

M5: Synchronmaschine

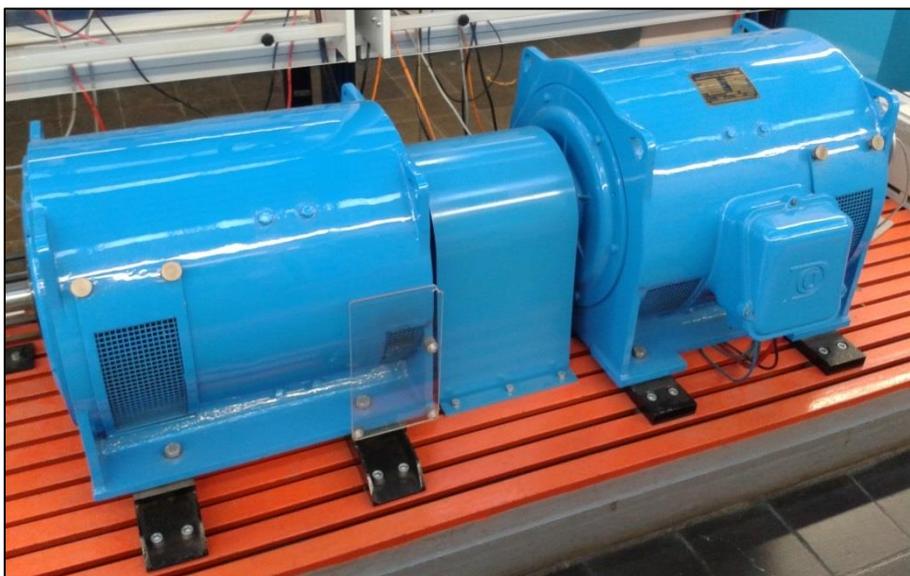


TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Institut für
Elektrische
Energiewandlung

Energietechnisches Praktikum



Abbildungen der Versuchsstände

Inhaltsverzeichnis

1. Bauform und Anwendung	2
2. Das d-q-Komponentensystem	4
3. Wirkungsweise	5
4. Ersatzschaltbilder und Zeigerdiagramme	5
4.1. Vollpolmaschine	5
4.2. Schenkelpolmaschine	6
5. Kreisdiagramm	8
5.1. Vollpolmaschine	8
5.2. Schenkelpolmaschine	9
6. Die Synchronmaschine am starren Netz	10
6.1. Synchronisieren	10
6.2. Die V-Kurven	10
7. Belastungskennlinien des Synchronmaschine im Inselbetrieb	12
8. Das Leerlauf-Kurzschlussverhältnis	13
9. Leistung und Drehmoment	15
9.1. Vollpolmaschine	15
9.2. Schenkelpolmaschine	16
10. Stoßkurzschluss	18
10.1. Verlauf des Ankerstromes	20
11. Beschreibung der im Versuch verwendeten Synchronmaschinen	22
12. Versuchsdurchführung und Ausarbeitung	23
12.1. Vorbereitung	23
12.2. Leerlaufversuch	23
12.3. Belastungsversuch	24
12.3.1. Synchronisation	24
12.3.2. V-Kurven	24
12.3.3. Regulierkennlinien	25
12.3.4. Ortskurven und Drehmomentkennlinien	25
12.3.5. Vorführung der Polradbewegung (relativ zum Drehfeld)	26
12.4. Kurzschlussversuch (nach Abbildung 20)	27
12.5. Stosskurzschlussversuch	28
12.6. Bewertung der Ausarbeitung allgemein:	28
13. Literatur	29
14. Anhang	30
15. Verständnisfragen	32

1. Bauform und Anwendung

Die Synchronmaschine läuft mit synchroner, d.h. der Netzfrequenz proportionaler, Drehfrequenz:

$$n_{\text{syn}} = \frac{f_s}{p} \quad (1a)$$

Sie ist als Drehstrom-Generator mit Typenleistungen bis über 1 GW der wichtigste elektro-mechanische Energiewandler. Als Motor wird sie sowohl für große Antriebsleistungen als auch – in besonderer Bauform – z.B. für Uhren im Bereich von einigen Watt und weniger verwendet. Weiterhin setzt man Synchronmaschinen als Phasenschieber zur reinen Blindleistungserzeugung bzw. Blindleistungskompensation ein.

Hinsichtlich der Bauform unterscheidet man Innenpolmaschinen (Abbildung 1a, b) und Außenpolmaschinen (Abbildung 1c), die elektrisch grundsätzlich gleichwertig sind. Außenpolmaschinen werden wegen der Leistungsübertragung über Schleifringe jedoch nur für kleine Leistungen gebaut.

Zwischen Vollpolmaschinen (Abbildung 1a) und Schenkelpolmaschinen (Abbildung 1b, c) bestehen jedoch Unterschiede im Betriebsverhalten infolge des unterschiedlichen magnetischen Widerstandes in Längs- (d) und Quer- (q) Richtung des Polrades oder Polsystems.

Die Vollpolmaschine (auch Turbomaschine genannt), meist in zweipoliger Ausführung ($p = 1$), wird fast ausschließlich in Dampfkraftwerken eingesetzt, da sie durch ihre geschlossene Läuferkonstruktion den dort notwendigen hohen Betriebsdrehzahlen (Fliehkraft) standhält. (Vierpolige Turbogeneratoren gibt es in bestimmten Kernkraftwerken mit Satt-dampfturbinen). Die Schenkelpolmaschine findet man vorzugsweise in Wasserkraftwerken. Sie wird dort bei niedriger Drehzahl betrieben und hat somit eine hohe Polzahl („Langsamläufer“).

Die **Erregerwicklung** der in Abbildung 1 dargestellten Maschinenformen wird mit Gleichstrom gespeist. Dieser wird entweder von einem statischen Gleichrichter oder einer auf der Welle mitrotierenden Erregermaschine (= Gleichstromgenerator) erzeugt und über Schleifringe in den Läufer der Synchronmaschine eingespeist. Bei großen Generatoren werden auch folgende Erregeranordnungen verwendet. Auf der Welle befindet sich eine Außenpolmaschine deren Ständer mit Gleichstrom gespeist wird. Die Drehspannung des Läufers wird durch eine mitrotierende Diodenbrücke gleichgerichtet und damit das Polrad des Generators erregt. Bei kleineren Leistungen ($< 100 \text{ kW}$) werden zunehmend Synchronmaschinen mit Permanent-Magneten eingesetzt. (Servo-Antriebe z.B. für Werkzeugmaschinen).

Bei kleinsten Leistungen wird oft nur das Reluktanzmoment also der unterschiedliche magnetische Widerstand (= *Reluktanz*) in d - und q -Richtung ausgenutzt. (Abbildung 14b : $I_f = 0$)

Neben der Ankerwicklung und der Erregerwicklung zeigt Abbildung 1 noch die **Dämpferwicklung**, die vor allem bei größeren Maschinen und umrichtergespeisten Motoren zur Dämpfung elektrischer und mechanischer Ausgleichsvorgänge nötig ist. Sie entspricht im Aufbau und in der Wirkung dem Läuferkäfig einer Asynchronmaschine. Sie kann bei geeigneter Dimensionierung zum asynchronen Hochlauf der Synchronmaschinen verwendet werden.

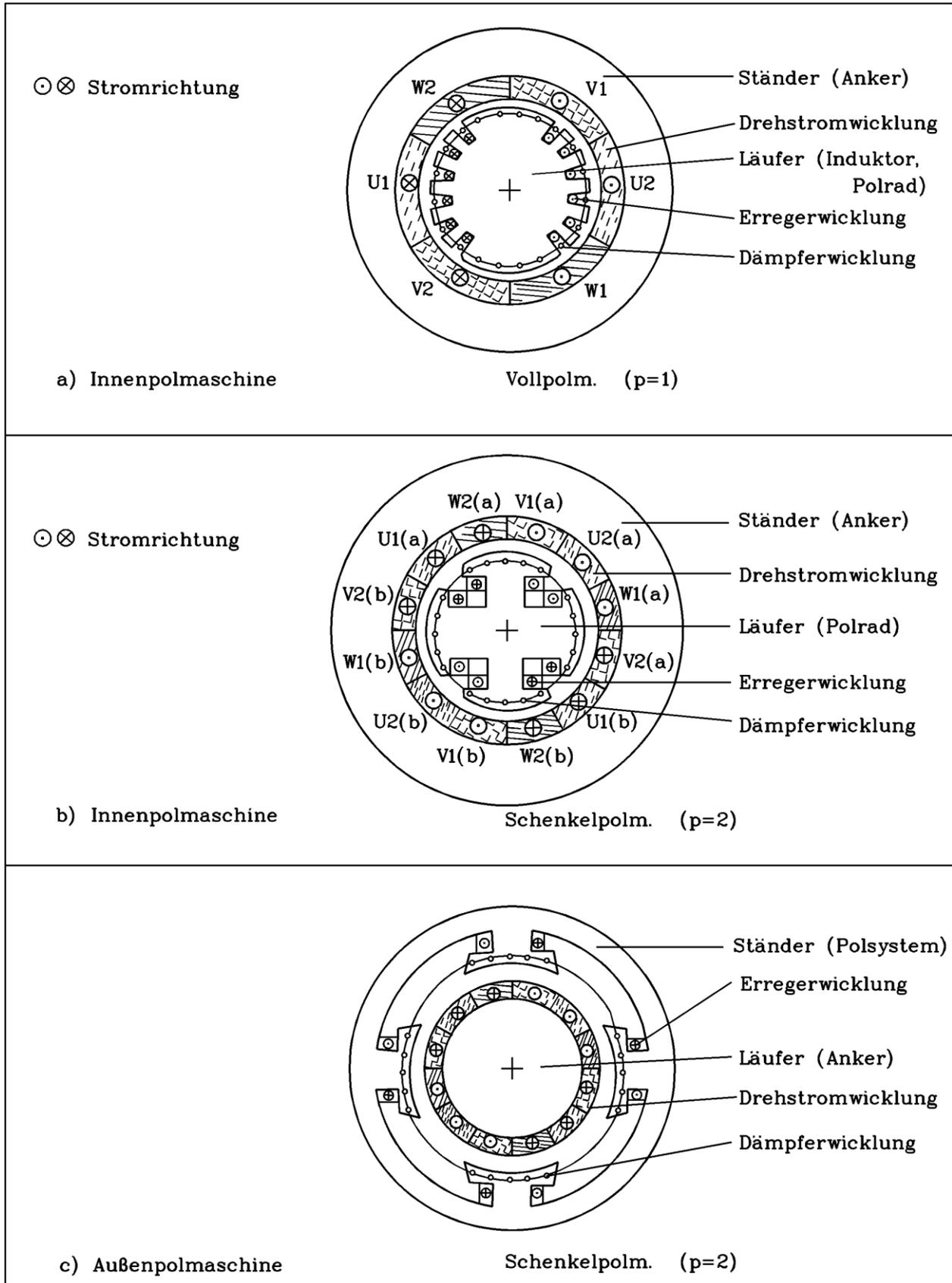


Abbildung 1: Verschiedenen Bauformen der Synchronmaschine

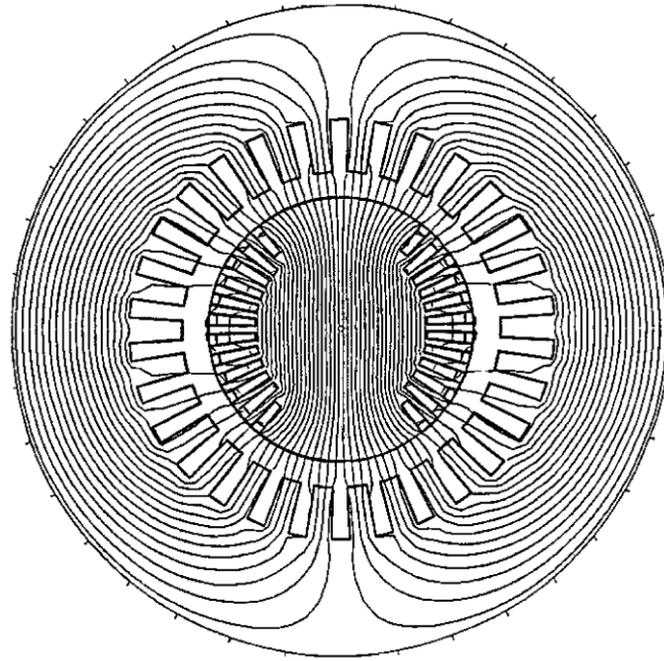


Abbildung 2: Verlauf des magnetischen Flusses in einer zweipoligen Vollpolmaschine für Leerlauf ($I_s = 0$)

2. Das d - q -Komponentensystem

Zur einheitlichen Darstellung von Maschinen beliebiger Polpaarzahl p wird grundsätzlich, entsprechend einer zweipoligen Bezugsmaschine, bezogen auf:

$$\text{elektrische Winkelkoordinaten} \quad \gamma = \gamma_e = p \cdot \gamma_m \quad (1b)$$

$$\text{elektrische Winkelgeschwindigkeiten} \quad \Omega_e = p \cdot \Omega_m \quad (1c)$$

Man verwendet in der Maschinentheorie, insbesondere bei der Behandlung der Synchronmaschine, das d - q -Komponentensystem, in dem der Polradfluss fest der d -Achse zugeordnet wird. Die d -Achsen liegen in Richtung der Läuferpole, während die q -Achsen um 90° el. versetzt anzunehmen sind (Abbildung 3).

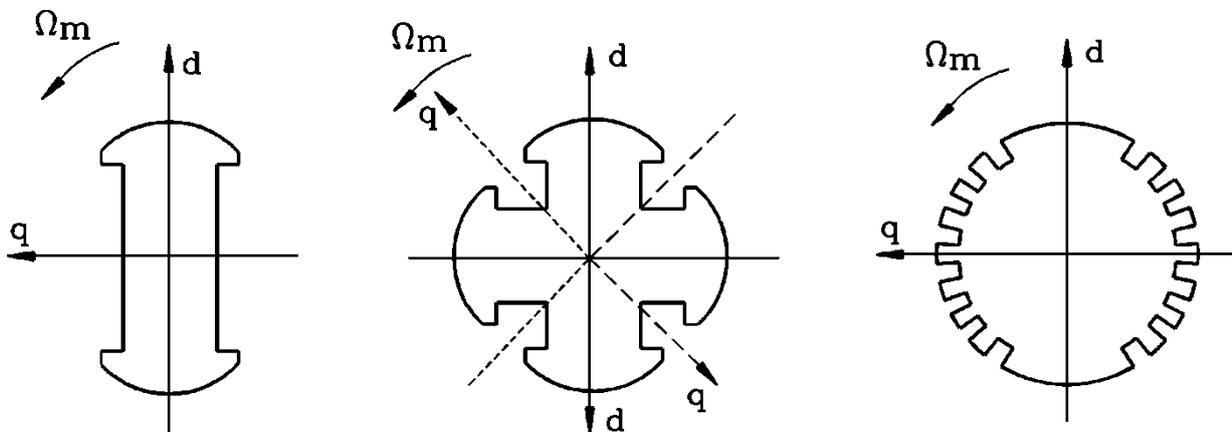


Abbildung 3: a) Schenkelpolmaschine $p = 1$, 90° el. $\cong 90^\circ$ räuml.; b) Schenkelpolmaschine, $p = 2$, 90° el. $\cong 45^\circ$ räuml.,

$$\gamma_m = \frac{\gamma_e}{p}, \Omega_m = \frac{\omega}{p}; \text{ c) Vollpolmaschine, } p = 1, 90^\circ \text{ el. } \cong 90^\circ \text{ räuml.}$$

3. Wirkungsweise

Es wird im Folgenden angenommen, dass alle Spannungen, Ströme und Flüsse sinusförmig seien. In ausgeführten Maschinen, insbesondere Maschinen kleiner Leistung, sind jedoch merkliche Abweichungen in Form von Oberschwingungen festzustellen.

Das gleichstromerregte Polrad rotiert mit der synchronen Drehfrequenz:

$$n = n_{\text{syn}} = \frac{f_s}{p} \quad (1a)$$

Der sinusförmig über den Läuferpolen verteilte Gleichfluss durchsetzt somit als Drehfeld die Stränge der Ankerwicklung und induziert Spannungen, die wegen der gegenseitigen Phasenverschiebung der Wicklungen von 120° ein Drehstromsystem ausbilden. Diese Ströme erregen ihrerseits wieder ein Drehfeld, das ebenfalls mit n_{syn} umläuft. Die beiden Drehfelder überlagern sich zum resultierenden Luftspaltfeld mit dem verketteten Hauptfluss $\underline{\Psi}_h$, der die Hauptspannung \underline{U}_h induziert.

4. Ersatzschaltbilder und Zeigerdiagramme

4.1. Vollpolmaschine

Bei sinusförmiger Änderung von $\underline{\Psi}_h$ wird in den Ankerwicklungssträngen die Hauptspannung \underline{U}_h induziert, entsprechend der Überlagerung von Polradfeld und Ankerfeld bei in d - und q - Richtung gleichem magnetischen Widerstand:

$$\underline{U}_h = j\omega\underline{\Psi}_h = jX_{\text{dh}}(\underline{I}'_f + \underline{I}_s) \quad (2)$$

Bei Belastung sind zu \underline{U}_h die Spannungsfälle in der Ankerwicklung zu addieren, damit man die Strangspannung \underline{U}_s erhält:

$$\underline{U}_s = R_s \underline{I}_s + jX_{s\sigma} \underline{I}_s + \underline{U}_h \quad (3)$$

$$\underline{U}_s = R_s \underline{I}_s + j(X_{s\sigma} + X_{\text{dh}}) \cdot \underline{I}_s + jX_{\text{dh}} \cdot \underline{I}'_f \quad (4)$$

$$\underline{U}_s = R_s \underline{I}_s + jX_d \underline{I}_s + \underline{U}_p \quad (5)$$

mit:

R_s : ohmscher Widerstand der Ankerwicklung (außer bei kleinen Maschinen: $R_s \ll X_d$)

$X_{s\sigma}$: Streureaktanz der Ankerwicklung

X_d : Synchronreaktanz ($X_d = X_{s\sigma} + X_{\text{dh}}$, sättigungsabhängig)

\underline{I}'_f : Fiktiver Dreiphasenstrom, der – in der Ständerwicklung fließend – nach Größe und Phase den gleichen sinusförmigen, umlaufenden Strombelag bilden würde, wie das mit Gleichstrom I_f erregte Polrad.

\underline{U}_p : Polradspannung ($\underline{U}_p = jX_{\text{dh}} \cdot \underline{I}'_f$). Dies ist die Wechselspannung, die an den Generatorklemmen bei entlasteter Maschine ($\underline{I}_s = 0$) und unverändertem Erregerstrom an einer sättigungsfreien Maschine messbar wäre. Sie ist durch den Erregerstrom bestimmt. \underline{U}_p hat **nichts** mit der Gleichspannung zu tun, die an der Erregerwicklung anliegt.

Den unterschiedlichen magnetischen Widerständen entsprechend, erhält man in den Achsen unterschiedliche Hauptreaktanzen X_{dh} und $X_{qh} = 0,5 \dots 0,8 \cdot X_{dh}$. Zur Bildung des verketteten Hauptflusses $\underline{\Psi}_h$ wird I_q nur im Verhältnis X_{qh} / X_{dh} wirksam.

Damit lautet jetzt die Spannungsgleichung:

$$\underline{U}_s = R_s \underline{I}_s + jX_{s\sigma} \underline{I}_s + \underline{U}_h \quad (6)$$

Mit der Hauptfeldspannung

$$\underline{U}_h = j\omega \underline{\Psi}_h = jX_{dh} \left(\underline{I}_d + \frac{X_{qh}}{X_{dh}} \underline{I}_q + \underline{I}_f' \right) \quad (7)$$

und der Polradspannung

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

ergibt sich (Zeigerdiagramm Abbildung 6):

$$\begin{aligned} \underline{U}_s &= R_s \underline{I}_s + jX_{s\sigma} (\underline{I}_d + \underline{I}_q) + jX_{dh} \underline{I}_d + jX_{qh} \underline{I}_q + \underline{U}_p \\ \underline{U}_s &= R_s \underline{I}_s + jX_d \cdot \underline{I}_d + jX_q \underline{I}_q + \underline{U}_p \end{aligned} \quad (8)$$

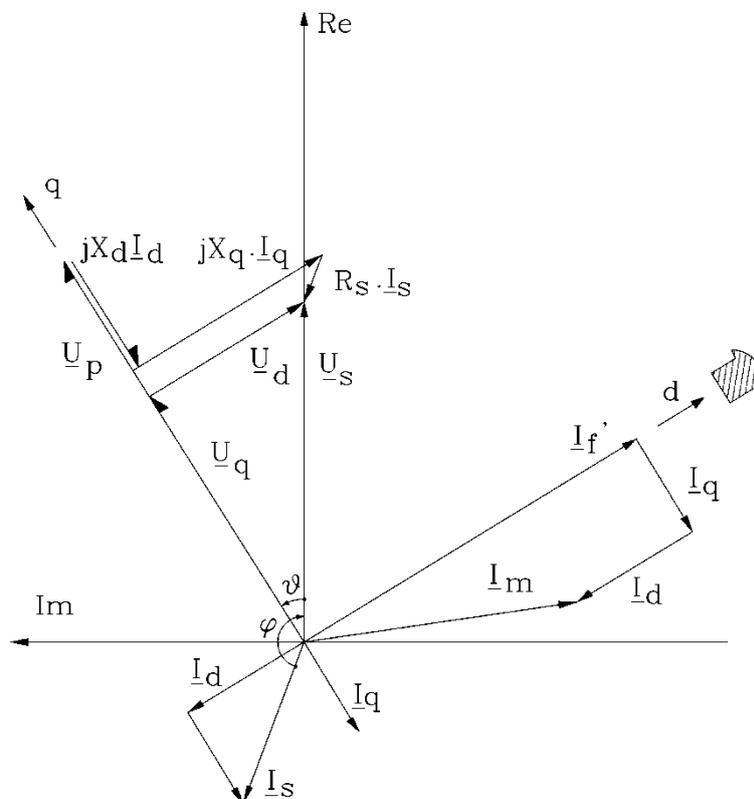


Abbildung 6: Zeigerdiagramm der Schenkelpolmaschine (ohmsch-induktive Last)

5. Kreisdiagramm

5.1. Vollpolmaschine

Man geht zweckmäßig von Gl. (5) aus und erhält für den Ankerstrom \underline{I}_s ($R_s = 0$):

$$\underline{I}_s = j \frac{\underline{U}_p}{X_d} - j \frac{\underline{U}_s}{X_d} \quad (9)$$

Die Ortskurven des Ständerstromes \underline{I}_s sind für konstante Erregung ($\underline{U}_p, I_f = \text{konst.}$) Kreise, deren Durchmesser durch den jeweils eingestellten Erregerstrom I_f bestimmt werden.

Unter Berücksichtigung von R_s erhält man aus Gl. 5

$$\underline{U}_s = jX_d \left(1 - j \frac{R_s}{X_d} \right) \cdot \underline{I}_s + \underline{U}_p \quad (5a)$$

mit $\left(1 - j \frac{R_s}{X_d} \right) = 1 - j \tan \rho \approx e^{-j\rho}$ für $\frac{R_s}{X_d} = \tan \rho \approx \rho \ll 1$

$$\underline{I}_s = e^{j\rho} \cdot \left[j \frac{\underline{U}_p}{X_d} - j \frac{\underline{U}_s}{X_d} \right] \quad (9a)$$

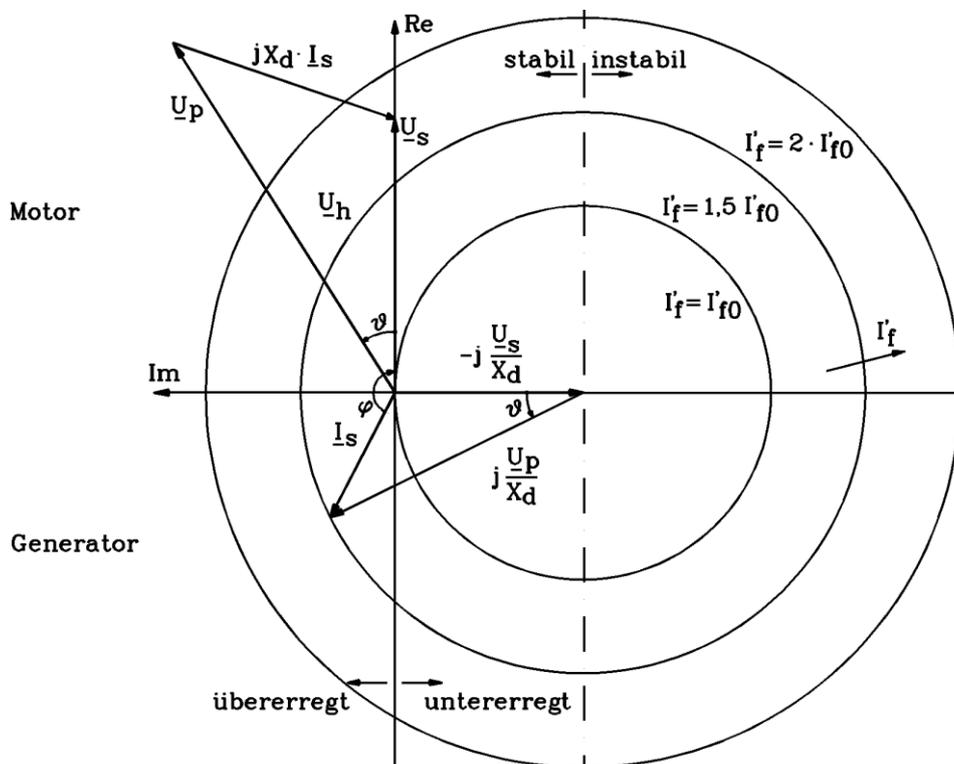


Abbildung 7: Stromortskurve der Vollpolmaschine

Der Einfluss von R_s bewirkt also gegenüber Abbildung 7 eine Drehung des Stromzeigerdiagramms um den Winkel ρ um den Koordinatennullpunkt und damit eine Anhebung des Kreismittelpunktes der Stromortskurven.

5.2. Schenkelpolmaschine

Vernachlässigt man R_s in Gl. 8, erhält man entsprechend Gl. 9

$$\underline{I}_s^* = \underline{I}_d + \frac{X_q}{X_d} \cdot \underline{I}_q = j \left(\frac{U_p}{X_d} - \frac{U_s}{X_d} \right) \quad (\text{vergleiche Abbildung 5}) \quad (10)$$

mit $\underline{U}_s = \underline{U}_d + \underline{U}_q$ (nach Abbildung 6)

$$\begin{aligned} \text{und} \quad \underline{U}_d &= -j \cdot \sin \vartheta \cdot e^{j\vartheta} \cdot \underline{U}_s = \frac{1}{2} (1 - e^{j2\vartheta}) \cdot \underline{U}_s \\ \underline{U}_q &= \cos(\vartheta) \cdot e^{j\vartheta} \cdot \underline{U}_s = \frac{1}{2} (1 + e^{j2\vartheta}) \cdot \underline{U}_s \end{aligned}$$

Beachtet man – mit den Komponenten nach Gl. 10

$$\begin{aligned} \underline{I}_d &= j \left[\frac{U_p}{X_d} - \frac{U_q}{X_d} \right] = j \left[\frac{U_p}{X_d} - \frac{U_s}{2} \cdot \frac{1}{X_d} (1 + e^{j2\vartheta}) \right] \\ \underline{I}_q &= \frac{X_d}{X_q} \cdot \left[-j \frac{U_d}{X_d} \right] = j \left[-\frac{U_s}{2} \cdot \frac{1}{X_q} (1 - e^{j2\vartheta}) \right] \end{aligned}$$

dass $\underline{I}_s = \underline{I}_d + \underline{I}_q$ ist,

so erhält man:

$$\underline{I}_s = j \left[\frac{U_p}{X_d} - \frac{U_s}{2} \left(\frac{1}{X_q} + \frac{1}{X_d} \right) + \frac{U_s}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) e^{j2\vartheta} \right] \quad (11)$$

Die Ortskurven sind keine Kreise mehr, sondern Pascal'sche Schnecken (Abbildung 8). Lage und Größe des dick gezeichneten sogenannten Reluktanzkreises sind vom Unterschied zwischen X_d und X_q abhängig. Dieser Kreis wird zum Punkt für $X_d = X_q$; ebenso werden die Schneckenkurven zu Kreisen. Die Ortskurven der Schenkelpolmaschine gehen dann in diejenigen der Vollpolmaschine über.

Der Einfluss des Ständerwiderstandes R_s bewirkt ähnlich wie bei der Vollpolmaschine eine kleine Drehung des Stromzeigerdiagramms und der Stromortskurven.

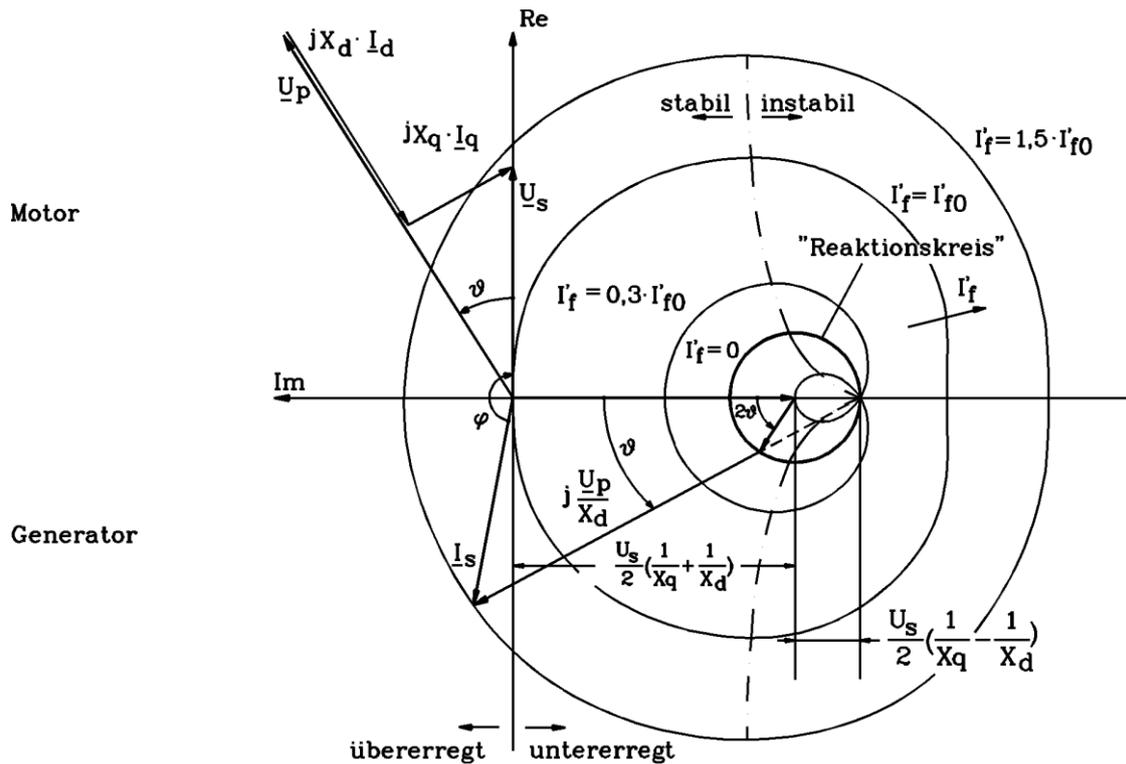


Abbildung 8: Stromortskurve der Schenkelpolmaschine

6. Die Synchronmaschine am starren Netz

6.1. Synchronisieren

Die Synchronmaschine kann nicht ohne weiteres an das Netz geschaltet werden. Dies bedeutet, dass vor dem Zuschalten

- die Maschine zunächst z.B. durch einen Anwurfmotor auf Synchrondrehzahl (durch die Netzfrequenz vorgegeben!) gebracht werden muss,
- Netz – und Maschinenspannung die gleiche Phasenfolge haben,
- der Erregerstrom I_f so einzustellen ist, dass die Maschinenspannung im Betrag gleich der Netzspannung ist,
- der Phasenwinkel zwischen Netz – und Maschinenspannung Null ist.

Wenn diese vier Bedingungen erfüllt sind, kann die Maschine ans Netz geschaltet und dann als Motor oder Generator betrieben werden.

6.2. Die V-Kurven

Eine elektrische Anlage enthält meist mehrere Generatoren und Verbraucher, die zu einem Netz zusammengeschlossen sind. Die Spannung an einzelnen Netzpunkten ist nicht konstant, da sie von der Netzbelastung, dem Netzzinnenwiderstand und der Spannungsregelung abhängig ist. Ein ideales Netz mit konstanter Spannung wird dagegen als „starres Netz“ bezeichnet.

Wenn nun die Synchronmaschine an einem starren Netz arbeitet, so ist ihre Klemmenspannung vorgegeben und durch Eingriff in die Stellgrößen der Maschine (Erregerstrom) nicht zu beeinflussen. Eine Änderung des Erregerstromes und damit der Läuferdurchflutung kann sich daher nur so auswirken, dass die Maschinen ihre Ständerdurchflutung durch Aufnahme eines vor- oder nacheilenden Blindstromes ändert. Diese Änderung wirkt so, dass das resultierende Luftspaltfeld stets den durch die Klemmenspannung bestimmten Wert nach Gl. 2 u. 3 hat. Die Maschine entnimmt dem Netz bei zu geringer Erregung (Untererregung) einen nacheilenden Blindstrom, dessen Feld die Polraddurchflutung ergänzt. Entsprechend fließt bei zu starker Erregung (Übererregung) ein voreilender Blindstrom, der die Polraddurchflutung teilweise kompensiert.

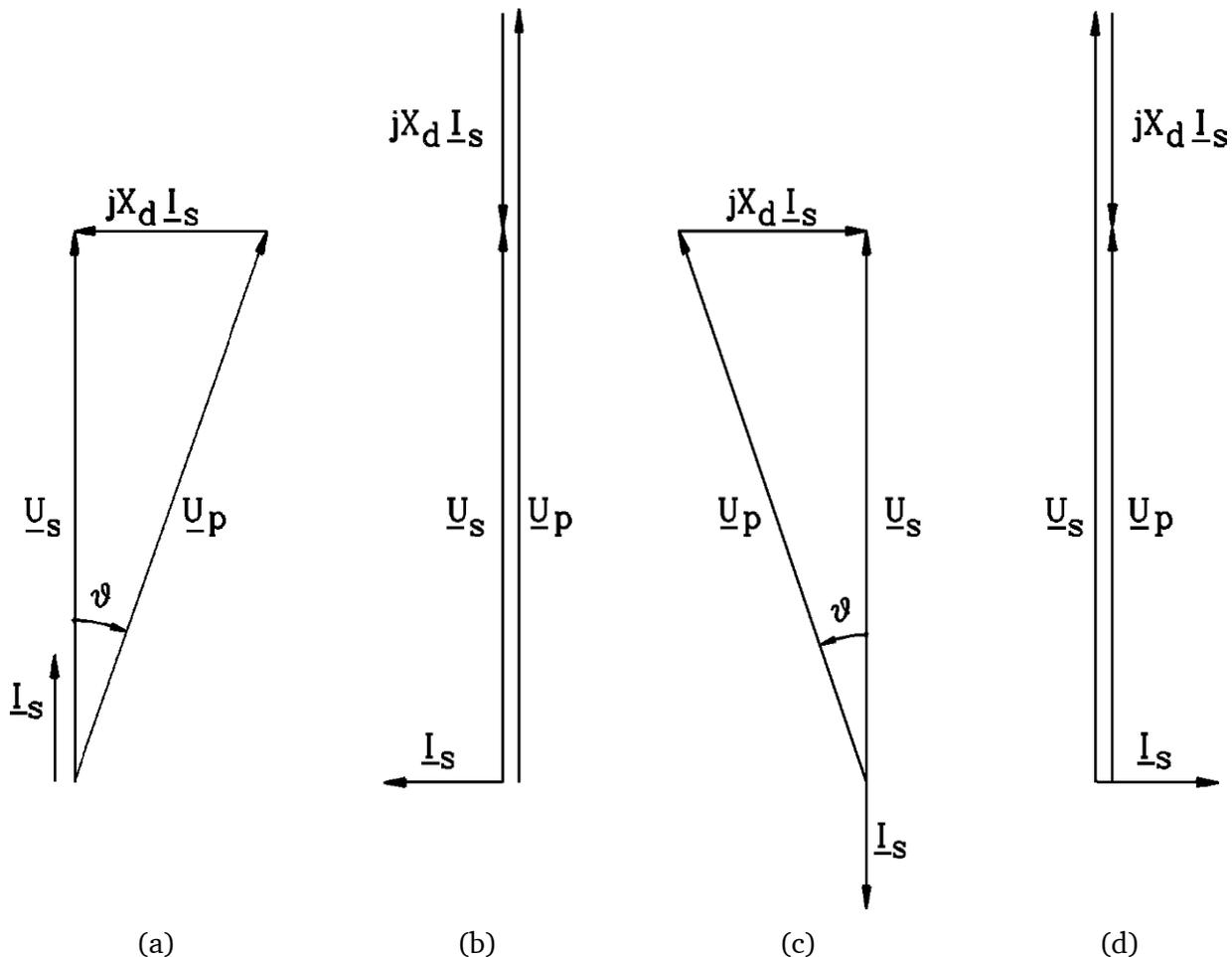


Abbildung 9: Spannungszeigerdiagramme für verschiedene Belastungen: a) Motor, reiner Wirkleistungs-Verbrauch; b) Phasenschieber, rein ind. Blindleistungs-Erzeugung (Kondensator); c) Generator, reine Wirkleistungs-Erzeugung; d) Phasenschieber, rein ind. Blindleistungs-Verbrauch (Drossel)

Wenn man in das Diagramm der Stromortskurve ein Gitter in Form von Parallelen zur realen bzw. imaginären Achse einträgt, so verbinden diese Geraden Punkte gleicher Wirk- und Blindleistung. Zu jedem Belastungszustand der Maschine können Polradwinkel, Wirk- und Blindstrom, sowie der zugehörige Erregerstrom abgelesen werden. Trägt man nun den Betrag des Ankerstromes I_s über dem Erregerstrom I_f auf und wählt die Wirklast der Maschine als Parameter, so erhält man eine Kurvenschar, die sogenannten „V-Kurven“ (Abbildung 10), in welchen sehr anschaulich das Verhalten der Synchronmaschine am starren Netz bei Unter- und Übererregung zu erkennen ist. Dabei ist der Strom $I_{f0,ges}$ der Leerläufererregerstrom für Nennspannung U_{sN} . Der Index „ges“ bedeutet „gesättigter Eisenkreis.“

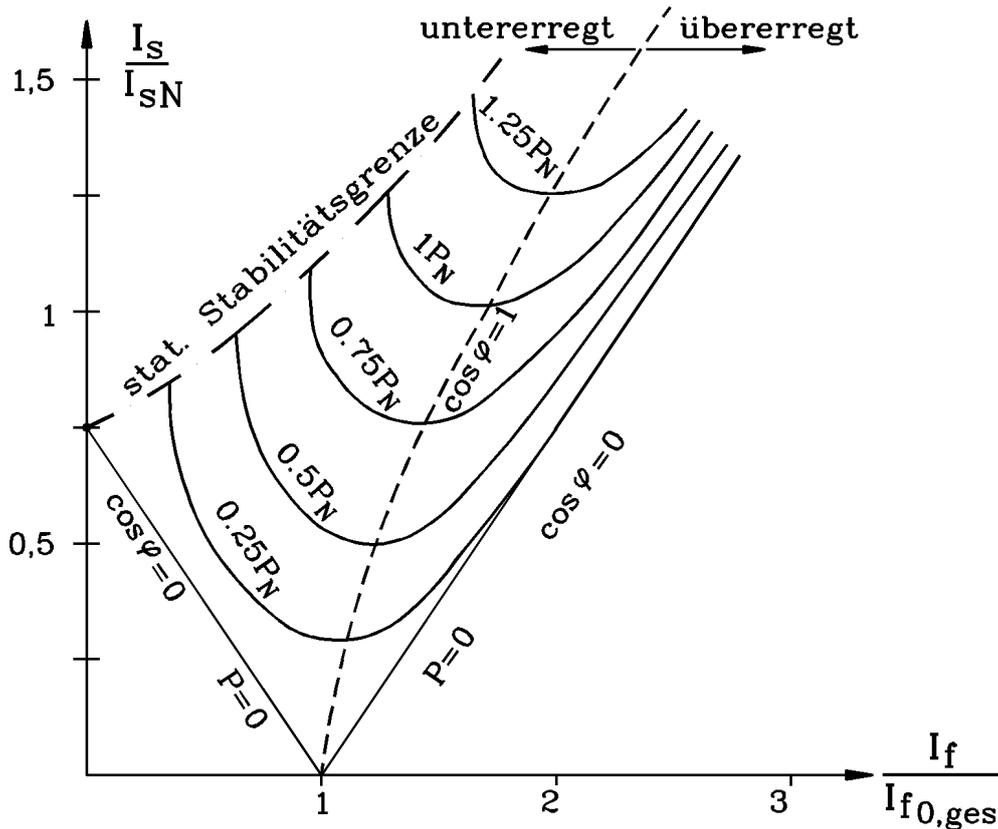


Abbildung 10: V-Kurven

7. Belastungskennlinien des Synchronmaschine im Inselbetrieb

Man spricht in der Anlagentechnik vom Inselbetrieb, wenn ein Generator allein ein Verbrauchernetz speist. Die Spannung an den Maschinenklemmen ist jetzt ohne besondere Regeleinrichtung nicht mehr konstant, sondern wegen des Innenwiderstands der Maschine lastabhängig. Diese Abhängigkeit der Verbraucherspannung (= Klemmenspannung) vom Laststrom und vom Leistungsfaktor $\cos\varphi$ ist in Abbildung 11 dargestellt.

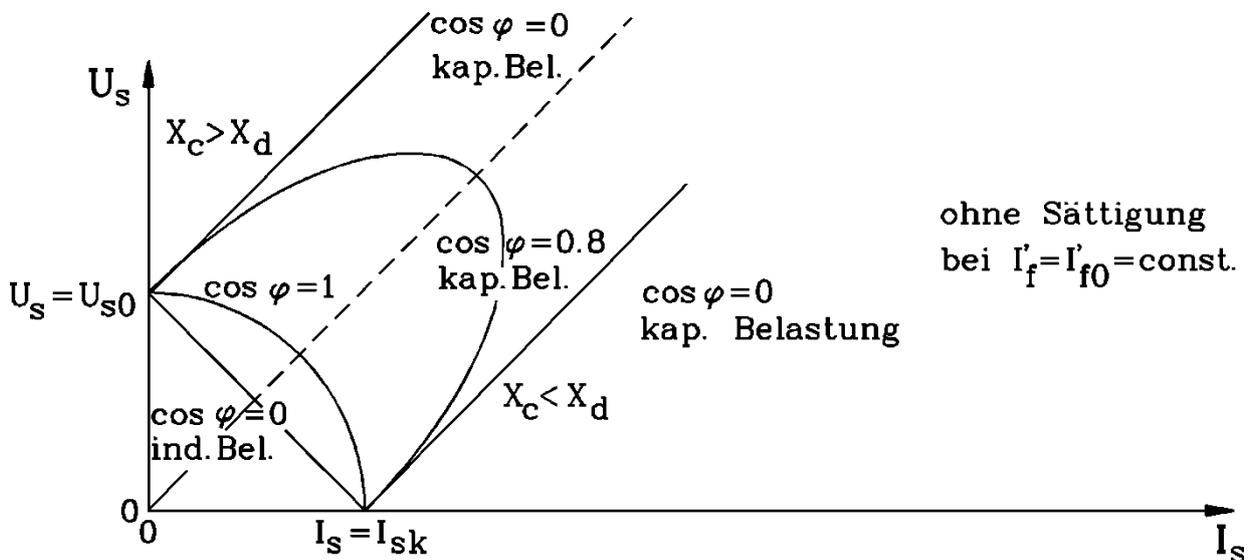


Abbildung 11: Belastungskennlinien der Synchronmaschine im Inselbetrieb (ungesättigte Maschinen)

8. Das Leerlauf-Kurzschlussverhältnis

Die Leerlaufkennlinie (Abbildung 12) zeigt die bekannte Abhängigkeit der Leerlaufspannung U_{s0} vom Erregerstrom I_f (auch Versuch 11.2).

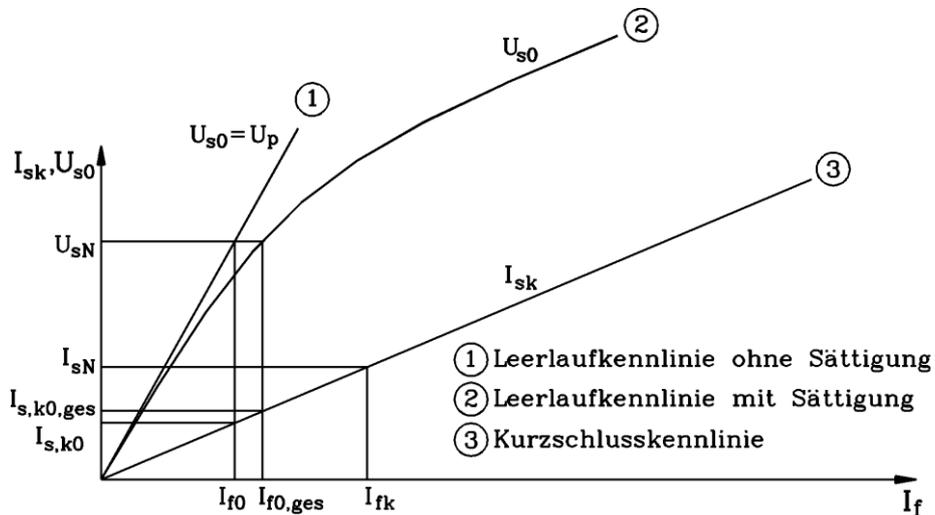


Abbildung 12: Leerlauf- und Kurzschlusskennlinie

Bei der Aufnahme der Leerlaufkennlinie ist zu beachten, dass auf Grund einer möglicherweise vorhandenen Restmagnetisierung (Remanenz) im Rotor bereits bei unerregter Maschine eine Remanenzspannung $U_R > 0$ in den Stator induziert wird. Gemäß DIN EN 60034-2 ist in diesem Fall eine Korrektur vorzunehmen. Dazu wird der lineare Abschnitt der gemessenen Leerlaufkennlinie bis zur negativen Abszissenachse verlängert. Der Achsenabschnitt ΔI_f wird anschließend zu allen gemessenen Erregerstromwerten addiert, so dass die Kennlinie wieder durch den Nullpunkt verläuft (siehe Abbildung 13).

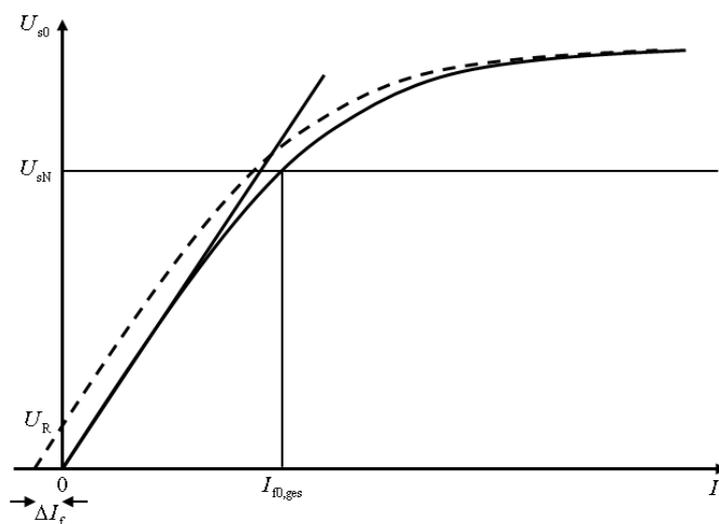


Abbildung 13: Beispielhafte gemessene (strichliert gezeichnet) und korrigierte Leerlaufkennlinie bei Auftreten von Eisenremanenz im Rotor

Im Kurzschluss wird das Läuferfeld durch die Rückwirkung des Ankerfeldes fast kompensiert. Es verbleibt ein geringes Luftspaltfeld, das die Ankerstreuspannung

$$\underline{U}_{s\sigma} = j \cdot X_{s\sigma} \cdot \underline{I}_{sk} \quad (12)$$

induziert. Der zugehörige kleine Fluss vermag keine Sättigungserscheinungen hervorzurufen, so dass die Kurzschlusskennlinie $I_{sk} = f(I_f)$ eine Gerade sein muss.

Als Maß für die bereits mehrmals erwähnte Rückwirkung des Ankerfeldes auf das Erregerfeld („Ankerrückwirkung“) verwendet man das Leerlauf – Kurzschlussverhältnis k_k , das wie folgt definiert ist.

$$k_k = \frac{I_{sk0}}{I_{sN}} \quad (13a)$$

mit I_{sk0} : Kurzschlussstrom beim Leerläufererregestrom I_f für Nennspannung U_{sN} .

$$\text{Ungesättigte Maschine: } k'_k = \frac{I_{sk0}}{I_{sN}} = \frac{I_{f0}}{I_{fk}} \quad (13b)$$

$$\text{Gesättigte Maschine: } k_k = \frac{I_{sk0,ges}}{I_{sN}} = \frac{I_{f0,ges}}{I_{fk}} \quad (13c)$$

Ein hohes Leerlauf-Kurzschlussverhältnis („harte“ Maschine: $k'_k = 0,8 \dots 1,3$) bedeutet, dass die Ankerrückwirkung gering und der Kurzschlussstrom entsprechend hoch ist. Das ist bei Schenkel-polmaschinen üblich.

Bei Vollpolmaschinen weist ein niedriger Wert für k'_k auf eine große Ankerrückwirkung hin („weiche“ Maschine: $k'_k = 0,3 \dots 0,8$). Ein vergleichsweise geringer Kurzschlussstrom reicht aus, um die Polraddurchflutung soweit zu kompensieren, dass nur noch das geringe Kurzschluss-Luftspaltfeld bestehen bleibt.

Die angegebene Zahlenwerte von k'_k gelten für die ungesättigte Maschine. Je nach Sättigungsgrad der Maschine kann das Leerlauf-Kurzschlussverhältnis k_n einer realen Maschine um 10% ... 20% größer als k'_k sein. Eine anschauliche Darstellung von k'_k folgt aus einer Umformung der G1.13b:

$$k'_k = \frac{I_{sk0}}{I_{sN}} = \frac{I_{sk0}}{U_{sN}} \cdot \frac{U_{sN}}{I_{sN}} = \frac{Z_N}{X_d} \quad (14)$$

Dabei ist $Z_N = \frac{U_{sN}}{I_{sN}}$ die Nennimpedanz der Maschine, auf die im Allgemeinen alle relativen

Impedanzen als Kennwerte der Maschine bezogen werden.

Das Leerlauf-Kurzschlussverhältnis k'_k ist also umgekehrt proportional zur ungesättigten Synchronreaktanz X_d , die man verständlicherweise auch „Ankerrückwirkungsreaktanz“ nennt.

9. Leistung und Drehmoment

9.1. Vollpolmaschine

Die Wirkleistung einer m -strängigen Maschine ist

$$P = m \cdot U_s \cdot I_{sw} = m \cdot U_s \cdot I_s \cdot \cos \varphi \quad (15)$$

Wir betrachten Abbildung 7, in dem unter Vernachlässigung des kleinen Ohm'schen Spannungsabfalls $R_s \cdot I_s$ die Ortskurven des Ankerstroms I_s für Betrieb am starren Netz ($U_s = U_{sN} = \text{konst.}$) für konstante Erregung ($I_f = \text{konst.} \rightarrow U_p = \text{konst.}$) dargestellt sind. Man erkennt, dass die Wirkkomponente des Ankerstroms

$$I_{sw} = I_s \cos \varphi = -\frac{U_p}{X_d} \sin \vartheta \quad (16)$$

entspricht. Damit erhält man mit $m = 3$ für die Wirkleistung

$$P = -3 \cdot \frac{U_p \cdot U_s}{X_d} \sin \vartheta \quad (P \sim I_{sw}) \quad (17)$$

und für das Drehmoment der Vollpolmaschine:

$$M_e = \frac{P_m}{\Omega_m} = \frac{P_m}{\omega} \cdot p = -3p \cdot \frac{U_s \cdot U_p}{\omega X_d} \cdot \sin \vartheta \quad (18)$$

oder

$$M_e = -M_{p0} \cdot \sin \vartheta \quad (19)$$

Das Drehmoment (Abbildung 14a) verläuft also wie der Sinus des Polradwinkels ϑ und erreicht für $\vartheta = \pm 90^\circ$ sein Maximum, das Kippmoment:

$$M_{p0} = 3p \cdot \frac{U_s \cdot U_p}{\omega X_d} \quad (20)$$

Das Kippmoment M_{p0} kann über die Erregung (U_p !) verändert werden. Ohne Regelung kann die Vollpolmaschine im stationären Betrieb nur mit $\vartheta < +90^\circ$ als Generator, bzw. $(-\vartheta) < 90^\circ$ als Motor stabil arbeiten. Wird das Kippmoment überschritten, so fällt die Synchronmaschine „außer Tritt“, d.h. das Polradfeld läuft nicht mehr synchron zum Ständerfeld um. Beim Synchrongenerator erhöht sich die Drehzahl, solange die Antriebsmaschine ein Drehmoment liefert, während sie beim Synchronmotor durch die Last bis zum Stillstand abfällt. Die beim Kippen auftretenden Ströme können den Nennstrom erheblich überschreiten.

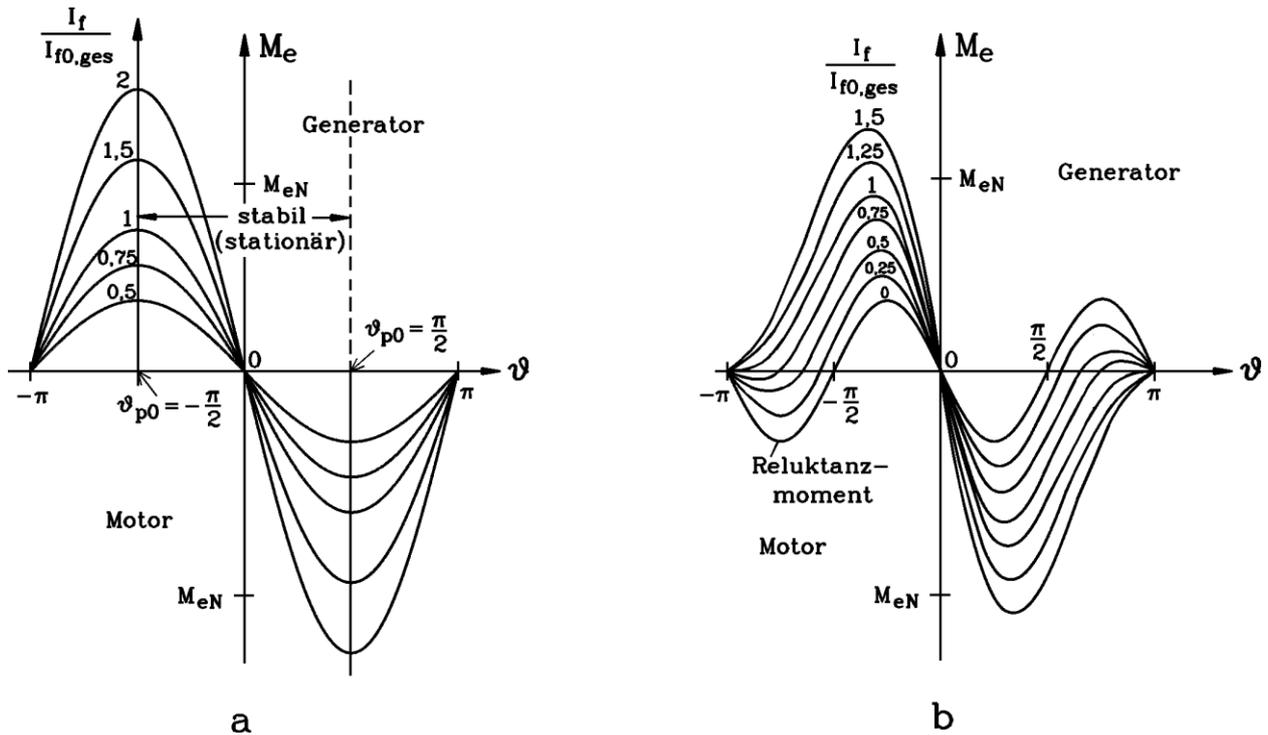


Abbildung 14: Drehmoment in Abhängigkeit des Polradwinkels ($R_s = 0$); a – Vollpolmaschine, b – Schenkelpolmaschine

Für $R_s > 0$ ist der Betrag des motorischen Kippmoments $M_{p0,mot}$ kleiner als der Betrag des generatorischen Kippmoments $M_{p0,gen}$ ($\varepsilon = R_s / X_d$).

$$M_{p0,mot} = -3p \cdot \frac{U_p}{\omega X_d} \cdot \left(\frac{U_p \cdot \varepsilon}{1 + \varepsilon^2} - \frac{U_s}{\sqrt{1 + \varepsilon^2}} \right) \quad (21a)$$

$$M_{p0,gen} = -3p \cdot \frac{U_p}{\omega X_d} \cdot \left(\frac{U_p \cdot \varepsilon}{1 + \varepsilon^2} + \frac{U_s}{\sqrt{1 + \varepsilon^2}} \right) \quad (21b)$$

Der Polrad-Kippwinkel nimmt gegenüber $R_s = 0$ bei Motorbetrieb ab und bei Generatorbetrieb zu.

$$\vartheta_{p0,mot} = -\pi/2 + \arctan \varepsilon \quad (22a)$$

$$\vartheta_{p0,gen} = \pi/2 + \arctan \varepsilon \quad (22b)$$

Der Stabilitätsbereich als Winkelbereich π zwischen den beiden Kippwinkeln bleibt erhalten wie bei $R_s = 0$ (siehe Abbildung 15a).

9.2. Schenkelpolmaschine

Entsprechend G1.16 erhalten wir bei vernachlässigtem R_s aus Abbildung 8 die Wirkkomponente des Ankerstroms

$$I_{sw} = I_s \cdot \cos \varphi = -\frac{U_p}{X_d} \cdot \sin \vartheta - \frac{U_s}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \sin 2\vartheta \quad (23)$$

So erhält man für die Wirkleistung

$$\begin{aligned}
 P &= 3 \cdot U_s \cdot I_s \cdot \cos \varphi \\
 &= -3 \cdot \frac{U_s \cdot U_p}{X_d} \cdot \sin \vartheta - 3 \frac{U_s^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \sin 2\vartheta
 \end{aligned} \tag{24}$$

Und für das Drehmoment

$$M_e = -3 \cdot p \cdot \frac{U_s \cdot U_p}{\omega X_d} \sin \vartheta - 3 \cdot p \cdot \frac{U_s^2}{2\omega} \cdot \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \sin 2\vartheta \tag{25}$$

Gl. 25 enthält also gegenüber Gl. 18 einen zusätzlichen Ausdruck, der von den unterschiedlichen magnetischen Widerständen (Reluktanzen) in d - und q - Achse herrührt und vom doppelten Polradwinkel abhängt. Er beschreibt ein zusätzliches Drehmoment, das Reluktanzmoment (auch Reaktionsmoment genannt) der Schenkelpolmaschine, welches unabhängig von der Erregung vorhanden ist (Abbildung 14b).

Bei Berücksichtigung des Ständerwiderstands verschiebt sich der sinusförmige Verlauf des Reluktanzmoments in Richtung der Ordinate nach unten und in Richtung positiver Polradwinkel um den Winkel

$$2\alpha = \arctan \left(\frac{R_s (X_d + X_q)}{X_d X_q - R_s^2} \right). \tag{26}$$

Für $X_d X_q - R_s^2 > 0$ ist der Verschiebungswinkel $\alpha > 0$; es erfolgt eine Verschiebung der Drehmomentkurve nach rechts. Beim Polradwinkel $\vartheta = 0$ ist deshalb das Drehmoment bereits positiv und nicht mehr Null, wie das bei $R_s = 0$ der Fall ist ($r_s = R_s / Z_N$). Der ohm'sche Widerstand verringert das verfügbare Motormoment insbesondere bei hohem Reluktanzunterschied prozentual erheblich (siehe Abbildung 15b).

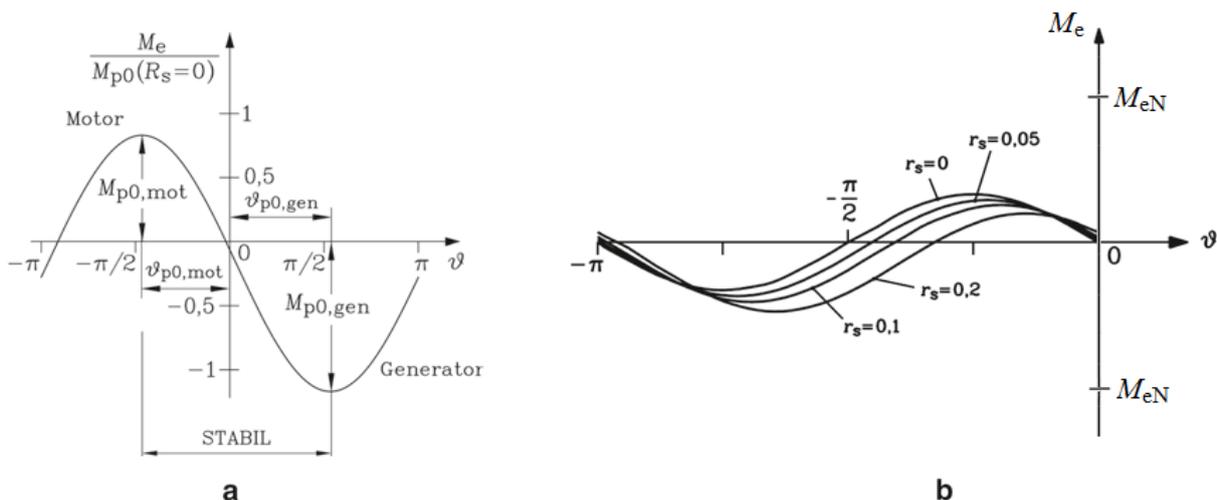


Abbildung 15: Drehmoment in Abhängigkeit des Polradwinkel ($R_s > 0$); a) – Synchronmoment, b) – Reluktanzmoment

10. Stoßkurzschluss

Als Stoßkurzschluss bezeichnet man den plötzlichen Kurzschluss der laufenden, erregten Synchronmaschine. Als Folge von Ausgleichsvorgängen beim Abbau des hohen Polradflusses vor dem Kurzschluss auf den niedrigen, im Dauerkurzschluss noch bestehenden Rest-Fluss treten hohe Stromspitzen, verbunden mit erheblichen Drehmomentstößen und elektrodynamischen Kräften zwischen den Wicklungen auf. Im Allgemeinen werden die Wickelköpfe größerer Synchronmaschinen zerstört, wenn ein Kurzschluss unmittelbar an den Klemmen der Maschine auftritt.

Wir klären zunächst das Verhalten einer beliebigen kurzgeschlossenen Spule mit der Induktivität und dem Widerstand R :

Die Spannung

$$u = R \cdot i + \frac{d\Psi}{dt} = R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt} \quad (27)$$

wird im Kurzschluss zu

$$u = 0.$$

Vernachlässigt man R , so ist vom Kurzschlusszeitpunkt an

$$\frac{d\Psi}{dt} = L \cdot \frac{di}{dt} \approx 0, \quad (27a)$$

$$\text{d.h. } \Psi = L \cdot I \approx \text{konst.} \quad (27b)$$

Der mit der Spule verkettete Fluss wird durch einen in der Spule fließenden Gleichstrom $I = \frac{\Psi}{L}$ "festgehalten".

Die genauere Betrachtung ergibt aus Gl. (27)

$$\frac{di}{dt} = -\frac{R}{L} \cdot i \quad (27c)$$

mit der Lösung

$$i = I \cdot e^{-\frac{t}{T}} \quad (27d)$$

Der Widerstand R bewirkt also eine exponentielle Abnahme des Stromes vom Anfangswert $I = \frac{\Psi}{L}$

mit der Zeitkonstante $T = \frac{L}{R}$ und eine entsprechende Abnahme des Flusses.

Wir betrachten nun den dreipoligen Stoßkurzschluss einer vorher leerlaufenden Synchronmaschine **ohne** Dämpferwicklung. Dabei spielen sich folgende Ausgleichvorgänge in der Maschine ab (in stark vereinfachter Darstellung):

- a1. Im Augenblick des Stoßkurzschlusses wird der mit der Ankerwicklung verkettete Fluss festgehalten, d.h. ein Gleichfluss von der Größe des ursprünglichen Polradflusses wird durch in den drei Strängen der Ankerwicklung fließende Gleichströme festgehalten.
- a2. Die Erregerwicklung, die über die Erregerstromquelle praktisch kurz geschlossen ist, dreht sich in diesem Gleichfeld. Dabei werden in ihr Wechselströme induziert, deren Fluss dem in die Erregerwicklung eindringenden Fluss des Gleichfeldes entgegengesetzt ist und den Hauptteil des Gleichflusses zwingt, sich über die Streuwege von Anker – und Erregerwicklung zu schließen. Die wirksame Induktivität ist bei diesem Übergangsvorgang die Übergangsinduktivität

$$L'_d = L_{\sigma} + (L_{f\sigma} \| L_{dh}) \quad (28)$$

- a3. Dieses Gleichfeld und die Gleichstromanteile des Stoßkurzschlussstromes im Anker sowie die Wechselstromkomponente des Erregerstroms klingen mit der Gleichstromzeitkonstanten T_a ab.
- b1. Ebenso hält die Erregerwicklung auf dem rotierenden Polrad den Polradfluss, der sie vor dem Stoßkurzschluss durchsetzte, durch einen entsprechenden Gleichstrom fest. Dieser Gleichstrom ist größer als der ursprüngliche Erregerstrom, und zwar umgekehrt proportional dem resultierenden magnetischen Leitwert oder der Reaktanz, die nun wirksam ist.
- b2. Die kurzgeschlossene Ankerwicklung reagiert auf diesen Dreh-Fluss des Polrades mit hohen Wechselströmen in allen drei Strängen, so dass der Hauptanteil des Drehflusses sich nur über die Streuwege von Anker – und Erregerwicklung schließen kann. Die diesen Streuwegen entsprechende wirksame Reaktanz ist wie in Gl. (27) – die Übergangsreaktanz (Abbildung 16b)

$$X'_d = X_{\sigma} + (X_{f\sigma} \| X_{dh}) \quad (29)$$

- b3. Der Erregerkreiswiderstand R_f bewirkt die Abnahme des Polradflusses und des ihm entsprechenden transienten Erregerstromes sowie der transienten Kurzschlussströme im Anker mit der Übergangszeitkonstanten (transiente Zeitkonstante)

$$T'_d = \frac{1}{\omega \cdot R_f} \cdot [X_{f\sigma} + (X_{\sigma} \| X_{dh})] \quad (30)$$

- c1. Im Erregerkreis fließt schließlich nur noch der von der Erregerstromquelle gelieferte ursprüngliche Erregerstrom.
- c2. Im Anker sind die Kurzschlusswechselströme auf den Wert des Dauerkurzschluss-Stroms I_{sk} abgeklungen. Seine Durchflutung kompensiert die Erregerdurchflutung bis auf die kleine Magnetisierungsdurchflutung, die nötig ist, den Restfluss - entsprechend dem Spannungsabfall von I_{sk} im Ankerkreis – über den Hauptflussweg zu treiben (Abbildung 16c). Dabei ist die Längsreaktanz X_d wirksam.

- d. Wenn die Maschine eine Dämpferwicklung hat, überlagert sich dem transienten Ausgleichvorgang noch ein subtransienter Ausgleichvorgang mit der subtransienten Reaktanz (Anfangsreaktanz) X_d'' , die kleiner ist als X_d' . Abbildung 16a zeigt die entsprechende Flussverteilung.

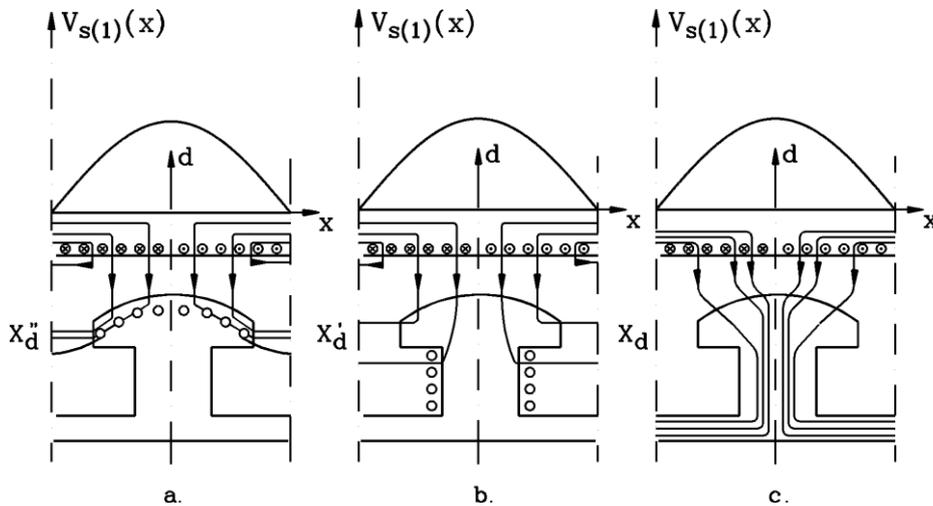


Abbildung 16: Durchflutungsgrundwelle und Flussverteilung, die den Reaktanzen X_d'' , X_d' und X_d entsprechen

10.1. Verlauf des Ankerstromes

Beim Stoßkurzschlussversuch wird die leerlaufende Maschine, die auf die Spannung U_2 erregt ist, dreipolig kurzgeschlossen. Es ergibt sich im Strang $U_1 - U_2$ der Stromverlauf

$$i_{sk}(t) = -\sqrt{2} \cdot \left[(I_{sk}'' - I_{sk}') \cdot e^{-t/T_d'} + (I_{sk}' - I_{sk}) \cdot e^{-t/T_d} + I_{sk} \right] \cdot \cos(\omega t + \Theta) + \sqrt{2} \cdot I_{sk}'' \cdot \cos\Theta \cdot e^{-t/T_a} \quad (31)$$

Es bedeuten

I_{sk}''	subtransienter Kurzschlussstrom,
I_{sk}'	transienter Kurzschlussstrom,
I_{sk}	Dauerkurzschlussstrom.

Das Glied $I_{sk}'' \cdot \cos\Theta$ ist das Gleichstromglied, das in seiner Höhe vom Kurzschluss-Zeitpunkt Θ abhängt. Bei Kurzschluss im Spannungsnulldurchgang ($\Theta = 0$) einer Phase tritt in dieser das größte Gleichstromglied auf.

Etwa eine halbe Periode später erreicht der Wechselstromanteil seinen Maximalwert in Richtung des Gleichstroms. Unter Berücksichtigung der exponentiellen Abnahme ergibt sich der höchste Augenblickswert, der Stoßkurzschlussstrom näherungsweise zu:

$$\hat{I}_{sk} \approx 1,8 \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot U_s}{X_d''} = 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{sk}'' \quad (32)$$

Mit einem zulässigen Mindestwert von $(X_d'' = 0,1 \cdot \frac{U_{sN}}{I_{sN}})$ tritt maximal das $18 \cdot \sqrt{2}$ -fache des

Nennstromes bei $U_s = U_{sN}$ auf. Zu bedenken ist, dass z.B. die Kräfte zwischen den Leitern des Wickelkopfes vom Quadrat der Stromstärke abhängen. Allerdings nehmen insbesondere die ersten Stromamplituden rasch ab, wodurch die Auswirkungen dieser Kräfte begrenzt bleiben.

Die Auswertung des Oszillogramme erfolgt durch Auftragen der um den Dauerkurzschlussstrom verringerten Wechselstromamplituden auf halblogarithmisches Papier (siehe VDE 0530, Teil 4 § 25).

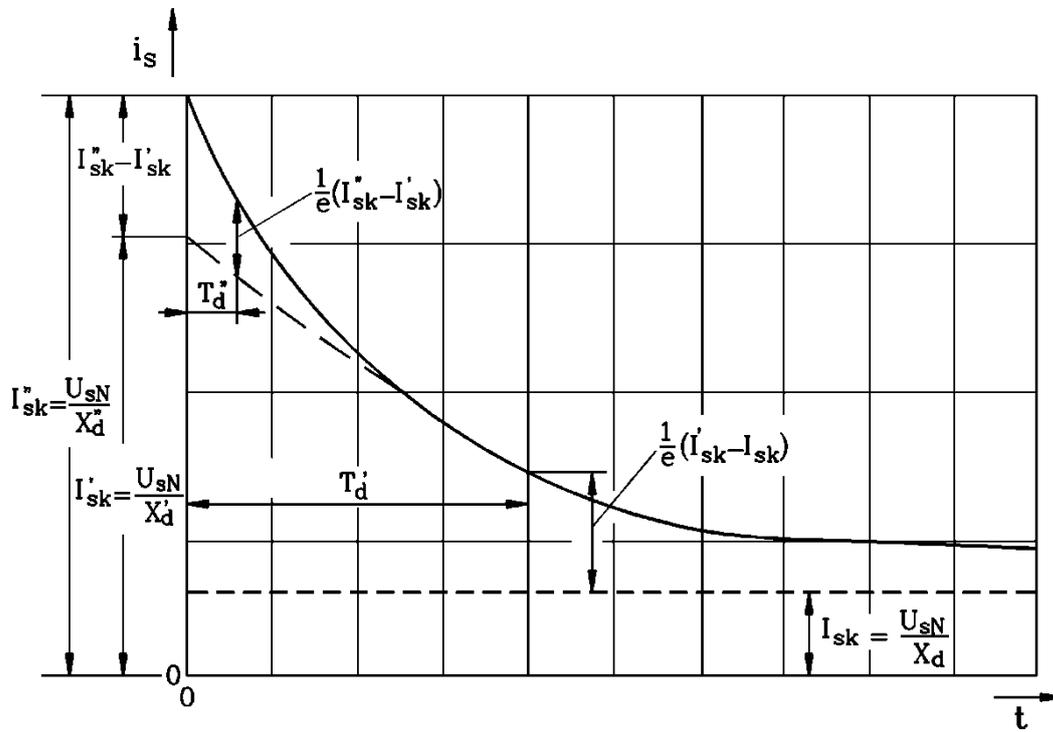


Abbildung 17: Hüllkurve der Wechselstromkomponenten bei dreipoligem Kurzschluss

11. Beschreibung der im Versuch verwendeten Synchronmaschinen

Der Versuch M5 kann wahlweise an zwei unterschiedlichen Synchronmaschinen durchgeführt werden. Die Polzahl beträgt jeweils 4, wodurch sich eine Synchrondrehzahl von 1500 min^{-1} ergibt. Die rot lackierte Maschine (Versuchsstand II, $S_N = 23 \text{ kVA}$) weist eine klassische Innen-Schenkelpolausführung (Typ Abb. 1b) auf, während die blau lackierte Maschine (Versuchsstand VII, $S_N = 40 \text{ kVA}$) als Außenpolmaschine (Typ Abb. 1c) ausgeführt ist. Der reale Aufbau dieser nur für kleine Leistungen verwendeten Bauform ist in der folgenden Abbildung 18 dargestellt.

Der Stator ist aufgebaut wie bei einer Gleichstrommaschine ohne Wendepole, jedoch mit Kompensationsnuten. Im rechten Bildbereich ist ein Pol der Erregerwicklung erkennbar. Die Maschine besitzt einen nachträglich eingebauten Dämpferkäfig in den Polschuhen. Hier wäre bei einer Gleichstrommaschine die Kompensationswicklung eingebaut. Über vier Schleifringe (Strang U, V, W und Neutralleiter) erfolgt die Anbindung des Rotors ans Dreiphasennetz. Die zugehörige verteilte Dreiphasenwicklung ist im mittleren Bildbereich zu sehen. Im Vergleich dazu sind bei der roten Maschine nur zwei Schleifringe vorhanden, um die rotierende Erregerwicklung mit Gleichstrom zu speisen.

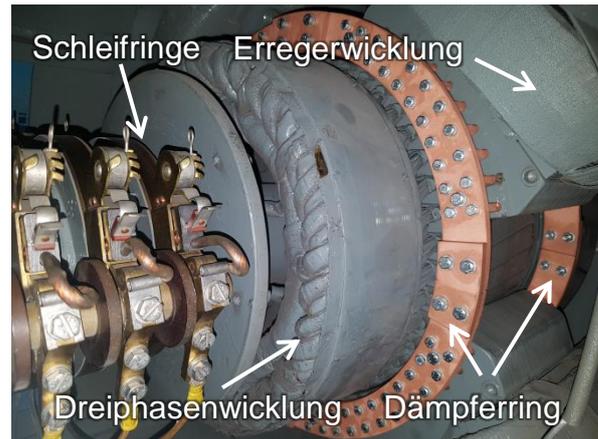


Abbildung 18: Aufbau der verwendeten Außenpol-Synchronmaschine mit Dämpferkäfig

Durch die ausgeprägte Schenkligkeit ist bei beiden Maschinen ein ausreichend großes Reluktanzmoment vorhanden, um die Maschine ohne Erregerstrom betreiben zu können. Die Auswirkungen auf das Betriebsverhalten werden im vorliegenden Versuch untersucht.

Als Belastungsmaschine kommt jeweils eine fremderregte Gleichstrommaschine zum Einsatz. Sowohl der Anker- als auch der Feldstrom werden dabei von einem Stromrichter gespeist. Zur Glättung des Ankerstroms sind zusätzliche Drosseln im Ankerkreis verbaut. Die Gleichstrommaschinen werden drehzahl geregelt betrieben, um die betriebsbedingten Drehzahlschwingungen der Synchronmaschinen zu kompensieren. Da die Synchronmaschinen naturgemäß am Netz ebenfalls mit konstanter Drehzahl laufen, muss der Regler der Gleichstrommaschine eine endliche Drehzahlsteifigkeit aufweisen und eine bleibende Regelabweichung zulassen. Dies wird erreicht, indem beim GSM-Regler der I-Anteil deaktiviert wird (PD-Regler). Die unterschiedlichen Belastungen im Motor- und Generatorbetrieb können somit über eine Änderung des Drehzahlswertes eingestellt werden.

12. Versuchsdurchführung und Ausarbeitung

 : Durchführung;  : Verständnisfrage;  : zu notieren;  : Ausarbeitung

Die angegebenen Einstellwerte gelten für Prüfstand II (rote Maschinen) und für Prüfstand VIII (blaue Maschinen) gleichermaßen, sofern nicht weitere Angaben in eckigen Klammern [] für die zweite Maschine vorliegen.

12.1. Vorbereitung

 Notieren Sie die Nenndaten der verwendeten Maschinen (Typenschild) sowie die verwendeten Messgeräte. (0,25 P)

Die Synchronmaschine ist mit einer fremderregten Gleichstrommaschine gekuppelt. Der Maschinensatz wird durch die mit Nennerregerstrom erregte Gleichstrommaschine mit Hilfe eines Stromrichters hochgefahren. Der Stromrichter fährt die Maschine bis Nenndrehzahl über einen eingestellten Rampenverlauf hoch. Die genaue Einstellung der Drehzahl erfolgt über einen Drehregler im Messkreis. Das Schaltbild des Versuchs zeigt Abbildung 19.

12.2. Leerlaufversuch

(Gesamtpunktzahl: 1,0 Punkte)

-  1. Treiben Sie die Synchronmaschine mit konstanter Drehzahl an. ($n = n_{\text{syn}}$)
2. Lesen Sie die Remanenzspannung ab und schalten Sie anschließend die Spannungsmessung wieder auf den höheren Messbereich um.
3. Schalten Sie die Spannungsversorgung der Erregerwicklung ein (S4). Beobachten Sie hierbei das Zeigermessgerät des Erregerstromes und regeln sie den Erregerstrom sofort auf dem Wert $I_f = 0A$.
4. Erhöhen Sie nun den Erregerstrom schrittweise. Gehen Sie dabei so vor, dass die verkettete Ständerspannung in 40-Volt-Schritten im Bereich $0 \leq U_s \leq 1,2 \cdot U_{sN}$ [$0 \leq U_s \leq 1,1 \cdot U_{sN}$] steigt.

 Wie ist der Übertragungsfaktor zwischen Skalenteilen des Anzeigerätes für den Erregerstrom und dem Stromwert?

 a) Notieren Sie U_s, I_f (0,25 P)

 b) Zeichnen Sie die gemessene (und gegebenenfalls korrigierte) Leerlaufkennlinie $U_s(I_f)$ auf Millimeterpapier. (0,25 P)

c) Zeichnen Sie die ungesättigte Leerlaufkennlinie in dasselbe Diagramm ein. (0,25 P).

d) Erläutern Sie den Kurvenverlauf, gehen Sie dabei auch auf die ungesättigte Leerlaufkennlinie ein. (0,25 P)

12.3. Belastungsversuch (Gesamtpunktzahl: 4,25 Punkte)

12.3.1. Synchronisation



1. Stellen Sie den Erregerstrom wieder so ein, dass sich der Wert $U_s = U_{sN}$ ergibt.
2. Schalten Sie Schalter S3 zu. (Schalter S5 muss offen sein!)



Was signalisieren Ihnen die Glühlampen und die Spannungsanzeige der „Dunkelschaltung“? Diskutieren Sie dies mit dem Betreuer des Versuchs.

Tipp: Der Betrag von Netz- und Maschinenspannung wird mit getrennten Geräten Netzseitig und an den Maschinenklemmen gemessen. Abweichungen in Frequenz- und Phasenlage werden durch Glühlampen sichtbar gemacht, welche die Spannungen über den 3 Schalterpolen signalisiert.



3. Schalten Sie die Synchronmaschine mit Schalter S5 an das Netz wenn alle 3 Lampen der Dunkelschaltung gleichzeitig dunkel sind und das zusätzlich eingebaute Spannungsmessgerät 0 V anzeigt.

12.3.2. V-Kurven



1. Betreiben Sie die Synchronmaschine als Generator am Netz. Treiben Sie den Generator dazu mit der Gleichstrommaschine an. (Positiver Ankerstromwert)
2. Stellen Sie die Antriebsleistung mit der GSM so ein, dass sich der geforderte Statorstrom $I_{sw} = 0,4 \cdot I_{sN}$ bzw. $I_{sw} = 0,8 \cdot I_{sN}$ bei einem Leistungsfaktor von $\cos \varphi = 1$ einstellt.

Tipp: $\cos \varphi = 1$ wenn Wattmeteranzeigen $\alpha_{Watt1} = \alpha_{Watt2}$

3. Verändern Sie für Ihre Messung nun den Erregerstrom I_f schrittweise in den übererregten und danach in den untererregten Bereich.

⚠ Beachten Sie dabei, dass weder I_{fN} noch I_{sN} überschritten werden

⚠ Verändern Sie bei dieser Messung nicht die Antriebsleistung der Gleichstrommaschine!



Sie verwenden Stromwandler für die Messung des Statorstroms. Wie berechnet sich der Übertragungsfaktor für die Amperemeter des Statorstroms?



- a) Notieren Sie sich die folgenden Werte: I_f in A, I_s in Skalenteilen, \dot{u}_t und I_s in A. (0,25 P)

Tipp: Bereiten Sie sich eine Tabelle folgender Gestalt vor:

40% P_N				80% P_N			
I_f / A	\dot{u}_t	I_s / Skt	I_s / A	I_f [A]	\dot{u}_t	I_s / Skt	I_s / A



- b) Zeichnen Sie die V-Kurven $I_s = f(I_f)$ auf Millimeterpapier. (0,5 P)
- c) Bestimmen Sie aus diesem Diagramm $I_{fN}(\cos \varphi = 0,8)$. (0,25 P)

12.3.3. Regulierkennlinien

1.  Betreiben Sie die Synchronmaschine als Generator am Netz. Treiben Sie den Generator dazu mit der Gleichstrommaschine an (Positiver Ankerstromwert).
2. Stellen Sie durch die GSM eine kleine Antriebsleistung ein, so dass sie einen Leistungsfaktor von $\cos\varphi=1$ einstellen können.

Tipp: $\cos\varphi=1$ wenn Wattmeteranzeigen $\alpha_{Watt1}=\alpha_{Watt2}$

Verändern Sie nun den Erregerstrom, so dass sich $\cos\varphi=1$ auch die Punkte $\cos(\varphi)=0,866$ übererregt, $\cos(\varphi)=0,866$ sowie $\cos(\varphi)=0$ über- und untererregt einstellen.

Tipp: $\cos(\varphi)=0,866$ wenn das Verhältnis der beiden Wattmeteranzeigen 1:2 beträgt und $\cos(\varphi)=0$ wenn das Verhältnis 1:-1 beträgt. Siehe auch „Allgemeines – Hinweise für die Praktika“

3. Wiederholen Sie die Schritte 1 bis 3 für verschiedene Belastungen, die Sie durch die GSM einstellen.

 *Beachten Sie dabei, dass weder I_{fN} noch I_{sN} oder der maximale Ankerstrom der GSM (100 A) [210 A] überschritten werden.*

- a)  Notieren Sie die folgenden Werte: I_f in A, I_s in Skalenteilen, \ddot{u}_1 und I_s in A. **(0,375 P)**

Tipp: Bereiten Sie sich eine Tabelle folgender Gestalt vor:

cos(phi)	1				0.866- übererregt				0.866- untererregt				0- übererregt				0- untererregt			
	I_f [A]	I_s [Skat]	\ddot{u}_1	I_s [A]	I_f [A]	I_s [Skat]	\ddot{u}_1	I_s [A]	I_f [A]	I_s [Skat]	\ddot{u}_1	I_s [A]	I_f [A]	I_s [Skat]	\ddot{u}_1	I_s [A]	I_f [A]	I_s [Skat]	\ddot{u}_1	I_s [A]

- b)  Zeichnen Sie die Regulierkennlinien in das Diagramm zusammen mit den Kennlinien aus Aufgabenteil 11.3.2. **(0,5 P)**

12.3.4. Ortskurven und Drehmomentkennlinien

1.  Bringen Sie die Gleichstrommaschine in den Leerlaufbetrieb (Ankerstrom = 0 A) und stellen Sie einen Erregerstrom von 0 A ein.
2. Drücken Sie im Leerlauf den Knopf „Leerlauf“ auf dem Polradwinkelmessgerät um es zurückzusetzen.
3. Stellen Sie einen konstanten Erregerstrom mit dem Wert $I_f = I_{fN}$ ein.
4. Verändern Sie nun schrittweise die Belastung mit der GSM so, dass sich der Polradwinkel in äquidistanten Schritten ändert. (Betreiben Sie die Synchronmaschine zunächst generatorisch, danach motorisch).
5. Nehmen Sie für generatorischen und motorischen Betriebsbereich jeweils ca. 7 Messwerte auf.
6. Wiederholen Sie die Schritte 3 bis 5 auch für die Erregerströme $I_f = I_{f0,ges}$ und $I_f = 0$.



- a) Notieren Sie sich die Werte \ddot{u}_i , I_s in Skt., Polradwinkel in Grad, α_{Watt1} und α_{Watt2} , sowie $U_{Watt,N}$ (0,375 P)

 Achten Sie darauf, dass bei beiden Wattmetern stets derselbe Spannungspfad ausgewählt ist.

Tipp: Bereiten Sie sich für jeden Erregerstromwert eine Tabelle folgender Gestalt vor:

$I_f = ? A$						
$I_s[\text{Skt.}]$	\ddot{u}_i	$I_s[A]$	$\theta [^\circ]$	α_1	α_2	$U_{Watt,N}$



- b) Berechnen Sie für jeden Ihrer Messpunkte die elektrische Wirkleistung P , sowie den Winkel φ und das elektrische Drehmoment M_e aus Ihren Messwerten. (1,0 P)

Tipp: Vernachlässigen Sie die Verluste der Synchronmaschine für die Berechnung von M_e wodurch folgende Vereinfachung gilt: $M_e = \frac{P}{\Omega_m}$. Verwenden Sie für die

Berechnung der Wirkleistung folgende Werte: $\alpha_{Watt,End} = 125 \text{ W}$, $I_{Watt,N} = 5 \text{ A}$.

- c) Tragen Sie das elektrische Drehmoment über dem Polradwinkel $M_e = f(\vartheta)$ in ein Diagramm auf Millimeterpapier auf. (0,5 P)
- d) Zeichnen Sie die Stromortkurven (Abbildung 8) mit den gemessenen Werten I_s und φ auf Millimeterpapier. (0,5 P)

12.3.5. Vorführung der Polradbewegung (relativ zum Drehfeld)



An der wird bei Belastung der Welle mit einem Stroboskop die Polradwinkel - Änderung über einen Lastwechsel vom Motorbetrieb bis zum Generatorbetrieb und bei Überlastung gezeigt. Die Synchronmaschine ist dabei unterregt zu betreiben! Beobachten Sie die Markierung an der Welle der Synchronmaschine.



Diskutieren Sie Ihre Beobachtung mit dem Betreuer des Versuchs.

12.4. Kurzschlussversuch (nach Abbildung 20)

(Gesamtpunktzahl: 1,75 Punkte)



1. Stellen Sie den Erregerstrom auf 0 A ein.
2. Fahren Sie den Versuchsstand komplett herunter und trennen Sie alle Spannungsversorgungen zum Prüfstand.
3. Verändern Sie den Versuchsaufbau gemäß Abbildung 20.
4. Treiben Sie die Synchronmaschine mit offenen Klemmen wieder auf Nenndrehzahl an.
5. Schalten Sie nun die Synchronmaschine über Schalter S5 kurz.
☞ Achten Sie darauf, dass zum Zeitpunkt des Kurzschließens der Erregerstrom auf 0 A eingestellt ist!
6. Erhöhen Sie nun den Erregerstrom in 1 A - Schritten so, dass sich der Statorstrom im Bereich $0 A < I_s < I_{sN}$ verändert.
7. Schalten sie die Antriebsleistung durch die GSM ab wenn sich die Synchronmaschine im Punkt $I_{sk} = I_{sN}$ befindet. Merken Sie sich bei auslaufender Maschine den Wert des Kurzschlussstromes bei Drehzahlen von ca. 1000 min^{-1} und 500 min^{-1} .



- a) Notieren Sie sich den eingestellten Erregerstrom und den sich ergebenden Kurzschlussstrom. (0,25 P)

Tipp: Bereiten Sie sich eine Tabelle folgender Gestalt vor:

I_f / A	\ddot{u}_f	I_s / Skt	I_s / A
-----------	--------------	--------------------	-----------



- b) Tragen Sie die Kurzschlusskennlinie $I_{sk} = f(I_f)$ in das Diagramm aus Aufgabe 12.2 ein. (0,25 P)
- c) Bestimmen Sie nun anhand der beiden Kennlinien das Leerlauf-Kurzschlussverhältnis k_k und k_k' . (0,5 P)
- d) Tragen Sie k_k' in das Diagramm der V-Kurven sinnvoll ein (0,25 P)
- e) Erklären Sie anhand einer Kennlinie den Verlauf des Kurzschlussstromes beim Auslauf der Synchronmaschine. (0,5 P)

12.5. Stosskurzschlussversuch (Gesamtpunktzahl: 1,75 Punkte)



1. Treiben Sie die Synchronmaschine analog zu Abschnitt 12.4 an. (Versuchsaufbau gemäß Abbildung 20; Schalter S5 offen)
2. Stellen Sie bei offenem Schalter den Erregerstrom so ein, dass sich eine Klemmenspannung von $U_s = 200\text{ V}$ (verkettet) ergibt.
Der Versuch wird mit einer reduzierten Spannung durchgeführt, da eine höhere Spannung zu einer zu großen Belastung beim Kurzschluss führt.
3. Verursachen Sie nun den Stoßkurzschluss durch schließen von Schalter S5.
4. Beobachten Sie den Verlauf des Stoßkurzschlussstroms auf dem Oszilloskop.



Was sehen Sie auf dem Oszilloskop? Wie verändert sich das Bild, wenn man den Versuch wiederholt? Woran liegt das? Diskutieren Sie das Verhalten mit dem Betreuer des Versuchs.



Speichern Sie das Bild des Kurzschlussstromes. Sie erhalten einen weiteren Verlauf des Kurzschlussstromes auf DIN A3 von Ihrem Betreuer.



- a) Fügen sie Ihr selbst aufgenommenes Bild des Kurzschlussstromes in der Ausarbeitung ein und erklären sie den Verlauf. Gehen Sie dabei auch auf einen eventuell erkennbaren Gleichanteil ein. Woher kommt dieser? (0,5 P)

Hinweis: Um eine übermäßige mechanische Beanspruchung der Wicklung zu vermeiden, wird der Stoßkurzschlussversuch mit verringerter Spannung durchgeführt (200 V verkettet). Man erhält daher bei der Auswertung die Reaktanzen der ungesättigten Maschine. Wegen des relativ hohen Dämpferkreiswiderstandes der untersuchten Maschine sind die subtransienten Vorgänge kaum bemerkbar, da ihre Zeitkonstante zu klein ist.

- b) Zeichnen Sie die obere Einhüllende des Kurzschlussstromes auf Millimeterpapier mit logarithmischer Einteilung. (Verwenden Sie dazu das Bild, dass sie auf DIN A3 Papier erhalten haben.) (0,25 P)
- c) Werten Sie den Verlauf des Kurzschlussstroms aus:
- bestimmen Sie \hat{I}_{sk} unter Verwendung Ihrer Zeichnung (0,25 P)
 - berechnen Sie X_d (0,25 P)
 - bestimmen Sie \hat{I}'_{sk} (0,25 P)
 - bestimmen Sie T'_d (0,25 P)

12.6. Bewertung der Ausarbeitung allgemein:

Die Form der Ausarbeitung (schriftliche Auswertung und Zeichnungen) wird ebenfalls bewertet. (1 Punkt)

13. Literatur

- [1] Bonfert, K.: Betriebsverhalten der Synchronmaschine, Springer-Verlag, Berlin, 1962
- [2] Bödefeld, T.; Sequenz, H.: Elektrische Maschinen, Springer-Verlag, Berlin, 1971
- [3] IEC 60034-4 (VDE 0530, Teil 4): Ermittlung der Kenngrößen und des Nennerregerstrom von Synchronmaschinen
- [4] Binder, A.: „Electrical Machines und Drives“, TU Darmstadt, textbook, 2008
- [5] Dubey, G.K.: Fundamentals of Electrical Drives, Narosa Publishing, New Delhi, 1995
- [6] Hindmarsh, J.: Electrical Machines and their Applications, Pergamon Press, Oxford, 1991
- [7] Hindmarsh, J.: Electrical Machines and Drives – Worked Examples, Pergamon Press, Oxford, 1985
- [8] Fitzgerald, A.E.; Kingsley, C.; Umans, S.D.: Electric machinery, McGraw-Hill, 6th ed., 2003, Boston, USA
- [9] Matsch, L.W.: Electromagnetic and Electromechanical Machines, Intext Educational Publishers, Int. Textbook Comp., 1972, Scranton, USA
- [10] Adkins, B.: The general theory of Electrical machines, Advanced Engineering Textbooks, Chapman & Hall, 4th ed. 1964, UK

15. Verständnisfragen

- 1) Skizzieren Sie den Aufbau einer Vollpolsynchronmaschine (Innenpolanordnung) mit Ständer, Drehstromwicklung, Luftspalt, Läufer und Erregerwicklung!
- 2) Skizzieren Sie den Aufbau einer Schenkelpolsynchronmaschine (Innenpolanordnung) mit Ständer, Drehstromwicklung, Luftspalt, Läufer und Erregerwicklung!
- 3) Nennen Sie Einsatzgebiete von Vollpol- und Schenkelpolsynchronmaschinen!
- 4) Zeichnen Sie das einphasige Ersatzschaltbild einer Vollpolsynchronmaschine und benennen Sie alle Komponenten entsprechend!
- 5) Geben Sie die Spannungsgleichung der Vollpolsynchronmaschine je Strang in komplexer Schreibweise an! Zeichnen Sie das Spannungs- und Stromzeigerdiagramm für eine ohmsch-induktive Last im Generatorbetrieb!
- 6) Was ist der wesentliche Unterschied in der Drehmomentbildung zwischen Vollpol- und Schenkelpolmaschine? Geben Sie die Spannungsgleichung der Schenkelpolsynchronmaschine je Strang in komplexer Schreibweise an (Hinweis: Der Strangstrom ist in d- und q-Komponente zu zerlegen)!
- 7) Was beschreibt die Stromortskurve der Synchronmaschine? Skizzieren Sie die Stromortskurve einer Vollpolmaschine für Nennerregung, und markieren Sie die Bereiche mit „stabil“, „instabil“, „übererregt“, „untererregt“, „Motor-“ und „Generatorbetrieb“!
- 8) Welche Bedingungen müssen für die Synchronisation einer Synchronmaschine an das starre Netz erfüllt sein?
- 9) Was beschreiben die V-Kurven einer Synchronmaschine? Skizzieren Sie qualitativ den Verlauf dreier V-Kurven ($0,25 P_N$, $0,5 P_N$, P_N), und verbinden Sie die Punkte für Betrieb mit Leistungsfaktor $\cos(\varphi) = 1$ (Regulierkennlinie)!
- 10) Was bedeutet in der Anlagentechnik der Begriff „Inselbetrieb“? Treten die stabilen und instabilen Betriebsbereiche wie beim Betrieb am starren Netz auf? Ändert sich die Klemmenspannung U_s bei Belastung? Begründen Sie Ihre Antwort!
- 11) Zeichnen Sie qualitativ die Leerlaufkennlinie und die Kurzschlusskennlinie einer Synchronmaschine in ein Diagramm! Welche Voraussetzung muss dabei die Drehzahl erfüllen?
- 12) Diskutieren Sie den Verlauf der generatorischen Leerlaufkennlinie! Beschreiben Sie insbesondere den Punkt für Erregerstrom $I_f = 0$ A und den Bereich für hohe Erregerströme!
- 13) Wie bestimmt man aus der Leerlauf- und der Kurzschlusskennlinie das Leerlauf-Kurzschlussverhältnis der ungesättigten Maschine k_k' ? Wie ermittelt man mit k_k' die ungesättigte Synchronreaktanz X_d ?
- 14) Tragen Sie für zwei unterschiedliche Erregerströme das Drehmoment über dem Polradwinkel für eine Vollpolsynchronmaschine auf! Kennzeichnen Sie das Nennmoment im Generator- und Motorbetrieb! Wie groß dürfen die zugehörigen Polradwinkel maximal sein?
- 15) Tragen Sie für die Schenkelpolsynchronmaschine das vom Erregerstrom stammende synchrone Drehmoment und das Reluktanzmoment über dem Polradwinkel in ein gemeinsames Diagramm ein! Ermitteln Sie daraus das resultierende Luftspaltpmoment! Kennzeichnen Sie das Nennmoment und den zugehörigen Polradwinkel im Generator- und Motorbetrieb! Tragen Sie die Stabilitätsgrenze ein!
- 16) Skizzieren Sie den Zeitverlauf des Stoßkurzschlussstroms je Strang (in p.u.) einer vorher leerlaufenden Synchronmaschine mit Dämpferwicklung für Kurzschluss a) im Spannungsnulldurchgang, b) im Spannungsmaximum mit typischen Zahlenwerten für Maximalwerte!
In welche drei Zeitbereiche lässt sich der Wechselanteil dieses Verlaufs einteilen und warum?