Systematik regelbarer Antriebe mit Induktionsmaschinen

Autor(en): **Zwicky, R.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **70 (1979)**

Heft 11

PDF erstellt am: **24.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-905389

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

Systematik regelbarer Antriebe mit Induktionsmaschinen [1])

Von R. Zwicky

621.313.333:62–54;

Die Leistungselektronik bietet für Induktionsmaschinen mit Schleifring- oder Kurzschlussläufer Lösungen an, mit denen sich klassische und neue Methoden der Drehzahlvariation elegant realisieren lassen. Es werden sämtliche möglichen Verfahren mit Schwerpunkt auf Maschinen mit Schleifringläufer systematisch dargestellt und bezüglich ihrer Betriebseigenschaften verglichen. Insbesondere werden die bisher noch nicht genützten Bereiche des gegensynchronen und des stark übersynchronen Motors als neue Betriebsart vorgeschlagen.

L'électronique de puissance permet de réaliser élégamment des variations de vitesse selon des méthodes classiques et nouvelles au moyen de machines à induction à induit à bagues ou à cage. Tous les procédés possibles sont représentés systématiquement, en insistant sur des machines à induit à bagues et en comparant leurs performances. Sont notamment proposés les domaines, non utilisés jusqu'ici du moteur anti-synchrone et du moteur fortement super-synchrone, comme nouveaux modes de service.

1. Einleitung

Induktionsmotoren, oft auch als Asynchronmotoren bezeichnet, sind wegen ihres einfachen Aufbaus mechanisch robust und elektrisch problemlos. Ihre vorteilhaften Eigenschaften haben ihnen für alle Antriebe, bei denen lediglich eine ungefähr konstante Betriebsdrehzahl erforderlich ist, zu ihrer vorrangigen Stellung verholfen.

Regelbare Antriebe mittels Asynchronmotoren erfordern zusätzliche Einrichtungen, welche nach zwei Grundprinzipien angeordnet werden können:

a) Variation von Frequenz und Spannung im Stator. Da beim natürlichen Betrieb mit kleinem Schlupf die Drehzahl in erster Näherung proportional der Statorfrequenz ist, kann die Drehzahl innerhalb beliebiger Grenzen verstellt werden. Weil damit auch die Anlaufprobleme entfallen, wird als Rotor grundsätzlich der Kurzschlussläufer verwendet. Derartige Antriebe, versehen mit einwandfreien Regelkreisen, erfüllen sämtliche Wünsche bezüglich Robustheit, Anpassungsfähigkeit und Regelbarkeit elektrischer Antriebe.

Der Nachteil dieser technisch idealen Lösung besteht in den verhältnismässig grossen Kosten. Die gesamte Leistung ist auf variable Frequenz umzuformen. Wegen der fehlenden Möglichkeit der Blindleistungsrücklieferung durch Induktionsmotoren können nicht die preiswerten, maschinenkommutierten Stromrichter wie beim Stromrichter-Synchronmotor verwendet werden. Es stehen lediglich die aufwendigen Systeme der zwangskommutierten Umrichter (bei nur bescheidenem Frequenzbereich auch Direktumrichter) zur Wahl.

b) Statorspeisung des Induktionsmotors mit konstanter Netzfrequenz und vorzugsweise konstanter Spannung; die Eingriffe zur Drehzahlvariation erfolgen im Rotor. Dies setzt allerdings den Schleifringrotor voraus. Dieser kleine Nachteil muss gegenüber dem mechanisch idealen Kurzschlussrotor der Gruppe a) in Kauf genommen werden. Es ergeben sich damit verschiedene Möglichkeiten, die bei bestimmten Betriebsbedingungen wesentlich weniger Aufwand erfordern als die Statorfrequenz-Variation.

Nebst der verlustbehafteten Methode mit Rotorzusatzwiderstand hat bereits die klassische Technik der elektrischen Maschinen zu verlustfreien Kaskaden geführt (untersynchrone und unter/übersynchrone Kaskade). Diese Konzepte werden auch heute verwendet, wobei die Hintermaschinen durch moderne Schaltungen der Leistungselektronik verdrängt wurden.

Im vorliegenden Beitrag sollen alle Betriebsbereiche des drehzahlregelbaren Induktionsmotors systematisch untersucht werden. Die wohlbekannten Verfahren lassen sich zwanglos einordnen. Darüber hinaus zeigt die Analyse Betriebsbereiche, in welchen wirtschaftlich interessante Varianten liegen, die bis heute noch nicht genutzt werden.

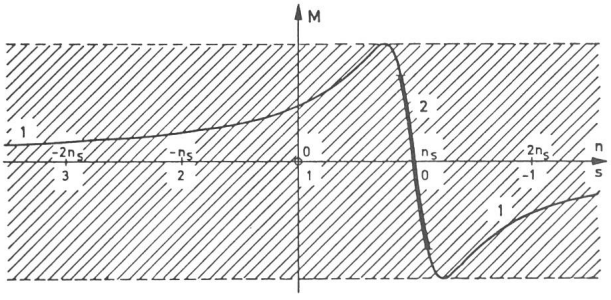

Fig. 1 Drehmoment-Drehzahlkennlinie des netzgespeisten Induktionsmotors

Betriebsbereiche:
$s > 1$ Gegenstrombremse
$0 < s < 1$ Asynchroner Motorbetrieb
$s < 0$ Asynchroner Generatorbetrieb

Normaler Betriebsbereich: Ausgezogener Kennlinienteil (2). Bei Speisung mit variabler Statorfrequenz kann die Kennlinie $M = f(n)$ im schraffierten Bereich beliebig waagrecht verschoben werden. Der mit n_s bzw. s skalierte Maßstab ist in diesem Fall durch einen absoluten n-Maßstab zu ersetzen

2. Der Induktionsmotor mit passivem Rotorkreis

Die bekannte Drehmoment-Drehzahlkennlinie des Induktionsmotors, der mit konstanter Netzspannung und Netzfrequenz gespeist wird und dessen Läuferwicklung in sich kurzgeschlossen ist, entspricht in Fig. 1 der Kennlinie 1. Man unterscheidet die Betriebsbereiche als Asynchronmotor (der Schlupf s bzw. die Drehzahl n liegen im untersynchronen Betrieb mit $0 < s < 1$), als Asynchrongenerator im übersynchronen Betrieb ($s > 0$) und als Gegenstrombremse ($s > 1$), bei welcher der Rotor gegen das Statordrehfeld dreht.

Bekanntlich darf beim Asynchronmotor die Funktion von Stator- und Rotorwicklung vertauscht werden, ohne dass sich an seinem Prinzip etwas ändert. In diesem Aufsatz wird der Klarheit wegen grundsätzlich die Statorwicklung als netzfrequent betriebene Wicklung angenommen, obschon bei gewissen Betriebsarten die Verwendung der Rotorwicklung als netzfrequenter Teil vorteilhafter ist.

Der normale Betrieb des ungeregelten Induktionsmotors mit fester Statorfrequenz und Statorspannung entspricht dem nahezu linearen Teil 2 der Kennlinie 1 in unmittelbarer Nachbarschaft der synchronen Drehzahl. Die Maschine bleibt, mit Ausnahme des Anlaufes, immer innerhalb der Drehzahlen, die dem positiven und negativen Kippmoment entsprechen. Der Betriebsbereich liegt innerhalb eines maximalen Schlupfes von plus/minus wenigen Prozenten.

[1]) Der Aufsatz entspricht dem Vortrag anlässlich der SEV/SGA-Tagung «Geregelte Drehstromantriebe» vom 15. März 1979.

Speist man den Stator mit veränderbarer Frequenz, so lassen sich die synchrone Drehzahl und der Betriebsbereich mit kleinem Schlupf auf beliebige positive oder negative Werte (mit Umkehr der Phasenfolge) einstellen. Der Kennlinienteil 2 in Fig. 1 lässt sich so innerhalb des schraffierten Bereiches in horizontaler Richtung parallel verschieben, und man gelangt zu einem freizügigen Vierquadrantenbetrieb mit beliebigem Vorzeichen von Drehzahl und Drehmoment. Sorgt man dafür, dass der magnetische Fluss des Motors konstant bleibt (in erster Näherung mit frequenzproportionaler Statorspannung), so bleibt auch das volle Kippmoment bei jeder Drehzahl verfügbar, sofern der Frequenzwandler den entsprechenden Strom liefert.

Eine grundsätzlich andere Regelungsmöglichkeit bietet ein Eingriff im Rotorkreis. Der Stator wird aus dem Netz mit konstanter Spannung und Frequenz gespeist. Erhöht man den Wicklungswiderstand R_2 des Rotors um einen an den Schleifringen angeschlossenen Zusatzwiderstand R_z, so verändert sich für zunehmende diskrete Werte von R_z die Kennlinie gemäss Fig. 2 von Kurve 1 zu 2 oder 3. Variiert man R_z stetig, so können sämtliche Betriebspunkte innerhalb der schraffierten Flächen von Fig. 2 erreicht werden.

Diese Methode führt naturgemäss zu Verlusten. Betrachtet man zur Vereinfachung eine ideale, verlustfreie Maschine, bei welcher nur der Widerstand im äusseren Rotorkreis berücksichtigt wird, so ergibt sich für eine zugeführte Statorleistung P_1 eine an der Welle abgegebene Leistung

$$P_{mech} = (1 - s)\, P_1$$

Aus dem Rotor wird gleichzeitig die elektrische Leistung

$$P_2 = s \cdot P_1$$

abgeführt. Antriebe mit Vernichtung von P_2 in einem ohmschen Widerstand sind vom energetischen Standpunkt aus a priori ungünstig. Sie finden lediglich Anwendung bei kleiner Benützungsdauer, wo der Energieverlust wenig ins Gewicht fällt. Für einen stetigen Stelleingriff zur Regelung eignet sich entweder ein elektronisch getasteter Rotorwiderstand oder ein

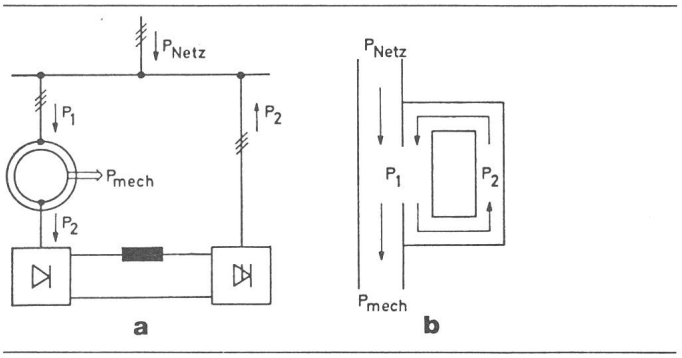

Fig. 3 Untersynchrone Kaskade

a Schaltbild
Links: Induktionsmotor und Gleichrichter im Rotorkreis
Rechts: Netzgeführter Wechselrichter

b Leistungsbilanz. Die Grössenverhältnisse entsprechen $s = 0{,}4$

Drehstromsteller zur Variation der Statorspannung bei konstantem Rotor-Zusatzwiderstand.

Die Verwertung der vom Rotor abgegebenen Leistung kann durch Gleichrichtung der Rotorleistung und anschliessende Rückgabe über einen Wechselrichter an das Netz erfolgen. Man gelangt so zur untersynchronen Kaskade nach Fig. 3a mit der Leistungsbilanz gemäss Fig. 3b. Die Rotorleistung wird nicht vernichtet, sondern über das Netz im Kreislauf wieder verwertet. Im Prinzip ist diese Betriebsart im gesamten schraffierten Bereich von Fig. 2 möglich. Bei grossem Schlupf im untersynchronen Motorbereich B wird das Verhältnis zwischen maximaler mechanischer Leistung und maximaler Kreislaufleistung jedoch sehr ungünstig. Weiterhin wird bei Auslegung des Rückgewinnungswechselrichters für grossen Schlupf auch dessen Steuerblindleistung, die aus dem Netz bezogen wird, insbesondere bei maximaler Drehzahl, gross. Aus diesen Gründen werden untersynchrone Kaskaden nur für Schlupfbereiche von 10 % bis höchstens etwa 40 % ausgelegt.

Die untersynchrone Kaskade ist grundsätzlich auch für Betrieb im übersynchronen Generatorbereich F geeignet (Fig. 2), doch ist diese Betriebsart zusammen mit dem untersynchronen Motorbetrieb anwendungsmässig uninteressant.

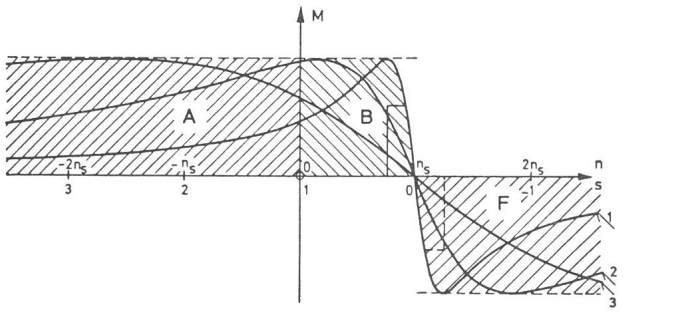

Fig. 2 Drehmoment-Drehzahlkennlinien des netzgespeisten Induktionsmotors

1 mit kurzgeschlossenem Rotor
2, 3 mit Zusatzwiderstand im Rotorkreis

Schraffierte Flächen: Möglicher Betriebsbereich mit stetig veränderbarem Zusatzwiderstand oder verlustfreier Verwertung der Rotorleistung

A Gegenstrombremse
B Untersynchroner Motor
F Übersynchroner Generator

Ausgezogener Bereich links von n_s: Übliche untersynchrone Kaskade

Gestrichelter Bereich rechts von n_s: Möglicher, aber nicht verwendeter Bereich der untersynchronen Kaskade

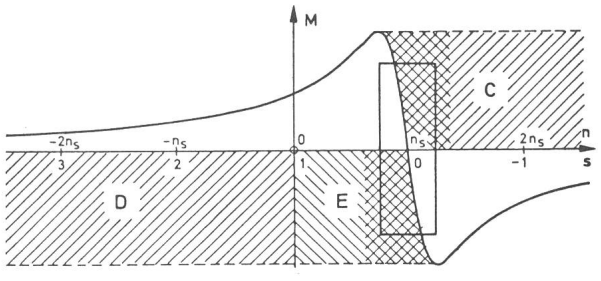

Fig. 4 Netzgespeister Induktionsmotor mit zusätzlicher Rotoreinspeisung variabler Frequenz

Schraffierte Flächen: Möglicher Betriebsbereich

C Übersynchroner Motor
G Gegensynchroner Motor
E Untersynchrone Bremse

Einfach schraffierte Flächen: Maschinenkommutierter Rotorwechselrichter (mit natürlicher Kommutierung) möglich

Doppelt schraffierte Flächen: Nur zwangskommutierte Wechselrichter oder Steuerumrichter zur Rotorspeisung geeignet

Ausgezogener Bereich um n_s: Übliche unter/übersynchrone Kaskade

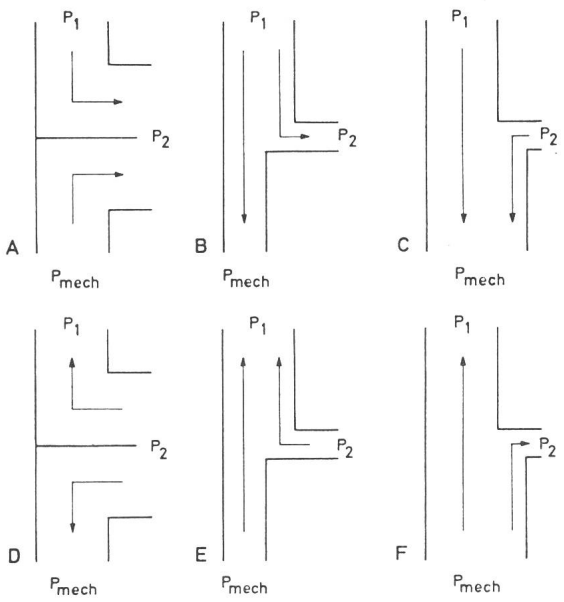

Fig. 5 **Leistungsbilanzen des Induktionsmotors bei konstanter Statorspannung, konstantem Drehmoment und mit Schlupfsteuerung**

Bezeichnung der Bereiche entsprechend Fig. 2 und 4

A	Gegenstrombremse	$s = 2$
B	Untersynchroner Motor	$s = 0{,}4$
C	Übersynchroner Motor	$s = -0{,}4$
D	Gegensynchroner Motor	$s = 2$
E	Untersynchrone Bremse	$s = 0{,}4$
F	Übersynchroner Generator	$s = -0{,}4$

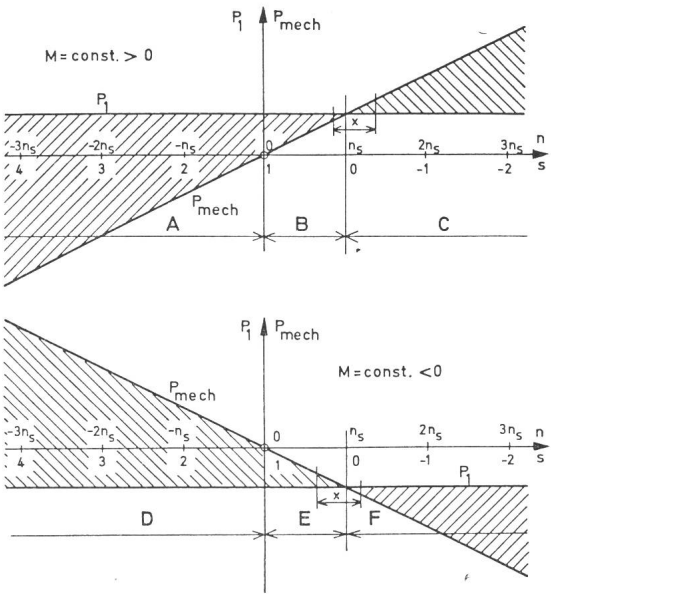

Fig. 6 **Leistungsflüsse des Induktionsmotors bei konstanter Statorfrequenz, variablem Schlupf und konstantem Drehmoment an der Welle**

Bereiche A...F gemäss Fig. 5

× Bereich, in welchem der Umrichter nicht maschinenkommutiert arbeiten kann

3. Der Induktionsmotor mit aktivem Rotor-Zusatzkreis

Anstelle eines ohmschen Rotorzusatzwiderstandes R_z oder des entsprechenden Kaskadenzusatzes, der dem Rotor Leistung entzieht, kann man einen negativen Widerstand oder einen Kaskadenzusatz verwenden, der dem Rotor Leistung zuführt. Diese Leistungszufuhr hat derart zu erfolgen, dass deren Spannung, Frequenz, Phasenlage und Drehsinn mit der induzierten Rotorspannung harmonieren. Damit entstehen die möglichen Betriebsbereiche gemäss den schraffierten Flächen in Fig. 4, die das Komplement zu Fig. 2 darstellen. Auf diese Weise entstehen die Betriebsbereiche: Motor übersynchron (C), Bremse bzw. Generator untersynchron (E), Motor gegensynchron (D).

Die beiden Bereiche C und E umfassen auch den Synchronismus (mit Gleichstromerregung, synchronisierter Induktionsmotor) sowie einen kleinen Teil unter- bzw. oberhalb des Synchronismus, wo den Rotorklemmen zwar Leistung zugeführt wird, die aber kleiner ist als die Verlustleistung im Rotor-Wicklungswiderstand. Fig. 5 zeigt die Leistungsbilanzen für alle Betriebsarten mit aktivem oder passivem Rotor-Zusatzkreis.

Für einen beliebigen Schlupf sind die Netzleistung P_1 und die Wellenleistung P_{mech} in Fig. 6 für ein konstantes positives bzw. negatives Drehmoment dargestellt.

Die Umrichterleistung ergibt sich (immer bei verlustfreier Maschine) mit der Vorzeichenfestlegung für P_1, P_2 und P_{mech} in Abschnitt 2 zu

$$P_2 = P_1 - P_{mech}$$

($P_2 > 0$ für Leistungsentzug aus dem Rotor, $P_2 < 0$ für Leistungszufuhr in den Rotor).

4. Betriebsbereiche und Umrichtersysteme

Von den 6 Betriebsbereichen A...F kommen A, B und F mit passivem Rotorkreis aus, wogegen C, D, E einen aktiven Rotorkreis benötigen (Fig. 7).

Passive Rotorzusatzkreise lassen sich in der Art der bereits besprochenen untersynchronen Kaskade verhältnismässig einfach und mit tragbarem Aufwand realisieren mittels natürlich kommutierender Stromrichter.

Aktive Rotor-Zusatzkreise erfordern Umrichter, welche in der Lage sind, die Netzleistung in der gewünschten Spannung, Frequenz und Phasenlage an den Rotor abzugeben. In Bereichen mit genügend grossem Schlupf liefert der Rotor eine Wechselspannung, welche die Verwendung natürlich kommutierender Wechselrichter erlaubt (maschinenkommutierter Wechselrichter). Bei kleinem Schlupf und bei Synchronismus besteht diese Möglichkeit nicht mehr. Man hat nur die Wahl

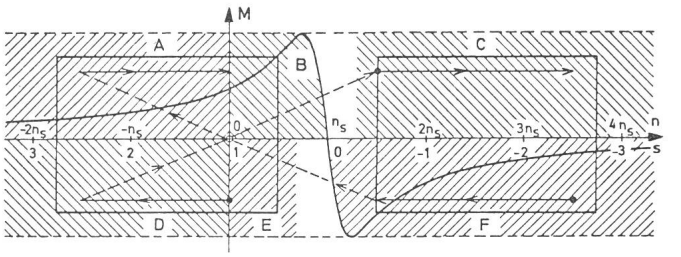

Fig. 7 **Induktionsmotor mit Speisung über Netz und Rotorumrichter**

Bereiche A...F wie in Fig. 5

Ausgezogene Bereiche: Gegensynchroner und übersynchroner Betrieb mit maschinenkommutiertem Umrichter

Pfeile: Anfahrt und Bremsung über den ganzen Bereich mit Drehfeldumschaltung

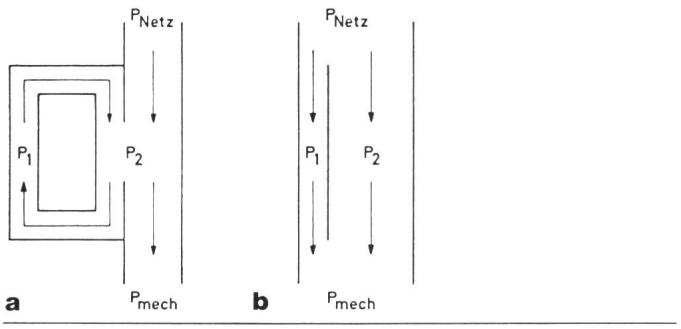

Fig. 8 Leistungsbilanzen des Induktionsmotors
a Gegensynchroner Motor ($s = 3$)
b Übersynchroner Motor ($s = -3$)

zwischen dem zwangskommutierten Wechselrichter oder dem vom Netz her kommutierten, nur für kleine Frequenzen geeigneten Steuerumrichter. Beide Lösungen sind sehr aufwendig und nur bei Auslegung für kleine Schlupfleistung, und damit für kleinen Schlupf und kleine Frequenz, wirtschaftlich interessant. Die wichtigste Anwendung sind elastische Netzkupplungsumformer für die Speisung niederfrequenter Bahnnetze. Der dort angewandte Steuerumrichter gestattet innerhalb eines Schlupfbereiches von plus/minus wenigen Prozenten (Fig. 4) sowohl den Betrieb in den Bereichen C und E (aktiv) als auch B und F (passiv).

Weitere Möglichkeiten der Verwendung maschinenkommutierter Wechselrichter (die natürliche Kommutierung wird durch die vom Rotor abgegebene Spannung ermöglicht), bestehen in den Bereichen C und D.

Im gegensynchronen Motorbetrieb des Bereiches D [1] entsteht eine Energiebilanz gemäss Fig. 8a. Dieser Antrieb ist in der Lage, vom Stillstand aus direkt auf seine maximale Drehzahl hochzufahren. Ähnlich wie bei der untersynchronen Kaskade, entsteht auch hier ein Leistungsanteil (P_1), der im Kreise zirkuliert. Sein Verhältnis zur mechanischen Leistung wird jedoch mit zunehmender gegensynchroner Drehzahl günstiger. Betreibt man beispielsweise eine achtpolige Maschine im gegensynchronen Betrieb mit 3000 U/min ($s = 5$), so zirkuliert nur noch ein Viertel der mechanischen Leistung; der Umrichter ist für fünf Viertel der mechanischen Leistung auszulegen. Bei kleinerer Drehzahl und konstantem Drehmoment bleibt die zirkulierende Leistung konstant (Fig. 6).

Wählt man wie im obigen Beispiel eine genügende Spanne zwischen der synchronen Drehzahl für Netzfrequenz und der maximalen gegensynchronen Drehzahl, so ist die zirkulierende Leistung nicht prohibitiv. Man arbeitet dann in einem zwar längst bekannten, interessanten Arbeitsbereich des Induktionsmotors, der jedoch bis heute kaum genutzt wurde.

Auch der Bereich C ergibt bei genügender Rotorspannung einen motorischen Betriebsbereich, welcher mit einem natürlich kommutierenden (maschinenkommutierenden) Wechselrichter auskommt. Die Leistungsbilanz in dieser Betriebsart geht aus Fig. 8b hervor. Man befindet sich im übersynchronen Bereich. Bei der Anfahrt ist es jedoch nicht möglich, den Synchronismus und seine benachbarten Bereiche kleinen Schlupfes zu durchfahren.

Das Anfahren und somit ein beliebiger Betrieb zwischen Stillstand und maximaler Drehzahl wird möglich bei Kombination der Bereiche D (tiefe Drehzahl) und C (hohe Drehzahl) in Fig. 7. Beim Übergang von D auf C müssen hierzu die Drehrichtung des Statorfeldes sowie die Impulsfolge des Wechselrichters umgekehrt werden. Fig. 9 zeigt eine Realisierungsmöglichkeit dieser Kombination.

Als Illustration sind in Fig. 10 die an einem Versuchsaufbau gemessenen Spannungen und Ströme im gegensynchronen Motorbetrieb wiedergegeben.

Eine verzögerungs- und überspannungsfreie Drehfeldrichtungsumschaltung beim Übergang von C nach D und umgekehrt ist mit elektronischer Umschaltung zweier Statorphasen möglich, wodurch ein fast stossfreier Übergang zwischen den beiden Bereichen erzielbar ist. Die gleiche Umschalteinheit gestattet auch den Betrieb in beiden Drehrichtungen. Da diese Anordnung ohne weiteres auch in den Quadranten A und F (Bremsbetrieb) arbeitet, erhält man bei entsprechender Auslegung der Steuer- und Regelkreise einen vollständigen Vierquadranten-Antrieb.

Ergänzt man den Umschalter in der direkt zugeführten Phase zu einem Drehstromsteller, so entsteht auch die Möglichkeit des Betriebes mit Feldschwächung. Dieser ist wie bei andern Antriebssystemen dann zweckmässig, wenn bei hohen Drehzahlen nicht mehr das volle mechanische Moment benötigt wird, und gestattet eine spannungsmässig kleinere Ausführung des Rotorumrichters.

Wie dieses letzte Beispiel zeigt, führt eine konsequente und vollständige Analyse aller möglichen Betriebsbereiche des Induktionsmotors auf neue Möglichkeiten, welche für drehzahlvariable Antriebe mit Induktionsmotoren zu technisch und wirtschaftlich interessanten Lösungen führen können.

5. Netzverhalten

Ohne auf alle Einzelheiten der gesamten Netzbelastungen (Blindleistungen des grundharmonischen Netzstromes sowie der harmonischen Stromoberschwingungen und der nichtharmonischen Netzströme) einzugehen, sollen einige wesentliche Tatsachen und Resultate erwähnt werden.

5.1 Grundharmonische Blindleistung

Bezüglich der grundharmonischen Blindleistung sind Antriebe mit variabler Statorfrequenz und mit Kurzschlussläufer relativ günstig. Ihre Netzbelastung wird einzig durch den Gleichrichter zur Speisung des Gleichstromzwischenkreises

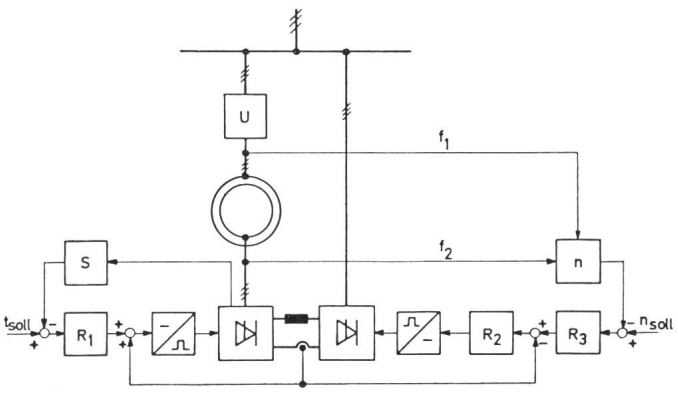

Fig. 9 Prinzipschema der Regelung eines Induktionsmotors für gegensynchronen/übersynchronen Betrieb mit maschinenkommutiertem Stromrichter
Die Umschaltlogik für die verschiedenen Betriebszustände ist weggelassen

R_1 Schonzeitregler
S Schonzeitmessung
R_2 Stromregler
R_3 Drehzahlregler
n Drehzahlmessung
U Drehfeldumschalter

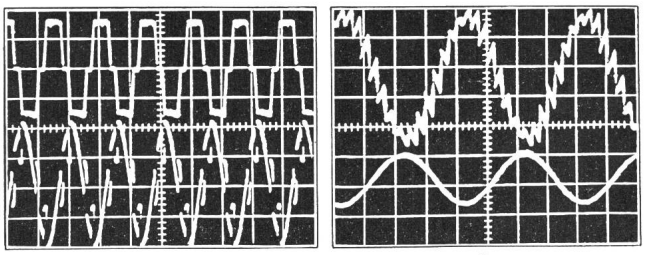

Fig. 10 Spannungen und Ströme im gegensynchronen Betrieb
$s = 2{,}67$
a oben: Netzspannung des Motors (100 V/div.)
unten: Netzstrom des Motors (10 A/div.)
b oben: Umrichterspannung (80 V/div.)
unten: Umrichterstrom des Motors (10 A/div.)

verursacht. Er wird zwar meist anschnittgesteuert betrieben, aber in der Regel nur mit kleinem Steuerbereich zur Ausregelung von Netzspannungs- und Belastungsschwankungen, wodurch seine Blindleistung im Rahmen bleibt.

Bei den Kaskaden aller Systeme muss der Magnetisierungsstrom des Motors beachtet werden, der sich zur Blindlast des netzseitigen Stromrichters addiert. In gleichem Sinne wirken ausserdem Blindbelastungen des Rotors durch den rotorseitigen Stromrichter. Legt man diesen so aus, dass er an den Rotor Blindleistung abgeben kann, so erscheint diese am Stator um den Faktor $1/s$ verstärkt. Diese Möglichkeit wird bei unter/übersynchronen Kaskaden mit kleinem Schlupfbereich und mit Steuerumrichter im Rotorkreis verwendet, um den gesamten Antrieb mit $\cos\varphi = 1$ oder gar mit Blindleistungsrückgabe an das Netz zu betreiben.

Die andern Kaskaden sind Blindleistungsverbraucher. Der Magnetisierungsstrom ist durch die Auslegung des Motors vorgegeben. Der rotorseitige Stromrichter muss mit minimaler Blindlast betrieben werden, d. h. als Gleichrichter ohne Phasenanschnitt oder als Wechselrichter mit maximalem Anschnittsteuerwinkel, der durch eine Schonzeitregelung gewährleistet werden muss. Zu diesen zwei einigermassen konstanten und nicht dominierenden Blindleistungen kommt die Blindleistung des netzseitigen Stromrichters. Sie ist am grössten bei Spannung null, am kleinsten bei Vollaussteuerung.

Bei der untersynchronen Kaskade entspricht der Betrieb mit minimaler Drehzahl der vollen Stromrichterspannung. Diese wird zu null bei höchster Drehzahl. Somit verläuft die Blindleistung in Funktion der Drehzahl im Vergleich zur Gleichstrommaschine umgekehrt und erreicht ihr Maximum bei der höchsten Drehzahl. Ihr Wert ist direkt proportional zum regelbaren Schlupfbereich s_{max}, weshalb untersynchrone Kaskaden in der Regel nur für beschränkten Schlupfbereich ausgelegt sind.

Bei der gegensynchronen Kaskade ist der Blindleistungsbedarf des netzseitigen Stromrichters etwas höher als bei einem Gleichstromantrieb, bei der gegensynchronen/übersynchronen etwas tiefer. Dazu kommen noch die schon erwähnten, etwa konstanten Blindleistungen. Damit hat bei gleichem Drehzahlregelbereich lediglich die gegensynchrone/übersynchrone Kaskade einen Blindleistungsbedarf, der mit dem stromrichtergeregelten Gleichstrommotor vergleichbar ist.

5.2 Verzerrungen des Netzstromes

Bei frequenzvariablen Antrieben sind die folgenden drei Ursachen für die Abweichung des Netzstromes von der Sinusform und damit für das Auftreten nicht-grundfrequenter Stromkomponenten zu unterscheiden:

a) Das übliche Oberschwingungsspektrum von direkt am Netz angeschlossenen Stromrichtern. Bei sechspulsigen Stromrichtern erscheinen Netzstromoberschwingungen der 5-, 7-, 11-, 13, ...fachen Netzfrequenz.

b) Bei Frequenzumrichtern mit einem Gleichstromzwischenkreis, der nicht ideal geglättet ist, entstehen Rückwirkungen der variablen Sekundärfrequenz auf den Netzstromrichter, welche durch Modulationseffekte zusätzliche, sekundärfrequenzabhängige und damit stetig variable Netzstromkomponenten bewirken. Dasselbe gilt in noch vermehrtem Masse für Steuerumrichter.

c) Bei sämtlichen Kaskadenschaltungen tritt zudem eine Oberschwingungsübertragung vom rotorseitigen Wechselrichter über die Maschine zum Netz auf. Verwendet man einen sechspulsigen Rotorwechselrichter für die Frequenz $s \cdot f_1$ (f_1 = Netzfrequenz), so erhält dessen Strom die Oberschwingungsfrequenzen $s \cdot f_1 \cdot (-5, +7, -11, +13, ...)$. Positives Vorzeichen bedeutet gleichen, negatives Vorzeichen gegenläufigen Drehsinn zu $s \cdot f_1$. In der Induktionsmaschine werden diese Drehfelder vom Rotor getragen, der gegenüber der Statorwicklung elektrisch mit $(1 - s) \cdot f_1$ rotiert. Dabei entstehen im Stator die neuen Frequenzen $f_1 \cdot (1 \pm 6s, 1 \pm 12s, ...)$. Dies sind wiederum Netzstromanteile, die stetig mit der Sekundärfrequenz variieren.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass im Netzstrom aller mit Umrichtern ausgestatteten Drehstromantriebe variabler Drehzahl sowohl die üblichen ganzzahligen Oberschwingungen der Netzfrequenz als auch drehzahlabhängige Modulationsfrequenzen zu finden sind. Deren Grösse und Frequenzbereich ist stark von der Art und der Auslegung des Antriebes abhängig und erfordert eine genauere Untersuchung im Einzelfall.

Literatur

[1] *A. Läuger:* The commutatorless DC-motor with three-phase current excitation. In: Proceedings of the Second IFAC-Symposium on Control in Power Electronics and Electrical Drives, Düsseldorf 1977. Oxford/New York, Pergamon Press 1977; p 619.

Adresse des Autors

Prof. Dr. *Rudolf Zwicky*, Institut für Automatik und industrielle Elektronik, ETHZ, 8092 Zürich.