

Synchrongeneratoren

Prof. Dr.-Ing. W. Kühn

Synchrongeneratoren können in der Ausführung als Turbogeneratoren von Dampfturbinen und Gasturbinen angetrieben werden. Bei Wasserkraftturbinen werden Schenkelpolläufer eingesetzt. Synchrongeneratoren erzeugen den größten Teil des Stroms, was sich auch bei weiterer Erhöhung des erneuerbaren Anteils an der Energieerzeugung nicht ändern wird. Von den Erneuerbaren Energieträgern kommen nur die Photovoltaik und Brennstoffzellen ohne mechanische Generatoren aus. Energie aus Windkraft wird sowohl über Synchrongeneratoren (Ringpolläufer oder Vollkonverter) als auch über Asynchrongeneratoren (normal oder doppelgespeist) eingespeist.

Die für die photovoltaische Einspeisung verwendeten Stromrichter lassen sich mit stationären Gleichungen beschreiben, die denen der mechanischen Synchrongeneratoren ähnlich sind. Daher gelten im Prinzip die weiter unten folgenden Gleichungen und Diagramme auch für über Stromrichter einspeisende erneuerbare Quellen. In getrennten Kapiteln werden der für die erneuerbare Erzeugung und für spezielle Energieübertragungsaufgaben besonders wichtige selbstgeführte Stromrichter sowie der für die Höchstleistungs-Gleichstrom-Übertragung über mehrere 1000 km eingesetzte netzgeführte Stromrichter behandelt.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen Turbogeneratoren und Schenkelpolläufern ist die Drehzahl. Damit mit beiden Generatortypen eine Frequenz von 50 Hz erzielt wird, ist die so genannte Polpaarzahl p entsprechend zu wählen. Polpaarzahl bezieht sich auf die Anzahl der magnetischen Nord- und Südpole, wobei Nord- und Südpol ein Polpaar ausmachen. Beim Turbogenerator gibt es Maschinen mit einer Polpaarzahl von $p = 1$ und $p = 2$. Im ersten Fall dreht sich der Läufer des Generators mit 3000 U/min und im zweiten Fall mit 1500 U/min.

Beim Schenkelpolläufer ist die Polpaarzahl sehr viel höher, z.B. $p = 15$. Die Drehzahl ist dann 200 U/min. Durch die entsprechend hohe Polpaarzahl kann man dann trotz der niedrigen Drehzahl eine Spannung mit einer Frequenz von 50 Hz erzeugen.

Im Folgenden wird der Aufbau eines Turbogenerators mit einer Polpaarzahl von $p = 1$ beschrieben.

Es gibt einen feststehenden Teil, den Anker, und einen umlaufenden Teil, den Läufer oder Rotor. Auf dem Läufer befindet sich, eingebracht in Nuten, die sogenannte Läufer- oder Erregerwicklung, durch die ein Gleichstrom fließt. Das vom Gleichstrom erzeugte Magnetfeld B ist, wenn man eine Augenblicksaufnahme macht, trapezförmig mit Maxima, Minima und Nulldurchgängen entlang des Läuferumfangs verteilt. Dieses Magnetfeld dreht sich mit der Umlaufgeschwindigkeit des Läufers, in unserem Fall also mit 3000 U/min oder 50 U/sec.

Auf dem Anker befinden sich drei um jeweils 120 Grad gegeneinander versetzte Wicklungen. Das umlaufende Magnetfeld induziert Spannungen in diese Wicklungen, welche jede aus in Reihen geschalteten Windungen besteht. Die Spannungen der drei Wicklungen sind in der Phase um 120 Grad gegeneinander versetzt. Die induzierten Spannungen sind bei Leerlauf der Ankerwicklungen identisch mit den Spannungen zwischen den Klemmen der Ankerwicklungen.

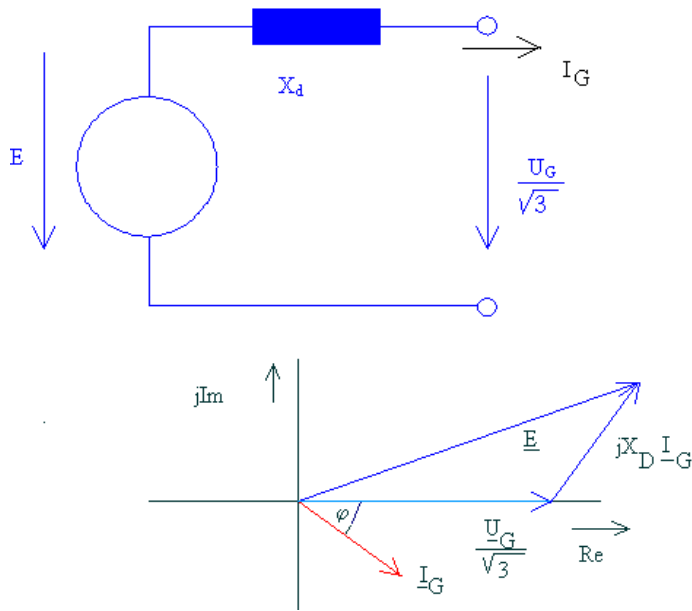
Durch verschiedene Maßnahmen wird erreicht, dass die Spannung sinusförmig ist, trotz der Trapezform des umlaufenden Magnetfeldes.

Bei Leerlauf tritt der Scheitelwert der Sinusspannung in jeder Ankerwicklung dann auf, wenn der Maximalwert des magnetischen Feldes die Wicklung schneidet. Schließt man an die Klemmen der Ankerwicklungen eine symmetrische Last an, so fließen Ströme in den drei Wicklungssträngen, die betragsgleich und in der Phase gegeneinander um 120 Grad versetzt sind. Diese drei Ströme verursachen jeder für sich ein örtlich fest stehendes Magnetfeld. Die Amplitude jedes fest stehenden Magnetfeldes ändert sich zwischen ihrem positiven und negativen Scheitelwert bei einem Umlauf des Rotors. Die drei Magnetfelder überlagern sich im Luftspalt wegen des radialen Verlaufs des Magnetfeldes arithmetisch. Die Überlagerung dieser drei am Ankerumfang um 120 Grad räumlich versetzt und um 120 Grad zeitlich versetzt auftretenden Magnetfelder ergibt ein umlaufendes Magnetfeld. Dieses von den Wicklungsströmen erzeugte Magnetfeld und das Rotorfeld überlagern sich zu einem resultierenden Feld. Die Klemmenspannung des Generators wird von diesem resultierenden Magnetfeld bestimmt. Abhängig von der Art und Größe der an den Ankerklemmen angeschlossenen Last gibt es eine Phasenverschiebung zwischen der Klemmenspannung und dem Ankerstrom (= Laststrom). Die Wirkung des Ankerstroms auf die Klemmenspannung des Generators nennt man Ankerrückwirkung.

Die in die Ankerwicklung induzierte Spannung nennt man synchrone Spannung E . Die zugehörige Außenleiterspannung nennt man Polradspannung U_p . Bei Leerlauf ist sie an den Ankerklemmen (= Generatorklemmenspannung) messbar. Fließt ein Laststrom, so unterscheiden sich Polradspannung und Generatorklemmenspannung. Im Ersatzschaltbild wird diese Spannungsdifferenz durch die so genannte synchrone Reaktanz berücksichtigt.

Die synchrone Reaktanz wird als relative Größe angegeben. Je nach Größe des Generators beträgt sie zwischen 120 % und 300 %. Den Wert der Reaktanz in Ohm erhält man durch Multiplikation mit dem Bezugswert U_{Gn}^2/S_n .

Ersatzschaltbild für den stationären Betrieb



Der Synchrongenerator erzeugt elektrische Wirkleistung und kann induktive oder kapazitive Blindleistung liefern. Das obige Zeigerbild gilt für übererregten Betrieb, d.h. der Generator liefert neben der Wirkleistung auch induktive Blindleistung an einen ohm-induktiven Verbraucher. Der Generatorstrom eilt der Generatorspannung um den Phasenwinkel φ nach.

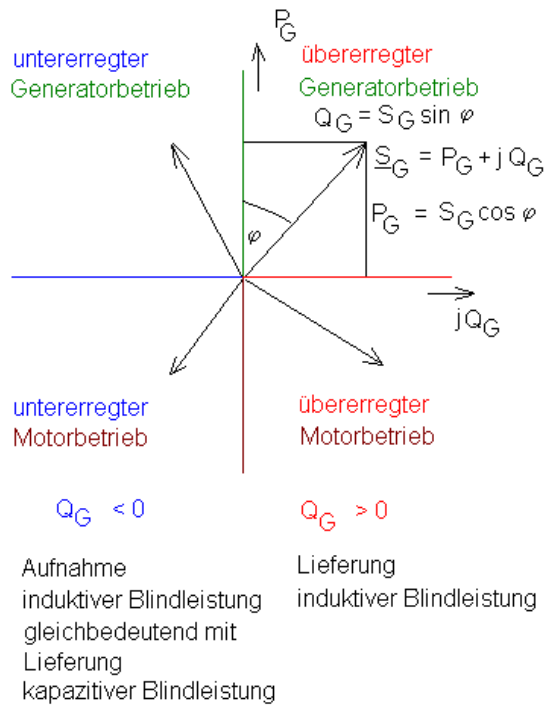
Aufgabe: Zeichnen Sie qualitativ Zeigerbilder für die Lieferung von

- Wirkleistung und kapazitiver Blindleistung
- nur induktiver Blindleistung
- nur kapazitiver Blindleistung

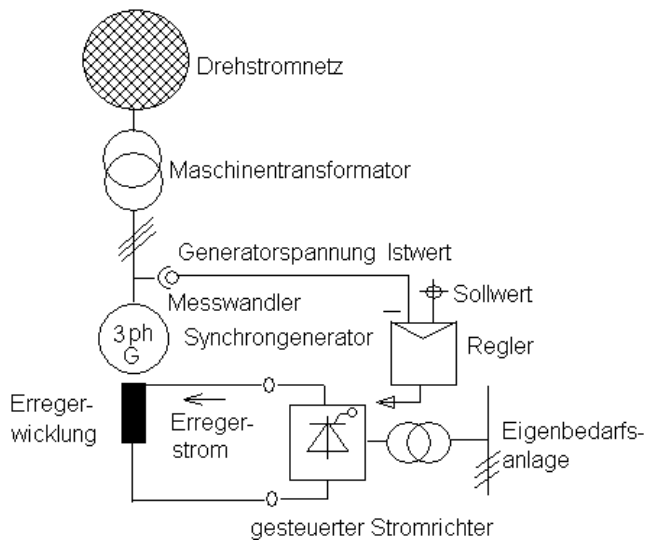
Bei Betrieb als nur Blindleistungserzeuger spricht man von Blindleistungsmaschine. Es wird dann der Welle der Maschine keine mechanische Leistung zugeführt. Die Maschine arbeitet zur Deckung ihrer Reibungsverluste und sonstigen Verluste (Wicklung, Eisen) als Motor.

Die Lieferung von induktiver oder kapazitiver Blindleistung ist für die Regelung der Generatorklemmenspannung notwendig. Da die Klemmenspannung durch die Übersetzung des Maschinentransformators auch die Netzspannung bestimmt, lässt sich mit dem Generator die Netzspannung regeln. Diese Regelung geht im mehreren 100 ms Bereich vor sich, während die Spannungsregelung mittels der Übersetzung des Maschinentransformators im Sekundenbereich erfolgt. Man unterscheidet zwischen übererregtem Betrieb (Lieferung von induktiver Blindleistung) und untererregtem Betrieb (Lieferung von kapazitiver Blindleistung = Aufnahme induktiver Blindleistung).

P/Q-Zeigerbilder für übererregten und untererregten Betrieb



Übersichtsschaltplan für die Generatorspannungsregelung



Leistungsgleichungen

$$P_G = U_p U_G / X_d \sin \delta$$

$$Q_G = U_p U_G / X_d \cos \delta - U_G^2 / X_d$$

P_G an den Generatorklemmen abgegebene Wirkleistung (elektrische Leistung)

Q_G an den Klemmen abgegebene induktive Blindleistung

U_p Polradspannung (Leiterspannung)

U_G Klemmenspannung (Leiterspannung)

X_d synchrone Reaktanz

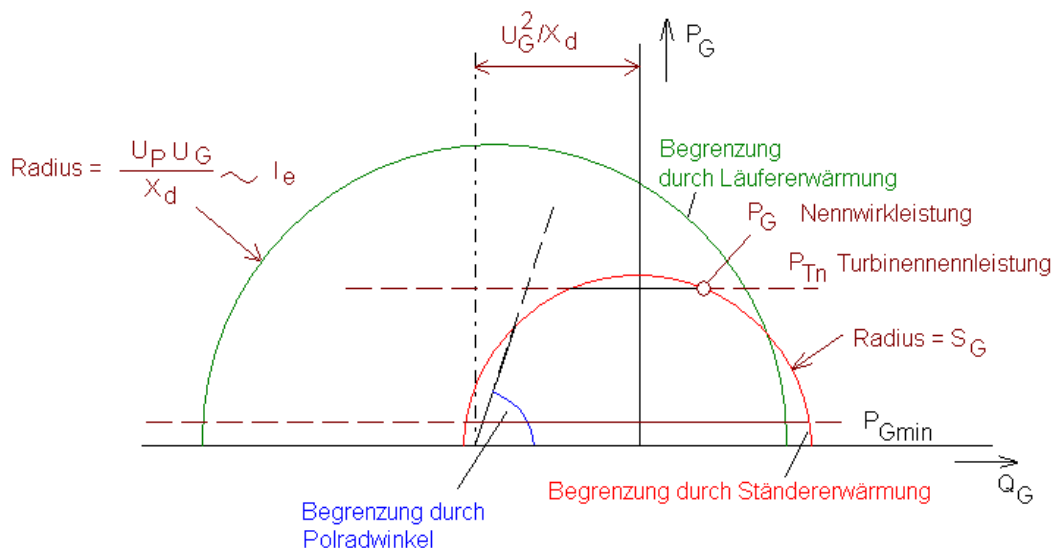
Polradwinkel δ

Wenn der Wert der Blindleistung in einer Rechnung negativ herauskommt, dann heißt dies, dass induktive Blindleistung an den Klemmen aufgenommen wird, was gleichbedeutend ist mit der Abgabe kapazitiver Blindleistung.

Betriebsdiagramm des Synchrongenerators

Das Wirkleistungs-/Blindleistungsdigramm der Synchronmaschine lässt sich aus den Gleichungen für P_G und Q_G entwickeln. Zweck des Diagramms ist der schnelle Überblick über die Zusammenhänge zwischen P_G , Q_G und U_p sowie über den Betriebsbereich eingrenzende Betriebsgrößen.

Der maximal zulässige kontinuierliche Ankerstrom wird bestimmt durch die Bemessungsscheinleistung, die sich als geometrische Summe aus Wirkleistung und Blindleistung ergibt. Im P/Q-Diagramm wird der maximale Ankerstrom also bestimmt durch einen Kreis mit einem Radius, der proportional der Scheinleistung ist. Da wir nur den Generatorbetrieb betrachten, ist nur ein Halbkreis zu zeichnen.



Mit P als Ordinate und Q als Abzisse ergibt sich somit ein Halbkreis im 1. und 2. Quadranten. P und Q sind also nicht frei wählbar, sondern es muss immer die Bedingung eingehalten werden, dass die Bemessungsscheinleistung des Generators nicht überschritten wird. Die maximal lieferbare induktive Blindleistung ist weiterhin durch die maximal zulässige Erregung des Generators, d.h. durch den maximal zulässigen Erregerstrom in der Feldwicklung des Rotors begrenzt. Welche Begrenzung lässt sich hierfür in das Betriebsdiagramm einzeichnen? Um das

herauszufinden, wird die Gleichung für die Blindleistung Q_G so aufbereitet, dass sich wiederum der Zusammenhang zwischen P_G und Q_G durch eine Kreisgleichung beschreiben lässt:

$$P_G = P_G \sin \delta$$

$$Q_G + U_G^2/X_d = U_P U_G/X_d \cos \delta$$

Hieraus folgt

$$P_G^2 + (Q_G + U_G^2/X_d)^2 = (U_P U_G/X_d)^2 \text{ (Kreisgleichung)}$$

Man kann diese Kreisgleichung in das Betriebsdiagramm einzeichnen, indem der Kreismittelpunkt auf der Abszisse um den Abschnitt $Q_G = U_G^2/X_d$ nach links verschoben wird. Der Radius des Kreises wird bei vorgegebener Klemmenspannung (Bemessungswert) von der einstellbaren Polradspannung bestimmt, welche wiederum von dem maximal zulässigen Erregerstrom abhängt.

Weitere Begrenzungen sind gegeben durch die maximale Turbinenleistung, die niedrigste Turbinenleistung und den maximal zulässigen Polradwinkel, der einen dynamisch stabilen Betrieb ermöglicht.

[Übungen zum Thema Synchronmaschine](#)