

Elektrotechnisches Versuchspraktikum

Für Bachelor-Studierende der Studiengänge Elektrotechnik (ET, 3. Semester), Elektrotechnik my Track (ET my Track, 5. Semester), Allgemeine Ingenieurwissenschaften (AIW 5. Semester), Engineering Science (5. Semester) und Technomathematik (TM 5. Semester)

Versuch Nr.: 6

Elektrische Maschinen

Ort: Gebäude O, Treppenhaus Erdgeschoss

Allgemeine Informationen unter:

<https://www.tuhh.de/mtec/teaching/e-praktikum>

Stand der Versuchsbeschreibung: 12.10.2023

1 Einleitung

Der Drehstrom-Asynchronmotor ist in industriellen Anlagen die am häufigsten vorkommende, rotierende elektrische Maschine. Durch seinen einfachen und robusten Aufbau ist er zum einen wartungsarm und zum anderen unempfindlich gegen Störungen. Um den Asynchronmotor drehzahlvariabel zu betreiben, kann man ihn über einen Frequenzumrichter an das Stromnetz anschließen.

Die Drehstromsynchronmaschine wird überwiegend als Generator eingesetzt. Die Drehzahl der Synchronmaschine und die Frequenz der Spannung sind linear über die Polpaarzahl gekoppelt. Um einen Synchrongenerator an ein Insel- oder Verbundnetz zu betreiben, ist eine Wirk- und Blindleistungsregelung erforderlich. Die Leistungsgrenzen moderner Synchrongeneratoren, die in Kraftwerken zum Einsatz kommen, liegen derzeit in der Größenordnung von 1300 MW Wirkleistung.

In diesem Versuch wird das Betriebsverhalten der Synchron- und der Asynchronmaschine vorgestellt. Anhand von Experimenten sollen ausgewählte Eigenschaften näher untersucht werden. Dabei werden beide Drehstrommaschinen sowohl als Motor als auch als Generator eingesetzt.

Ziel dieses Versuchs ist es, einen Überblick über diese beiden Maschinentypen zu erhalten. Grundlegende physikalische Zusammenhänge werden vermittelt, um ein besseres Verständnis beider Maschinen sicherzustellen. Darüber hinaus ist es Teil des Versuchs, möglichst selbstständig die Maschinen zu bedienen, verschiedene Betriebspunkte anzufahren und Leistungsmessungen vorzunehmen. Übliche Vorgehensweisen wie zum Beispiel das Synchronisieren einer Synchronmaschine an ein Stromnetz oder den Einsatz von externen Rotorwiderständen bei Asynchronmaschinen sollen von den Studierenden selbst ausgeführt werden.

Die Messergebnisse sind aufzunehmen, grafisch darzustellen und zu diskutieren.

2 Grundlagen

Ganz allgemein bestehen elektrische Maschinen immer aus einem feststehenden Teil (Stator) und einem rotierenden Teil (Rotor). Für letzteren gibt es je nach Maschinenart synonyme: Bei Gleichstrommaschinen nennt man den Rotor „Anker“, bei Synchronmaschinen „Polrad“ und bei Asynchronmaschinen „Läufer“.

Synchron- und Asynchronmaschinen sind Drehfeldmaschinen. Bei diesen erzeugt der Stator ein magnetisches Drehfeld, das ein Drehmoment auf den Rotor ausübt.

2.1 Dreiphasensysteme

Spannungssymmetrische Dreiphasensysteme (Drehstromsysteme) sind dadurch charakterisiert, dass zum einen die Phasenverschiebung zwischen den einzelnen Phasen 120° beträgt und zum anderen die Spannungsbeträge aller Phasen gleich groß sind.

Derartige Spannungssysteme können daher in folgender komplexer Schreibweise dargestellt werden:

$$\begin{aligned}
 \text{Phase } L_1: \quad \underline{U}_1 &= U_1 \cdot e^{j0^\circ} \\
 \text{Phase } L_2: \quad \underline{U}_2 &= U_2 \cdot e^{-j120^\circ} \\
 \text{Phase } L_3: \quad \underline{U}_3 &= U_3 \cdot e^{j120^\circ}
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

Die Größe U_n , mit $n = 1, 2, 3$, ist der Spannungsbetrag der einzelnen Phase gegen Erdpotential, die sogenannte „Leiter-Erdspannung“, die in symmetrischen Drehstromsystemen für alle Phasen gleich groß ist. Weiterhin kann in einem Drehstromsystem aber auch die Spannung zwischen zwei Phasen, die sogenannte „verkettete Spannung“ oder „Dreieckspannung“ abgegriffen werden. Für diese Spannung gilt:

$$\begin{aligned}
 \underline{U}_{12} &= \underline{U}_2 - \underline{U}_1 = U_2 \cdot e^{-j120^\circ} - U_1 \cdot e^{j0^\circ} &= \sqrt{3}U_{12} \cdot e^{j30^\circ} \\
 \underline{U}_{31} &= \underline{U}_1 - \underline{U}_3 = U_1 \cdot e^{j0^\circ} - U_3 \cdot e^{-j240^\circ} &= \sqrt{3}U_{31} \cdot e^{-j210^\circ} \\
 \underline{U}_{23} &= \underline{U}_3 - \underline{U}_2 = U_3 \cdot e^{j240^\circ} - U_2 \cdot e^{-j120^\circ} &= \sqrt{3}U_{23} \cdot e^{-j90^\circ}
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

Die verkettete Spannung des symmetrischen Drehstromsystems ist also vom Betrag her um den Faktor $\sqrt{3}$ größer als die Leiter-Erdspannung. Die Phasenverschiebung zwischen den einzelnen Phasenspannungen beträgt 120° , während die

beiden Drehstromsysteme um 30° gegeneinander verschoben sind. Dies ist in Abbildung 2.1 dargestellt.

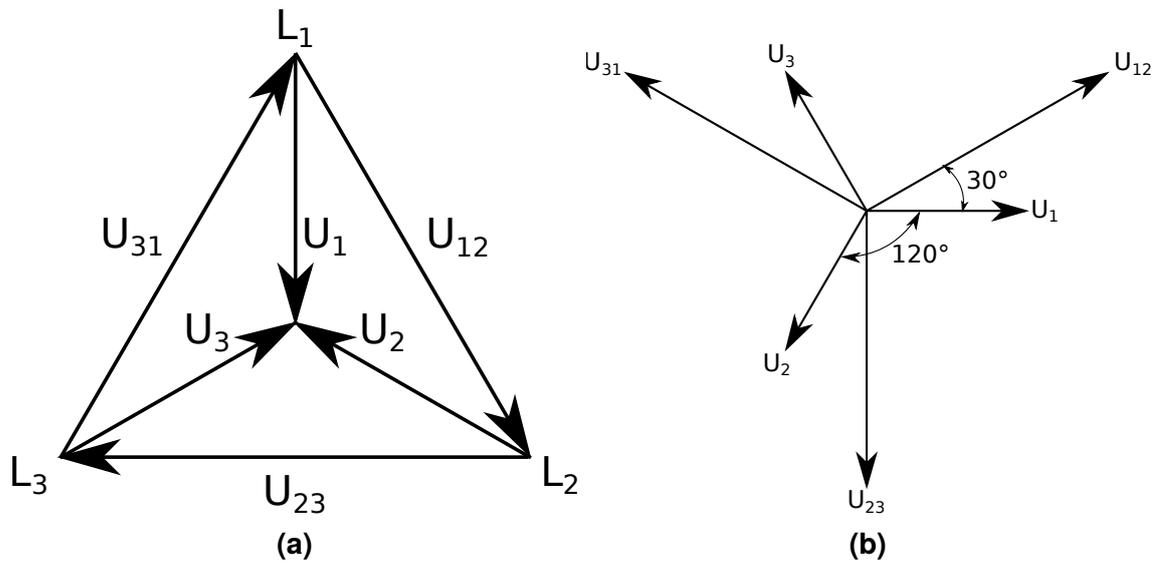


Figure 2.1: Spannungszeiger im Drehstromsystem

In der elektrischen Energieversorgung kommen, abgesehen von einigen Sonderformen wie Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ), praktisch nur spannungssymmetrische Drehstromsysteme für die Energieübertragung zum Einsatz. Im Rahmen dieses Versuchs wird ebenfalls ein dreiphasiges spannungssymmetrisches System vorausgesetzt.

2.1.1 Leistungen und Verbraucher in Drehstromsystemen

Verbraucher können im Drehstromsystem grundsätzlich auf zwei unterschiedliche Arten angeschlossen werden, nämlich in Sternschaltung oder in Dreieckschaltung. Beide Anschlussformen sind für einen Verbraucher in Abbildung 2.2 dargestellt. Bei einem symmetrischen Verbraucher weisen alle drei Impedanzen gemäß den Abbildungen 2.2 den gleich Wert auf. Für einen symmetrischen Verbraucher ergeben sich keine nennenswerten Unterschiede in beiden Anschlussarten, es kann von "außen" nicht einmal festgestellt werden, ob der Verbraucher im Stern oder Dreieck geschaltet ist. Die Summe aller drei Phasenströme ist in diesem Falle Null, weshalb der Neutralleiter der Sternschaltung stromlos bleibt und entfallen kann (Hochspannungsnetze werden in guter Näherung symmetrisch betrieben, so dass kein vierter Leiter benötigt wird).

2.1.2 Verbraucher in Sternschaltung

Für einen Verbraucher in Sternschaltung nach Abbildung 2.2a gilt mit der Verbraucherimpedanz Z_λ und dem Lastwinkel φ_L :

$$\text{Phasenstrom:} \quad \underline{I}_i = \frac{\underline{U}_i}{\underline{Z}_\lambda} \quad \text{mit } i = 1, 2, 3 \quad (2.3)$$

$$\text{Scheinleistung:} \quad \underline{S} = \underline{U}_1 \cdot \underline{I}_1^* + \underline{U}_2 \cdot \underline{I}_2^* + \underline{U}_3 \cdot \underline{I}_3^* = 3 \cdot U_\lambda \cdot I \cdot e^{j\varphi_L} \quad (2.4)$$

$$\text{Wirkleistung:} \quad P = \text{Re}\{\underline{S}\} = 3 \cdot U_\lambda \cdot I \cdot \cos(\varphi_L) \quad (2.5)$$

$$\text{Blindleistung:} \quad Q = \text{Im}\{\underline{S}\} = 3 \cdot U_\lambda \cdot I \cdot \sin(\varphi_L) \quad (2.6)$$

2.1.3 Verbraucher in Dreieckschaltung

Für einen symmetrischen Verbraucher in Dreieckschaltung gemäß Abbildung 2.2b gilt mit der Verbraucherimpedanz Z_Δ und dem Lastwinkel φ_L , dass die Ströme I_{12} , I_{23} und I_{31} in den Verbraucherzweigen vom Betrag gleich groß sind. Der Betrag dieser Dreieckströme sei I_Δ . Aus der Beziehung:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_{12} - \underline{I}_{31} \quad (2.7)$$

ergibt sich dann, dass der Dreieckstrom I_Δ um $\sqrt{3}$ kleiner als der Phasenstrom I_i ist. Mit diesen Überlegungen lassen sich die Leistungen des Verbrauchers errechnen zu:

$$\begin{aligned} \text{Scheinleistung:} \quad \underline{S} &= \underline{U}_{12} \cdot \underline{I}_{12}^* + \underline{U}_{23} \cdot \underline{I}_{23}^* + \underline{U}_{31} \cdot \underline{I}_{31}^* \\ &= \sqrt{3} \cdot U_\Delta \cdot I \cdot e^{j\varphi_L} = 3 \cdot U_\lambda \cdot I \cdot e^{j\varphi_L} \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$\text{Wirkleistung:} \quad P = \sqrt{3} \cdot U_\Delta \cdot I \cdot \cos(\varphi_L) = 3 \cdot U_\lambda \cdot I \cdot \cos(\varphi_L) \quad (2.9)$$

$$\text{Blindleistung:} \quad Q = \sqrt{3} \cdot U_\Delta \cdot I \cdot \sin(\varphi_L) = 3 \cdot U_\lambda \cdot I \cdot \sin(\varphi_L) \quad (2.10)$$

Für den symmetrischen Betrieb gilt demnach ganz allgemein:

- Die Leistungsbestimmung aus den Phasengrößen ist unabhängig von der Schaltungsart der Verbraucher
- An den Verbraucherelementen liegt bei Dreieckschaltung die um den Faktor $\sqrt{3}$ größere verkettete Spannung an

- Dagegen ist der Strom durch die Verbraucherelemente um den Faktor $\sqrt{3}$ kleiner als bei der entsprechenden Sternschaltung mit gleicher Leistung

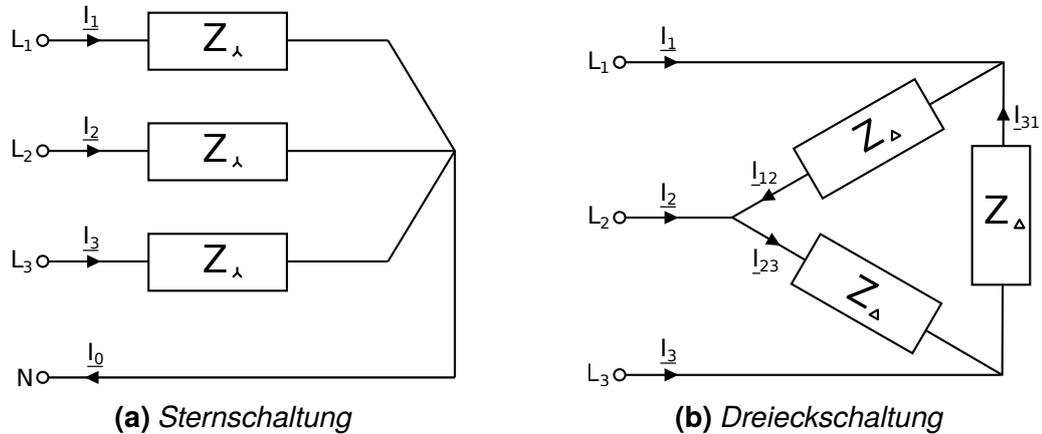


Figure 2.2: Anschlussarten eines Verbrauchers im Dreiphasensystem

2.1.4 Einphasige Ersatzdarstellung symmetrischer Dreiphasensysteme

Bei symmetrischem Betrieb eines Dreiphasensystems genügen die Größen einer Phase zur vollständigen Beschreibung des Systemzustandes. Dementsprechend kann ein symmetrisches Drehstromsystem durch eine einphasige Ersatzschaltung dargestellt werden. Diese Ersatzschaltung wird beschrieben durch die Leiter-Erdspannung U_λ , den Phasenstrom I sowie die Impedanzen einer Phase gegen Erde. Die verkettete Spannung tritt in der einphasigen Ersatzdarstellung nicht mehr auf und in Dreieckschaltung angeschlossene Verbraucher sind in eine äquivalente Sternschaltung (mittels Dreieck-Stern-Umwandlung) umzurechnen.

Zu beachten ist außerdem, dass die Leistung der einphasigen Ersatzschaltung nur $\frac{1}{3}$ der dreiphasigen Leistung beträgt, so dass Leistungsangaben entsprechend umgerechnet werden müssen.

2.1.5 Wirkleistungsmessung in symmetrischen Drehstromsystemen

Es genügt, die Leistung einer Phase zu messen, da das Netz symmetrisch betrieben wird. Besitzt das System einen Nullleiter, so erfolgt die Messung wie in

Abbildung 2.3a gezeigt. In diesem Fall ergibt sich die gemessene Wirkleistung des Verbrauchers zu:

$$P_{\text{mes}} = U_{\lambda} \cdot I_w \quad \text{mit } I_w \text{ als Wirkstrom der gemessenen Phase} \quad (2.11)$$

und damit die dreiphasige Wirkleistung zu:

$$P_{\text{ges}} = 3 \cdot P_{\text{mes}} = 3 \cdot U_{\lambda} \cdot I_w \quad (2.12)$$

Besitzt das System keinen Nullleiter, gestaltet sich die Messung schwieriger. Entweder kann über einen sogenannten "Sternpunktbildner", welcher einen sehr hochohmigen Verbraucher in Sternschaltung darstellt, ein künstlicher Sternpunkt geschaffen werden, gegen den wiederum die Leiter-Erdspannung abgegriffen werden kann. Alternativ kann eine Messung nach Abbildung 2.3b, der sogenannte "Aron-Schaltung", mit zwei Wattmetern durchgeführt werden. Hier ergibt sich:

$$\begin{aligned} P_{1\text{mes}} &= \text{Re}\{\underline{U}_{31} \cdot \underline{I}_1^*\} = U_{\Delta} \cdot I \cdot \cos(-210^{\circ} + \varphi_L) \\ P_{2\text{mes}} &= \text{Re}\{\underline{U}_{23} \cdot \underline{I}_2^*\} = U_{\Delta} \cdot I \cdot \cos(30^{\circ} + \varphi_L) \end{aligned} \quad (2.13)$$

Dabei sei φ_L der Phasenwinkel der Verbraucherimpedanz. Die dreiphasige Leistung des Verbrauchers bestimmt sich damit zu:

$$P_{\text{ges}} = P_{2\text{mes}} - P_{1\text{mes}} = 3 \cdot U_{\lambda} \cdot I \cdot \cos(\varphi_L) = 3 \cdot U_{\lambda} \cdot I_w \quad (2.14)$$

Zu beachten ist, dass diese Schaltung auch bei unsymmetrischen Verbrauchern angewendet werden kann, sofern kein Null-Leiter vorhanden ist.

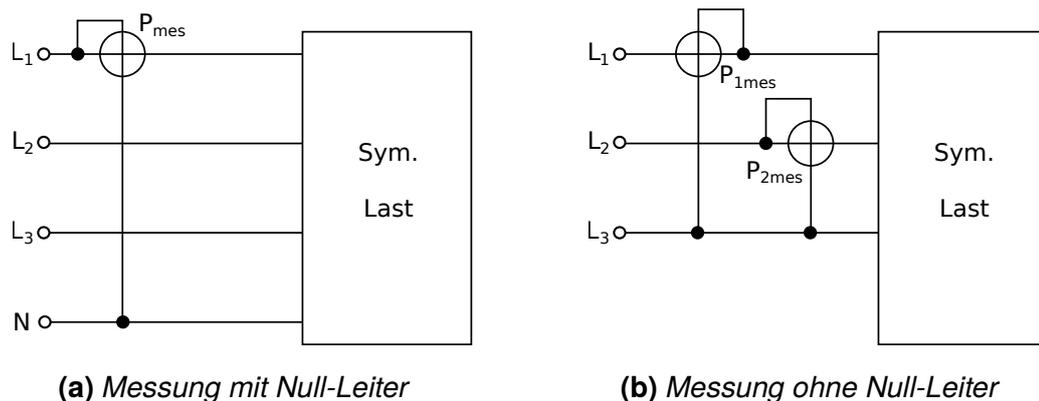


Figure 2.3: Wirkleistungsmessung bei einem symmetrischen Drehstromverbraucher

2.1.6 Blindleistungsmessung in symmetrischen Drehstromsystemen

Für die Messung der Blindleistung ist es unerheblich, ob der Null-Leiter vorhanden ist oder nicht. Es wird hier die Tatsache ausgenutzt, dass jeweils eine verkettete Spannung um 90° gemäß Abbildung 2.1b phasenverschoben zu einer Phasenspannung ist, so dass bei der Schaltung des Wattmeters nach Abbildung 2.4 gerade die Blindleistung in Phase 1 gemessen wird. Es ergibt sich:

$$\operatorname{Re}\{\underline{U}_{23} \cdot \underline{I}_1^*\} = U_\Delta \cdot I \cdot \cos(\varphi_L - 90^\circ) = \sqrt{3} \cdot U_\lambda \cdot I \cdot \sin(\varphi_L) = Q_{\text{mes}} \quad (2.15)$$

und somit die dreiphasige Blindleistung:

$$Q_{\text{ges}} = \sqrt{3} \cdot Q_{\text{mes}} = 3 \cdot U_\lambda \cdot I \cdot \sin(\varphi_L) \quad (2.16)$$

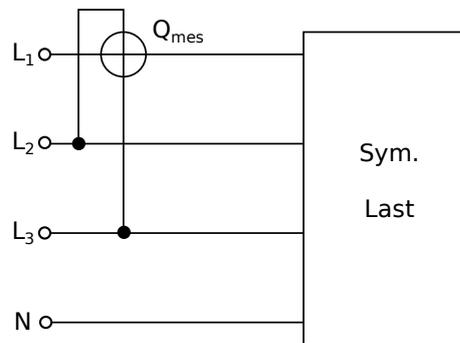


Figure 2.4: Blindleistungsmessung bei einem symmetrischen Drehstromverbraucher

2.2 Drehfeldtheorie

Zur Erzeugung eines magnetischen Drehfeldes werden drei gleichartige Spulen, die sogenannten Stränge verwendet, deren Achsen entsprechend Abbildung 2.5 in einer Ebene liegen und um 120° räumlich gegeneinander verdreht sind.

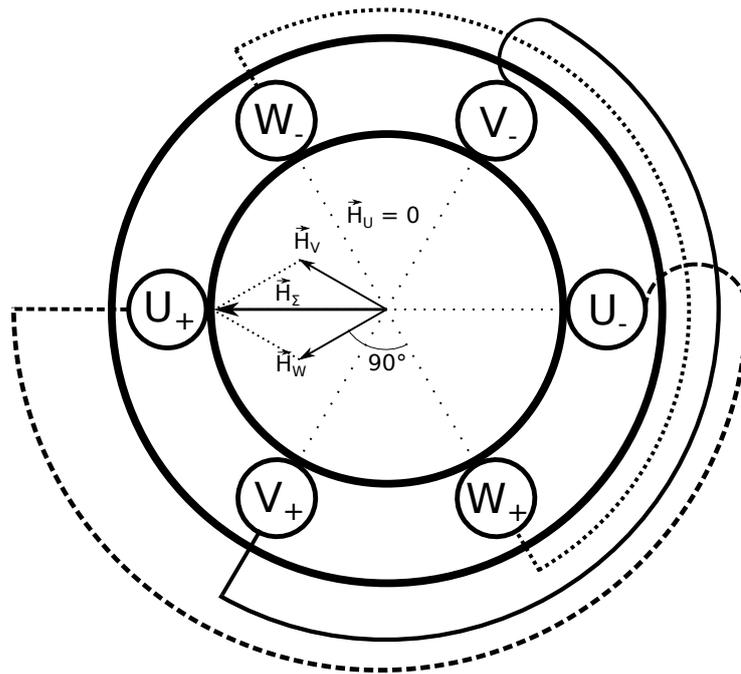


Figure 2.5: Magnetfeldbildung in einem Stator zum Zeitpunkt $t=0$

Die drei Spulen werden von den Strömen i_U , i_V und i_W durchflossen und erzeugen im Mittelpunkt des Sternes die drei magnetischen Feldstärken \vec{H}_U , \vec{H}_V , und \vec{H}_W . Die Gesamtfeldstärke \vec{H} ist die vektorielle Summe:

$$\vec{H} = \vec{H}_U + \vec{H}_V + \vec{H}_W \quad (2.17)$$

Die Größe der magnetischen Feldstärken ist zu den Strömen proportional:

$$\begin{aligned} H_U &= C \cdot i_u & \text{mit } i_u &= I \cdot \cos(\omega t) \\ H_V &= C \cdot i_v & \text{mit } i_v &= I \cdot \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ H_W &= C \cdot i_w & \text{mit } i_w &= I \cdot \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (2.18)$$

Die Konstante C ist von den geometrischen Abmessungen und von den Windungszahlen der Spulen abhängig. Den Feldstärkevektor \vec{H} kann man durch Vorgabe der Ströme i_U , i_V und i_W in jede Richtung drehen. Eine Rotation von \vec{H} mit konstanter Winkelgeschwindigkeit bei konstantem Betrag ergibt sich, wenn die

drei Ströme Sinusfunktionen der Zeit sind, die gegeneinander um eine $\frac{1}{3}$ Periode ($\hat{=} 120^\circ = \frac{2\pi}{3}$) verschoben sind.

Dies folgt aus den Additionstheoremen der Winkelfunktionen, wenn man die Komponenten in einem xy-Koordinatensystem entsprechend Abbildung 2.6 aufträgt und die Komponente des Summenvektors bestimmt.

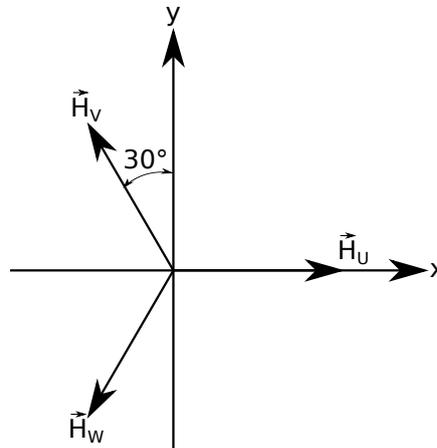


Figure 2.6: Zerlegung der Feldstärkevektoren in kartesischen Koordinaten

Die geometrische Addition der Feldanteile aller drei Spulen ergibt:

$$\begin{aligned} H_x &= H_U + H_V \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) + H_W \cdot \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) = H_U - \frac{1}{2} \cdot H_V - \frac{1}{2} \cdot H_W \\ H_y &= H_V \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) + H_W \cdot \sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot H_V - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot H_W \end{aligned} \quad (2.19)$$

Werden die Formeln (2.18) in die Gleichungen (2.19) eingesetzt ergibt sich nach wenigen Umformungen:

$$H_x = \frac{3}{2} \cdot C \cdot I \cdot \cos(\omega t) \quad (2.20)$$

$$H_y = \frac{3}{2} \cdot C \cdot I \cdot \sin(\omega t) \quad (2.21)$$

Lässt man ωt von 0 bis 2π laufen, beschreibt der Vektor $\vec{H} = H_x \cdot \vec{e}_x + H_y \cdot \vec{e}_y$ also einen Kreis. Das bedeutet, dass dieser Vektor mit der Winkelgeschwindigkeit ω in mathematisch positiver Richtung (gegen den Uhrzeigersinn) rotiert. Seine Norm ist dabei konstant $\frac{3}{2} \cdot C \cdot I$. Dies lässt sich grafisch durch vektorielle Addition, wie in Abbildung 2.5 verdeutlichen, darstellen. Die Drehrichtung kehrt sich um, wenn

zwei der drei Stränge vertauscht werden, sich die Phasenfolge somit von U-V-W auf U-W-V ändert.

Zur Führung des magnetischen Flusses, zur mechanischen Festlegung der Spulen und um die magnetischen Zugspannungen aus dem Luftspalt von innen fernzuhalten, sind die Spulen in Nuten eingebettet. Zur Vermeidung von Wirbelströmen innerhalb des Eisens ist der Stator aus einzelnen, durch Oxid- oder Lackschichten voneinander isolierten Blechen aufgebaut. Die natürliche Oxidschicht allein reicht in vielen Anwendungsfällen schon aus.

Werden die Spulen im Rotor so angeordnet, dass sie nur um 60° versetzt sind, ist es möglich die doppelte Spulenanzahl auf dem Umfang unterzubringen. Die Anzahl der Wiederholungen der Spulen auf dem Umfang wird als Polpaarzahl p bezeichnet. Hierbei bedeutet eine Polpaarzahl $p = 1$ dass die Spulen U-V-W nur einmal im Umfang enthalten und eine Polpaarzahl von $p = 2$ dass die Spulen U-V-W zweimal im Umfang enthalten sind. Durch die Erhöhung der Polpaarzahl p wird auch die Anzahl der magnetisch ausgebildeten Nord- und Südpole, welche immer paarweise (daher Polpaare) auftreten, erhöht, was in einer Reduzierung der Drehgeschwindigkeit des magnetischen Summenvektors resultiert.

In Abbildung 2.7 ist ein Schnitt des Stators einer Maschine mit der Polpaarzahl $p = 2$ dargestellt. Die Spulen bestehen aus Stäben oder Drahtbündeln, die axial an der Innenseite des Stators angeordnet sind. Diese werden an der Vorder- und Rückseite des Stators radial miteinander verbunden.

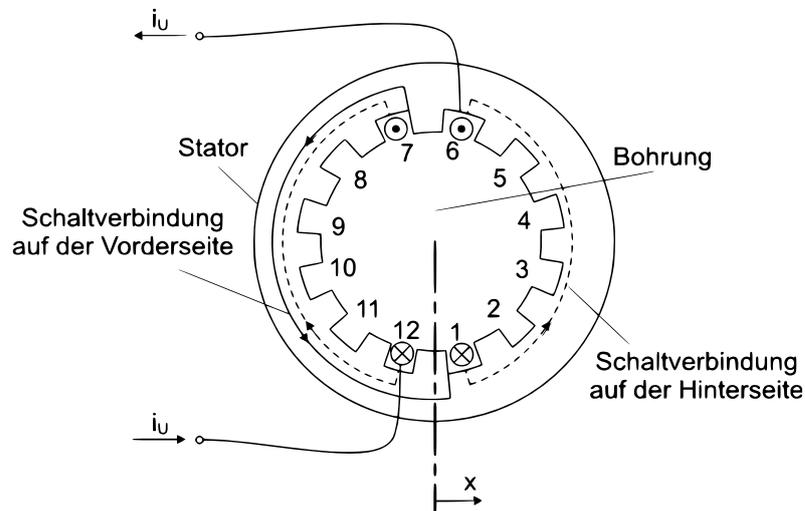


Figure 2.7: Querschnitt durch den Stator einer Drehfeldmaschine

2.3 Aufbau der Synchronmaschine

Synchronmaschinen sind elektromechanische Energiewandler, die sowohl im Motor- als auch im Generatorbetrieb eingesetzt werden können. Das Betriebsverhalten im Motor- und Generatorbetrieb unterscheidet sich, abgesehen von der Wirkleistungsflussrichtung, nicht, so dass hier nur der praktisch bedeutsamere Generatorbetrieb beschrieben ist.

Wesentliches Merkmal der Synchronmaschine ist die belastungsunabhängige Drehzahl im stationären Betrieb, was bedeutet, dass Stator- und Rotordrehfeld synchron laufen. Die Drehzahl n ist dabei mit der Polpaarzahl p der Maschine und Netzfrequenz f gegeben zu:

$$n = \frac{f}{p} \quad (2.22)$$

Man unterscheidet zum einen zwei- und vierpolige Maschinen, sogenannte Turbogeneratoren, deren Erreger-Gleichstromwicklung praktisch über den gesamten Rotorumfang verteilt ist, so dass der Rotor einen nahezu homogenen Zylinder bildet. Derartige Maschinen sind mit einer Drehzahl von 3.000 U/min resp. 1.500 U/min (bezogen auf 50 Hz) geeignet als Generatoren für Dampf- und Gasturbinen. Zum anderen sind die hochpoligen Maschinen zu erwähnen (z.B. 16-, 24-, 48-polige Maschinen), sogenannte Schenkelpolmaschinen, deren Erregerwicklung in ausgeprägten Polen untergebracht ist, so dass hier der Rotor keinen homogenen Zylinder bildet. Derartige langsam laufende Maschinen werden vorwiegend als Wasserkraftgeneratoren eingesetzt. Aufgrund des inhomogenen Rotorzylinders der Schenkelpolmaschinen ist die mathematische Behandlung dieses Maschinentyps ungleich schwieriger, so dass im Rahmen dieses Versuchs nur die einfacher zu behandelnden Turbogeneratoren berücksichtigt werden.

Das Polrad-Magnetfeld kann entweder durch Dauermagnete oder durch Gleichstromwicklungen auf dem Rotor erzeugt werden. Bei letzteren wird im Rotor durch den Gleichstrom, den man als Erregerstrom oder kurz Erregung bezeichnet, ein magnetisches Gleichfeld erzeugt, das dem Magnetfeld eines Dauermagneten entspricht. Die erforderliche Erregerleistung ist klein, da nur die ohmschen Verluste in der Erregerwicklung gedeckt werden müssen. Mithilfe des Erregerstroms kann die Generatorklemmenspannung an den Statorspulen eingestellt werden.

2.3.1 Ersatzschaltbild des Synchrongenerators

Der symmetrisch betriebene Synchrongenerator kann in einem einphasigen Ersatzschaltbild als eine komplexe Spannungsquelle \underline{E} mit dem Innenwiderstand $R + jx_d$ dargestellt werden. Der ohmsche Anteil R des Innenwiderstandes kann dabei für die meisten stationären Rechnungen vernachlässigt werden, so dass sich das in Abbildung 2.8 gezeigte Ersatzschaltbild ergibt.

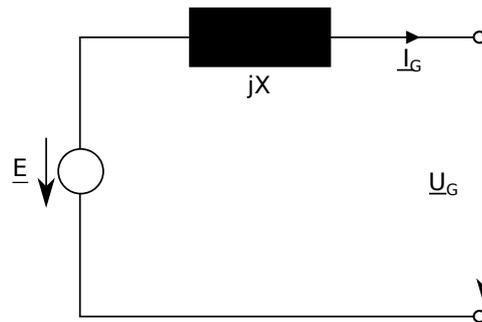


Figure 2.8: Ersatzschaltbild des symmetrisch betriebenen Synchrongenerators

Die Spannungsquelle E , auch Polradspannung genannt, entsteht durch Induktion des Rotorfeldes im Stator. Bezieht man nun die Spannungsgleichungen der Maschine auf die Klemmenspannung \underline{U}_G des Generators, so erhält man unter Berücksichtigung des Polradwinkels δ , welcher den Phasenwinkel zwischen \underline{E} und \underline{U}_G beschreibt, sowie des Lastwinkels φ , welcher den Phasenwinkel zwischen \underline{U}_G und \underline{I}_G darstellt, die Beziehung:

$$E \cdot e^{j\delta} = U_G + j \cdot x_d \cdot I_G \cdot e^{j\varphi} \quad (2.23)$$

Daraus ergeben sich die Leistungsgleichungen:

$$P_G = \frac{3 \cdot U_G \cdot E_G}{x_d} \cdot \sin(\delta) \quad (2.24)$$

$$Q_G = \frac{3 \cdot U_G \cdot E_G}{x_d} \cdot \cos(\delta) - \frac{3 \cdot U_G^2}{x_d}$$

Die Polradspannung \underline{E} ist dabei abhängig vom Erregerstrom i_r , während der Polradwinkel ϑ durch das mechanische Moment der Antriebsmaschine beeinflusst werden kann. Für einen Arbeitspunkt im übererregtem Generatorbetrieb zeigt Abbildung 2.9 das Zeigerdiagramm der Maschine zu dem Ersatzschaltbild nach Abbildung 2.8.

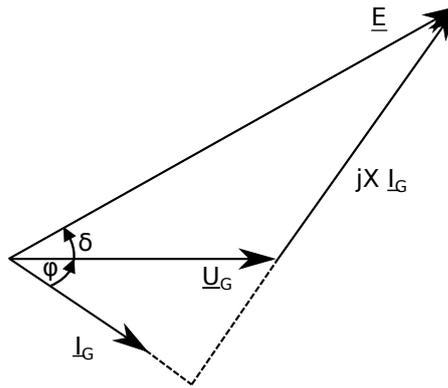


Figure 2.9: Zeigerdiagramm eines Synchrongenerators im stationären Betrieb

2.3.2 Leistung des Synchrongenerators

Die Leistungsgleichungen für Turbogeneratoren (Vollpolläufer) sind gegeben durch:

$$\begin{aligned}
 P_G &= P_K \cdot \sin(\delta) \\
 Q_G &= P_K \cdot \cos(\delta) - \frac{3 \cdot U_G^2}{x_d}
 \end{aligned}
 \quad \text{mit } P_K = \frac{3 \cdot U_G \cdot U_E}{x_d} \quad (2.25)$$

Dabei ist P_K die maximal abgebbare Wirkleistung des Generators, die auch Kippleistung genannt wird. Da der Polradwinkel δ durch das mechanische Antriebsmoment beeinflusst wird, kann die Wirkleistungsabgabe der Maschine in Abhängigkeit von der Antriebsleistung als Funktion von δ dargestellt werden. Dies ist ersichtlich für den Turbogenerator eine Sinus-Funktion, wobei für $\delta < 0$ die Wirkleistungsabgabe negativ wird. Das entspricht demnach einer Wirkleistungsaufnahme, so dass die Maschine als Motor betrieben wird. Das Leistungsverhalten ist aber im Motor- und Generatorbetrieb, wie anfangs bereits erwähnt, identisch. Abbildung 2.10 zeigt die Wirkleistungsabgabe der Synchronmaschine als Funktion des Polradwinkels δ .

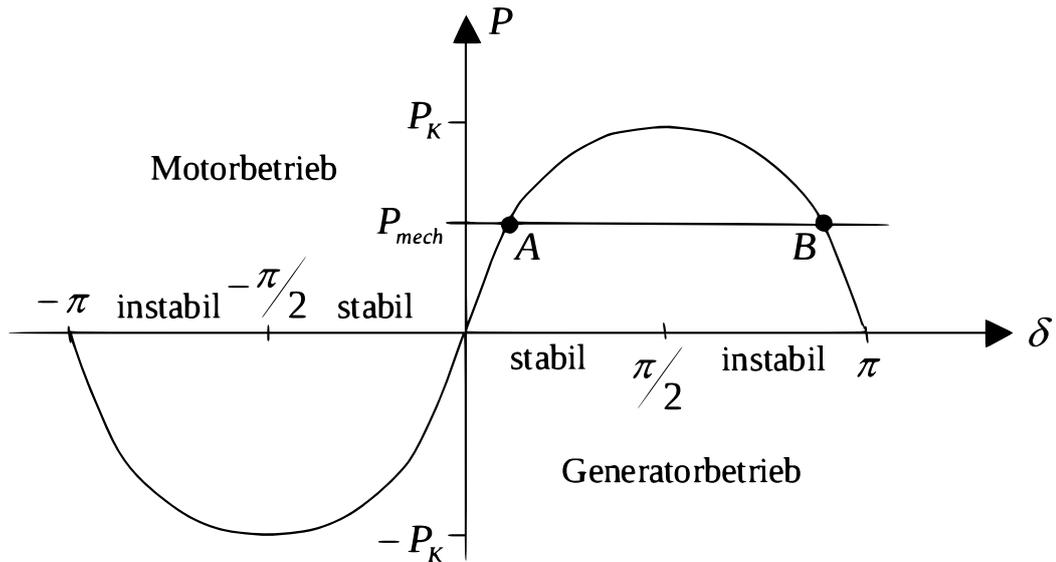


Figure 2.10: Wirkleistungskennlinie für einen Vollpolläufer

Im stationären Betriebszustand sind mechanische und elektrische Leistung im Gleichgewicht. Es ergeben sich die zwei potentielle Arbeitspunkte A und B wie in Abbildung 2.10 dargestellt.

Für den Arbeitspunkt A gilt:

Wird δ durch eine externe Störung (z.B. Laständerung) größer, steigt die elektrische Wirkleistung P_G , so dass die Maschine gebremst wird und wieder in den Arbeitspunkt A läuft. Dies gilt sinngemäß für eine Verkleinerung von δ .

Für den Arbeitspunkt B gilt:

Bei Zunahme von δ durch eine externe Störung nimmt die elektrische Leistung ab, so dass die Maschine beschleunigt wird und aus dem Arbeitspunkt B herausläuft. Die Maschine wird instabil und fällt außer Tritt, d.h. Rotor und Statorfeld laufen nicht mehr synchron.

Gleiche Betrachtungen gelten für den Motorbetrieb. Damit ist die Synchronmaschine am starren Netz statisch stabil für $-\frac{\pi}{2} < \delta < \frac{\pi}{2}$.

2.3.3 Betriebsdiagramm eines Synchrongenerators

Bei konstanter Antriebsleistung ($\delta = konst$) und starrer Netzspannung ($U_G = konst$) hängt die Blindleistung nur vom Erregerstrom i_r ab. Durch entsprechende Wahl des Erregerstromes kann die Blindleistung Q_G daher negativ, null oder positiv werden. D.h. durch Steuerung des Erregerstromes kann die Maschine Blindleistung abgeben oder aufnehmen, was bei der Spannungsregelung im elektrischen Netz aber auch im Phasenschieberbetrieb älterer Kompensationsanlagen ausgenutzt wird. In diesem Zusammenhang sind zwei Begriffe definiert, die unabhängig vom Wirkleistungsarbeitspunkt die Blindleistungsverhältnisse der Maschine beschreiben:

übererregter Betrieb

$Q_G > 0$; die Maschine gibt Blindleistung an das Netz ab. Sie wirkt für das Netz wie eine Kapazität.

untererregter Betrieb

$Q_G < 0$; die Maschine nimmt Blindleistung aus dem Netz auf. Sie wirkt für das Netz wie eine Induktivität.

Die Belastbarkeit einer Synchronmaschine wird durch ihre Baugröße und die Konstruktion der Maschine bestimmt (Kühlung der Rotor- und Statorwicklung, Eisensättigung, Auslegung der Erregung etc.). Daher sind vorgegebene technische Grenzwerte in jedem Fall einzuhalten.

Die Forderung, dass der Synchrongenerator nicht mehr als seine maximale Scheinleistung S_{\max} , für die die Maschine gebaut ist, abgeben darf, wird im Betriebsdiagramm durch einen Halbkreis dargestellt. S_{\max} wird durch die maximal zulässige Erwärmung der Statorwicklung vorgegeben.

Die minimal und maximal abgebbare (Generator-)Wirkleistung $P_{G,\min}$ und $P_{G,\max}$ wird durch die Turbine begrenzt. Bei Wasserkraftgeneratoren ist $P_{G,\min} = 0$, $P_{G,\max}$ wird durch die maximale Durchflussmenge des Wassers bestimmt. Bei thermischen Kraftwerken werden diese Grenzwerte durch den minimalen und maximalen Dampfstrom durch die Turbine festgelegt. Sie sind als horizontale Geraden in Abbildung 2.11 dargestellt.

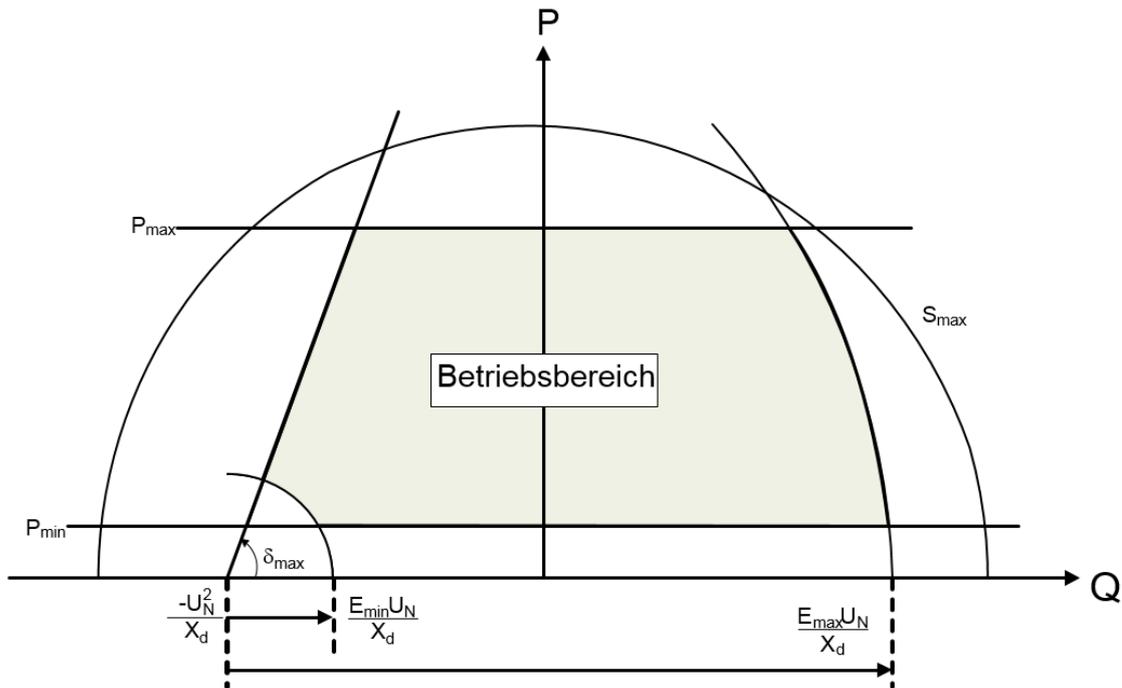


Figure 2.11: Betriebsdiagramm der Synchronmaschine

Aus den Leistungsgleichungen 2.25 folgt:

$$P_G = Q_G \cdot \tan(\delta) + \frac{U_N^2}{x_d} \cdot \tan(\delta) \quad (2.26)$$

Für $P_G = 0$ folgt daher für Punkt A, der die Blindleistung darstellt, die im untererregten Betrieb maximal aufgenommen werden kann:

$$Q_G = -\frac{U_N^2}{x_d} \quad (2.27)$$

Wird ein Generator ohne Abgabe von Wirkleistung betrieben befindet er sich im Phasenschieberbetrieb. Zur Erzeugung von Blindleistung muss von der Turbine keine Arbeit geleistet werden.

Die meisten der sich am Netz befindlichen Generatoren verfügen über eine Spannungsregelung, die die minimale Polradspannung E_{\min} vorgibt. Die maximale Polradspannung E_{\max} ist durch die maximal zulässige Erwärmung der Statorwicklung vorgegeben. Diese Grenzwerte lassen sich im Betriebsdiagramm durch zwei Kreise mit dem Radius R gemäß Formel XX darstellen, wobei für die Polradspannung die jeweiligen Extremwerte eingesetzt werden.

$$R = \frac{E \cdot U_N}{x_d} \quad (2.28)$$

Eine weitere Grenze des Betriebsdiagramms ist die Stabilitätsgrenze im untererregten Stabilitätsbereich. Der theoretische Wert dieser Grenze liegt bei $\delta_{\max} = 90^\circ$. Im Allgemeinen wird jedoch $\delta_{\max} = 70^\circ$ gewählt. Somit entsteht eine Gerade im Punkt A mit der Steigung δ_{\max} . Das vollständige Betriebsdiagramm und der daraus resultierende Betriebsbereich sind in Abbildung 2.11 dargestellt.

2.3.4 Netzsynchonisierung

Soll ein Synchrongenerator Wirk- und Blindleistung in ein Netz einspeisen, ist es zunächst notwendig, den Generator bei geöffnetem Leistungsschalter zu dem Netz zu synchronisieren. Um den Leistungsschalter gefahrlos schließen zu können, müssen folgende Kriterien erfüllt sein:

- Phasenfolge:
Generatordrehrichtung = Netzdrehrichtung
(ENTSO-E rechtsdrehend)
- Frequenz:
Generatorfrequenz = Netzfrequenz
(50Hz)
- Spannung:
Generatorklemmenspannung = Netzspannung
(400V [± 10 V], $Q_G = 0$)
- Phasenwinkel:
Generatorphasenwinkel = Netzphasenwinkel
(0° [$\pm 3^\circ$], $P_G = 0$)

Wird der Leistungsschalter ohne vorherige Synchronisation geschlossen, kann dies zu schweren Schäden an Mensch und Maschine führen.

2.4 Aufbau der Asynchronmaschine

Wie die Synchronmaschine, ist auch die Asynchronmaschine eine Drehfeldmaschine. Der Stator einer Asynchronmaschine zeigt keine grundsätzlichen Abweichungen zur Synchronmaschine. Anders als bei der Synchronmaschine erfolgt

die Magnetisierung des Rotors bei den Asynchronmaschinen (engl. Induction Machines) durch Induktionswirkung vom Stator. In einer im Läufer angebrachten, kurzgeschlossenen Drehstromwicklung werden durch das umlaufende Statorfeld Spannungen induziert, welche in den kurzgeschlossenen Wicklungen einen Stromfluss zur Folge haben. Im Zusammenwirken dieser Ströme mit dem Stator-Drehfeld entsteht das Drehmoment der Asynchronmaschine.

Aus diesem Grund kann die Asynchronmaschine nur ein Drehmoment entwickeln, wenn sie sich nicht mit synchroner Drehzahl dreht, da bei synchroner Drehzahl keine Spannungen in den Läufer induziert werden kann.

Eine weitere Ausführung der Asynchronmaschine ist der sog. Schleifringläufer. Hierbei sind die Läuferwicklungen nicht direkt auf dem Läufer kurzgeschlossen, sondern über Schleifringe von außen kontaktierbar. Dies ermöglicht das Einbringen von Anschlusswiderständen zwischen den Strängen, die Einfluss auf die Drehzahl-Drehmomenten Charakteristik nehmen. Eine mögliche Anwendung ist die gezielte Verringerung des Anlaufstromes $I_{err,an}$ durch das Einbringen von Widerständen. Mit dem Ziel, die mechanische Belastung zu reduzieren, ist die Reduktion des Anlaufmomentes die Folge. Ein Nebeneffekt ist die Verringerung der Nenndrehzahl durch die zuvor erwähnte Verringerung des Nennerregerstromes $I_{err,n}$ im gesamten Betriebsbereich.

Die Wicklungen im Rotor können auch durch je einen massiven Metallstab pro Nut ersetzt werden. Diese Metallstäbe werden dann an den Stirnseiten mit ebenfalls massiven Kurzschlussringen kontaktiert, so dass sie praktisch alle parallel geschaltet sind. Diese Anordnung wird als Käfigläufer bezeichnet. Für das Betriebsverhalten ergibt dies keine Unterschiede zu den kurzgeschlossenen Drehstromwicklung. Die Drehmoment-Charakteristik kann jetzt nur noch durch gezielten Einsatz von Stromverdrängung beeinflusst werden. Dabei wird ausgenutzt, dass bei hohen Frequenzen der Strom nur an der Oberfläche des Rotors fließt (entsprechend dem Skineneffekt). Da die Frequenz im Läufer im regulären Arbeitspunkt sehr niedrig ist, können die Käfigstäbe so geformt werden, dass die beim Anlaufen aus dem Stillstand im Rotor auftretende Netzfrequenz f schon eine „hohe Frequenz“ ist. Durch geschickte Wahl von Stabmaterial und -form kann so erreicht werden, dass der im Anlauf wirksame Läuferwiderstand wesentlich größer ist, als der im Nennpunkt wirksame Läuferwiderstand.

Zur Beschreibung der Asynchronmaschine werden neben den elektrischen Größen auch Drehzahl- und Frequenzgrößen benötigt, da der Rotor je nach Belastung verschieden schnell dreht. Im Allgemeinen werden die Luftspaltdrehzahl n_0 und die Rotordrehzahl n , sowie die Netzfrequenz f_{Netz} und die Rotorstromfrequenz f_{Rotor} verwendet. Die Luftspaltdrehzahl hängt mit der Netzfrequenz und der Polpaarzahl p

zusammen. Sie ist mit der Synchrondrehzahl $n_0 = \frac{f_{\text{Netz}}}{p}$ identisch. Die Rotordrehzahl n ist die mechanische Drehzahl des Rotors. Es bleibt die Rotorstromfrequenz. Im Rotor wird, da er nicht synchron mit dem Luftspaltfeld umläuft eine Spannung induziert, die in den kurzgeschlossenen Rotorwicklungen einen Strom zur Folge hat. Die Frequenz dieses Wechselstromes ergibt sich aus der Differenz zwischen Luftspalt- und Rotordrehzahl:

$$f_{\text{Rotor}} = p \cdot (n_0 - n) \quad (2.29)$$

Auf dieser Basis wird zur Beschreibung der Abweichung von der Synchrondrehzahl der Schlupf eingeführt. Dieser ist definiert als:

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} = \frac{f_{\text{Rotor}}}{f_{\text{Netz}}} \quad (2.30)$$

Dabei ist f_{Rotor} die Rotorstromfrequenz und nicht die mechanische Drehzahl des Rotors. Es gilt:

$$\begin{aligned} s = 1 \rightarrow n = 0 & \rightarrow f_{\text{Rotor}} = f_{\text{Netz}} \rightarrow \text{der Motor steht} \\ s = 0 \rightarrow n = n_0 & \rightarrow f_{\text{Rotor}} = 0 \rightarrow \text{Synchronismus} \end{aligned} \quad (2.31)$$

Bei Speisung der Ständerwicklung mit drei phasensymmetrischen Spannungen der Frequenz f_{Netz} entsteht damit in der Läuferwicklung bei Drehung des Läufers mit der Drehzahl n eine Spannung mit der Frequenz $f_2 = s \cdot f_1$. Aus dem Induktionsgesetz $u = \frac{d\phi}{dt}$ folgt, dass die induzierte Spannung zu dem Schlupf proportional ist, da der Fluss durch die Spannung im Stator vorgegeben ist. Der erläuterte Sachverhalt kann durch folgendes einphasiges Ersatzschaltbild beschrieben werden:

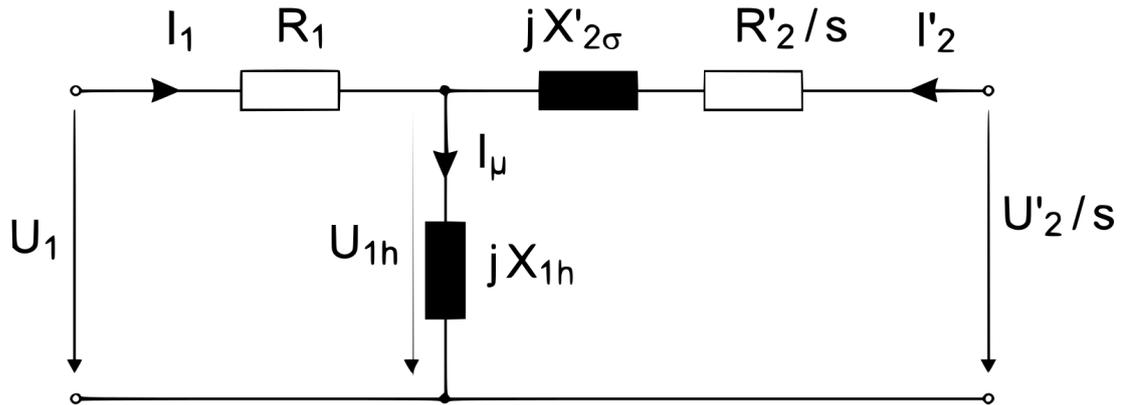


Figure 2.12: Ersatzschaltbild für den Asynchronmotor im stationären Betrieb mit dem Schlupf s

Die gestrichenen Größen U'_2, I'_2, R'_2 und $X'_{2\sigma}$ sind in diesem Fall die mit dem Übertragungsfaktor \ddot{u} auf die Primärseite bezogene Größen. Der Übertragungsfaktor \ddot{u} berechnet sich aus dem Wicklungsverhältnis der Spulen von Primär- und Sekundärseite, also den Stator- und den Rotorwicklungen. Die Umrechnung der bezogenen Größen erfolgt gemäß den Formeln:

$$\begin{aligned} I'_{-2} &= \frac{1}{\ddot{u}} \cdot I_2 \\ R'_2 &= \ddot{u}^2 \cdot R_2 \\ X'_{2\sigma} &= \ddot{u}^2 \cdot X_{2\sigma} \end{aligned} \quad (2.32)$$

$X_{2\sigma}$ ist die gesamte Streuinduktivität, die hier willkürlich dem Läufer zugerechnet ist. Die primäre Spannung U_1 setzt sich aus der vom Luftspaltdrehfeld induzierten inneren Spannung U_{1h} sowie dem Spannungsabfall $R_1 \cdot I_1$ am ohmschen Widerstand der Ständerwicklung zusammen. Durch die transformatorische Kopplung der im Bild vertikal eingezeichneten Reaktanz kommt der Umstand zum Ausdruck, dass das Luftspaltfeld, das in der Primärwicklung die Spannung U_{1h} induziert, von den Durchflutungen der Ständer- und der Läuferwicklungen gemeinsam erregt wird. Während die magnetische Wirkung der Ströme I_1 und I_μ in diesen Transformatorwicklungen unabhängig von der Drehzahl des Läufers bzw. des Schlupfes s ist, ist die im Sekundärteil induzierte Spannung nur das s -fache der primären Luftspaltspannung. Im Sekundärkreis hat der von $s \cdot U_{1h}$ verursachte Strom I_2 den ohmschen Widerstand R_2 sowie einen der Läuferfrequenz proportionalen Streublindwiderstand, also $s \cdot X_{2\sigma}$ zu überwinden. Als Gleichung ausgedrückt heißt das:

$$I_2 = \frac{s \cdot U_{1h}}{R_2 + j s \cdot X_{2\sigma}} = \frac{U_{1h}}{\frac{R_2}{s} + j X_{2\sigma}} \quad (2.33)$$

Durch die Division von Zähler und Nenner durch den Schlupf s wurde erreicht, dass als Ursache von I_2 dieselbe Spannung U_{1h} in Erscheinung tritt, die auch auf der Primärseite des Transformators wirksam ist. Es können daher die beiden gekoppelten Wicklungen auch durch eine einzige ersetzt werden und es ergibt sich das Ersatzschaltbild nach folgender Abbildung:

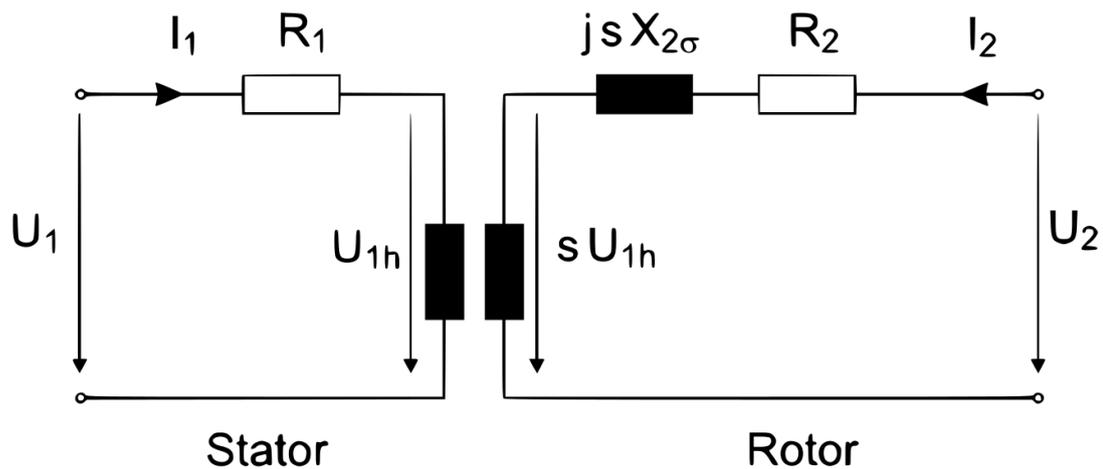


Figure 2.13: Modifiziertes Ersatzschaltbild für den Asynchronmotor im stationären Betrieb

Im Falle des Kurzschlussläufers ist $\frac{U'_2}{s} = 0$.

Ohne Nachweis seien hier noch die Beziehungen angegeben, mit denen eine Asynchronmaschine in ihrem grundsätzlichen Betriebsverhalten beschrieben werden kann:

$P_{Cu1} = 3 \cdot R_1 \cdot I_1^2$	Ständer-Kupferverluste	(2.34)
$P_\delta = P_{\text{Netz}} - P_{Cu1}$	Luftspaltleistung	(2.35)
$P_{\text{mech}} = (1 - s) \cdot P_\delta$	mechanisch abgegebene Leistung	(2.36)
$P_2 = s \cdot P_\delta$	Verlustleistung im Rotor	(2.37)
$\underline{U}_1 = (R_1 + jX_{1\sigma}) \cdot \underline{I}_1 + jX_{1h} \cdot \underline{I}_\mu$	Statorspannung	(2.38)
$\left(\frac{R'_2}{s} + jX'_{2\sigma}\right) \cdot \underline{I}_2 + jX_{1h} \cdot \underline{I}_m = 0$	Rotorspannung	(2.39)
$M = 3 \cdot p \cdot \frac{U_1 \cdot I_1 \cdot \cos(\varphi)}{\omega_0}$	Drehmoment	(2.40)

Für den vom Ständer aus dem Netz aufgenommenen Strom lässt sich die Abhängigkeit vom Schlupf als Ortskurve in der komplexen Ebene angeben. Für das Ersatzschaltbild Abbildung 2.13 mit $R_1 = 0$ ist dies ein Kreis, der nach einem der Entdecker dieser Beziehung „Heyland-Kreis“ genannt wird.

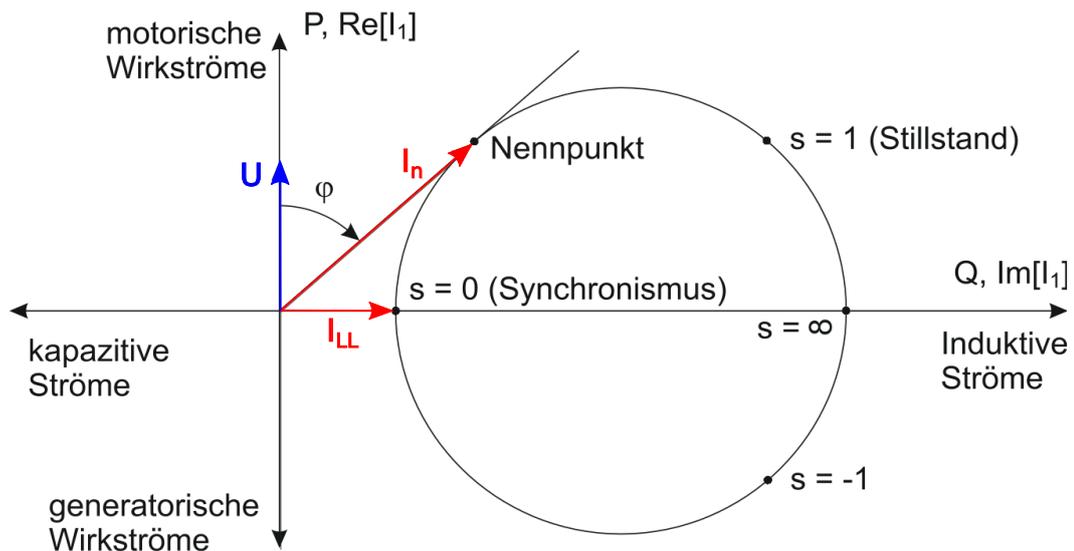


Figure 2.14: Stromortskurve der Asynchronmaschine (Heyland-Kreis)

Dazu ergibt sich die folgende Drehzahl-Strom- bzw. Drehzahl-Drehmoment-Charakteristik:

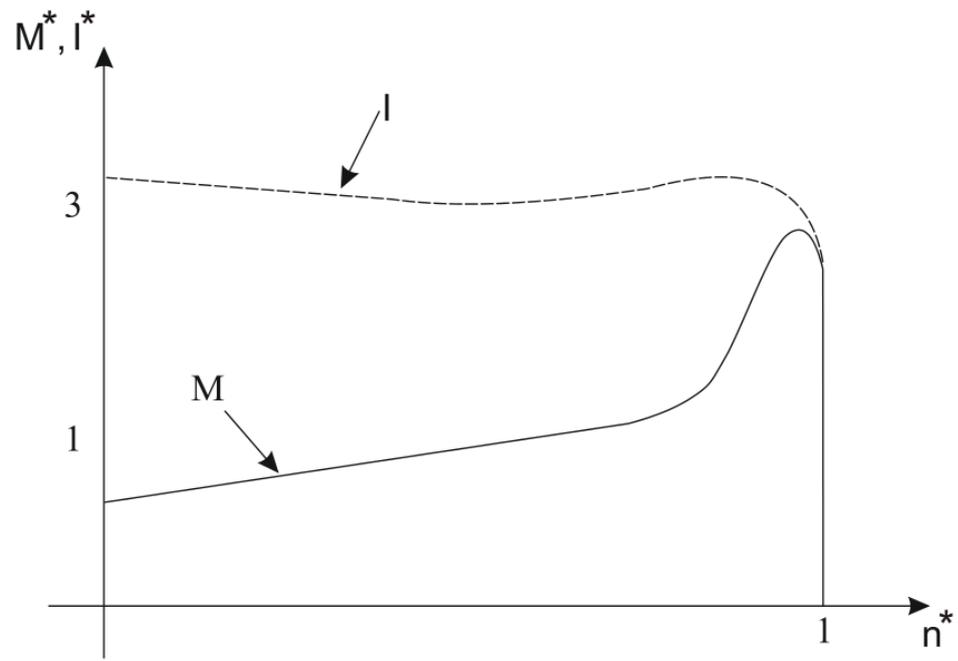


Figure 2.15: Drehzahl-Strom- und Drehzahl-Drehmoment-Charakteristik

3 Versuchsaufbau und Versuchsbeschreibung

Im Folgenden werden die Versuchsstände für den Synchron- und den Asynchronmaschinenatz vorgestellt.

Beide Versuchsstände besitzen neben der betrachteten Drehfeldmaschine ebenfalls eine Gleichstrommaschine, die zum Einstellen unterschiedlicher Betriebspunkte dient. Insgesamt sind somit vier Maschinen vorzufinden.

3.1 Versuchsstand Synchronmaschine

Das Verhalten der Synchronmaschine wird mittels des in Abbildung 3.1 gezeigten Aufbaus untersucht.



Figure 3.1: *Versuchsstand Synchronmaschine*

Die Aufgaben an diesem Versuch gelten der Spannungs- und Leistungsuntersuchung der Maschine an unterschiedlichen Betriebspunkten.

Zunächst wird die Maschine im Generatorbetrieb betrieben, indem sie ohne Verbindung der Statorwicklungen zum Stromnetz durch die Gleichstrommaschine angetrieben wird. Es gilt hier, die Errgeung der Synchronmaschine zu variieren und Generatorspannungen zu messen.

In einem zweiten Schritt wird die Maschine als Motor betrieben. Hierzu muss das Drehfeld der Maschine mit dem Stromnetz synchronisiert und verbunden werden. Auch hier gilt es über das Variieren der Erregung unterschiedliche Betriebspunkte zu simulieren. Weiterhin wird die Gleichstrommaschine zur Simulation von Lastmomenten zugeschaltet.

Der Versuchsstand besteht aus den folgenden Komponenten

1. Synchronmaschine
2. Schalttafel für die Synchronmaschine
3. Polradwinkelmessvorrichtung
4. Gleichstrommaschine
5. Schalttafel für die Gleichstrommaschine
6. Stroboskoplampe
7. Stromwandler
8. Amperemeter
9. Voltmeter
10. 4x Wattmeter

3.1.1 Schalttafel der Gleichstrommaschine

Die Schalttafel der Gleichstrommaschine dient der Bedienung der Gleichstrommaschine und verfügt über den Hauptschalter der Anlage. Die Tafel beinhaltet weiterhin:

- Schalter *An*: Verbindet die Gleichstrommaschine mit dem Netz
- Schalter *Aus*: Trennt die Gleichstrommaschine vom Netz
- Drehregler *Soll-Drehzahl*: Aktiviert die Drehzahlregelung der Gleichstrommaschine. Je höher der Wert, desto höher die Drehzahl

- Drehregler *Drehmomentbegrenzung*: Begrenzt das abzugebende Drehmoment der Maschine. Der Wert 0 bedeutet, dass die Maschine kein Drehmoment erzeugen darf. Der maximale Wert hebt die Drehmomentbegrenzung auf und erlaubt der Maschine mit maximaler Leistung nach der *Soll-Drehzahl* zu streben. Für den Betrieb gilt es, Betriebspunkte (hier: Soll-Drehzahlen) langsam anzufahren. Dies ist durch langsames Aufdrehen der Soll-Drehzahl ohne Momentenbegrenzung, oder durch Momentenbegrenzung bei abrupter Änderung der Soll-Drehzahl gewährleistet.
!!ACHTUNG!! Der Regelkreis kann die Drehgeschwindigkeit nicht nur erhöhen, sondern auch aktiv abbremsen.
- Kippschalter *Drehrichtung*: Der Schalter kehrt die Drehrichtung der Gleichstrommaschine um. Auf *vorwärts* geschaltet, dreht sie die Synchronmaschine in Netzrichtung.
!!Achtung!! Um Maschinen- und Personenschäden zu vermeiden, ist eine Umkehr der Drehrichtung nur im Leerlauf gestattet!
- Display *Ist-Drehzahl*: Zeigt die aktuelle Drehzahl der Gleichstrommaschine (folglich auch der Synchronmaschine) in Umdrehungen pro Minute
- Anzeigen *Ankerspannung & Ankerstrom*: Zeigt die aktuelle Ankererregung
- Anzeigen *Feldspannung & Feldstrom*: Zeigt die aktuelle Statorerregung

3.1.2 Schalttafel der Synchronmaschine

Die Schalttafel der Synchronmaschine wird verwendet, um die Synchronmaschine zu bedienen, die Messgeräte zu verbinden und aktuelle Betriebsdaten abzulesen. Die einzelnen Elemente sind wie folgt zu deuten:

- Schalter *Gleichrichter Erregung Ein*: Schaltet einen Erregerstrom auf das Polrads
- Schalter *Gleichrichter Erregung Aus*: Unterbricht die Gleichstromerregung des Polrads
- Drehregler *Erregerstrom*: Variiert die Erregerspannung und damit den Erregerstrom des Polrads
- Anzeige *Erregerstrom*: Zeigt den aktuellen Erregerstrom des Polrads
- Schalter *Koppelschütz Netz-Generator Ein*: Zeitgleich mit *Freigabe* zum Anschluss des Stators ans Netz betätigen

- Schalter *Koppelschütz Netz-Generator Freigabe*: Zeitgleich mit *Ein* zum Anschluss des Stators ans Netz betätigen
- Anzeigen *Erregerspannung & Erregerstrom*: Aktuelle Erregung des Polrads
- Anzeige *Netzspannung* Anzeige der Netzspannung
- Anzeigen *Generatorspannung & Generatorstrom*: Betriebsdaten, sofern in Generatorbetrieb
- Anzeige *Synchronoscope*: Beziehung von Frequenzen und Phasengleichheit zwischen Statorfeld und Stromnetz

3.1.3 Messgeräte des Synchronmaschinenprüfstandes

Zur Vermessung der Maschine stehen neben den Anzeigen auf den Schalttafeln, herkömmlichen Volt-, Ampere- und Wattmeter zur Verfügung. Alle Messgeräte besitzen mehrere Anschlüsse. Neben einem Ausgang sind unterschiedliche Eingänge für unterschiedliche Größenordnungen von Spannung und Stromstärken vorhanden.

Um Schäden an den Messinstrumenten zu vermeiden, berücksichtigen Sie unter allen Umständen sowohl die Art des Anschlusses (Spannung, Stromstärke) als auch die Größenordnung, in der sich Ihre Messgrößen befinden!

Da sich auf den Instrumenten maximal zwei Skalen befinden, ist in Abhängigkeit der gewählten Anschlüsse ein Skalierungsfaktor zu ermitteln und bei der Auswertung zu verwenden.

Leistungsmessgeräte

Die Leistungsmessung bei den Versuchen zur Synchronmaschine erfolgt mit handelsüblichen Wattmetern (Kreuzspul-Messinstrumente), die über einen Strom- und einen Spannungspfad verfügen. Beide Pfade sind gegeneinander isoliert, jedoch darf eine gerätetypische Isolierspannung nicht überschritten werden. In diesen Messinstrumenten wird das Produkt $P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$ auf elektro-mechanischem Weg gebildet. Durch die Massenträgheit des Zeigers wird der arithmetische Mittelwert angezeigt

Dabei ist φ der Winkel zwischen dem Strom durch den Strompfad und der Spannung am Spannungspfad, wobei es zunächst keine Rolle spielt, worauf die beiden Größen bezogen werden.

In einem Einphasen-System gibt es nur den Leiterstrom und die Leiterspannung, daher ist die Zuordnung eindeutig: die Anzeige ist die Wirkleistung. Das Vorzeichen der Leistung kann durch Umpolen einer der beiden Messgrößen geändert werden.

Im Dreiphasensystem hingegen gibt es sechs Spannungen (drei Dreiecksspannungen und drei Sternspannungen, siehe Abbildung 2.1a) und drei Leiterströme. Das Messergebnis hängt also stark davon ab, welche Spannung und welcher Strom gemessen werden.

Jedes symmetrische Drehstromsystem (alle intakten Dreiphasenmaschinen dürfen als symmetrisch betrachtet werden) kann man sich zusammengesetzt aus drei gleichen, unabhängigen Einphasensystemen zwischen jeweils einem Außenleiter und dem Mittelpunktsteiter denken. Dann wird klar, dass sich als Wirkleistung je Phase der Wert $P_{\text{Phase}} = U_{L,i} \cdot I_{L,i} \cdot \cos \varphi$ ergibt.

Die Wirkleistung lässt sich also messen, indem man dem Messinstrument die Sternspannung und den Leiterstrom einer Phase (zum Beispiel L1) zuführt. Die Leistung des Gesamtsystems ist dann $P_{\text{ges}} = 3 \cdot P_{\text{Phase}}$

Entsprechend ist die Blindleistung je Phase $Q_{\text{Phase}} = U_{L,i} \cdot I_{L,i} \cdot \sin \varphi$ und insgesamt $Q_{\text{ges}} = 3 \cdot Q_{\text{Phase}}$. Wenn die Beziehung $\sin \varphi = \cos \varphi + 90^\circ$ ausgenutzt wird, kann die Blindleistung mit dem gleichen Messgerät bestimmt werden. Dazu wird an das Messinstrument eine um 90° gegenüber der Sternspannung phasenverschobene Spannung angelegt. Diese kann entweder mit einem Kondensator erzeugt werden (wenig elegant, weil exakt 90° nie erreicht werden) oder nach dem Zeigerbild aus Abbildung 2.1a zwischen den beiden anderen Außenleitern abgegriffen werden.

Die so gemessene Spannung ist jedoch um den Faktor $\sqrt{3} = 1.732$ größer, als die Sternspannung. Somit ergibt sich die Blindleistung pro Phase zu

$$Q_{\text{Phase}} = \frac{1}{\sqrt{3}} U_{23} \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_{U_{23} I_1} \quad (3.1)$$

.

Aus $Q_{\text{ges}} = 3 \cdot Q_{\text{Phase}}$ und Gleichung 3.1 folgt

$$\sqrt{3} U_{23} \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_{U_{23} I_1} \quad (3.2)$$

Mit der in Abbildung 3.2 gezeigten Schaltung ist die Messung von Wirk- und Blindleistung für beide Leistungsrichtungen (Generator- und Motorbetrieb) möglich.

Die Verwendung von je zwei Messgeräten für Wirk- und Blindleistung ist erforderlich, weil die Geräte jeweils nur eine Leistungsrichtung anzeigen können. Die Anzeige

lässt sich, wie schon erwähnt, durch das Umpolen nur eines der beiden Eingänge ändern. Da die Stromwandlerkreise im Betrieb nicht geöffnet werden dürfen und da am Spannungspfad lebensgefährliche Spannungen liegen, ist die Verwendung von zwei gegenseitig anzeigenden Instrumenten die einzige ungefährliche Möglichkeit, beide Leistungsrichtungen während eines Versuchsteiles abzulesen.

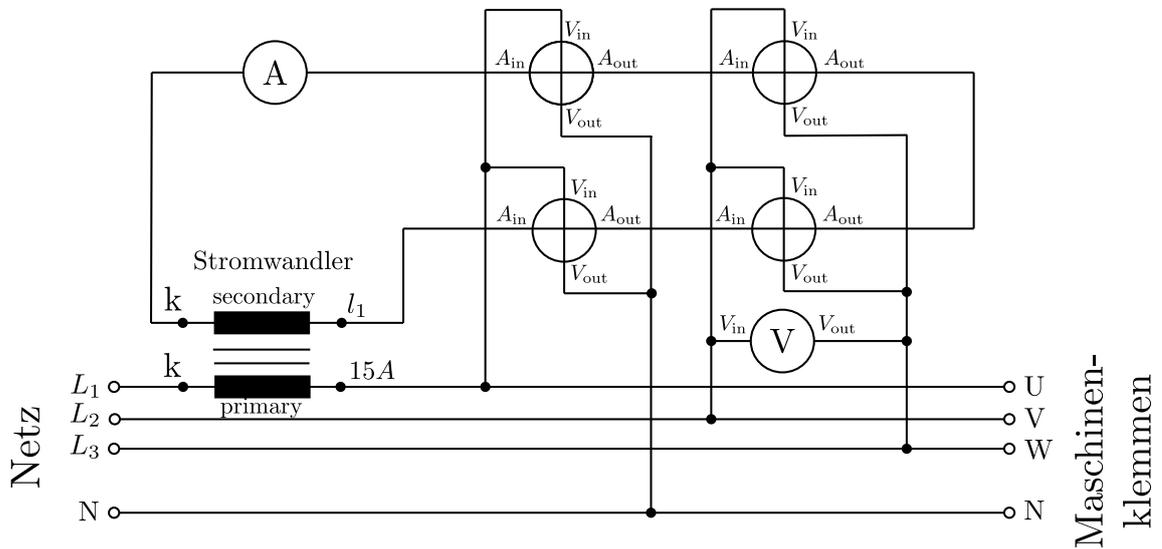


Figure 3.2: Aufbau der Messschaltung der Synchronmaschine

3.2 Versuchsstand Asynchronmaschine

Das Verhalten der Asynchronmaschine wird mittels des in Abbildung 3.3 gezeigten Aufbaus untersucht.



(a) Schalttafel der ASM

(b) Maschinenaufbau

Figure 3.3: Versuchsstand der Asynchronmaschine

Die Versuche widmen sich dem Anlaufverhalten mit und ohne Anlaufwiderständen. Hierbei ist das transiente Verhalten der Maschine zu untersuchen. Weiterhin wird die Gleichstrommaschine zur Simulation von Lastmomenten hinzugeschaltet. Das Ziel ist unter Anderem eine Strom-Orts-Kurve

Der Versuchsstand besteht aus den folgenden Komponenten

1. Asynchronmaschine (Schleifringläufer)
2. Gleichstrommaschine
3. Schalttafel
4. Vorschaltwiderstände
5. Digitales Motormessgerät

Im Gegensatz zum Messaufbau der Synchronmaschine wird bei der Asynchronmaschine nur ein Messgerät eingesetzt. Dieses ist so anzuschließen, dass alle drei Leiterströme und alle drei Spannungen gleichzeitig gemessen werden. Zur Messung der Ströme werden Stromzangen verwendet, welche um jede Maschinenzuleitung gehängt werden müssen. Über einen Schalter ist an jeder Zange der Messbereich von 100 A einzustellen. Um Ströme, Spannungen und Leistungen korrekt interpretieren zu können, ist auf die Zählpfeilrichtung beim Anschluss aller Stromzangen zu achten (Pfeil auf der Unterseite der Zangen).

Aus den Amplituden und den Phasenlagen der Ströme und Spannungen berechnet das Messgerät die gesamte Wirk- und Blindleistung der Asynchronmaschine. Außerdem können die zeitlichen Verläufe der Messgrößen und deren Phasenlagen zueinander grafisch dargestellt werden.

Abbildung 3.4 zeigt, wie das Messgerät anzuschließen ist. Die Kabel zur Spannungsmessung sind mit der Schalttafel zu verbinden.

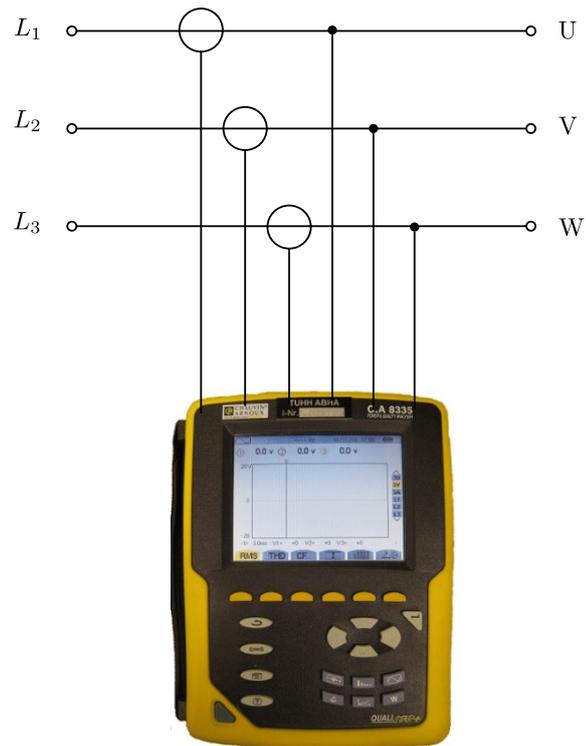


Figure 3.4: Aufbau der Messschaltung der Asynchronmaschine

4 Versuchsvorbereitung

1. Allgemeines

- a) Was versteht man unter Drehstrom?
- b) Welche Spannungen und welche Frequenz besitzt das Stromnetz in Deutschland?
- c)
 - i. Was ist der Unterschied zwischen Dreieck- und Sternschaltung?
 - ii. Erläutern Sie die Strom- und Spannungsgrößen in Dreieck und in Sternschaltung. Geben Sie die charakteristischen Gleichungen an.

2. Synchronmaschine

- a) Was versteht man unter Erregerstrom?
- b) Was versteht man unter Polradwinkel?
- c)
 - i. Erklären Sie den Vorgang des Synchronisierens.
 - ii. Welche vier Bedingungen müssen erfüllt werden?
 - iii. Wie wird dies in der Praxis erreicht?
- d) Nenne Sie Unterschiede zwischen Synchron- und Asynchronmaschine. Gehen Sie dabei auf den Aufbau und die Einsatzmöglichkeiten im Betrieb als Motor sowie Generator ein.

3. Asynchronmaschine

- a) Aus welchen beiden Komponenten besteht eine Asynchronmaschine?
- b) Erklären Sie das Funktionsprinzip der Asynchronmaschine. Gehen Sie dabei auf die Ströme und Spannungen im Stator und Rotor ein, sowie auf die Magnetfeldstärke. Welche Rolle spielt der Schlupf und wie ist dieser definiert?

5 Versuchsdurchführung

Dieser Versuch findet in der Eißendorferstraße 38 (Geb. O) in den Laborräumen des IMEK (Institut M-4 Leitung Prof. Dr.-Ing. Kern) statt.

Bringen Sie für die Versuchsaufgaben einen Taschenrechner und einen Zirkel mit. Eine Vorbereitung auf das Labor ist zwingend notwendig. Sie werden an elektrischen Maschinen und dem deutschen Drehstromnetz arbeiten. Für Ihre Sicherheit und die Ihrer Kommilitonen sollten Sie die hier aufgezeigten Kenntnisse verstanden haben.

Sicherheitsregeln

Das Arbeiten mit Netzspannung und rotierenden Maschinen erfordert umsichtiges Handeln!

Von drehenden Wellen gehen Gefahren aus. Auf zweckmäßige Kleidung und ggf. Schutz langer Haare ist zu achten. Lose Schals o.ä. sind verboten.

Bei allen Arbeiten an Klemmen und rotierenden Teilen ist die gesamte Anlage mit dem Hauptschalter spannungsfrei zu machen. Der Hauptschalter ist als Sicherung gegen Wiedereinschalten in die gesperrte Position zu bringen.

Die Maschinen und die spannungsführenden Klemmen dürfen erst berührt werden, wenn die Wellen zum Stillstand gekommen sind.

Die Anlage darf erst nach Abnahme durch den Versuchsbetreuer eingeschaltet werden.

Ein Verstoß gegen diese Regeln oder Sicherheitsanweisungen des Versuchsbetreibers hat den Ausschluss von der weiteren Versuchsdurchführung zur Folge.

5.1 Hinweise zur Versuchsauswertung

Die Versuchsmaschinen sind mit jeweils einer Gleichstrommaschine gekoppelt, die sowohl bremsen als auch antreiben kann. Der Ankerstrom der Gleichstrommaschine darf (ohne Beweis) als proportional zum mechanischen Drehmoment angenommen werden.

Die Messwerte sollen in grafischer Form aufgetragen werden.

Als Bezugswerte gelten die Maschinendaten laut Typenschild, mit folgenden Ausnahmen:

- Bezugswerte für den Erregerstrom für die Gleichstrommaschine. Dieser wird folgend mit 10 A angenommen.
- Bezugswerte für die Drehzahl. Hierfür ist die synchrone Drehzahl zu verwenden.

5.2 Versuche mit der Synchronmaschine

1. Tragen Sie die Typenschilddaten der Synchronmaschine ein. Berücksichtigen Sie Motor- und Generatorschild separat:

- Nennspannung:

- Nennstrom:

- Nennleistung:

- Nenndrehzahl:

- Leistungsfaktor:

2. Wie in Abschnitt 3.1 vermerkt, besitzen die Messgeräte anschlussabhängige Skalierungsfaktoren. Bestimmen und notieren Sie diese Faktoren für die Strom-, Spannungs- und Leistungsmessgeräte.

	Skala des Messgerätes	Stromwandlungsfaktor	Bezogen auf 3 Phasen	Gesamtwert (Multiplikation)
Wattmeter (Wirkleistung)				
Wattmeter (Blindleistung)				
Amperemeter				
Voltmeter				

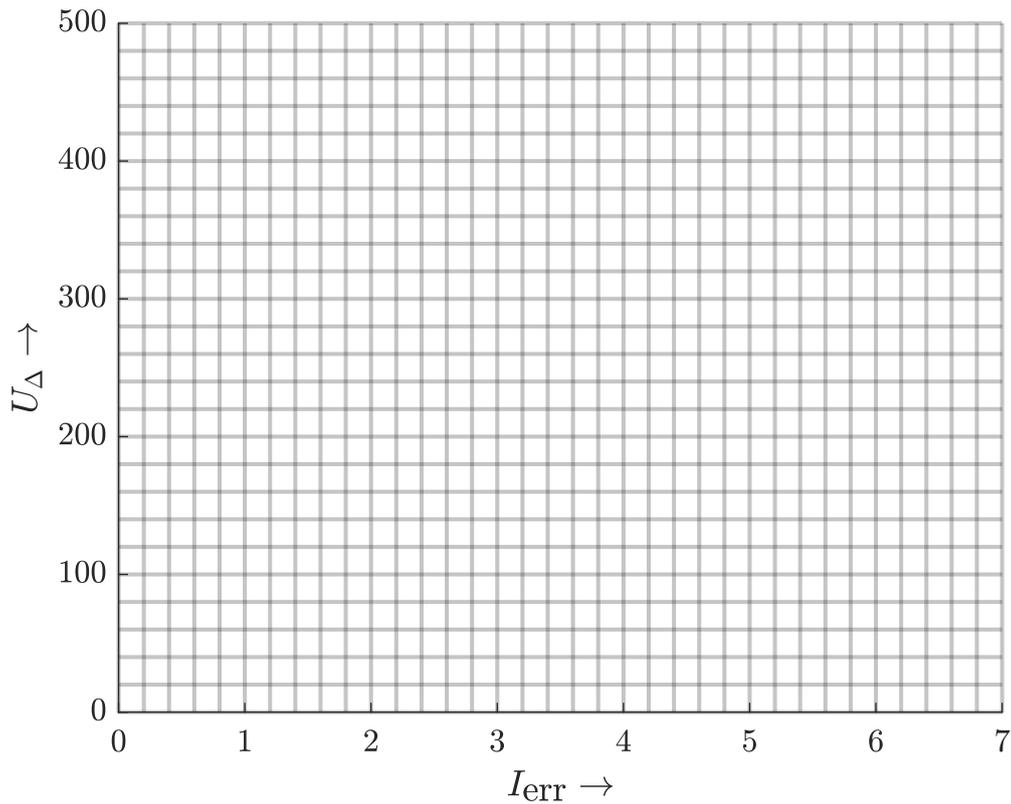
3. Nutzen Sie den Hauptschalter des Prüfstandes, um den Prüfstand **ab**zuschalten. Bauen Sie im abgeschalteten Zustand die Schaltung in Abbildung 3.2 nach und nutzen Sie diesen Aufbau für die folgenden Messungen.

Die Synchronmaschine wird zunächst als Generator im Leerlauf betrieben. Hierfür bleiben die Statorwicklungen vom Netz getrennt, der Erregerstrom des Polrads variiert und die Gleichstrommaschine treibt das Polrad an. Nehmen Sie die Leerlaufkennlinie ($U_{\Delta} = f(I_{\text{err}})$) der Synchronmaschine auf. Damit ist die Abhängigkeit der Spannung an den Statorklemmen (U_{Δ}) vom Erregerstrom (I_{err}) gemeint, wenn der Stator nicht an das Netz angeschlossen ist und kein elektrischer Verbraucher an den Statorklemmen anliegt.

I_{err} in A	U_{Δ} in SkT	U_{Δ} in V
0		
1		
2		
3		
4		
5		
6		

Anhand der Tabelle können sie den Nennererregstrom $I_{\text{err,N}}$ Bestimmen.

Lösung:



4. Notieren Sie die Synchronisierungsbedingungen und Einflussmöglichkeiten zu deren Einstellung:

Bedingung	Einflussmöglichkeit

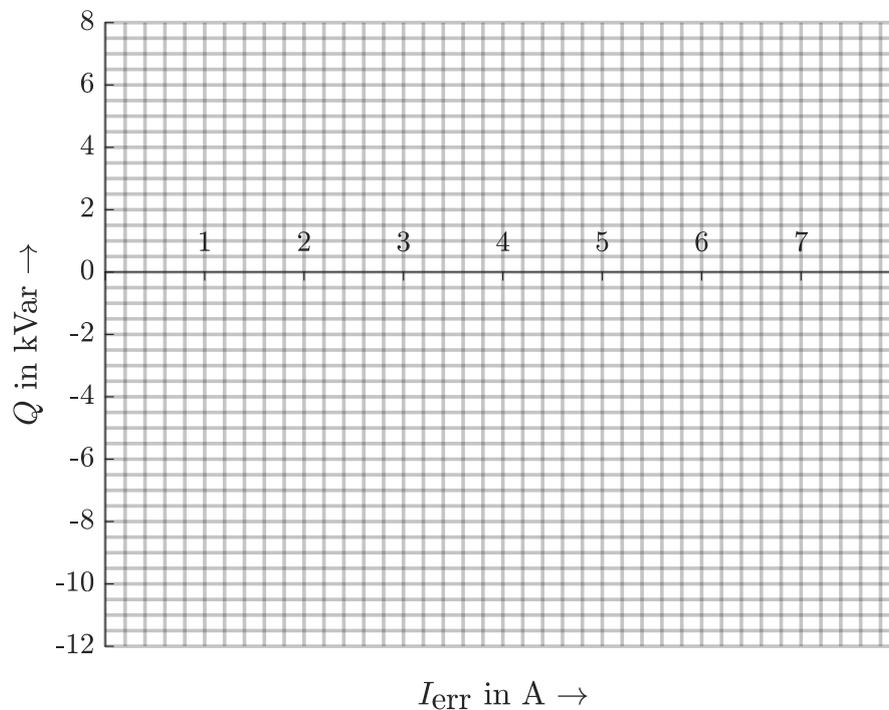
5. Synchronisieren sie die Maschine mit dem Netz. Nutzen sie hierfür die Strobolichtpistole und die Polradwinkelanzeige an der Maschine selber. Streben Sie nach einem konstanten Polradwinkel mit dem Winkel $\approx 0^\circ$ Nach dem Synchronisieren mit dem Netz, schalten sie die Gleichstrommaschine ab. Die Synchronmaschine befindet sich nun weder im herkömmlichen Motor- noch Generatorbetrieb. Ohne mechanische Last erzeugt sie Blindleistung und

speist diese ins Stromnetz. In diesem Zustand wird die Maschine als Phasenschieber bezeichnet. Variieren Sie nun den Erregerstrom und notieren sie die abgegebene Wirk- und Blindleistung sowie den Polradwinkel in folgender Tabelle. Beginnen Sie mit einem Erregerstrom von 3 A.

I_{err} in A	δ in Grad	P in kW	Q in kVAr
6			
5			
4			
3			
2			
1			
0			

Welchen Zusammenhang können sie aus den von Ihnen gemessenen Werten herauslesen?

Lösung:



6. Fahren Sie die Synchronmaschine wieder auf den Nennbetriebspunkt $I_{\text{err,N}}$, n_{N} und synchronisieren sie die Maschine mit dem Netz.
7. Sie möchten die Maschine nun unter Last untersuchen, indem Sie mit der Gleichstrommaschine unterschiedliche Polradwinkel anfahren. Sie nutzen hierfür die Drehmomentenregelung der Gleichstrommaschine.
 - Stellen Sie die Soll-Drehzahl auf ihr maximum
 - Stellen Sie die Momentenbegrenzung auf 0

Durch das Erhöhen der Momentenbegrenzung wird die Gleichstrommaschine die Synchronmaschine beschleunigen (Vorwärtsrichtung), oder bremsen (Rückwärtsrichtung). Nutzen Sie die Stroboskoppistole, um einen Polradwinkel von zunächst 20° einzustellen. Drehen Sie hierfür **vorsichtig** die Momentenbegrenzung der Gleichstrommaschine auf.

Messen Sie die Wirk- und Blindleistung in Abhängigkeit vom Polradwinkel δ . Ohne Last betrüge der Polradwinkel 0° . Durch die im Leerlauf mitgezogene Gleichstrommaschine beträgt der Polradwinkel ohne aktives Einwirken der Gleichstrommaschine jedoch $\approx -5^\circ$. Im *Vorwärtsmodus* sollten Sie alle Polradwinkel zwischen -5° und 20° anfahren können. Erst ein Bremsvorgang, ausgelöst durch die Gleichstrommaschine, sorgt für negative Polradwinkel $< -5^\circ$.

Den Bremsvorgang können sie durch die Drehzahlregelung der Gleichstrommaschine bedingt, auch über die Soll-Drehzahl einstellen, aber nutzen Sie der Erfahrung halber bitte die Richtungsumkehr der Gleichstrommaschine wie folgt:

- Stellen Sie die Momentenbegrenzung der Gleichstrommaschine auf 0
- Stellen Sie die Soll-Drehzahl der Gleichstrommaschine auf ihr Maximum
- Schalten Sie die Gleichstrommaschine auf *rückwärtst*
- Drehen Sie **vorsichtig** an der Momentenbegrenzung.

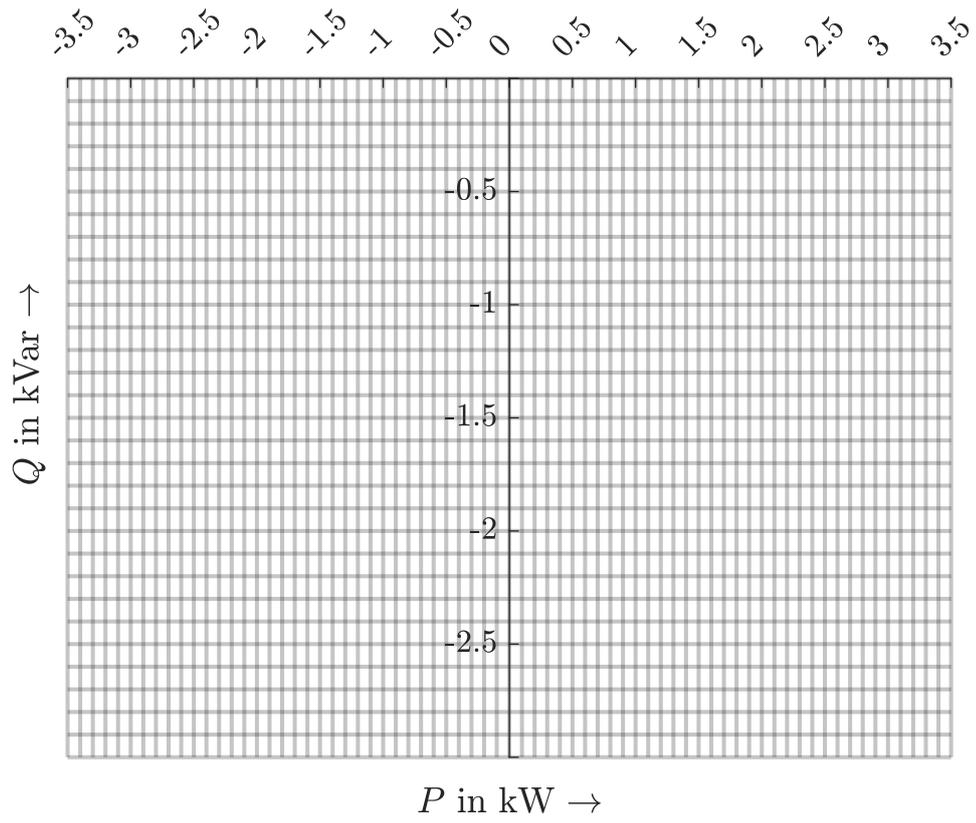
Notieren Sie die abgegebene Wirk- und Blindleistung in Folgender Tabelle. Beginnen Sie mit einem Polradwinkel von -5° .

δ in Grad	P in kW	Q in kVAr
20°		
15°		
10°		
5°		
0°		
-5°		
-10°		
-15°		
-20°		

Welchen Zusammenhang können sie aus den von Ihnen gemessenen Werten herauslesen?

Lösung:

Zeichnen Sie die Ständerstrom-Ortskurve der Blindleistung in Abhängigkeit der Wirkleistung.



5.3 Versuche mit der Asynchronmaschine

1. Tragen Sie die Typenschilddaten der Asynchronmaschine ein:

- Nennspannung:

- Nennstrom:

- Nennleistung:

- Nenndrehzahl:

- Leistungsfaktor:

2. Vor Beginn der Messung muss das Messgerät angeschlossen werden. Schließen Sie dazu den im Stern geschalteten Stator der Asynchronmaschine nach dem in Abbildung 3.4 gezeigten Schaltplan an das Messgerät an. Nutzen Sie die Anschlüsse an der Schalttafel und die Zuleitungen von der Schalttafel zur Asynchronmaschine.

3. Sie betreiben den Prüfstand zunächst im Stillstand

- Die Kontakte der Schleifringe an der Asynchronmaschine sind offen.
- Die Gleichstrommaschine ist ausgeschaltet
- Die Statorwicklung der Asynchronmaschine wird mit dem Netz verbunden

Welches Verhalten erwarten Sie bei dieser Konfiguration?

Lösung:

4. Überprüfen Sie Ihre Vermutung, indem Sie nun bei gleichem Aufbau die Rotorklemmenspannung U_{KL} , U_{LM} und U_{MK} messen. Welchen Bauteil entspricht die Maschine in diesem Fall?

Lösung:

Lösung:

5. Schließen Sie nun die Rotorwicklungen kurz. Der Läufer der Asynchronmaschine entspricht nun einem Käfigläufer. Die Maschine wird ohne Last gestartet, d.h. die Gleichstrommaschine ist weiterhin nicht eingeschaltet. Bestimmen Sie mithilfe des Digitalen-Speicher-Oszilloskops die Anlaufzeit der Maschine sowie die stationäre Drehzahl.

Zur Bedienung des Gerätes hier ein kurzer Crashkurs:

- a) Navigieren Sie zum Menüpunkt *Anlaufstrom* im *Transienten-Menü* (Knopf mit Wackeliger Kurve)
- b) Löschen Sie die letzte Messkurve aus dem Speicher (dies muss zwischen jeder Messung wiederholt werden)
- c) Stellen Sie das Gerät auf eine Triggerschwelle von 2 A
- d) Starten Sie die Messung (*Gerät in Wartestellung* ist die benötigte Anzeige)
- e) Schalten Sie die Asynchronmaschine ans Netz
- f) Sobald die Drehzahl nicht weiter steigt, stoppen Sie die Messung durch betätigen des Hand-Symbols
- g) Zur Auswertung der Messkurve drücken Sie auf die *RMS* Schaltfläche

Lösung:

6. Entfernen Sie den Kurzschluss zwischen den Rotorwicklungen und schließen Sie den Rotor mithilfe der Leistungswiderstände kurz. Bestimmen Sie die Anlaufzeit der Maschine sowie die stationäre Drehzahl. Folgen Sie der obigen Anleitung

Lösung:

7. Nach der Anlaufzeit betrachten Sie nun unterschiedliche Lastbetriebspunkte. Um die Maschine zu schonen, nutzen Sie die Gleichstrommaschine, um die Asynchronmaschine auf ihre jeweilige Nenndrehzahl zu bringen.

Betrachten Sie zunächst das Verhalten ohne Anlaufwiderstände. Schließen Sie hierfür den Läufer wieder kurz.

Nutzen Sie nun die Gleichstrommaschine, zum Simulieren einer Last.

- a) Beide Maschinen stehen still
- b) Nutzen Sie die Gleichstrommaschine zum Beschleunigen der Asynchronmaschine auf Nenndrehzahl:
 - i. Beide Maschinen stehen still
 - ii. Solldrehzahl auf 0
 - iii. Drehmomentbegrenzung auf max
 - iv. Anschalten der Gleichstrommaschine
 - v. Langsames hochdrehen der Soll-Drehzahl, bis die Nenndrehzahl der Asynchronmaschine erreicht ist
 - vi. Schalten Sie die Asynchronmaschine ans Netz
- c) Nutzen Sie die Drehzahlregelung der Gleichstrommaschine, um verschiedene Drehzahlen anzufahren
- d) Notieren Sie die Wirk- und Blindleistungen in Abhängigkeit von der Drehzahl

n in min^{-1}	Schlupf s	P in kW	Q kVAr
2875			
2900			
2925			
2950			
2975			
3000			
3025			
3050			
3075			

8. Wiederholen Sie den vorherigen Versuch, aber verwenden Sie nun erneut die Leistungswiderstände zum Kurzschließen des Läufers.

n in min^{-1}	Schlupf s	P in kW	Q kVAr
2875			
2900			
2925			
2950			
2975			
3000			
3025			
3050			
3075			

Ist es möglich den Asynchronmotor im generatorischen Betrieb zu fahren? Wenn ja, erläutern Sie wie.

Lösung:

9. Es soll die Stromortskurve der Asynchronmaschine (Heylandkreis) konstruiert werden. Dazu muss die Maschine in zwei verschiedenen Punkten betrieben und der Strom aufgenommen werden. Aus den zwei Strömen lässt sich dann mit Hilfe eines Zirkels eine kreisförmige, vom Schlupf abhängige Stromortskurve konstruieren. Bei der Zeichnung darf davon ausgegangen werden, dass der Leerlaufstrom rein imaginär ist.

Um den Leerlaufstrom zu bestimmen wird die Asynchronmaschine mit Synchrondrehzahl betrieben.

Leerlaufstrom ($s = 0$): _____ $\cos(\varphi)$: _____

Für den zweiten Wert wird die Asynchronmaschine im Motorbetrieb mit einer Drehzahl von $n = 2880 \text{ min}^{-1}$ betrieben.

Nennstrom ($s = 0.04$): _____ $\cos(\varphi)$: _____