

FH Stralsund
Fachbereich Elektrotechnik
Praktikum im Fach
Elektrische Maschinen

Versuch EMM 4

Drehstrom-Synchronmaschine I

Versuchsziel: Aneignung von Kenntnisse über Wirkungsweise und Betriebsverhalten der Synchronmaschine als Generator im Inselbetrieb. Untersuchung des leerlaufenden Synchronmotors als Phasenschieber.

1. Theoretische Grundlagen

1.1. Allgemeines

Aufbau. Die Synchronmaschine besteht aus dem mit Gleichstrom erregten Induktor und dem die Ein- oder Mehrphasenwechselstrom-Wicklung tragenden Anker. Das Polsystem ist bei vier- und mehrpoligen Maschinen meistens mit ausgeprägten Polen (Schenkelpolmaschine) ausgerüstet, während die zweipoligen und teilweise die ganz großen vierpoligen Generatoren und Motoren einen trommelförmigen Induktor (Vollpolmaschine) besitzen. Man bezeichnet letztere als Turboläufer. Die Erregerwicklung der Einzelpolmaschine ist als konzentrische Wicklung auf den Polen aufgebracht; bei den Turboläufern ist sie dagegen verteilt angeordnet und in Nuten eingebettet. Außer bei Maschinen kleiner Leistung ist der Induktor als der sich drehende Teil der Maschine (Innenpolmaschine) ausgebildet, der im allgemeinen im Innern des Ankers umläuft und nur selten zur Erzielung eines besonders hohen Trägheitsmomentes (Dieselantrieb) außenrotierend angeordnet wird. Die Pole können massiv, ganz oder teilweise geblättert sein. Der aus Dynamoblechen aufgebaute Ständer trägt in Nuten die Ankerwicklung. In den Polschuhen befindet sich, sofern sie aus Blechen aufgebaut sind, häufig eine sog. Dämpferwicklung, die aus mehreren, den Schuh in axialer Richtung durchsetzenden Stäben aus Kupfer, Messing, Bronze oder Eisen gebildet wird, die durch Endringe auf beiden Seiten zu einem gemeinsamen Kurzschlußkäfig verbunden sind. Bei massiven Polschuhen fehlen die Stäbe; Kurzschlußringe um die Pole ergeben einen unvollkommenen, aber doch ausreichenden Käfig. Der aus Kupfer aufgebaute Kurzschlußkäfig dient der Dämpfung der aus irgendeinem Grund angeregten Pendelungen und vor allem bei einphasigen oder unsymmetrisch belasteten Generatoren zur Aufhebung des inversen Feldes. Der aus Widerstandswerkstoff ausgeführte Käfig ermöglicht den Selbstanlauf der Synchronmaschine als Motor auch gegen beachtliche Gegenmomente.

Leistungsbereich. Drehstrom-Synchrongeneratoren besitzen die größten Einheitsleistungen elektrischer Maschinen. Als Turbogeneratoren für Wärmekraftwerke werden derzeit zweipolige Generatoren mit Leistungen von ca. 1200 MVA bei 50 Hz und 21 kV Nennspannung gefertigt. Bei vierpoligen Maschinen liegen die Daten sogar bei 1700 MVA und 27 kV. Die größten Schenkelpolmaschinen mit senkrechter Wellenanordnung für Wasserkraftwerke erreichen über 800 MVA.

Als Industrieantrieb hat die Synchronmaschine durch die Entwicklung der Frequenzumrichter stark an Bedeutung gewonnen. Sie steht dadurch als drehzahlregelbarer Antrieb vom Bereich der Servomotoren bis zu den größten Leistungen zur Verfügung. Man verwendet sie als Antriebe für Hochofengebläse, Zementmühlen, Förderanlagen und Walzgerüste. Als Kleinstmotore werden sie z.B. für Uhren, Phonogeräte und in der Feinwerktechnik eingesetzt.

Erregerleistung. Für den Betrieb einer elektrisch erregten Synchronmaschine und speziell im Einsatz als Drehstromgenerator benötigt man für die Läuferwicklung einen einstellbaren Gleichstrom. Dieser wird durch das Erregersystem geliefert., dessen Regeleinrichtungen vor allem die Spannungshaltung und die Blindlaststeuerung im stationären und dynamischen Bereich (Laststöße) übernehmen. Die erforderlichen Erregerleistungen erstrecken sich für zweipolige Turbogeneratoren von ca. 3 kW bei 100 kVA bis etwa 4000 kW bei einer 1000 MVA-Maschine. Für vierpolige Generatoren im Grenzleistungsbereich beträgt der Erregerstrom über 10 kA. Als Erregertechnik sind heute die Erregung durch angekuppelte *Gleichstrom-Erregermaschine*, die *Stromrichtererregung*, die *bürstenlose Erregung*, die Erregung bei *selbsterregten, komponentierten Synchrongeneratoren* und die *Dauermagneterregung* kleinerer Synchronmaschinen gebräuchlich.

1.2. Betriebsverhalten der Vollpolmaschine

1.2.1. Erregerfeld und Ankerrückwirkung

Rotiert die durch einen Erregergleichstrom I_E gespeiste Läuferwicklung mit der Drehzahl n_1 im Ständer einer Synchronmaschine, so wird in jedem Wicklungsstrang des Ständers eine Spannung U_q induziert. Mißt man bei konstanter Antriebsdrehzahl $n = n_1$ die bei steigender Erregung induzierte Strangspannung, so erhält man wie bei einem Gleichstromgenerator eine Leerlaufkennlinie $U_q = f(I_E)$. Sie weicht mit beginnender Sättigung immer mehr von der Anfangssteigung ab, womit zur Erzeugung der Nennspannung U_N ein größerer Erregerstrom I_{E0} als bei rein linearem Verlauf der Kennlinie benötigt wird (Bild 1).

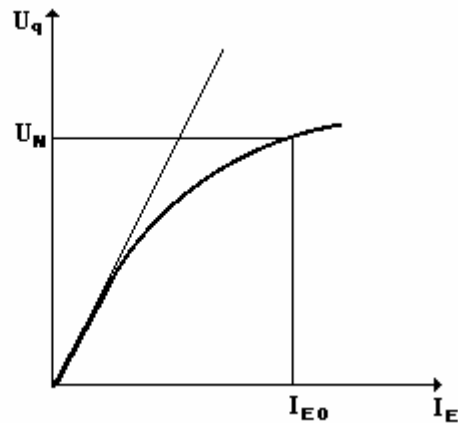


Bild 1 Leerlaufkennlinie eines Synchrongenerators

Ist die Synchronmaschine unbelastet, dann ist U_q gleich U_p . U_p ist eine reine Rechengröße und wird als ideelle Polradspannung bezeichnet. Wird die Synchronmaschine belastet, dann erzeugt die stromdurchflossene Ständerwicklung eine eigene Drehdurchflutung Θ_1 , die mit $n_1 = f_1/p$ synchron mit der Läuferdurchflutung rotiert. Die durch den Läufererregerstrom erzeugte Läuferdurchflutung Θ_E und die durch den fließenden Ständerstrom erzeugte Ständerdrehdurchflutung addieren sich zu einer gemeinsamen Drehdurchflutung

$$\Theta_\mu = \Theta_E + \Theta_1 \quad (1)$$

Das ist die im Luftspalt resultierend wirksame Magnetisierungsdurchflutung. Sie ist für den Drehfluß Φ_h der belasteten Maschine maßgebend, der in der Ständerwicklung jetzt die Spannung U_q induziert. Wie bei der Gleichstrommaschine wird auch bei der Synchronmaschine das Luftspaltfeld durch den Belastungsstrom beeinflusst. Da man die Drehstromwicklung der Synchronmaschine, die ja den Belastungsstrom führt, häufig auch als Ankerwicklung bezeichnet, nennt man den Einfluß von I_1 auf das resultierende Luftspaltfeld wieder Ankerrückwirkung.

Bezieht man I_1 auf die Erregerseite, so kann man anstelle der Addition der Drehdurchflutungen direkt die Stromzeiger zusammensetzen. Man erhält

$$\underline{I}_m = \underline{I}_E + \underline{I}'_1 \quad (2)$$

wobei

$$\underline{I}'_1 = g \cdot \underline{I}_1 \quad (3)$$

mit g als maschinenspezifische Konstante ist.

Bild 2 gibt die Zusammenhänge wider.

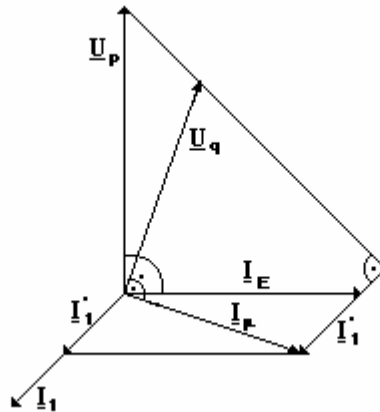


Bild 2 Zeigerdiagramm der induzierten Spannungen und Erregerströme im Generatorbetrieb

1.3. Zeigerdiagramm und Ersatzschaltung

Wie bei einem Asynchronmotor besteht auch bei der Synchronmaschine ein Unterschied zwischen der in der Ständerwicklung induzierten Spannung \underline{U}_q und der Klemmenspannung \underline{U}_1 als Folge der Spannungsabfälle an R_1 und $X_{1\sigma}$. Der Blindwiderstand $X_{1\sigma}$ erfasst dabei die Wirkung des gesamten Streuflusses, der von der Ständerdurchflutung erzeugt, jedoch nicht mit der Erregerwicklung verkettet ist.

Bild 3 zeigt eine übliche Ersatzschaltung für eine Vollpolmaschine.

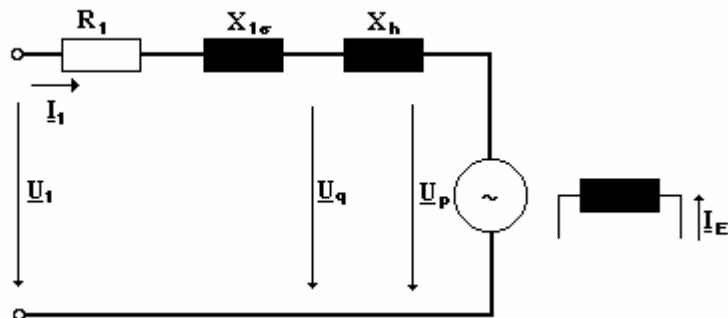


Bild 3 Ersatzschaltbild der Vollpolmaschine

Grundlage dieses Ersatzschaltbildes ist das komplette Zeigerdiagramm des Synchrongenerators bei ohmsch-induktiver Belastung (Bild 4).

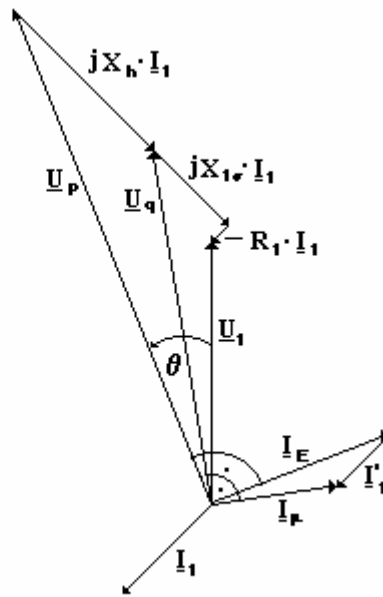


Bild 4 Vollständiges Zeigerdiagramm des Synchrongenerators bei ohmsch-induktiver Belastung

Die in der Ständerwicklung induzierte Spannung \underline{U}_q unterscheidet sich um den Spannungsabfall $\underline{I}_1 \cdot (R_1 + jX_{1\sigma})$ von der Klemmenspannung \underline{U}_1 . Senkrecht zu \underline{I}_E erhält man die Polradspannung \underline{U}_p die bei dieser Läufererregung nach der linearisierten Leerlaufkennlinie (Bild 1) ohne Ankerrückwirkung, d.h. im Leerlauf vorhanden wäre. Die Höhe der Polradspannung hängt von der Größe des Erregerstromes ab. Bei der ungesättigten, leerlaufenden Maschine besteht zwischen Erregerstrom und Polradspannung ein linearer Zusammenhang. Zwischen der Spannung \underline{U}_q und der Spannung \underline{U}_p besteht ein Spannungsfall über den Blindwiderstand X_h . Die über X_h abfallende Spannung $X_h \cdot \underline{I}_1$ ist die durch das Ständerdrehfeld erzeugte Selbstinduktionsspannung. X_h wird als Hauptreaktanz der Ständerwicklung bezeichnet. Zusammen mit der Ständerstreureaktanz $X_{1\sigma}$ bildet X_h die Synchronreaktanz $X_d = X_h + X_{1\sigma}$.

Über das Zeigerdiagramm läßt sich mit

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_p + \underline{I}_1 \cdot (R_1 + j(X_h + X_{1\sigma})) \quad (4)$$

die Spannungsgleichung der Synchronmaschine für die Ständerseite angeben. Aus dieser Gleichung kann man das Ersatzschaltbild nach Bild 3 aufstellen, das im Gegensatz zur Asynchronmaschine nur die Ständerwicklung umfaßt. Die Läuferwicklung braucht nicht berücksichtigt zu werden, da die durch das Läuferdrehfeld ständerseitig hervorgerufene Spannung \underline{U}_p in der Ersatzschaltung als Quellenspannung enthalten ist und das Ständerfeld wegen der fehlenden Relativbewegung in der Läuferwicklung ohne Wirkung bleibt.

2. Versuchsvorbereitungen

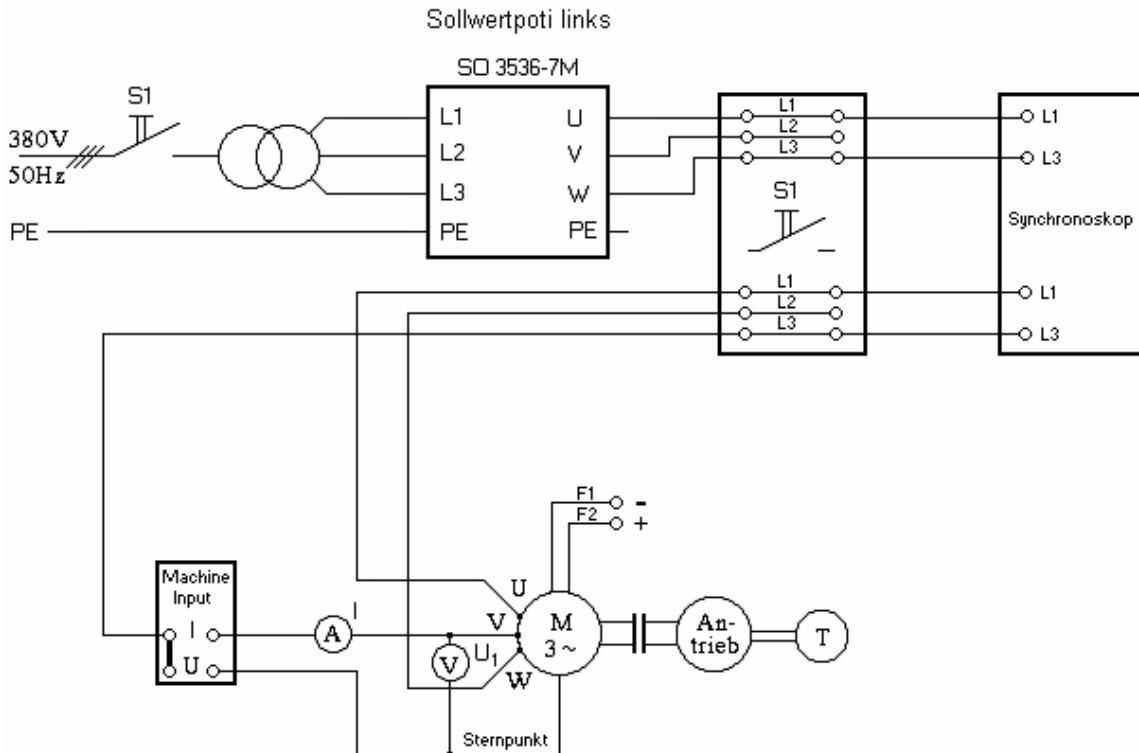
2.1. Kolloquiumsfragen

- 2.1. Charakterisieren Sie Vollpol- und Schenkelpol- sowie Innen- und Außenpolmaschinen!
- 2.2. Erklären Sie die Begriffe Dämpferkäfig und Ankerrückwirkung!
- 2.3. Geben Sie den Ersatzstromkreis für die Vollpolmaschine an, stellen Sie die Spannungsgleichungen auf und zeichnen Sie das Zeigerdiagramm für einen ohmsch-induktiven Belastungsfall!
- 2.4. Entwickeln Sie die Stromortskurve der Synchronmaschine aufgrund des vereinfachten ESB!
- 2.5. Wovon hängt das Drehmoment einer Synchronmaschine hauptsächlich ab?
- 2.6. Erläutern Sie die Begriffe "Polradspannung", "Polradwinkel" und "Erregergrad"!
- 2.7. Was verstehen Sie unter Spannungsänderung eines im Einzelbetrieb arbeitenden Synchrongenerators beim Übergang von Nennlast auf Leerlauf?
- 2.8. Diskutieren Sie das Blindleistungsverhalten einer Synchronmaschine!
- 2.9. Wie funktioniert der Phasenschieberbetrieb?
- 2.10. Wie erfolgt die Wirkleistungsübernahme bzw. -abgabe einer am Netz leerlaufenden Synchronmaschine?
- 2.11. Welche Synchronisierungsbedingungen in welcher Reihenfolge sind beim Zuschalten einer Synchronmaschine an das starre Netz einzuhalten? Welche meßtechnischen Verfahren sind dabei üblich?
- 2.12. Erläutern Sie die Vorgehensweise beim Leerlauf- und Kurzschlußversuch sowie deren Auswertung! Was verstehen Sie unter Belastungs- und Regelkennlinien einer Synchronmaschine?
- 2.13. Geben Sie Anwendungsbeispiele für Synchronmaschinen an!

3. Versuchsaufgaben

3.1. Versuchsaufbau

Bauen Sie folgende Versuchsschaltung auf:



- Beachten Sie: 1. Anstelle des SO 3536-7M kommt der Mitsubishi-Umrichter S 500 zum Einsatz. Schalten Sie den Umrichter in Linkslauf (P 17 auf „1“).
2. Schalten Sie die Synchronmaschine in DREIECK!

3.2. Durchzuführende Versuche

3.2.1. Synchronmaschine als fremdgesteuerter Motor am Frequenzumrichter

3.2.1.1. Aufnahme der Drehzahl-Drehmoment/Wellenleistung-Kennlinien $n, P_2 = f(M, f_1)$

Laden Sie die Datei *Motor_Frequenzsteuerung.asma* aus dem Ordner EMA4. Löschen Sie eventuell vorhandene Diagramme.

Versorgen Sie die Polradwicklung der Synchronmaschine mit dem Nennerregerstrom von 0,6 A. Achten Sie auf die Polarität laut Zeichnung. Schalten Sie den Schalter S1 ein.

Versorgen Sie den Frequenzumrichter mit Spannung und geben Sie, nachdem Sie sich davon überzeugt haben, das das Sollwertpoti auf 0 Hz steht, die Pulse mittels drücken der Taste RUN frei.

Stellen Sie durch Rechtsdrehen des Sollwertpotis eine Frequenz von 20 Hz ein. Der Läufer des Motors sollte entsprechend der Ständerdrehfeldfrequenz drehen.

Schalten Sie in der Software die Servobremse mittels Klick auf ► ein.

Belasten Sie den Synchronmotor mittels Klick auf die nebenstehende Schaltfläche.

Wiederholen Sie die Messreihen für eine Ständerdrehfeldfrequenz von 50 Hz und 70 Hz.

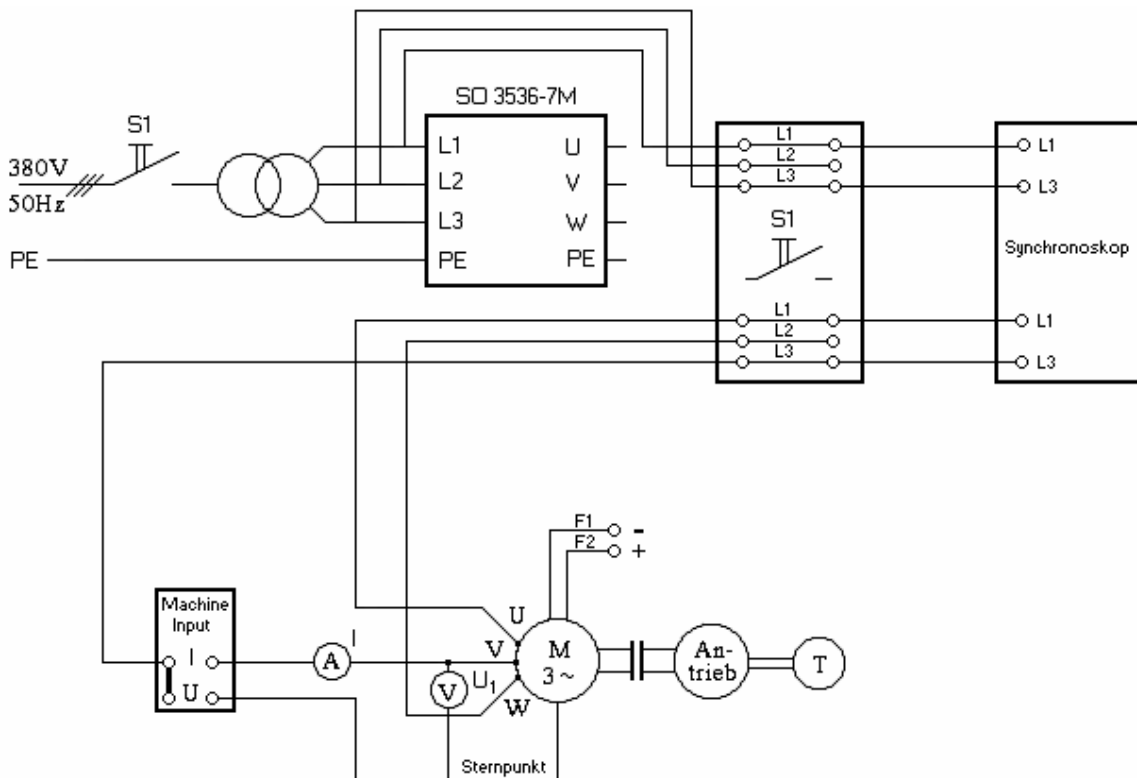
Schalten Sie nach erfolgreicher Aufnahme der Kennlinien in der Software die Servobremse mittels Klick auf ► wieder aus und setzen Sie den Synchronmotor still. Drücken Sie am Frequenzumrichter die Taste STOP/RESET

Schalten Sie den Schalter S1 wieder aus!

Stellen Sie sicher, das zum Ausdrucken der Kennlinienschar das Blatt auf Querformat und die Druckqualität auf Entwurf eingestellt sind. Drucken Sie die Kennlinien aus.

3.2.2. Synchronmaschine als Synchrongenerator am starren Netz

Bauen Sie folgende Versuchsschaltung auf:



Beachten Sie: 1. Anstelle des SO 3536-7M kommt der Mitsubishi-Umrichter S 500 zum Einsatz.

Schalten Sie den Umrichter in Linkslauf (P 17 auf „1“).

2. Schalten Sie die Synchronmaschine in STERN!

3.2.2.1. Wirkleistungsabgabe

Laden Sie die Datei *Generator_Wirkleistung.asma* aus dem Ordner EMA4. Löschen Sie eventuell vorhandene Diagramme.

Versorgen Sie die Polradwicklung der Synchronmaschine mit dem Nennerergerstrom von 0,6 A. Achten Sie auf die Polarität laut Zeichnung.

Schalten Sie in der Software die Servobremse mittels Klick auf ► ein.

Stellen Sie in das dafür vorgesehene Eingabefeld ein Drehmoment von 1 Nm ein. Bestätigen Sie diese Eingabe und warten Sie den Hochlauf des Antriebs ab.

Stellen Sie die Synchronisierungsbedingungen her und schalten Sie die Synchronmaschine mittels S1 an das starre Netz.

Stellen Sie den Erregerstrom auf seinen Nennwert von 0,6 A.

Belasten Sie den Generator durch Klick auf die Belastungsschaltfläche in der Software.

Schalten Sie nach erfolgreicher Aufnahme der Kennlinien in der Software die Servobremse mittels Klick auf ► wieder aus und trennen Sie den Synchrongenerator mittels S1 vom Netz.

Stellen Sie sicher, dass zum Ausdrucken der Kennlinienschar das Blatt auf Querformat und die Druckqualität auf Entwurf eingestellt sind. Drucken Sie die Kennlinien aus.

3.2.2.2. Blindleistungsabgabe bzw. -aufnahme

Laden Sie die Datei *Generator_Blindleistung.asma* aus dem Ordner EMA4. Löschen Sie eventuell vorhandene Diagramme.

Versorgen Sie die Polradwicklung der Synchronmaschine mit dem Nennerergerstrom von 0,6 A. Achten Sie auf die Polarität laut Zeichnung.

Schalten Sie in der Software die Servobremse mittels Klick auf ► ein.

Stellen Sie in das dafür vorgesehene Eingabefeld ein Drehmoment von 3 Nm ein. Bestätigen Sie diese Eingabe und warten Sie den Hochlauf des Antriebs ab.

Stellen Sie die Synchronisierungsbedingungen her und schalten Sie die Synchronmaschine mittels S1 an das starre Netz.

Stellen Sie den Erregerstrom auf 0,0 A. Nehmen Sie die aktuellen Werte mittels Klick auf den Fotoapparat auf.

Wiederholen Sie diese Messungen bis zu einem Erregerstrom von 1,0 A in 0,1 A-Schritten

Schalten Sie nach erfolgreicher Aufnahme der Kennlinien in der Software die Servobremse mittels Klick auf ► wieder aus und trennen Sie den Synchrongenerator mittels S1 vom Netz.

Stellen Sie sicher, dass zum Ausdrucken der Kennlinienschar das Blatt auf Querformat und die Druckqualität auf Entwurf eingestellt sind. Drucken Sie die Kennlinien aus.

3.3. Versuchsauswertung

3.3.0. Diskutieren Sie die aufgenommenen Kennlinien.

4. Versuchseinrichtung

Als Versuchsobjekt steht ein Maschinensatz zur Verfügung, bestehend aus Drehstrom-Synchronmaschine Typ SE 2662-5M und einer Servobremse Typ SE 2663-6E.

Daten des Drehstromasynchronmotors:

$U_1 = Y \ 380 \text{ V}$
 $I_1 = 2,8/1,6 \text{ A}$
 $S = 1,0 \text{ kW}$
 $P = 0,8 \text{ kW}$
 $U_{\text{err}} = 220 \text{ V}$
 $I_{\text{err}} = 0,6 \text{ A}$
 $n = 1500 \text{ min}^{-1}$
 $\cos \varphi = 0,8 - 1 - 0,8$

Daten der Servobremse:

$U = 390 \text{ V}$
 $I = 9,1 \text{ A}$
 $P = 3,9 \text{ kW}$
 $n = 3455 \text{ min}^{-1}$
 $M = 10,8 \text{ Nm}$
 $f = 120 \text{ Hz}$

Die Servobremse dient in Verbindung mit einem digitalen Steuergerät dem Antrieb bzw. der Belastung der Versuchsmaschine!

5. Literaturverzeichnis

- 5.1. Müller, G.: Elektrische Maschinen - Grundlagen, Aufbau und Wirkungsweise
Berlin: Verlag Technik 1989 (6. Auflage)
- 5.2. Müller, G.: Elektrische Maschinen - Betriebsverhalten rotierender elektrischer Maschinen
Berlin: Verlag Technik 1990 (2. Auflage)
- 5.3. Philippow, E.: Taschenbuch der Elektrotechnik Bd. 5
Berlin: Verlag Technik 1988 (8. Auflage)
- 5.4. Fischer, R.: Elektrische Maschinen
München, Wien: Carl Hanser Verlag 1989 (7. Auflage)