

13 Asynchronmaschine

Die Asynchronmaschine (ASM) ist wegen ihrer Robustheit die am häufigsten für elektrische Antriebsaufgaben eingesetzte Maschine. Deshalb sind mehr als 80% aller Elektromotoren über 1kW Leistung Asynchronmotoren. Nachteilig ist die enge Bindung der Drehzahl an die speisende Netzfrequenz. Bei Direktanschluß an das 50Hz-Netz sind dadurch keine Drehzahlen über 3000 1/min erreichbar. Die Anpassung der Drehzahl an den Arbeitsprozess muß daher mit Getrieben erfolgen. Neuerdings sind auch elektronische Umrichter so preisgünstig, daß diese vermehrt zur Speisung von drehzahlvariablen Asynchronmaschinen verwendet werden.



Bild 13.1: Anwendung von Asynchronmaschinen

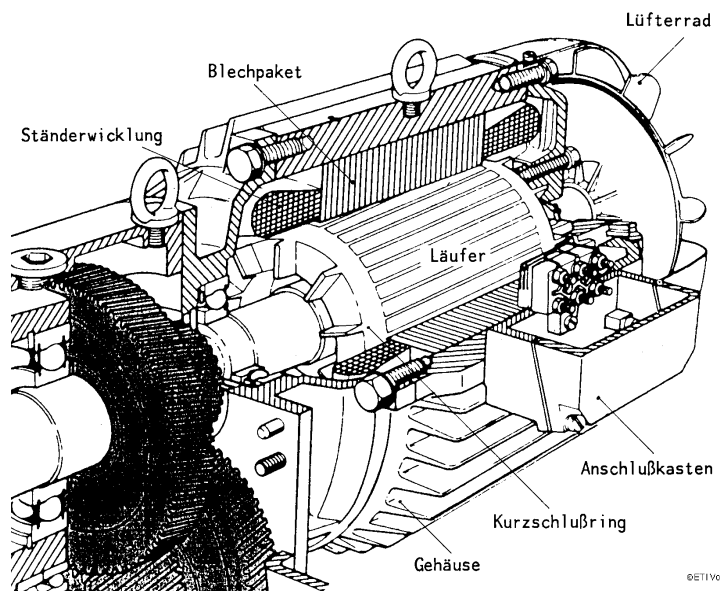


Bild 13.2: Schnittbild einer Asynchronmaschine mit angebautem Getriebe

13.1 Prinzip der Asynchronmaschine

Die Wirkungsweise der Asynchronmaschine beruht auf der Entstehung eines magnetischen Drehfeldes durch die dreiphasige Wicklung. Die prinzipielle Arbeitsweise der Asynchronmaschine soll anhand eines einfachen Modells nach Bild 13.3 erklärt

werden. Wie bei der Erzeugung einer Drehspannung durch einen Drehstromgenerator (siehe Bild 7.1 ?) trägt das Statorblechpaket bei diesem einfachen Modell drei Durchmesserspulen R , S und T , die um jeweils 120° räumlich gegeneinander versetzt sind.

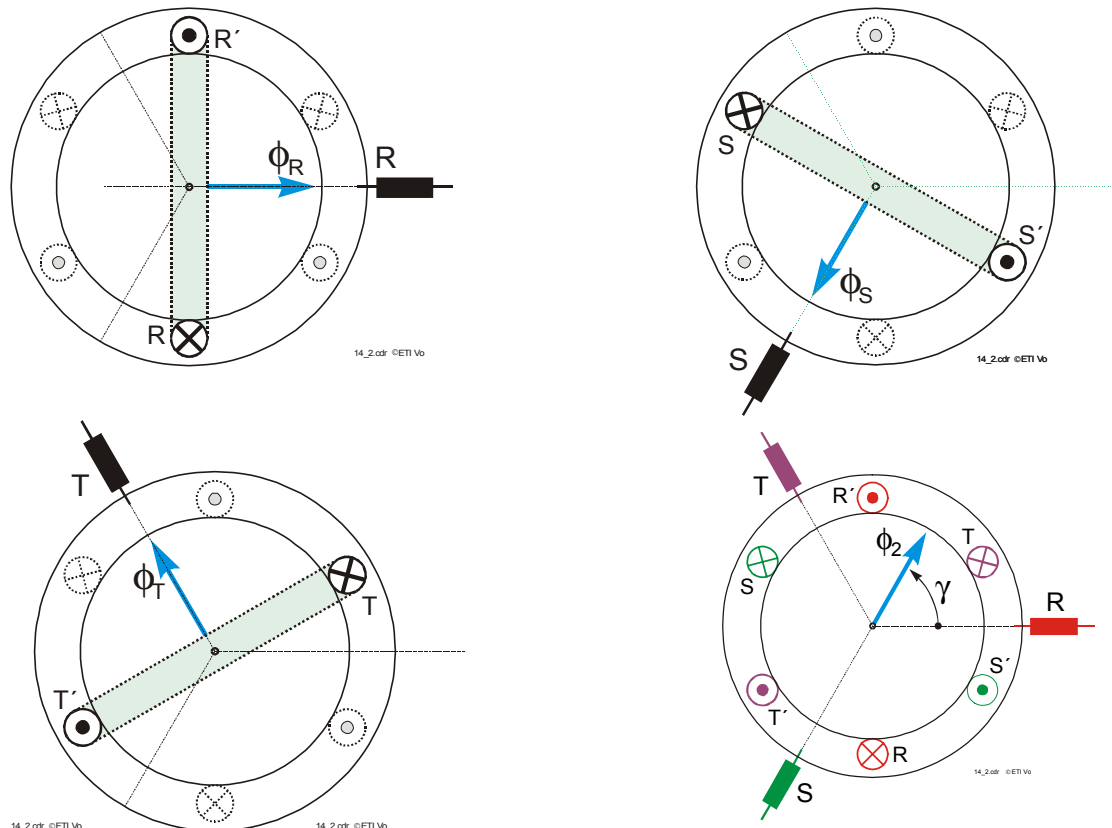


Bild 13.3: Richtungen des Flusses, wenn nur jeweils eine Wicklung bestromt wird und Überlagerung der Einzelflüsse bei einem sinusförmigen Stromsystem.

Wenn man annimmt, daß jede Wicklung für sich in der angegebenen Weise vom Strom durchflossen ist, so erhält man die um jeweils 120° räumlich gegeneinander verschoben Flüsse Φ_R , Φ_S und Φ_T . Die Flüsse in Bild 13.3 sind unter der Annahme gezeichnet, daß die sie erregenden Ströme gleich groß sind.

Ersatzweise läßt sich eine Durchmesserspule durch eine Induktivität senkrecht zur Durchmesserspule ersetzen. Werden nun die Wicklungen mit einem sinusförmigen Drehstromsystem nach Bild 13.3 gespeist, dann verändern die Einzelflüsse ihre Amplitude entsprechend der Zeitverläufe der Ströme. Außerdem überlagern sich die Flüsse vektoriell innerhalb der Maschine zu einem Gesamtfluß. In Bild 13.4 sind für die Winkel $\omega t = 0^\circ, 60^\circ, 120^\circ$ und 180° die Flüsse vektoriell addiert. Man erkennt, daß der Betrag $|\underline{\phi}_R + \underline{\phi}_S + \underline{\phi}_T|$ des Gesamtflusses konstant bleibt und sich genau mit dem

Winkel des speisenden Stromsystems räumlich bewegt. Es entsteht deshalb in der Maschine ein sich räumlich drehendes Magnetfeld. Wenn wir für $\omega t = x$ setzen, erhalten wir für die zeitliche Abhängigkeit der Flüsse

$$\Phi_R(t) = \Phi_M \cdot \cos(x) ;$$

$$\Phi_S(t) = \Phi_M \cdot \cos\left(x - \frac{2\pi}{3}\right) ; \quad (13.1)$$

$$\Phi_T(t) = \Phi_M \cdot \cos\left(x - \frac{4\pi}{3}\right) .$$

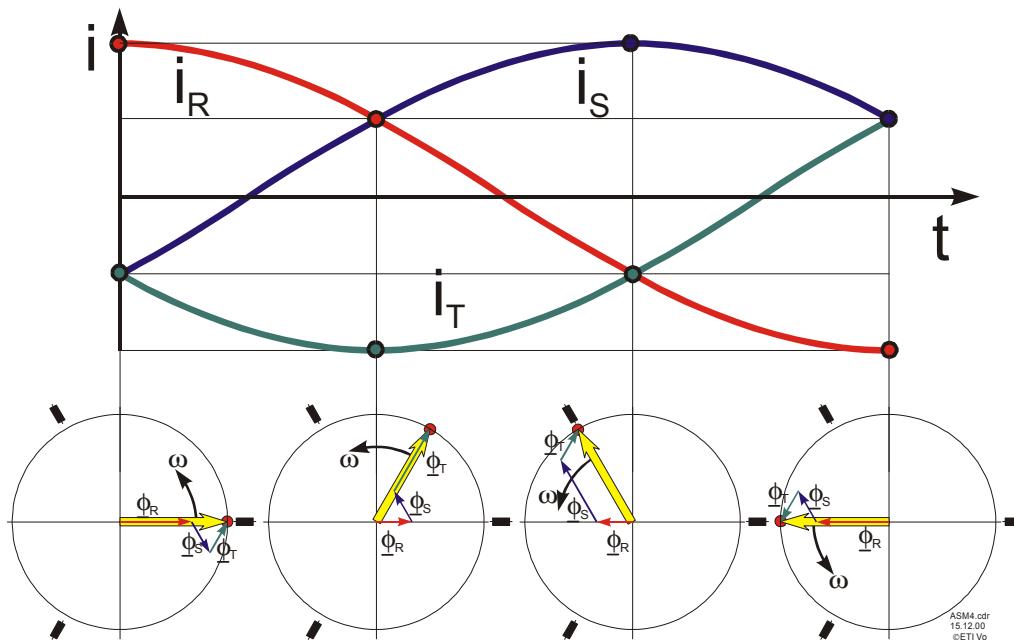


Bild 13.4: Räumlicher sich drehender Fluß bei Speisung der Ständerwicklung mit Drehstrom.

Als Modell für die in der Asynchronmaschine vorhandenen Rotorwicklungen bringen wir eine drehbare Spule in das sich drehende Feld und führen für die mit der Spule verknüpften Größen die Zahl 2 als Index ein. Bei stillstehender Spule wird in der Spule eine Spannung induziert. Falls sich die Spule genau synchron mit dem Fluß dreht, findet für die Spule keine Flußänderung statt und die induzierte Spannung ist Null, folglich kann dann in den Rotorwicklungen kein Strom fließen. Erst wenn sich die Spule asynchron, also langsamer oder schneller als das Drehfeld dreht, wird in der Rotorwicklung eine zu der Relativgeschwindigkeit proportionale Spannung induziert.

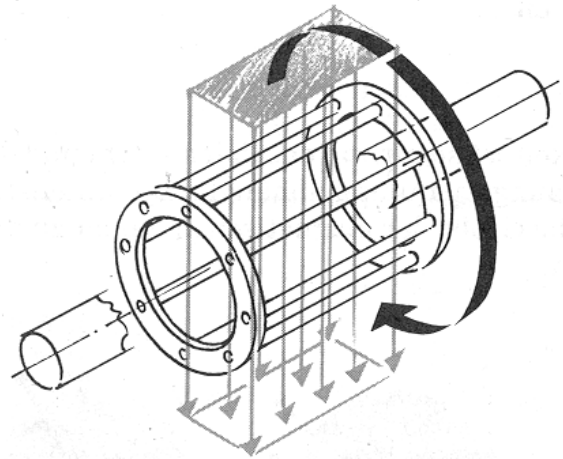
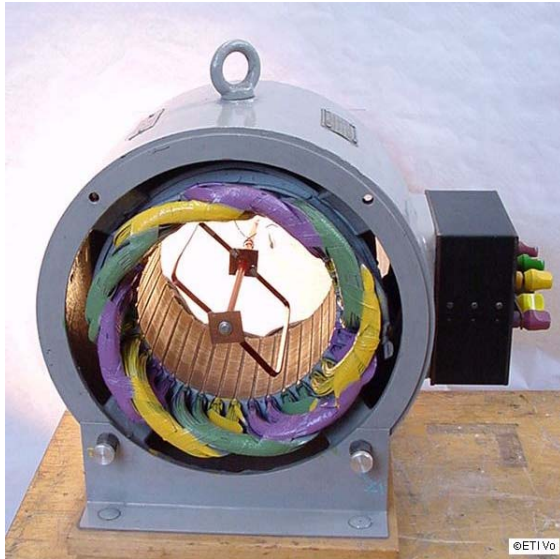


Bild 13.5: In sich kurzgeschlossene Leiterschleife in einem Ständer mit 3 Polpaaren (links). Drehendes Magnetfeld durchsetzt ein Kurzschlußkäfig (rechts).

Wenn sich die Spule mit dem Winkel γ bewegen kann, gilt für die von den Ständerwicklungen R , S und T erregten Teilflüsse durch die Rotorspule:

$$\Phi_{2R} = \Phi_R(t) \cdot \cos \gamma$$

$$\Phi_{2S} = \Phi_S(t) \cdot \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (13.2)$$

$$\Phi_{2T} = \Phi_T(t) \cdot \cos\left(\gamma - \frac{4\pi}{3}\right) .$$

Der Gesamtfluß Φ_2 durch die Rotorspule setzt sich aus der Summe der Teilflüsse zusammen und ist von dem Stellungswinkel γ und dem elektrischen Winkel ωt bzw. der Zeit t abhängig. Für den Gesamtfluß gilt:

$$\underline{\Phi}_2 = \underline{\Phi}_{R2} + \underline{\Phi}_{S2} + \underline{\Phi}_{T2} . \quad (13.3)$$

Wenn wir die zeitabhängigen Flüsse nach Gl.(13.1) in Gl.(13.2) einsetzen und nach Gl.(13.3) den Betrag ermitteln, erhält man:

$$\begin{aligned} \Phi_2 &= \Phi_M \cdot \left[\cos x \cdot \cos \gamma + \cos\left(x - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) + \cos\left(x - \frac{4\pi}{3}\right) \cdot \cos\left(\gamma - \frac{4\pi}{3}\right) \right] \\ &= \frac{1}{2} \cdot \Phi_M \cdot \left[\cos(x - \gamma) + \cos(x + \gamma) + \cos(x - \gamma) + \cos\left(x + \gamma - \frac{4\pi}{3}\right) + \cos(x - \gamma) \right. \\ &\quad \left. + \cos\left(x + \gamma - \frac{8\pi}{3}\right) \right] . \end{aligned}$$

Durch weitere Umformungen erhält man daraus den Gesamtfluß Φ_2 durch die Rotorpule

$$\Phi_2 = \frac{3}{2} \cdot \Phi_M \cdot \cos(\omega t - \gamma) . \quad (13.4)$$

Aus der Gl.(13.4) kann man am Argument der Kosinusfunktion sehen, daß die Flußänderung durch die Spule 2 vom Differenzwinkel $\omega t - \gamma$ abhängig ist. Wenn sich der

Rotor genau mit dem vom Ständerstrom erregten magnetischen Feld dreht, ist $\Phi_2 \max. (\omega t = \gamma)$. Die Winkelgeschwindigkeit des Rotors bezeichnet man in diesem Fall als die synchrone Winkelgeschwindigkeit Ω_s .

Durch die Überlagerung der drei Teilflüsse haben wir festgestellt, daß sich ein magnetischer Fluß Φ_2 mit zwei Polen ergibt (Nord- und Südpol). Die Ständerwicklung nach Bild 13.4 hat also ein Polpaar, das wir mit p bezeichnen. Bringt man nun im Ständer der Maschine nicht nur 3 Spulen, sondern $p \cdot 3$ Spulen gleichverteilt am Umfang an, dann bewegt sich das magnetische Feld nur noch um $1/p$ des gesamten mechanischen Umfangs weiter, wenn der elektrische Winkel sich um 2π ändert (Bild 13.5 und Bild 13.6). Die mechanische synchrone Winkelgeschwindigkeit Ω_s ist daher

$$\boxed{\Omega_s = \frac{\omega}{p}} \quad (13.5)$$

Die synchrone Drehzahl n_s erhält man daraus zu

$$n_s = \frac{\Omega_s}{2\pi} = \frac{\omega}{p \cdot 2\pi} = \frac{f}{p} \quad (13.6)$$

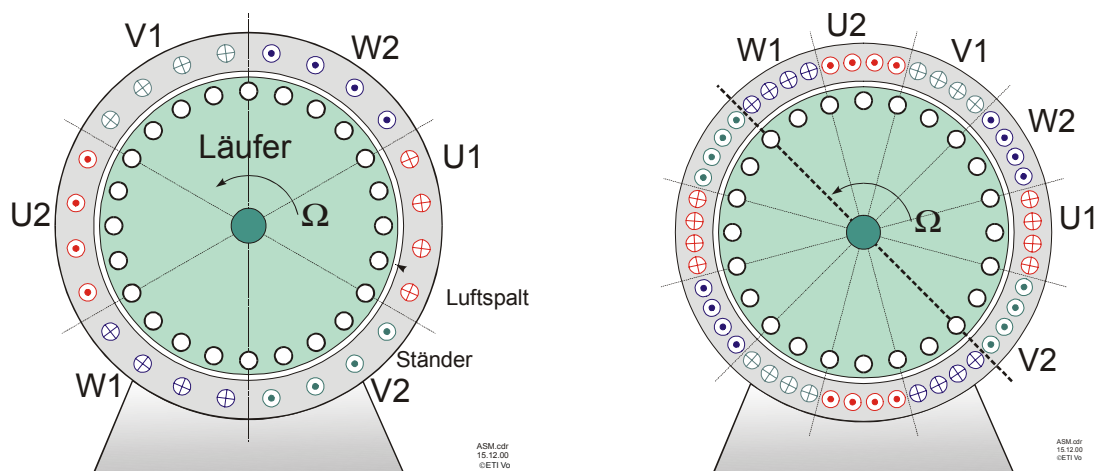


Bild 13.6: Anordnung der Wicklungen bei einem und zwei Polpaaren.

Am 50Hz-Netz ergibt sich für $p=1$ die größte synchrone Drehzahl von $n_s = 3000 \text{ min}^{-1}$, bei 60Hz-Netzen (USA) ist die höchste synchrone Drehzahl $n_s = 3600 \text{ min}^{-1}$. Bei verschiedenen Polpaarzahlen p ergeben sich die folgenden synchronen Drehzahlen:

p	1	2	3	4	5	6	7	8
n_s / min^{-1}	3000	1500	1000	750	600	500	428	375

Zur Richtungsumkehr der synchronen Drehzahl n_s sind zwei beliebige Leiteranschlüsse des Drehstromnetzes an den Maschinenklemmen zu vertauschen. Analytisch drückt sich dies in einem Vorzeichenwechsel im Argument der Kosinusfunktion von Gl.(13.4) aus.

Die auf die synchrone Winkelgeschwindigkeit bezogene Relativ-Winkelgeschwindigkeit Ω_R des Rotors zu der synchronen Winkelgeschwindigkeit Ω_s des Drehfelds bezeichnet man als Schlupf s .

$$s = \frac{\omega_R}{\Omega_s} = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} = 1 - \frac{\Omega}{\Omega_s} \quad (13.7)$$

oder

$$\Omega = \Omega_s \cdot (1 - s) \quad (13.8)$$

Durch die Definition des Schlupfes s vereinfachen sich viele Gleichungen, die für die ASM gültig sind. Der dimensionslose Schlupf s ist Null, wenn sich der Rotor genau mit der synchronen Winkelgeschwindigkeit dreht.

Bei stillstehendem Rotor ist $s=1$ und im Rotor tritt die synchrone Winkelgeschwindigkeit Ω_s als Rotorfrequenz ω_R auf. Aus Gl.(13.8) erhält man:

$$\Omega = \Omega_s - \Omega_s \cdot s = \Omega_s - \omega_R$$

oder

$$\omega_R = s \cdot \Omega_s \quad (13.9)$$

Die gleichen Zusammenhänge gelten auch für die Frequenzen.

$$f_R = s \cdot f_s \quad (13.10)$$

Für die in der Rotorspule induzierte Spannung gilt bei konstanten Winkelgeschwindigkeiten mit $x = \omega t$, $\gamma = \Omega \cdot t$ und unter Vernachlässigung des Nullphasenwinkels ($p=1$)

$$u_2 = \dot{\Phi}_2 = -\frac{3}{2} \cdot \Phi_M \cdot \sin(x - \gamma) \cdot (\dot{x} - \dot{\gamma}) = -\frac{3}{2} \cdot \Phi_M \cdot \sin(\omega t - \Omega t) \cdot (\omega - \Omega) \quad .$$

Mit der Rotorkreisfrequenz $\omega_R = \omega - \Omega$ wird daraus

$$u_2 = -\frac{3}{2} \cdot \omega_R \cdot \Phi_M \cdot \sin \omega_R t \quad (13.11)$$

Die in der Rotorspule induzierte Spannung u_2 ist bei konstantem Fluß also zu der Differenzkreisfrequenz ω_R bzw. zum Schlupf $s = \omega_R / \Omega_s$ proportional (Bild 13.7).

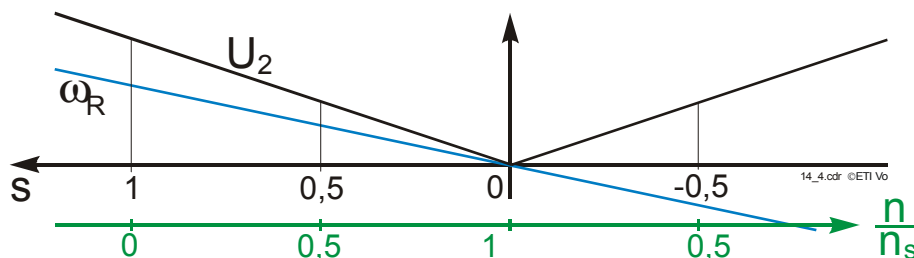


Bild 13.7: Effektivwert U_2 der Läufer-Spannung und Differenz-Kreisfrequenz ω_R in Abhängigkeit vom Schlupf s bzw. der bezogenen Rotordrehzahl n/n_s .

Die Rotorspule kann durch eine Induktivität L und einen Widerstand R sowie durch die Spannungsquelle u_2 dargestellt werden. Die im Läufer der Asynchronmaschine

vorhandenen Rotorspulen sind kurzgeschlossen, daher schließen wir auch unsere Modellspule kurz.

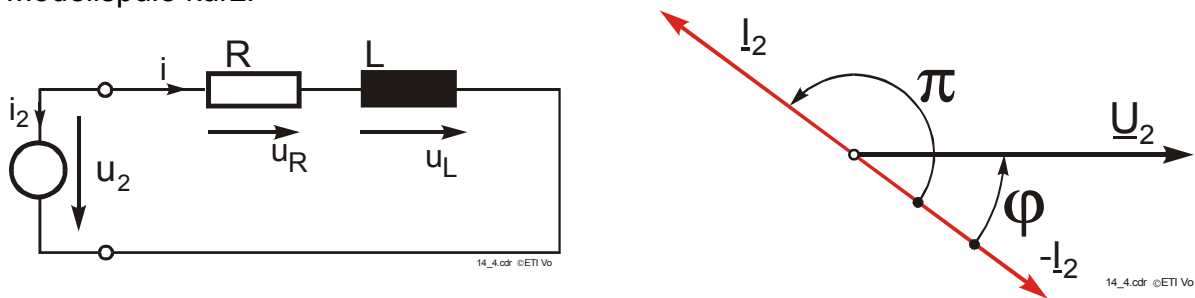


Bild 13.8: Ersatzschaltung und Zeigerdiagramm der Rotorspule

In der kurzgeschlossenen Spule fließt dann ein Wechselstrom $i = i_2$, der gegenüber der treibenden Spannung u_2 die Phasenverschiebung φ hat

$$i_2 = -\frac{u_2}{Z} = \frac{3}{2} \cdot \omega_R \cdot \Phi_M \cdot \frac{1}{Z} \sin(\omega_R t - \varphi) \quad (13.12)$$

Mit den komplexen Effektivwerten gilt:

$$\underline{I}_2 = -\frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}} \quad (\underline{U}_2 \text{ sei reell}) \quad (13.13)$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega_R L)^2}$$

$$\varphi = \arctan \frac{\omega_R L}{R} = \arccos \frac{R}{Z} \quad .$$

Weil sich die stromdurchflossenen Leiter der Rotorspule in einem magnetischen Feld befinden, wird auf sie eine Kraft F ausgeübt, die proportional zu dem Produkt $B \cdot i$ ist. Die Leiter befinden sich an der Stelle $\gamma + \pi/2$, weshalb auch die magnetische Induktion B an dieser Stelle für die Berechnung eingesetzt werden muß. Um die mechanischen Abmessungen und damit die Maschinenkonstanten bei der folgenden Herleitung nicht berücksichtigen zu müssen, wird nur die Proportionalität der Größen betrachtet.

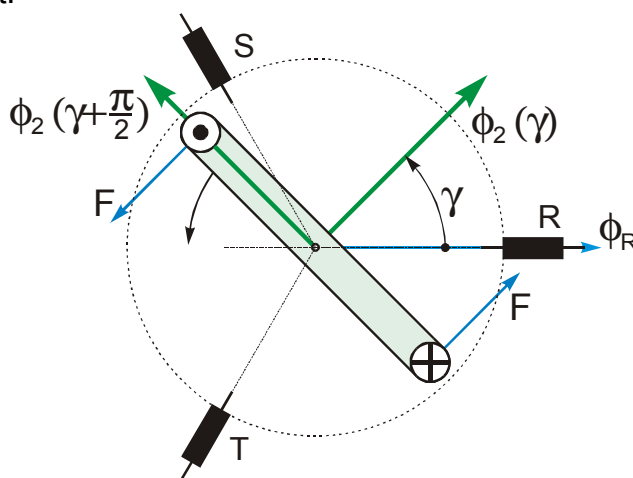


Bild 13.9: Kräfte auf die stromdurchflossenen Leiter der Rotorspule

Mit der oben gewählten Zählweise für γ erhält man

$$F \sim m \sim B \left(\gamma + \frac{\pi}{2} \right) \cdot i(\gamma) \quad (m = \text{zeitlich veränderliches Drehmoment})$$

$$B \sim \Phi$$

$$B \left(\gamma + \frac{\pi}{2} \right) \sim \Phi \left(\gamma + \frac{\pi}{2} \right) \sim \cos \left(x - \gamma - \frac{\pi}{2} \right) = \cos \left(\omega_R t - \frac{\pi}{2} \right) = \sin(\omega_R t) \quad .$$

Daher folgt für den Momentanwert $m(t)$ des Drehmoments:

$$m \sim \frac{\omega_R}{Z} \cdot \sin \omega_R t \cdot \sin(\omega_R t - \varphi) \quad ,$$

durch einfache trigonometrische Umformung wird daraus

$$m \sim \frac{\omega_R}{2 \cdot Z} \cdot [\cos \varphi - \cos(2\omega_R t - \varphi)] \quad .$$

Nun bilden wir den zeitlichen Mittelwert über das Drehmoment m . Da der zweite Term wegen $2\omega_R$ keinen Beitrag zum Mittelwert liefert, erhält man

$$\bar{m} \sim M \sim \frac{\omega_R}{Z} \cdot \cos \varphi = \frac{\omega_R}{\sqrt{R^2 + (\omega_R L)^2}} \left(\cos \arccos \frac{R}{Z} \right) \quad ,$$

$$M \sim \frac{R \cdot \omega_R}{Z^2} = \frac{R \cdot \omega_R}{R^2 + (\omega_R L)^2} = \frac{1}{\left(\frac{R}{\omega_R \cdot L} + \frac{\omega_R \cdot L}{R} \right) \cdot L} \quad ,$$

$$M \sim \frac{1}{\left(\frac{R}{\omega_R \cdot L} + \frac{\omega_R \cdot L}{R} \right)} \quad . \tag{13.14}$$

Bei gegebenen Parametern R und L ist das mittlere Drehmoment M nur von der Rotorfrequenz ω_R abhängig. Wir untersuchen, wo die Funktion $M(\omega_R)$ ihr Maximum hat. Da die Abhängigkeit nur im Nenner vorkommt, liegt ein Maximum von M dann vor, wenn $1/M$ ein Minimum hat.

Es läßt sich zeigen, daß der Arbeitspunkt bei dem maximalen Drehmoment instabil ist; man sagt die Maschine kippt und bezeichnet diesen Punkt als Kippunkt. Die zu dem Maximum gehörenden Größen erhalten deshalb den zusätzlichen Index k (Rotor-Kippkreisfrequenz ω_{Rk} , Drehmoment M_k usw.).

$$\frac{\delta}{\delta \omega_R} \left(\frac{R}{\omega_R L} + \frac{\omega_R L}{R} \right)' = 0 \quad \text{oder}$$

$$0 = -\frac{R}{\omega_{Rk}^2 \cdot L} + \frac{L}{R} \quad \rightarrow \quad \frac{\omega_{Rk}^2 \cdot L}{R} = \frac{R}{L}$$

$$\boxed{\omega_{Rk} = \frac{R}{L}} \quad . \tag{13.15}$$

Das Kippmoment wird damit

$$M_k \sim \frac{1}{\frac{\omega_{Rk}}{\omega_R} + \frac{\omega_R}{\omega_{Rk}}} \quad (13.16)$$

Zu der Rotorkreisfrequenz ω_{Rk} gehört der Kippschlupf s_k

$$\omega_R = s \cdot \Omega_s \quad ; \quad \omega_{Rk} = s_k \cdot \Omega_s$$

Damit wird durch Einsetzen in die Momentengleichung Gl.(13.16)

$$M \sim \frac{1}{\frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k}} \quad .$$

Für die graphische Darstellung beziehen wir das Drehmoment M auf das soeben berechnete maximal auftretende Kippmoment M_k und erhalten dafür

$$\frac{M}{M_k} = \frac{\frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k}}{\frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k}} = \frac{2}{\frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k}}$$

$$\boxed{\frac{M}{M_k} = \frac{2}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}} \quad . \text{ (Kloss'sche Formel)} \quad (13.17)$$

Die Gl.(13.17) wird als Kloss'sche Formel bezeichnet und beschreibt die Abhängigkeit des Drehmoments vom Schlupf s . Zum Zeichnen der Funktion M / M_k machen wir folgende Näherungen:

$$s \ll s_k \quad \rightarrow \quad \frac{M}{M_k} = \frac{2}{\frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k}} \approx \frac{2 \cdot s}{s_k} \quad \text{in der Nähe der synchronen Drehzahl}$$

$$s \gg s_k \quad \rightarrow \quad \frac{M}{M_k} = \frac{2}{\frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k}} \approx \frac{2 \cdot s_k}{s} \quad \text{in der Nähe von } n=0$$

$$s = s_k \quad \rightarrow \quad \frac{M}{M_k} = 1 \quad .$$

Die Abhängigkeit des auf das Kippmoment bezogenen Drehmoments ist in Bild 13.10 dargestellt. Die Skalierung der Achse für den Schlupf läuft der Skalierung der Drehzahlachse entgegen. Bei der Darstellung wird im Gegensatz zur Gleichstrommaschine üblicherweise das Drehmoment auf der Ordinatenachse und die Drehzahl auf der Abszisse aufgetragen. Die bei realisierten Maschinen gültigen Kennlinien haben prinzipiell immer den in Bild 13.10 dargestellten Verlauf, können jedoch bei Drehzahlen um Null von dem theoretischen Verlauf abweichen.

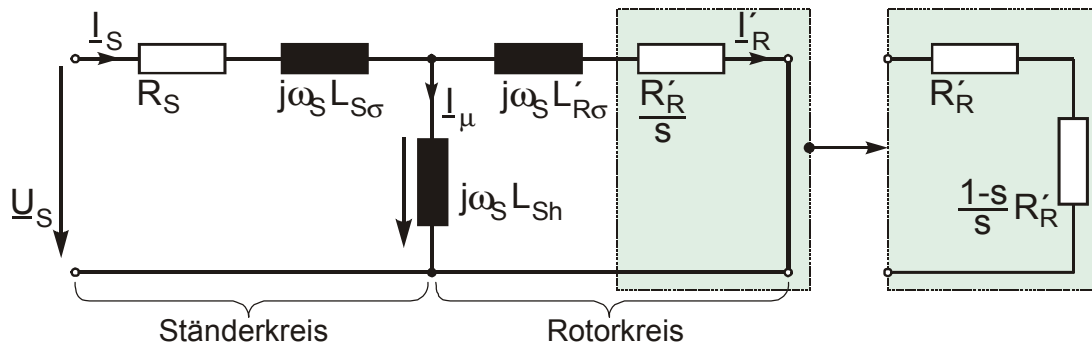


Bild 13.11: Ersatzschaltung der Asynchronmaschine

13.3 Leistungen

Die Asynchronmaschine belastet das Drehstromnetz wie ein Drehstromverbraucher, daher lassen sich die Leistungen aus den Strang- (Index S) oder den Leitergrößen (Index L) berechnen.

Die an den Klemmen aufgenommene Scheinleistung ist

$$S = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L = 3 \cdot U_S \cdot I_S \quad . \quad (13.18)$$

Wirkleistung des Stators

$$P_S = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos \varphi = 3 \cdot U_S \cdot I_S \cdot \cos \varphi = S \cdot \cos \varphi \quad . \quad (13.19)$$

Blindleistung

$$Q = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \sin \varphi = 3 \cdot U_S \cdot I_S \cdot \sin \varphi = S \cdot \sin \varphi \quad . \quad (13.20)$$

Die vom Stator über den Luftspalt übertragene Leistung nennt man die Drehfeldleistung P_D , sie ist die vom Netz aufgenommene Statorleistung P_S , verringert um die Verluste P_{vS} im Statorwiderstand R_S .

Verlustleistung im Ständer bei $R_S \neq 0$:

$$\boxed{P_{vS} = 3 \cdot R_S \cdot I_S^2} \quad . \quad (13.21)$$

Damit ist die Drehfeldleistung

$$P_D = P_S - 3 \cdot R_S \cdot I_S^2 \quad . \quad (13.22)$$

Im Kippunkt bezeichnet man die Drehfeldleistung als Kippdrehfeldleistung P_{Dk} . Im Rotor teilt sich die Drehfeldleistung in die Rotorverluste P_{vR} und die mechanisch abgegebene Leistung P_{mech} auf. Die in Bild 13.12 dargestellten mechanischen Reibungsverluste P_{vm} im Lager sind hier vernachlässigt.

Die Verlustleistung im Rotor ist:

$$P_{vR} = 3 \cdot R'_R \cdot I_R'^2 \quad , \quad (13.23)$$

$$P_D = 3 \cdot \frac{R'_R}{s} \cdot I_R'^2 = 3 \cdot R'_R \cdot I_R'^2 \cdot \left(\frac{1+s-s}{s} \right) = P_{vS} \cdot \left(1 + \frac{1-s}{s} \right)$$

$$P_D = P_{vR} + P_{mech} \quad . \quad (13.24)$$

Der Wirkungsgrad der Maschine ist daher

$$\eta = \frac{P_{mech}}{P_S} = \frac{P_S - P_{vS} - P_{vR}}{P_S} \quad (13.25)$$

Die Leistungen auf der Rotorseite lassen sich in Übereinstimmung mit dem Ersatzschaltbild auch mit Hilfe des Schlupfes s ausdrücken. Für die Drehfeldleistung gilt nach Bild 13.12:

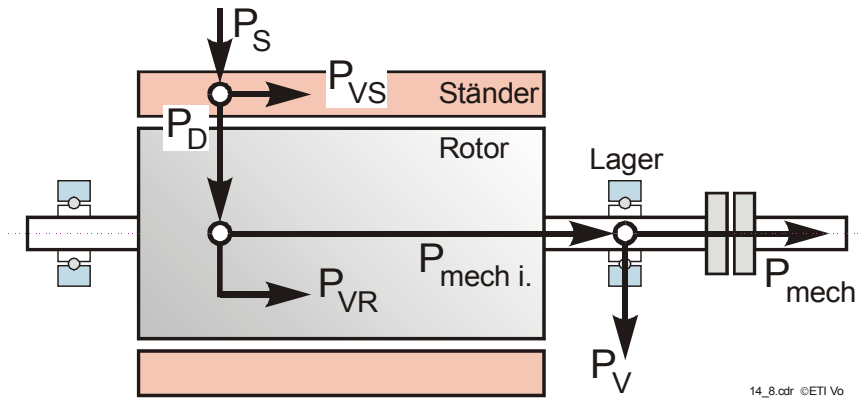


Bild 13.12: Leistungsfluß bei Motorbetrieb in der Asynchronmaschine

Durch Vergleich mit Gl.(13.23) und Gl.(13.24) erhält man die Verlustleistung im Rotor

$$P_{vR} = s \cdot P_D \quad (13.26)$$

sowie die mechanisch abgegebene Leistung

$$P_{mech} = (1-s) \cdot P_D = \frac{(1-s)}{s} \cdot P_{vR} \quad (13.27)$$

Wenn die Statorverluste vernachlässigt werden können, ist die Drehfeldleistung gleich der Statorleistung.

Das von der Maschine abgegebene Drehmoment läßt sich durch die Drehfeldleistung und die synchrone Drehzahl ausdrücken:

$$M = \frac{(1-s) \cdot P_D}{\Omega} = \left(1 - 1 + \frac{\Omega}{\Omega_s}\right) \cdot \frac{P_D}{\Omega} \quad \text{oder}$$

$$M = \frac{P_D}{\Omega_s} = \frac{P_{mech}}{\Omega} \quad (13.28)$$

In Bild 13.13 sind die Drehfeldleistung, die mechanisch abgegebene Leistung und die Rotorverlustleistung als Flächen dargestellt. Die Drehfeldleistung wird durch den auf der Momentenkennlinie liegenden Arbeitspunkt in die mechanische Leistung und die Verlustleistung aufgeteilt.

s	P_{mech}	P_D
1	0	P_{vR}
0	0	0

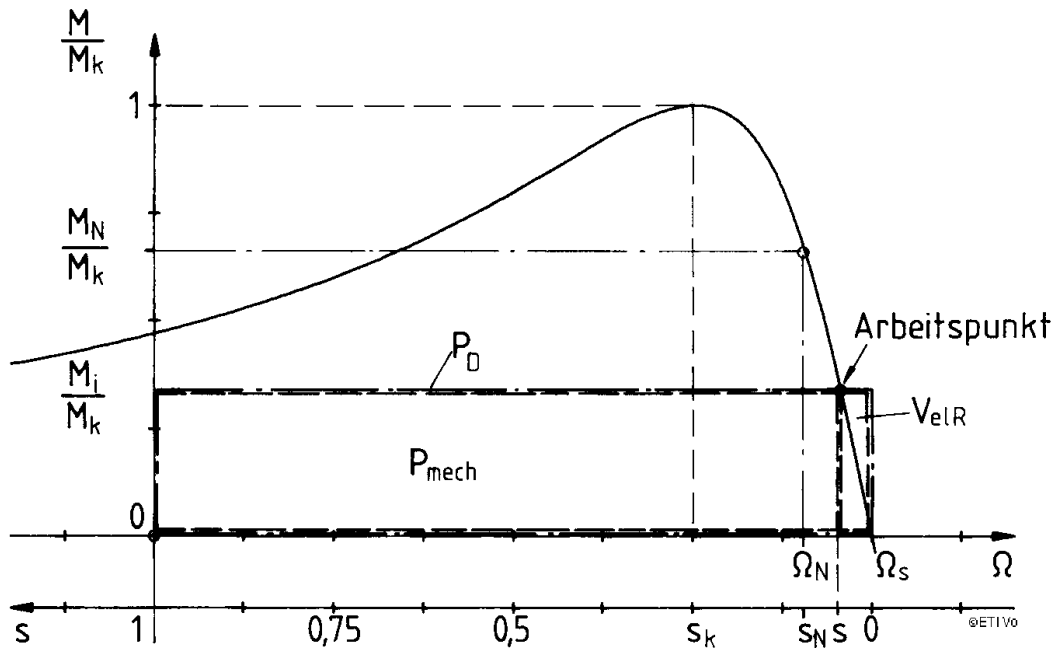


Bild 13.13: Aufteilung der Drehfeldleistung P_D in die mechanische Leistung P_{mech} und die Rotorverlustleistung P_{vR} bei Motorbetrieb.

13.4 Typenschild der Asynchronmaschine

Das Typen- oder Leistungsschild einer Asynchronmaschine enthält die wichtigsten Angaben, die zum Betrieb notwendig sind. Aus den Angaben kann Folgendes abgelesen werden.

Der Motor kann an ein Drehstromnetz 230/400V angeschlossen werden

Motortype: Drehstrommotor 5,8kW; 4-polig (p=2)

Dreieckschaltung, d.h. Anlauf in Sternschaltung möglich

Stromaufnahme bei Nennleistung 11,5 A

Hersteller:			
D-Motor 5,8/4		Nr. 0815	
230/400	Δ	11,5 A	
5,8 kW		cos φ 0,85	
1440 U/min		50 Hz	

Nennleistung des Motors 5,8 kW. Diese Leistung kann er dauernd an der Welle abgeben

Nenndrehzahl = Drehzahl bei Belastung mit Nennmoment

Drehstromnetz 50 Hz

Leistungsfaktor bei Nennlast ist 0,85

Beispiel:

Für die Maschine mit dem obigen Typenschild soll die synchrone Drehzahl, die aufgenommene Leistung, die Scheinleistung, der Nennschlupf und der Wirkungsgrad berechnet werden.

Die synchrone Drehzahl ist 1500 min^{-1} .

Den Nennschlupf s_N erhält man daraus zu

$$s_N = 1 - \frac{n_N}{n_s} = 1 - \frac{1440 \text{ min}}{1500 \text{ min}} = 0,04 \quad .$$

Aus der mechanisch abgegebenen Leistung und der Nenndrehzahl erhält man das Nennmoment M_N .

$$M_N = \frac{P_{mechN}}{2\pi \cdot n_N} = \frac{5,8 \text{ kW} \cdot 60 \text{ s}}{2\pi \cdot 1440} = 38 \text{ Nm} \quad .$$

Die Scheinleistung ist

$$S = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L = \sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 11,5 \text{ A} = 7,96 \text{ kVA} \quad .$$

Die vom Netz bei Motorbetrieb aufgenommene Wirkleistung erhält man daraus zu:

$$P = S \cdot \cos \varphi = 7,96 \text{ kVA} \cdot 0,85 = 6,77 \text{ kW}$$

und die Blindleistung

$$Q = S \cdot \sin \varphi = 7,96 \text{ kVA} \cdot 0,526 = 4,2 \text{ kVA} \quad .$$

Der Wirkungsgrad η ist

$$\eta = \frac{P_{mech}}{P} = \frac{5,8 \text{ kW}}{6,77 \text{ kW}} = 0,856 \quad .$$

13.5 Stationäres Betriebsverhalten der Asynchronmaschine

Das stationäre Betriebsverhalten kann mit Hilfe der Kloss'schen Formel diskutiert werden. Dabei sind die folgenden Schlupfwerte von besonderer Bedeutung, da $s=1$ und $s=0$ das Betriebsdiagramm in den Brems-, Motor und Generatorbereich einteilen (Bild 13.14).

$s=1$:

Der Läufer steht still, die gesamte Drehfeldleistung P_D wird nach Gl.(13.24) im Rotorwiderstand in Stromwärmeverluste P_{vR} umgesetzt. Die Maschine wirkt wie ein kurzgeschlossener Transformator (siehe Ersatzschaltbild für $s=1$).

$s=0$:

Theoretischer Leerlaufpunkt; die Drehfeldleistung, das Moment und die mechanische Leistung sind Null. Um diesen Betriebspunkt genau zu erreichen, muß die Maschine von außen angetrieben werden. Ohne äußeren Antrieb läuft die Maschine im Leerlauf wegen unvermeidlicher Lüfterverluste und Lagerreibung nur näherungsweise in diesem Punkt.

Weitere ausgezeichnete Punkte sind:

$s = s_k$:

Beim Kippschlupf s_k tritt das höchste Drehmoment, das sogenannte Kippmoment M_k auf.

$s = s_N$:

Schlupfwert bei Nennmoment M_N .

13.5.1 Motorbetrieb

Für den stationären Motorbetrieb wird der Bereich $0 < s < s_k$ ausgenutzt, in dem die Drehzahl bei Belastung näherungsweise linear abnimmt. Bei Nennbelastung mit Nennmoment M_N ist der dazugehörige Nennschlupf s_N typischerweise 3...6%. Das Nennmoment bezogen auf das Kippmoment beträgt ca. $M_N / M_k = 0,4 \dots 0,6$. Als Näherung für das Drehmoment von $s = 0$ bis zum Nennbetriebspunkt $s = s_N$ kann man d.h. $s \approx 0$ in die Kloss'sche Formel einsetzen und erhält

$$\frac{M(s)}{M_k} = \frac{2}{\frac{s_k + s}{s} + \frac{s}{s_k}} \approx 2 \cdot \frac{s}{s_k} \quad \text{für } -s_N \ll s \ll s_N \quad (13.29)$$

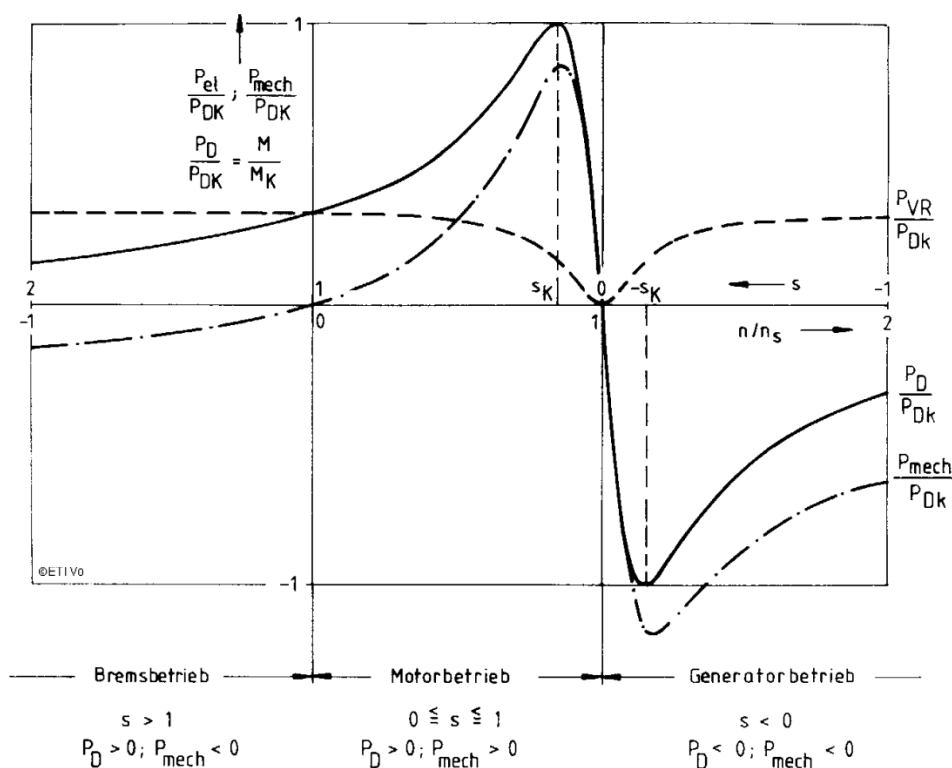


Bild 13.14: Drehfeldleistung, mechanische Leistung und elektrische Leistung in Abhängigkeit vom Schlupf s bzw. n/n_s

Wenn die Belastung mit Nennmoment M_N erfolgt und Nennspannung anliegt, stellt sich die Nenndrehzahl ein, welche immer kleiner als die synchrone Drehzahl ist. Ty-

rische Werte der Nenndrehzahlen n_N bei verschiedenen Polpaarzahlen sind in der folgenden Tabelle angegeben.

p	1	2	3	4	5	6	7	8
n_s / min^{-1}	3000	1500	1000	750	600	500	428	375
n_N / min^{-1}	2800	1480	920	610	550	470	410	360

Bei Motorbetrieb ist die abgegebene Leistung P_{mech} und die elektrisch zugeführte Leistung positiv. Die elektrisch zugeführte Leistung teilt sich in die Verlustleistung P_v und die mechanische Leistung auf. Weil das Drehmomenten-Drehzahl-Verhalten ähnlich wie bei einer fremderregten Gleichstrommaschine ist, nennt man diesen Bereich auch den Nebenschlußbereich.

Beim Anlauf der Maschine vom Stillstand $n=0$ ($s=1$) auf Nenndrehzahl, wird der Schlupfbereich $s_N < s < 1$ durchlaufen, wobei das Beschleunigungsmoment $M_B = M - M_L$ im gesamten Bereich positiv sein muß. Für das Anlaufmoment bei Drehzahl $n=0$ ($s=1$) erhält man mit der Kloss'schen Formel

$$\frac{M(s=1)}{M_k} = \frac{2}{\frac{s_k}{1} + \frac{1}{s_k}} = \frac{2 \cdot s_k}{s_k^2 + 1} \quad (13.30)$$

Wenn s_k einige % bis 10 % beträgt, ist näherungsweise $M/M_k \approx 2 \cdot s_k$.

13.5.2 Generatorbetrieb

Der Läufer wird übersynchron angetrieben. Dadurch wechseln die elektrische und die mechanische Leistung ihr Vorzeichen. Die in diesem Fall mechanisch zugeführte Leistung P_{mech} teilt sich in die Rotorverluste elektrische und die Drehfeldleistung P_D auf. Nach Abzug der Ständerverluste P_{vs} speist die Maschine die Wirkleistung ins Drehstromnetz, nimmt jedoch wie im Motorbetrieb Blindleistung auf. Der Generatorbetrieb bei der Asynchronmaschine ist nur dann möglich, wenn die Ständerwicklungen an Spannungsquellen angeschlossen sind, die einen Magnetisierungsstrom zulassen.

13.5.3 Bremsbetrieb

Der Läufer wird entgegen dem Drehfeld angetrieben. Es wird sowohl mechanische Leistung P_{mech} über die Welle als auch elektrische Leistung P_S zugeführt. Die gesamte zugeführte Energie wird im Rotor der Maschine in Wärme umgesetzt. Daher darf der Betrieb nur sehr kurzzeitig, z.B. beim Reversieren, durchlaufen werden. Wird eine Schleifringläufermaschine mit Vorwiderständen im Rotorkreis verwendet, treten die Verluste hauptsächlich in den zusätzlichen Widerständen auf.

13.6 Konstruktiver Aufbau der Asynchronmaschine

Der Ständer der Asynchronmaschine besteht aus gegeneinander isolierten Blechen, die zu einem Blechpaket zusammengeschichtet sind. In den Nuten des Blechpakets ist eine Drehstromwicklung so angeordnet, daß sie magnetisch $2p$ Pole bildet. Die 6 Enden der 3 Stränge sind auf das Klemmbrett geführt und entsprechend bezeichnet. Durch geeignete Verbindung kann die Wicklung je nach der angegebenen Spannung zu einer Stern- oder Dreieckschaltung verschaltet werden.

In den Nuten des Läuferblechpakets befinden sich runde oder annähernd runde Stäbe aus Aluminium, Bronze oder Kupfer. Diese Stäbe sind beiderseits des Blechpakets mit Kurzschlußringen kurzgeschlossen und bilden damit einen Käfig (Bild 13.15). Aus diesem Grund wird der Asynchronmotor auch Käfig- oder Kurzschlußläufer genannt. Bei dem Läufer mit Aluminiumstäben werden die Stäbe und die Kurzschlußringe in einem Spritzgußverfahren eingebracht. Dazu werden in das Rotorblechpaket ohne weitere Isolierung eine gut leitende Aluminiumlegierung eingespritzt. Wegen der gegeneinander isolierenden Oxidschicht der Rotorbleche können nur sehr kleine Kurzschlußströme auftreten. Nach dem Einbringen der Spritzgußwicklung wird der Rotor auf einer Drehbank überdreht. Bei Bronze- und Kupferstäben werden die Kurzschlußringe hart angelötet.

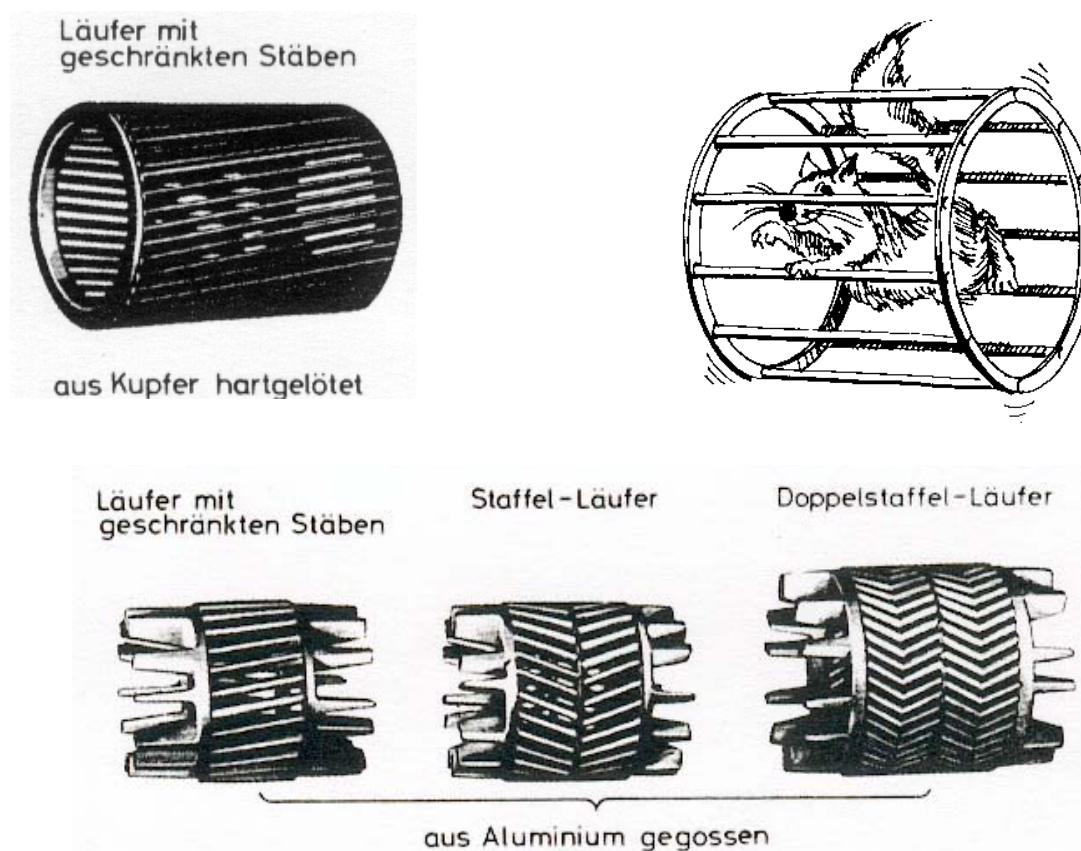


Bild 13.15: Verschiedene Kurzschlußläufer ohne Blechpaket und Welle

Um die Welligkeit des Drehmoments gering zu halten, wird die Rotorwicklung oder die Ständerwicklung geschrägt. Aus dem gleichen Grund wird auch die Ständerwicklung auf mehrere Nuten verteilt. Für den in Bild 13.16 dargestellten Blechschnitt

für Ständer und Läufer einer vierpoligen Maschine mit 24 Ständernuten sind für jede Seite einer Wicklung 3 Nuten vorgesehen ([2 Seiten]·[2 Nuten]·[3 Phasen]·[2 Polpaare] = 36 Nuten). Die Schrägung erkennt man an dem aufgeschnittenen Läufer in Bild 13.16 rechts.

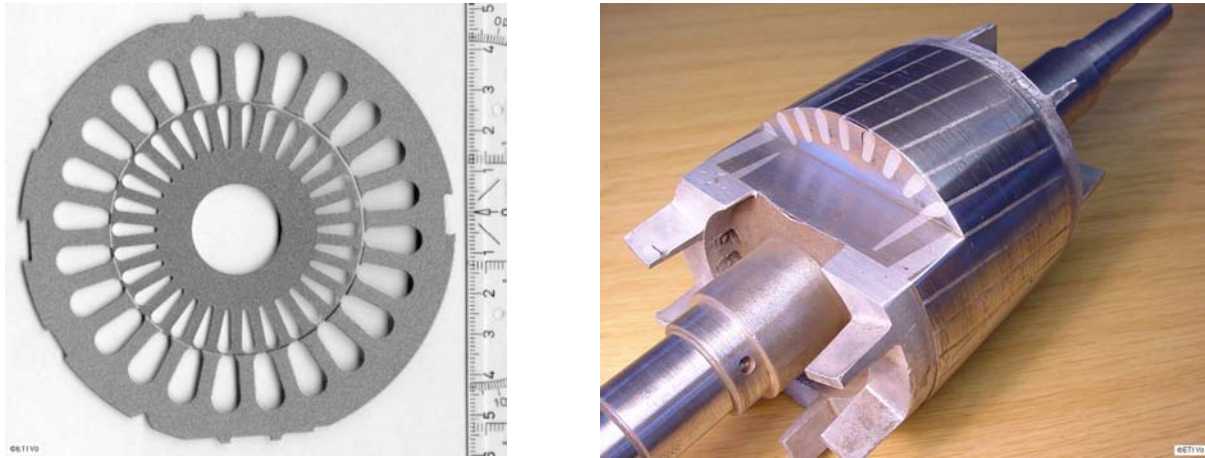


Bild 13.16: Blechschnitt einer vierpoligen (2 Polpaare $p=2$) Asynchronmaschine mit 24 Ständernuten Leistung 550 W $n=1470$ 1/min. Das Rotorblech paßt erst nach dem Abdrehen in die Bohrung des Ständers (links). Aufgeschnittener Rotor mit eingegossenen Aluminiumstäben.

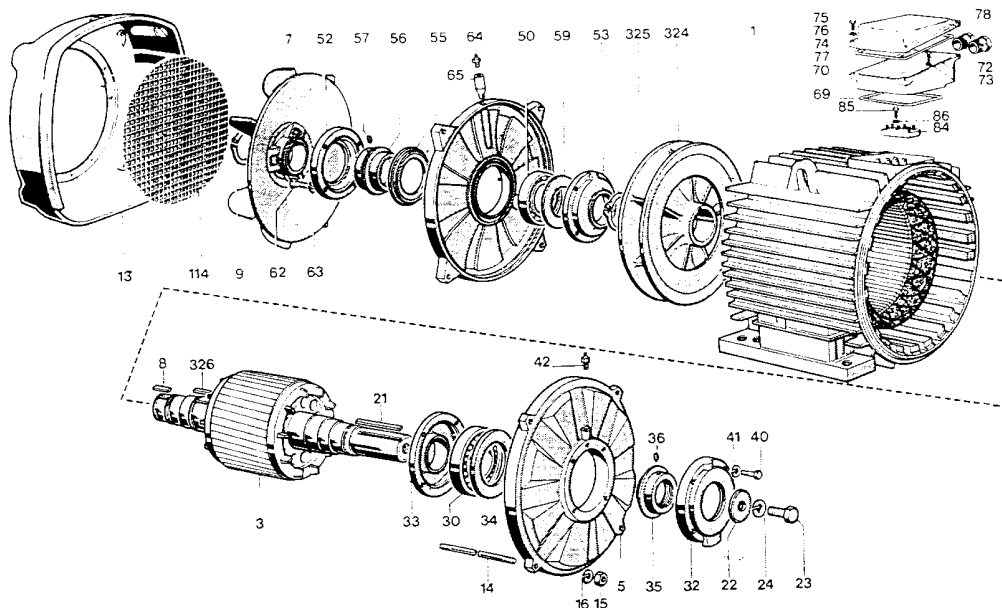


Bild 13.17: Sprengzeichnung einer Asynchronmaschine

13.7 Schleifringläufermaschine

Die Wicklungsenden des Rotors sind auf Schleifringe geführt. Damit nicht 6 Schleifringe auf der Welle angebracht werden müssen, sind die Rotorwicklungen auf dem Rotor zu einer Sternschaltung zusammengeschaltet und die drei verbleibenden Enden auf drei Schleifringe geführt. Der Kurzschluß wird dann außerhalb mit Hilfe von zusätzlichen Widerständen realisiert. Wenn man eine solche Maschine fest bremst ($n=0$), kann man sie als Stelltransformator benutzen. Zur Verstellung der Spannung

muß der Rotor um einen bestimmten Winkel verdreht werden. Durch das Einschalten der zusätzlichen Widerstände verändert sich der Kippschlupf s_k bzw. die Rotorkippkreisfrequenz ω_{Rk} nach Gl.(13.15) linear mit dem Widerstand (siehe Drehzahlverstellmöglichkeiten).

Über die Schleifringe läßt sich auch mit Hilfe von Stromrichtern ein Drehstromsystem variabler Frequenz einspeisen. Diese sogenannte doppelgespeiste ASM wird teilweise bei Windkraftanlagen großer Leistung (100-500 kW) eingesetzt.



Bild 13.18: Rotor einer Schleifringläufermaschine 15 kW.

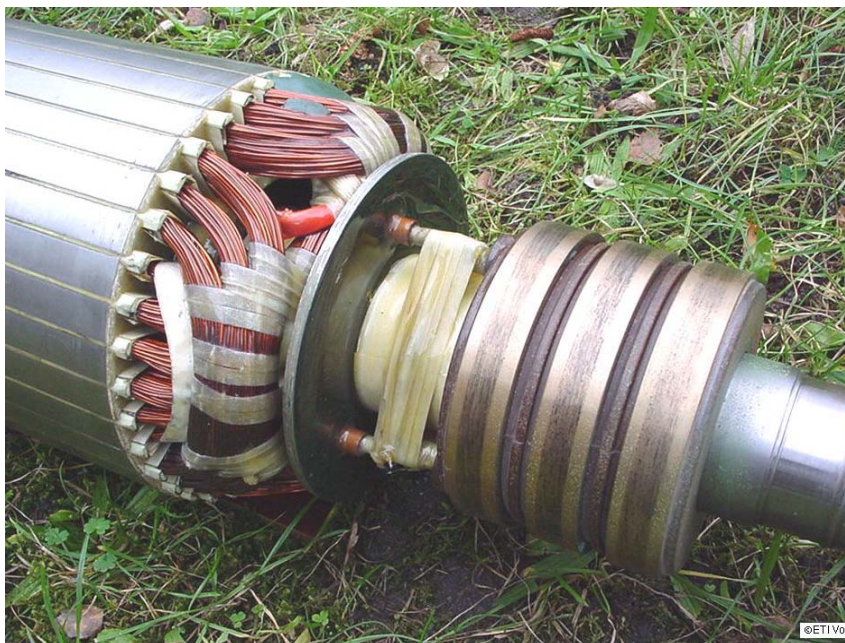


Bild 13.19: Wickelkopf und Schleifringe eines Schleifringläufers 15 kW



Bild 13.20: Aufgeschnittene Asynchronmaschine (links). Wickelkopf der Ständerwicklung (rechts) (Leistung ca. 1,5 kW).

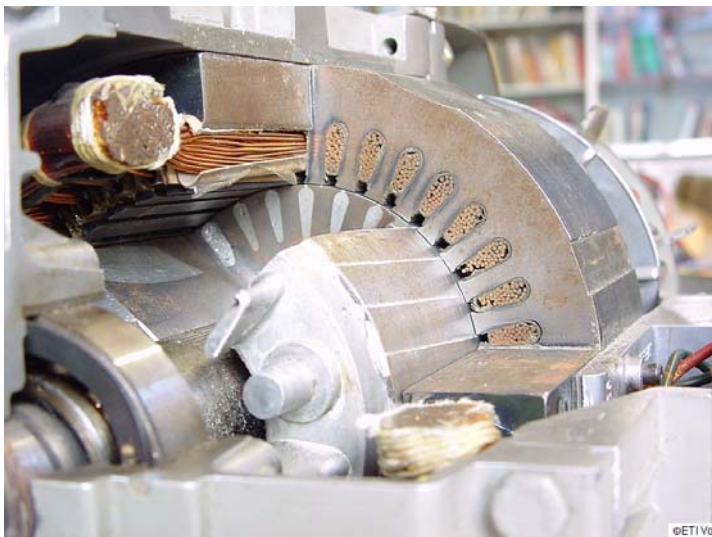


Bild 13.21: Aufgeschnittener Ständer mit Ständerwicklung und Rotor mit Spritzgußstäben (Leistung ca. 1,5 kW).

13.8 Drehzahlverstellmöglichkeiten

Bei der Asynchronmaschine kann die Drehzahl im Leerlauf nur durch Verstellen der Speisefrequenz oder durch Umschaltung der Polpaarzahl geändert werden. Bei Belastung gibt es zusätzlich die Möglichkeit der Spannungsverstellung und beim Schleifringläufer das Einschalten zusätzlicher Widerstände in den Läuferkreis.

13.8.1 Spannungsverstellung

Durch die Verstellung der Ständerspannung verändert sich nach Gl.(13.11) die im Rotor induzierte Spannung und damit auch der Rotorstrom. Wird bei konstantem Schlupfwert die Ständerspannung geändert, so ist das Drehmoment quadratisch von der Ständerspannung abhängig

$$\boxed{M \sim U_S^2} .$$

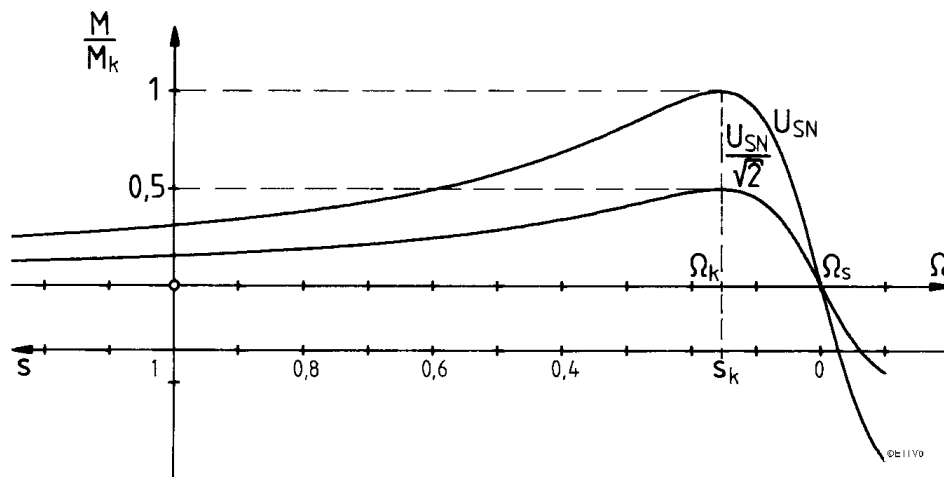


Bild 13.22: Drehmomenten-Drehzahl-Kennlinien bei der Spannungsverstellung
 $(U_S = U_{SN}, U_{SN} / \sqrt{2})$

Eine häufige Anwendung der Spannungsverstellung ist die Stern-Dreieckschaltung. Durch die Umschaltung von Stern- auf Dreieckschaltung ändert sich die Spannung an den Ständerwicklungen im Verhältnis $1:\sqrt{3}$. Im gleichen Verhältnis ändern sich auch die Ströme. Daher ändern sich die Leistung und die Drehmomente im Verhältnis $1:3$. Da im Normalbetrieb die Nennleistung der Maschine benötigt wird, verwendet man bei kleinem Lastmoment die Stern-Dreieckschaltung nur zum Anlassen.

13.8.2 Polumschaltung

Durch Veränderung der Polpaarzahl kann nach Gl.(13.6) die synchrone Drehzahl $n_s (\Omega_s)$ in Stufen verändert werden. Dazu gibt man dem Motor entweder zwei getrennte Wicklungen verschiedener Polzahl oder sorgt dafür, daß mittels eines besonderen Schalters die Wicklungen auf eine andere Polzahl umgruppiert werden. Die Polumschaltung wird auch als Dahlanderschaltung bezeichnet.

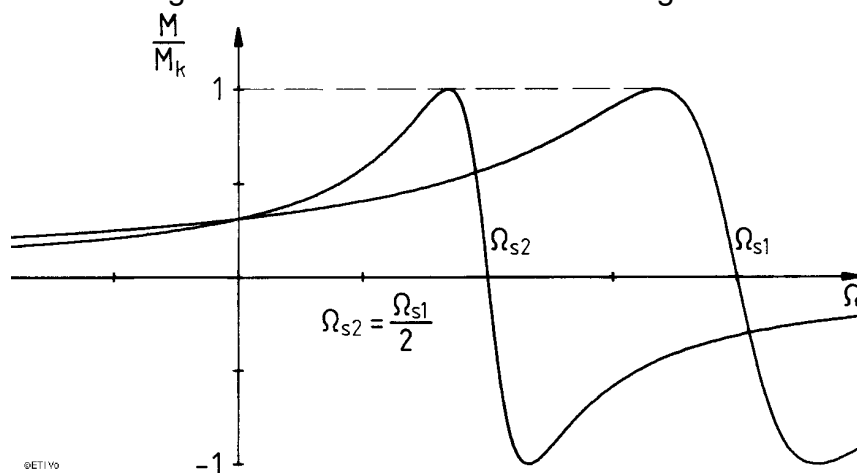


Bild 13.23: Drehmomenten-Drehzahl-Kennlinien bei polumschaltbarer Wicklung bei einer Drehstromasynchronmaschine (Dahlanderschaltung) $p_1 / p_2 = 2$

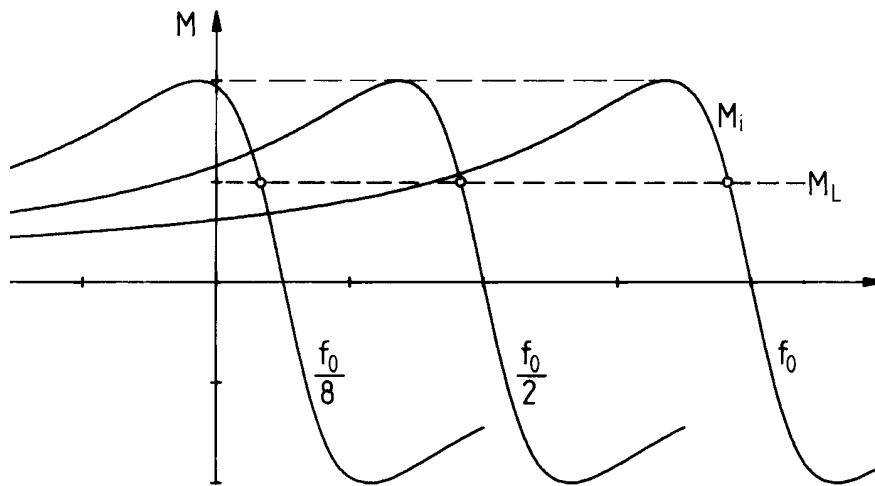


Bild 13.25: Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie der ASM bei Betrieb mit variabler Ständerfrequenz.

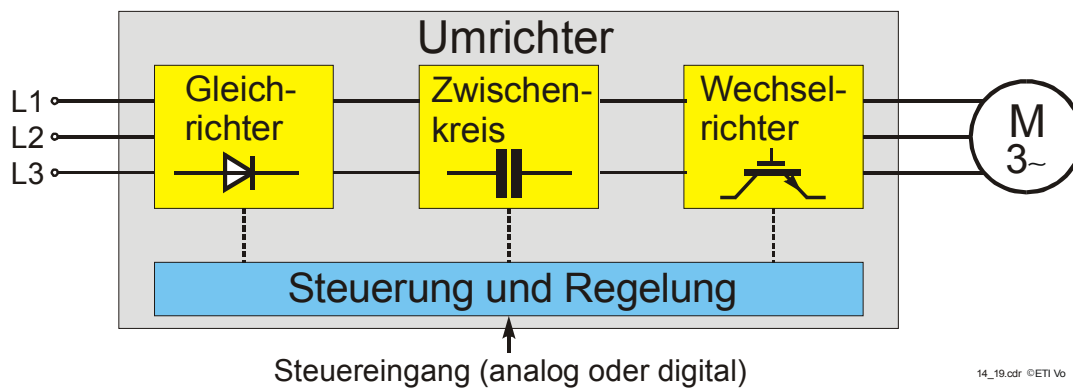


Bild 13.26: Grundprinzip einer stromrichter gespeisten Asynchronmaschine

