SYNCHRONMASCHINE (SM)

CHARAKTERISTISCHE KENNLINIEN IM INSEL- UND NETZBETRIEB

Versuch SM
Institut für Leistungselektronik und Messtechnik
ETH Zürich

12. Dezember 2005

1 Ziel des Versuches

Der vorliegende Versuch soll das Verständnis für die Synchronmaschine vertiefen. Insbesondere sollen dabei folgende Punkte veranschaulicht werden:

- Verhalten der ungeregelten Maschine im Inselbetrieb
- Erklärung des Verhaltens mit Hilfe des Spannungszeigerdiagramms
- Durchführung der Synchronisation mit dem Netz
- Betrieb der Maschine als Motor, Generator und Phasenschieber am Netz
- Sichtbarmachen des Polradwinkels

2 Literatur

Als zusätzliche Literatur wird empfohlen:

- Fischer, R.: Elektrische Maschinen; Carl Hanser Verlag, München; 1999
- Nürnberg, W.; Hanitsch, R.: Die Prüfung elektrischer Maschinen; Springer-Verlag, Berlin; 1987
- Müller, G.: Elektrische Maschinen, Grundlagen, Aufbau und Wirkungsweise; Verlag Technik, Berlin; 1990
- Bödefeld, Th.; Sequenz, H.: Elektrische Maschinen; Springer Verlag, Berlin; 1971
- Taegen, F.: Einführung in die Theorie der elektrischen Maschinen II; Vieweg, Braunschweig; 1971

Inhaltsverzeichnis

1 Ziel des Versuches **1**

2 Literatur **1**

3 Theoretische Grundlagen **3**
3.1 Repetitorium 3
3.2 Elektrische Ersatzschaltung 3
3.3 Ortskurve für Netzbetrieb 5
3.4 Estimation der Maschinenparameter 6

4 Hinweise zur Versuchsdurchführung **7**
4.1 Inselbetrieb der Synchronmaschine 7
4.2 Netzbetrieb der Synchronmaschine 8
4.2.1 Das Synchronisieren 8
4.2.2 Messung der Strom- und Leistungsortskurven 9
4.2.3 Messung des Polradwinkels 9
4.3 Zusammenfassung der Messungen 10
4.3.1 Inselbetrieb 10
4.3.2 Netzbetrieb 10
4.4 Maschinendaten 11

5 Aufgabenstellung **11**
5.1 Vorbereitende Aufgaben 11
5.2 Messungen 12
5.2.1 Inselbetrieb 12
5.2.2 Netzbetrieb 12

6 Praktikumsprotokoll **13**
6.1 Vorbereitende Aufgaben 13

3 Theoretische Grundlagen

3.1 Repetitorium

Die Synchronmaschine lässt sich grundsätzlich in zwei verschiedene Arten unterteilen: Je nach Rotorbauart unterscheidet man zwischen Vollpolmaschinen (auch Turbomaschinen genannt) und Schenkelpolmaschinen. Bei der Vollpolmaschine besteht der Rotor aus massivem Eisen; die Erregerwicklung liegt in Nuten verteilt. Diese Ausführung eignet sich für hohe Drehzahlen (z.B. als Generatoren in Dampfturbinenkraftwerken). Schenkelpolmaschinen haben konzentrierte Erregerwicklungen auf Polen aus massivem oder geblechtem Eisen. Diese Pole sind dann auf der eigentlichen Welle befestigt. Schenkelpolmaschinen haben viele Pole und drehen entsprechend langsam ($n = \frac{f_1}{p}$). Sie eignen sich als Generatoren in Wasserkraftwerken.

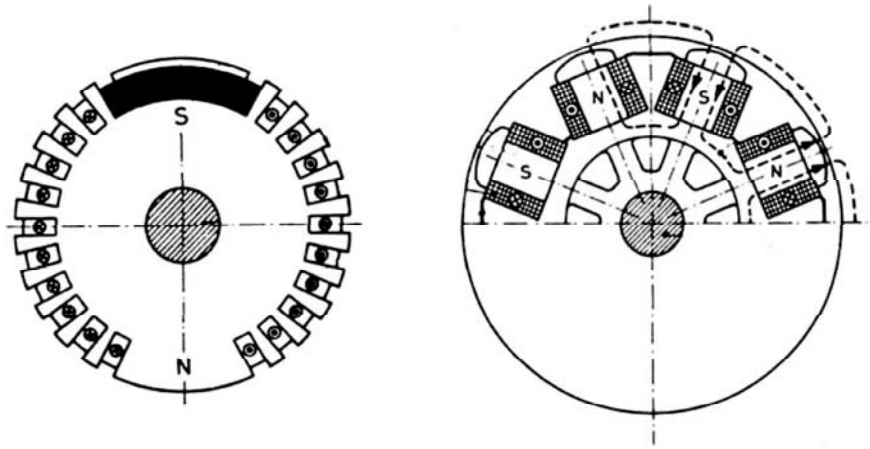


Abbildung 1: Vollpolrotor (p=1) und Schenkelpolrotor (p=4)

3.2 Elektrische Ersatzschaltung

Im vorliegenden Versuch soll eine 4polige Schenkelpolmaschine untersucht werden. Wegen den im Gegensatz zur Vollpolmaschine ausgeprägten Polen ist der Luftspalt δ im Bereich der Polachse (Längsachse, d-Achse) kleiner als im Bereich der Pollücke (Querachse, q-Achse). Eine in der Polachse wirkende Durchflutung Θ erzeugt daher eine grössere Luftspaltinduktion B_δ als eine in der Querachse wirkende Durchflutung.

Damit die Schenkelpolmaschine wie eine Synchronmaschine mit konstantem Luftspalt behandelt werden kann, muss die Statordrehdurchflutung Θ in eine Längskomponente Θ_d und in eine Querkomponente Θ_q zerlegt werden. Für eine Grundwellenbetrachtung ergibt sich, dass diese Durchflutun-

gen eine im Verhältnis c_d, bzw. c_q verringerte Wirkung im Vergleich zu einer Vollpolmaschine (δ const) haben.

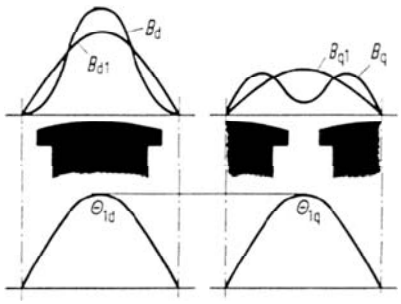


Abbildung 2: Luftspaltfelder in Längs- und Querrichtung

Es gilt für:

- Schenkelpolmaschinen:
  - $c_d = 0.85$ - 0.92
  - $c_q = 0.25$ - 0.45
- Vollpolmaschinen:
  - $c_d = 1$
  - $c_q = 0.85$ - 0.95

Somit ergibt sich folgende Ersatzschaltung mit $\underline{I}_1 = \underline{I}_{1d} + \underline{I}_{1q}$ und $\underline{U}_1 = \underline{U}_{1d} + \underline{U}_{1q}$:

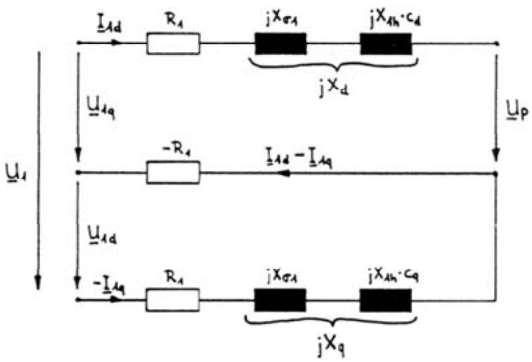


Abbildung 3: Ersatzschaltung einer Schenkelpol-Synchronmaschine

Man fasst die Reaktanzen $X_{\sigma 1}$ und $c_d X_{1h}$ zur synchronen Längs-, und $X_{\sigma 1}$ und $c_q X_{1h}$ zur synchronen Querreaktanz zusammen. Durch geeignete Wahl von c_d und c_q lässt sich die obige Ersatzschaltung wieder auf die bekannte Ersatzschaltung für Vollpolmaschinen zurückführen. Für die Betrachtung des grundsätzlichen Betriebsverhaltens der Synchronmaschine darf auch der Statorwiderstand R_1 vernachlässigt werden. Man erhält dann die auf der nächsten Seite dargestellte, stark vereinfachte Ersatzschaltung der Vollpol-Synchronmaschine.

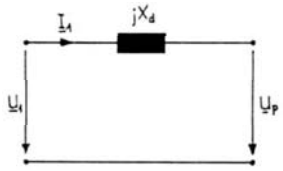


Abbildung 4: Vereinfachte Ersatzschaltung einer Vollpol-Synchronmaschine

3.3 Ortskurve für Netzbetrieb

Die Stromortskurve des Statorstromes (sog. Pascalschnecke) ist gegeben durch:

$$\underline{I}_1 = \underline{A} + \underline{B}e^{j\vartheta} + \underline{C}e^{j2\vartheta} \tag{1}$$

Dabei ist ϑ der Polradwinkel der Maschine und

$$\underline{A} = U_1\left(\frac{R_1}{R_1^2 + X_d X_q} + j\frac{X_d + X_q}{2(R_1^2 + X_d X_q)}\right) \tag{2}$$

$$\underline{B} = kI_f\left(\frac{R_1}{R_1^2 + X_d X_q} + j\frac{-X_q}{R_1^2 + X_d X_q}\right) \tag{3}$$

$$\underline{C} = U_1\left(-j\frac{X_q - X_d}{2(R_1^2 + X_d X_q)}\right) \tag{4}$$

wobei für die Polradspannung U_p und den Erregerfeldstrom I_f folgender linearisierter Zusammenhang gilt:

$$U_p = kI_f \tag{5}$$

Bei Vernachlässigung des Statorwiderstandes ($R_1 = 0$) haben die Stromortskurven folgenden Verlauf:

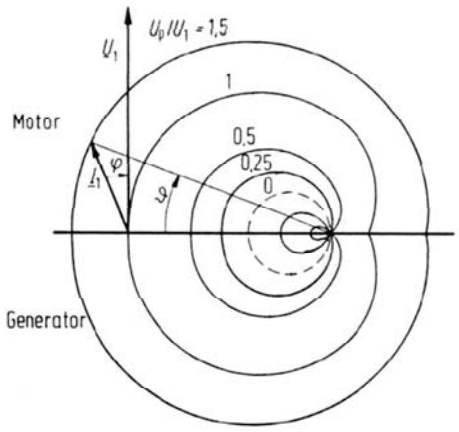


Abbildung 5: Stromortskurven der Schenkelpol-Synchronmaschine

Während bei grossen Feldströmen I_f (und somit hohen Polradspannungen U_p) ein ähnlicher Verlauf wie bei der Vollpolmaschine auftritt, schnürt sich die Ortskurve bei schwacher Erregung ein und ergibt schliesslich eine innere Schleife. Für $U_p = 0$ erhält man den gestrichelten Kreis (sog. Reaktionskreis) aus welchem sich die Maschinenparameter estimieren (abschätzen) lassen.

Da die verwendete Praktikumsmaschine einen relativ grossen Statorwiderstand ($R_1/X_d \approx 10\%$) aufweist, wird dieser bei der Bestimmung der Ortskurven durch den Computer berücksichtigt. Die Achse dieser Pascalschnecken ist dann gegenüber der negativen imaginären Achse leicht im Gegenuhrzeigersinn verdreht. Der Polradwinkel ϑ bezieht sich auf die Achse der Pascalschnecken.

Die Ortskurven in der Leistungsebene erhält man durch die Multiplikation mit der Netzspannung U_1. ($\underline{S}_1 = P_1 + jQ_1 = \sqrt{3}\underline{U}_1\underline{I}_1^*$)

3.4 Estimation der Maschinenparameter

Zur Bestimmung von X_d, X_q und R_1 wird der Reaktionskreis ($I_f = 0$) der Synchronmaschine verwendet. Dazu wird eine Messreihe mit mindestens 3 Messwerten und $I_f = 0$ aufgenommen. Durch lineare Ausgleichsrechnung werden dann die Koordinaten des Mittelpunktes und der Radius des Reaktionskreises aus diesen Messwerten bestimmt. Daraus wiederum lassen sich X_d, X_q und R_1 bestimmen.

Für den Residuenvektor gilt dabei folgender Ansatz:

$$\underline{R} = \underline{P}^2 + \underline{Q}^2 - 2\underline{P}P_0 - 2\underline{Q}Q_0 + P_0^2 + Q_0^2 - R_0^2 \tag{6}$$

P_0 und Q_0 sind die Koordinaten des Kreismittelpunktes, R_0 dessen Radius. Die zwei weiteren Messreihen mit $I_f \neq 0$ werden dann noch zur Bestimmung des Faktors k verwendet.

4 Hinweise zur Versuchsdurchführung

4.1 Inselbetrieb der Synchronmaschine

Die Synchronmaschine wird von einer Gleichstrommaschine mit Nenndrehzahl angetrieben. Die Klemmen des Synchrongenerators werden dreiphasig symmetrisch mit einer Lastimpedanz verbunden.

Im Praktikum wird die SM nacheinander mit einem ohmschen Widerstand, mit einer Induktivität und mit einer Kapazität belastet. Der Erregerstrom I_f der Synchronmaschine soll dabei konstant bleiben! Man misst die Klemmenspannung U_1 in Funktion des Laststromes I_1 bei variabler Belastung. Nur bei der ohmschen Belastung wird Wirkleistung abgegeben. An der Welle des Generators tritt daher ein Drehmoment auf, das den Gleichstrommotor bremst, d.h. die Drehzahl sinkt bei steigender Belastung und muss also mit der GM-Erregung nachreguliert werden.

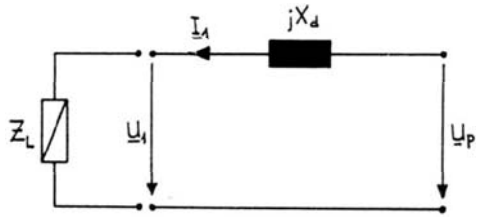


Abbildung 6: Belastung der Synchronmaschine im Inselbetrieb

Im Inselbetrieb wird die Polradspannung U_p zur treibenden Spannung. Es gelten die folgenden Beziehungen:

$$\underline{U}_p = jX_d\underline{I}_1 + \underline{U}_1 \tag{7}$$

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_p}{jX_d + \underline{Z}_L} \tag{8}$$

Bei induktiver oder kapazitiver Belastung ist die Funktion $U_1 = f(I_1)$ eine Gerade. Bei beliebiger Last ist $U_1 = f(I_1)$ eine nichtlineare Funktion (bei der Vollpolmaschine eine Ellipse). Die Belastungskennlinien $U_1 = f(I_1)$ werden mit dem Rechner ausgewertet. Mit der linearen Ausgleichsrechnung

werden die Koeffizienten dieser Funktion bestimmt und ausgedruckt. Anschliessend werden die Messwerte und die angenäherte Funktion graphisch dargestellt und ebenfalls ausgedruckt.

4.2 Netzbetrieb der Synchronmaschine

Normalerweise wird die Synchronmaschine an einem starren Netz betrieben, d.h. die Netzspannung und die Frequenz sind unabhängig von der Belastung. Im Labor wird die Synchronmaschine von einer fremderregten Gleichstrommaschine angetrieben, resp. gebremst.

4.2.1 Das Synchronisieren

Eine Synchronmaschine darf keinesfalls in einem beliebigen Zustand direkt ans Netz geschaltet werden. Die Ströme und Momente würden zu hoch, und die Maschine würde sich unzulässig erwärmen. Oft ist auch das asynchrone Anlaufmoment zu klein um die SM solo auf Nenndrehzahl zu bringen (es gibt jedoch speziell für den Direktanlauf konstruierte Synchronmaschinen).

Im Moment des Zuschaltens der Synchronmaschine ans Netz müssen folgende Synchronisierbedingungen für alle drei Phasen erfüllt sein:

- Gleiche Beträge der Spannungen von SM und Netz
- Übereinstimmung der Frequenz von SM und Netz
- Richtige Phasenfolge (Drehsinn) von SM und Netz
- Gleiche Phasenlage von SM und Netz

Die Synchronmaschine wird zunächst mit der Antriebsmaschine (im Kraftwerk mit der Turbine) bei offenen Klemmen auf Nenndrehzahl hochgefahren. Mit dem Erregerstrom I_f wird dann die Klemmenspannung auf den gleichen Wert wie die Netzspannung eingestellt. Da kein Strom I_1 fliesst, entspricht die Klemmenspannung $\underline{U}_1$ in diesem Moment gerade der Polradspannung $\underline{U}_p(= f(I_f))$.

Die letzten drei Punkte der Synchronisierbedingungen werden mit einem Synchronisiergerät überwacht. Dieses besteht im einfachsten Fall aus drei Glühlampen, welche zwischen Netz und Maschine geschaltet werden. Man unterscheidet zwischen Dunkel- und Hellschaltung.

Bei Übereinstimmung der Phasenlage von Netz und Maschine sind alle Lampen bei der Dunkelschaltung dunkel, während bei der Hellschaltung die Lampen 1 und 3 brennen und nur die Lampe 2 dunkel ist.

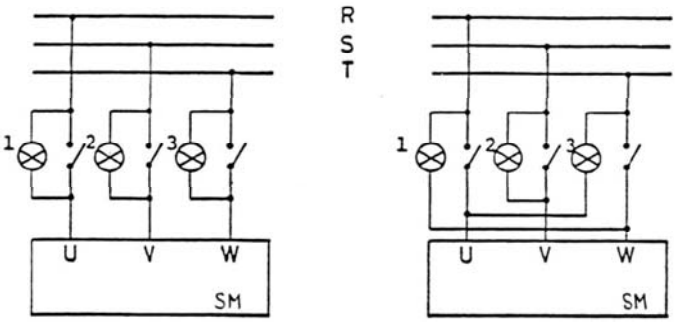


Abbildung 7: Synchronisiergerät, Dunkel- und Hellschaltung

4.2.2 Messung der Strom- und Leistungsortskurven

Ist die Synchronmaschine einmal mit dem Netz synchronisiert, so kann sie Leistung vom Netz aufnehmen, bzw. ans Netz abgeben. Diese Leistungsaufnahme ist abhängig von dem an der Maschine wirkenden Drehmoment. Wirkt auf die Maschine ein bremsendes Moment, so eilt das Polrad dem Statorfeld nach, die Maschine nimmt Leistung vom Netz auf und arbeitet als Motor. Wirkt auf die Maschine ein antreibendes Moment, so läuft das Polrad dem Statorfeld vor und die Maschine arbeitet als Generator. Ob die Maschine als Motor oder als Generator läuft, hängt also nur von der Maschine ab, mit welcher die SM gekuppelt ist. Die im Labor verwendete Gleichstrommaschine erlaubt beide Betriebsarten. Bei konstanter Ankerspannung an der Gleichstrommaschine kann das Drehmoment mit dem Erregerstrom I_e der Gleichstrommaschine gesteuert werden.

Mit dem Erregerstrom I_f der Synchronmaschine wird der Blindleistungsbedarf gesteuert. Wird die SM übererregt, so gibt sie Blindleistung ans Netz ab, sie wirkt wie ein Kondensator. Wird die Maschine untererregt, so nimmt sie Blindleistung vom Netz auf und wirkt induktiv. Im sog. Phasenschieberbetrieb wird diese Eigenschaft der Maschine ausgenutzt: die Synchronmaschine wird dann ohne anliegendes Drehmoment (Turbine abgekuppelt) über- oder untererregt am Netz betrieben.

4.2.3 Messung des Polradwinkels

Aus dem Zeigerdiagramm kann der Polradwinkel ϑ entnommen werden. Im Zeigerdiagramm ist der Winkel zwischen der Netzspannung $\underline{U}_1$ und der Polradspannung $\underline{U}_p$ der Polradwinkel ϑ. Im Leerlauf ist der Polradwinkel ϑ null, d.h. $\underline{U}_1$ und $\underline{U}_p$ sind in Phase. Bei Belastung eilt das Polrad um den Polradwinkel ϑ gegenüber seiner Leerlauflage nach. Die Messung des Polradwinkels beruht auf diesem Zusammenhang.

Auf dem Rotor wird eine Winkelskala angebracht und mit einem Stroboskop beleuchtet. Das Stroboskop wird mit der Netzspannung $\underline{U}_1$ getriggert. Damit sieht das Auge die Skala immer im gleichen Zeitpunkt. Ändert sich die Belastung, so ändert sich die Lage des Rotors mit der Winkelskala bezüglich dem Statorfeld um den Polradwinkel ϑ.

Je nach der Polpaarzahl p der Synchronmaschine beträgt der mechanische Polradwinkel:

$$\vartheta_m = \frac{\vartheta}{p} \tag{9}$$

Die Skala auf der Praktikumsmaschine zeigt direkt den elektrischen Polradwinkel ϑ an.

4.3 Zusammenfassung der Messungen

4.3.1 Inselbetrieb

Die Gleichstrommaschine wird als Turbine eingesetzt. Folgende Messungen sollen durchgeführt werden:

- Messen der Belastungskennlinien $U_1 = f(I_1)$ der Synchronmaschine bei konstantem Erregerfeldstrom I_f der SM bei ohmscher, induktiver und kapazitiver Belastung der SM; die SM ist in Stern zu schalten.

4.3.2 Netzbetrieb

Die Gleichstrommaschine wird zum Antrieb und zur Belastung eingesetzt. Folgende Aufgaben sollen durchgeführt werden:

- Antrieb durch GM ($\rightarrow$ Turbine im Kraftwerk), Synchronisation mit dem Netz
- Messen der SM-Betriebskennlinien (Pascalschnecken) für drei verschiedene Erregerströme I_f der SM; die SM ist in Stern zu schalten
- Messen des Polradwinkels und der Blindleistungen für ausgewählte Betriebspunkte

4.4 Maschinendaten

GLEICHSTROMMASCHINE	
Nennspannung	$U_{nenn} = 220V$
Nennstrom	$I_{nenn} = 45.5A$
Nenndrehzahl	$n_{nenn} = 1500min^{-1}$

SYNCHRONMASCHINE	
Nennspannung (verkettet)	$U_{nenn} = 380V, Stern$
Nennstrom	$I_{nenn} = 15.2A$
Nennscheinleistung	$S_{nenn} = 10kVA$
Polpaarzahl	$p = 2$

5 Aufgabenstellung

5.1 Vorbereitende Aufgaben

Die Lösungen der vorbereitenden Aufgaben sollen ins Praktikumsprotokoll übertragen werden.

1. Welche Bedingungen müssen erfüllt sein, damit die Synchronmaschine ans Netz geschaltet werden darf?

2. Zeichne das Zeigerdiagramm eines am Netz arbeitenden Schenkelpol-Synchrongenerators (R_1 vernachlässigt):

   $U_1 = 110V, \;\; I_1 = 10A, \;\; cos\varphi = 0.8 \;\; kapazitiv, \;\; X_d = 10\Omega, \;\; X_q = 4\Omega$

   Bestimme grafisch die Polradspannung U_p und den Polradwinkel ϑ!

3. Eine Synchronmaschine wird im Inselbetrieb mit konstantem Erregerstrom I_f (d.h. U_p const) betrieben. Zeichne qualitativ die Zeigerdiagramme für Leerlauf, Belastung mit einer rein ohmschen, einer rein induktiven und einer rein kapazitiven Last! Der Statorwiderstand R_1 darf vernachlässigt werden.

4. Wie verändern sich qualitativ die Zeigerdiagramme aus Aufgabe 3 falls der Erregerstrom I_f der SM bei gleichbleibender Wirk- resp. Blindbelastung erhöht wird? (Pro Memoria: $M_{kipp} \sim I_f$)

5. Zeichne die Messschaltungen!

5.2 Messungen

5.2.1 Inselbetrieb

Baue die erste Messschaltung auf und beachte nach dem Einschalten des Rechners die Anweisungen auf dem Bildschirm!

1. Fahre mit der Gleichstrommaschine die Synchronmaschine hoch und belaste diese dreiphasig und symmetrisch nacheinander mit einem Widerstand (blauer Kasten), einer Induktivität und einer Kapazität (über die Wahlleitung). Messe die Belastungskennlinien $U_1 = f(I_1)$ der Synchronmaschine (je ca. 6 Messungen für I_1 von 0 bis 15 A). Der Erregerstrom I_f der SM beträgt für alle Messungen 0.8 A! Die Drehzahl soll mit dem GM-Erregerstrom I_e auf $n = 1500 min^{-1}$ eingestellt und mit dem Stroboskop oder der Drehzahlmessuhr kontrolliert werden.

5.2.2 Netzbetrieb

Die folgenden Versuche werden am <u>Wahlnetz mit $3 * 110$ V</u> durchgeführt:

1. Synchronisiere die SM mit der Dunkel- und Hellschaltung mit dem Netz. Vor dem Anlassen der Gleichstrommaschine ist zu beachten, dass der Erregerstrom I_f der SM null ist (Gefahr des Exitus für die Glühlampen)!

2. Probiere die verschiedenen Betriebsbereiche der SM aus und beachte was passiert, wenn die Erregungen der GM und der SM verändert werden (immer Instrumente überwachen!). Mit dem Stroboskop lässt sich dabei der Polradwinkel beobachten.

3. Nehme die Leistungsortskurven (Pascalschnecken) der Synchronmaschine bei variabler Belastung an der Welle auf (je ca. 6 Messungen). Der Erregerstrom I_f der SM soll dabei für die erste Messreihe 0 A, für die zweite Messreihe 0.25 A und für die dritte Messreihe 0.5 A betragen. Der Statorstrom I_1 darf 15 A nicht überschreiten! Wird die Maschine überlastet, so schlüpft sie; es entstehen hohe Ströme!

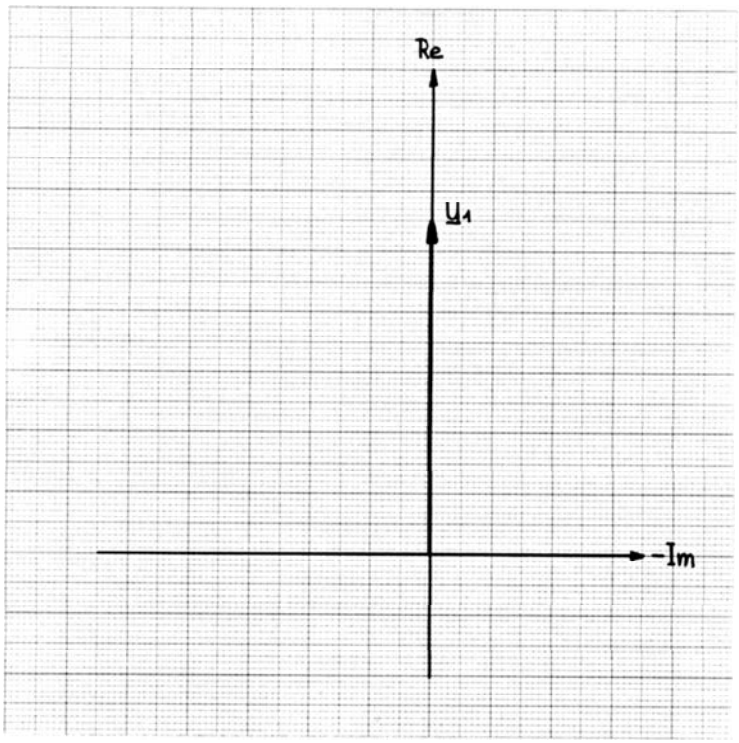
4. Stelle den Erregerstrom I_f der SM auf 0.5 A und regle die Belastung mit der GM nun so, dass die Wirkleistung P der SM genau null wird. Mit der Drehscheibe am Stroboskop gleicht man dies so ab, dass der Zeiger der Winkelskala auf dem Kupplungsflansch der Maschine auf null steht. Mit der GM-Erregung stellt man nun die Wirkleistung zuerst auf −1 kW, dann auf +1 kW ein und liest die Polradwinkel und Blindleistungen ab! Zeichne die zuletzt gemessenen Betriebspunkte in die Pascalschnecke ein. Wie stimmen die Polradwinkel überein?

6 Praktikumsprotokoll

6.1 Vorbereitende Aufgaben

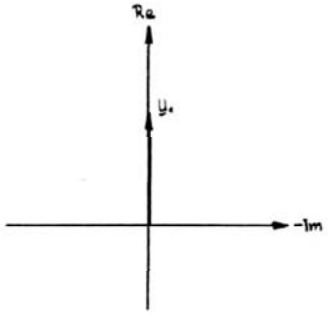
1. Synchronisierbedingungen:

2. Zeigerdiagramm SM am Netz:

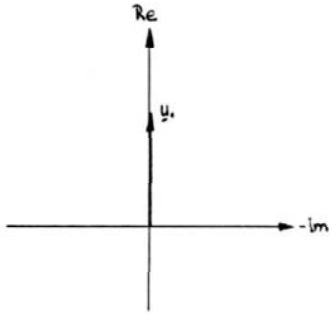


Polradspannung $U_p =$	Polradwinkel $\vartheta =$

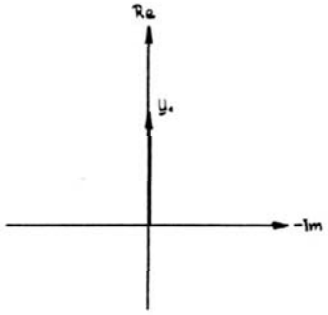
3. Zeigerdiagramm SM im Inselbetrieb:



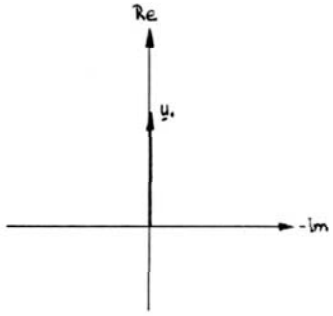
Leerlauf



Ohmsche Belastung



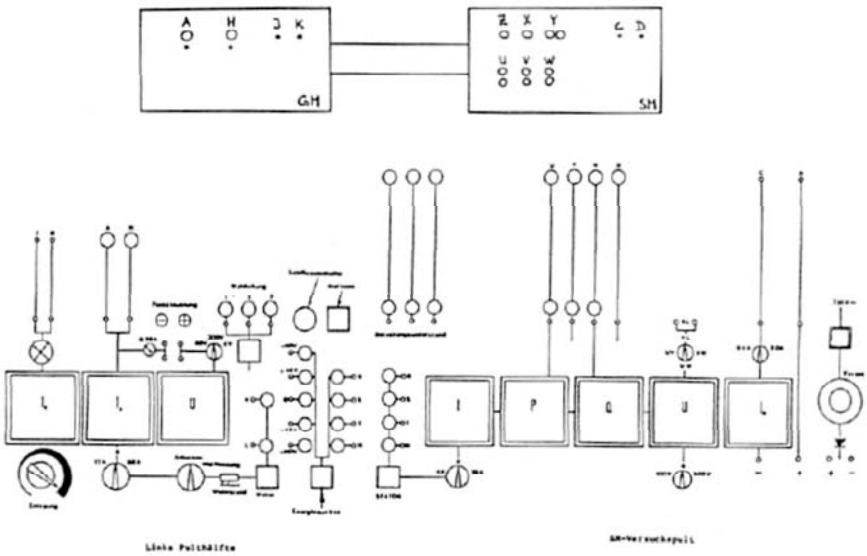
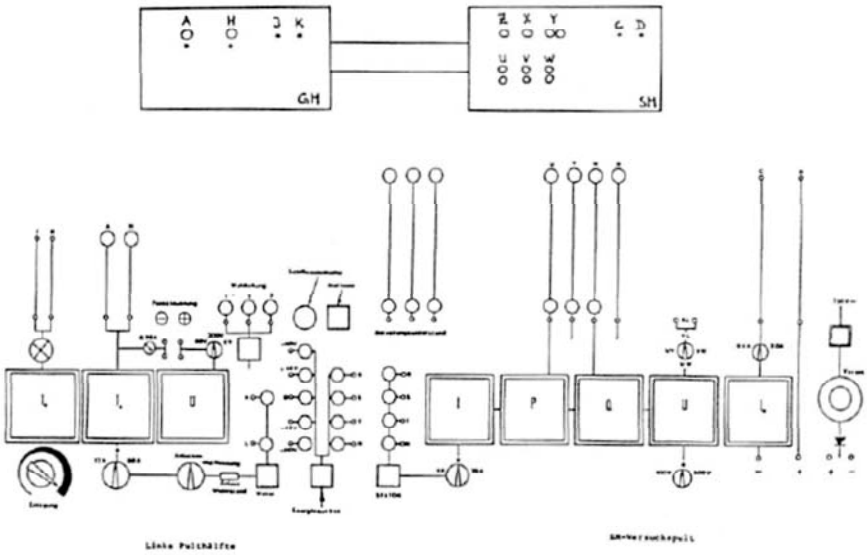
Induktive Belastung
(Maschine kapazitiv)



Kapazitive Belastung
(Maschine induktiv)

4. Qualitative Änderungen:

5. Messschaltung Inselbetrieb:



Messschaltung Netzbetrieb: