



Synchronmaschine



Arbeitsplatz 2: Synchronmaschine
Raum: T010



1. Theoretische Grundlagen	3
1.1. Aufbau	3
1.2. Leerlaufspannung und Frequenz	4
1.3. Ankerrückwirkung	4
1.4. Ersatzschaltbild, Spannungsgleichung, Zeigerdiagramm	5
1.5. Einfluß der Sättigung	7
1.6. Gesättigte Maschine, Leerlaufkennlinie	7
1.7. Kurzschlusskennlinie	8
1.8. Belastung des Synchrongenerators im Inselbetrieb bei konstanter Drehzahl n und Erregerstrom I_f	9
1.9. Parallelschalten ans Netz	10
1.10. Belasten der Synchronmaschine (Generator- oder Motorbetrieb)	11
1.11. Regulier- und V – Kurven	14
1.12. Stroboskopische Messung des Polradwinkels ϑ	15
1.13. Stromrichtergespeiste Gleichstrommaschine	16
1.14. Drehmomentrechner	19
2. Versuchsvorbereitung	20
3. Versuchsdurchführung	21
3.1. Allgemeines	21
3.2. Inbetriebnahme des Versuchsaggregates (im Beisein des Betreuers)	21
3.2.1. Einschalten	21
3.2.2. Ausschalten	22
3.3. Kurvenform, Frequenz, Phasenlage	22
3.4. Aufnahme der Leerlaufkennlinie	24
3.5. Aufnahme der Kurzschlusskennlinie (dreisträngiger Kurzschluss)	26
3.6. Synchronisation mit dem Netz	26
3.7. Belasten der SM am Netz	27
3.8. Unerregte SM am Netz	28
3.9. Aufnahme der Regulierkurven	28
3.10. Aufnahme der V – Kurven (optional, wenn genügend Zeit)	30
3.11. Aufnahme der Arbeitskennlinien n , I , DM , $\eta = fP_{mech}$ für den motorischen Betrieb	32
3.12. Drehmomentkennlinie $DM = f(\vartheta)$	34
4. Schaltplan	36

1. Theoretische Grundlagen

1.1. Aufbau

Bei den Synchronmaschinen unterscheidet man grundlegend zwei Arten der Ausführung:

a) Innenpolmaschine

Die mit Gleichstrom gespeiste Erregerwicklung (Anschlüsse über 2 Schleifringe) liegt im Läufer, die Drehstromwicklung im Ständer.

b) Außenpolmaschine

Die Erregerwicklung liegt im Ständer, die Drehstromwicklung (Anschlüsse über 3 Schleifringe) im Läufer.

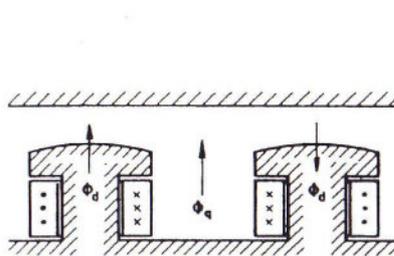


Bild 1.1-1 Synchronmaschine
mit ausgeprägten
Polen (Abwicklung)

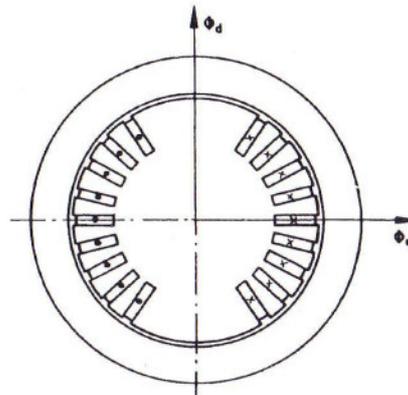


Bild 1.1-2 Vollpolmaschine

Je nach Ausbildung des Läufers (Polrad spricht man bei den Innenpolmaschinen vom Schenkelpol- oder Vollpolmaschinen. Der Läufer einer Schenkelpolmaschine trägt die Gleichstromerregwicklung auf den ausgeprägten Polen (Bild 1.1-1). Bei den Vollpolmaschinen ist die Erregerwicklung in Nuten untergebracht, wobei etwas zwei Drittel des Umfangs bewickelt werden (Bild 1.1-2). Der magnetische Widerstand für den Querfluß ϕ_q in der Pollücke ist bei Schenkelpolmaschinen ungefähr zweimal so groß wie der für den Längsfluß ϕ_d in Richtung der Polachse. Bei Vollpolmaschinen ist dagegen – bedingt durch die ungleiche Nutverteilung – der magnetische Widerstand in der Querachse q nur 1,2 mal so groß wie der in der Längsachse d . Für die folgenden überschlägigen Betrachtungen des stationären Betriebs werden die magnetischen Widerstände in beiden Achsen als gleich groß angenommen, wie es praktisch für Vollpolmaschinen zutrifft.



1.2 Leerlaufspannung und Frequenz

Das von der Läuferwicklung eines Vollpolgenerators (Turbogenerators) im Luftspalt erregte Polradfeld verläuft bei entsprechender Auslegung der Erregerwicklung annähernd sinusförmig über den Umfang. Bei Antrieb des Läufers durch eine fremde Maschine (z.B. Verbrennungskraftmaschine, Wasserturbine, Dampfturbine, Gleichstrommaschine) läuft dieses Feld gegenüber der dreisträngigen Ständerwicklung (Ankerwicklung) um. Ein solches umlaufendes, räumlich sinusförmiges Feld konstanter Amplitude bezeichnet man als Kreisdrehfeld.

Dieses Drehfeld induziert in jedem Strang der Ständerwicklung die Spannung

$$U_p = \omega \cdot N_1 \cdot k_1 \cdot \frac{\hat{\Phi}_{p1}}{\sqrt{2}}$$

Hierbei ist:

U_p die Polradspannung

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ die Kreisfrequenz der induzierten Spannung im Ständer

$f = Z_p \cdot n$ die Frequenz

n die Drehzahl des Läufers

Z_p die Polpaarzahl

k_1 der Wicklungsfaktor der Ständerwicklung für die Grundwelle des Luftspaltfeldes

N die Windungszahl eines Ständerstranges

$\hat{\Phi}_{p1}$ die Amplitude der räumlichen Grundwelle des Polradflusses

Anker derjenige Teil einer elektrischen Maschine, in dessen Wicklung eine Spannung induziert wird.

1.3 Ankerrückwirkung

Die symmetrische Belastung des Vollpolgenerators hat im Ständer (Anker) symmetrische Ströme zur Folge, die ihrerseits ein Drehfeld erzeugen. Die Überlagerung der magnetischen Spannungen vom Läufer und Ständer haben ein resultierendes Drehfeld zur Folge, das sich vom ursprünglichen allein vorhandenen Polradfeld nach Größe und räumlicher Phasenlage unterscheidet. Diese Rückwirkung des Ständerstromes auf den Luftspaltfluß nennt man "Ankerrückwirkung". Entsprechend den magnetischen Spannungen können auch die Ströme vom Anker- und Feldwicklung zusammengesetzt werden (Bild 1.4-2, Sättigung vernachlässigt).

1.4 Ersatzschaltbild, Spannungsgleichung, Zeigerdiagramm

Die folgenden Überlegungen sind im Verbraucherzählpfeilsystem (VZS) angegeben.

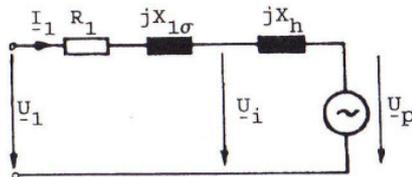


Bild 1.4-1
Ersatzschaltbild für eine
Vollpolmaschine

Die vom resultierenden Luftspaltfluß in der Ständerwicklung induzierte Spannung \underline{U}_i ist gleich:

$$\underline{U}_i = \underline{U}_1 - R_1 \cdot \underline{I}_1 - jX_{1\sigma} \cdot \underline{I}_1$$

R_1 ohmscher Ständerwiderstand
 $jX_{1\sigma}$ Streureaktanz der Ständerwicklung
 I_1, U_1 Strangstrom, Strangspannung des Ständers

Der im rotierenden Läufer fließende Erregergleichstrom I_f kann in einen in den Ständerwicklungen äquivalenten Wechselstrom I'_f (Effektivwert) umgerechnet werden:

$$I'_f = \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{N_f}{m \cdot N_1} \cdot I_f$$

mit
 N_f Windungszahl der Feldwicklung
 m Strangzahl der Ständerwicklung
 $\gamma = f\left(k_1, \frac{b_p}{\tau_p}\right)$ Umrechnungsfaktor
 b_p Polbreite
 τ_p Polteilung

Bei dem zu zwei Dritteln bewickelten Turboläufer ist $\gamma = 0,82$, beim Schenkelpolläufer $\gamma = 0,73$.

I'_f ist der Effektivwert des symmetrischen Drehstromsystems (Frequenz f) einer äquivalenten dreisträngigen Ständerwicklung, welches das Luftspaltfeld erzeugt wie der Gleichstrom I_f der rotierenden Erregerwicklung.

Dem resultierenden Luftspaltfluß entspricht der auf die Ständerseite bezogene Magnetisierungsstrom I'_μ (Effektivwert)

$$\underline{I}'_\mu = \underline{I}_1 + \underline{I}'_f$$

Mit der Hauptinduktivität x_h der Ständerwicklung gilt

$$\underline{U}_i = jx_h \cdot \underline{I}'_\mu$$

Entsprechend wird die Polradspannung U_p definiert zu

$$\underline{U}_p = jx_h \cdot \underline{I}'_f$$

Damit erhält man:

$$\underline{U}_i = jx_h \cdot \underline{I}_1 + \underline{U}_p \quad \text{bzw.}$$

$$\underline{U}_p = \underline{U}_1 - \{R_1 + j(x_h + x_{1\sigma})\} \cdot \underline{I}_1$$

Setzt man $R_1 = 0$, so erhält man:

$$\underline{U}_p \approx \underline{U}_1 - jx_d \cdot \underline{I}_1 \quad \text{mit} \quad x_d = x_h + x_{1\sigma}$$

Dabei ist x_d die synchrone Reaktanz.

Die Synchronmaschine (mit Vollpoläufer) kann also im stationärem Betrieb durch eine Spannungsquelle mit der Polradspannung \underline{U}_p und die nachgeschalteten Strangwiderstände dargestellt werden (Bild 1.4-1).

Da im stationären Betrieb in der Erregerwicklung vom Ankerfeld keine Spannung induziert wird (Ankerfeld und Erregerwicklung laufen synchron miteinander um), erscheint im Ersatzschaltbild nur der Stromkreis des Ständers mit der eingefügten Polradspannung \underline{U}_p . Zu diesem Ersatzschaltbild gehört bei einem gegebenen Belastungsfall das Zeigerdiagramm in Bild 1.4-2.

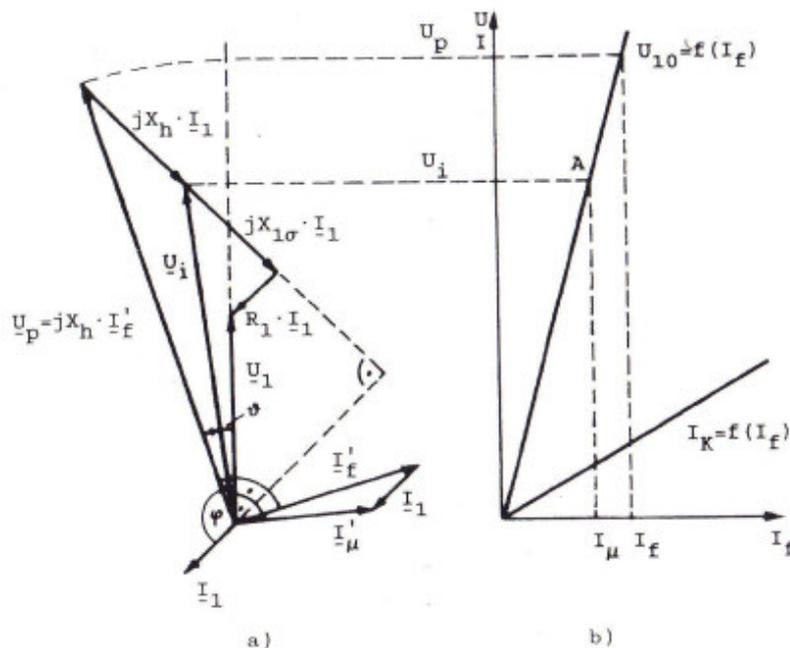


Bild 1.4-2 a) Zeigerdiagramm (Sättigung vernachlässigt)
b) Leerlauf - und Kurzschlußkennlinie

Der Winkel φ zwischen Strom und Spannung zählt positiv von I_1 nach U_1 in mathematisch positivem Umlaufsinn; der Polradwinkel ϑ ist im selben Umlaufsinn von U_1 nach U_p positiv zu zählen. Es ist zu beachten, daß die Beträge der Zeiger U_1 und I_1 Effektivwerte der Strangspannung bzw. des Strangstromes darstellen.

Der negative Phasenwinkel φ des Stromes I_1 gegenüber der Klemmenspannung U_1 kennzeichnet eine generatorische – kapazitive Belastung des Netzes. Neben den auftretenden Spannungen sind auch die auf den Ständer umgerechneten Ströme als Zeiger dargestellt. Bei rein kapazitiver Belastung liegt (bei Vernachlässigung von R_1) I_1 in Gegenphase zu I_μ ; die



Ständerdurchflutung wirkt dann der Läuferdurchflutung direkt entgegen, so daß zur Spannungshaltung ein erhöhter Erregerstrom I'_f erforderlich ist.

Bei rein induktiver Belastung liegt I_1 mit I'_μ in Phase; die Ständerdurchflutung wirkt magnetisierend, so dass zur Spannungshaltung der Erregerstrom I'_f reduziert werden muß. Im ungesättigten Bereich sind die Ströme I'_f , I'_μ , und I_1 den Spannungen U_p , U_i und $jx_h \cdot I_1$ proportional.

1.5 Einfluß der Sättigung

Der resultierende Hauptfluss ist durch die Hauptfeldspannung U_1 bestimmt, die auf der Magnetisierungskennlinie den Arbeitspunkt A festlegt und damit den wirksamen Magnetisierungsstrom I_μ bestimmt. x_h hängt vom Sättigungszustand der Maschine ab. Die in Bild 1.4-2 durchgeführte Bestimmung von U_p im Zeigerdiagramm und die damit verbundene Ermittlung von I'_f gilt deshalb nur bei linearer Leerlaufkennlinie. $x_{1\sigma}$ wird als Sättigungsunabhängig angesehen.

1.6 Gesättigte Maschine, Leerlaufkennlinie

Bei der realen Maschine ergibt sich auf Grund der Sättigung der Eisenwege ein nichtlinearer Zusammenhang zwischen Magnetisierungsstrom I_μ und der induzierten Spannung U_i . Man erhält ihn aus der Leerlaufkennlinie $U_{10} = f(I_f)$ bei $I_1 = 0$. Es ist dann $I'_\mu = I'_f$ und $U_i = U_p = U_1$.

1.7 Kurzschlusskennlinie

Im Kurzschluss wird die vom Läufer erzeugte Durchflutung durch den Kurzschlußstrom im Ständer nahezu völlig kompensiert. Lediglich zur Überwindung der ohmschen Spannungsabfälle und der Streuspannungsabfälle in der Ständerwicklung wird eine geringe Spannung benötigt. Die Maschine arbeitet daher im ungesättigten Zustand. Es gilt mit $R_1 \approx 0$:

$$I_K = \frac{U_p}{R_1 + jx_d} \approx \frac{U_p}{jx_d}$$

Diese Gleichung kann zur Bestimmung der synchron Reaktanz $x_d = x_1\sigma + x_h$ benutzt werden. Die Polradspannung U_p ist der Luftspaltkennlinie (Tangente an die Leerlaufkennlinie im Nullpunkt) zu entnehmen.

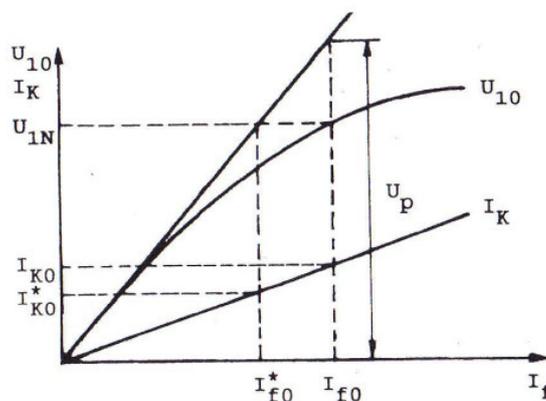


Bild 1.7-1 Leerlauf- und Kurzschlußkennlinie

Bei einer der Nennspannung entsprechenden Leerlauferregung I_{f0} (d.h. $U_p = U_{1N}$) stellt sich der Dauerkurzschlußstrom

$$I_{K0}^* = \frac{U_{1N}}{x_d} \quad I_{K0} = \frac{U_{1N}}{x_{dges}} \quad \text{ein.}$$

Er beträgt bei Turbogeneratoren ungefähr des 0,8 – fache und bei Schenkelpolgeneratoren ungefähr das 1,2 – fache des Nennstromes I_{1N} . Alte und kleine Maschinen weisen ein wesentlich höheres Verhältnis $\frac{I_{K0}}{I_{1N}}$ auf.

Bei Vollasterregung ($U_p > U_{1N}$) steigen die Werte entsprechend an: moderne Großmaschinen weisen hierbei einen Dauerkurzschlußstrom von etwa $2,2 \cdot I_{1N}$ auf.

Das Kurzschlußverhältnis K_C und die relative Ankerreaktanz x_{dges} bei gesättigter Maschine und Vernachlässigung des ohmschen Widerstandes R_1 sind wie folgt definiert:

$$K_C = \frac{I_{K0}}{I_{1N}} \\ x_{dges} = \frac{x_{dges} \cdot I_{1N}}{U_{1N}} = \frac{U_{1N}}{I_{K0}} \cdot \frac{I_{1N}}{U_{1N}} = \frac{I_{1N}}{I_{K0}} = \frac{1}{K_C}$$

1.8 Belastung des Synchrongenerators im Inselbetrieb bei konstanter Drehzahl n und Erregerstrom I_f

Die vereinfachten Zeigerdiagramme in Bild 1.8-1 zeigen für ohmsche und kapazitive Belastungsstrom eine Verkleinerung der Klemmenspannung gegenüber der Leerlaufspannung ($U_p < U_{10} = U_1$), bei induktivem Belastungsstrom dagegen eine Erhöhung der Klemmenspannung.

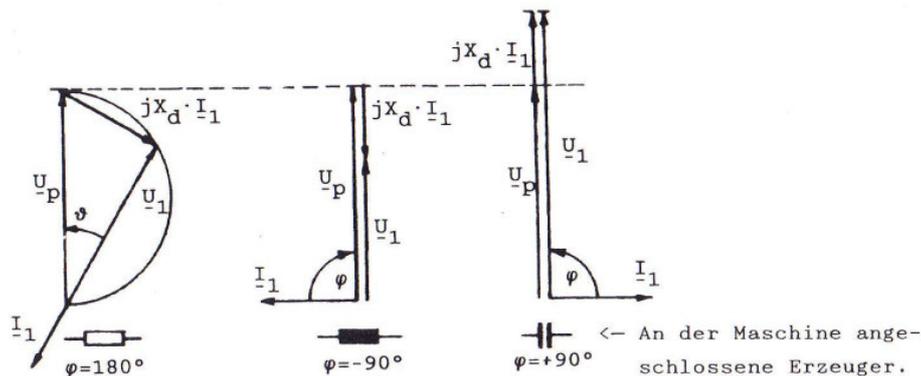


Bild 1.8-1 Zeigerdiagramme des Synchrongenerator für ohmsche, kapazitive und induktive Belastung (VZS).

Vernachlässigt man R_1 , so ergibt sich aus dem Zeigerdiagramm (Bild 1.4-2) nach dem Kosinussatz und mit

$$I_{K0} = \frac{U_{1N}}{x_{dges}} \quad \text{und} \quad K_C = \frac{I_{K0}}{I_{1N}}$$

Die Öhlschlägersche Formel für die Belastungskennlinie:

$$\left(\frac{U_p}{U_{1N}}\right)^2 = \left(\frac{U_1}{U_{1N}}\right)^2 + \left(\frac{I_1}{I_{K0}}\right)^2 + 2 \cdot \frac{U_1}{U_{1N}} \cdot \frac{I_1}{I_{K0}} \cdot \sin\varphi$$

oder

$$\left(\frac{U_p}{U_{1N}}\right)^2 = \left(\frac{U_1}{U_{1N}}\right)^2 + \left(\frac{I_1}{K_C \cdot I_{1N}}\right)^2 + 2 \cdot \frac{U_1}{U_{1N}} \cdot \frac{I_1}{K_C \cdot I_{1N}} \cdot \sin\varphi$$

Wird der Erregerstrom I_f so eingestellt, dass im Leerlauf die Nennspannung auftritt, so ist $U_p = U_{10} = U_{1N}$ und damit ergibt sich:

$$1 = \left(\frac{U_1}{U_{1N}}\right)^2 + \left(\frac{I_1}{I_{K0}}\right)^2 + 2 \cdot \frac{U_1}{U_{1N}} \cdot \frac{I_1}{I_{K0}} \cdot \sin\varphi$$

Für einen gegebenen Leistungsfaktor $\cos\varphi$ kann damit die Belastungskennlinie $\left(\frac{U_1}{U_{1N}}\right) = f\left(\frac{I_1}{I_{K0}}\right)$ gezeichnet werden. Wählt man z.B. einen rein induktiven Belastungsstrom ($\varphi = 90^\circ$), so lautet die Gleichung für die Belastungskennlinie

$$\frac{U_1}{U_{1N}} = 1 - \frac{I_1}{I_{K0}}$$



Das ist die Gleichung deiner Geraden.

Die Belastungskennlinien haben keine praktische Bedeutung, da eine unregelmäßige Betriebsweise heute kaum mehr vorkommt. Trotzdem ist es wichtig, das Eigenverhalten des Generators zu kennen, um einwandfrei funktionierende Stellglieder für den Erregerstrom auswählen zu können.

1.9 Parallelschalten ans Netz

Schaltet man einen beliebig erregten Synchrongenerator bei einem beliebigen Schlupf und einer beliebigen Polradstellung unmittelbar auf ein starres Netz, so können in den ersten Perioden unzulässig hohe Stromstöße in der Ständerwicklung und hohe Spannungsspitzen in der Erregerwicklung auftreten. Um dies zu vermeiden, darf das Parallelschalten eines Synchrongenerators mit dem Netz nur dann durchgeführt werden, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

- a) Die Generatorspannung muss dem Betrag nach gleich der Netzspannung sein.
- b) Die Frequenz der Generatorspannung muss gleich der Netzfrequenz sein.
- c) Die Phasenfolge der Spannungen an den Klemmen, die zusammenschaltet werden sollen, muss übereinstimmen.
- d) Die Phasenlage der Spannungssysteme muss übereinstimmen bzw. die Spannungsdifferenz zwischen den zusammenzuschalten Klemmen muss gleich Null sein.

Zu a): Die Generatorspannung wird mit Hilfe der Erregung des Synchrongenerators auf den Wert der Netzspannung gebracht.

Zu b): Durch die Antriebsmaschine wird der Synchrongenerator auf synchrone Drehzahl gebracht, der genaue Wert wird mit Hilfe von Synchronisierereinrichtungen eingestellt.

Zu c): Gleiche Phasenfolge und gleicher Drehsinn werden ebenfalls mit den Synchronisierereinrichtungen festgestellt.

Zu d): Im Augenblick des Parallelschaltens müssen beide Spannungssysteme in Phase sein (Spannungsdifferenz Null).



1.10 Belasten der Synchronmaschine (Generator- oder Motorbetrieb)

Nach dem Parallelschalten ist die Polradspannung U_p der Maschine in Betrag und Phasenlage gleich der Netzspannung U_1 . Die Synchronmaschine kann im Generator- und Motorbetrieb mit Blind- und Wirkleistung belastet werden.

Man erreicht dies:

- a) durch Verstellen der Erregung der Synchronmaschine zur Steuerung der Blindleistung
- b) durch Verstellen des Antriebsmomentes zur Steuerung der Wirkleistung.

Zu a): Wird die Erregung der Synchronmaschine vom Leerlauf ausgehend verstärkt, so wird die Polradspannung U_p größer als die Netzspannung U_1 sein, d.h., die Maschine ist übererregt. Es fließt ein kapazitiver Blindstrom, der die Läuferdurchflutung soweit abbaut, wie es zur Erregung eines resultierenden, zur Netzspannung proportionalen Feldes erforderlich ist (Bild 1.10-1b). Die Maschine nimmt kapazitive Blindleistung auf. Wird die Erregung vom Leerlauf ausgehend geschwächt, so wird U_p kleiner als U_1 , d.h., die Maschine ist untererregt. Es fließt ein induktiver Blindstrom, der die zu schwache Läuferdurchflutung verstärkt (Bild 1.10-1c). Hier muss die Synchronmaschine ihre Magnetisierungsblindleistung teilweise aus dem Netz beziehen, d.h., sie nimmt induktive Blindleistung auf.

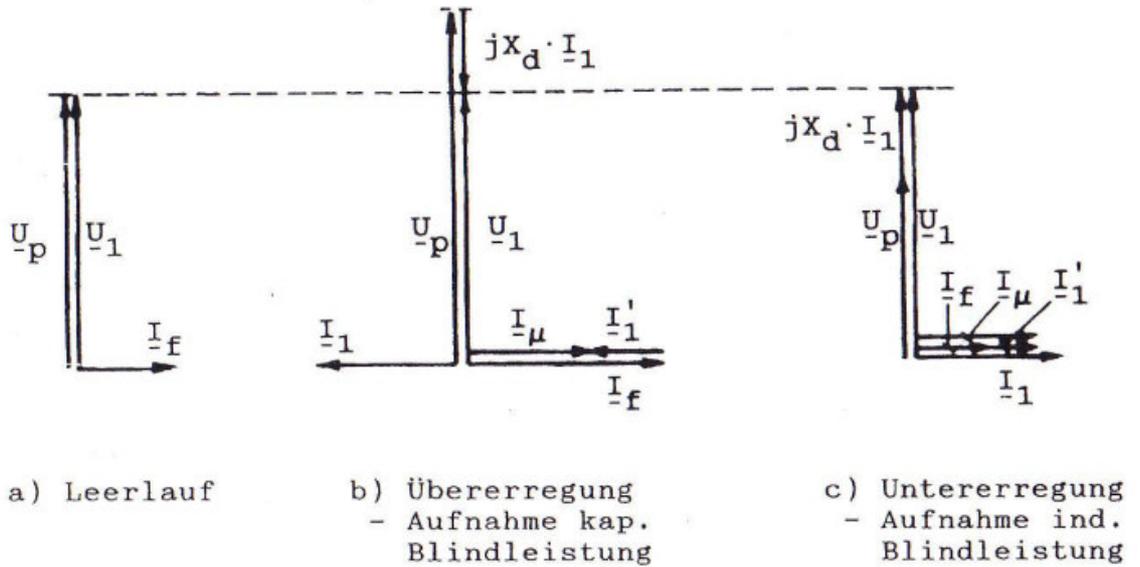


Bild 1.10-1 Blindlastbetrieb der Synchronmaschine am Netz

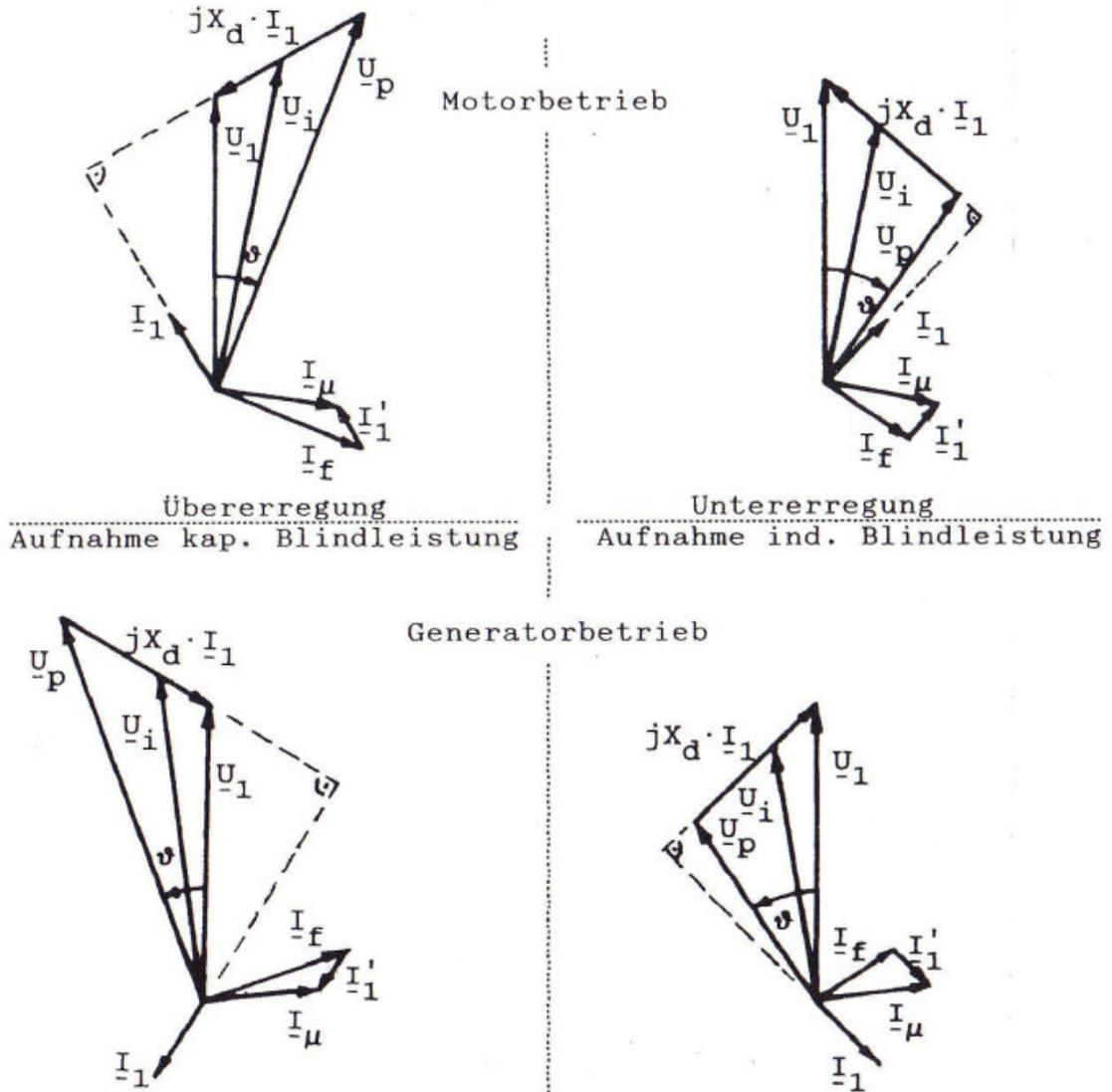


Bild 1.10-2 Vierquadrantenbetrieb der Synchronmaschine am Netz

Zu b): Abhängig vom Drehmoment der mit der Synchronmaschine gekoppelten Antriebsmaschine (z.B. Gleichstrommaschine) kann die Synchronmaschine sowohl im Generator- als auch im Motorbetrieb arbeiten.

Bei negativem Drehmoment (gleiche Richtung mit der Drehrichtung der Synchronmaschine – VZS), arbeitet die Synchronmaschine im Generatorbetrieb, gibt elektrische Wirkleistung an das Netz ab. Dabei stellt sich ein positiver Polradwinkel $\vartheta > 0$ ein. Der Läufer eilt vor.
Bei positivem Drehmoment (gegen die Drehrichtung der Synchronmaschine –VZS) geht die Synchronmaschine in den Motorbetrieb, gibt mechanische Leistung an die Antriebsmaschine ab. Der Polradwinkel ist in diesem Fall negativ $-\vartheta < 0$. (Bild 1.10-2)

Die Abhängigkeit des Drehmoments vom Polradwinkel lässt sich für eine Vollpolmaschine (Turbogenerator) bei Vernachlässigung von R_1 leicht ableiten. Für die Wirkleistung gilt:

$$P = 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi = 3 \cdot \frac{U_1}{x_d} \cdot x_d \cdot I_1 \cdot \cos\varphi$$

Aus dem Zeigerdiagramm (Bild 1.4-2) bei $R_1 = 0$ folgt nach dem Sinussatz:

$$x_d \cdot I_1 \cdot \cos\varphi = -U_p \cdot \sin\vartheta$$

und damit wird:

$$P = -3 \cdot \frac{U_1}{x_d} \cdot U_p \cdot \sin\varphi$$

Bei Vernachlässigung der Verluste hat das Drehmoment (Bild 1.10-3) die folgende Form:

$$D_M = \frac{P}{\omega} = -3 \cdot \frac{U_1 \cdot U_p}{\omega \cdot x_d} \cdot \sin\vartheta$$

Hierbei ist: $\omega = \frac{\omega_{\text{Netz}}}{Z_p}$ die synchrone Winkelgeschwindigkeit

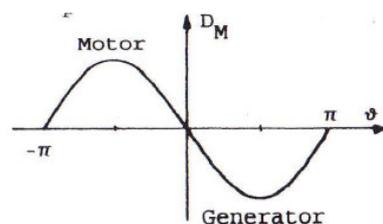


Bild 1.10-3: Abhängigkeit des Drehmoments vom Polradwinkel

1.11 Regulier- und V – Kurven

Der charakteristische Verlauf der beiden Kennlinien lässt sich aus dem vereinfachten Zeigerdiagramm des Vollpolgenerators ableiten. (Bild 1.11-1)

Es werden folgende Annahmen getroffen:

$$U_1 = U_{1N} = \text{konst.} \quad n = \text{konst.} \quad R_1 = 0 \quad x_d = x_h + x_{1\sigma}$$

Nach Anwendung des Kosinussatzes ist: $U_p^2 = U_{1N}^2 + (x_d \cdot I_1)^2 + 2 \cdot U_{1N} \cdot x_d \cdot I_1 \cdot \sin\varphi$

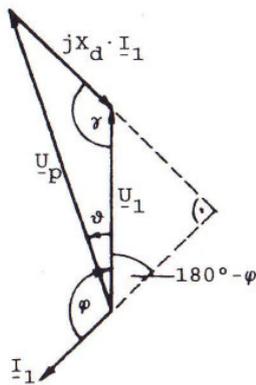


Bild 1.11-1
Vereinfachtes Zeigerdiagramm
des Vollpolgenerators

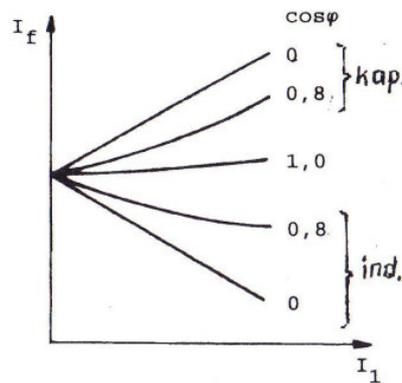


Bild 1.11-2
Regulierkurven

Regulierkurven

Nach Division der obigen Gleichung durch U_{1N}^2 und nach Einführung von

$$\frac{I_f}{I_{f0}} = \frac{U_p}{U_{1N}} \quad \text{und} \quad I_{K0}^* = \frac{U_{1N}}{x_d} = \text{konst.} \quad \text{wird}$$

$$\frac{I_f}{I_{f0}} = \sqrt{1 + \left(\frac{I_1}{I_{K0}^*}\right)^2 + 2 \cdot \frac{I_1}{I_{K0}^*} \cdot \sin\varphi}$$

Die Gleichung stellt den Erregerstrombedarf des Turbogenerators in Abhängigkeit vom Belastungsstrom dar. Parameter ist der Leistungsfaktor. Der charakteristische Verlauf des „Regulierkurven“ ist in Bild 1.11-2 ersichtlich.

V – Kurven

Die Multiplikation der Spannungszeiger im vereinfachten Diagramm des Turbogenerators mit $\frac{j}{x_d}$ [z.B. $\left(\frac{j}{x_d}\right) \cdot -jx_d \cdot I_1 = I_1$] ergibt eine Stromortskurve der Vollpolmaschine bei $R_1 = 0$.

Aus der Stromortskurve werden als Zusammenhang zwischen dem Erregerstrom $I_f \sim \frac{U_p}{x_d}$ und dem Belastungsstrom I_1 bei konst. Wirkleistung P ($I_{1W} = \text{konst.}$) V – förmige Kennlinien entnommen. (s. Bild 1.11-4)

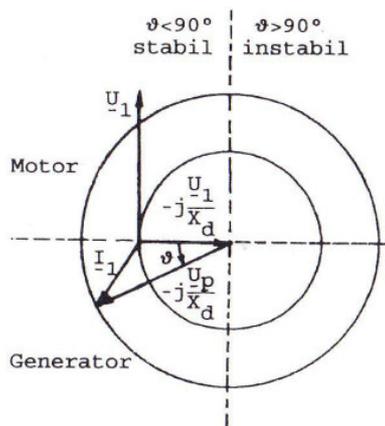


Bild 1.11-3
Stromortskurve der Vollpol-
maschine bei $R_1 = 0$

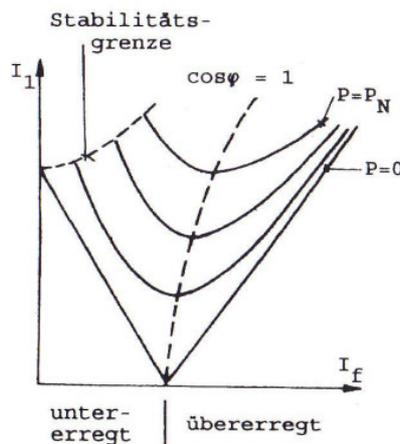


Bild 1-11-4
V - Kurven für verschie-
dene Wirkbelastungen

Die Minima des Stromes I_1 liegen dort, wo die Blindkomponente $I_{1b} = 0$ ist; der Magnetisierungsbedarf der Maschine wird dann gerade durch die Gleichstromerregung des Polrades gedeckt. Rechts von der Verbindungslinie $\cos\varphi = 1,0$ herrscht Übererregung, links davon Untererregung.

Der eingezeichneten Stabilitätsgrenze entspricht die Grenze für $\vartheta = 90^\circ$ in der Stromortskurve. Bei Überschreiten dieses Winkels, z.B. infolge zu starker Untererregung, fällt die Synchronmaschine außer Tritt. Weitere Belastungsgrenzen werden mit Rücksicht auf die zulässige Erwärmung durch die höchstzulässigen Werte von Ständer- und Erregerstrom festgelegt.

Bei gleichen Koordinaten- Maßstäben deckt sich die V - Kurve für $P = 0$ mit den Regulierkennlinien für $\cos\varphi = 0$. Dasselbe gilt für die Verbindungslinie der Minima und die Kurve $\cos\varphi = 1$.

1.12 Stroboskopische Messung des Polradwinkels ϑ

Für den Winkel eines läuferfesten Punktes gegenüber dem Ständer gilt bei Betrieb am starren Netz und mit der Näherung Winkel $(U_i, U_1) \approx 0$:

$$\alpha_L = a_0 + \frac{\omega t}{Z_p} + \frac{\vartheta}{Z_p}$$

Wird dieser Punkt im Abstand von $T = \frac{2 \cdot \pi}{\omega}$ beleuchtet, so erscheint er als Z_p -facher Punkt stehend an den Orten.

$$a_0 + \frac{\vartheta}{Z_p} + K \cdot \frac{2 \cdot \pi}{Z_p}$$

wobei $K = 0 \dots (Z_p - 1)$

Durch Markierung des festen Winkels a_0 am Ständer (Leerlauf $\Rightarrow \vartheta = 0$) kann der belastungs- und erregungsabhängige Winkel ϑ ermittelt werden.

Die periodische Beleuchtung des Läufers erfolgt durch ein netzsynchronisiertes Stroboskop.

1.13 Stromrichtergespeiste Gleichstrommaschine

Als Antriebsmaschine und Belastung der Synchronmaschine wird in diesem Versuch eine stromrichtergespeiste, fremderregte Gleichstrommaschine verwendet, deren Drehzahl n bzw. Ankerspannung u_A geregelt ist. Als Regelprinzip hat sich in der Antriebstechnik das Stromleitverfahren durchgesetzt. Den grundsätzlichen Aufbau dieser Anordnung zeigt Bild 1.13-1. Hierbei ist der Drehzahlregelung (bzw. Ankerspannungsregelung) eine Ankerstromregelung unterlagert.

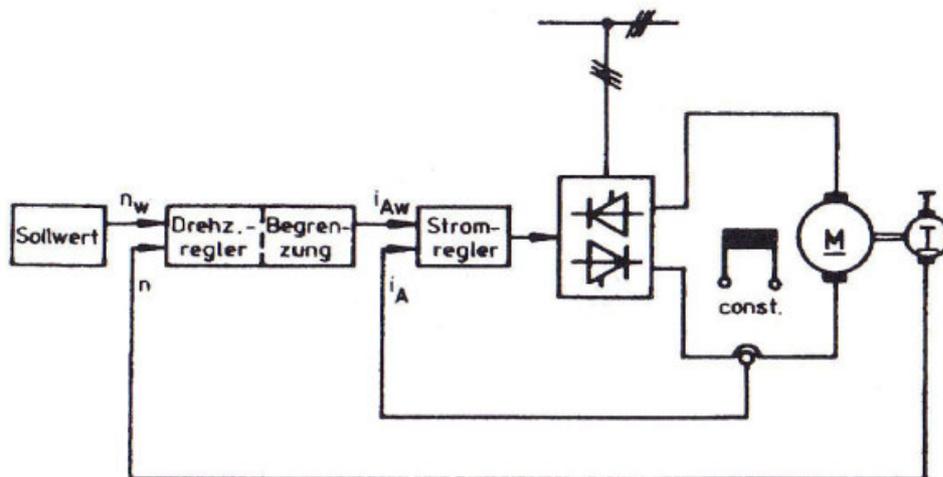


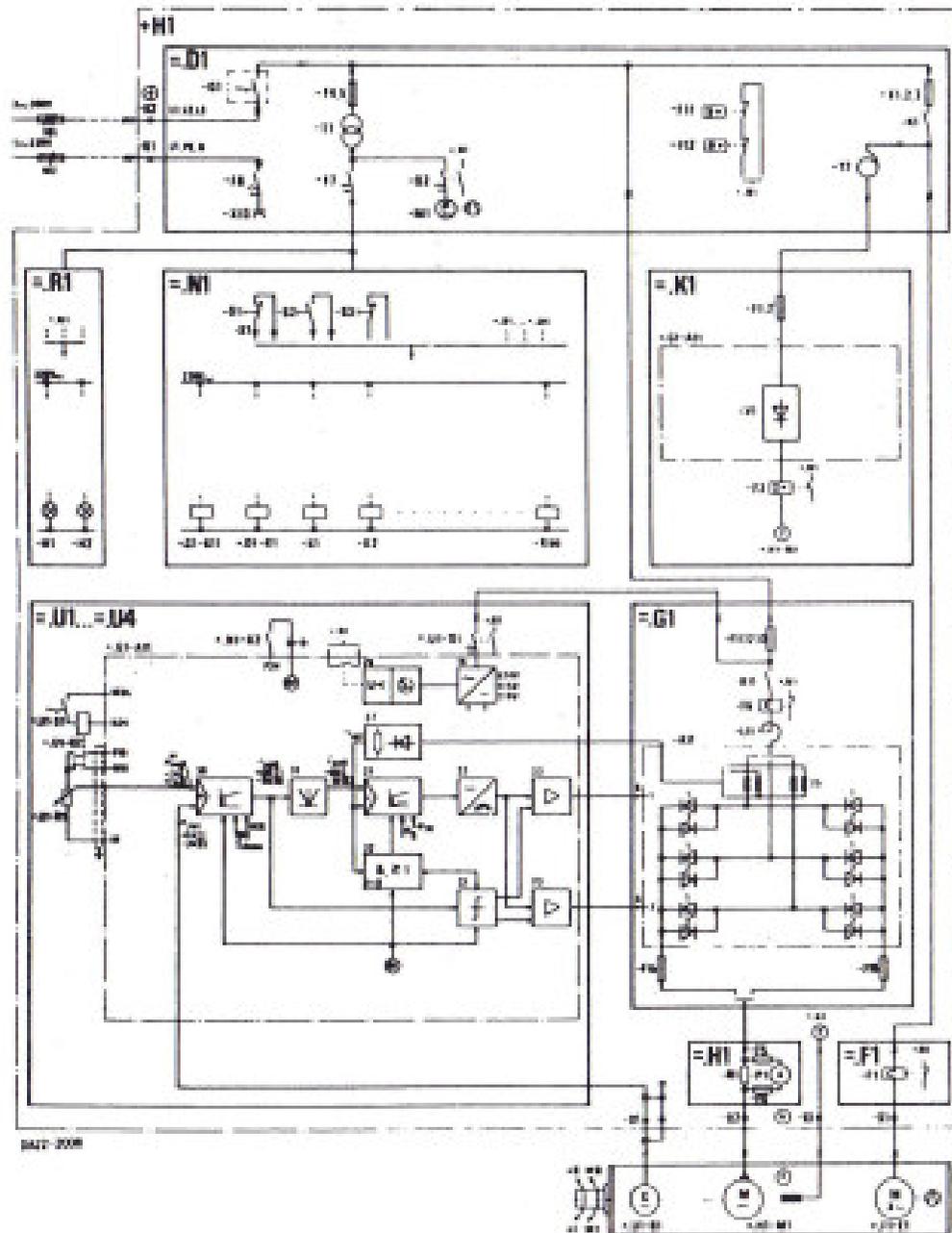
Bild 1.13-1 Drehzahlregelung nach dem Stromleitverfahren

Die Führung des Ankerstromes ist für die Vorgabe des Drehmomentes und im Hinblick auf die Begrenzung des Ankerstromes eine wichtige Aufgabe. Sie wird hier von einer eigenen, dem Drehzahlregelkreis unterlagerten Regelschleife erfüllt. Der übergeordnete Drehzahlregler gibt dabei an seinem Ausgang den Sollwert für den unterlagerten Stromregelkreis vor. Zur Begrenzung des Ankerstromes wird die Ausgangsspannung des Drehzahlreglers auf die den zulässigen Extremwerten des Ankerstromes entsprechenden positiven und negativen Spannungswert begrenzt.

Bei den Thyristorstromrichtern als Leistungsstellglied handelt es sich um eine kreisstromfreie Gegenparallelschaltung. Zwei vollgesteuerte Drehstrombrücken werden hier direkt gegenparallel geschaltet. Beide Stromrichter sind völlig gleich aufgebaut. Jeder Stromrichter ist eine komplette Schaltung zugeordnet. Da keine strombegrenzende Drosseln im Kreisstrompfad vorhanden sind, muss jederzeit sichergestellt sein, dass immer nur eine Brücke Zündimpulse erhält und Strom führt. Falls im Störfall beide Stromrichter gleichzeitig gezündet werden, könnte ein hoher Kurzschlussstrom über beide Brücke fließen, der die Thyristoren zerstören würde. Daher sind zum Schutz der Thyristoren Sicherungen vorhanden.

SIMOREG-Schrankgerätee

Übersichtsschaltplan



Legende

Schaltschrank

+ H1 SIMOREG-Schrankgerät

Funktionsgruppen:

- D1 Drehstromverteilung
- F1 Motor-Lüfter
- G1 Stromrichter-Leistungsteil
- H1 Motor-Ankerkreis
- K1 Erregung
- N1 Steuerung
- O1 Überwachung
- R1 Messung
- U1 bis U4 Steuerungs- und Regelungsteil

Kennzeichnung der Betriebsmittel, die in den Funktionsgruppen enthalten sind: siehe Tabelle „Aufbau der SIMOREG-Schrankgeräte“

- 11 Taster „Störungsqutrierung“
- 12 Leuchtdioden für Störungsanzeigen
- 13 Speicherglieder für Überwachungseingänge
- 14 Überlast-Überwachung (thermisches Abbild)
- 15 Stromwert-Normierung
- 16 Sammelmeldung „Störung“
- 17 Erregerstrom-Überwachung
- 18 Stromversorgung für Regelung
- 19 Stromsollwert-Potentiometer
- 20 Stromregler
- 21 Stromregler mit Adaption
- 22 Steuersatz
- 23 Steuersatz-Endstufe
- 24 Thyristor-Stromrichter für Erregerkreis
- 25 Wandler für Stromwert-Erfassung
- 26 Netzüberwachung
- 27 Stromwert-Anpassung
- 28 Relais für Sollwert-Umschaltung
- 29 Analoges Hochlaufgeber
- 30 Drehzahlregler
- 31 Betragbildner
- 32 Reglerführung/Logik
- 33 Kommandostufe
- 34 Ausgangsverstärker
- 35 Drehzahl-Grenzwertmelder
- 36 Sicherungen für Erregergleichrichter
- 37 Thyristor-Lüfter/Thermofühler-Kontakt

BILD 1.13-2 SIMOREG Vierquadrantenantrieb in Kreisstrom - freier Gegenparallelschaltung.



Das einwandfreie Arbeiten der kreisstromfreien Gegenparallelschaltung ist nur mit einer sog. Umschaltautomatik möglich, die allein den jeweils aktiven Stromrichter mit Zündimpulsen versorgt, die Gegengruppe durch eine Impulssperre aber zuverlässig abschaltet. Diese Impulsumschaltung wird mit elektronischen Mitteln verwirklicht.

Die vorgegebene Struktur erlaubt also eine Richtungsumkehr des Ankerstromes i_A bzw. des Drehmomentes d_M sowie der Drehzahl n der Gleichstrommaschine. Dies bedeutet, dass im Drehzahl – Drehmomenten – Diagramm alle vier Quadranten durchlaufen werden können (Vierquadrantenbetrieb).

In diesem Versuch wird ein Vierquadrantenantrieb der Firma Siemens mit der Bezeichnung SIMOREG eingesetzt. Die Prinzipschaltung ist in Bild 1.13-2 dargestellt. Neben der dort abgebildeten Regelung der Drehzahl ist außerdem eine Ankerspannungsregelung realisiert. Dazu wird die Ankerspannung über einen Potentialtrennwandler der Regelung als Istwert zurückgeführt. Der bei der Drehzahlregelung benutzte Drehzahlregler dient jetzt als Ankerspannungsregler.

1.14 Drehmomentrechner

Der im Versuch eingesetzte Drehmomentrechner wird zur Messung des Drehmomentes der Gleichstrommaschine verwandt. Dabei wird das an der Welle wirksame Drehmoment im statischen und dynamischen Belastungszustand vorzeichenrichtig erfasst. Neben der Bestimmung von Drehmomenten mit einer Pendelmaschine oder einer Messwelle erhält man damit eine weitere Messmethode. Ohne an dieser Stelle zu sehr in die Einzelheiten zu gehen kann man das Messprinzip allgemein folgendermaßen angeben:

Das an der Welle der Gleichstrommaschine wirksame Drehmoment ist:

$$d_{Mw} = d_{Me} - d_{Mo} - d_{Mz} - d_{Mb} \quad \text{mit}$$

d_{Mw}	Drehmoment an der Welle
d_{Me}	elektrisch erzeugtes Moment
d_{Mo}	Leerlaufmoment
d_{Mz}	Zusatzverlustmoment
d_{Mb}	Beschleunigungsmoment

Aus den Gleichungen der Gleichstrommaschine ergibt sich für das elektrische Moment:

$$d_{Me} = c_2 \cdot \varphi_f \cdot i_A$$

Mit $\varphi_f = \frac{e_A}{c_1 \cdot n}$ und $\frac{c_2}{c_1} = \frac{1}{2 \cdot \pi}$ folgt daraus:

$$d_{Me} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{e_A}{n} \cdot i_A \quad \text{wobei}$$

e_A	die EMK
n	die Drehzahl
i_A	der Ankerstrom

der Maschine sind.

Das Leerlaufmoment wird aus dem Leerlaufstrom I_{A0} berechnet (Leerlaufversuch).

Das Zusatzverlustmoment wird in der Fabrik ermittelt und im Drehmomentrechner als Kurvenzug abgespeichert.

Das Beschleunigungsmoment $d_{Mb} = 2 \cdot \pi \cdot \theta \cdot \frac{dn}{dt}$ wird ohne Kenntnis der absoluten Größen durch einen Nullabgleich mit Hochlauf der unbelasteten Maschine berücksichtigt.

Somit kann das Wellenmoment d_{Mw} durch die Messung von Ankerstrom i_A , der Drehzahl n und der EMK e_A rechnerisch bestimmt werden.

Diese Aufgaben – Messung und Rechnung – führt der Drehmomentrechner durch. Dabei werden die analogen Größen i_A , n und e_A über einen Analog – Digital – Umsetzer (ADU) einem Mikroprozessor (Intel 8086) zur weiteren Verarbeitung angeboten.



2. Versuchsvorbereitung

- 2.1 Warum werden bei Turbogeneratoren nur etwas 2/3 des Läuferumfangs bewickelt?
- 2.2 Warum sind die magnetischen Widerstände in der Längs- und Querachse verschieden groß?
- 2.3 Was versteht man unter Ankerrückwirkung?
- 2.4 Bei welcher Belastung der Synchronmaschine wird ihr Luftspaltfeld infolge der Ankerrückwirkung verstärkt (VZS) ?
- 2.5 Warum sind die Kurzschlussströme vom Leerlauf aus und vom Nennbetrieb heraus verschieden groß?
- 2.6 Zur Synchronisation einer SM mit dem Netz kann die Dunkelschaltung verwendet werden. Erläutern Sie die Schaltung und geben Sie die Bedingungen an, die erfüllt sein müssen, damit alle Lampen dieser Schaltung verlöschen.
- 2.7 Der Arbeitspunkt der SM am starren Netz kann beeinflusst werden
- a) über die Erregung
 - b) über das Lastmoment.
- Wie muss man vorgehen, um einen vorgegebenen Arbeitspunkt mit 2 Einstellungen zu erreichen (Ausgangspunkt: maximaler Erregerstrom, unbelastete Maschine).
- Beispiel: Es soll eingestellt werden:
- Scheinleistung $S = 2,5 \text{ kVA}$ generatorisch,
 $\cos\varphi = 0,8$ kapazitiv (VZS)

Wie groß ist bei diesem Arbeitspunkt der Wattmeter – Ausschlag?



Hinweis zur Versuchsdurchführung

Vor Beginn der Versuchsdurchführung befaße man sich gründlich mit der Versuchsanlage, d.h. Schaltplan, Verdrahtung, und Daten der Synchronmaschine.

3. Versuchsdurchführung

3.1 Allgemeines

- a) Die Synchronmaschine (SM) ist mit einer fremderregten Gleichstrommaschine (GM) mechanisch gekuppelt. Die GM, die einen Umkerstromrichter in kreisstromfreier Gegenparallelschaltung angeschlossen ist, wird während des Versuches verwendet als:
 - Antriebsmaschine (Gleichstrommotor) für den generatorischen Betrieb der SM.
 - Belastungsmaschine (Gleichstromgenerator) für den motorischen Betrieb der SM.Belastungsänderungen der SM werden über die Drehzahlregelung (Veränderung des Sollwerts der Drehzahl der GM) vorgenommen.
- b) Der fertig vorbereitete Versuchsaufbau ist anhand des beigefügten Schaltplans zu überprüfen und evtl. zu ergänzen.
- c) Bei den Messungen 3.3 bis 3.5 wird die SM mit der GM angetrieben und ist nicht mit dem Netz verbunden.

3.2 Inbetriebnahme des Versuchsaggregates (im Beisein des Betreuers)

Bei der Inbetriebnahme des Versuchsaggregates muss unbedingt die Reihenfolge der Schalthandlungen eingehalten werden.

3.2.1 Einschalten

- a) Stromrichter in Betrieb setzen
 - Netzschalter Q5 in Stellung „Ein“ schalten
 - Potentiometer „Feldsteller“ in Position „0“ stellen
 - Potentiometer „Drehzollsollwert“ in Position „0“ stellen – Linksanschlag
 - Hauptschalter des Stromrichters in Stellung „Ein“ schalten
 - Taster „Antrieb Ein“ betätigen
 - Erregung der GM (mit Feldsteller) auf 0,8 A einstellen
 - Mit dem Potentiometer „Drehzollsollwert“ gewünschte Drehzahl einstellen
 - Lüfter der SM mit Q6 auf minimale Drehzahl einstellen



b) SM ans Netz schalten

- Mit der GM wird die SM auf die synchrone Drehzahl hochgefahren
- Schalter Q1 und Motorschutzschalter Q2 einschalten
- Umformer U1 einschalten
- Erregung der SM auf $\approx 1 A$ einstellen
- Schalter Q3 und Q4 einschalten
- Synchronisation durchführen
- Wenn alle Synchronisationsbedingungen erfüllt sind Taster S1 betätigen.

3.2.2 Ausschalten

Die Schalthandlungen beim Ausschalten müssen in umgekehrter Reihenfolge durchgeführt werden.

a) Abschalten der SM

- SM entlasten:
 - a) Wirkleistung durch Verringerung des Antriebsmomentes (Belastungsmomentes).
 - b) Blindleistung durch Änderung des Erregerstromes.
- Taster S2 betätigen
- Erregung der SM $-I_f = 0 A$ einstellen
- Schalter Q3 und Q4 ausschalten
- Motorschutzschalter Q2 und Schalter Q1 ausschalten
- Lüfter der SM mit Q6 abschalten.

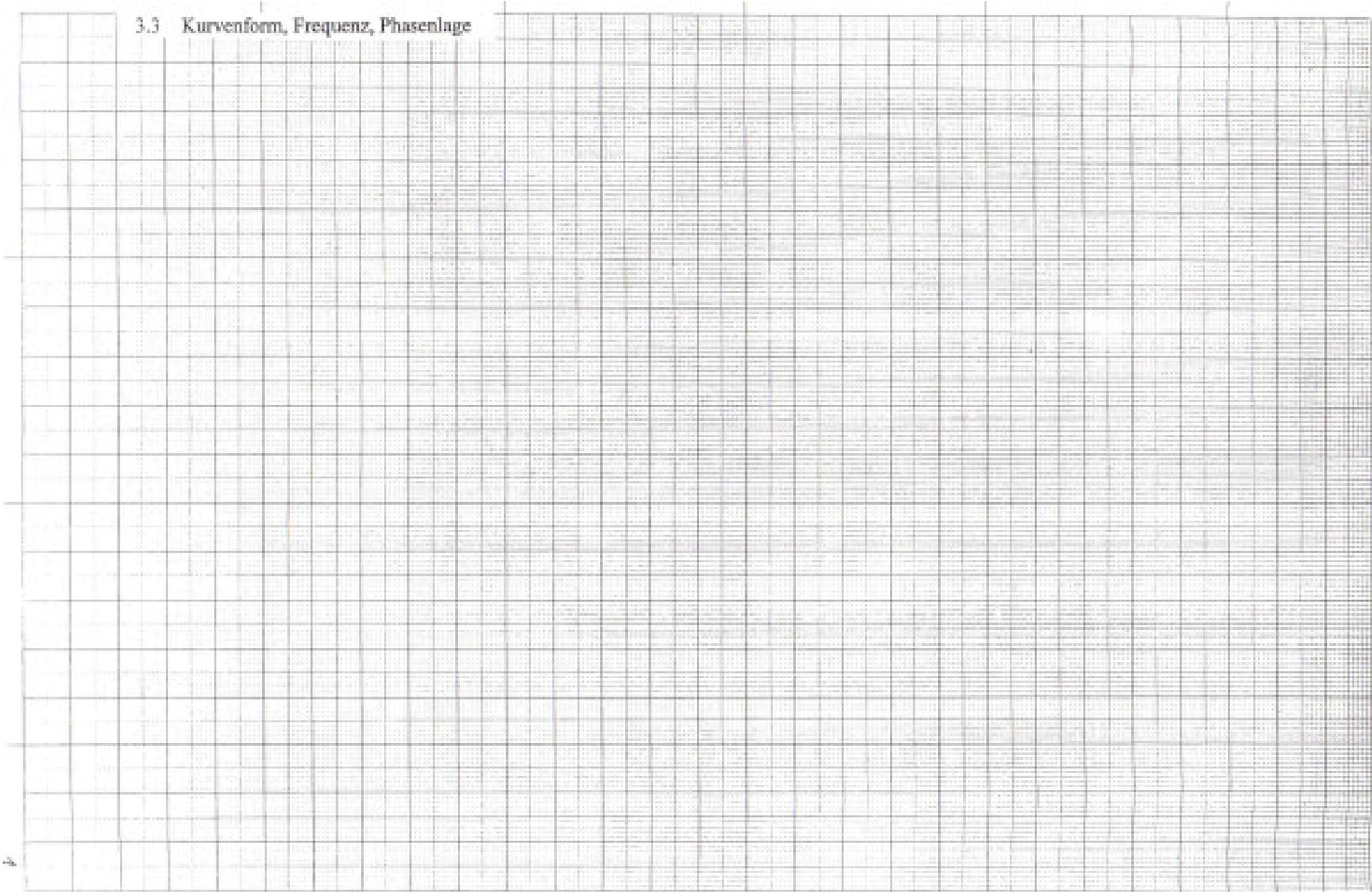
b) Stromrichter abschalten

- Potentiometer "Drehzahlsollwert" in Position "0" stellen
- Taster "Antrieb Aus" betätigen
- Potentiometer "Feldsteller" auf Linksanschlag stellen und einrasten
- Hauptschalter des Stromrichters und danach Netzschalter Q5 in Stellung "Aus" stellen.

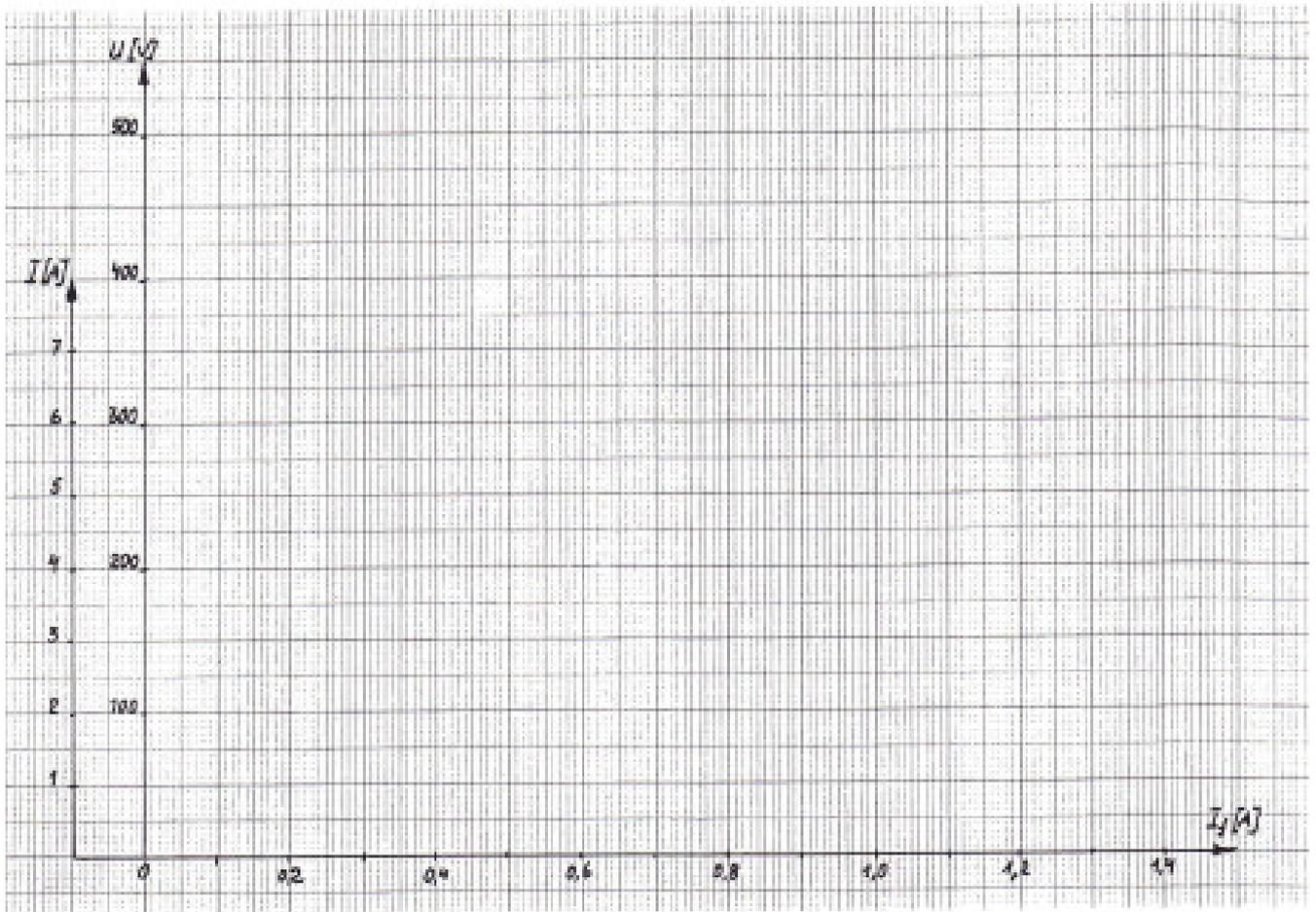
3.3 Kurvenform, Frequenz, Phasenlage

Mit Hilfe der GM wird die SM bis zu $n = 200 \text{ U/mim}$ hochgefahren und mit $I_f = 0,5 A$ erregt. Die drei Strangspannungen sind zu oszillographieren. Aus der Aufzeichnung sind Polpaarzahl, synchrone Drehzahl und die Phasenwinkel zwischen den Spannungen zu ermitteln.

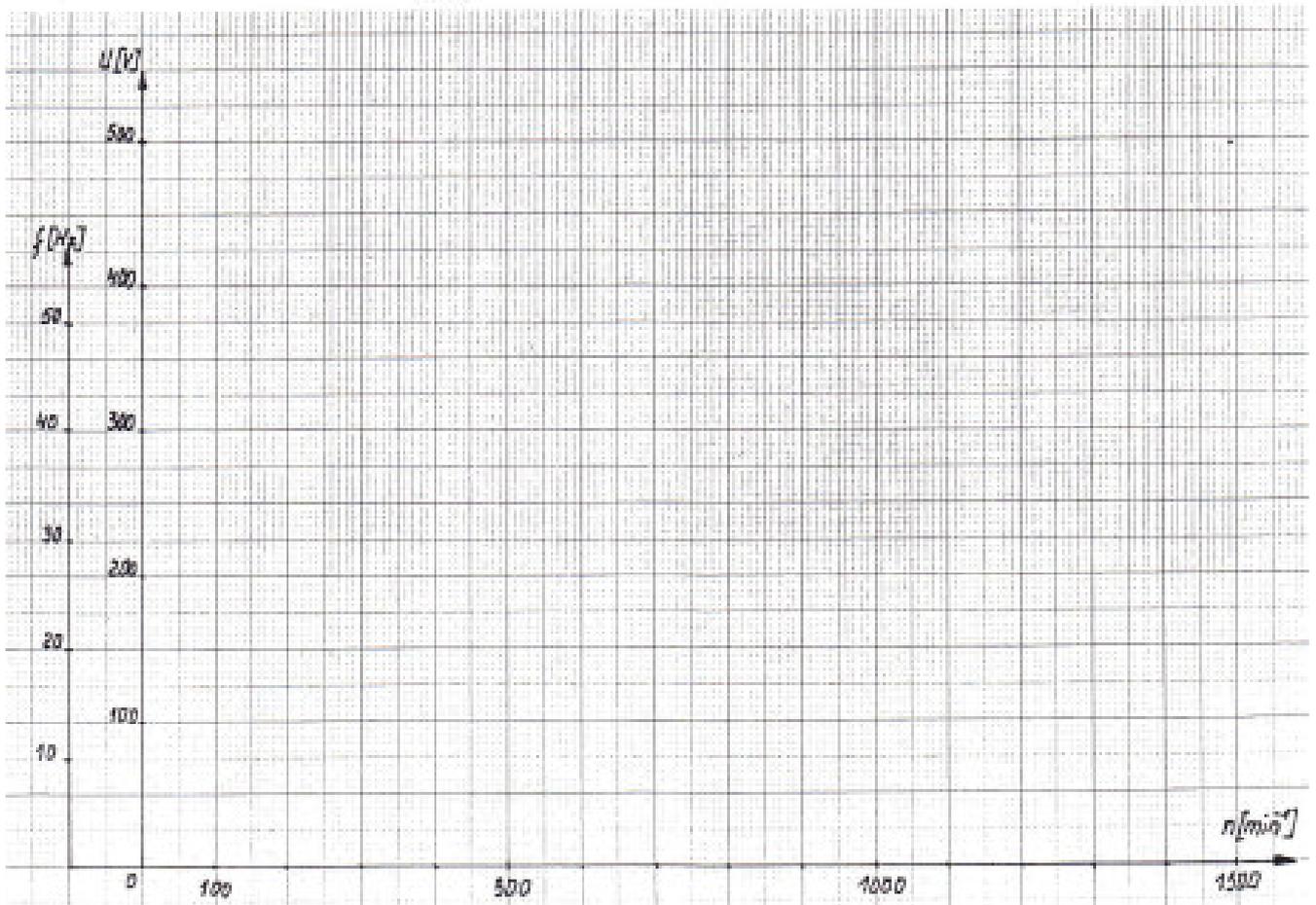
3.3 Kurvenform, Frequenz, Phasenlage



3.4a, 3.5



3.4b



3.5 Aufnahme der Kurzschlusskennlinie (dreisträngiger Kurzschluss)

Bei stillstehender SM einen dreisträngigen Kurzschluss in die vorhandene Verdrahtung der Anlage so einbauen, dass der kurzgeschlossene Stromkreis abgesichert ist (Stromwandler überbrücken). Danach ist die SM auf konstante synchrone Drehzahl zu bringen.

Verstellen: Mit Hilfe des Erregerstromes I_f (von 0 A bis 1,35 A) den Kurzschluss Strom I_K von Null bis $1,2 I_{1N}$

Messen: I_K , I_f (ca. 6 Messpunkte)

Auftragen: In das Diagramm der Leerlaufkennlinie $U = f(I_f)$

Ermitteln: Dauerkurzschlussstrom bei Leerlauferregerstrom $I_{K0} =$

Kurzschlussverhältnis $K_C =$

relat. Ankerreaktanz $x_{dges} =$

I_f	[A]						
I_K	[A]						

3.6 Synchronisation mit dem Netz

Die SM wird durch die Antriebsmaschine auf die synchrone Drehzahl hochgefahren. Die Synchronisationsbedingungen (Spannung, Frequenz, Phasenfolge, Phasenlage der zusammenschalteten Spannungssysteme müssen übereinstimmen) sind mit Hilfe der Synchronisationseinrichtung einzustellen. Die Zuschaltung zum Netz erfolgt nur im Beisein des Betreuers!

Hinweis: Bei allen folgenden Versuchen ist die SM mit dem Netz verbunden.



3.7 Belasten der SM am Netz

Die verschiedenen Betriebszustände der Synchronmaschine bei $P = 3 \text{ kW}$ (Generator, über- und untererregt; Motor, über- und untererregt) sind einzustellen. Die Anzeigen des Blindleistungs- und $\cos\varphi$ - Messers sind zu verfolgen.

- a) Erläutern Sie die Ergebnisse der einzelnen Betriebszustände!
- b) Frage: Wie muss die GM und die Erregung der SM vom Leerlauf ausgehend eingestellt werden, damit die SM dem Netz Wirkleistung entnimmt, jedoch Blindleistung in dieses abgibt?

Zeichnen Sie ein Zeigerdiagramm für diesen Betriebszustand im Erzeugerzählpfeilsystem (EZS) unter der Annahme $R = 0$.

Bei $\cos\varphi = 1$, 0,8 über- und untererregt ist U_1 und I_1 zu oszillographieren und in den Bericht einzubinden (Die Graphen können direkt auf einen USB-Stick gespeichert werden.)

3.8 Unerregte SM am Netz

Einstellen: Mit Hilfe von Antriebsmaschine und Erregung der SM ist der Belastungsstrom $I_1 = 0$ einzustellen. Im Anschluss daran wird der Erregerstrom der SM $I_f = 0$ eingestellt. Dabei ist darauf zu achten, dass keine Stromschwankungen im Erreger- und Ankerkreis auftreten.

Messen: Spannung U , Strom I

Berechnen: Es ist die relative Ankerreaktanz bei gesättigter SM unter Vernachlässigung des ohmschen Widerstands $x_{dges} = \frac{U}{I_1} \cdot \frac{I_1}{U_N}$ zu berechnen. Das Ergebnis ist mit dem von Messung 3.5 zu vergleichen.

$$I_f = 0 \text{ A} \quad U_{U-V} = \quad \text{V} \quad I = \quad \text{A} \quad x_{ges} =$$

3.9 Aufnahme der Regulierkurven

$I_f = f(I_1)$ für $\cos \varphi = 1, 0,8, 0$ bei Über- und Untererregung im Generatorbetrieb.

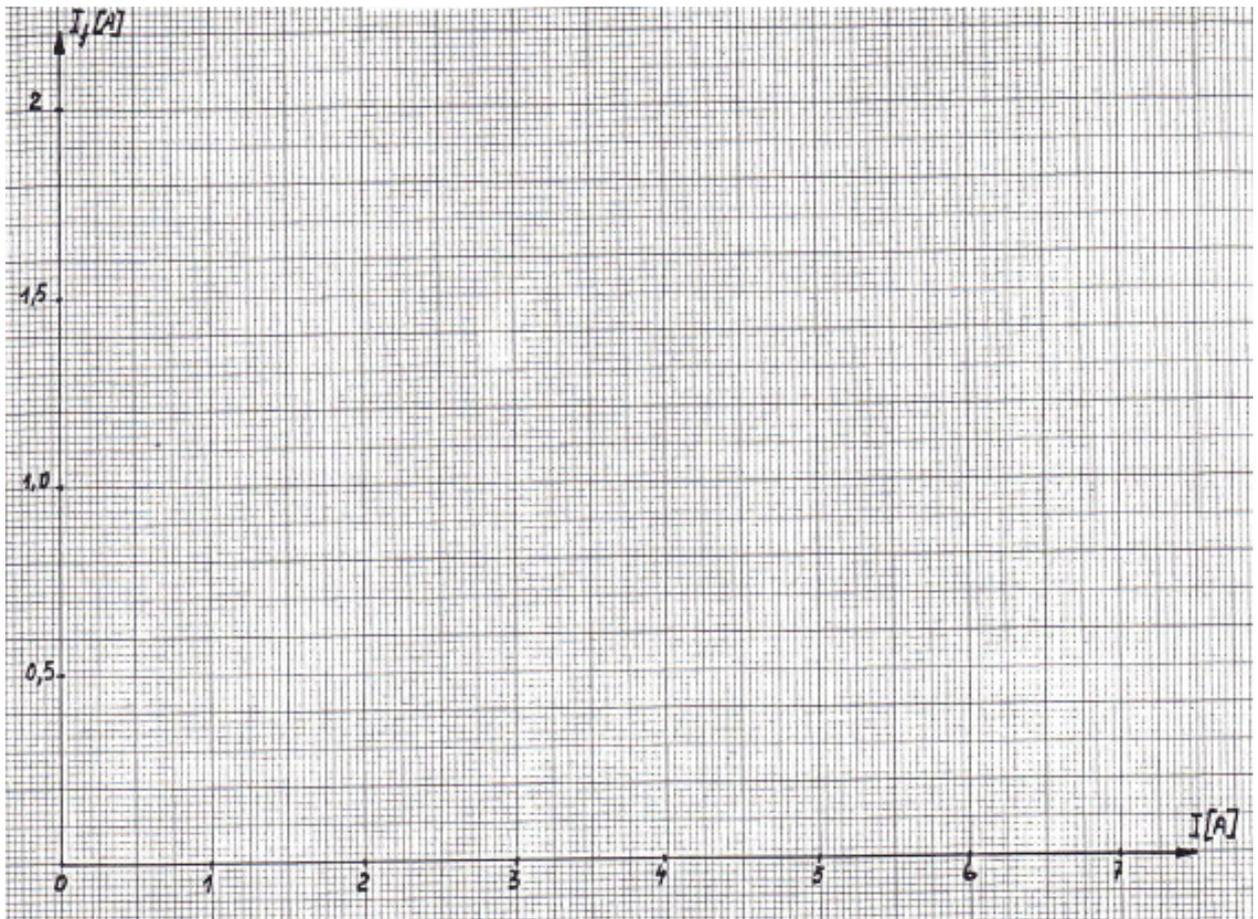
Konstanthalten: $\cos \varphi$

Verändern: Erregerstrom I_f der SM, Antriebsdrehmoment mit Hilfe der GM, von $I_1 = 0$ bis $I_1 = I_{1N}$

Messen: $U, \cos \varphi, I_1, I_f$ (ca. 6 Messpunkte für entspr. $\cos \varphi$)

Auftragen: $I_f = f(I_1)$ für $\cos \varphi = 1; 0,8; 0$ bei Über- und Untererregung

$\cos \varphi = 1$	I [A]						
	I_f [A]						
$\cos \varphi = 0,8$ übererregt	I [A]						
	I_f [A]						
$\cos \varphi = 0,8$ untererregt	I [A]						
	I_f [A]						
$\cos \varphi = 0$ übererregt	I [A]						
	I_f [A]						
$\cos \varphi = 0$ untererregt	I [A]						
	I_f [A]						



3.10 Aufnahme der V – Kurven (optional, wenn genügend Zeit)

Für den generatorischen Betriebszustand der SM sind die V – Kurven $I_1 = f(I_f)$ bei $P = \text{konst.}$ aufzunehmen (konstanter Wattmeterausschlag).

Konstanthalten: a) $P = 0$ $0,0 A \leq I_f \leq 2,2 A$
 b) $P = 0,5 \cdot P_N$ $0,6 A \leq I_f \leq 2,2 A$
 c) $P = P_N$ $1,0 A \leq I_f \leq 2,2 A$
 SN = 4,5 kVA bei $\cos\varphi = 0,8$

Messen: $U, P, Q, I_1, I_f, \cos\varphi$ (ca. 11 Messpunkte)

Auftragen: V - Kurven $I_1 = f(I_f)$ für $P = 0; 0,5 P_N; P_N$

Hinweis: Die Wirkleistung P ist bei $\cos\varphi = 1$ einzustellen

Aufnahme der V-Kurven

a) $P = 0$

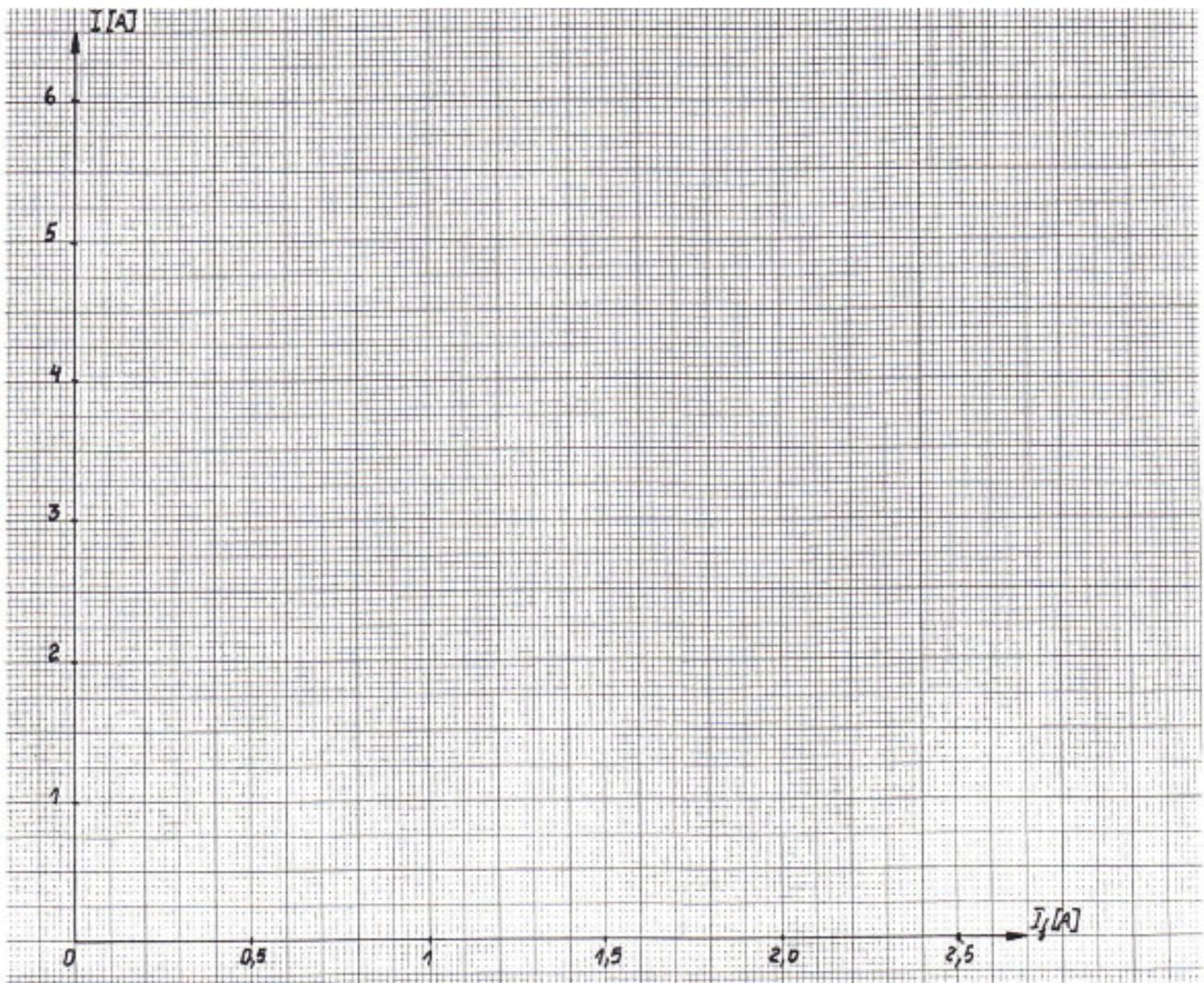
		untererregt						übererregt				
I	[A]											
Q	[kVAr]						ca. 0					
I_f	[A]	0										2,2

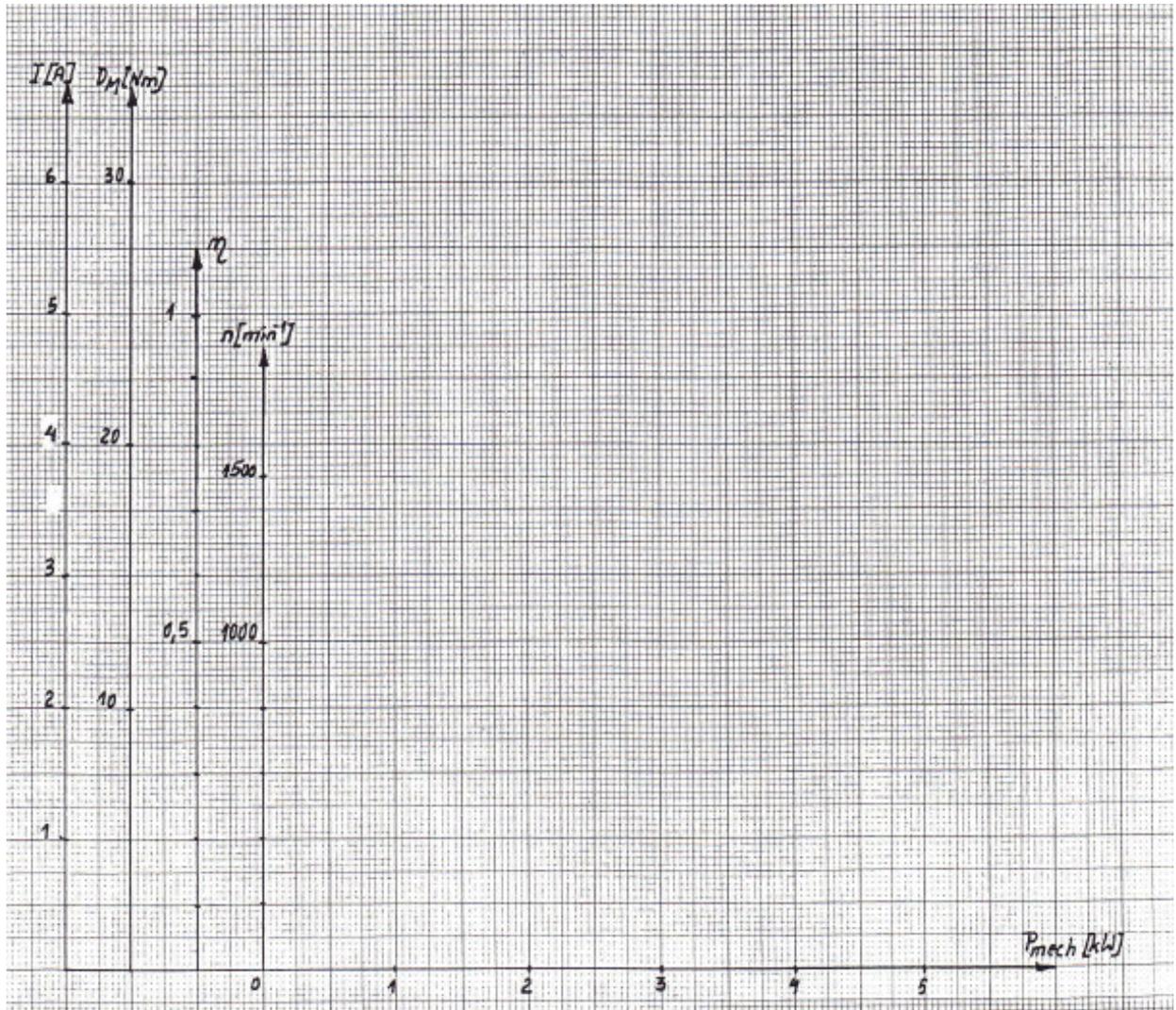
c) $P = 0,5 \cdot P_N$

		untererregt						übererregt				
I	[A]											
Q	[kVAr]						0					
I_f	[A]	0,6										2,2
$\cos\varphi$	-						1					

d) $P = P_N$

		untererregt						übererregt				
I	[A]											
Q	[kVAr]						0					
I_f	[A]	1,1										2,2
$\cos\varphi$	-						1					





3.12 Drehmomentkennlinie $D_M = f(\vartheta)$

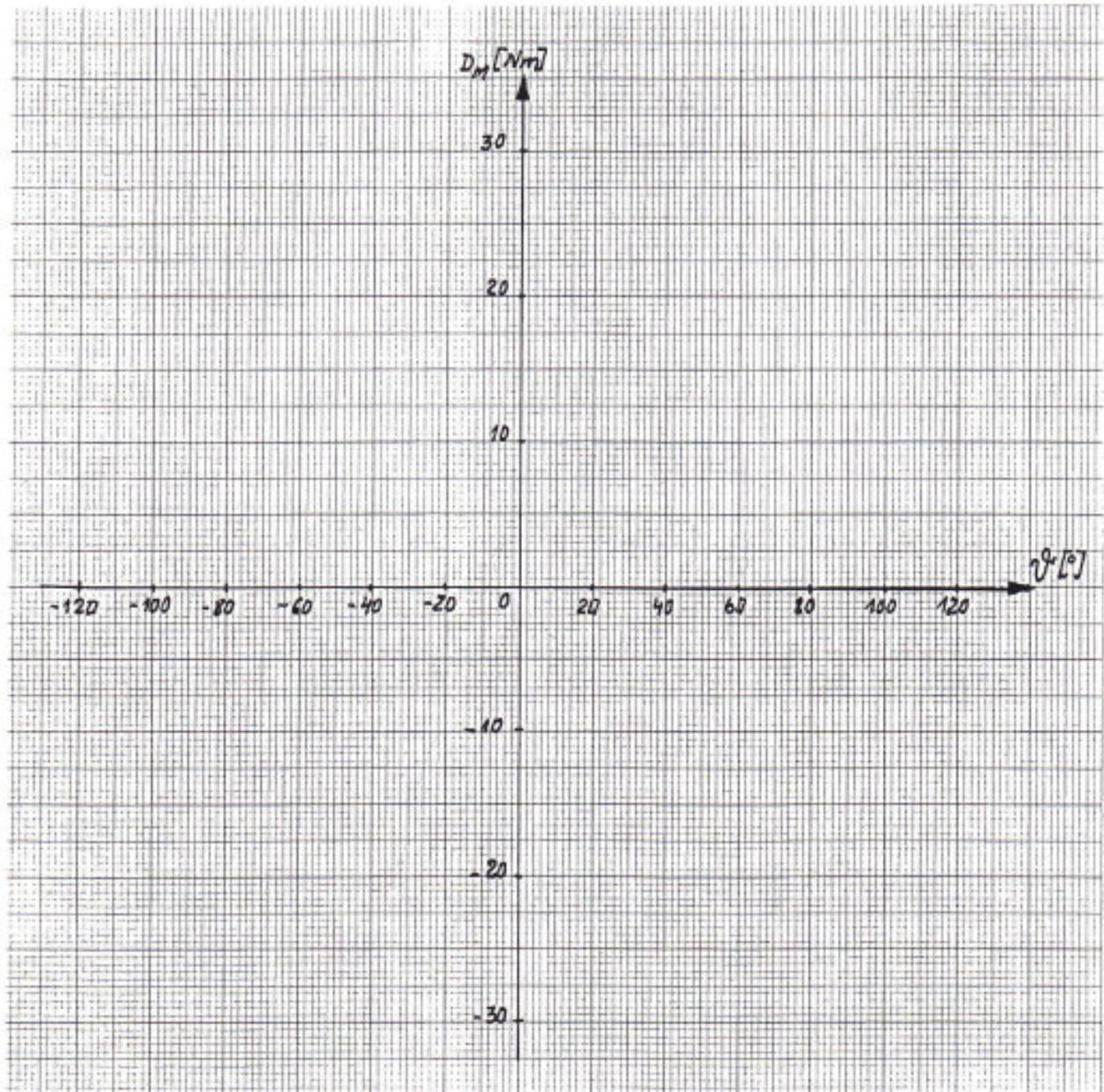
Die SM ist mit $I_f = 1,2 A$ zu erregen und so anzutreiben, dass $P = 0$ wird. Die auf der SM angebrachte Skala ist mit dem Stroboskop zu beleuchten und der Zeiger auf $\vartheta = 0^\circ$ einzustellen. Anschließend wird die SM bei unveränderter Erregung so angetrieben, dass sich ein Polradwinkel von $\vartheta \approx 60^\circ$ generatorisch ergibt. Von diesem Punkt aus wird die SM mit der GM entlastet und danach motorisch belastet bis ein Polradwinkel von $\vartheta = 60^\circ$ erreicht ist. Während dieses Vorgangs werden jede 10° (elektr.) das Drehmoment und der Polradwinkel abgelesen. Die Drehmomentkennlinie ist aufzuzeichnen und bei $\vartheta = 0^\circ$ zu linearisieren.

$D_{MN} = 25,5 Nm$ (13 Messpunkte)

Auftragen: $D_M = f(\vartheta)$

Hinweis: Polradwinkel über 45°_{el} sind mit der gebotenen Vorsicht einzustellen, da die SM außer Tritt fallen könnte. In diesem Fall ist die Belastung sofort zu verringern.

ϑ	[°]													
D_M	[Nm]													



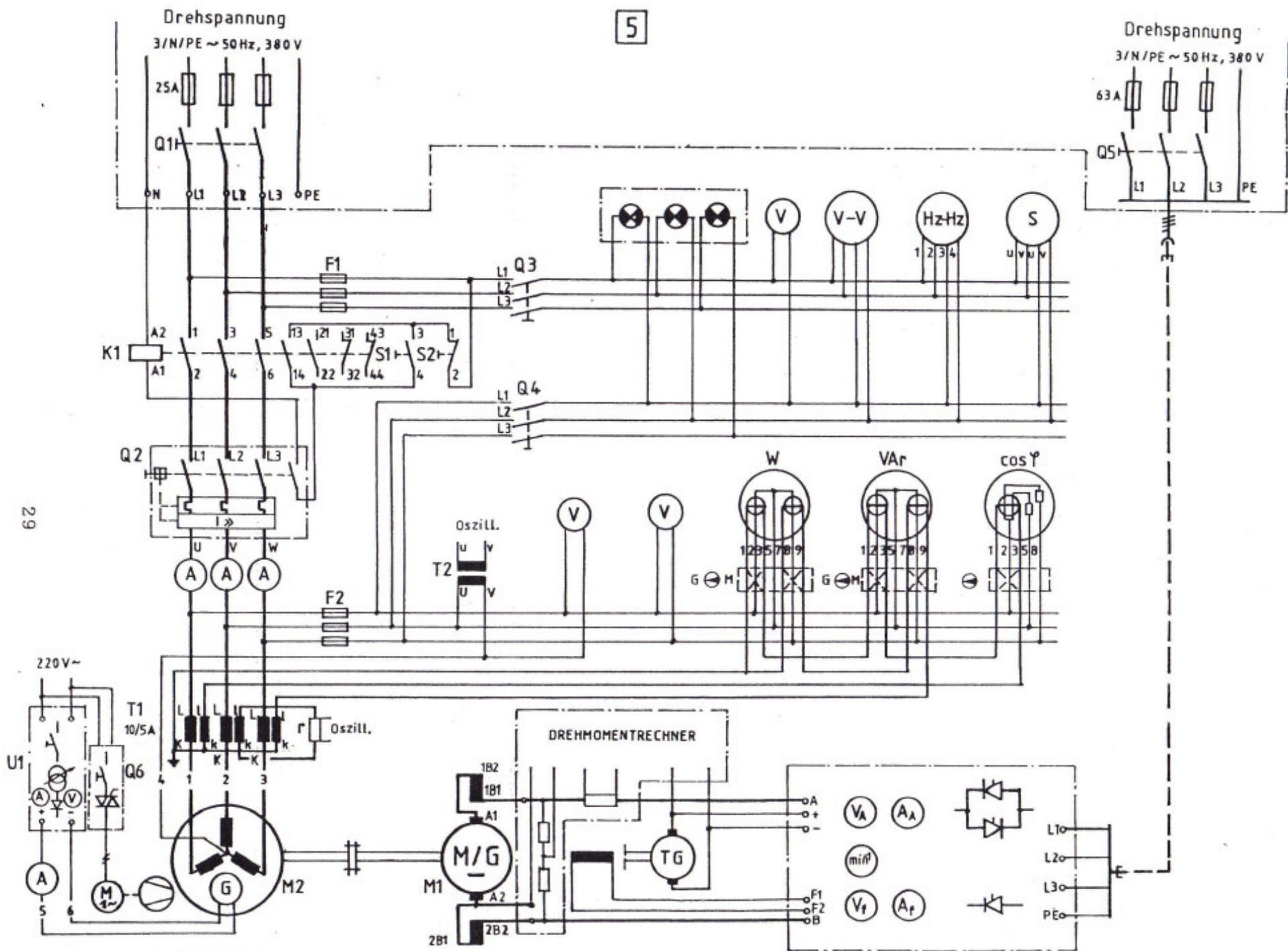


Bild 3-1
Schaltplan zum Praktikumsversuch: Synchronmaschine



Unterlagen für die Versuchsauswertung, die mit:

- Antworten zu den versuchsvorbereitenden Fragen
 - Berechnungen
 - qualitativer Analyse (Interpretation) der aufgenommenen Kennlinien
- ergänzt werden müssen