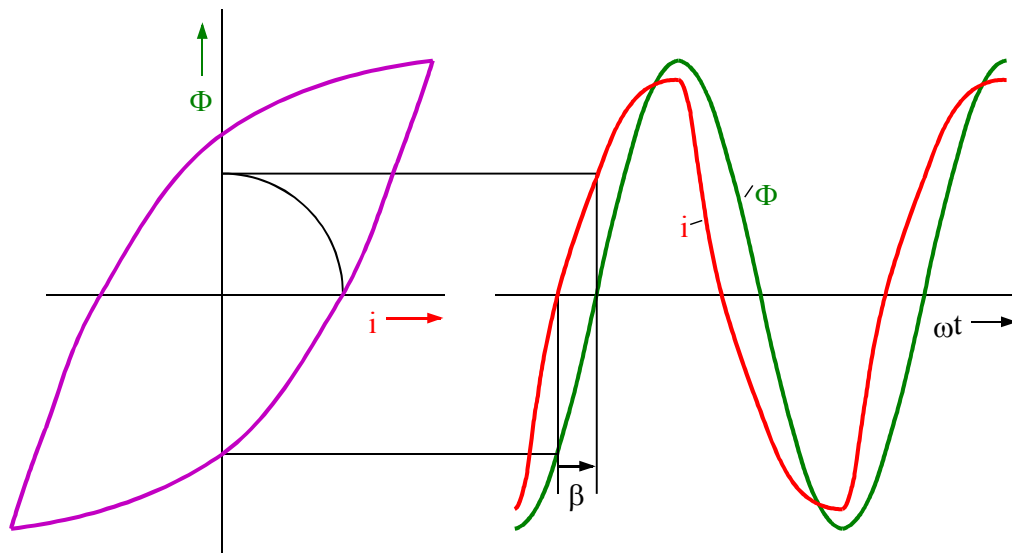
Der Anlauf des Reluktanzmotors erfolgt wie der eines normalen Kurzschlussläufermotors über die Käfigwicklung. In der Nähe der Synchrondrehzahl fällt der Läufer bei einem Eintrittfallmoment M_S in Tritt (er synchronisiert) und kann danach bis zu einem Außertrittfallmoment $M_{As} > M_S$ bei synchroner Drehzahl belastet werden.

Die abgegebene Leistung des Reluktanzmotors, der bis 10 kW gebaut wird, erreicht rd. 50 % der Typenleistung der entsprechenden Asynchronmaschine. Der Leistungsfaktor $\lambda = 0,5$ und der Wirkungsgrad $\eta = 0,6$ sind relativ niedrig.

Hysteresemotoren

Der Hysteresemotor ist eine Synchronmaschine mit Dauermagneterregung und günstigem asynchronen Anlaufeigenschaften. Der Ständer wird bei Kleinstmotoren meist im Spaltpolprinzip mit ausgeprägten Polen ausgeführt. Der Läufer besitzt keine Wicklung, sondern besteht aus einem Zylinder aus hartmagnetischem Werkstoff.

Zur Erzielung hoher Drehmomente ist also eine breite Hystereseschleife mit $\sin\beta \rightarrow 1$ günstig.

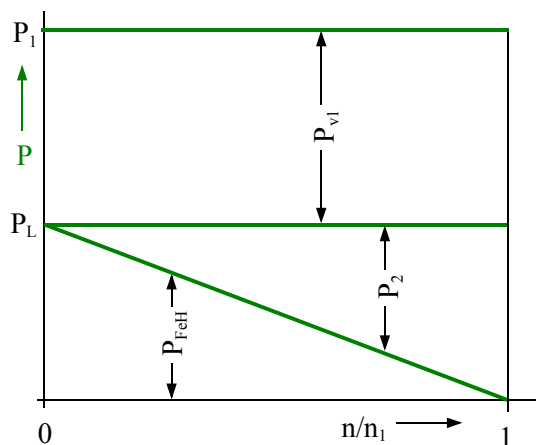


Magnetisierungskennlinie $\Phi = f\{i\}$

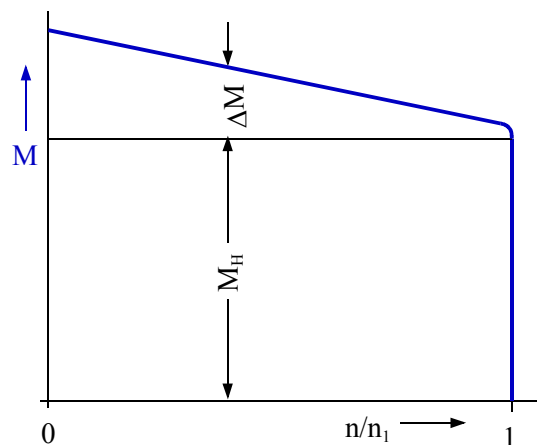
Diagramme von Feld Φ und Erregerstrom i

Magnetisierung eines hartmagnetischen Werkstoffes

Im synchronen Lauf entwickelt der Hysteresemotor sein Drehmoment wie eine gewöhnliche dauermagneterregte Synchronmaschine. Hysteresemotoren werden bei Leistungen unter 100 W für Kleinantriebe, die mit synchroner Drehzahl laufen müssen, eingesetzt.



Leistungsbilanz eines Hysteresemotors



Drehmomentkennlinie eines Hysteresemotors

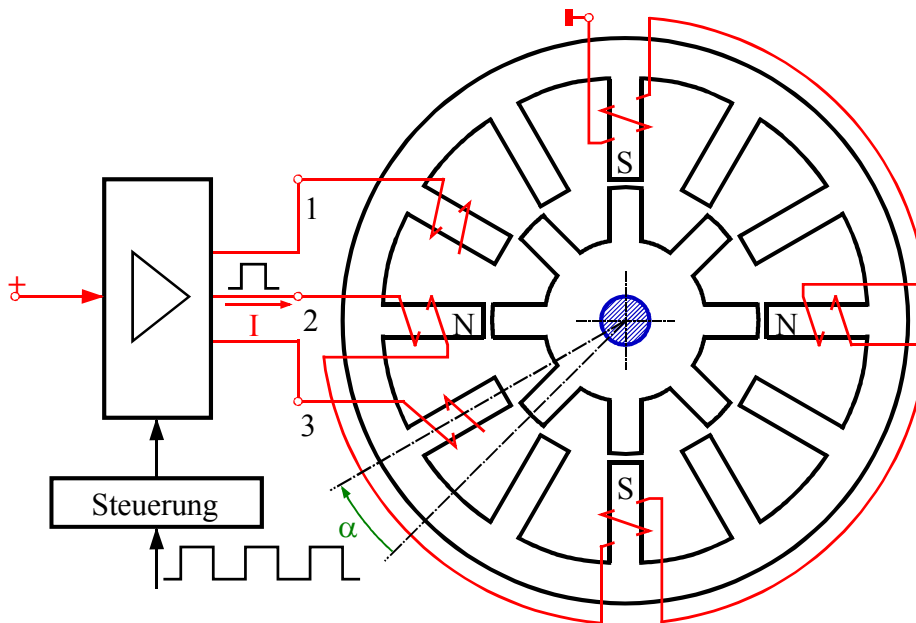
Schrittmotoren

Schrittmotoren sind eine Sonderbauform der Synchronmaschine mit ausgeprägten Ständerpolen, deren Wicklungen durch Stromimpulse zyklisch angesteuert werden.

Dem sprungförmig umlaufendem Magnetfeld folgt der Läufer jeweils mit einem Schritt um den Winkel α .

Einer Reihe von n Steuerimpulsen entspricht daher eine Drehung der Welle um den Drehwinkel $\varphi = n \cdot \alpha$, was eine Positionierung ohne Rückmeldung erlaubt.

Zu einem Motor gehört immer ein dem Motor zugeordnetes Ansteuergerät.



Schaltung eines dreisträngigen Reluktanzschrittmotors mit einem Schrittwinkel $\alpha = 15^\circ$

Das Prinzip der Schrittmortertechnik kann am Beispiel eines dreisträngigen Motors mit Reluktanzläufer gezeigt werden. Durch die Stromimpulse werden die Wicklungsstränge 1 bis 3 nacheinander erregt und damit eine sprungförmige Winkeländerung der Ständerfeldlage erreicht. Der Läufer stellt sich jeweils so in dieses Ständerfeld ein, dass vier seiner Zähne mit den gerade erregten Ständerpolen deckungsgleich sind, was der Stellung kleinsten magnetischen Widerstandes (Reluktanz) entspricht. Im Beispiel ergibt jeder Impuls einen Winkelschritt von $\alpha = 15^\circ$.

In der Praxis werden häufig im Vollschrittbetrieb mit einem Winkelschritt von α immer alle m Wicklungen mit unterschiedlicher Polarität bestromt (möglichst großer Wirkungsgrad). Im Halbschrittbetrieb mit einem Winkelschritt von $\alpha/2$ werden dann abwechselnd m Wicklungen und $m-1$ Wicklungen bestromt.

Schrittmotoren werden als permanenterregte Motoren, als Reluktanzmotoren mit weichmagnetischem Läuferzahnrad oder als Hybridmotoren mit $m = 2$ bis $m = 5$ Wicklungssträngen ausgeführt.