Permanentmagnet-Synchronantriebe im Feldschwächbetrieb

Autor(en): **Fräger, Carsten**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin.ch : Fachzeitschrift und Verbandsinformationen von Electrosuisse, VSE = revue spécialisée et informations des associations Electrosuisse, AES**

Band (Jahr): **97 (2006)**

Heft 3

PDF erstellt am: **01.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-857647

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Permanentmagnet-Synchronantriebe im Feldschwächbetrieb

Regelung und Kennlinien, Rückwirkung auf den Wechselrichter

Ein Motor im Feldschwächbetrieb kann mit höheren Drehzahlen betrieben werden, ohne dass das Drehmoment abfällt: zusätzliche 500 $^{1}/_{min}$ bei 40 Nm entsprechen 2 kW, bzw. 20%, die der Motor zusätzlich leistet. Dazu muss der Wechselrichter die Motorspannung durch eine gezielte Stromvorgabe in der Ständerwicklung vermindern.

Beim Betrieb der Permanentmagnet-Synchronantriebe mit Feldschwächung wird durch eine gezielte Stromvorgabe in der Ständerwicklung die Motorspannung abgesenkt, um den Drehzahlbereich zu

Carsten Fräger

erweitern. Der Strom der Ständerwicklung wirkt dem Permanentmagnetfeld entgegen und schwächt damit die induzierende Wirkung des Magnetfeldes.

Permanentmagneterregte Synchronmotoren (PMSM) mit Speisung aus einem Spannungszwischenkreiswechselrichter mit Pulsweitenmodulation werden in grosser Zahl für hochdynamische, geregelte Servoantriebe eingesetzt (Bild 1 und 2). Bei der klassischen Betriebsweise mit einem am Rotorfeld orientierten Statorstrom wird durch die zur Verfügung stehende Spannung des Wechselrichters der Drehzahl- und Drehmomentenbereich begrenzt.

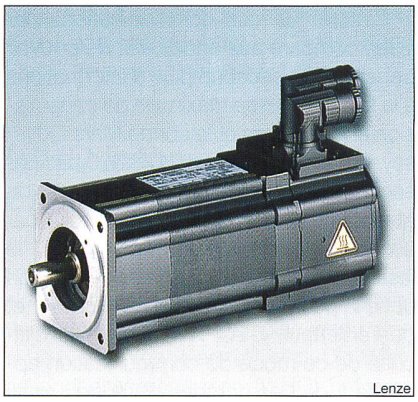

Bild 1 Synchron-Servomotor

Durch Feldschwächbetrieb der PMSM kann die Drehzahl bei gleichem Drehmoment deutlich erhöht werden. Theoretisch wird bei entsprechenden Parametern die Leerlaufdrehzahl nur noch durch die mechanische Festigkeit der Maschine und die Spannungsfestigkeit des Spannungszwischenkreiswechselrichters begrenzt. Durch diese Betriebsweise lassen sich Störungen durch Netzspannungsschwankungen oder den Temperaturgang der Magnete auffangen, so dass die Auslegung der Antriebe dichter an den Betriebsgrenzen erfolgen kann, ohne Rücksicht auf temporäre Störungen.

Vorteile des Feldschwächbetriebs

Der Feldschwächbetrieb der PMSM ergibt einige Vorteile bei der Auslegung eines Antriebs: Bei gleicher Stromrichterleistung kann eine grössere Wellenleistung zur Verfügung gestellt werden. Zudem kann der Antrieb bei einem Einbrechen der Netzspannung oder der Zwischenkreisspannung weiter sein Drehmoment ohne Drehzahleinbruch zur Verfügung stellen, so dass der Betrieb ungestört weitergeht. Die Betriebssicherheit nimmt damit zu. Auch kann die Synchronmaschine mit höheren Impedanzen ausgeführt werden, so dass die Maschine bei voller Betriebstemperatur kurzschlussfest ist und keine irreversible Entmagnetisierung der Permanentmagnete im Kurzschlussfall droht. Der gesamte Antrieb kann für Nennbetriebsbedingungen ausgelegt werden. Der Temperaturgang der Magnete, der speziell bei

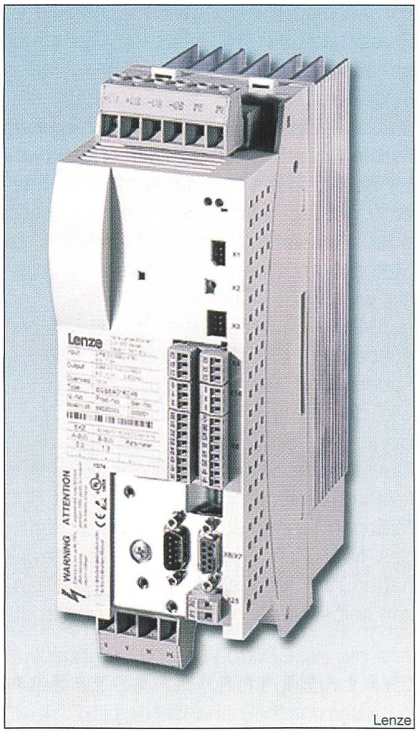

Bild 2 Servoumrichter

kalter Maschine für eine Begrenzung der erreichbaren Drehzahlen sorgt, braucht nicht unbedingt beachtet zu werden, da durch die Feldschwächung diese Drehzahlgrenzen kurzzeitig überschritten werden können.

Ein weiterer Vorteil des Feldschwächbetriebs ist, dass bei der Generierung der Drehzahlsollwerte die aktuelle Netzspannung oder der Einfluss hoher Leistungsaufnahme anderer Verbraucher aus dem Zwischenkreis nicht unbedingt berücksichtigt werden muss, da kurzzeitig diese Einflüsse auf die Drehzahlgrenze durch die Feldschwächung aufgefangen werden. Dadurch lässt sich die Sollwertgenerierung in einer komplexen Regelstruktur vereinfachen. Bei Antrieben mit geringerem Drehmomentbedarf bei hohen Drehzahlen, zum Beispiel bei Wickelantrieben, braucht die Antriebsleistung nicht mehr auf das Produkt aus höchstem Drehmoment und höchster Drehzahl bzw. höchstem Strom und höchster induzierter Spannung ausgelegt werden, sondern die tatsächlich höchste geforderte Leistung

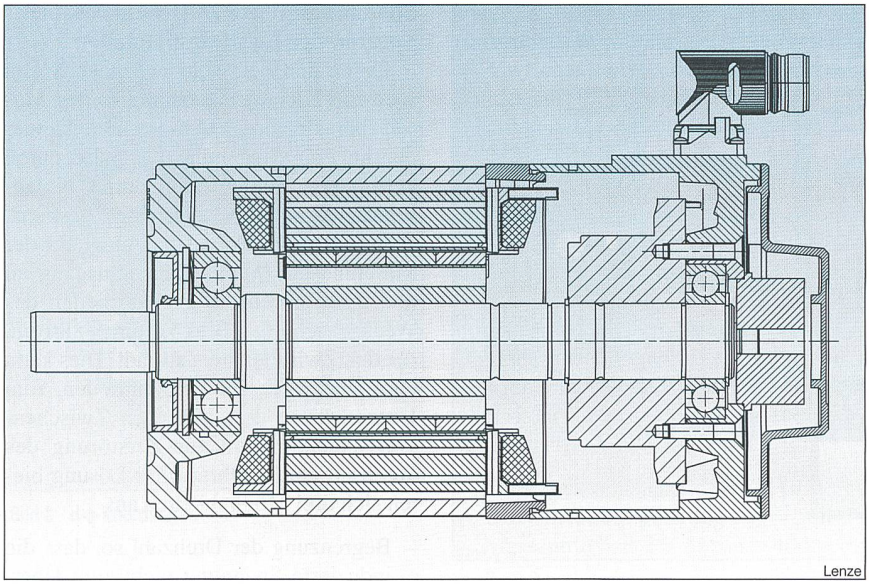

Bild 3 Längsschnitt durch einen Synchron-Servomotor mit Resolver und Bremse

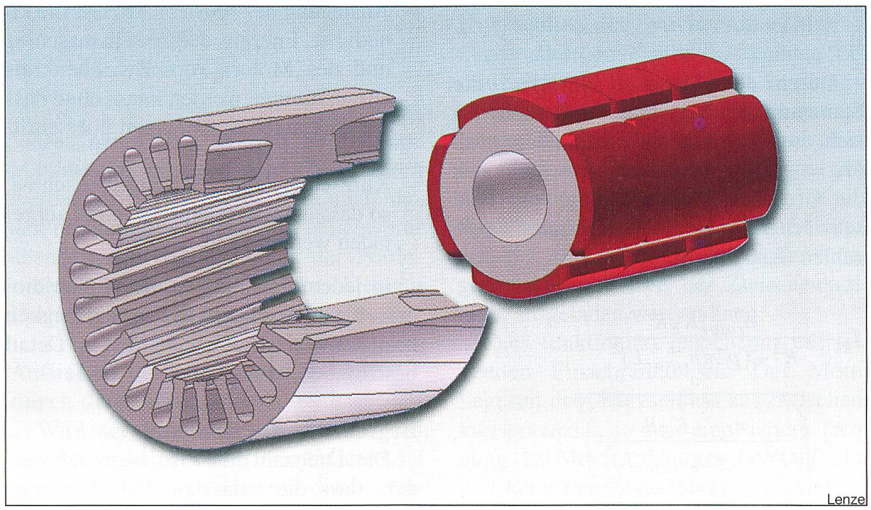

Bild 4 Rotor mit PM-Luftspaltmagneten und Stator geschränkt

bestimmt die zu installierende Antriebsleistung, so dass sich Antriebe deutlich kostengünstiger gestalten lassen.

Betrieb ohne Feldschwächung

Den Aufbau einer PMSM für einen Servoantrieb zeigen Bild 3 und Bild 4. Zur Regelung der Statorströme steht der Rotorwinkel φ_{rotor} durch den eingebauten Winkelgeber zur Verfügung, in der Regel ein Resolver oder optischer Winkelkodierer. Die Speisung erfolgt über einen Wechselrichter entsprechend Bild 5.

Beim normalen Betrieb wird nur ein Strom I_q in Phase mit der Polradspannung über die Pulsweitenmodulation des Wechselrichters eingeprägt, so dass sich mit dem einsträngigen Ersatzschaltbild der PMSM (Bild 6) das Zeigerdbild in Bild 7 ergibt. Dabei werden die d-q-Koordinaten entsprechend Bild 8 verwendet. Die Spannungsgleichung lautet bei reeller Polradspannung U_P und reellem Motorstrom I_q:

$$\underline{U} = U_d + jU_q =$$

$$jU_P + jR \cdot I_q - jX \cdot I_q$$

$$= jK_E \cdot \frac{\omega_{rotor}}{2\pi} + jR \cdot I_q - p \cdot \omega_{rotor} \cdot L \cdot I_q$$

$$\text{mit} \quad K_E = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot p \cdot \Psi_{pm} = \frac{U_p}{n_{rotor}}$$

$$U = \sqrt{\left(\frac{\omega_{rotor}}{2\pi} \cdot K_E + R \cdot I_q\right)^2 + (p\omega_{rotor} L \cdot I_q)^2}$$

Aus der inneren Leistung $U_P \cdot I_q \cdot m$ (m = Strangzahl) ergibt sich das Drehmoment

$$M_M = \frac{U_P \cdot I_q \cdot m}{\omega_{rotor}} = \frac{m}{2\pi} \cdot K_E \cdot I_q$$

Der Wechselrichter begrenzt die zur Verfügung stehende Spannung U, so dass mit zunehmender Drehzahl der in der Maschine maximal mögliche Strom $I_{q\,max}$ durch die Spannung begrenzt wird:

$$I_{q\max} = -\frac{n_{rotor} K_E R}{R^2 + (p \cdot 2\pi n_{rotor} L)^2} + \sqrt{\left(\frac{n_{rotor} K_E R}{R^2 + (p \cdot 2\pi n_{rotor} L)^2}\right)^2 - \frac{(n_{rotor} K_E)^2 - U^2}{R^2 + (p \cdot 2\pi n_{rotor} L)^2}}$$

Entsprechend nimmt auch das erreichbare Drehmoment mit der Drehzahl ab. Das Ergebnis für eine konkrete Maschine zeigt Bild 9. Dieses Bild zeigt die Grenzkennlinie bei konstanter Netzspannung und damit konstanter Zwischenkreisspannung für unterschiedliche Betriebstemperaturen. Bei absinkender Netzspannung verschieben sich die Grenzkurven weiter nach links zu kleineren Drehzahlen.

Die unterschiedlichen Kennlinien entstehen durch die Temperaturabhängigkeit der Remanenzinduktion der Permanentmagneten aus NdFeB[1]. Bei niedrigen Temperaturen sind die Induktion und damit die Spannungskonstante K_E und die Polradspannung U_P höher, so dass der erreichbare Strom I_q und das zughörige Drehmoment M abnehmen.

Für einen zuverlässigen Betrieb muss die ungünstigste Grenzkennlinie für die auftretenden Temperaturen und Spannungen berücksichtigt werden. Dies kann bei schwachen Netzen mit entsprechend kleiner Zwischenkreisspannung zu deutlichen Leistungseinbussen führen.

Feldschwächung über die Ständerwicklung

Im Folgenden wird der Betrieb der PMSM bei Feldschwächung über die Ständerwicklung anhand der Spannungsgleichungen für den stationären Betrieb betrachtet. In [1…3] finden sich Angaben zu den Impedanzverhältnissen und Kennlinien. Die Wirkung der Wirbelströme im Ständer auf die Betriebskennlinie bleibt hier noch unberücksichtigt und wird in einem späteren Abschnitt behandelt.

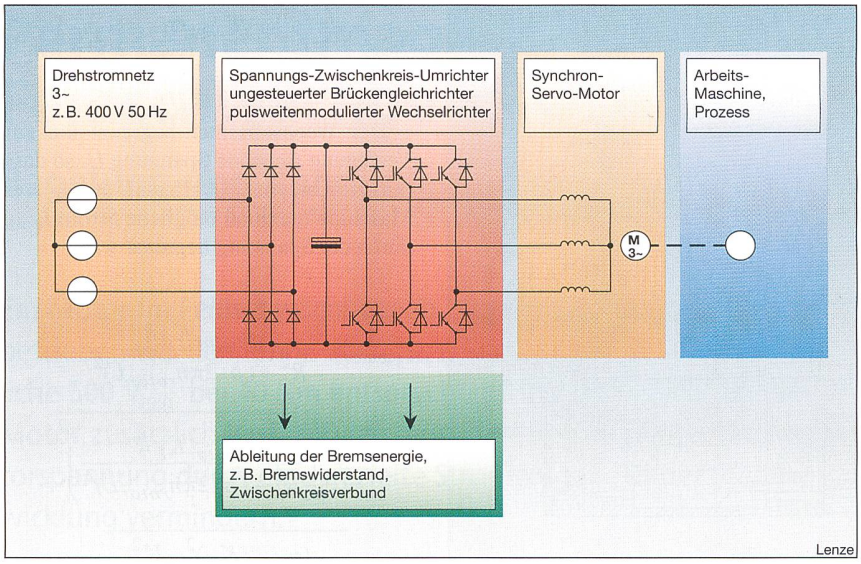

Bild 5 Spannungszwischenkreiswechselrichter mit IGBT

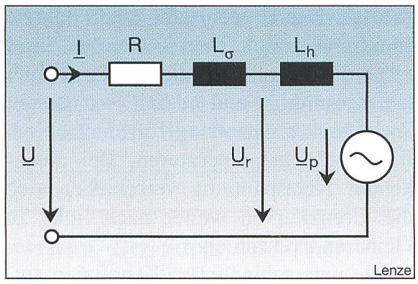

Bild 6 Ersatzschaltbild Permanentmagneterregte Synchronmaschine (PMSM)

Naturgemäss ist bei der permanenterregten Synchronmaschine das Rotorfeld fest durch die Magnete vorgegeben und lässt sich im Betrieb nicht verstellen. Die Beeinflussung des Magnetfeldes geschieht also über den Strom in der Ständerwicklung. Hierzu wird zusätzlich zum Strom I_q in Phase mit der Polradspannung U_P ein voreilender Strom I_d in die Ständerwicklung eingeprägt, der der Polradspannung entgegenwirkt. Das Zeigerbild zeigt Bild 10. Die Spannungsgleichung nimmt dann folgende Form an:

$$\underline{U} = U_d + jU_q =$$

$$jU_P + jX \cdot I_d + jR \cdot I_q + R \cdot I_d - X \cdot I_q$$

$$= jK_E \cdot n_{rotor} + jp \cdot 2\pi n_{rotor} \cdot L \cdot I_d$$

$$+ jR \cdot I_q + R \cdot I_d - p \cdot 2\pi n_{rotor} \cdot L \cdot I_q$$

$$U = \sqrt{(n_{rotor} \cdot K_E + p \cdot 2\pi n_{rotor} \cdot L \cdot I_d + R \cdot I_q)^2 + (R \cdot I_d - p2\pi n_{rotor} L \cdot I_q)^2}$$

Durch den Strom $I_d < 0$ wird die Spannung der Maschine verkleinert. Da sich das Drehmoment unverändert nach $M_M = \frac{m}{2\pi} \cdot K_E \cdot I_q$ berechnet, verschiebt sich die Grenzkennlinie abhängig vom Feld schwächenden Strom I_d zu höheren Drehzahlen ($I_d < 0$):

$$I_q = -\frac{n_{rotor} K_E R}{R^2 + (p2\pi n_{rotor} L)^2} + \sqrt{\left(\frac{n_{rotor} K_E R}{R^2 + (p2\pi n_{rotor} L)^2}\right)^2 - \frac{(n_{rotor} K_E + p \cdot 2\pi n_{rotor} \cdot L \cdot I_d)^2 - U^2}{R^2 + (p2\pi n_{rotor} L)^2}}$$

Die Wirkung zeigt Bild 11: Die linke Kurve zeigt die Grenzkurve ohne Feldschwächung, die rechte Linie die erreichbare Grenze bei einem optimalen Feld schwächenden Strom. Der Drehzahlgewinn durch die Feldschwächung beträgt mehr als 500 $^1/_{min}$ bei Drehmomenten bis 40 Nm. Dies sind 2 kW bzw. 20% zusätzliche Leistung, ohne dass eine grössere Leistungselektronik erforderlich ist.

Grenzen des Feldschwächbereichs

Aus den Spannungsgleichungen ergeben sich bei entsprechenden Parametern beliebig hohe Leerlaufdrehzahlen. Tatsächlich ist der erreichbare Feldschwächbereich aber durch verschiedene Effekte begrenzt:

Spannungsgrenze Zwischenkreis bei Sperren der Leistungshalbleiter

Durch den Feld schwächenden Strom wird die Klemmenspannung U des Motors bei kleinen Drehmomenten kleiner als die Polradspannung U_P. Wird durch auftretende Fehler oder durch Notabschaltung der Wechselrichter gesperrt, steht die volle Polradspannung U_P der Maschine am Wechselrichterausgang an und treibt durch die Freilaufdioden des Wechselrichters (Bild 5) einen Strom, der den Zwischenkreis auflädt. Dies kann zum Überlasten der Freilaufdioden, zum Überschreiten der zulässigen Zwischenkreisspannung und zur Zerstörung des Wechselrichters führen. Zur Lösung bieten sich drei Möglichkeiten an:

- Begrenzung der Drehzahl so, dass die induzierte Spannung nicht zum Überschreiten der Zwischenkreisspannung führen kann
- Auslegung des Antriebs, so dass die kinetische Energie der Arbeitsmaschine und des Motors vom Zwischenkreis aufgenommen werden kann, ohne dass die zulässigen Spannungen überschritten werden
- Kurzschluss der Synchronmaschine, so dass der Zwischenkreis nicht aufgeladen werden kann

In jedem Fall müssen die Freilaufdioden eine ausreichende Stromtragfähigkeit besitzen. Die Lösungen werden im Detail beschrieben.

Begrenzung der Drehzahl

Die Drehzahl muss so begrenzt werden, dass die zulässige Zwischenkreisspannung nicht überschritten wird. Entsprechend wird die zulässige Drehzahl

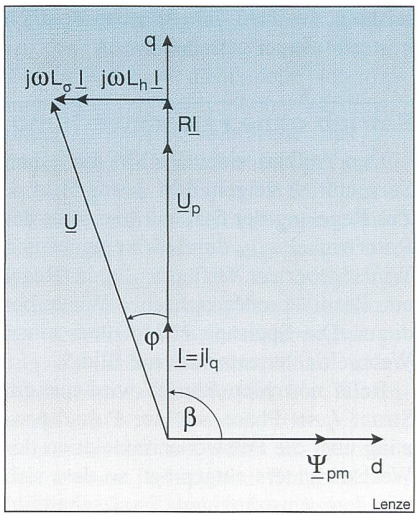

Bild 7 Zeigerdiagramm PMSM ohne Feldschwächung

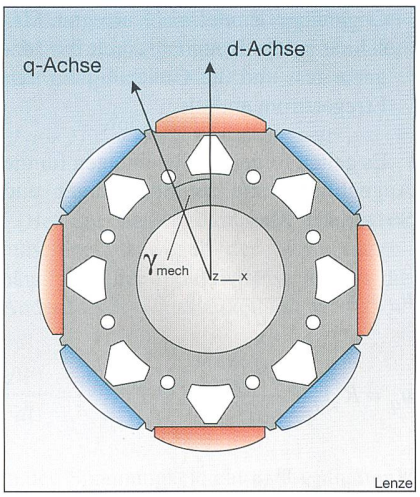

Bild 8 d-q-Koordinaten

n_{zul} durch die maximal zulässige Zwischenkreisspannung $U_{ZK\,max}$ begrenzt:

$$n_{zul} = \frac{U_{ZK\max}}{\sqrt{2}\cdot\sqrt{3}\cdot K_E}$$

Das heisst, der Antrieb besitzt eine Maximaldrehzahl, die nicht überschritten werden darf. Die volle Leistungsfähigkeit des Antriebs kann damit bei entsprechenden Anwendungen mit der Forderung nach hoher Drehzahl bei kleinem Drehmoment nicht ausgenutzt werden.

Aufnahme der kinetischen Energie durch den Zwischenkreis

Wird der Synchronmotor im Fall des Abschaltens nicht durch eine äussere Last angetrieben, kann dieser nur die im Antrieb gespeicherte kinetische Energie in den Zwischenkreis speisen, so dass der Spannungsanstieg begrenzt ist. Dabei findet eine Speisung des Zwischenkreises aus der Synchronmaschine nur so lange statt, wie die induzierte Spannung der Maschine gross genug ist, um über die Freilaufdioden einen Strom in den Zwischenkreis zu treiben. Die zugehörige Drehzahl, unterhalb der keine für den Wechselrichter kritische Rückspeisung erfolgt, ergibt sich wie im vorhergehenden Abschnitt:

$$n_u = \frac{U_{ZK\max}}{\sqrt{2}\cdot\sqrt{3}\cdot K_E}$$

Entsprechend ergibt sich aus der maximalen Betriebsdrehzahl des Antriebs die Energie, die in den Zwischenkreis gespeist werden kann:

$$W = \frac{4\pi^2}{2} J_{Antrieb}\cdot\left(n_{\max}^2 - n_u^2\right)$$

Die Energie muss entweder über einen Spannungsanstieg auf die Spannung U_{ZK}^* im Zwischenkreis in den Zwischenkreiskondensatoren gespeichert werden

$$U_{ZK}^* = \sqrt{\frac{2W}{C} + U_{ZK}^2}$$

oder über den Bremschopper in Wärme verwandelt werden. Dies setzt aber voraus, dass der Bremschopper auch bei Reglersperre arbeitet. Bei einem realen Antrieb mit folgenden Daten steigt auf Grund der kinetischen Energie die Spannung um 100 V auf 660 V an:

- Zwischenkreiskapazität 4700 µF
- Zwischenkreisspannung U_{ZK} = 560 V
- Massenträgheit des Antriebs 40 kgcm²
- n_u = 3700 $^1/_{min}$
- n_{max} = 5200 $^1/_{min}$

Kurzschluss der Synchronmaschine

Als Alternative gibt es folgende Lösung: Statt bei Störungen alle Leistungshalbleiter des Wechselrichters zu sperren, werden die drei Halbleiter auf einer Seite des Zwischenkreises gezündet und die drei anderen gesperrt. Damit wird die Synchronmaschine über drei Schalter und die zugehörigen Freilaufdioden kurzgeschlossen, so dass der Zwischenkreis nicht aufgeladen werden kann.

Dies funktioniert jedoch nur mit folgenden Einschränkungen: Der Motor liegt mit dem Kurzschluss auf Zwischenkreispotenzial, so dass eine sichere Trennung des Motors nicht gegeben ist. Folglich kann der Kurzschluss nur temporär eingesetzt werden, um eine Personengefährdung nach Stillsetzen des Antriebs zu vermeiden. Zudem müssen der Motor und die Leistungshalbleiter so aufeinander abgestimmt sein, dass der Kurzschlussstrom nicht zur Zerstörung der Freilaufdioden oder der Schalter führt. Ausserdem ist der Kurzschluss der Synchronmaschine nicht anwendbar, wenn die Betriebsstörung durch einen Körperschluss auf der Leitung zwischen Wechselrichter und Motor ausgelöst wurde.

Entmagnetisierung: Maximalstrom abhängig von Feldschwächung

Durch den Stromfluss I_q in der Ständerwicklung werden die Magnete des Rotors lastabhängig abmagnetisiert. Um Schäden am Motor zu vermeiden, muss dies im reversiblen Bereich passieren, so dass der Maximalstrom I_{max} der Maschine durch den zulässigen Betriebsbereich der Magnete vorgegeben ist. Die Stellen höchster Entmagnetisierung liegen an den Polkanten (Bild 4).

Fliesst zusätzlich zum Drehmoment bildenden Strom I_q ein Feld schwächender Strom $I_q < 0$, tritt eine zusätzliche Entmagnetisierung auf. Näherungsweise dürfen beide zusammen den Maximalstrom der Maschine nicht überschreiten:

$$I = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \overset{!}{\le} I_{\max}$$

Betriebskennlinien eines Antriebes

Die Wirkung der Feldschwächung wird an einem realen Antrieb untersucht. Bild 12 zeigt die Drehzahl-Drehmoment-Grenzkurve des Antriebs bei 10% Netzunterspannung und bei voller Spannung.

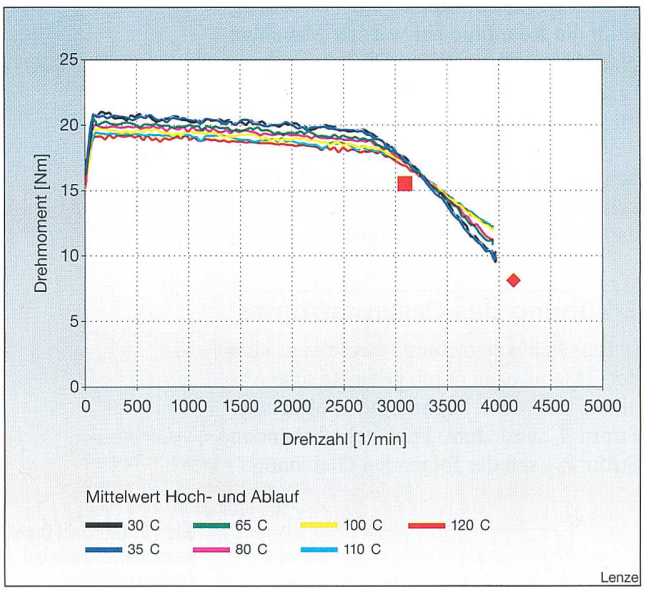

Bild 9 Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie PMSM unter Beachtung der Spannungsgrenzen und des Temperaturganges

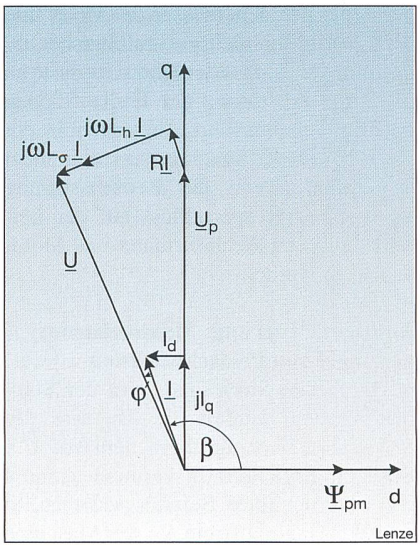

Bild 10 Zeigerdiagramm PMSM mit Feldschwächung durch Strom

Durch Betrieb mit einem zusätzlichen Feld schwächenden Strom wird die Drehzahlgrenze nach rechts verschoben. Beim Vergleich der Kurven bei voller Netzspannung von 400 V und bei 10% Netzunterspannung (360 V) zeigt sich Folgendes: Durch den Feldschwächbetrieb lässt sich ein erheblicher Teil des Betriebsbereichs bei vollem Netz abdecken, der ohne die Feldschwächung nicht erreichbar wäre.

Dies führt dazu, dass Netzspannungsschwankungen nicht in vollem Masse bei der Antriebsauslegung beachtet werden müssen, da die betroffen Betriebspunkte durch den zusätzlichen Feldschwächstrom erreicht werden. Da die Netzspannungsschwankungen in der Regel nur kurzzeitig sind, ist die zusätzliche Erwärmung des Motors normalerweise zu tolerieren.

Des Weiteren wirkt die Grenzkurve bei kalter Maschine nicht mehr begrenzend für die Drehzahl: durch Feldschwächung kann die Kennlinie bei warmer Maschine erreicht werden. Die höheren Verluste führen zwar zu einer schnelleren Erwärmung der Maschine, die Endtemperatur wird jedoch nicht beeinflusst, da mit zunehmender Temperatur die Notwendigkeit des Feldschwächbetriebes und der damit verbundene Strom entfallen.

Erhöhung des Gesamtstromes

Bei Feldschwächung berechnet sich der Gesamtstrom durch geometrische Addition aus dem Drehmoment bildenden Strom I_q und dem Feld schwächenden Strom I_d nach der folgenden Gleichung:

$$I = \sqrt{I_q^2 + I_d^2}$$

Die Erhöhung des Gesamtstromes durch die Feldschwächung gegenüber dem Betrieb ohne Feldschwächung zeigt Bild 13 für Feldströme von 1,5/2,5/5 und 8 A. Diese Erhöhung des Gesamtstromes macht sich natürlich in einer Erhöhung der Belastung der Zuleitung und der Leistungshalbleiter bemerkbar. Jedoch ist insbesondere bei nur gelegentlichem Einsatz der Feldschwächung bei Erreichen der Spannungsgrenze der thermisch wirksame Strom nur wenige Prozent erhöht.

Regelung

Die Regelung erfolgt zweckmässig in d-q-Komponenten. Alle Grössen werden im rotorfesten Koordinatensystem beschrieben (Bild 8). Dadurch werden für den stationären Betrieb die transformierten Ströme und Spannungen des Stators zu Gleichgrössen. Die Spannungsgleichungen der Maschine erhält man durch Anwendung der Park-Transformation [5].

Gleichungen der Synchronmaschine und der Mechanik

Die Spannungsgleichungen werden entsprechend der Park-Transformation [5] in d-q-Koordinaten angegeben. Das rotorfeste Koordinatensystem zeigt Bild 8. Für die Permanentmagnet erregte Synchronmaschine ergeben sich gegenüber der elektrisch erregten Maschine mit Dämpferkäfig folgende Vereinfachungen:

- Gegenüber der Synchronmaschine mit Dämpferwicklung entfallen bei Vernachlässigung der Wirbelströme im Rotor die Gleichungen für den Dämpferkäfig in d-Achse bzw. q-Achse.
- Gegenüber der elektrisch erregten Maschine ist die Erregung durch die Magnete fest und die Gleichung für den Erregerstrom entfällt.

Es gelten folgende Gleichungen für die Augenblickswerte der Spannungen und Ströme der Maschine:

$$u_d = R \cdot i_d + \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega_s \Psi_q$$

$$u_q = R \cdot i_q + \frac{d\Psi_q}{dt} + \omega_s \Psi_d$$

$$\Psi_d = L_d \cdot i_d + \Psi_{PM}$$
$$\Psi_q = L_q \cdot i_q$$
$$\omega_s = p \cdot \omega_{rotor}$$

Das Luftspaltdrehmoment für die dreisträngige Maschine ($m = 3$) erhält man zu

$$m_M = -\tfrac{3}{2} p (L_q \cdot i_d \cdot i_q - L_d \cdot i_d \cdot i_q - i_q \cdot \Psi_{PM})$$

Bei Maschinen mit Luftspaltmagneten sind in der Regel die Induktivitäten in d- und q-Achse nahezu gleich ($L_d = L_q$), so dass sich das Drehmoment nach folgender Beziehung ergibt:

$$m_M = \tfrac{3}{2} p \cdot i_q \cdot \Psi_{PM} = \frac{m}{\sqrt{2}\pi} \cdot K_E \cdot i_q = \frac{3}{\sqrt{2}\pi} \cdot K_E \cdot i_q$$

$$\text{mit } K_E = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot p \cdot \Psi_{pm}$$

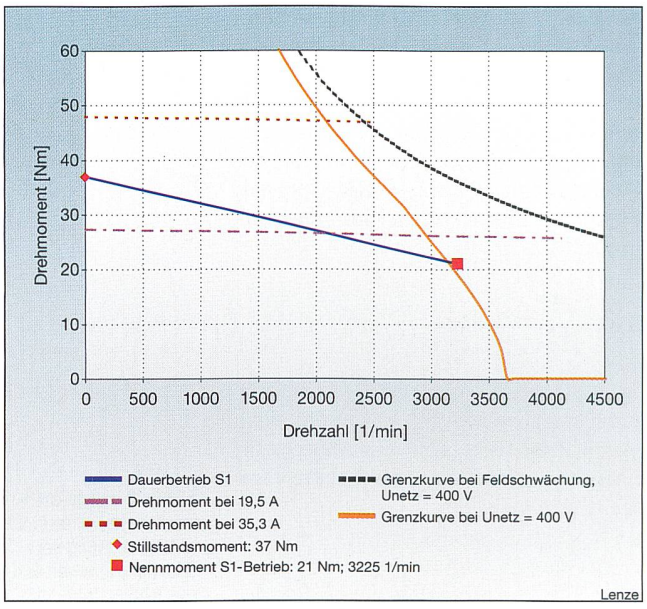

Bild 11 Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie bei Feldschwächung

Ohne eine elastische Kupplung zwischen Motor und Last gilt folgende Gleichung für die Mechanik:

$$(J_M + J_L)\frac{d\omega_{rotor}}{dt} + m_M - m_L = 0$$

Bei der Beschreibung der Synchronmaschine ist wegen der Sättigungsabhängigkeit der Induktivitäten jeweils die Änderung der Flussverkettung

$$\frac{d\Psi}{dt} = \frac{d(L \cdot i)}{dt}$$

in den Spannungsgleichungen enthalten.

Berücksichtigung der Wirbelströme

Bei schnellen Änderungen der Statorströme machen sich die Wirbelströme im Eisen bemerkbar. Sie bedämpfen die Wirkung der Statorstromänderungen, so dass der Motor mit entsprechenden Zeitkonstanten auf die Statorstromänderungen reagiert. Dies lässt sich in den Spannungsgleichungen dadurch berücksichtigen, dass zu einem Teil der Induktivität ein Parallelwiderstand angenommen wird.

Für die Beschreibung der Synchronmaschine sind dann zusätzlich zu den Statorströmen i_d und i_q Ströme i_{dw} und i_{qw} zur Berücksichtigung der Wirbelströme erforderlich. Die Wirbelströme werden durch die Statorströme i_d und i_q induziert. Die Wirbelströme treten in der Gleichung für das Drehmoment m_M auf. Sie bewirken einen verzögerten Anstieg des Drehmomentes bei Stromänderungen und führen zu einem Drehmomentabfall bei zunehmender Drehzahl[2)].

Gleichungen des Stromreglers und Wechselrichters

Die Leistungsstufe des Wechselrichters stellt eine 3-phasige Spannung zur Verfügung, die aus den Komponenten u_d und u_q in d- und q-Achse gebildet wird. Zusammen mit dem Stromregler kann der Wechselrichter als Stromquelle mit P_{T1}-Verhalten beschrieben werden

$$i_d = \frac{1}{1+sT} i_{dsoll}$$

$$i_q = \frac{1}{1+sT} i_{qsoll}$$

Dabei wird die Rückwirkung der Motorspannung auf den Stromregler im Wechselrichter vernachlässigt und der Wechselrichter als kontinuierlich arbeitendes System angenähert.

Strecke aus Wechselrichter, Maschine und Mechanik

Wird der Strom in den Motor durch den Wechselrichter eingeprägt, werden für das Bewegungsverhalten nur die Gleichungen für die Drehmomente benötigt. Zur Darstellung mit der Laplace-Transformation zur Beschreibung des Regelungsverhaltens werden folgende Vereinfachungen getroffen:

- gleiche Induktivitäten und Widerstände in d- und q-Achse $L_d = L_q = L$
- näherungsweise Berücksichtigung der Sättigung durch eine im jeweiligen Betriebspunkt konstante Induktivität
- in den Spannungsgleichungen wird die Ständerfrequenz im jeweiligen Betriebspunkt als konstant betrachtet
- Vernachlässigung der Drehmomentwirkung der Wirbelströme

$$m_M = \frac{m}{\sqrt{2}\pi} \cdot K_E \cdot i_q$$

$$(J_M + J_L) \cdot s \cdot \omega_{rotor} = m_M - m_L$$

Aus den vorangegangenen Gleichungen lässt sich das Drehmoment m_M in Abhängigkeit von den Stromsollwerten i_{qsoll} errechnen:

$$m_M = \frac{m}{\sqrt{2}\pi} \cdot K_E \cdot \frac{1}{1+sT} \cdot i_{qsoll}$$

Hier hat der Feldschwächstrom keinen Einfluss auf das Drehmoment. Werden die Wirbelströme berücksichtigt hat der Feldschwächstrom i_d bzw. i_{dsoll} eine Wirkung auf das Drehmoment und führt zu einem drehzahlabhängigen Einfluss. Dies ist in den Gleichungen im Anhang im Internet[2)] im Detail berücksichtigt.

Feldschwächregler

Der Regler für die Feldschwächung muss vor Erreichen der Spannungsgrenze des Wechselrichters den Feld schwächenden Strom einprägen. Dabei muss die Einprägung des Stromes im Stator so erfolgen, dass sich keine Änderung des Drehmomentes ergibt. Eine Drehmomentänderung kann dabei durch die Kopplung von d- und q-Achse durch die Wirbelströme auftreten. Eine Kopplung zwischen den beiden Komponenten tritt ebenfalls durch die Rückwirkung der Motorspannung auf den Stromregelkreis auf.

Zur Vermeidung der ungewollten Drehmomentänderung durch die Kopplung zwischen d- und q-Achse sollen die beiden Stromkomponenten so eingeprägt werden, dass die Einflüsse der gegenseitigen Kopplung eliminiert werden. Das Auflösen der Drehmomentgleichung zur Berücksichtigung der Wirbelströme im Anhang nach i_{qsoll} ergibt den zusätzlichen Strom i^*_{qsoll} zur Kompensation des Einflusses des Feld schwächenden Stromes i_d bzw. i_{dsoll}. Näherungsweise lässt er sich durch folgende Gleichung beschreiben:

$$i^*_{qsoll} = \psi_{pm} \cdot F_1(s) + F_2(s) \cdot i_{dsoll}$$

Durch diese Vorsteuerung wird der Einfluss der Feldschwächung auf das Drehmoment reduziert.

Regelungstechnische Probleme beim Erreichen der Spannungs- und Stromgrenze

Wenn der Betriebspunkt des Antriebs gegen die Drehzahl-Drehmoment-Grenz-

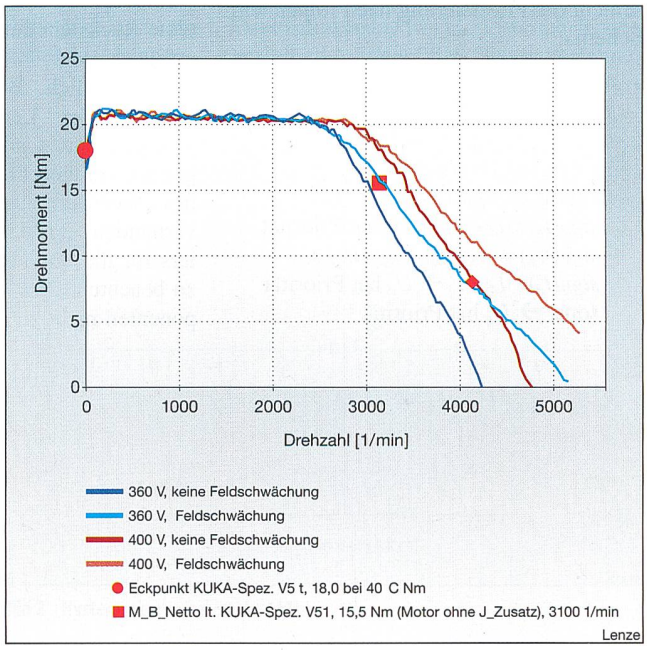

Bild 12 Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie PMSM bei Netzspannung 400 V und 360 V

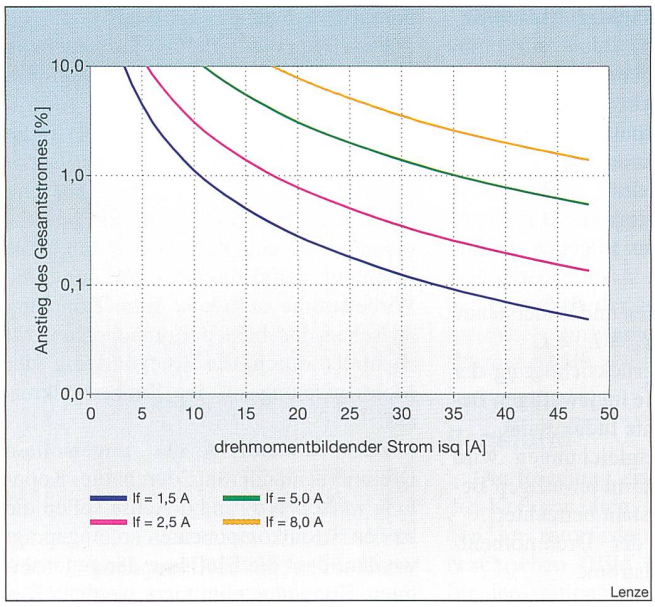

Bild 13 Anstieg des Gesamtstromes durch Feldschwächung

kurve wandert, greifen die Grenzen des Wechselrichters:

- Die Spannung $U = \sqrt{U_d^2 + U_q^2}$ ist durch die aktuelle Zwischenkreisspannung begrenzt
- Der Strom I_{max} ist durch den zulässigen Strom des Wechselrichters und den zulässigen Strom des Motors begrenzt

Wird als Erstes die Spannungsgrenze erreicht, wird der Strom I_d erhöht. Damit steigt auch der Gesamtstrom $I = \sqrt{I_d^2 + I_q^2}$, so dass schnell die Stromgrenze I_{max} erreicht werden kann. Um hier einen vernünftigen Betrieb zu erreichen, ist abhängig vom Betriebszustand einem der Ströme I_d oder I_q Vorrang in der Regelung zu geben. Entsprechend [4] geschieht die Priorisierung nach folgendem Schema:

- motorisch → U_d hat Priorität
- generatorisch
  - $sign(U_d) \neq sign(I_d) \wedge sign(U_q) = sign(Iq)$ → U_d hat Priorität
  - $sign(U_d) = sign(I_d) \wedge sign(U_q) = sign(I_q) \wedge |I_d| < |I_q$ → U_d hat Priorität
  - $sign(U_d) \neq sign(I_d) \wedge sign(U_q) \neq sign(I_q) \wedge |I_d| < |I_q$ → U_d hat Priorität
  - sonst → U_q hat Priorität

Der Strom I_d muss auf einen Maximalwert begrenzt werden, so dass die Spannung an der Maschine nicht mit zunehmendem Strom I_d ansteigt. Damit ergibt sich der grösste zulässige Strom zu

$$I_{dzul} = \frac{U_P}{p \cdot \omega_{rotor} \cdot L} = \frac{K_E}{p \cdot L}$$

Zusammenfassung

Der Feldschwächbetrieb der PMSM durch Feldschwächung über die Statorströme stellt eine attraktive Möglichkeit dar, Antriebe unempfindlich gegenüber Netzspannungsschwankungen oder den Temperaturgang der Magnete zu machen. Damit kann die Antriebsauslegung dichter an den Nennbetriebsbedingungen ohne Rücksicht auf temporäre Störungen erfolgen.

Hinsichtlich Betriebsstörungen mit Sperren der Leistungshalbleiter des Wechselrichters sind einige Randbedingungen zu beachten, um einen Ausfall des Wechselrichterzwischenkreises zu vermeiden. Bei der Auslegung des Reglers für die Vorgabe der Statorströme ist zu beachten, dass die beiden Stromkomponenten nicht zu einer zusätzlichen Beeinflussung des Drehmomentes führen und dass sich die Stromkomponenten auf jeweils optimale Werte einstellen.

Referenzen

[1] Binder, K. Greubel, B. Piepenbreier, H.J. Tölle: Permanent-Magnet Synchronous Drive with Wide Field-Weakening Range. ETEP Vol. 8, Nr. 3 (1998), S. 157—165

[2] F. Aschenbrenner: Die permanent erregte Synchronmaschine als Traktionsmotor. E&I 107 H. 1 (1990) S. 22—27

[3] W. Leitgeb: Eine Möglichkeit der Feldschwächung dauermagneterregter Maschinen und ihre Auswirkung auf die Bemessungsleistung des Stromrichters. Archiv für Elektrotechnik 76 (1993) S. 293—299

[4] M. Riese: Forschungsbericht zum Seminar Antriebsmanagement. TU Dresden (1997)

[5] Hütte: Elektrische Energietechnik Bd. 1 Kap. 2.2

Angaben zum Autor

Dr.-Ing. Carsten Fräger ist Leiter Product Management Servotechnik bei Lenze Drive Systems. Er studierte an der Universität Hannover Elektrotechnik. Seit 1989 ist er bei Lenze tätig, Stationen waren die Applikation Servoantriebe, die Motorenentwicklung und die strategische Entwicklung Elektromechanik. 1994 promovierte er an der Universität Hannover zum Thema Kaskadenmaschine für Antriebe mit geringem Stromrichteraufwand. An der FVA ist er in Arbeitskreisen Lineartechnik und Direktantriebe tätig.
Lenze Drive Systems GmbH, D-31855 Aerzen, fraeger@lenze.de

[1] Neodym-Eisen-Bor

[2] Unter www.electrosuisse.ch/v, Rubrik Bulletin SEV/VSE -> Archiv -> Fachartikel kann der Artikel inklusive Anhang heruntergeladen werden. Im Anhang sind zusätzliche Berechnungen zu den Wirbelströmen, zum Stromregler/Wechselrichter sowie zur Strecke aus Wechselrichter, Maschine und Mechanik.

Résumé

Entraînements synchrones à aimant permanent en réglage shunt

Réglage et courbes caractéristiques, répercussions sur le convertisseur. Un moteur à réglage shunt peut tourner à plus haut régime sans chute de couple: 500 $^1/_{min}$ de plus à 40 Nm correspondent à 2 kW, soit 20% de plus de rendement moteur. Pour cela, l'entraînement doit réduire la tension moteur par un réglage ciblé de la consigne de courant dans l'enroulement du stator.