

2. Gleichstrommaschine

Der wesentliche Vorteil der Gleichstrommaschine (GSM) gegenüber der Drehfeldmaschine ist ihre über die Spannungsamplitude veränderbare Betriebsdrehzahl bei gleichbleibendem Moment. Gleichstrommaschinen ermöglichen einen großen Drehzahlbereich. Das Bild 2.1 zeigt den grundsätzlichen Aufbau einer GSM. Die Erregerwicklung befindet sich bei GSM üblicherweise im Ständer (Außenpolmaschine). Der Läufer trägt die Wicklung, in die bei Bewegung eine Spannung induziert wird (Ankerwicklung). Die Erregerwicklung erzeugt ein zeitlich und räumlich konstantes Feld. In diesem Feld dreht sich die Läufer (Anker)-Wicklung. Der Läufer trägt eine Reihe von Wicklungen, die über den Kommutator (Stromwender) mit der speisenden Gleichspannungsquelle verbunden sind.

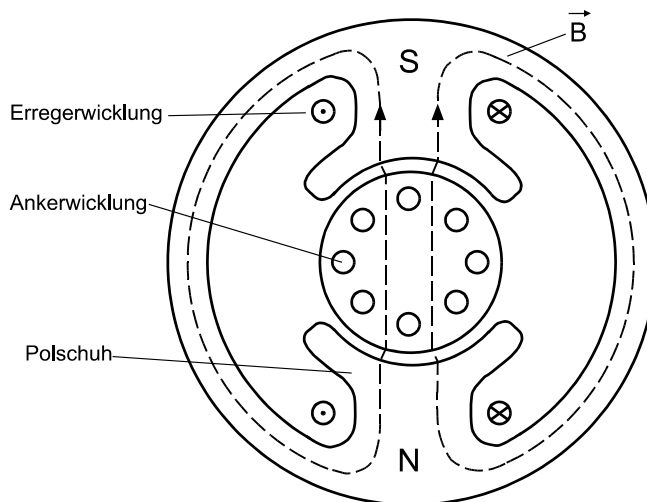


Bild 2.1: Aufbau der Gleichstrommaschine

Zur Erläuterung der Funktion betrachten wir zunächst eine einzige Windungsschleife in einem homogenen, zeitlich konstanten Magnetfeld (Bild 2.2). Die induzierte Spannung u_{12} lässt sich folgendermaßen berechnen:

$$u_{12} = \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.1)$$

mit $\Phi = \Phi_0 \cdot \cos(2\pi n t)$ und $\Phi_0 = -B \cdot A$ folgt

$$u_{12} = 2\pi n \cdot B \cdot A \cdot \sin(2\pi n \cdot t) = \omega \cdot B \cdot A \cdot \sin(\omega t) \quad (2.2)$$

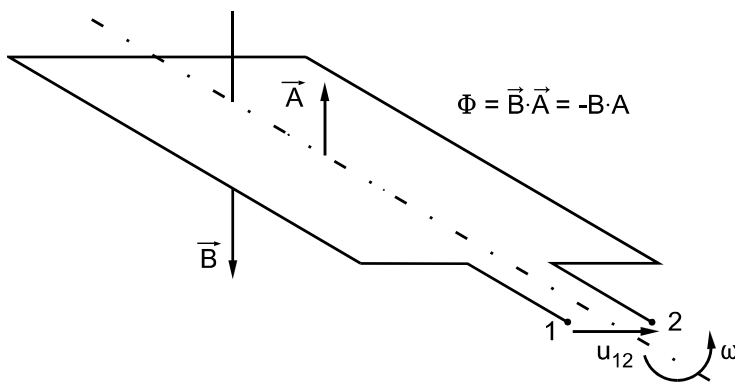


Bild 2.2: Ankerwicklung im homogenen, zeitlich konstanten Magnetfeld

2.1 Der Kommutator

Ein Kommutator für eine Windungsschleife besteht aus zwei voneinander isolierten Ringhälften, auf denen Bürsten schleifen (Bild 2.3). Wechselt die in der Schleife induzierte Spannung ihr Vorzeichen, wechseln auch die Bürsten auf die jeweils andere Ringhälfte. An den Bürsten ist eine pulsierende Gleichspannung abgreifbar. Durch mehrere räumlich versetzte Windungsschleifen (Wicklungen) erhält man eine Glättung des Spannungsverlaufs.

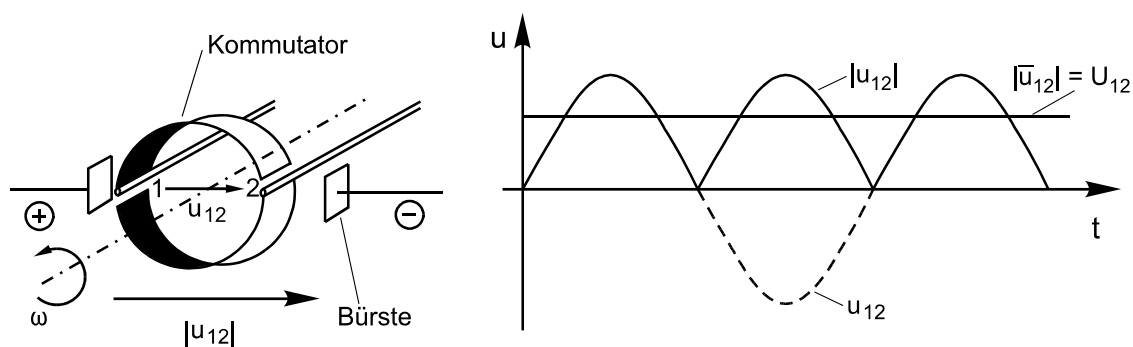


Bild 2.3: Das Kommutatorprinzip

2.2 Grundgleichungen der GS-Maschine

Allgemein gilt: Bewegt sich ein Leiter in einem Magnetfeld, dann entsteht in diesem Leiter eine elektrische Feldstärke.

$$-\vec{E} = \vec{v} \times \vec{B} \quad (2.3)$$

Im Luftspalt einer Maschine stehen B , v sowie der Leiter senkrecht aufeinander. Für einen Ankerleiter der Länge l ergibt sich:

$$U_q = -E \cdot l = l \cdot B \cdot v \cdot \sin 90^\circ \quad (2.4)$$

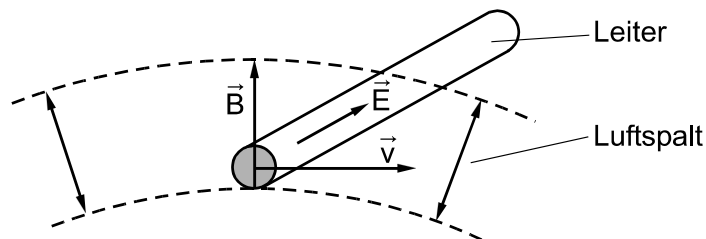


Bild 2.4: Zur Berechnung der induzierten Spannung

Die an den äußeren Klemmen abgreifbare Spannung entspricht bei leerlaufender Maschine ($I = 0$) der inneren Quellenspannung u_q entsprechend der Leiterzahl Z .

$$U_q = Z \cdot B \cdot l \cdot v \quad (2.5)$$

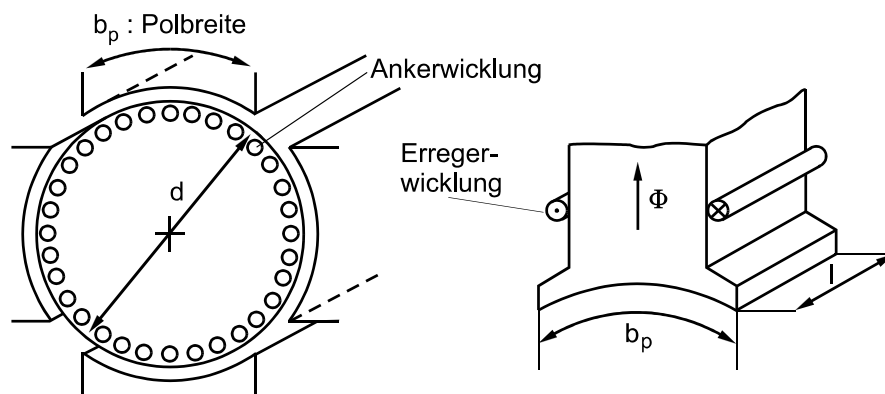


Bild 2.5: Zur Bestimmung der Maschinenkonstanten

Wir führen anstelle der Flußdichte B den magnetischen Fluß Φ ein (Bild 2.5),

$$B = \frac{\Phi}{A} = \frac{\Phi}{b_p \cdot l} \quad (2.6)$$

und weiter anstelle der Umfangsgeschwindigkeit v die Drehzahl n :

$$v = d \cdot \pi \cdot n \quad (2.7)$$

Setzen wir die Größen in die Gleichung für u_q (Gleichung 2.5) ein, so erhalten wir nach entsprechendem Kürzen als Ergebnis die Größengleichung

$$\begin{aligned} U_q &= Z \cdot \frac{\Phi}{b_p \cdot l} \cdot l \cdot d \cdot \pi \cdot n \\ &= Z \cdot \frac{r}{b_p} \cdot 2 \cdot \pi \cdot n \cdot \Phi \\ &= C_{Masch} \cdot n \cdot \Phi = Z \cdot \frac{p}{\pi} \cdot \omega \cdot \Phi \\ &= C'_{Masch} \cdot \omega \cdot \Phi = C'_{Masch} \cdot 2 \cdot \pi \cdot n \cdot \Phi \end{aligned} \quad (2.8)$$

- mit:
- Z Zahl der in Reihe liegenden Leiter
 - $(r \pi)/b_p$ Polpaarzahl p bei Polbedeckung $\alpha = 1$
 - $2 \pi n$ Winkelgeschwindigkeit ω ($[n] = s^{-1}$)
 - Φ Erregerfluß ($[\Phi] = V s = Wb$)
 - α Polbedeckung $\alpha = b_p/\tau$, mit τ als Polteilung

Für eine gegebene Maschine sind also Φ und n die betrieblichen Einflußgrößen. Die Maschinenkonstante C_{Masch} ist durch die Konstruktion der Maschine festgelegt. Sie kann durch Messungen bestimmt werden. Die Formel (2.8) gilt für jede Betriebsart der Maschine. Eine Quellenspannung u_q wird bei Generator- und Motorbetrieb induziert. Die an den Bürsten abgreifbare Gleichspannung ist durch die Frequenz

$$f_a = 0 \quad (2.9)$$

gekennzeichnet (Bild 2.6). Im Innern der Wicklung tritt dagegen eine Wechselspannung mit der Frequenz

$$f_i = p \cdot n \quad (2.10)$$

auf. Die innere Frequenz kann in weiten Grenzen beliebige Werte annehmen. Dadurch ergibt sich bei der Gleichstrommaschine eine große Freizügigkeit bezüglich der Drehzahl.

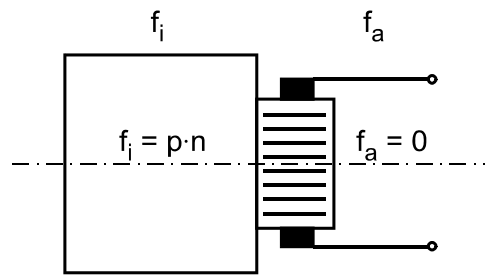


Bild 2.6: Der Kommutator als mechanischer Frequenzwandler

2.3 Leistung und Drehmoment

Sobald die Maschine belastet ist, also ein Ankerstrom I_A fließt, ergibt sich eine Kraftwirkung und damit ein inneres Drehmoment. Das gilt für jede Betriebsweise. Ein einfacher Weg zur Bestimmung des inneren Drehmomentes M_i ergibt sich über die innere Leistung:

$$P_i = U_q \cdot I_A \quad (2.11)$$

Die Gleichung für das Drehmoment lautet:

$$M_i = \frac{P_i}{\omega} = \frac{U_q \cdot I_A}{2 \cdot \pi \cdot n} \quad (2.12)$$

Setzt man Gl. (2.8) in Gl. (2.12) ein, so folgt:

$$M_i = Z \cdot \frac{p}{\pi} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{2 \cdot \pi \cdot n} \cdot I_A \cdot \Phi = Z \cdot \frac{p}{\pi} \cdot I_A \cdot \Phi \quad (2.13)$$

Nach erfolgter Auslegung stellen die Faktoren für die Maschine wieder eine Konstante C'_{Masch} dar,

$$M_i = C'_{Masch} \cdot \Phi \cdot I_A \quad (2.14)$$

wobei

$$C_{Masch} = C'_{Masch} \cdot 2 \cdot \pi \quad (2.15)$$

gilt.

2.4 Ankerrückwirkung

Die Ankerstromverteilung bewirkt eine symmetrische Durchflutungsverteilung Θ_A (Bild 2.7). Die Induktion stellt sich entsprechend dem magnetischen Widerstand ein. In der Polücke ist der magnetische Widerstand groß, deshalb entsteht eine Einbuchtung im Verlauf der Induktion B_A .

B_A überlagert sich der Erregerinduktion B_f , dadurch entsteht die resultierende Luftspaltinduktion B_{res} .

Durch Feldverzerrung stehen die Bürsten nicht mehr in einer neutralen Zone ($B_{res} = 0$). Zur Verhinderung von "Bürstenfeuer" (Lichtbogen am Kommutator) müssen die Bürsten räumlich verstellt werden. Die Stellung ist aber abhängig vom Ankerstrom (Größe und Vorzeichen, d.h. auch von der Betriebsweise als Motor oder Generator). Dadurch können vor allem bei großen Maschinen unangenehme Folgen entstehen.

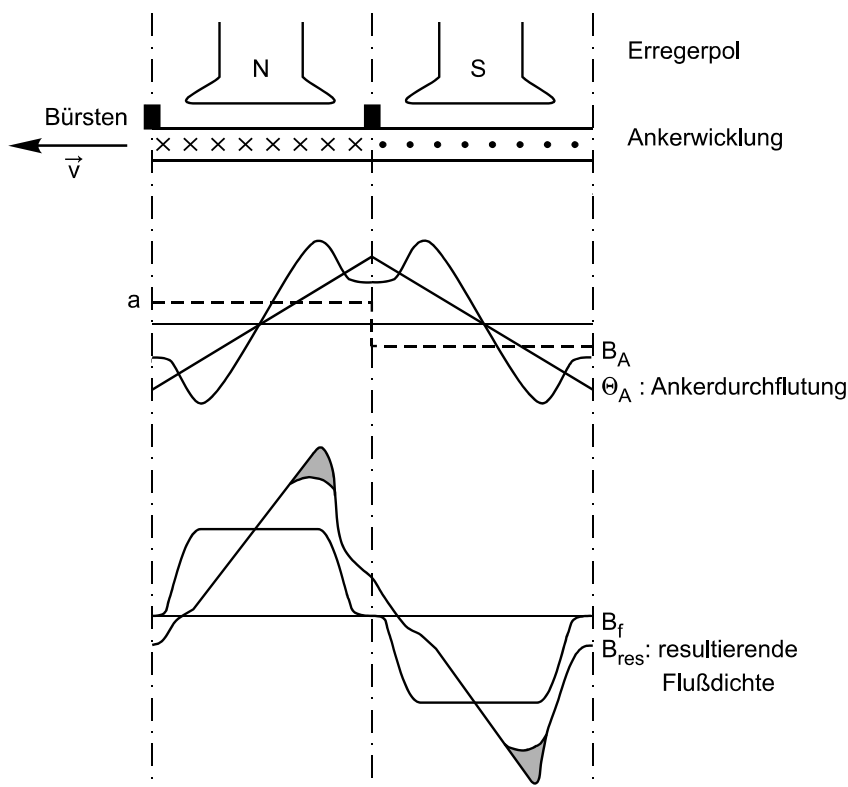


Bild 2.7: Luftspaltfeld unter Berücksichtigung der Ankerrückwirkung (Θ_A, B_A) ("abgewinkelte" Maschine)

Eine Abhilfe entsteht durch Einbringung von Wendepolen und Kompensationswicklungen.

- Wendepole (Bild 2.8):
Sie befinden sich in den Pollücken; ihre Erregerwicklung ist von I_A durchflossen. Die Aufgabe der Wendepole besteht in der Kompensation des Ankerfeldes in der Pollücke; dadurch bleibt die neutrale Zone erhalten und die Kommutierung wird erleichtert.
- Kompensationswicklung (Bild 2.8):
Sie befindet sich in den Polschuhen und wird von I_A durchflossen. Die Aufgabe der Kompensationswicklung ist die Vermeidung von Spitzen in der Feldkurve und damit des Spannungsabfalls der Ankerrückwirkung. Da Wendepole und Kompensationswicklung von I_A durchflossen werden, erfolgt eine automatische Kompensation des Ankerfeldes.

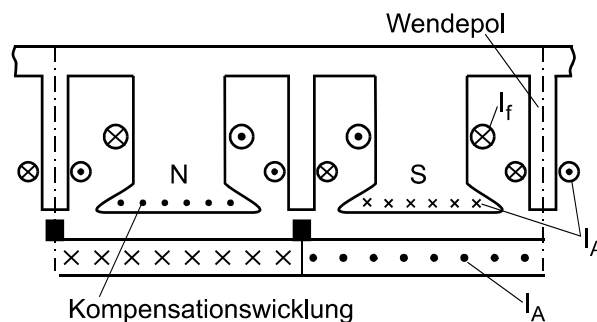


Bild 2.8: Anordnung von Wendepolen und Kompensationswicklungen

2.5 Das Betriebsverhalten der Gleichstrommaschine

2.5.1 Mathematisches Modell für den stationären Betrieb

Das Verhalten der GSM im stationären Betrieb ($\dot{I}_A = \dot{I}_f = 0$) kann aus den folgenden drei Gleichungen abgeleitet werden:

$$U_A = R_A \cdot I_A + U_q \quad (2.16)$$

$$U_q = C_{Masch} \cdot \Phi \cdot n \quad (2.17)$$

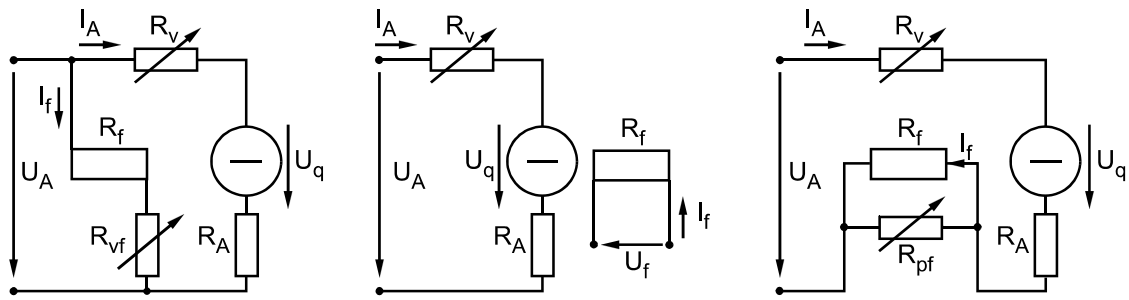
$$M_i = \frac{C_{Masch}}{2 \cdot \pi} \cdot \Phi \cdot I_A \quad \text{mit} \quad \Phi = \frac{N_f \cdot I_f}{R_{mf}} \quad (2.18)$$

R_{mf} ist der magnetische Widerstand des Feldkreises.

Das Betriebsverhalten der Gleichstrommaschine hängt davon ab, wie die Erregerwicklung geschaltet ist. Wir unterscheiden prinzipiell drei Arten der Schaltung von Erregerwicklungen (Bild 2.9).

- Nebenschlußmaschine,
die Erregerwicklung wird parallel zur Ankerwicklung geschaltet.
- fremderregte Gleichstrommaschine,
die Erregerwicklung wird an eine unabhängige Spannungsversorgung angeschlossen.
- Reihenschlußmaschine,
die Erregerwicklung wird mit der Ankerwicklung in Reihe geschaltet

Eine Maschine kann auch mehrere unterschiedlich geschaltete Erregerwicklungen haben.



Nebenschlußmaschine

Fremderregte Maschine

Reihenschlußmaschine

Bild 2.9: Betriebsarten der Gleichstrommaschine

- R_A Ankerwicklungswiderstand
- R_V Ankervorwiderstand
- R_f Feldwicklungswiderstand
- R_{pf} Feldparallelwiderstand
- R_{vf} Feldvorwiderstand

2.5.2 Vollständiges mathematisches Modell

Bei der Behandlung dynamischer Vorgänge der Gleichstrommaschine (am Beispiel der fremderregten Gleichstrommaschine) muß der Spannungsabfall an der Ankerwicklungs- (L_A) und Feldwicklungsinduktivität (L_f) berücksichtigt werden. Bild 2.10 zeigt das Ersatzschaltbild für diesen Fall.

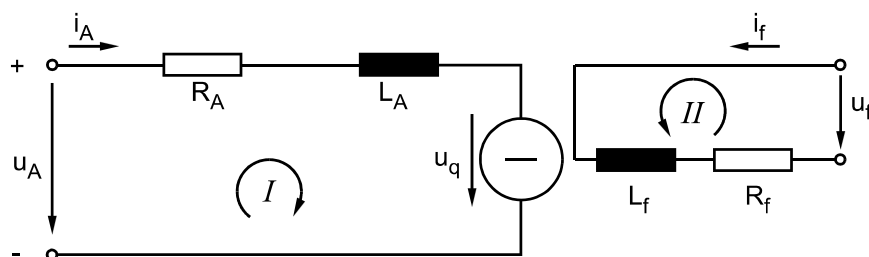


Bild 2.10: Ersatzschaltbild der fremderregten Gleichstrommaschine

Die Zusammenstellung der Grundgleichungen für das Ersatzschaltbild aus Bild 2.10 ergibt:

$$u_A = i_A \cdot R_A + L_A \cdot \frac{di_A}{dt} + C_{Masch} \cdot n \cdot \dot{\Phi} \quad (2.19)$$

$$u_f = i_f \cdot R_f + L_f \cdot \frac{di_f}{dt} \quad (2.20)$$

$$M_i = \frac{C_{Masch}}{2\pi} \cdot \Phi \cdot i_A \quad (2.21)$$

hierbei ist $C_{Masch} \cdot n \cdot \dot{\Phi} = u_q$.

2.6 Nebenschlußmaschine

Das stationäre Betriebsverhalten (differenzierte Größen werden gleich Null gesetzt) der Gleichstromnebenschlußmaschine wird beschrieben durch:

1. Spannungsgleichung des Ankerkreises:

$$U_A = I_A \cdot (R_A + R_V) + U_q \quad (2.22)$$

2. Gleichung des Feldkreises:

$$\Phi = \frac{N_f}{R_m} \cdot I_f \quad \text{mit} \quad I_f = \frac{U_A}{R_f + R_{vf}} \quad (2.23)$$

Mit der Leerlaufdrehzahl ($I_A = 0$, $U_A = U_q$)

$$n_0 = \frac{U_A}{C_{Masch} \cdot \Phi} \quad (2.24)$$

erhält man für die Drehzahl n folgende Gleichung:

$$n = n_0 - \frac{I_A (R_A + R_V)}{C_{Masch} \cdot \Phi} \quad (2.25)$$

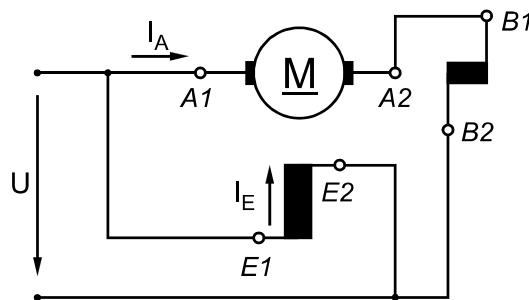


Bild 2.11: Schaltbild der Nebenschlußmaschine (nach DIN 40715/42401)
Ankerwicklung A1-A2, Wendepolwicklung B1-B2, Erregerwicklung E1-E2

Die Drehzahl n läßt sich durch folgende Maßnahmen einstellen (siehe Bild 2.9):

1. Ankerkreisvorwiderstand R_V verändern (Bild 2.12)

Die beiden Nachteile dieser Maßnahme sind:

- hohe Verluste
- starke Abhängigkeit der Drehzahl vom Ankerstrom

2. Fluß über I_f einstellen

Die Drehzahl n ist proportional $1/\Phi$, weil bei kleinerem Fluß eine höhere Drehzahl erforderlich ist, um ein Spannungsgleichgewicht zu erzielen. Flußschwächung bedeutet Drehzahlerhöhung. (Übliches Verfahren der Drehzahleinstellung)

Es ist allerdings zu kleinen Drehzahlen hin beschränkt, da wegen Sättigung nicht ein beliebig großer Fluß realisierbar ist.

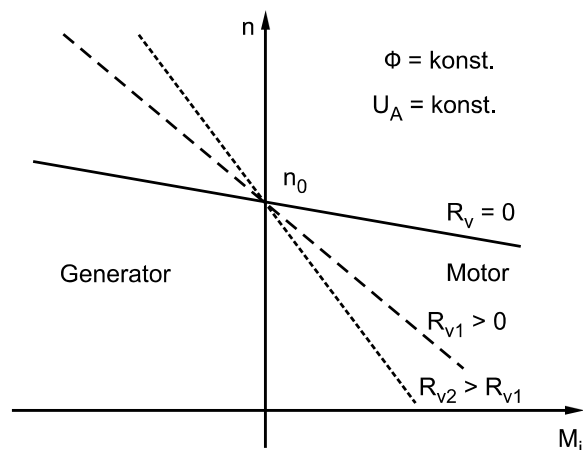


Bild 2.12: Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie mit R_V als Parameter

Für die Abhängigkeit $n = f(M_i)$ gilt:

$$n = n_0 - \frac{(R_A + R_V)}{\frac{(C_{Masch})^2}{2\pi} \cdot \Phi^2} \cdot M_i \quad (2.26)$$

Wirkung des Ankervorwiderstandes:

Der Ankervorwiderstand R_V dient als Anlasser zur Begrenzung des Anfahrstromes am Gleichstromnetz konstanter Spannung (z.B. bei Gleichstrombahnen).

Der Ankerkreisvorwiderstand R_V begrenzt zwar den Ankerstrom I_A , verkleinert aber gleichzeitig das Drehmoment $M_i = C_{Masch}/(2\pi) \cdot \Phi \cdot I_A$, d.h. die Drehzahlkennlinie wird "weicher". (Achtung, zusätzliche Verluste)

2.7 Der selbsterregte Gleichstromgenerator

Der selbsterregte Gleichstromgenerator ist eine Sonderform der Nebenschlußmaschine. Die Feldwicklung des Generators wird durch die vom Generator selbst erzeugte Spannung gespeist. Diese Betriebsweise ist möglich, weil durch die Remanenz des Eisens auch bei $I_f = 0$ ein endliches Feld vorhanden ist.

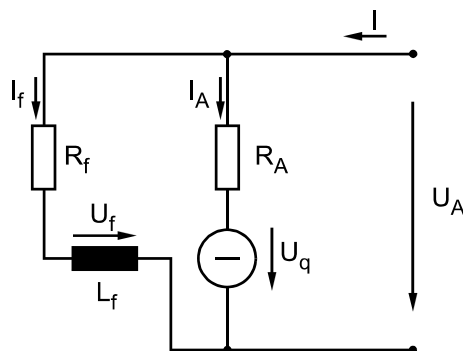


Bild 2.13: Ersatzschaltbild eines selbsterregten Gleichstromgenerators

Mit der Annahme $n = \text{konst.}$ und $R_A = 0$ erhält man:

$$I_f = \frac{U_q}{R_f} \quad (2.27)$$

$$U_q = I_f \cdot R_f \quad R_A \ll R_f, \quad L_A \ll L_f \quad (2.28)$$

Für den Erregerkreis gilt:

$$u_q = L_f \cdot \frac{di_f}{dt} + R_f \cdot i_f \quad (2.29)$$

$$\frac{di_f}{dt} = \frac{1}{L_f} \cdot (u_q - i_f \cdot R_f) \quad (2.30)$$

Aus der vorherigen Gleichung ergibt sich:

$$u_q > i_f R_f \rightarrow \frac{di_f}{dt} > 0 \quad (2.31)$$

i_f nimmt solange zu, bis $u_q = i_f \cdot R_f$ ist. Dieser Punkt ist der stationäre Betriebspunkt. Tatsächlich darf R_A nicht vernachlässigt werden. Bei Belastung des Generators wird durch $I_A \cdot R_A$ das Feld geschwächt. Daraus folgt, daß u_q kleiner wird (Bild 2.14)

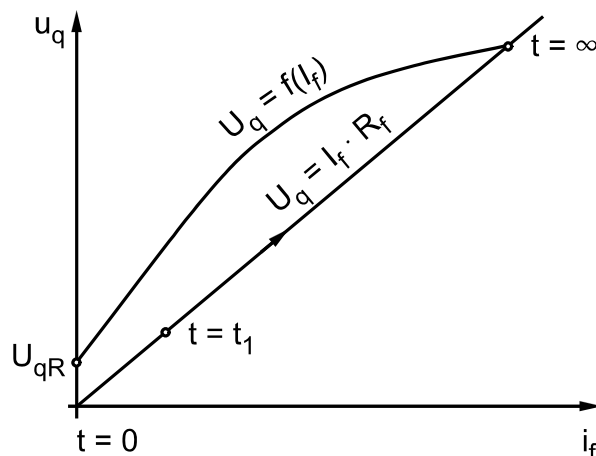


Bild 2.14: Leerlaufkennlinie und stationärer Betriebspunkt des Gleichstrom-Generators

2.8 Reihenschlußmaschine

Ein Schaltbild der Reihenschlußmaschine ist in Bild 2.15 dargestellt.

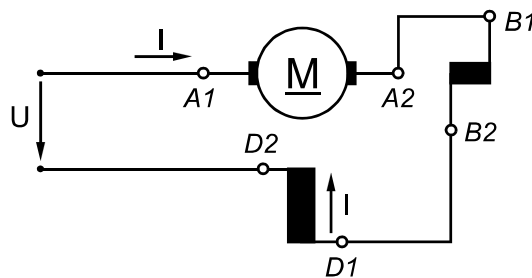


Bild 2.15: Schaltbild einer Reihenschlußmaschine

Wie beim Nebenschlußmotor wird R_v nur zum Anfahren und R_{pf} zur Feldschwächung und damit zur Drehzahlsteuerung verwendet (siehe Bild 2.9). Im Normalfall ist $R_{pf} \rightarrow \infty$. Für den Fall $R_{pf} \rightarrow \infty$ ist $I_f = I_A$. Daraus ergibt sich $\Phi = f(I_A)$.

Im linearen Bereich der Magnetisierungskennlinie gilt daher:

$$\Phi = \frac{N_f}{R_{mf}} \cdot I_A \quad (2.32)$$

Die erste Grundgleichung (Gl. 2.17) ergibt:

$$U_q = C_{Masch} \cdot \frac{N_f}{R_{mf}} \cdot n \cdot I_A \quad (2.33)$$

Mit $R = R_v + R_A + R_f$ gilt:

$$U_A = C_{Masch} \cdot \frac{N_f}{R_{mf}} \cdot n \cdot I_A + R \cdot I_A \quad (2.34)$$

Daraus erhält man:

$$n = \frac{R_{mf}}{C_{Masch} \cdot N_f} \cdot \left[\frac{U_A}{I_A} - R \right] \quad (2.35)$$

Die zweite Grundgleichung (Gl. 2.18) ergibt:

$$M_i = \frac{C_{Masch}}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{N_f}{R_{mf}} \cdot I_A^2 \quad (2.36)$$

Somit gilt mit Gleichung (2.35) und (2.36) für die Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie:

$$n = \frac{R_m}{C_{Masch} \cdot N_f} \cdot \left[\frac{U_A}{\sqrt{M_i}} \cdot \sqrt{\frac{N_f}{R_{mf}} \cdot \frac{C_{Masch}}{2 \pi}} - R \right] \quad (2.37)$$

Der Reihenschlußmotor zeigt eine starke Abhängigkeit des Drehmomentes von der Drehzahl: "weiche Drehzahlkennlinie". Dadurch ist er besonders geeignet für Traktionszwecke (Bahnmotoren). Er verbindet ein hohes Anzugsmoment ($n = 0$) mit hoher Drehzahl bei kleinem Drehmoment (Bild 2.16).

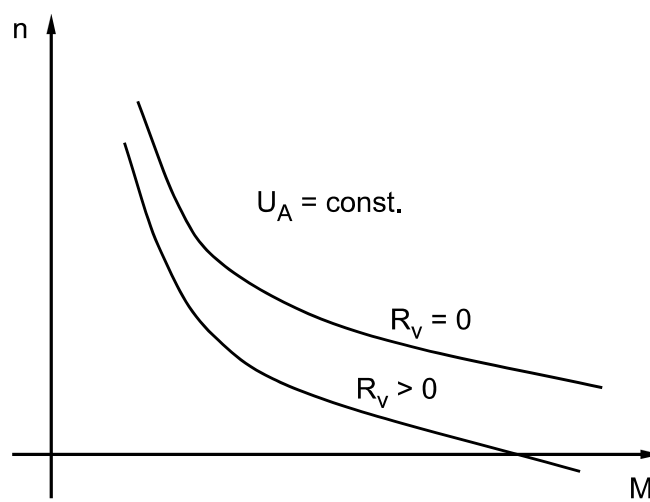


Bild 2.16: Drehzahl-Drehmomentkennlinie mit R_v als Parameter

Hinweis:

Der Reihenschlußmotor darf nicht völlig mechanisch entlastet werden; wegen des fehlenden Flusses geht sonst $n \rightarrow \infty$, d.h. der Motor würde durchdrehen.

Die Drehrichtungsumkehr ist nur durch Umpolen der Feld- oder Ankerwicklung möglich. Wegen der Reihenschaltung von Feld- und Ankerwicklung wirkt das Moment unabhängig von der Stromrichtung immer in die gleiche Richtung. Deshalb ist der Reihenschlußmotor auch mit Wechselspannung betreibbar. (Eisenteile müssen zur Verringerung der Wirbelströme geblecht werden.)

Der Einsatz als Wechselstrom-Bahnmotor oder bei kleiner Leistung (bis ca. 500 W) als Universalmotor, d.h. Betrieb mit Gleich- oder Wechselspannung (Hausgeräte, Elektrowerkzeuge u.ä.) ist üblich.

Der Vorteil des Universalmotors: Der Drehzahlbereich ist nicht durch eine Leerlaufdrehzahl beschränkt.

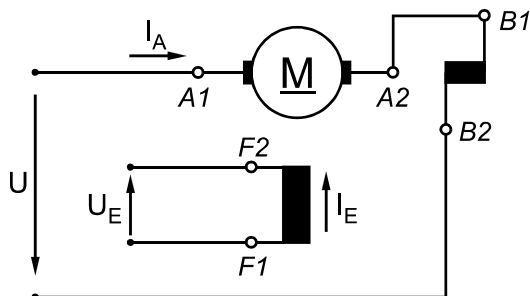
2.9 Fremderregte Gleichstrommaschine

Bild 1.17: Schaltbild der fremderregten Gleichstrommaschine

Unter der Annahme, daß die Ankerspannung $U_A = \text{konst.}$ und der magnetische Fluß $\Phi = \text{konst.}$ sind, leiten wir die Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie der fremderregten Gleichstrommaschine ab. Im Leerlauf gilt:

$$U_q = U_A \quad (2.38)$$

Mit der ersten Grundgleichung (2.17) folgt:

$$n_0 = \frac{U_A}{C_{Masch} \cdot \Phi} \quad (2.39)$$

Bei abweichender Drehzahl ist $U_q \neq U_A$. Die Differenz ist der Spannungsabfall am Ankerwiderstand R_A :

$$I_A \cdot R_A = U_A - U_q \quad (2.40)$$

Mit Gleichung (2.17) erhält man für die Drehzahl n :

$$n = \frac{1}{C_{Masch} \cdot \Phi} \cdot (U_A - I_A \cdot R_A) \quad (2.41)$$

Mit Gleichung (2.39) und (2.18) ergibt sich:

$$n = n_0 - \frac{R_A}{\frac{C_{Masch}^2 \cdot \Phi^2}{2 \pi}} \cdot M_i \quad (2.42)$$

Damit ist das Verhalten der fremderregten Maschine beschrieben. Die Leerlaufdrehzahl n_0 ist durch U_A und Φ steuerbar.

Hieraus läßt sich das Kennlinienfeld Drehzahl über Drehmoment ermitteln (Bild 2.18). Parameter ist die Klemmenspannung U_A bezogen auf die Nennspannung U_{AN} , der Fluß Φ sei konstant.

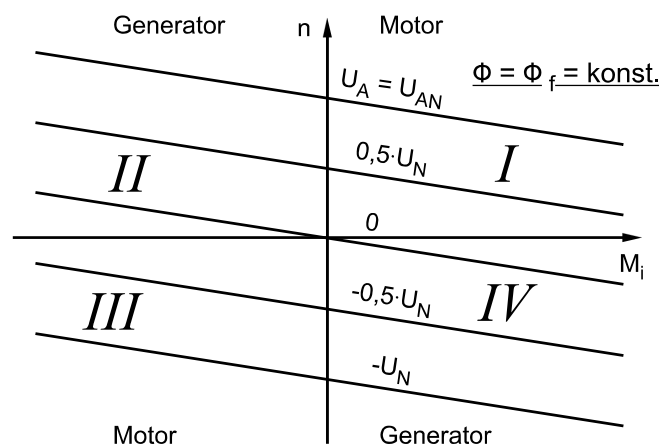


Bild 2.18: Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie der fremderregten GSM

Im Verbraucherzählpeilsystem gilt:

für $U_A > U_q$ ist $I_A > 0 \rightarrow P_i = U_q \cdot I_A > 0$
 → Motorbetrieb

für $U_A < U_q$ ist $I_A < 0 \rightarrow P_i = U_q \cdot I_A < 0$
 → Generatorbetrieb

Bei $U_A = \text{konst.}$ kann Strom- und damit Leistungsumkehr durch Erhöhung von n bewirkt werden.

Beim Betrieb an einem Zweiquadrantenstromrichter (vgl. Abs. 2.12: $U_A = 0 \dots U_{AN}$, I_A : positives oder negatives Vorzeichen) kann auch bei konstanter Drehzahl ($U_q = \text{konst.}$) durch Verstellen von U_A vom Motor in den Generatorbetrieb gewechselt werden.

2.10 Drehzahlstellen

Wie die Betrachtungen in den Kapiteln 2.6 bis 2.9 gezeigt haben besitzt die GSM je nach Schaltung der Erregung ein unterschiedliches Betriebsverhalten. Dem entsprechend bieten sich verschiedene technische Möglichkeiten das Betriebsverhalten zu beeinflussen. In den folgenden Kapiteln 2.10, 2.11 und 2.12 wird nur auf die grundsätzlichen Zusammenhänge eingegangen, die bei allen Maschinen gleich sind.

Die Möglichkeiten zur Drehzahlstellung lassen sich aus folgender Gleichung bestimmen.

$$n = \frac{U_A}{C_{Masch} \cdot \Phi} - \frac{R_A \cdot 2\pi}{C_{Masch}^2 \cdot \Phi^2} \cdot M_i \quad (2.43)$$

Die Drehzahl n kann durch Änderung der Klemmenspannung U_A , des Luftspaltflusses Φ und des Ankerkreiswiderstandes R_A verstellt werden. Die Drehrichtung der Maschine wird durch Umpolen der Ankerspannung $\pm U_A$ oder der Erregerspannung $\pm U_f$ verändert.

Soll die Drehzahl verringert werden, so geschieht dies verlustarm über eine Verringerung der Betriebsspannung U_A . Soll die Drehzahl erhöht werden, so ist das auch über eine Schwächung des Erregerfeldes (Feldschwächung) möglich.

2.10.1 Änderung des Erregerflusses

Bei Nennerregung I_{fN} fließt der thermisch zulässige Erregerstrom, eine Verringerung der Drehzahl durch Vergrößern der Erregung ist daher i.a. nicht möglich. Darüber hinaus ist eine wirtschaftliche Vergrößerung des magnetischen Flusses wegen der Eisensättigung nicht möglich. Daher kommt eine Drehzahlstellung nur durch Feldschwächung in Frage. Die Änderung des magnetischen Flusses wird durch Spannungsteiler oder Vorwiderstände im Erregerkreis bewirkt.

Das Maß der Feldschwächung wird durch den Feldschwächungsfaktor f angegeben:

$$f = \frac{\Phi_{max}}{\Phi} \geq 1 \quad (2.44)$$

Φ_{max} ist der magnetische Fluß bei I_{fmax} .

Bei Betrieb an Nennspannung mit Nennerregung ergibt sich die Grundkennlinie der Maschine. Die Grunddrehzahl n_{Gr} ist die Leerlaufdrehzahl bei Nennspannung und Nennerregung. Der Drehzahlabfall bei Belastung mit dem Moment M_i wird bestimmt durch den Term

$$\Delta n = f^2 \cdot \frac{R_A \cdot 2\pi}{(C_{Masch} \cdot \Phi_{max})^2} \cdot M_i \quad (2.45)$$

Allgemein gilt also bei Betrieb mit $U_A = U_{AN}$ bei verschiedener Feldschwächung:

$$n = n_{Gr} \cdot f - f^2 \cdot \frac{R_A \cdot 2\pi}{(C_{Masch} \cdot \Phi_{max})^2} \cdot M_i \quad (2.46)$$

Der Drehzahlabfall bei Belastung ist proportional zu f^2 , so daß die Kennlinien bei Feldschwächung stärker geneigt sind. Im Feldschwächbetrieb werden die Kennlinien also "weicher".

Gleichzeitig steigt gemäß Gleichung (2.18) bei konstantem Moment M_i im Feldschwächbetrieb der Strom I_A an. (Achtung: Strombegrenzung beachten)

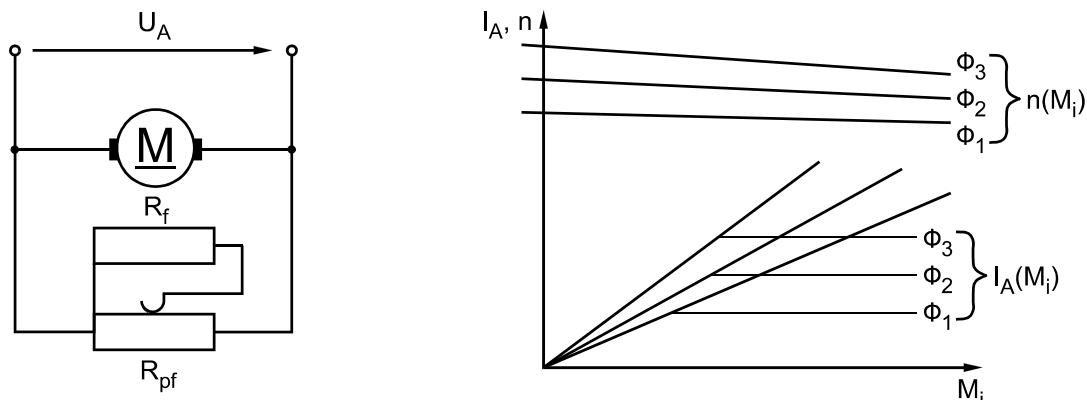


Bild 2.19: Stationäre Kennlinien bei Feldschwächung; $\Phi_1 > \Phi_2 > \Phi_3$

Da wegen der zulässigen Wicklungserwärmung im Anker über einen längeren Zeitraum nur Betrieb mit Nennstrom erlaubt ist, darf die Maschine im Feldschwächbetrieb nicht mehr mit Nennmoment belastet werden. Die innere Leistung P_i bleibt also konstant.

$$M_{izul} = \frac{C_{Masch} \cdot \Phi_{max}}{2\pi} \cdot \frac{1}{f} \cdot I_{AN} = \frac{1}{f} \cdot M_N \tag{2.47}$$

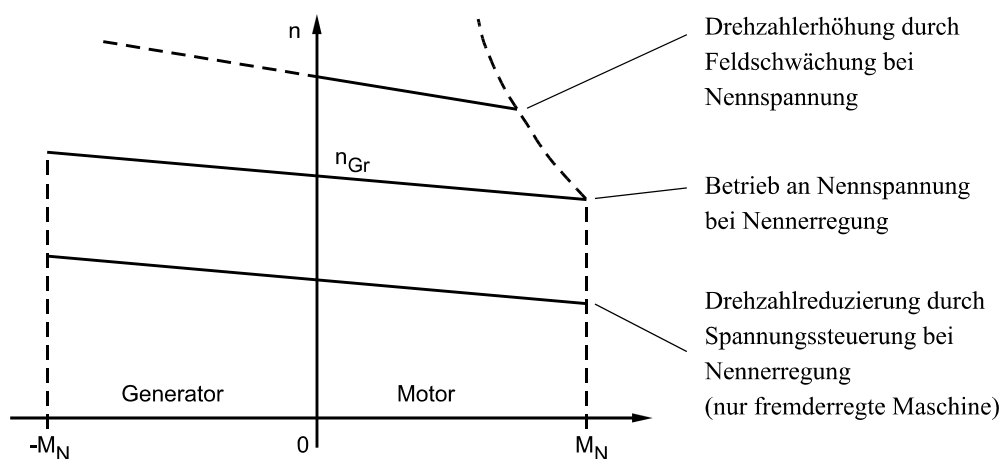


Bild 2.20: Das Betriebsverhalten der Nebenschluß- und der fremderregten Maschine

2.10.2 Änderung der Ankerspannung

Die Änderung der Ankerspannung durch einen Vorwiderstand oder Spannungsteiler ist wegen der großen Verluste in diesen Widerständen höchstens bei sehr kleinen Maschinen angebracht. Bei großen Maschinen ist eine Stromrichterspeisung erforderlich.

Die Drehzahl n läßt sich bei konstantem Fluß etwa im Verhältnis der Ankerspannung verstellen.

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{U_{A1} - R_A I_A}{U_{A2} - R_A I_A} \quad (2.48)$$

Siehe hierzu auch Bild 2.18

Unter der Voraussetzung konstanter Erregung bleibt die Stromaufnahme des Ankers gemäß Gleichung (2.18) unabhängig von der Klemmenspannung.

2.10.3 Änderung des Ankerkreiswiderstandes

Mit der Erhöhung des Ankerkreiswiderstandes wächst der Spannungsabfall. Es ist darauf zu achten, daß die Spannung an der Erregerwicklung von der Schaltung unbeeinflusst bleibt. Damit wird nach Gleichung (2.43) die Neigung der Drehzahlkennlinie verstärkt. Ankerstrom und Leerlaufdrehzahl werden durch den Vorwiderstand nicht beeinflusst. Im Vorwiderstand treten große Stromwärmeverluste auf. Mit dem Ankerstrom bleibt auch die Aufnahme der elektrischen Leistung unbeeinflusst von der Schaltung, während die mechanische Leistung mit der Drehzahlabenkung zurückgeht. Der Wirkungsgrad sinkt stark ab.

2.11 Anlassen

Infolge der fehlenden Gegenspannung nimmt der Motor im Augenblick des Einschaltens einen sehr großen Ankerstrom auf. Zur Vermeidung von stoßartigen Beanspruchungen sind Anlaßhilfen vorzusehen, die folgende Aufgaben erfüllen müssen:

- Begrenzung des Anlaßstromes auf einen zulässigen Wert
- Bereitstellung eines dem Verwendungszweck angepaßten Anlaufmomentes

Der Anlaßvorgang kann durch stufenweise Abschaltung von Ankervorwiderständen erfolgen; spannungsgesteuerte Aggregate werden mit der Ankerspannung hochgefahren (z.B. Stromrichterspeisung).

2.12 Bremsen der Gleichstrommaschine

Bei der elektrischen Bremsung des Antriebes wirkt das Drehmoment der Maschine der Bewegungsrichtung entgegen. Die den Bremsvorgang einleitende Schalthandlung führt zum generatorischen Betrieb, in dem die Maschine als Generator auf Widerstände arbeitet (Widerstandsbremung) oder in das Netz zurückspeist (Nutzbremsung) oder zum Gegenstrombetrieb, in dem die Maschine im gegenläufigen Drehsinn an das Netz geschaltet wird (Gegenstrombremsung).

2.12.1 Nutzbremung

Der Übergang vom Motorbetrieb in den generatorischen Bremsbetrieb erfolgt stetig bei Überschreiten der Leerlaufdrehzahl (ideelle Leerlaufdrehzahl): Während die Erregung unverändert bleibt, wächst die induzierte Spannung über den Betrag der Klemmenspannung U_A hinaus und treibt gemäß $U_A = U_q + I_A \cdot R_A$ den Strom I_A , der seine Richtung umkehrt. Damit wechselt auch das Drehmoment nach $M_i = C'_{\text{Masch}} \cdot \Phi \cdot I_A$ das Vorzeichen. Bei vorgegebener Drehzahl kann die Größe des von der Maschine entwickelten Bremsmoments durch Ankervorwiderstände variiert werden. Das Moment sinkt mit wachsendem Widerstand. Die Zuordnung der Momente und Ströme im stationären Betrieb ist Bild 2.21 zu entnehmen. Die Bremsenergie wird nach Abzug der Generatorverluste in das Netz eingespeist. Mit Hilfe von Stromrichtern kann die Nutzbremung bis zum Stillstand hin erfolgen. (Siehe Kapitel 2.13)

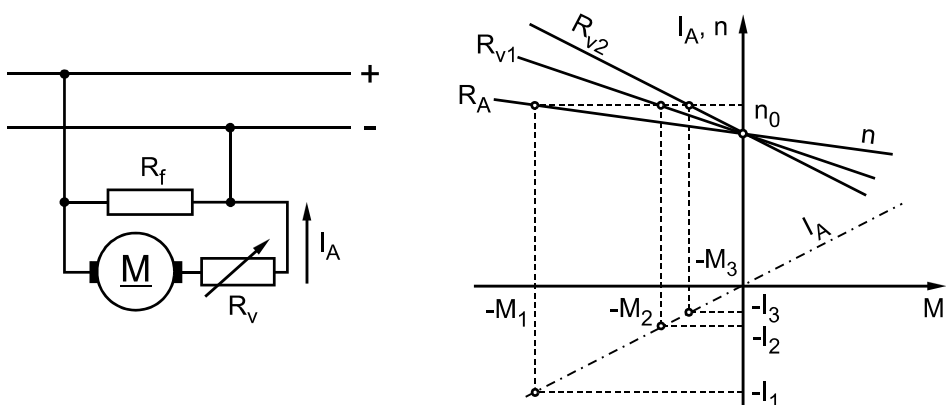


Bild 2.21: Generatorbremsung $R_{V1} < R_{V2}$

2.12.2 Widerstandsbremung

Die den Bremsbetrieb einleitende Schalthandlung schließt den Ankerkreis über einen Widerstand R_V ; der Gesamtwiderstand des Ankerkreises beträgt damit $R'_A = R_A + R_V$. Die Erregerwicklung wird fremderregt, so daß auch bei kleinen Drehzahlen Bremswirkung eintritt. Aus der Spannungsgleichung $U_A = C_{Masch} \cdot \Phi \cdot n + R_A \cdot I_A$ des Motorbetriebes folgt:

$$0 = C_{Masch} \cdot \Phi \cdot n + R'_A \cdot I_A$$

$$\rightarrow I_A = - \frac{C_{Masch} \cdot \Phi \cdot n}{R'_A} \quad (2.49)$$

Mit $M_i = \frac{C_{Masch} \cdot \Phi \cdot I_A}{2\pi}$ erhält man für das Drehmoment

$$M_i = - \frac{(C_{Masch} \cdot \Phi)^2 \cdot n}{2\pi \cdot R'_A} \quad (2.50)$$

Induzierte Ankerspannung und Ankerkreiswiderstand R'_A bestimmen Strom und Moment, die wie bei der Nutzbremung ihre Richtung gegenüber dem Motorbetrieb umkehren. Bei vorgegebener Drehzahl kann das Drehmoment durch Vergrößerung des Ankerwiderstandes begrenzt werden. Das Kennlinienfeld in Bild 2.22 veranschaulicht den Übergang vom Motor- in den Bremsbetrieb, der infolge der mechanischen Trägheit bei der im Schaltmoment herrschenden Drehzahl erfolgt. Die Zuordnung von Strömen und Momenten sind dem Diagramm zu entnehmen. Während des Bremsvorganges sinken mit der Drehzahl induzierte Spannung und Drehmoment der Maschine. Zur Erhöhung der Bremswirkung ist der Vorwiderstand zu verringern. Im Stillstand entwickelt die Maschine kein Moment. Die Bremsenergie wird -soweit sie nicht von der Arbeitsmaschine genutzt wird- im Ankerkreis in Wärme umgewandelt.

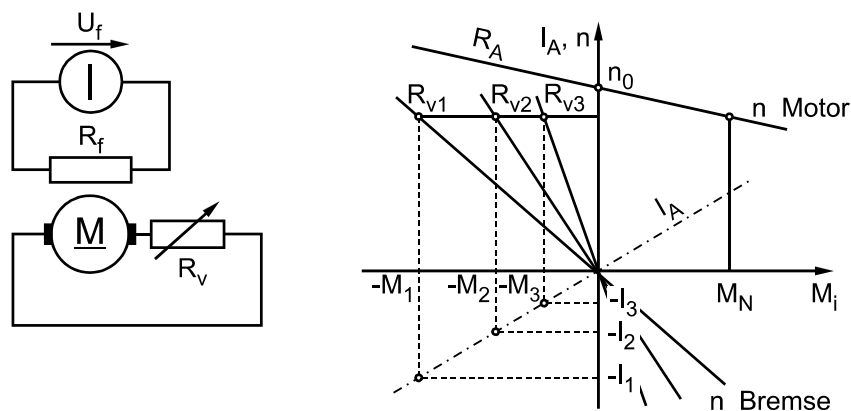


Bild 2.22: Widerstandsbremung

2.12.3 Gegenstrombremsung

Im Bremsbetrieb wird der Anker umgepolt, so daß die Maschine jetzt den ihrer Schaltung gegenläufigen Drehsinn hat. Aus der Spannungsgleichung des Motorbetriebes folgt nach der Schalthandlung:

$$-U_A = C_{Masch} \cdot \Phi \cdot n + R'_A \cdot I_A$$

$$\Rightarrow I_A = -\frac{U_A + C_{Masch} \cdot \Phi \cdot n}{R'_A} \quad (2.51)$$

mit Gleichung (2.18) folgt:

$$-\frac{U_A + C_{Masch} \cdot \Phi \cdot n}{R'_A} = \frac{M_i \cdot 2 \cdot \pi}{C_{Masch} \cdot \Phi}$$

$$\Rightarrow n = -\left[n_0 + \frac{2\pi \cdot R'_A}{(C_{Masch} \cdot \Phi)^2} \cdot M_i \right] \quad (2.52)$$

Der Übergang vom Motor- in den Bremsbetrieb ist in Bild 2.23 dargestellt.

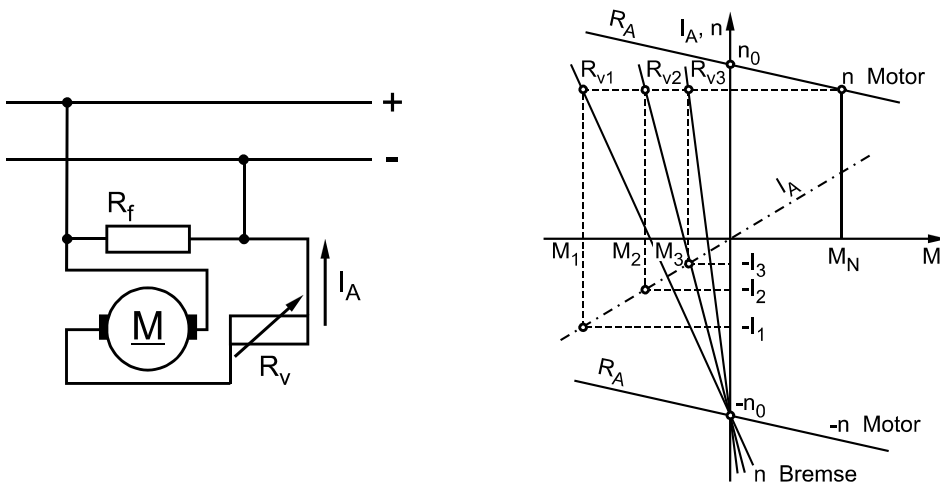


Bild 2.23: Gegenstrombremsung; $R_{V1} < R_{V2} < R_{V3}$

Da der Eigencharakteristik der Maschine im Gegenstrombetrieb sehr große Ströme und Drehmomente entsprechen, sind diese durch große Ankervorwiderstände auf zulässige Werte zu begrenzen. Infolge der stark lastabhängigen Kennlinie $n = f(M_i)$ sinkt das

Bremsmoment mit der Drehzahl; die Bremswirkung kann durch Verkleinerung des Vorwiderstands verstärkt werden.

Im Stillstand entwickelt die Maschine das ihrem Ankerkreiswiderstands entsprechende Anlaufmoment des Motorbetriebes im Gegendreh Sinn. Der Motor läuft also hoch, sofern $|M_i| > |M_w|$. Dieser meist unerwünschte Anlauf ist durch Abschalten der Maschine beim oder kurz vor Erreichen des Stillstands zu verhindern (Schlepp- oder Fliehkraftschalter, Bremswächter).

Die Bremsenergie, die sich aus der kinetischen Energie der bewegten Masse und der dem Netz entnommenen elektrischen Energie zusammensetzt, wird im Ankerkreis in Stromwärme umgewandelt, soweit sie nicht von der Arbeitsmaschine umgesetzt wird.

Die Gegenstrombremsung wurde früher bei Gleichstrommaschinen angewandt. Sie hat heute keine Bedeutung mehr, weil bei Stromrichterspeisung ähnliche Bremswirkungen auch im Stillstand erzielt werden können.

2.13 Gleichstromstellergespeiste Gleichstrommaschine

Hier soll noch einmal auf die Möglichkeit, durch Änderung der Ankerspannung die Motordrehzahl unabhängig vom Drehmoment zu verstellen, eingegangen werden.

Wie schon in Kapitel 2.10.2 gesagt, werden bei größeren Maschinen (> 10 kW) oder Maschinen mit hohen dynamischen Anforderungen (Roboter) Stromrichter eingesetzt. An die Ankerklemmen des Motors wird eine periodische Folge von Spannungsimpulsen gelegt, die einem Gleichspannungsnetz entnommen werden (z.B. 750 V-Bahnnetz). In der Prinzipschaltung nach Bild 2.24 wird der Motor über ein abschaltbares Stromrichterventil (z.B. "Gate turn off thyristor" Abk. GTO) periodisch während der Einschaltdauer (Impulsbreite) T_e an die konstante Netzspannung U_1 gelegt und während der Abschaltdauer T_a wieder von ihr getrennt. Als Stromrichterventil finden heute kontaktlose Schalter Anwendung, die durch Thyristorschaltungen, bei kleineren Leistungen auch durch Transistorschaltungen realisiert werden können. Der Mittelwert der dem Motoranker zugeführten Spannung

$$\bar{U}_A = \frac{T_e}{T} \cdot U_1 \quad (2.53)$$

bestimmt nach Gleichung (2.43) die Drehzahl der fremderregten Maschine. Der Stellbereich kann 1 : 100 bis 1 : 1000 betragen. Er kann über die Einschaltdauer T_e gesteuert werden ("step down-chopper").

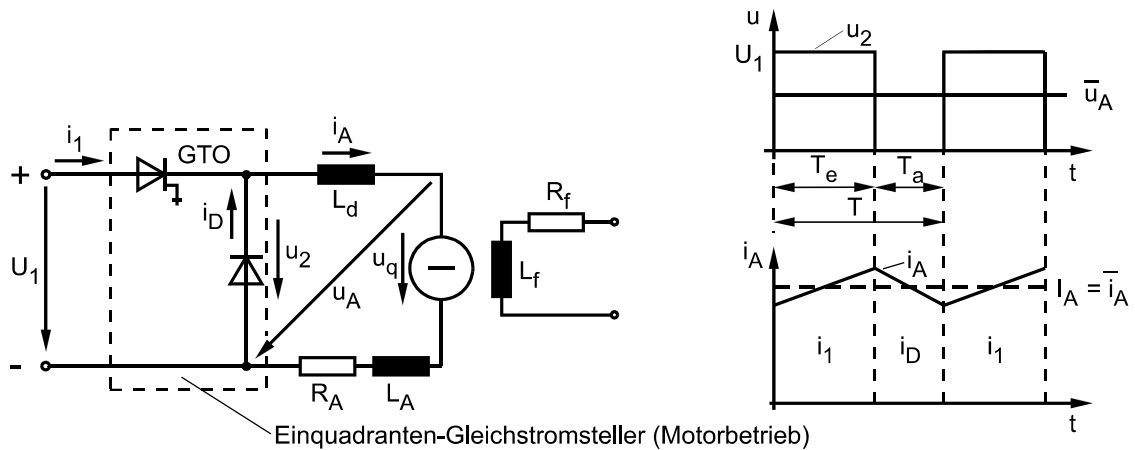


Bild 2.24: Prinzip einer gleichstromstellergespeisten GSM ("step down - chopper")

Soll die Gleichstrommaschine als Generator arbeiten (Nutzbremsung) muß der Strom I_A seine Richtung ändern. Dazu müssen das abschaltbare und das nichtabschaltbare Ventil vertauscht und für umgekehrte Stromrichtung angewendet werden (Bild 2.25).

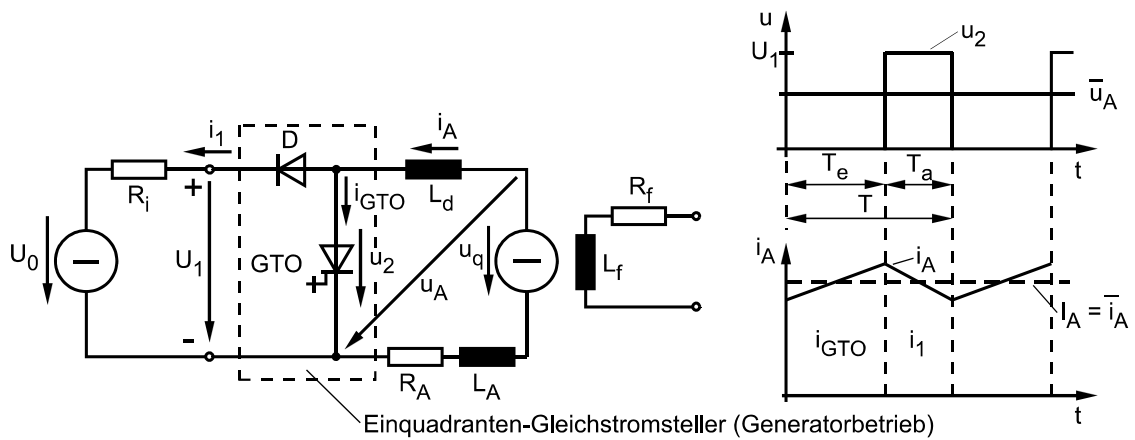


Bild 2.25: Prinzip einer gleichstromstellergespeisten GSM ("step up - chopper")

Der Spitzenwert der Spannung U_1 ist größer als U_0 ($U_0 < U_1$). Dies ist erforderlich, damit der Spannungsabfall $R_i \cdot i_1$ überwunden werden kann. Im Intervall T_a muß gelten:

$$\Delta U = R_i \cdot i_1 = (U_1 - U_0) \tag{2.54}$$

Die Differenzspannung ΔU bringt die Drossel $L'_d = L_d + L_A$ auf. "step up-chopper"

Es gilt für $i_1 > 0$:

$$\begin{aligned}
 \int_{T_a} \Delta U dt &= \int_{i_A} L'_d \cdot \frac{di_A}{dt} dt \\
 &= L'_d \cdot \Delta I \\
 &= \Delta U \cdot T_a \\
 \rightarrow \Delta U &= L'_d \cdot \Delta \frac{I}{T_a} = R_i \cdot \bar{i}_1
 \end{aligned}
 \tag{2.55}$$

Hieraus kann zum Beispiel bei Vorgabe von $\frac{\Delta I}{\bar{i}_1} = \frac{\Delta I}{I_A} = 0,2 \cdot L'_d$ berechnet werden:

$$L'_d = 5 \cdot T_a \cdot R_i$$

Gleichstromumrichter zur Speisung von Gleichstrommotoren werden heute bei Straßenbahnen, U-Bahnen und Elektroautos eingesetzt. Auch bei Roboter- und Werkzeugmaschinenantrieben sind sie zu finden.

2.14 Einquadranten-Stromrichter-Gleichstromantriebe

Zur Verstellung der Drehzahl des fremderregten Gleichstrommotors bei vorhandenem 3-Phasen-Netz werden vorwiegend Stromrichter eingesetzt. Der Motoranker wird aus dem Wechsel- oder Drehstromnetz über einen steuerbaren Gleichrichter mit einer stetig verstellbaren Gleichspannung gespeist. Die Drehzahl stellt sich nach Gleichung (2.43) ein.

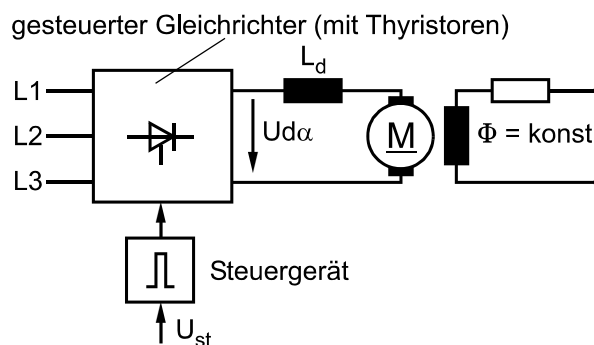


Bild 2.26: Stromrichtergespeiste fremderregte Gleichstrom-Nebenschluß-Maschine

Moderne Anlagen werden mit steuerbaren Halbleiterventilen (Thyristoren) ausgerüstet; der Mittelwert der Gleichspannung U_{da} kann über eine Steuerspannung U_{st} eingestellt werden. Die Leistungs- und Drehmoment-Drehzahlbereiche sind in Bild 2.27 dargestellt.

Einquadrantenantriebe		Mehrquadrantenantriebe			
mit Einfachstromrichter		mit Einfachstromrichter		mit Zweifachstromrichter	
halbgesteuert	vollgesteuert	Umschaltung im Ankerkreis	Umschaltung im Erregerkreis	Kreisstromfreie Gegenparallelschaltung	Kreisstromführende Kreuzschaltung
Leistungsbereich 1~: bis 10 kW 3~: bis 100 kW	Leistungsbereich 1~: bis 10 kW 3~: bis 10 MW Drehrichtungsumkehr bei gleicher Momentenrichtung möglich	Leistungsbereich 1~: bis 10 kW 3~: bis 300 kW Momentenfreie Pause 0,1 bis 0,2 sek	Leistungsbereich 1~: bis 10 kW 3~: bis 10 MW Momentenfreie Pause 0,5 bis 2 sek	Leistungsbereich 1~: bis 10 kW 3~: bis 10 MW Momentenfreie Pause 2 bis 10 ms	Leistungsbereich 1~: bis 10 kW 3~: bis 10 MW Momentenfreie Pause keine

Bild 2.27: Stromrichterschaltung für Ein- und Mehrquadrantenantriebe (Quelle: Siemens)

2.15 Mehrquadranten-Stromrichter-Gleichstromantriebe

Wie bei elektrischen Antriebsmaschinen teilt man die möglichen Arbeitsbereiche von Stromrichtern in vier Quadranten ein, die mit römischen Ziffern I bis IV nummeriert werden. Welcher Quadrant vorliegt, entscheidet sich durch das Vorzeichen der Gleichspannung U_d (U_A) und des Gleichstromes I_d (I_A).

Einfachstromrichter-Schaltungen können den Strom nur in einer Richtung führen: $I_A \geq 0$.

Ist die Stromrichterspannung positiv, also $U_A \geq 0$ (halbgesteuert), wird der Stromrichter im I. Quadranten betrieben; er arbeitet dabei im Gleichrichterbetrieb ($0 \leq \alpha \leq 90^\circ$). Ist die Stromrichterspannung negativ ($U_A \leq 0$) liegt Betrieb im IV. Quadranten vor ($90 \leq \alpha \leq 180^\circ$). Dieser Betrieb ist nur mit vollgesteuerten Schaltungen möglich.

Negative Ströme, und damit ein Betrieb in den Quadranten II und III, kann ein Stromrichter nur dann führen, wenn antiparallel zu den Ventilen für positive Ströme noch Ventile für die entgegengesetzte Stromrichtung geschaltet werden.

Man spricht von den sogenannten Zweifach- oder Umkehrstromrichtern. Eine mögliche Schaltung zeigt Bild 2.28. Eine andere Möglichkeit zur Realisierung des Vierquadrantenbetriebs ist die Anker- oder Erregerkreis-Umschaltung. In diesem Fall können Einfachstromrichter angewendet werden.

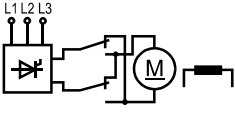
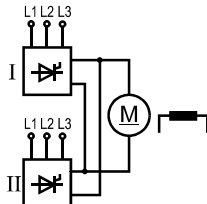
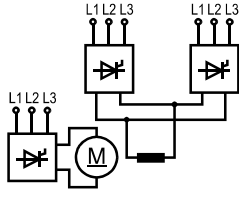
Bezeichnung	Einfachstromrichter mit Ankerumschaltung	im Ankerkreis	Zweifachstromrichter im Erregerkreis
Prinzipschaltung			
Steuerungstechnische Bedingungen	Die Anker-Umschaltung muß im stromlosen Zustand erfolgen	Der Kreisstrom zwischen den Stromrichtern muß unterdrückt bzw. in Grenzen gehalten werden	Bei Erregerstrom-Umkehr muß der Ankerstrom null sein
Zeit für eine volle Drehmomentumkehr	0,1 ... 0,2 sek	0 ... 2 ... 10 ms	0,5 ... 1 sek

Bild 2.28: Schaltung für Umkehrstromantriebe

2.15.1 Gegenparallelschaltung

Der in Bild 2.28 (Mitte) dargestellte Umkehrstromrichter entsteht durch Gegenparallelschaltung zweier Einfachstromrichter, die heute üblicherweise in kreisstromfreier Drehstrom-Brücken-Schaltung (B6-Schaltung) ausgeführt werden (vgl. Bild 2.32). Dadurch ergibt sich ein Doppelstromrichter, der in allen vier Quadranten der Gleichstrom-Gleichspannungsebene betrieben werden kann. Die positiven Ströme werden vom Einfachstromrichter I, die negativen Ströme vom Einfachstromrichter II übernommen. Der Einfachstromrichter II deckt damit die Quadranten II und III ab, wobei er sich im Quadranten III im Gleichrichter-, im Quadranten II im Wechselrichterbetrieb befindet.

Arbeitet der Umkehrstromrichter im I. oder III. Quadranten, fließt Leistung vom Drehstrom- zum Gleichstromnetz. Im Fall eines Betriebs in den Quadranten II und IV fließt Leistung vom Gleich- in das Drehstromnetz (Nutzbremsung).

Speist ein Umkehrstromrichter eine Gleichstrommaschine, kann diese bei jeder Drehzahl sowohl antreiben als auch bremsen.

Für die Verwirklichung von Umkehrstromrichterantrieben werden verschiedene Schaltungen angewendet, wie Bild 2.27 und 2.28 darstellt. Sie unterscheiden sich im dynamischen Verhalten und Schaltungsaufwand. (Faustregel: Je mehr Aufwand/Kosten, desto besser das dynamische Verhalten.)

2.15.2 Beispiel eines Umkehrstromrichterantriebs

Zum Bremsen ist es notwendig, die Richtung des Drehmoments der GSM umzukehren. Das erfordert, wie in Kapitel 2.15 erläutert, entweder eine Richtungsumkehr des Anker- oder Feldstromes.

Von besonderer praktischer Bedeutung ist die Ankerkreisumschaltung. Sie erfordert zwar einen höheren Ventilaufland, arbeitet aber kontaktfrei, hoch dynamisch und mit vergleichsweise einfacher Steuerung.

Das Prinzip der Ankerkreisumschaltung soll am Beispiel einer Dreiphasen-Mittelpunkt-Schaltung (M3) verdeutlicht werden (Bild 2.29). Zur Erläuterung der Wirkungsweise bleiben die innere Spannungsabfälle in den Stromrichtern unberücksichtigt.

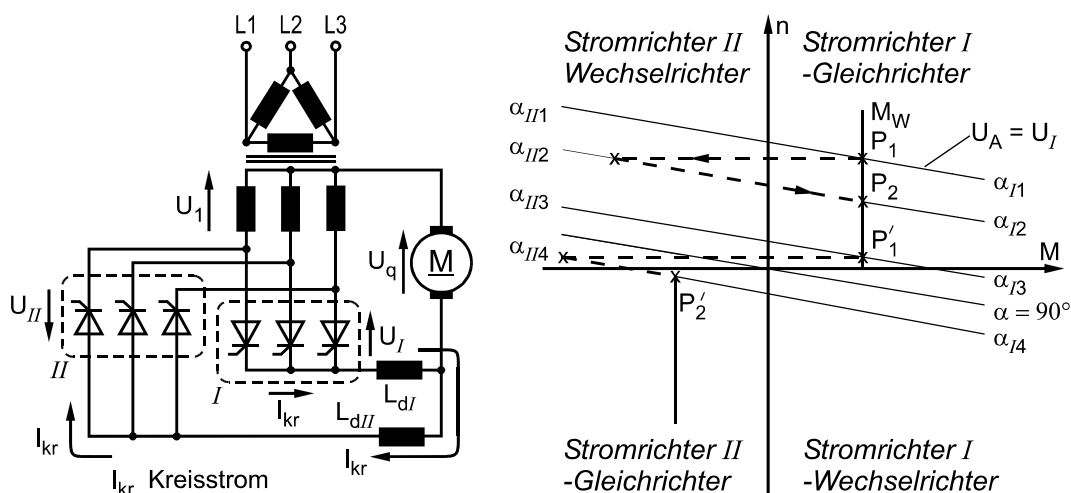


Bild 2.29: Prinzip eines Umkehrstromrichters (M3) mit Thyristoren

Zunächst möge Stromrichter I im Gleichrichterbetrieb arbeiten. Es ist:

$$U_I \geq U_q \quad (2.56)$$

Der Stromrichter I treibt als gesteuerter Gleichrichter einen Strom durch den GS-Motor. Dieser dreht sich in Drehrichtung I ($n \geq 0$). Damit kein Kreisstrom unter Umgehung des Motors durch die Stromrichter I und II fließt, muß

$$U_I + U_{II} \leq 0 \quad (2.57)$$

sein.

Der nicht benötigte Stromrichter II ist entweder völlig gesperrt (kreisstromfreie Schaltung, $I_{Kr} = 0$) oder arbeitet im Wechselrichterbetrieb (kreisstrombehaftete Schaltung $I_{Kr} \approx 10\% I_{dN}$), um diese Bedingung einzuhalten. Ein stufenloser Übergang des Stromes von Stromrichter I auf Stromrichter II ergibt sich, wenn die Stromrichter so angesteuert werden, daß $U_I = -U_{II}$ ist. Das wurde in Bild 2.29 vorausgesetzt.

Zum Abbremsen des Antriebs geht man vom Steuerwinkel α_1 auf α_2 über, d.h. man verkleinert die Spannung U_I unter Einhaltung der Bedingung $U_I = -U_{II}$. Dadurch wird der Strom durch den Motor zu Null und kehrt schließlich seine Richtung um.

$$U_I \leq U_q \quad (2.58)$$

Umkehr der Stromrichtung bedeutet aber Übergang auf den Stromrichter II, der im Wechselrichterbetrieb arbeitet. Die GSM wird abgebremst und die Bremsenergie über den Stromrichter II ins Netz zurückgespeist. Der Antrieb bewegt sich auf der α_{12} , α_{112} zugeordneten Kennlinie auf den neuen Arbeitspunkt P_2 zu. Dabei geht die Stromführung wieder auf den Stromrichter I über. (Treiben mit verringerter Drehzahl)

Der Reversiervorgang vom Arbeitspunkt P'_1 auf den Arbeitspunkt P'_2 verläuft in gleicher Weise. Wird ein Steuerwinkel $\alpha_1 > 90^\circ$ eingestellt (z.B. α_{14} in Bild 2.29), geht der Stromrichter I in den Wechselrichterbetrieb und Stromrichter II in den Gleichrichterbetrieb über. Die Drehrichtung kehrt sich um.

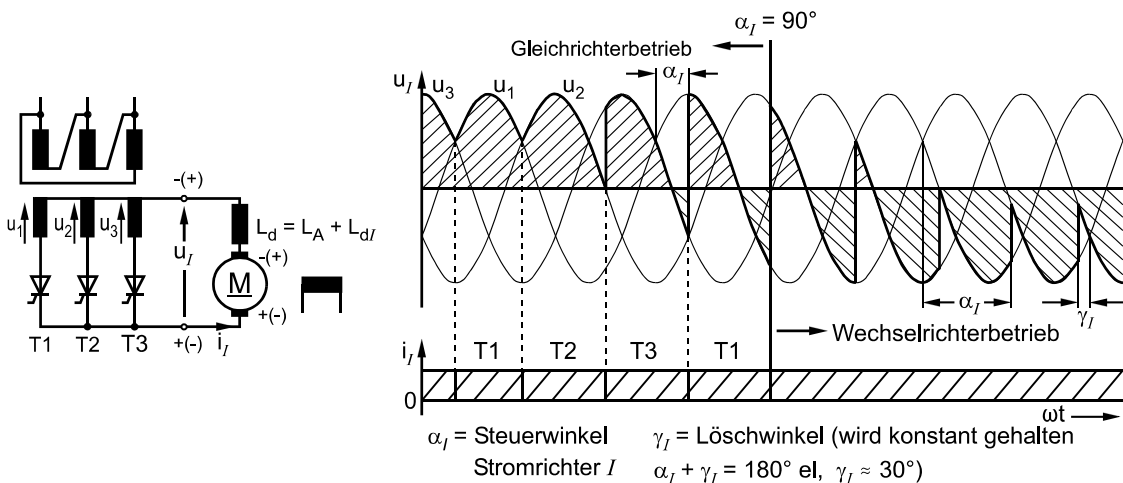


Bild 2.30: Strom- und Spannungszeitverläufe einer M3-Schaltung im Gleich- und Wechselrichterbetrieb

2.16 Regelung der fremderregten Gleichstrommaschine

Gleichstromantriebe müssen im praktischen Einsatz die Anforderungen an die Drehzahl-Charakteristik der angekuppelten Arbeitsmaschine erfüllen. Bei vielen Anwendungen müssen die Drehzahl oder andere Prozeßgrößen trotz starker Lastschwankungen vorgegebenen Sollwerten nachgeführt werden. Dies erfordert entsprechende Regelkreise.

Aufgabe der Regelung ist es weiterhin, das geforderte dynamische Verhalten des Antriebs durch Anpassen der Regelgrößen (z.B. Strom, Leistung) an den Sollwert, auch bei Einwirkung von Störungen, zu realisieren.

Als Störgrößen, die zu unerwünschten Änderungen der Betriebsgrößen führen, können z.B. Netzspannungsschwankungen oder Belastungsänderungen auftreten.

2.16.1 Mathematisches Modell des fremderregten Gleichstromantriebs

Durch fünf Gleichungen läßt sich der Gleichstromantrieb vollständig beschreiben (hier werden für dimensionsbehaftete, zeitabhängige Größen, zur Unterscheidung zu den nachfolgend eingeführten normierten Größen, Großbuchstaben verwendet):

$$U_A = R_A \cdot I_A + L_A \frac{dI_A}{dt} + U_q \quad (2.59)$$

$$U_q = C'_{Masch} \cdot \Phi \cdot \Omega \quad (2.60)$$

$$M_i - M_L = J \cdot \frac{d\Omega}{dt} \quad (2.61)$$

$$M_i = \frac{C_{Masch}}{2\pi} \cdot \Phi \cdot I_A = C'_{Masch} \cdot \Phi \cdot I_A \quad (2.62)$$

$$U_f = R_f I_f + L_f \frac{dI_f}{dt} \quad (2.63)$$

Bevor wir das dem Gleichspannungssystem entsprechende Strukturbild (Wirkungsplan) zeichnen, wollen wir eine Normierung vornehmen (alle Größen bis auf t werden dimensionslos).

Wir beziehen:

- $U_A(t)$, $U_q(t)$ auf die Nennankerspannung U_{AN} ,

$$u_A = \frac{U_A(t)}{U_{AN}}, \quad u_q = \frac{U_q(t)}{U_{AN}} \quad (2.64)$$

- $I_A(t)$ auf den Nennankerstrom I_{AN} ,

$$i_A = \frac{I_A(t)}{I_{AN}} \quad (2.65)$$

- alle Momente auf das Nennmoment M_N , z.B.

$$m_i = \frac{M_i(t)}{M_N} \quad (2.66)$$

- die Drehzahl n auf die Nenndrehzahl n_N ,

$$n = \frac{\Omega(t)}{2\pi n_N} = \frac{\Omega(t)}{\Omega_N} \quad (2.67)$$

- den Fluß Φ auf den Nennfluß Φ_N ,

$$\phi = \frac{\Phi}{\Phi_N} \quad (2.68)$$

In normierter Schreibweise nimmt die Ankerspannungsgleichung (2.59) dann folgende Form an:

$$\frac{U_A}{U_{AN}} = \underbrace{\frac{R_A I_{AN}}{U_{AN}}}_{K_A} \cdot \frac{I_A}{I_{AN}} + \underbrace{\frac{L_A}{R_A}}_{T_A} \cdot \frac{R_A I_{AN}}{U_{AN}} \cdot \frac{di_A}{dt} + \frac{U_q}{U_{AN}} \quad (2.69)$$

mit $K_A = \frac{U_{AN}}{I_{AN} R_A}$, $T_A = \frac{L_A}{R_A}$ ergibt sich

$$u_A = \frac{1}{K_A} i_A + \frac{T_A}{K_A} \frac{di_A}{dt} + u_q \quad (2.70)$$

Die Gleichung (2.17) bzw. (2.60) kann wie folgt normiert werden:

$$\underbrace{\frac{U_q}{U_{AN}}}_{u_q} U_{AN} = C'_{Masch} \underbrace{\frac{\Phi}{\Phi_N}}_{\phi} \underbrace{\frac{\Omega}{\Omega_N}}_n \Phi_N \Omega_N \quad (2.71)$$

Durch Zusammenfassen der Größen folgt:

$$u_q = \Phi \cdot n \cdot \underbrace{C'_{Masch} \frac{\Phi_N \Omega_N}{U_{AN}}}_{=1} \quad (2.72)$$

wobei der geklammerte Ausdruck willkürlich gleich 1 gesetzt wird. Der so definierte Nennfluß Φ_N kann auch über die Feldgrößen I_{fN} , N_f/R_{mf} ausgedrückt werden (vgl. Gleichung 2.18).

$$\Phi_N = \frac{U_{AN}}{\Omega_N C'_{Masch}} = I_{fN} \cdot \frac{N_f}{R_m} \quad (2.73)$$

Auf ähnliche Weise kann die Gleichung (2.62) dimensionslos geschrieben werden:

$$\underbrace{\frac{M_i}{M_N}}_{m_i} = \frac{C'_{Masch}}{M_N} \underbrace{\frac{\Phi}{\Phi_N}}_{\phi} \underbrace{\frac{I_A}{I_{AN}}}_{I_A} \Phi_N I_{AN} \quad (2.74)$$

$$m_i = \Phi \cdot i_A \cdot \underbrace{\frac{C'_{Masch}}{M_N} \Phi_N I_{AN}}_{=1} \quad (2.75)$$

Mit $M_N = C'_{Masch} \cdot \Phi_N \cdot I_{AN}$.

Nachdem das Nennmoment M_N definiert worden ist, kann auch die Bewegungsgleichung (2.61) dimensionslos geschrieben werden.

$$\frac{M_i}{M_N} - \frac{M_L}{M_N} = J \frac{\Omega_N}{M_N} \cdot \frac{d}{dt} \left(\frac{\Omega}{\Omega_N} \right) \quad (2.76)$$

$$m_i - m_L = T_H \cdot \frac{dn}{dt}$$

mit $T_H = J \frac{\Omega_N}{M_N}$

T_H ist die Hochlaufzeit des unbelasteten Antriebes mit ($\Omega = \Omega_N$).
Der Feldstromkreis ist vom Ankerstromkreis elektrisch völlig entkoppelt. Die Feldgleichung (2.63) wird daher auf die Feld-Nenngröße (Nennspannung U_{fN} , Nennstrom I_{fN}) bezogen.

$$\frac{U_f}{U_{fN}} = \frac{I_{fN} \cdot R_f}{U_{fN}} \cdot \frac{I_f}{I_{fN}} + \frac{L_f}{R_f} \cdot \frac{R_f I_{fN}}{U_{fN}} \cdot \frac{d}{dt} \left(\frac{I_f}{I_{fN}} \right) \quad (2.77)$$

$$u_f = \frac{1}{K_f} i_f + \frac{T_f}{K_f} \cdot \frac{di_f}{dt}$$

Für die magnetische Koppelung zwischen Anker- und Feldgleichung gilt (Gl. 2.18):

$$\frac{\Phi}{\Phi_N} = \frac{N_f I_{fN}}{R_{mf} \Phi_N} \cdot \frac{I_f}{I_{fN}} \Rightarrow \Phi = i_f \quad (2.78)$$

Mit den Gleichungen (2.70) bis (2.78) kann das dynamische Verhalten der Gleichstrommaschine mathematisch behandelt werden.

- Ankerspannung

$$u_A = \frac{1}{K_A} (i_A + T_A \dot{i}_A) + u_q \quad (2.79)$$

- induzierte Quellenspannung

$$u_q = \Phi \cdot n \quad (2.80)$$

- Drehmoment

$$m_i = \Phi \cdot i_A \quad (2.81)$$

- Bewegungsgleichung

$$m_i = m_L + T_H \cdot \dot{n} \quad (2.82)$$

- Feldgleichung

$$u_f = \frac{1}{K_f} (\Phi + T_f \cdot \dot{\Phi})$$

Zur Aufstellung des Wirkungsplanes der Gleichstrommaschine werden die Differentialgleichungen "Laplace"-transformiert.

(Laplace-Operator $\frac{d}{dt} = p$)

$$i_A = K_A (u_A - u_q) \frac{1}{1 + p \cdot T_A} \quad (2.84)$$

$$n = \frac{m_i - m_L}{T_H \cdot p} \quad (2.85)$$

$$\Phi = K_f u_f \frac{1}{1 + p \cdot T_f} \quad (2.86)$$

Die Umsetzung der algebraischen Gleichungen (2.80) und (2.81) und der transformierten Differentialgleichung (2.84) in eine grafische Darstellung ergibt folgenden Wirkungsplan:

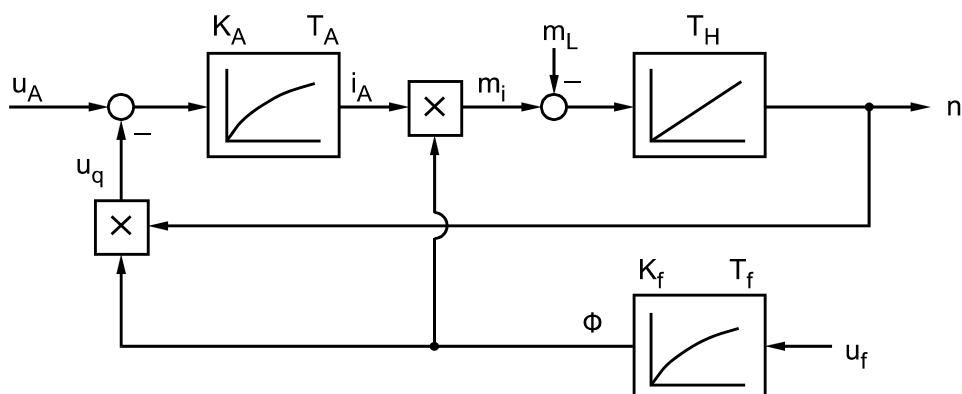


Bild 2.31: Strukturbild (Wirkungsplan) einer fremderregten Gleichstrommaschine

Ausgehend von einer fremderregten, stromrichter gespeisten Gleichstrommaschine mit unterlagertem Stromrichterkreis ergibt sich für eine drehzahlregelte GSM folgendes Regelschema (Bild 2.32):

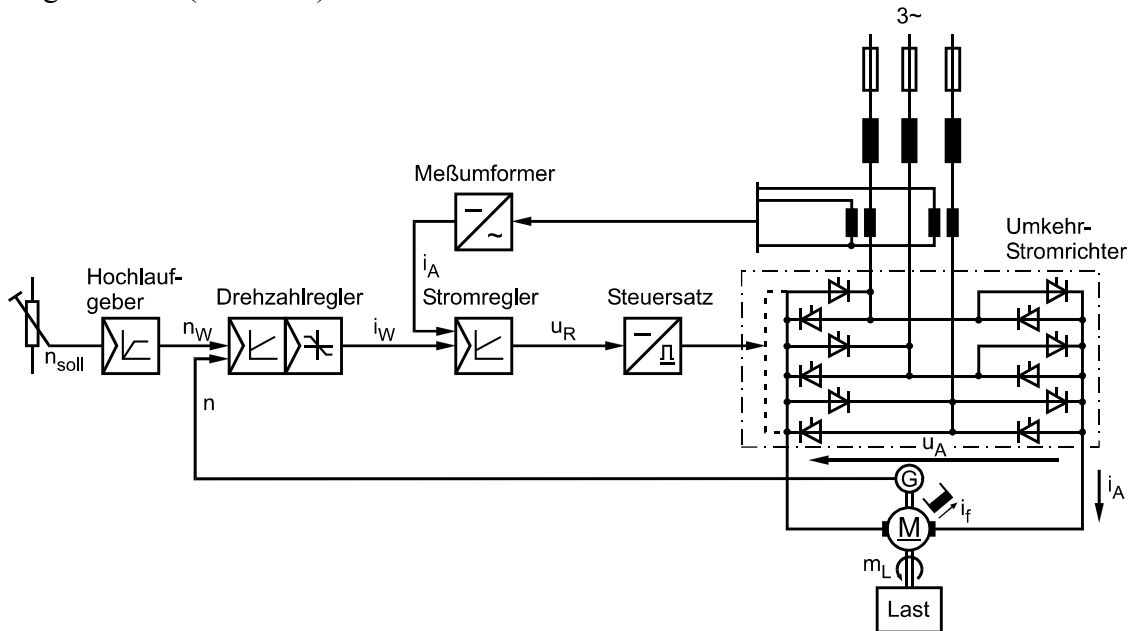


Bild 2.32: Schaltung einer geregelten, fremderregten, stromrichter gespeisten Gleichstrommaschine

Der Strom i_A für den unterlagerten Stromkreis wird auf der Drehstromseite (kostengünstiger) erfaßt und zu einem Gleichwert umgeformt. Der vom Drehzahlregler vorgegebene Sollwert i_w wird mit i_A verglichen und aus der Regelabweichung vom Stromregler die Steuerspannung u_R für den Umkehrstromrichter gebildet. Dieser erzeugt aus dem Dreiphasennetz eine zu u_R proportionale Gleichspannung u_A mit beliebiger Polarität und variabler Höhe.

Der Sollwert n_w für den Drehzahlregler wird vom Hochlaufgeber entsprechend der Vorgabe n_{soll} mit definierter maximaler Sollbeschleunigung erzeugt und mit dem Istwert n verglichen. Aus der Regelabweichung bildet der überlagerte Drehzahlregler die Führungsgröße i_w für den Ankerstromregelkreis.

In Bild 2.33 ist das entsprechende Strukturbild wiedergegeben. Es ist ersichtlich, daß der Umkehrstromrichter durch ein Totzeitglied (K_r, T_r) nachgebildet und die beiden Regler ($K_{R1}, K_{R2}, T_{R1}, T_{R2}$) mit PI-Übertragungsverhalten ausgestattet sind.

Die Berechnungen dieser Regelkreise für einen drehzahlregulierten Gleichstromantrieb wird in der Vorlesung "Regelung elektrischer Antriebe" ausführlich behandelt. Auf eine weitergehende Betrachtung wird hier verzichtet.

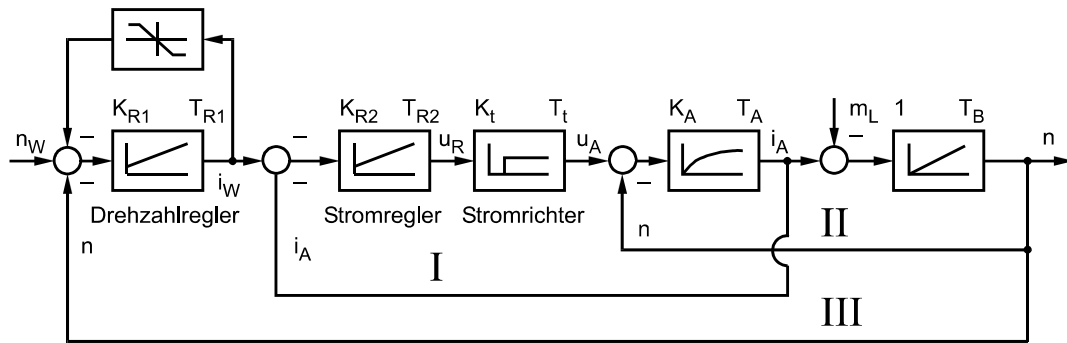


Bild 2.33: Strukturbild (Wirkungsplan) einer geregelten, fremderregten, stromrichter- gespeisten Gleichstrommaschine im Nennflußbetrieb

S8803 Elektrische Energietechnik

- Deckblatt und Inhaltverzeichnis
- Kapitel 1
- Kapitel 2
- Kapitel 3
- Kapitel 4 Seite 1 bis 10
- Kapitel 4 Seite 11 bis 46
- Kapitel 5 und Literatur