

Wechselstromantriebe



Turbogenerator: Quelle wikipedia.org

Inhalt:

- Die Wechselspannung
- Der Transformator
- Der Synchrongenerator
- Die Asynchronmaschine

Inhaltverzeichnis

1.	Die Wechselspannung	3
1.1.	Erzeugung der Wechselspannung	4
1.2.	Der Kondensator	5
1.3.	Die Induktivität	6
1.4.	Überblick	7
1.5.	Die Leistung	9
1.6.	Der Drehstrom.....	11
2.	Der Transformator.....	13
2.1.	Die Ersatzschaltung.....	14
2.2.	Vereinfachte Ersatzschaltung (ohne Verluste).....	15
3.	Synchrongenerator im Inselbetrieb	16
3.1.	Einsträngiges Ersatzschema	16
3.2.	Wechselstromdiagramme im Inselbetrieb	17
4.	Der Synchrongenerator am starren Netz	18
4.1.	Das Generatordiagramm	18
4.2.	Die Generatordiagrammkonstante.....	20
5.	Drehfeldasynchronmaschine.....	21
5.1.	Die Ersatzschaltung	22
5.2.	Beispiel: Asynchronmotor	23

1. Die Wechselspannung

Die Wechselspannung ist die elektrische Spannung in einem Wechselstrom-Netz. Sofern nicht anders angegeben ist dabei der Effektivwert der Wechselspannung gemeint, also die Effektivspannung U_{eff} .

Die Spitzenspannung U_0 berechnet sich bei einer sinusförmigen Wechselspannung aus der effektiven Spannung. Die Spitze-Spitze-Spannung $2U_0$ liegt zwischen dem positiven und negativen Spitzenwert einer Periodendauer und ist die doppelte Spitzenspannung.

Das Kurzzeichen für Wechselspannung ist die Tilde. $230V\sim$ ist beispielsweise die Kurzbezeichnung für eine Wechselspannung mit einem Effektivwert von 230 Volt.

Es gibt verschiedene Formen von Wechselspannung, häufig sind:

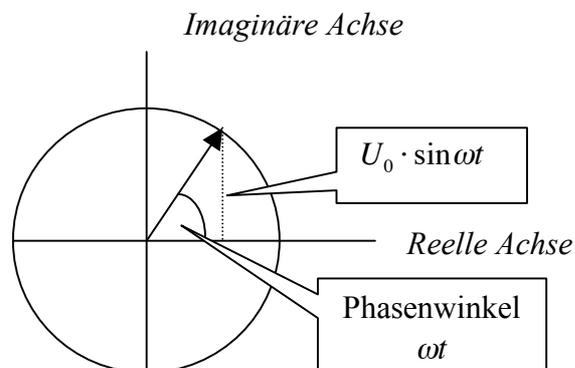
1. sinusförmig
2. sägezahnförmig
3. rechteckförmig

Für ein sinusförmige Wechselspannung gilt:

$$U_{\text{eff}} = \frac{U_0}{\sqrt{2}}$$

Bemerkung: In diesem Dokument wird für den Effektivwert einer Wechselspannung die Bezeichnung U (und nicht U_{eff}) verwendet.

Der Wert der Spannung $U(t) = U_0 \cdot \sin \omega t$ ist durch ihren Betrag U_0 und die „Phase“ ωt gegeben. Beide Informationen kann man in einen „Zeiger“ darstellen. Der Betrag und die Phase sind dann als Länge des Vektors und als Winkel zur x Achse ablesbar:



Die zeitliche Änderung der dargestellten Größen entspricht der Drehung des Zeigers mit konstanter Winkelgeschwindigkeit. Die trigonometrische Formulierung entspricht der Projektion des Zeigers auf eine der Achsen.

	Schreibweise	
	Komplex	Trigonometrisch
Anwendung, z. B. auf die Elektrische Spannung:	$U = U_0 \cdot e^{i\omega t + \varphi}$	$U_0 \cdot \sin(\omega t + \varphi)$

Wobei: $e^{i\varphi} = \cos \varphi + i \cdot \sin \varphi$

1.1. Erzeugung der Wechselspannung

Das Prinzip eines Wechselstromgenerators ist äußerst einfach. Durch die Drehung einer Leiterschleife in einem Magnetfeld ändert sich der magnetische Fluss durch die Schleife ständig. Dadurch wird ihre Spannung induziert.

Rotiert die Schleife mit der Winkelgeschwindigkeit ω , hängt die Fläche der Spule bezüglich dem Magnetfeld so ab:

$$A(t) = 2 \cdot r \cdot l \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

mit dem Induktionsgesetz:

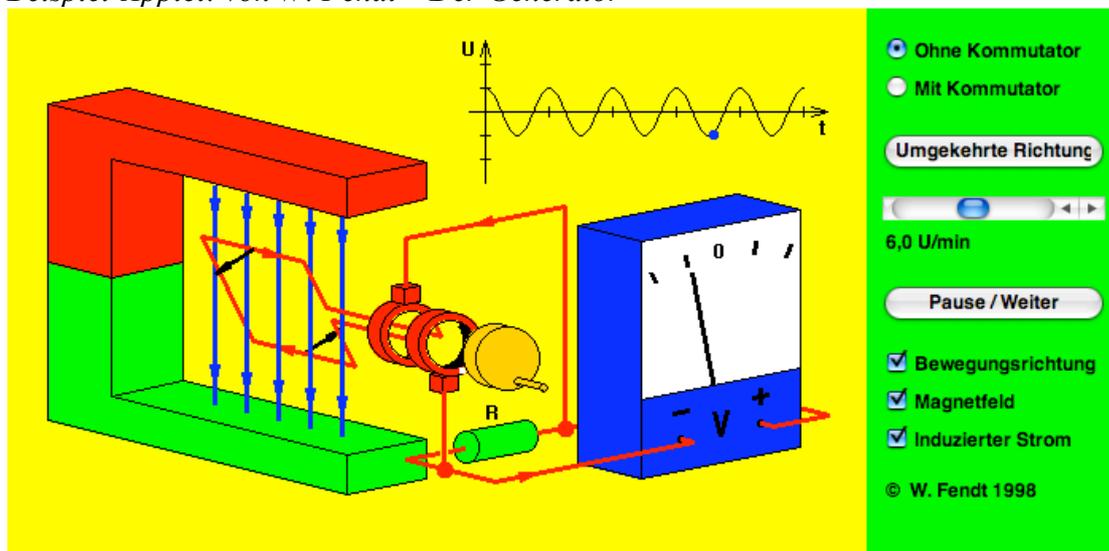
$$U(t) = -\frac{d}{dt} B \cdot A = B \cdot \frac{d}{dt} (A \cdot \cos(\omega \cdot t))$$

resultiert eine induzierte Spannung von:

$$U(t) = 2 \cdot r \cdot l \cdot B \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

Die durch die Rotation dem Leiter induzierte Spannung kann durch Bürsten an den Schleifringen abgegriffen werden. Steht der Leiter parallel zum Magnetfeld, wirkt auf ihn die Lorentzkraft. Diese hemmt die Bewegung der Schleife und so ist zur Bewegung der Schleife mechanische Arbeit notwendig.

Beispiel-Applet: von W. Fendt – Der Generator



Link: <http://www.virtualuniversity.ch/mathematik/15.html>

1.2. Der Kondensator

Eine Sinusförmige Wechselspannung mit der Amplitude U und der Frequenz f bzw. der Kreisfrequenz $\omega=2\pi\cdot f$, also

$$U(t) = \hat{U} \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

an einem Kondensator bewirkt den Strom:

$$I(t) = C \cdot \frac{d}{dt}U(t) = \omega \cdot C \cdot \hat{U} \cdot \cos(\omega \cdot t) = \omega \cdot C \cdot \hat{U} \cdot \sin(\omega \cdot t + \frac{\pi}{2})$$

Das Verhältnis von Spannungsamplitude zu Stromamplitude wird allgemein als Scheinwiderstand bezeichnet; im Falle eines idealen Kondensators, bei dem der Strom der Spannung um genau 90° vorseilt, als kapazitiver Blindwiderstand X_C :

$$X_C = \frac{1}{j\omega C} = \frac{-j}{\omega C}$$

Phasenverschiebungswinkel:

$$\varphi = -\frac{\pi}{2} \text{ mit } X_C = \frac{1}{\omega C}$$

Die Formel zeigt, dass der elektrische Blindwiderstand des Kondensators mit zunehmender Frequenz bis zum praktischen Kurzschluss bei Hochfrequenz abnimmt und andererseits bei der Frequenz $f = 0$, also bei Gleichspannung, unendlich groß wird und praktisch wie eine Leitungsunterbrechung wirkt.

Durch die Phasenverschiebung von 90° zwischen Spannung und Strom wird an einem Blindwiderstand im zeitlichen Mittel keine Leistung in Wärme umgewandelt; die Leistung pendelt nur hin und her und wird als Blindleistung bezeichnet.

1.3. Die Induktivität

Wird eine Spule an sinusförmige Wechselspannung angelegt, so wechseln der Strom und das Magnetfeld ebenfalls periodisch seine Richtung. Die Stromänderung verursacht durch Selbstinduktion eine Spannung, die der Eingangsspannung gleicht. Bei einem Transformator kann sie an einer weiteren Wicklung entnommen werden. Der Spulenstrom $i(t)$ und die durch Selbstinduktion an den Klemmen erzeugte Spannung $u(t)$ folgen bei einer idealen Spule der Gleichung

$$U_L = L \cdot \frac{d}{dt} I_L$$

Hierbei sind Strom und Spannung wie bei passiven Bauelementen üblich im Verbraucherzählpfeilsystem angegeben.

Da der Strom infolge der induzierten Gegenspannung nur allmählich anwachsen bzw. abfallen kann, folgt er dem Verlauf der Spannung stets mit zeitlichem Verzug, er ist phasenverschoben. Unter idealen Bedingungen (bei einem vernachlässigbar kleinen ohmschen Widerstand) eilt die Wechselspannung dem Strom um 90° (der vollständigen 360° -Periode) voraus. Es besteht eine Trägheit der Spule gegen Stromänderungen.

$$U(t) = \hat{U} \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

an einer Spule bewirkt den Stromfluss

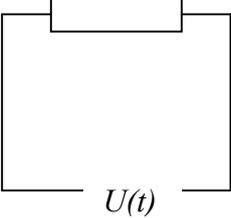
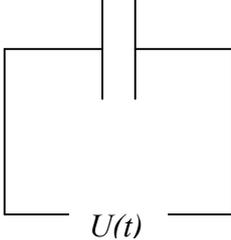
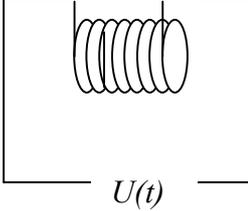
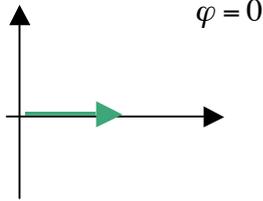
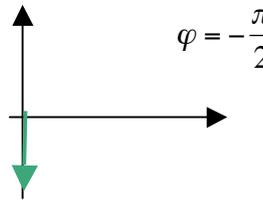
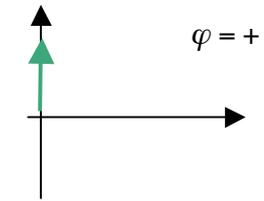
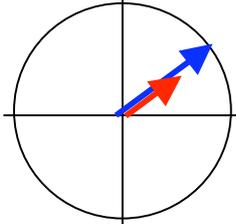
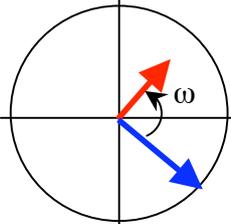
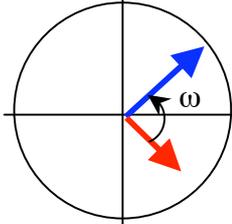
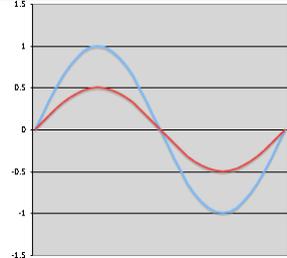
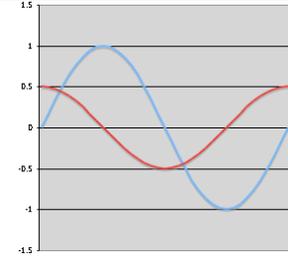
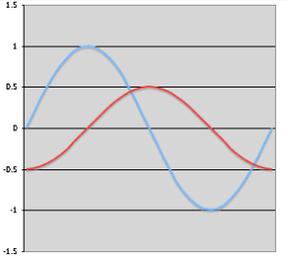
$$I(t) = \frac{1}{L} \int U(t) dt = \frac{-1}{\omega L} \cos(\omega \cdot t) = \frac{\hat{U}}{\omega L} \cdot \sin(\omega \cdot t - \frac{\pi}{2})$$

$$X_L = j\omega L$$

Phasenverschiebungswinkel:

$$\varphi = +\frac{\pi}{2} \text{ mit } X_L = \omega L$$

1.4. Überblick

Bemerkung	Ohmsch	Kapazitiv	Induktiv
Schema			
Spannung über dem Bauteil	$U(t) = R \cdot I(t)$	$U(t) = \frac{Q(t)}{C}$	$U(t) = L \frac{dI}{dt}$
Strom als Funktion der Spannung	$I(t) = \frac{1}{R} \cdot U(t)$	$I(t) = \frac{d}{dt} Q = C \cdot \frac{d}{dt} U(t)$	$I(t) = \frac{1}{L} \int U(t) dt$
	$I(t) = \frac{1}{R} \cdot U(t)$	$I(t) = j \cdot \omega \cdot C \cdot U(t)$	$I(t) = -\frac{j}{\omega L} U(t)$
Widerstand $R = \frac{U(t)}{I(t)}$	R	$X_C = -\frac{j}{\omega C}$	$X_L = j\omega L$
Zeiger-diagramm für den Widerstand			
Zeiger-diagramm der Spannung (blau) und des Stromes (rot)			
Verlauf der Spannung (blau) und des Stromes (rot)			

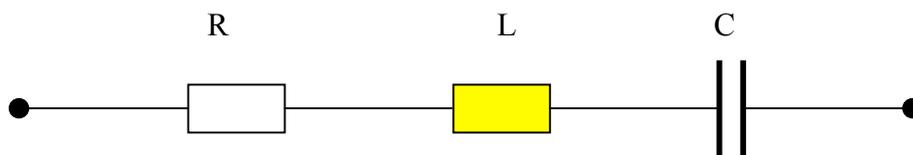
Demo-Applet: <http://www.virtualuniversity.ch/mathematik/40.html>

Der Faktor $\pm j$ zwischen Strom und Spannung zeigt eine Phasenverschiebung von $\pm 90^\circ$. Für den Kondensator und die Spule gilt deshalb:

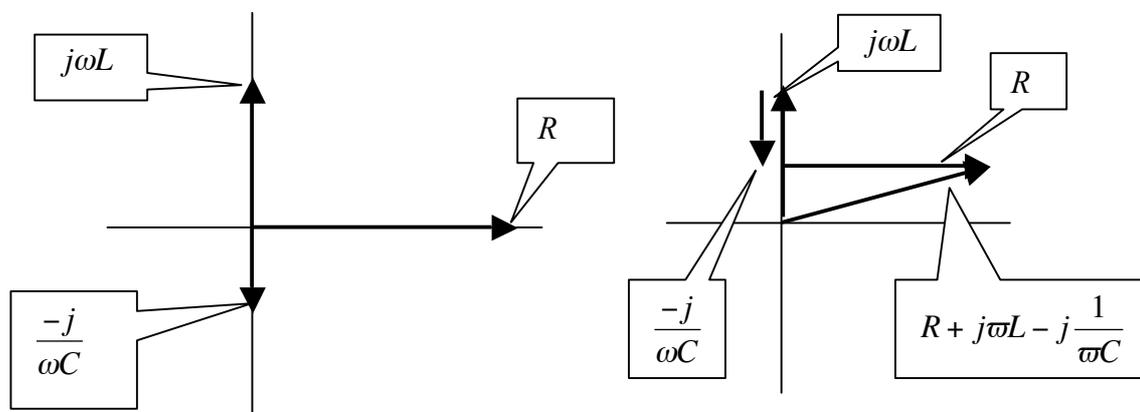
	Schreibweise	
	Vektor in der komplexen Ebene	Trigonometrisch
Spannung:	$U(t) = U_0 \cdot e^{i\omega t}$	$U_0 \cdot \sin(\omega t)$
Strom im Kondensator:	$I(t) = j \cdot \omega \cdot C \cdot U(t) = I_0 \cdot e^{i\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)}$	$I_0 \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$
Strom in der Spule:	$I(t) = \frac{-j}{\omega \cdot L} \cdot U(t) = I_0 \cdot e^{i\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)}$	$I_0 \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$

Die komplexen Widerstände können vektoriell, als Zeigerdiagramm dargestellt werden.

Beispiel: Ein Widerstand, eine Spule und ein Kondensator in Serie beschaltet



Zur Berechnung des Gesamtwiderstands Z ihrer Kombinationen werden die Widerstände vektoriell addiert. Die durch die Widerstände verursachte Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung ist als Winkel der Vektoren zur waagrechten, reellen Achse unmittelbar abzulesen.



1.5. Die Leistung

Die Elektrische Leistung P ist der Mittelwert des zeitlichen Verlaufs der (Augenblicks-)Leistung $P(t)$. Die Augenblicksleistung ergibt sich aus den Augenblickswerten von Strom und Spannung gemäß der folgenden Gleichung:

$$P(t) = U(t) \cdot I(t)$$

Bei Einbezug einer Phasenverschiebung mit dem Phasenwinkel zwischen Strom und Spannung lautet die allgemeine Formel der komplexen Wechselstromrechnung für die Blindleistung

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi$$

und für die Wirkleistung

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

wobei I und U die Effektivwerte von Strom und Spannung sind.

Bei ohmscher Belastung haben Spannung und Strom einen phasengleichen Verlauf, der Phasenwinkel ist und deshalb $\cos=1$, daher nimmt die Wirkleistung immer den positiven Wert des mathematischen Produkts von Strom und Spannung an. Dies bedeutet, dass wirksam Arbeit verrichtet wird.

$$P = U \cdot I \cdot \cos 0 = U \cdot I$$

$$Q = U \cdot I \cdot \sin 0 = 0$$

Um eine Viertelperiode gegeneinander verschobene Spannung und Strom ergeben Blindleistung mit dem Mittelwert Null (hier kapazitiv)

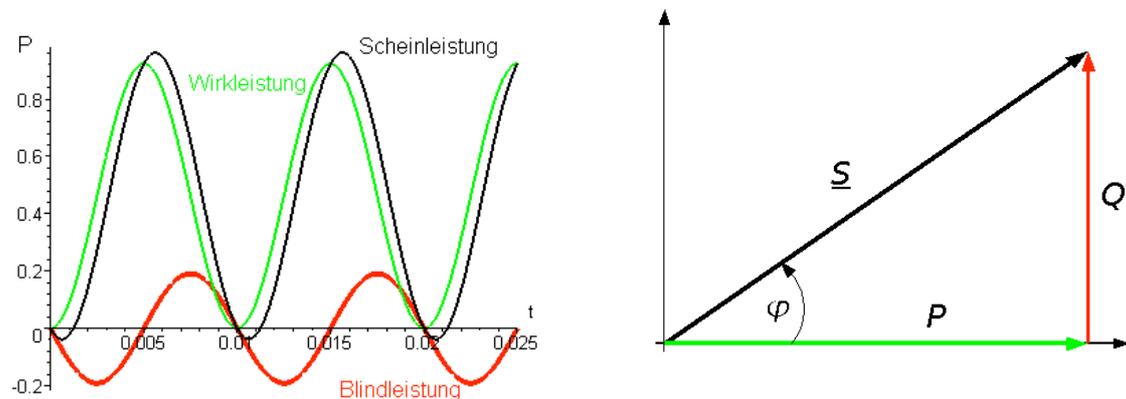
Ein induktiver Verbraucher (z. B. Drosselspule, Transformator, Asynchronmotor) benötigt induktive Blindleistung, um das magnetische Feld aufbauen zu können. Dieses Feld wird mit der Energie und in der Frequenz des speisenden Netzes auf- und wieder abgebaut. Die Energie wird zunächst im Magnetfeld gespeichert, jedoch mit jedem periodischen Abbau des magnetischen Feldes wieder ins Netz zurückgespeist. Bei rein induktiver Belastung haben Spannung und Strom einen um eine Viertelperiode verschobenen Verlauf, der Phasenwinkel ist 90 Grad. Das rechnerische Produkt aus Strom und Spannung befindet sich wechselnd im positiven und negativen Bereich, wobei die Frequenz der Leistung das Doppelte der Grundfrequenz ist. Die Aufzeichnung der Verläufe von Spannung und Strom macht dies sichtbar. Wenn sich die Leistung im „negativen“ Bereich befindet, bedeutet das, dass sie in das Netz zurückgeliefert wird. Im Mittelwert summiert sich diese Leistung daher zu Null, erzeugt „blinden“ Stromfluss und pendelt im versorgenden Netz hin und her. Für eine Phasenverschiebung von genau 90 Grad ist und daher ergibt sich

$$P = U \cdot I \cdot \cos \frac{\pi}{2} = 0$$

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \frac{\pi}{2} = U \cdot I$$

Bei einer angenommenen Phasenverschiebung von genau 90 Grad wird also nur Blindleistung erzeugt. Die sich aus dem Produkt der Effektivwerte von Strom und Spannung ergebende Leistung, die Scheinleistung S , setzt sich aus Wirk- und Blindanteil zusammen, und ist genau gleich dem Blindanteil, da der Wirkanteil gleich Null ist.

Ein ähnliches Verhalten gilt auch für kapazitive Verbraucher (z. B. Kondensatormotoren, Erdkabel), die jedoch statt dem magnetischen ein elektrisches Feld erzeugen, das die Phase zwar in die andere Richtung verschiebt, aber den gleichen Effekt bewirkt.



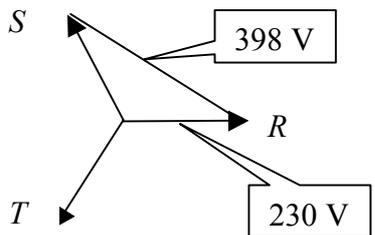
- Das Formelzeichen für die Blindleistung ist Q , die Maßeinheit var
- Das Formelzeichen für die Wirkleistung ist P , die Maßeinheit Watt
- Das Formelzeichen für die Scheinleistung ist S , die Maßeinheit VA

Die Scheinleistung S ist die geometrische Summe aus Wirkleistung P und Blindleistung Q . In der komplexen Zeigerdarstellung ist die Blindleistung durch den imaginären Anteil an der Leistung beschrieben. Der Winkel zwischen den Zeigern von Schein- und Wirkleistung entspricht der Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung.

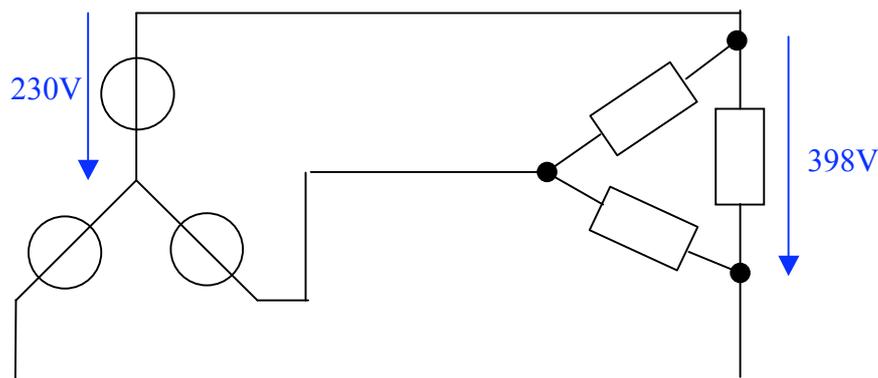
$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

1.6. Der Drehstrom

Unter Drehstrom versteht man drei Wechselstromnetze, als „Phasen“ R , S und T bezeichnet, die gegeneinander um 120° phasenverschoben sind. Eigentlich wären für die drei Netze 6 Leitungen erforderlich, man legt aber jeweils eine Leitung jeder Phase auf Erdpotential, so dass drei Leitungen zum „Mittelpunktsleiter“ M zusammengefasst werden. Somit genügen vier Leitungen für ein Drehstromnetz. Der Sinn dieser Anordnung wird im Hinblick auf die Krafterzeugung klar. Wie aus dem Zeigerdiagramm ersichtlich ist, stehen im Drehstromnetz die (effektiv) Spannungen 398 V und 230 V jeweils 3 mal zur Verfügung. Je nach Art des Anschlusses- in „Dreieck“ oder in „Sternschaltung“- liegen 230 oder 398 V am Verbraucher.

	<p>Zeigerdiagramm zu den Spannungen im Drehstromnetz</p>
$U_{RS} = 2 \cdot U \cdot \sin 60^\circ : R \quad \sqrt{3} = 398 \text{ V}$	<p>Mit dem Effektivwert $U=230 \text{ V}$ folgt die Spannung „zwischen den Phasen“ zu 398 V</p>

Zu den Steckdosen der Hausinstallationen wird jeweils eine Phase und der Mittelpunkt geführt (230 V). In unterschiedlichen Stockwerken oder Räumen können durchaus unterschiedliche Phasen liegen, damit die drei Phase mehr oder wenig gleich belastet sind



Demo-Applet: <http://www.zum.de/dwu/depotan/apem112.htm>

Drehstrommotoren und Generatoren

Aus dem Faradayschen Induktionsgesetz ist bekannt, dass die zeitliche Änderung des Magnetfeldes in einer Leiterschleife einen Strom induziert. Mit Hilfe des Drehstroms gelingt es, mit festen Stator Spulen ein sich im Raum drehendes Magnetfeld zu erzeugen. Wird ein Leiter in dieses Feld gebracht, dann induziert das Drehfeld im Leiter einen Strom, der entgegenwirkt.

Bei gleicher Drehzahl von Drehfeld und Anker wird das Drehmoment verschwinden, weil sich der Leiter relativ zum Feld nicht mehr bewegt (im Leerlauf ohne Reibung). Diese Motoren werden als *Asynchronmotoren* bezeichnet, da diese Motoren mit Schlupf arbeiten. Im Prinzip bleibt das Drehmoment mit zunehmendem Schlupf ziemlich konstant. Wenn der Schlupf sehr klein ist, nimmt das Drehmoment ziemlich linear ab. Der Verlauf der Drehmomentkennlinie kann mit Vorwiderständen oder konstruktiv beeinflusst werden.

Die Anker von Drehstrommotoren werden als *Kurzschlußläufer* bezeichnet, wenn man zum Aufbau des induzierten Magnetfeldes einen kräftigen Stromfluß durch dicke Kupferleitungen braucht. Die Entwicklung ist damit beschäftigt, die Optimierung der Drehmoment Kennlinie zu erlangen.

Der Asynchronmotor besitzt besonders in der Käfigläuferausführung gegenüber der Gleichstrommaschine den Vorteil des wesentlich einfacheren und robusteren konstruktiven Aufbaus. Asynchronmotoren können bis 50 MVA Leistung haben.

Ist der Anker selbst magnetisch (mit einer Erregung), dann folgt er dem Feld mit dessen Drehfrequenz. So wird der *Synchronmotor* gekennzeichnet. Sein Drehmoment fällt sehr stark ab, sobald er außer Takt gerät. Dieses Betriebsverhalten sollte nicht vorkommen.

Drehstrom-Synchrongeneratoren besitzen die grössten Leistungen der elektrischen Maschinen. Als Turbogeneratoren (die angeschlossene Turbine wird vom Dampf getrieben) für Kraftwerke werden zweipolige Generatoren bis 1500 MVA und 20kV Nennspannung gefertigt.

Zu grossen Stückzahlen bringen es Synchronmaschinen wieder als Kleinstmotoren für Uhren in der Feinwerktechnik.

2. Der Transformator

Ein Transformator (kurz: Trafo) wird auch als „ruhende elektrische Maschine“ bezeichnet und besteht mindestens aus einer Spule mit Anzapfung oder aus zwei oder mehreren getrennten Drahtspulen, die sich in ihrem gemeinsamen magnetischen Feld befinden. Praktische Ausführungen haben zwei oder mehr Spulen aus isoliertem Kupferdraht auf einem gemeinsamen Eisen- oder Ferritkern.



Mit Hilfe von Transformatoren lassen sich elektrische Wechselspannungen herauf- oder herunter transformieren, das heißt erhöhen oder verringern, und damit den technischen Erfordernissen des Gebrauchs anpassen. Durch diese Erfindung wurde die Übertragung von elektrischem Strom über weite Strecken mittels Hochspannungsleitungen und damit unser modernes Stromnetz erst möglich.

Transformatoren lassen sich auch zur Erzeugung eines galvanisch getrennten Stromkreises einsetzen (Trenntransformator).



Wenn bei angelegter elektrischer Spannung an der Primärspule kein Strom aus der Sekundärspule des Transformators entnommen wird, wird dies als „Leerlauf“ oder „unbelasteter Betrieb“ bezeichnet.

Im Leerlauf verhält sich die Primärspannung in sehr guter Näherung wie die Windungszahlen.

Dabei sind U_1 und U_2 die Primär- und Sekundärspannung sowie N_1 und N_2 die Primär- und Sekundärwindungszahl.

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

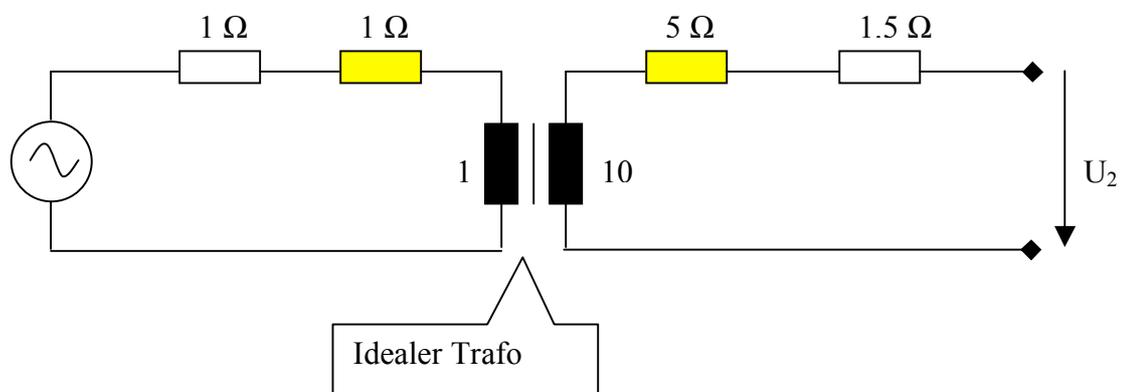
Ist der Transformator sekundärseitig belastet, so bewirkt der Sekundärstrom im Eisen ein zusätzliches magnetisches Wechselfeld. Nach der Lenzschen Regel muss die

durch den Sekundärstrom verursachte Magnetfeldänderung derjenigen, die durch den Primärstrom verursacht wird, entgegengerichtet sein. Die effektive Magnetfeldänderung ist bei Belastung somit in der Primärspule geringer als im unbelasteten Fall - die Flussdichte sinkt etwas.

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

2.1. Die Ersatzschaltung

Gegeben sei ein Drehstromtransformator mit dem Verhältnis 10KV/100 kV. Die Wärmeleistung und die Verluste werden mit diesen Bauteilen dargestellt:



Leerlaufbetrieb:

Die Leerlaufspannung darf direkt mit dem ü-Verhältnis berechnet werden:

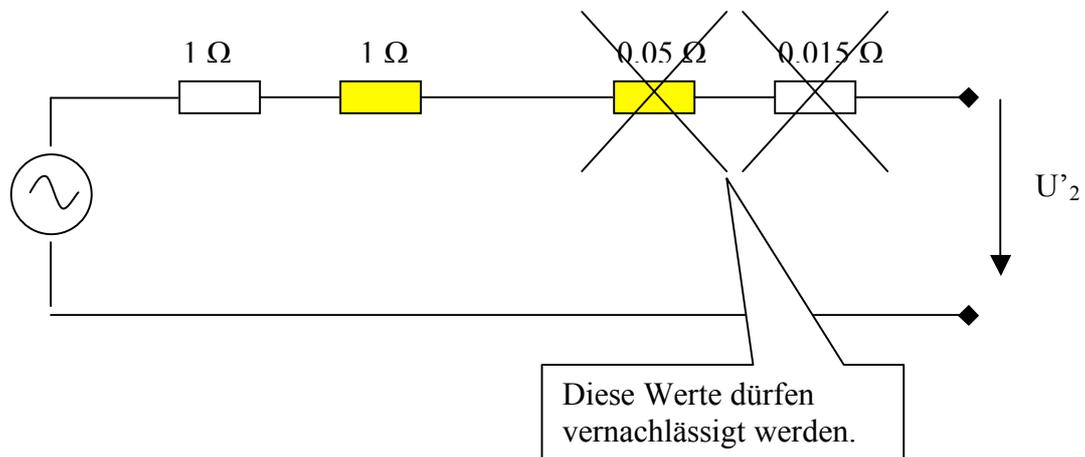
$$U_2 = \frac{N_2}{N_1} U_1 = \frac{10}{1} 10kV = 100kV$$

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

2.2. Vereinfachte Ersatzschaltung (ohne Verluste)

Zur Behandlung des Transformators im Netz ist es üblich, die Schaltung zu vereinfachen. In der Ersatzschaltung erscheint der Trafo **nicht mehr**. Die Spannungen, die Ströme, die Bauteilen sowie die Last müssen mit dem Verhältnis \ddot{u} berücksichtigt werden.



Die Formeln zur Umrechnung der sekundären Werten auf die Primärseite lassen sich über die Bedingung der Energie bestimmen.

$$\begin{aligned}
 U'_2 &= U_2 \cdot \frac{N_1}{N_2} & X'_2 &= X_2 \cdot \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \\
 I'_2 &= I_1 = I_2 \cdot \frac{N_1}{N_2} & R'_2 &= R_2 \cdot \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2
 \end{aligned}$$

3. Synchrongenerator im Inselbetrieb

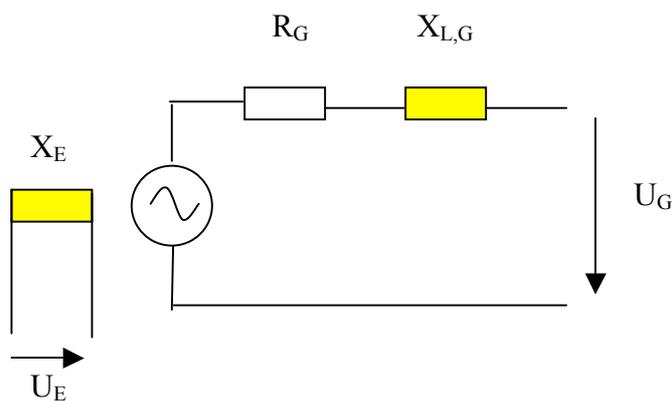
Im Inselbetrieb speist der Generator einen einzelnen fest vorgegebenen Verbraucher.

Das Widerstandsdiagramm ist Grundlage für die Beschreibung des Inselbetriebs. Spannungsdiagramm und Leistungsdiagramm ergeben sich durch die Klemmenstromstärke.

3.1. Einsträngiges Ersatzschema

Ein Drehstromsynchrongenerator ist im Normalfall symmetrisch belastet. Deshalb wird für die Beschreibung des Generators als Spannungsquelle das einsträngige Ersatzschema verwendet.

Die in Nuten des Statorblechpakets eingebaute Statorwicklung besitzt einen Blindwiderstand $X_{L,G}$ und einen Wirkwiderstand R_G .



Polradspannung im Leerlauf

Ist an den Klemmen des laufenden Synchrongenerators kein Verbraucher angeschlossen, so beträgt die Klemmenstromstärke und damit auch der Blindspannungsabfall im Generator null.

Im Leerlauf entspricht die Ausgangsspannung U_G die induzierte Quellenspannung (U_0), die auch Polradspannung genannt wird.

Den Zusammenhang zwischen Polradspannung (U_0) und Erregerstromstärke (I_e) liefert eine bestehende Leerlaufkennlinie. Entsprechend der Magnetisierungskurve für das Statorisen zeigt die Leerlaufkennlinie für niedrige Erregerstromstärken einen linearen Bereich und für hohe Erregerstromstärken Sättigung.

Stromstärke bei Kurzschluss

Die aus den Generatorklemmen fließende Kurzschlussstromstärke (I_K) erweist sich als proportional zur Erregerstromstärke.

3.2. Wechselstromdiagramme im Inselbetrieb

Die Induktivität der Statorwicklungen ist verantwortlich für den induktiven Generator-Blindwiderstand $X_{L,G}$.

Verschiedene, an den Generatorklemmen angeschlossene Verbraucher lassen sich zu einem Gesamtverbraucher zusammenfassen. Dieser wird durch seinen Wirkwiderstand (R) und seinen Blindwiderstand beschrieben.

Wird in einem stationären Betriebszustand die Erregerstromstärke erhöht, so erhöht sich auch die Klemmenstromstärke. Wie aus den Diagrammen ersichtlich, wird dabei im ersten Moment auch eine höhere Wirkleistung an den Verbraucher übertragen.

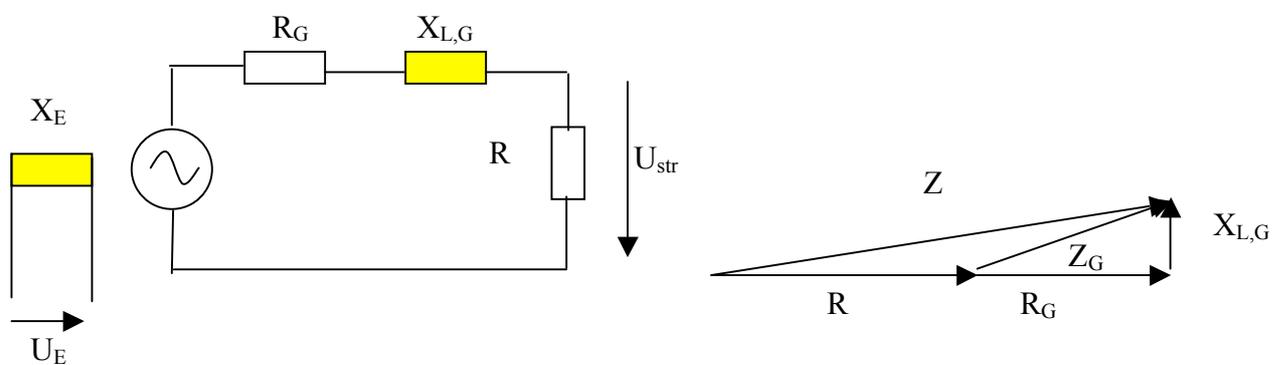
Abgesehen von den Verlusten ist die abgegebene elektrische Wirkleistung so definiert:

$$P = S \cdot \cos\varphi = 3 \cdot U_{str} \cdot I \cdot \cos\varphi$$

$$P \cong 3 \cdot U_{str} \cdot \frac{U_0 \cdot \cos\varphi}{X_{L,G}}$$

Beispiel eines ohmschen Verbrauchers

Ein Generator ($X_{L,G}=3 \text{ Ohm}$, $R=0.5 \text{ Ohm}$) überträgt eine Wirkleistung von 24 MW an einem ohmschen Verbraucher. Die Strangspannung beträgt 8000 V. Welche Spannung muss induziert werden?



$$I = \frac{24 \text{ MW}}{3 \cdot 8000 \text{ V}} = 1000 \text{ A}$$

$$R = \frac{8000 \text{ V}}{1000 \text{ A}} = 8 \Omega$$

$$Z = \sqrt{8.5 \Omega^2 + 3 \Omega^2} = 9 \Omega$$

$$U_0 = 9 \Omega \cdot 1000 \text{ A} = 9000 \text{ V}$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{3 \Omega}{8.5 \Omega}\right) = 19,4^\circ$$

4. Der Synchrongenerator am starren Netz

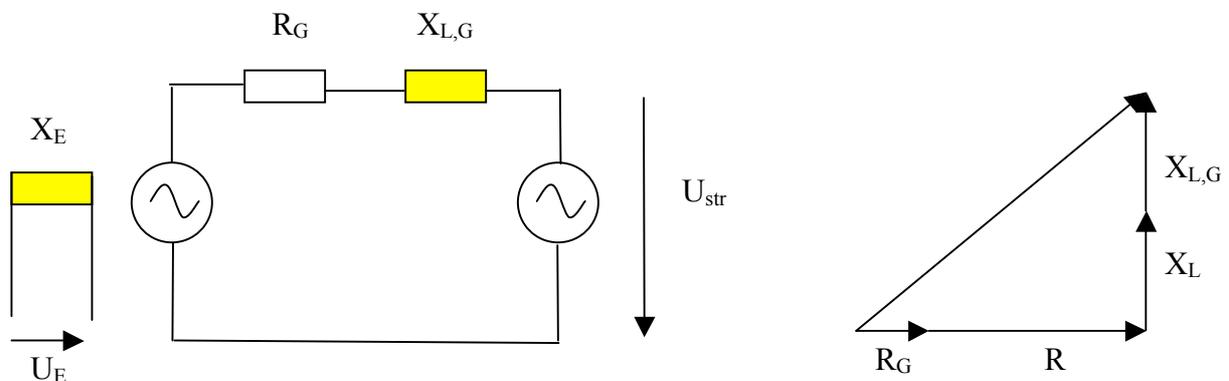
Analog zum Betriebsverhalten im Inselbetrieb kann auch das Betriebsverhalten am starren Netz durch die entsprechenden Wechselstromdiagramme beschrieben werden.

Einsträngiges Ersatzschema am starren Netz

Das Ersatzschaltbild des Generators am starren Netz unterscheidet sich nicht von demjenigen im Inselbetrieb. Unterschiedlich ist hingegen das Betriebsverhalten.

Wir eine Synchronmaschine am starren Netz geschaltet, so sind für sie die Klemmenspannung und Frequenz vorgegeben.

Die mögliche Betriebsarten lassen sich wie üblich über das vereinfachte Ersatzschaltbild darstellen.



Eine leer laufende Synchronmaschine geht in den Generatorbetrieb über, wenn man ihrer Welle ein erhöhtes Drehmoment zuführt.

Bei übererregung gibt die Ständerwicklung induktiven Blindstrom ab und wirkt damit wie ein Kondensator. Bei Untererregung verhält sich die Maschine wie eine Spule.

In der Praxis betreibt man Synchrongenerator immer übererregt, um den Blindstrombedarf des Netzes zu decken, dh. Um Spule und Induktivitäten des Netzes zu kompensieren.

4.1. Das Generatordiagramm

Bei vernachlässigtem ohmschen Widerstand R erhält man aus der Ersatzschaltung eine einfache Gleichung:

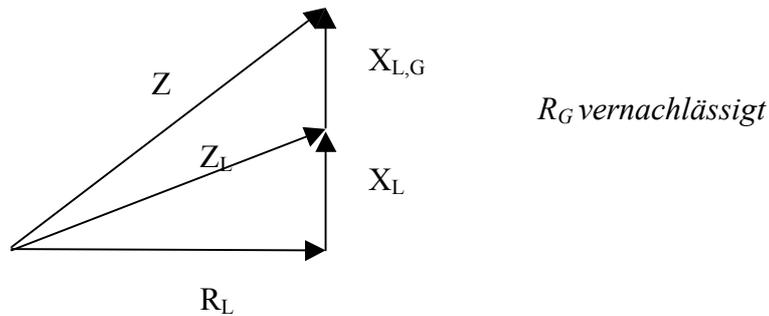
$$U_{str} = U_0 + jX_{L,G} \cdot I$$

Bei einer Übererregung ($U_0 > U_{str}$) kann man sofort erkennen, dass der Generator wie eine Wechselspannungsquelle mit einem Kondensator sich verhält (der Produkt $jX_{L,G} \cdot I$ muss negativ sein).

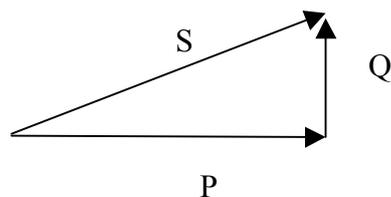
Da der Phasenwinkel im Leistungsdiagramm im Verbundbetrieb dieselbe Lage besitzt wie im gedrehten und umgeklappten Spannungsdiagramm des Generators, können die beiden Diagramme ineinander geschoben werden.

Der Massstab ist so zu wählen (Generatordiagrammkonstante c), dass die Strecken S und $U_{L,G}$ gleich gross sind.

Die Verbraucher:

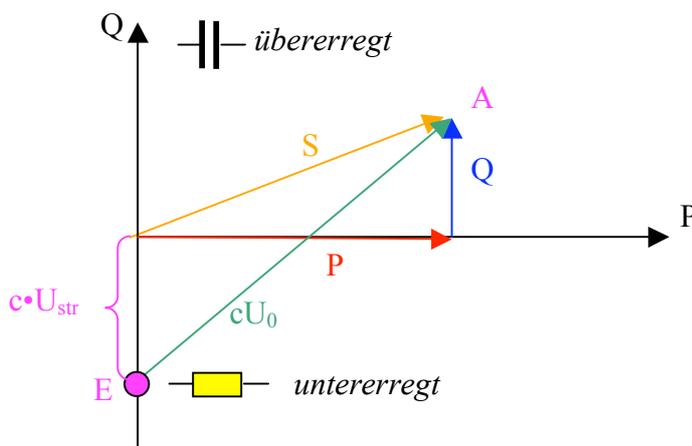


Die Leistungen:



Der Betriebszustand des Generators im Verbundbetrieb kann im Generatordiagramm dargestellt werden.

Das Generatordiagramm zeigt wie Wirkleistung P , eine Blindleistung B und eine Scheinleistung S , wobei der Phasenwinkel und Polradspannung sowie die Strangspannung (U_{Str}) mit dem Lastwinkel zusammenhängen.



Der Betriebspunkt A ist durch zwei Grössen gegeben:

- durch die Leistung P (z.B. Turbine) und
- durch die induzierte Spannung U_0 (vom Erregerstrom I_e abhängig)

Durch Verändern dieser Grössen kann jeder beliebige Betriebszustand eingestellt werden. Im Diagramm ist zu beachten, dass der Punkt E (Erregerpunkt) für jeden beliebigen Betriebszustand immer am selben Ort ist.

4.2. Die Generatordiagrammkonstante

Die Spannungen des Spannungsdiagramms des Generators müssen mit der Generatorkonstanten c multipliziert werden damit die Strecke S und $U_{L,G}$ übereinstimmen:

$$c = 3 \cdot \frac{U_{str}}{X_{L,G}} \quad \text{Generatorkonstante}$$

$$S = c \cdot U_{L,G} \quad \text{Scheinleistung des Generators (mit Erregung)}$$

$$P = c \cdot U_0 \cdot \sin \nu \quad \text{Wirkleistung des Generators (mit Erregung)}$$

$$B = c \cdot U_0 \cdot \cos \nu \quad \text{Blindleistungabgabe des Generators (mit Erregung)}$$

$$B_0 = \frac{3 \cdot U_{str}^2}{X_{L,G}} \quad \text{Blindleistungsaufnahme des Generators (ohne Erregung)}$$

Die Strecke $B_0 = cU_{str}$ (Erregerpunkt) entspricht der Blindleistungsaufnahme, wenn der Generator nicht erregt wird.

Beispiel:

Ein Generator ($X_{L,G} = 2 \Omega$) gibt 200MW elektrische Leistung und 100 Mvar Blindleistung ans Netz ab. Die Strangspannung beträgt 10kV.

Ermitteln Sie den Lastwinkel und die Polradspannung.

$$B_0 = \frac{3 \cdot U_{str}^2}{X_{L,G}} = \frac{3 \cdot 10kV^2}{2\Omega} = 150M \text{ var}$$

$$\tan \nu = \frac{200MW}{150M \text{ var} + 100M \text{ var}}$$

$$\Rightarrow \nu = 38,7$$

$$P = c \cdot U_0 \cdot \sin \nu = 15kA \cdot U_0 \cdot \sin 38,7 = 200MW$$

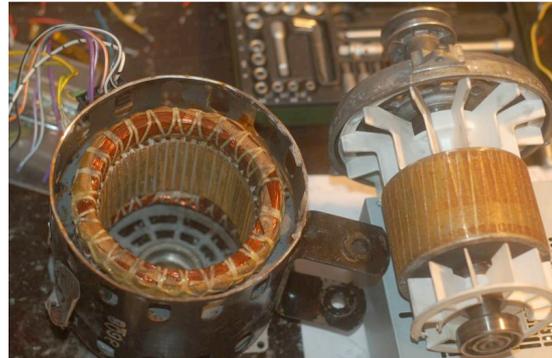
$$\Rightarrow U_0 = 21,3kV$$

5. Drehfeldasynchronmaschine

Der Rotor eines Drehstrom-Asynchronmotors hat eine Wicklung, die im Regelfall kurzgeschlossen ist (Kurzschlussläufer). Diese Wicklung ist entweder als Drahtspulenwicklung oder als Leiterstab-Käfig ausgeführt.

In der Massenfertigung wird das Blechpaket des Rotors häufig mit Leiter-Nuten versehen, die mit Aluminium ausgegossen werden, wobei gleichzeitig Kühllüfter-Lamellen mit eingearbeitet werden.

Insbesondere im Bereich der oberen Leistungsklasse von Motoren sind bei bestimmten Anforderungen Schleifringläufer-Motoren wirtschaftlich und technisch vorteilhaft.



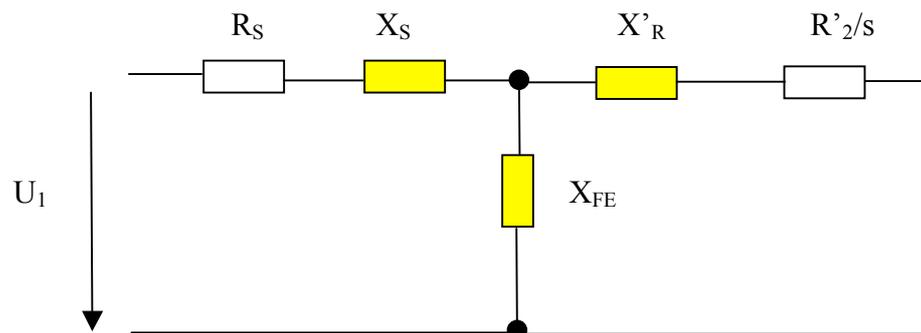
Der Ständer oder Stator besteht aus dem Gehäuse, dem Ständerblechpaket und der darin eingelegten Ständerwicklung, die immer als Mehrphasenwicklung ausgeführt ist. Das Gehäuse muss das Drehmoment gegen das Fundament abstützen. Häufig hat das Gehäuse auch Kühlrippen für den Motor.

Die Anschlüsse der Strangwicklungs-Paare werden meist auf ein Klemmbrett herausgeführt, wo sie üblicherweise mit den Kennbuchstaben U1-U2, V1-V2 und W1-W2 gekennzeichnet sind. An diesem Klemmbrett kann die Betriebs-Schaltung so vorgenommen werden, dass zum einen eine Anpassung an die gegebene Betriebsspannung oder aber eine Anlauf-Schaltung durch eine geeignete Schütz-Schaltung, z. B. die Stern-Dreieck-Schaltung (Y/ Δ), ausgeführt werden kann.

Man kann die Motordrehzahl auch über Frequenzumrichter steuern, indem man die Frequenz erhöht oder erniedrigt. Das ist sinnvoll bei Anlagen, die eine variable Drehzahl benötigen, ohne dass ein verstellbares Getriebe eingesetzt werden muss.

Zum Verständnis der Vorgänge einer Drehzahlregelung ist die Betrachtung des Ersatzschaltbilds der Asynchronmaschine unumgänglich. Das Ersatzschaltbild zeigt eine zur Maschine elektrisch äquivalente Schaltung, wie sie auch der Frequenzumrichter sieht.

5.1. Die Ersatzschaltung



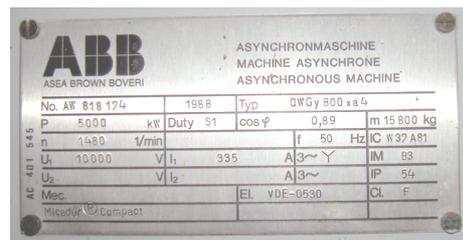
Auf der linken Seite sieht man die Ständerwicklung mit dem Kupferwiderstand R_s und Blindwiderstand der Induktivität X_s . Rechts sieht man den Läufer oder Rotor. Die Induktivität X_r des Rotors ist praktisch zu vernachlässigen, da sie beim Kurzschlussläufer in der Regel aus nur einer einzigen Windung besteht. Der Wirkwiderstand R_r entspricht hingegen direkt der von der Maschine abgegebenen Wirkleistung. Dieser Wert verändert sich in der Praxis mit der Veränderung des Drehmoments bzw. der Belastung der Maschine jedoch wesentlich. Er ist lediglich im Leerlauf der Maschine nahezu unendlich groß.

Im Leerlauf besteht das Ersatzschaltbild des Asynchronmotors im Wesentlichen also aus R_s und X_s , weshalb eine solche Maschine fast nur Blindleistung aufnimmt. Der Gesamtstrom entspricht im Leerlauf deshalb auch in etwa dem Nennstrom und die Maschine wird bei Leerlauf auch annähernd so heiß wie bei Nennbelastung. Mit zunehmender Belastung steigt der Wirkstrom durch R_r . Bei hochmagnetisierten Asynchronmotoren findet mit ansteigendem Drehmoment jedoch zunächst durchaus ein Rückgang des Gesamtstroms statt, welcher erst später mit steigendem Drehmoment dann wieder bis zum Nennstrom ansteigt.

5.2. Beispiel: Asynchronmotor

Ein Asynchronmotor mit einer Nennleistung von 5 MW, Drehstrom von 335 A und eine Klemmenspannung von 10 KV.

Der Leistungsfaktor beträgt 0.89 und die Nenndrehzahl beträgt 1480 U/min.



Formelsammlung:

Der Schlupf :
$$s = 1 - \frac{n}{n_s}$$

Stator Drehfeld :
$$n_s = \frac{f_{Netz}}{PPZ}$$

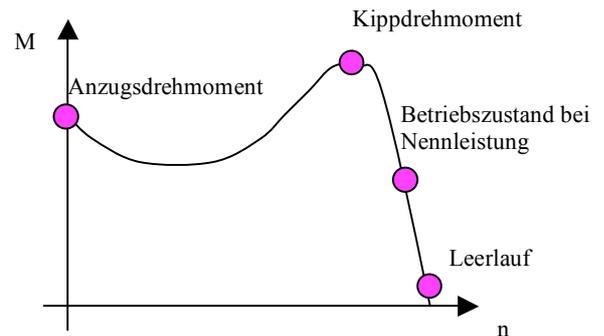
Scheinleistung:
$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$$

El. Leistung:
$$P = S \cdot \cos \varphi$$

El. Blindleistung:
$$B = S \cdot \sin \varphi$$

Mech. Leistung:
$$P_M = \eta_M \cdot P = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot M$$

Drehmoment-Kennlinie:



Beispiel: Leistung und Wirkungsgrad des Motors

Welche Scheinleistung, elektrische Leistung Wirkungsgrad besitzt der Motor?

$$S = \sqrt{3} \cdot 10kV \cdot 335A = 5.8MVA$$

$$\cos \varphi = 0.89 \Rightarrow \varphi = 27.1^\circ$$

$$P = 5.8MVA \cdot \cos \varphi = 5.1MW$$

$$\eta = \frac{5MW}{5.1MW} = 98\%$$

Testfragen

1. Ein Drehstromsynchrongenerator (Sternschaltung, Strangspannung 5000V) speist einen Drehstromverbraucher, der aus drei im Stern geschalteten Wirkwiderständen besteht. Welche Wirkleistung bezieht der Drehstromverbraucher vom Generator, wenn die Stromstärke an den Generatorklemmen 20 A beträgt (Wirkwiderstand der Leitungen=0)?

2. Ein Drehstromverbraucher in Dreieckschaltung hat eine elektrische Scheinleistung von 30kVA. Welchen Wirkwiderstand besitzt ein einzelner Strang, wenn die Strangstromstärke des Drehstromverbrauchers 50 A und der Blindwiderstand eines einzelnen Strangs 6 Ohm beträgt?

3. Bei einer Umschaltung eines Drehstromverbrauchers von Sternschaltung in Dreieckschaltung.

- Bleibt die Klemmenstromstärke unverändert
- Erhöht sich die Klemmenspannung
- Erhöht sich die Strangspannung des Verbrauchers
- Erhöht sich die Klemmenstromstärke des Verbrauchers

4. Ein Drehstromsynchrongenerator speist einen Ohmschen Verbraucher. Nun wird der Wirkwiderstand des Ohmschen Verbrauchers reduziert. Die Erregerstromstärke des Generators bleibt unverändert.

- Dabei vermindert sich die Klemmenstromstärke
- Dabei erhöht sich die Strangspannung
- Dabei vermindert sich die Wirkspannung
- Dabei erhöht sich die Klemmenstromstärke

5. Ein Drehstromsynchronmotor in Sternschaltung besitzt eine Strangspannung von 230V, einen Leistungsfaktor von 0.85 und bezieht eine Klemmenstromstärke von 3 A. Welche elektrische Wirkleistung nimmt der Motor auf?

6. Um welchen Winkel sind die Wechselspannungen zwischen je einem Phasenleiter und der Erde beim Drehstromnetz Phasen verschoben?

7. Ein kleiner Drehstromsynchrongenerator speist einen Ohmschen Verbraucher (Wirkwiderstand 12 Ohm) mit einer Wirkleistung von 1kW. Die induktive Blindspannung im Generator beträgt 230 V. Welchen inneren Blindwiderstand besitzt der Generator?

8. Ein zweipoliger Drehstromsynchrongenerator mit Drehzahlregelung versorgt einen induktiven Verbraucher im Inselbetrieb. Nun wird durch Erhöhen der Erregerstromstärke die Polradspannung um 10% erhöht.

- Dabei ändert sich der Lastwinkel
- Dabei ändert sich der Phasenwinkel
- Dabei erhöht sich die Strangspannung
- Dabei vermindert sich die Blindleistung

9. Ein induktiver Verbraucher besitzt am 50Hz-netz einen Wirkwiderstand von 80 Ohm und einen induktiven Blindwiderstand von 20 Ohm. Welchen Scheinwiderstand besitzt dieser Verbraucher am 100 Hz-Netz?

10. Wie verhalten sich die unten aufgeführten Grössen bei einer Verdoppelung der Frequenz?

	Verdoppelt sich	bleibt gleich	halbiert sich
Der Wirkwiderstand	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Der induktive Blindwiderstand	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Der Kapazitive Blindwiderstand	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

11. Von einer Wechselspannungsquelle (Spannung=20V) mit einstellbarer Frequenz wird durch einen Verbraucher bei einer Frequenz von 50Hz eine Stromstärke von 5A bezogen. Bei der selben Spannung (20V), aber bei einer Frequenz von 60 Hz ist die von der Spannungsquelle bezogene Stromstärke grösser als 5A. Beim Verbraucher handelt es sich um einen:

Ohmschen Verbraucher	<input type="checkbox"/>
Induktiven Verbraucher	<input type="checkbox"/>
Kapazitiven Verbraucher	<input type="checkbox"/>

12. Ein ohmscher Widerstand von 40Ohm, ein induktiver Blindwiderstand von 60Ohm und ein Blindwiderstand von -30 Ohm sind in Serie an eine Spannungsquelle ($f=50\text{Hz}$, Spannung 230V) angeschlossen. Berechnen Sie die Stromstärke

13. Ein Blindwiderstand von -60 Ohm bei 50 Hz wird an eine Wechselspannungsquelle von 230 V, 150 Hz angeschlossen. Berechnen Sie die Stromstärke.

14. Ein übererregter Drehstromsynchrongenerator liefert eine Blindleistung von 300 Mvar ans Netz. Berechnen Sie die elektrische Wirkleistung, wenn der Erregerpunkt bei $B_0=200$ Mvar liegt und der Lastwinkel sei $\vartheta = 45^\circ$ ($\tan 45^\circ = 1$).

15. Wird bei einem im Nennbetriebszustand fahrenden Drehstrom-Asynchronmotor das Bremsmoment reduziert,

sinkt seine Klemmenstromstärke	<input type="checkbox"/>
steigt seine Statorfeldfrequenz	<input type="checkbox"/>
sinkt sein Schlupf	<input type="checkbox"/>

16. Ein Drehstromsynchronmotor besitzt folgende Daten:

Scheinleistung = 10 kVA

Wirkungsgrad = 0.9

Elektrische Wirkleistung = 8 KW

Welche mechanische Leistung gibt der Motor an seiner Welle ab?