

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins  
**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke  
**Band:** 64 (1973)  
**Heft:** 13

**Artikel:** Stromrichter-Maschinensysteme mit Drehzahlsteuerung von Asynchron- und Synchronmaschinen  
**Autor:** Naunin, D.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-915570>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 16.03.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Stromrichter-Maschinensysteme mit Drehzahlsteuerung von Asynchron- und Synchronmaschinen

Von D. Naunin

62-531.6:621.313.32:621.313.33

## 1. Einleitung

Bis zur Einführung der Thyristoren in die Stromrichtertechnik sind Asynchron- und Synchronmaschinen wegen der Abhängigkeit ihres Drehzahlverhaltens von der Speisefrequenz gar nicht oder nur mit Hilfe von zusätzlichen Wicklungen oder Widerständen als Antriebsmaschinen mit variabler Drehzahl eingesetzt worden. Frequenzgesteuerte Wechselrichter mit Quecksilberdampfventilen sind industriell nicht gebaut worden, da vor allem wegen der langen Freiwerdezeiten der Ventile der Kommutierungsaufwand zu gross war. Das trifft für Thyristoren nicht mehr zu. Die Thyristortechnik, die zunächst ihr Einsatzgebiet im Bereich der elektrischen Antriebe bei den Gleichstrommaschinen fand und den Markt der drehzahlgeregelten Gleichstromantriebe fast ausschliesslich bestimmt, dringt heute zunehmend in das Gebiet der Drehfeldmaschinen ein, um auch die mechanisch und elektrisch vorteilhafteren Drehfeldmaschinen für die Drehzahlregelung zu erschliessen. Der vorliegende Aufsatz behandelt diesen Teilbereich der Stromrichter-Maschinensysteme und versucht, einen Überblick über die Arten und Möglichkeiten der Thyristorpeisung von Asynchron- und Synchronmaschinen und über die Anwendungsgebiete stromrichter gespeister Drehfeldmaschinen zu geben. Auf Literatur, in der das stationäre und dynamische Verhalten genauer beschrieben ist, wird hingewiesen.

Den Drehfeldmaschinen kann mit Hilfe von Gleich- und Wechselrichtern unabhängig von ihrem konstruktiven Aufbau nahezu jedes Drehzahlverhalten durch eine geeignete Steuerung aufgezwungen werden. Eine Asynchronmaschine kann ein «Synchronmaschinenverhalten» (s. Abschnitt 3.2), eine Synchronmaschine ein «Gleichstrom-Nebenschlussmaschinenverhalten» (s. Abschnitt 4.2) bekommen. Es muss deshalb unterschieden werden, ob auf Grund des Aufbaus oder des Drehzahlverhaltens eine Maschine zusammen mit ihrer Steuerung in die Kategorie «Asynchronmaschine» oder «Synchronmaschine» eingeordnet wird. Es wurde auch schon eine neue Kategorie «Stromrichtermotor» (Abschnitt 4.2) vorgeschlagen. Da dazu noch keine anerkannte Übereinkunft besteht, wird in diesem Aufsatz von der klassischen, vom Aufbau her begründeten Unterscheidung ausgegangen, bei der die Asynchronmaschinen einen elektrisch und magnetisch rotationssymmetrischen Läufer und die Synchronmaschinen (Innenpoltyp) einen elektrisch und magnetisch rotationssymmetrischen Läufer haben. Auf Grund der heute möglichen genauen Drehzahlregelungen sind Unterscheidungen nach dem Drehzahlverhalten oft schwer zu treffen.

## 2. Drehzahländerung ohne Stromrichter

Zur Verdeutlichung des Fortschrittes, den die Stromrichtertechnik gebracht hat, werden kurz die Verfahren aufgezählt, mit denen eine Drehzahländerung von Drehfeld-

maschinen ohne Stromrichter möglich ist. Die ersten beiden Verfahren gelten für die Synchron- und Asynchronmaschine, die anderen nur für die Asynchronmaschine. Eine Drehzahländerung erreicht man durch:

1. Frequenzänderung mit vorgeschalteten rotierenden Frequenzformern:

Durch die Vorschaltung eines mit variabler Drehzahl angetriebenen Synchrongenerators ist der Aufwand bei diesem Verfahren recht gross [1]<sup>1)</sup>.

2. Polpaarzahländerung:

Durch Kombinationen mehrerer Wicklungen mit unterschiedlichen Polpaarzahlen ist nur eine stufenweise Drehzahlverstellung möglich. Sie erfordert einen erhöhten Wicklungsaufwand.

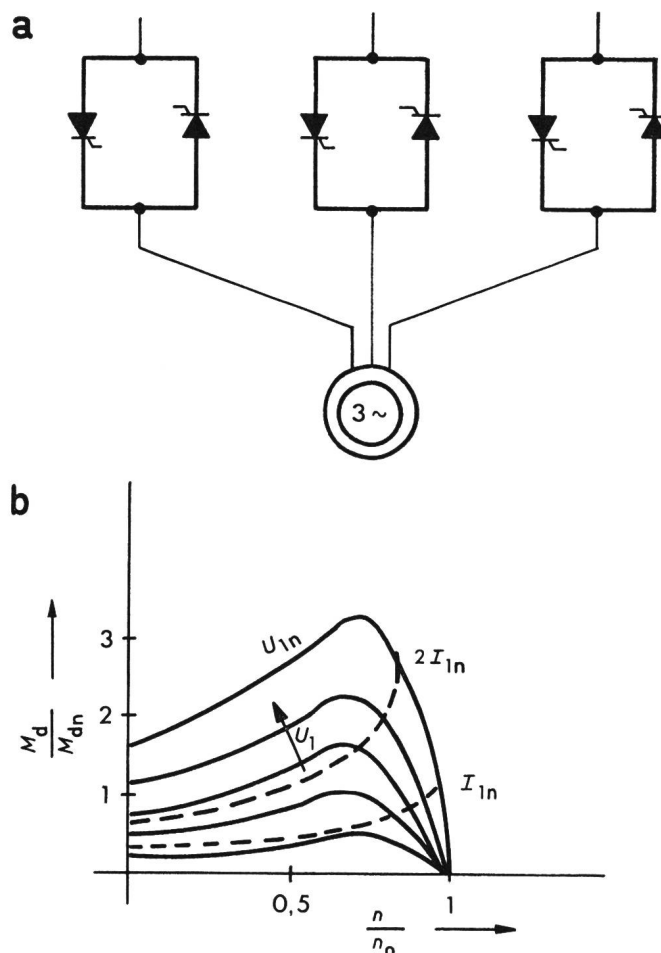


Fig. 1

Drehstromsteller gespeiste Asynchronmaschine

- a Schaltbild
- b Drehmoment-Drehzahlkennlinien
- $M_d$  Drehmoment
- $M_{dn}$  Nenndrehmoment
- $n$  Drehzahl
- $n_o$  Synchrondrehzahl
- $I_{1n}$  Ständernennstrom
- $U_1$  Ständerspannung

<sup>1)</sup> Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

3. Spannungsänderung mit Ständervorwiderständen:  
Die Drehzahländerung ist nur in einem begrenzten Lastbereich möglich; bei grösseren Leistungen wird dieses Verfahren unwirtschaftlich.

4. Schlupfänderung mit Läuferwiderständen:  
Es gilt das gleiche wie zu 3. Darüber hinaus sind eine Schleifringwicklung und Schleifringe notwendig.

5. Polteilungsänderung:  
Diese Möglichkeit wurde bisher nur beim «Logmotor» [2] und beim «Spherical Motor» [3] im Versuchsstadium erprobt.

6. Frequenzänderung mit einem Kommutator:  
Der Kommutator als Frequenzwandler für die Einspeisung in den Sekundärkreis wird bei den Drehstromkommutatormaschinen (Drehstrom-Nebenschluss- und Drehstrom-Reihenschlussmaschinen) eingesetzt. Die verlustlose, universelle Drehzahländerung wird mit erhöhtem mechanischem Aufwand erkauf.

Die Drehzahländerung wird in diesen Fällen durch mechanische Änderungen erreicht, wenn man die hinzugeschalteten Widerstände als Veränderung der Maschinendaten auffasst. Die eingespeisten elektrischen Grössen werden – bis auf Fall 1. – von einem Netz konstanter Spannung und Frequenz vorgegeben. Im Gegensatz dazu werden bei Vorschaltung eines Stromrichters die eingespeisten elektrischen Grössen verändert; der Motor ist in den meisten Fällen ein Normmotor ohne besondere zusätzliche Eigenschaften und konstruktive Besonderheiten.

Im folgenden werden zuerst die Stromrichterschaltungen zur Speisung von Asynchronmaschinen, dann die zur Speisung von Synchronmaschinen und schliesslich ein abgrenzender Vergleich zwischen stromrichtergespeisten Drehfeld- und Gleichstrommaschinen behandelt.

### 3. Stromrichtergespeiste Asynchronmaschinen

Stromrichter können zur Drehzahländerung einer Asynchronmaschine im Ständerkreis und im Läuferkreis (bei Vorhandensein einer Schleifringwicklung) eingesetzt werden. Sie beeinflussen den Spannungsmittelwert, die Spannungsform und die Frequenz der Ständer- und Läuferspannungen. Ein optimales Verhalten entsteht dann, wenn Spannungsmittelwert und Frequenz aufeinander abgestimmt sind: Wie bei der Gleichstrommaschine sollten sie im mittleren Drehzahlbereich proportional zueinander sein; bei Erreichen der maximalen Spannung, die meistens die Nennspannung ist, kann eine Drehzahlerhöhung nur durch eine Feldschwächung erfolgen, bei Drehzahlen um Null ist der Ohmsche Ständerspannungsabfall zu berücksichtigen [5]. Zur Schaltungsvereinfachung sind Abweichungen von dieser optimalen Zuordnung möglich.

(Im folgenden aufgeführte Literaturangaben beziehen sich stets auf die behandelte Schaltung. Stromrichterschaltungen im allgemeinen werden u. a. in den Büchern 6...9 beschrieben.)

#### 3.1 Drehstromsteller

Die einfachste ständerseitige Stromrichterschaltung ist der Drehstromsteller. In Fig. 1a ist ein symmetrischer Drehstromsteller aufgezeichnet. Bei dieser Schaltung ist nur eine Änderung des Spannungsmittelwertes durch Anschnittsteuerung der Speisespannung, die auf Grund der antiparallelen Thyristoren in jeder Phase und Halbwelle symmetrisch ist, möglich. Dieses Verfahren ist in seiner Wirkungsweise dem der Spannungsänderung durch Ständervorwiderstände gleich. Unsymmetrische Drehstromsteller liegen dann vor, wenn z. B. jeweils ein Thyristor und eine Diode pro Phase antiparallel geschaltet sind oder nur zwei Phasen antiparal-

le Thyristoren haben. Auf Grund der konstanten Speisefrequenz ist eine Drehzahlveränderung nur bei Last und nicht beim Leerlauf möglich. Fig. 1b gibt die Drehmoment-Drehzahl-Kennlinien mit dem Effektivwert der Ständerspannung als Parameter wieder. Der mögliche Steuerbereich wird nach oben hin durch den gestrichelt eingezeichneten Nennstrom begrenzt. Ist auch im unteren Drehzahlbereich ein stabiles Verhalten erforderlich, muss ein zusätzlicher Läuferwiderstand oder ein Läuferkäfig mit höherem Widerstand eingesetzt werden, so dass das Kippmoment bei einem niedrigeren Drehzahlwert auftritt. Genaue Berechnungen über das Verhalten des Asynchronmotors mit Drehstromsteller sind u. a. in [10; 11] enthalten. Generatorbetrieb und Reversierbetrieb – durch Vertauschen zweier Phasen – sind möglich, so dass ein Vierquadrantenbetrieb erreicht werden kann. Das Einsatzgebiet liegt im Bereich bis 20 kW, in Sonderausführungen bis 60 kW, hauptsächlich für Pumpen, Lüfter und ähnliche Antriebe, deren Drehzahlführung unkritisch ist.

#### 3.2 Direktumrichter

Eine Asynchronmaschine, die über einen Direktumrichter gespeist wird, zeigt Fig. 2, in dem zwei Schaltungsvarianten

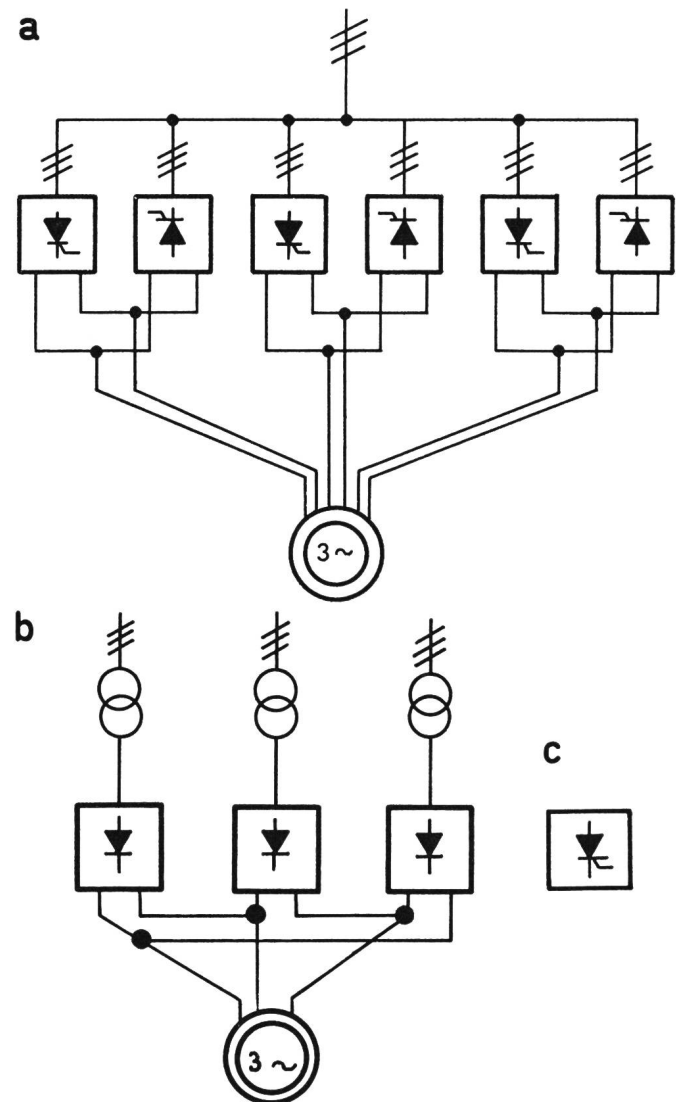


Fig. 2

#### Direktumrichtergespeiste Asynchronmaschine

- a mit getrennter Speisung aller drei Stränge
- b in Dreieckschaltung
- c Symbol für eine vollgesteuerte Brückenschaltung

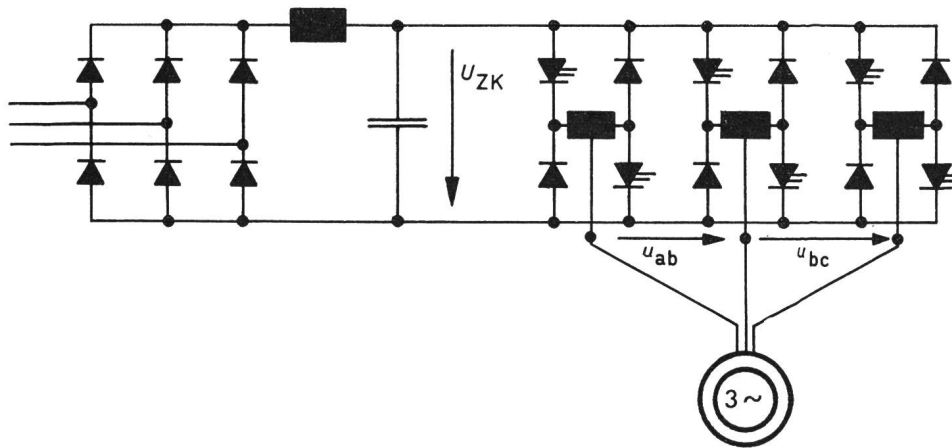


Fig. 3  
 Umrichter mit konstanter  
 Zwischenkreisgleichspannung  $U_{ZK}$  zur  
 Speisung von Asynchronmaschinen  
 $u_{ab}$ ,  $u_{bc}$  verkettete Ständerspannungen  
 Thyristor mit Löschsaltung

aufgezeichnet sind. Der Direktumrichter nach Fig. 2a besteht aus 6 antiparallel geschalteten vollgesteuerten Drehstrombrückenschaltungen, so dass jeder Strang der Asynchronmaschine mit jeder Netzphase über antiparallele Thyristoren verbunden ist. (Wenn für jeden Maschinenstrang ein Transformator vor dem Stromrichter vorgesehen ist, können der Stromrichter und der Asynchronmotor jeweils in Stern mit oder ohne Sternpunktverbindung geschaltet werden. Eine Sternpunktverbindung hat Vorteile bei der Stromregelung.) Schaltung b in Fig. 2 erfordert weniger Thyristoren. Wegen der höheren Ventilbeanspruchung ist der Ventilaufwand jedoch der gleiche wie bei Schaltung a. Dadurch, dass in diesen Schaltungen gleichsam ein Gleichstromzwischenkreis versteckt ist, wird mit Hilfe einer geeigneten Steuerung erreicht, dass die Ausgangsfrequenz des Umrichters unabhängig von der Netzfrequenz wird und deshalb den Erfordernissen des Motors angepasst werden kann. Die Frequenz ist allerdings nur im Bereich von 0 bis etwa 20 Hz bei einer Netzfrequenz von 50 Hz einstellbar. Die Ausgangsspannung des Umrichters wird dabei aus Teilen der Netzspannung durch Anschchnittsteuerung zusammengesetzt. Ihre Form hängt vom Steuerprinzip ab. Eine etwa sinusförmige Spannung ist mit dem «Steuerumrichter», eine trapezförmige mit dem «Trapezumrichter», auch Hüllkurvenumrichter genannt, erreichbar. Wegen der niedrigen Frequenzen werden die antiparallelen Brückenschaltungen kreisstromfrei gefahren, da kurze stromlose Pausen beim Richtungswechsel des Stroms, die zur Verhinderung von Kurzschlüssen notwendig sind, nicht stören. Der Direktumrichter ist wie der Drehstromsteller netzgeführt, d. h., die Kommutierungsenergie wird dem Netz entnommen.

Wegen der hohen Anzahl von Thyristoren und wegen des hohen Steuerelektronikaufwandes (für alle drei Maschinenstränge muss beim meistens verwendeten Steuerumrichter je nach der Regelgröße ein sinusförmiger Strom- bzw. Flussverlauf vorgegeben werden) ist der Einsatz eines Direktumrichters nur bei hohen Leistungen über 1 MW wirtschaftlich. Dadurch, dass durch einen geringen zusätzlichen Steuer Aufwand ein Vierquadrantenbetrieb möglich ist, ist dieser Antrieb bei niedrigen Drehzahlen universell einsetzbar. Technische Versuchsausführungen sind in [12; 13] beschrieben.

Der Anwendungsbereich für Asynchronmaschinen mit normaler Ständerspeisung und einer Läuferpeisung über Direktumrichter liegt bei der Energieübertragung vom 50-Hz-Netz in das 16⅔-Hz-Netz der elektrischen Bahnen und umgekehrt vor. Da die beiden Netzfrequenzen nicht konstant

sind und auch keine feste Beziehung zueinander haben, muss dem Läufer der Asynchronmaschine, die einen Synchron-generator antreibt, eine von der Richtung und Größe der umzuformenden Energie abhängige Spannung und Frequenz zugeführt werden. Die Frequenzen liegen im Bereich von 0 bis  $\pm 1$  Hz. Ein Umformerwerk für 25 MW wurde gerade nach diesem Prinzip für die Deutsche Bundesbahn in Neu-Ulm fertiggestellt.

Asynchronmaschinen, denen ständer- und läuferseitig Frequenzen vorgegeben sind, verlieren ihr typisches asynchrones Drehzahlverhalten, das durch den belastungsabhängigen Drehzahlabfall gekennzeichnet ist. Sie erhalten ein «Synchronmaschinenverhalten», da bei der «klassischen» Synchronmaschine Belastung und Drehzahl unabhängig voneinander sind. Die doppelt gespeiste Asynchronmaschine wird deshalb bei einigen Autoren (u. a. [6]) zu den Synchronmaschinen gezählt.

### 3.3 Umrichter mit konstanter Zwischenkreisgleichspannung

Ein Umrichter mit konstanter Zwischenkreisgleichspannung  $U_{ZK}$  zur Speisung von Asynchronmotoren ist in Fig. 3 aufgezeichnet. Er besteht aus einer ungesteuerten Gleichrichterschaltung, deren konstante Ausgangsspannung über LC-Glieder geglättet wird, und einem selbstgeführten Wechselrichter, bei dem die Kommutierungsenergie zur Löschung der Thyristoren aus einem Löschkreis mit Kondensator, der jedem Thyristor zugeordnet ist, entnommen wird. (Der «löschrare» Thyristor hat in Fig. 3 und den folgenden Figuren ein eigenes Symbol.) Die Löschkreis schaltung kann verschiedene Formen haben [6]. Wegen der induktiven Belastung, die ein Asynchronmotor darstellt, müssen Freilaufdioden antiparallel zu den Thyristoren geschaltet werden.

Durch den Gleichspannungszwischenkreis kann man unabhängig von der Netzfrequenz Spannung und Frequenz des Motors in weiten Grenzen, die nur durch die Motor- bzw. Bauelementdaten begrenzt sind, steuern. Unterhalb des Typenpunktes des Motors, der durch die Nennleistung des Motors bei den Nennwerten aller Größen gekennzeichnet ist, muss, wie schon erwähnt, die Motorspannung herabgesetzt werden. Da die Wechselrichtereingangsspannung konstant ist, geschieht dies durch Pulsen der Motorspannung in der Form, dass während einer Halbperiode der Ständerfrequenz, in der z. B. der Mittelwert der Spannung  $u_{ab}$  (Fig. 3) positiv ist,  $u_{ab}$  durch Löschen eines stromführenden Thyristors zeitweise Null bzw. bei Löschung zweier Thyristoren zeitweise negativ wird. Dadurch werden die Zünd- und Löschimpulse der Thyristoren zum einen durch die gewünschte Ständerfre-

quenz, zum anderen diesen unterlagert durch eine höhere, zur Spannungsmittelwertbildung erforderliche Pulsfrequenz bestimmt. Die Pulsfrequenz kann konstant mit vom Spannungsmittelwert abhängiger Pulslänge oder abhängig von der Spannung mit konstanter Pulslänge bzw. Pulspause sein [16]. Weiterhin kann sie völlig frei und durch eine Stromregelung bestimmt sein, wodurch die Asynchronmaschine analog zur Gleichstrommaschine in stromgeregelten Gleichstromantrieben zu einer stromgespeisten Maschine gemacht wird. Dieses Verfahren wird z. B. im «Pulsverfahren» der AEG-Telefunken angewendet [14]; der Strom hat dabei eine Rechteckform mit etwa 120°-Blocklänge. In dem von der Brown, Boveri & Cie. AG angewandten Unterschwingungsverfahren ist wiederum die Pulslänge sinusförmig über eine Periode verteilt, um einen möglichst sinusförmigen Strom zu erhalten [15]. Die Siemens AG macht einen sinusförmigen Flussverlauf bei ihrer Transvektor-Regelung zur Grundlage und führt ebenfalls eine Impulsbreitenmodulation durch [16]. Wechselrichter mit gepulster Ausgangsspannung werden allgemein als Pulswechselrichter bezeichnet.

Die Ständerfrequenz des Motors kann durch eine Drehzahlsteuerung oder -regelung festgelegt werden. Wenn man ein optimales Drehmoment- und Drehzahlverhalten erreichen will, ist es besonders vorteilhaft, die Läuferfrequenz als Steuer- oder Regelgröße vorzugeben, da sie nach Untersuchungen, die u. a. in [5; 17] beschrieben sind, das stationäre und dynamische Verhalten der Asynchronmaschine am nachhaltigsten beeinflusst. Die Ständerfrequenz ergibt sich dann als Summe aus der gemessenen Drehzahlfrequenz des Läufers und der vorgegebenen Läuferfrequenz. Die Schwierigkeiten bei der technischen Verwirklichung dieser Empfehlung, die ganz allgemein für jede stromrichtergespeiste Asynchronmaschine gilt, bisher jedoch nur bei Schaltungen mit Gleichspannungszwischenkreis realisiert wurde, liegen darin, dass Läufer- und Ständerfrequenz oft im Verhältnis 1:100 und höher zueinander liegen können und damit an die Genauigkeit der verwendeten Geräte und Messeinrichtungen hohe Anforderungen gestellt werden. Die erforderliche Genauigkeit ist in bisher gebauten Anlagen mit Hilfe einer Digitalisierung bzw. einer Regelung der Frequenzen erreicht worden.

Auf Grund der Pulsfrequenz, die in den meisten Fällen wesentlich höher als die Grundfrequenzen ist, entstehen Oberwellen in Spannung, Strom und Drehmoment, die das Verhalten der Maschine stark beeinflussen können. Untersuchungen darüber sind sehr zahlreich, jedoch noch nicht abgeschlossen (u. a. [14; 15; 18; 19]).

Der Aufwand an Stromrichterventilen, zu denen vor allem Thyristoren mit kurzen Freiwerdezeiten gehören, und an Steuerelektronik ist recht gross, jedoch kann die Asynchronmaschine mit dieser Stromrichterschaltung im Bereich von einigen Kilowatt bis zu mehreren Megawatt bei Frequenzen von 0 bis 200 Hz und mehr sehr universell angewendet werden. Eingesetzt wurde sie bisher z. B. bei Pumpenantrieben in Kernkraftwerken, Mehrmotorantrieben in der Textilindustrie und Rollgangmotoranlagen in Walzwerken und anderen Industriezweigen. Eine Drehzahlreversierung ist sehr leicht möglich, ein Vierquadrantenbetrieb nur dann, wenn dem netzseitigen Gleichrichter ein Wechselrichter parallelgeschaltet wird.

### 3.4 Umrichter mit variabler Zwischenkreisgleichspannung

Die im vorangegangenen Abschnitt behandelte Spannungsanpassung an die Ausgangsfrequenz hat den Nachteil erhöhten Aufwandes an Zünd- und Löscheinrichtungen und erhöhter Umschaltverluste. Die Spannungsanpassung kann auch durch eine steuerbare Zwischenkreisgleichspannung  $U_{ZK}$  vorgenommen werden. Fig. 4 zeigt zwei Schaltungsbeispiele. In der Schaltung a wird  $U_{ZK}$  durch eine vollgesteuerte Brückenschaltung erzeugt. Auch eine halbgesteuerte Brückenschaltung mit drei Thyristoren und drei Dioden ist möglich, wenn keine Energierückspeisung erforderlich ist. Bei diesen Schaltungen ist wegen der zunehmenden Welligkeit der Gleichrichterausgangsspannung mit abnehmender Zwischenkreisgleichspannung ein hoher Glättungsaufwand notwendig. Ausserdem wächst die aus dem Netz bezogene Blindleistung, sowohl die Grundwellen- als auch die Verzerrungsblindleistung, an. Schaltung b, bei der  $U_{ZK}$  aus der Gleichspannung eines ungesteuerten Gleichrichters über einen Gleichstromsteller, auch Gleichstrompuls-wandler genannt, gebildet wird, hat in dieser Hinsicht günstigere Eigen-

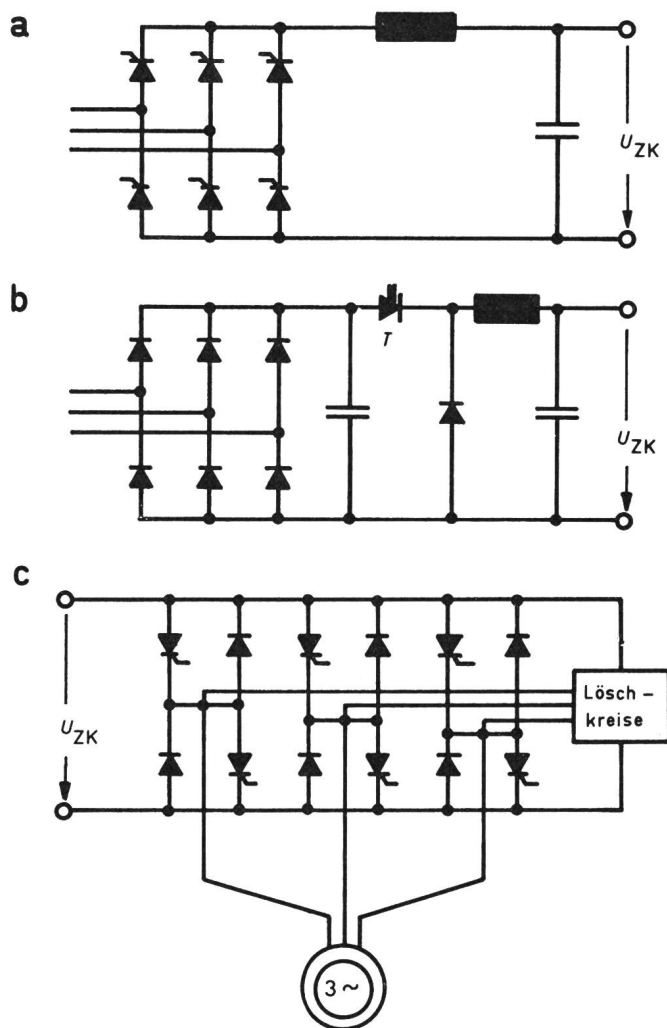


Fig. 4

Umrichter mit variabler Zwischenkreisgleichspannung  $U_{ZK}$  zur Speisung von Asynchronmaschinen

- a Gleichrichter in vollgesteuerter Brückenschaltung
- b Gleichrichter in ungesteuerter Brückenschaltung und nachgeschaltetem Gleichstromsteller
- c Wechselrichter
- T löschbarer Thyristor im Gleichstromsteller

schaften. Hierbei wird durch eine Spannungs- bzw. Stromregelung die Zwischenkreisgleichspannung  $U_{ZK}$  durch gepulstes Aufladen des Kondensators über den Thyristor  $T$  auf die gewünschte Höhe gebracht. Wegen der hohen Pulsfrequenz ist ein Thyristor mit kurzer Freiwerdezeit erforderlich.

Die Thyristoren im Wechselrichter sind in dieser Schaltung nur im Takt der Ständerfrequenz zu zünden und zu löschen. Es braucht deshalb nicht mehr eine Einzellöschung zu erfolgen, es kann eine Phasenfolgelöschung – durch zwischen den Phasen angeordnete Kommutierungskondensatoren –, eine Phasenlöschung – ein Kommutierungskondensator pro Phase – oder eine Summenlöschung – ein Kommutierungskondensator für alle Phasen – vorgenommen werden [6]. Da in den meisten Schaltungen  $U_{ZK}$  gleichzeitig die Ladespannung der Kondensatoren ist, darf eine untere Grenzspannung und damit Grenzfrequenz zur Sicherstellung der Kommutierung nicht unterschritten werden, wenn nicht eine Nachladung durch eine besondere Schaltung vorgesehen ist.

Über eine Läuferfrequenzvorgabe für ein optimales Drehmomentverhalten von Asynchronmaschinen mit der Stromrichterschaltung nach Fig. 4 gilt das gleiche wie mit der Schaltung nach Fig. 3. Eine Drehzahlreversierung ist auch hier leicht möglich, eine Rückspeisung im Generatorbetrieb

nur bei der Schaltung a und Beibehaltung der Stromrichtung im Zwischenkreis.

Schaltung a wurde bisher u. a. bei Pendelmaschinen zur Prüfung von Verbrennungsmotoren bis zu 400 kW bei 4000 U./min<sup>-1</sup> eingesetzt, wobei zur besseren Stromeinprägung der Glättungskondensator im Zwischenkreis weggelassen wurde [20]. Schaltung b ist bisher hauptsächlich bei Antrieben bis 20 kW angewendet worden und stellt hierbei eine wirtschaftliche Lösung dar.

### 3.5 Stromrichter im Läuferkreis

Alle bisher erwähnten Stromrichterschaltungen sind zur Drehzahlsteuerung auch im Läuferkreis möglich, wären aber bis auf die Direktumrichtereinspeisung bei Netzumformern unwirtschaftlich. Angewandte Stromrichterschaltungen im Läuferkreis beschränken sich deshalb hauptsächlich auf den pulsgesteuerten Widerstand und die untersynchrone Stromrichter-kaskade, deren Schaltungen in Fig. 5 aufgezeichnet sind. Die Wirkungsweise einer Schaltung mit pulsgesteuertem Widerstand entspricht der schon erwähnten Schaltung mit veränderbarem Widerstand im Läufer. Durch eine Steuerung des Puls-Pausen-Verhältnisses des Stromes durch den Thyristor  $T$  in der Schaltung a kann jeder mittlere Läuferwiderstandswert  $R_L$  zwischen 0 und  $R$  eingestellt werden.

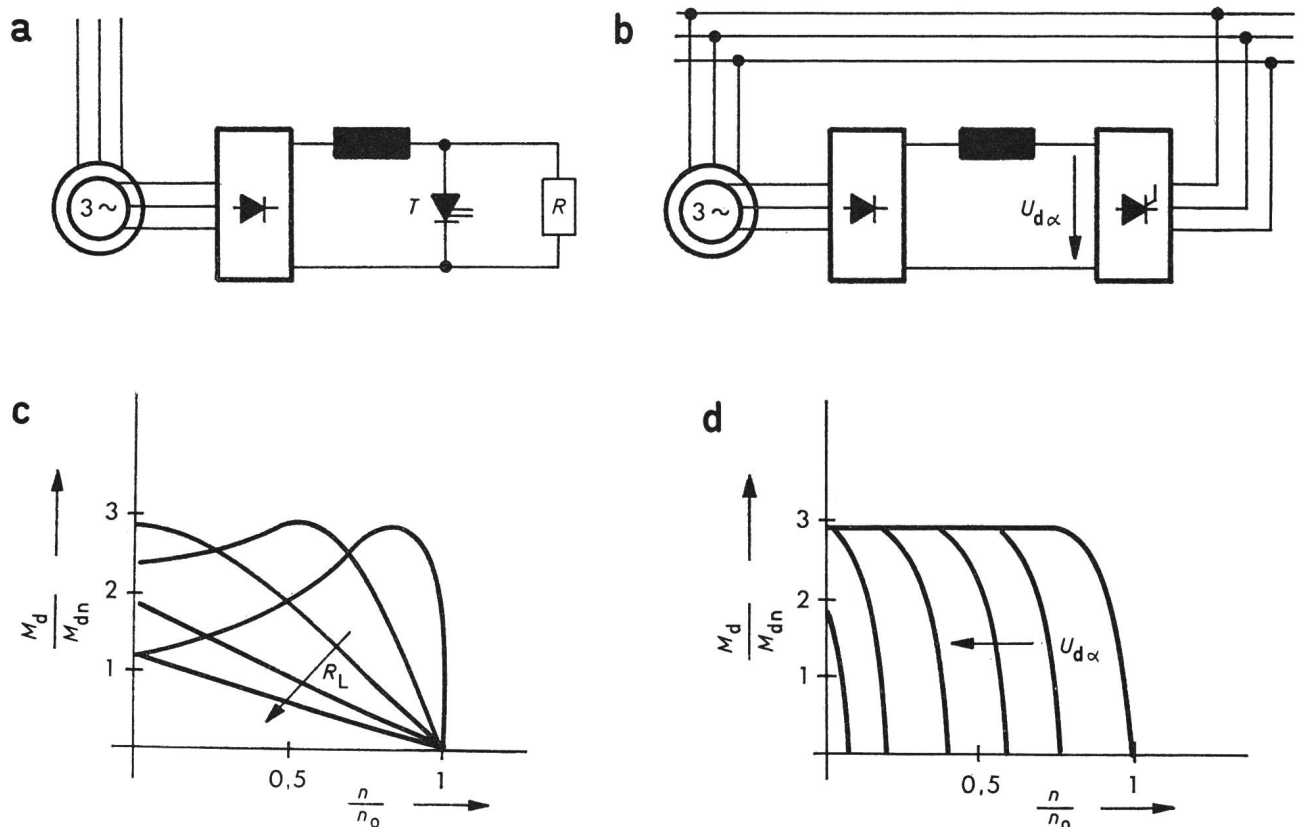


Fig. 5  
Stromrichter im Läuferkreis

- a pulsgesteuerter Widerstand
- b untersynchrone Stromrichter-kaskade
- c Drehmoment-Drehzahlkennlinie nach Schaltung a
- d Drehmoment-Drehzahlkennlinie nach Schaltung b
- $U_{d\alpha}$  Wechselrichtereingangsspannung
- $R_L$  mit Hilfe der Steuerung des Thyristors  $T$  einstellbarer Widerstand zwischen 0 und  $R$

Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 1

Auf Grund der Gleichrichtung ist nur eine T-R-Schaltung notwendig. Die Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie nach Fig. 5c zeigt, dass eine Drehzahländerung nicht im Leerlauf, sondern nur bei Belastung möglich ist. Diese Schaltung wird vor allem bei Kransteuerungen benutzt, wodurch die mechanisch anfälligeren Schützsteuerungen wegfallen.

Bei der untersynchronen Stromrichtererkaskade nach Schaltung b wird die Schlupfenergie nach Gleichrichtung wieder über einen Wechselrichter ins Netz zurückgespeist. Auf Grund der mit Hilfe der Anschnittsteuerung des Wechselrichters kontinuierlich einstellbaren Zwischenkreisgleichspannung kann eine Drehzahleinstellung im gesamten Bereich unterhalb der synchronen Drehzahl, die bis auf die Stromrichterverluste verlustlos ist, vorgenommen werden (Fig. 5d). Motoren bis zu 2 MW werden mit dieser Schaltung betrieben.

Eingehende Untersuchungen über das stationäre und dynamische Verhalten von Asynchronmaschinen mit Stromrichtern im Läufer sind in [21; 22] enthalten.

#### 4. Stromrichtergespeiste Synchronmaschinen

Für die Zuordnung zwischen Ständerspannung und Ständerfrequenz bei Synchronmaschinen (Innenpoltyp) gilt das gleiche wie für das optimale Verhalten von Asynchronmaschinen. Ein Abweichen von dieser Zuordnung ist nicht möglich, da die stationäre Drehzahl nicht von der Spannung, sondern nur von der Ständerfrequenz abhängig ist. Deshalb ist eine Steuerung der Drehzahl über einen Drehstromsteller, wie sie bei der Asynchronmaschine erlaubt ist (Abschnitt 3.1), bei der Synchronmaschine nicht möglich. Auch eine Beeinflussung der Drehzahl über den Läuferstrom kann nicht durchgeführt werden; der Läuferstrom ist immer nur ein Gleichstrom. Da die Drehzahl sich streng nach der Ständerfrequenz und nicht nach der Belastung richtet, ist eine Drehzahleinstellung und ein Gleichlauf von mehreren Motoren mit geringerem elektronischem und regeltechnischem Aufwand möglich als bei Asynchronmaschinen. Auch die Kommutierung in vorgeschalteten Stromrichtern ist günstiger, da die Synchronmaschine bei Übererregung Blindleistung zur Verfügung stellen kann.

##### 4.1 Direktumrichter

Ein Direktumrichter für Synchronmaschinen hat den gleichen Aufbau wie für Asynchronmaschinen, so dass die in Fig. 2 angegebenen Schaltungen auch für Synchronmaschinen gelten. Dadurch, dass die Kommutierungsenergie vom Netz und von der Synchronmaschine geliefert werden kann, ist kein Phasenwinkel zwischen Strangspannung und -strom vorgeschrieben; jeder Winkel ist möglich und damit ein Vierquadrantenantrieb leicht durchführbar. Direktumrichtergespeiste Synchronmaschinen sind wie die Asynchronmaschinen nur bei grossen Leistungen wirtschaftlich. Bei Synchronmaschinen kann aber die Wirtschaftlichkeit durch eine geregelte Erregung, die den Phasenwinkel zu Null macht, noch erhöht werden.

Die Frequenz bzw. die Zündimpulse des Umrichters werden in den bisher gebauten Anlagen mit Hilfe einer an die Maschine angekuppelten Taktgebermaschine, die die Polradlage angibt, direkt aus der Drehzahl abgeleitet. Dadurch ist es möglich, allein über die Stromsollwertvorgabe bei der Stromregelung, die das Beschleunigungsmoment beeinflusst, die

Drehzahl zu steuern. Anlaufprobleme gibt es nicht. Auf Grund dieses Steuerprinzips, das die Ständerfrequenz in direkter Abhängigkeit aus der Drehzahl bildet, sind die bei einer Synchronmaschine im allgemeinen auftretenden Pendelungen nicht möglich; ein Kippmoment ist ebenfalls nicht vorhanden. Die Dämpferwicklung hat demzufolge nur die Aufgabe, Oberwellenfelder im Luftspalt, die auf Grund der nichtsinusförmigen Spannungen und Ströme entstehen, zu dämpfen. Sie kann deshalb bei Stromregelung mit einer Sinusform auch weggelassen werden. Auf Grund der gekoppelten Drehzahl-/Stromregelung erhält die Synchronmaschine ein Verhalten, das dem in der klassischen Theorie der Synchronmaschinen beschriebenen Verhalten nicht mehr sehr ähnlich ist (s. auch Abschnitt 4.2).

Direktumrichtergespeiste Synchronmaschinen haben sich bei Mahlanlagen im Bereich um 5 MW und 0 bis 15 U./min<sup>-1</sup> in Zementmühlen sehr bewährt [23; 24]. Bisher konnten Mühlen in diesem Leistungsbereich wegen des geringen Wirkungsgrades der notwendigen Getriebe nicht gebaut werden.

##### 4.2 Umrichter mit variabler Zwischenkreisgleichspannung

Bei Speisung einer Synchronmaschine über einen Umrichter mit Gleichstromzwischenkreis, wie er in Fig. 6 dargestellt ist, kann der Wechselrichter wesentlich einfacher aufgebaut werden als der entsprechende bei einer Asynchronmaschine, da die Kommutierungsblindleistung nicht aus Löschkondensatoren entnommen werden muss. Bei dieser Schaltung muss nur durch Übererregung der Synchronmaschine sichergestellt werden, dass der Phasenwinkel zwischen Strangspannung und -strom immer kapazitiv ist – wodurch auch die Freilaufdioden entfallen –, da sonst die Ventile nicht mehr gesperrt werden können. Die Spannungsanpassung an die Frequenz bzw. Drehzahl erfolgt über die Steuerung der Wechselrichtereingangsspannung  $U_{d\alpha}$ , da wegen der fehlenden Löschkreise ein Pulsen der Wechselrichterausgangsspannung bei konstanter Wechselrichtereingangsspannung nicht möglich ist. Eine Schaltung nach Fig. 3 wäre unwirtschaftlich.

Dem Zwischenkreis bei umrichtergespeisten Synchronmaschinen fehlt häufig der Kondensator als Glättungsglied. Dadurch wird der Maschine nicht eine Spannung, sondern ein Strom eingeprägt, so dass sich die Spannung frei ausbildet und nahezu sinusförmig wird. Der Strom in den Maschinenwicklungen erhält eine Rechteckform. (Ein Zwischenkreis mit überwiegend kapazitiver Glättung sollte Gleichspannungszwischenkreis, ein Zwischenkreis mit überwiegend induktiver Glättung Gleichstromzwischenkreis genannt werden.)

Auf Grund einer unterschiedlichen Frequenzvorgabe unterscheidet man zwei Betriebsarten der umrichtergespeisten Synchronmaschine. Bei einer von der Polradlage der Maschine abhängigen Frequenzvorgabe (Schalterstellung a in Fig. 6) erhält man den «Stromrichtermotor», bei einer von der Maschine unabhängigen Vorgabe (Schalterstellung b) den «Stromrichtersynchronmotor» – zwei Bezeichnungen, die sich einzubürgern beginnen. Im ersten Fall ist der Motor eigengetaktet, im zweiten fremdgetaktet.

Das Betriebsverhalten der beiden Motoren ist grundsätzlich verschieden. Der Stromrichtersynchronmotor verhält sich wie ein Synchronmotor am Netz und neigt zu Pendelungen; seine Drehzahl wird von aussen fest vorgegeben. Der

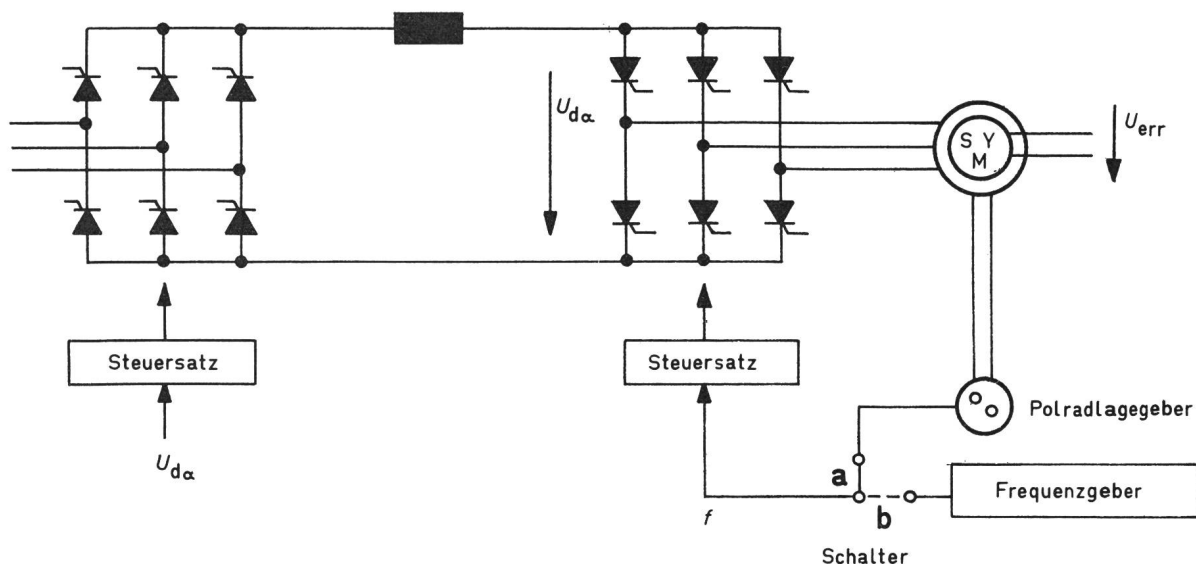


Fig. 6

**Umrichtergespeiste Synchronmaschine**

Schalterstellung a: Stromrichtermotor  
 Schalterstellung b: Stromrichtersynchronmotor

$U_{err}$  Erregergleichspannung  
 $U_{d\alpha}$  Wechselrichtereingangsspannung  
 $f$  Ständerfrequenz

Stromrichter motor zeigt das Verhalten einer Gleichstromnebenschlussmaschine, da die Drehzahl bei konstanter Zwischenkreisspannung und Erregerspannung mit zunehmender Belastung wie bei der Gleichstrommaschine sinkt. Der vom Polradlagegeber getaktete Wechselrichter bildet zusammen mit dem Geber einen «elektronischen Kommutator». Die Erregerdurchflutung und die Ankerdurchflutung haben durch die von der Polradlage her bestimmte Weiterschaltung des Ständerstromes zwischen den Phasen immer eine konstante Lage im Luftspalt zueinander. Eine genauere Beschreibung, die hier aus Platzgründen nicht möglich ist, ist u.a. in [25] enthalten. Der Stromrichter motor ist damit nur wegen seines Aufbaus eine Synchronmaschine.

Eine Drehzahlregelung des Stromrichter motors wird wie bei der Gleichstrommaschine durch Einwirkung auf den Stromsollwert einer unterlagerten Stromregelung durchgeführt, die wiederum auf die Zwischenkreisgleichspannung  $U_{d\alpha}$  durch Änderung des Ansnchnittwinkels des Gleichrichters einwirkt.

Da bei niedrigen Drehzahlen die Maschinenspannung nicht zur Kommutierung ausreicht, sind beide Motoren in ihrer Drehzahl nach unten hin begrenzt. Aus diesem Grunde muss auch eine besondere Anlaufhilfe vorgesehen werden. Sie kann ausser mit einem Anwurfmotor oder einem Anlauftransformator auch durch eine geeignete zusätzliche Steuerung des Ansnchnittwinkels des Gleichrichters erfolgen [25; 28].

Stromrichter motoren und Stromrichtersynchronmotoren werden in jedem Leistungsbereich bei Drehzahlen, die über einer minimalen Drehzahl liegen, universell eingesetzt. Bei Einbau einer rotierenden Gleichrichter erregung (Abschnitt 4.4) sind sie in der gleichen Weise wartungsfrei wie Asynchronmaschinen. Eine Drehzahlreversierung ist leicht möglich, ebenso der Generatorbetrieb bei Beibehaltung der Stromrichtung im Zwischenkreis.

*4.3 Umrichter für Reluktanz- und Hysteresemotoren*

Bei Reluktanz- und Hysteresemotoren ist die Erregung nicht wie bei den anderen Synchronmaschinen steuerbar. Sie nehmen einen induktiven Strom auf und können deshalb nicht Kommutierungsenergie zur Verfügung stellen. Die Wechselrichter in den Umrichtern mit Zwischenkreis – Direktumrichter werden nicht verwendet – müssen deshalb, wie für die Asynchronmaschinen in Abschnitt 3.3 und 3.4 beschrieben, selbstgeführt sein. Da es sich in den meisten Fällen nur um Motoren kleiner und kleinster Leistungen handelt, kann auch durch Parallel- bzw. Reihenschaltung von Kondensatoren zu den Motoren der Wechselrichterausgangstrom kapazitiv gemacht werden.

Reluktanz- und Hysteresemotoren eignen sich sehr gut für Gruppenantriebe mit Motoren kleiner Leistung und hohen Drehzahlen, besonders dann, wenn auf Gleichlauf sehr grosser Wert gelegt wird. Sie werden deshalb vor allem in der Textilindustrie und z. B. bei der Urananreicherung nach dem Zentrifugenverfahren [26] verwendet.

*4.4 Gleichrichter im Läuferkreis*

Eine Gleichrichterschaltung ist normalerweise bei jeder Synchronmaschine im Erregerkreis vorgesehen, wenn nur ein Drehstromnetz zur Verfügung steht. Um die Erregerenergie schleifringlos in den Läufer zu übertragen, sind die Läufer entweder so auszubilden, dass die Erregerwicklung im Stator untergebracht werden kann, wie z. B. bei der Klauenpolmaschine oder dem Simotron-Antrieb der Siemens-AG, oder die Gleichrichtung darf erst im Läufer in einer rotierenden Gleichrichterschaltung – RG-Erregung – erfolgen. Im letzteren Fall ist eine transformatorische Energieübertragung in den Läufer notwendig, die auf verschiedene Arten möglich ist [27]. Die schleifringlose Erregung von Synchronmaschinen gewinnt mit zunehmender Verteuerung der Wartungsarbeiten an Bedeutung.



## 5. Bemessung stromrichter gespeister Drehfeldmaschinen

Durch die nichtsinusförmigen Spannungen und Ströme entstehen Pendelmomente und Zusatzverluste, die bei sinusförmiger Speisung nicht auftreten. Die Höhe der Pendelmomente und Zusatzverluste hängt von der Stromrichterschaltung und vom Betriebszustand der Maschine ab. Gewöhnlich sind die Zusatzverluste im Nennzustand am geringsten und nehmen mit abnehmender Belastung relativ und oft auch absolut zu. Wegen des dadurch ungünstigeren Leistungsfaktors ist ein Motor, der von einem Stromrichter gespeist wird, um etwa 10 % grösser als bei rein sinusförmiger Speisung auszulegen.

Untersuchungen über die Auswirkungen der Oberwellen auf das Maschinenverhalten als auch auf die Wicklungsauslegung sind aktuell und noch nicht abgeschlossen. Auch Rückwirkungen auf das Versorgungsnetz werden diskutiert.

## 6. Vergleich Drehfeldmaschine – Gleichstrommaschine

Wegen des grösseren Aufwandes an Stromventilen und Steuerelektronik sind die stromrichter gespeisten Drehfeldmaschinen gegenüber den Gleichstrommaschinen im Nachteil. Der kostenmässig höhere Aufwand wird in vielen Fällen auch nicht durch die geringeren Kosten der Maschinen selbst aufgehoben, so dass normalerweise der Kaufpreis die Entscheidung zugunsten der Gleichstrommaschine bestimmen wird. Nur dort, wo die Gleichstrommaschine wegen des Erreichens von Grenzbedingungen nicht mehr oder nur bei hohem konstruktivem Aufwand eingesetzt werden kann, ist ihr die stromrichter gespeiste Drehfeldmaschine auch wirtschaftlich überlegen. Die Grenzbedingungen werden bestimmt durch:

### 1. Maximalen Kommutatorstrom:

Kommutatoren können nicht beliebig gross mit beliebig vielen Bürsten gebaut werden.

### 2. Maximale Drehzahl:

Wegen der begrenzten Kommutatorumfangsgeschwindigkeit sind Drehzahlen über etwa  $10\,000\text{ min}^{-1}$  bei 100 kW bzw. über etwa  $1000\text{ min}^{-1}$  bei 2,5 MW nicht erreichbar [4].

### 3. Maximale Beschleunigung:

Das Schwungmoment ist etwa doppelt so gross wie bei einer Asynchronmaschine gleicher Leistung.

### 4. Geringes Leistungsgewicht:

Asynchronmaschinen gleicher Leistung sind leichter und brauchen weniger Raum und kleinere Fundamente.

### 5. Wartungsaufwand:

Der Kommutator erfordert mehr Wartung und verringert die Betriebssicherheit.

### 6. Explosionsgefahr:

Der konstruktive Mehraufwand für explosionsgeschützte Motoren ist wegen der möglichen Funkenbildung am Kommutator sehr gross.

### 7. Geringe Gleichlaufeigenschaften mehrerer Motoren:

Der Gleichlauf von parallelgeschalteten Synchronmotoren ist naturgemäss wesentlich grösser. Er kann nur durch einen hohen Regelungsaufwand bei Gleichstrommaschinen erreicht werden.

Der wirtschaftliche Einsatz von stromrichter gespeisten Drehfeldmaschinen wird in Zukunft im wesentlichen durch die Preise der Bauelemente im Stromrichter und die Vertrautheit der Entwickler von Steuerelektronikschaltungen mit den Eigenschaften der frequenzgesteuerten Drehfeldmaschinen bestimmt. Auch der Gesichtspunkt der Wartungsfreiheit wird zunehmend an Bedeutung gewinnen.

## 7. Zusammenfassung

Es werden die möglichen und bisher auch angewendeten Stromrichterschaltungen zur Drehzahlsteuerung von Asynchron- und Synchronmaschinen aufgeführt und ihre Eigenschaften kurz erläutert. Auf Grund der zahlreichen Schaltungsvarianten kann mit Hilfe einer geeigneten Steuerung den Drehfeldmaschinen jedes gewünschte Drehmoment-Drehzahl-Verhalten aufgezwungen werden, so dass sie universell eingesetzt werden können. Sie gewinnen zunehmend an Bedeutung gegenüber den stromrichter gespeisten Gleichstrommaschinen, deren Einsatz auf Grund des andersartigen mechanischen Aufbaus Grenzen gesetzt sind.

### Literatur

- [1] A. Dziwoki: Rotierende Frequenzumformer. Siemens Z. 30(1956)1, S. 42...49.
- [2] F. C. Williams a. o.: The logmotor — a cylindrical brushless variable-speed induction motor. Proc. IEE Part A: Power Engineering 108 (1961)38, p. 91...99.
- [3] F. C. Williams, E. R. Laithwaite and J. F. Eastham: Development and design of spherical induction motors. Proc. IEE Part A: Power Engineering 106(1959)30, p. 471...484.
- [4] M. Mader: Schnelllaufende Asynchronmaschinen. Siemens Z. 45 (1971)9, S. 590...594.
- [5] D. Naunin: Ein Beitrag zum dynamischen Verhalten der frequenzgesteuerten Asynchronmaschinen. Dissertation der Technischen Universität Berlin, 1968.
- [6] K. Heumann und C. Stumpe: Thyristoren. Eigenschaften und Anwendung. Stuttgart, Teubner Verlag, 1969.
- [7] Silizium-Stromrichter-Handbuch. Baden, Brown Boveri & Cie. AG, 1971.
- [8] G. Möltgen: Netzgeführte Stromrichter mit Thyristoren. Einführung in die Wirkungsweise und Theorie. Berlin/München, Siemens AG, 1967.
- [9] M. Meyer und G. Möltgen: Thyristoren in der technischen Anwendung. Bd. 1: Stromrichter mit erzwungener Kommutierung. Berlin/München, Siemens AG, 1967.
- [10] M. Michel: Die Strom- und Spannungsverhältnisse bei der Steuerung von Drehstromlasten über antiparallele Ventile. ETZ-A 88(1967)10, S. 244...249.
- [11] G. Spatz: Statisches und dynamisches Betriebsverhalten eines über einen Drehstromsteller gespeisten Drehstrom-Asynchronmotors. Dissertation der Technischen Universität Karlsruhe, 1970.
- [12] R. Heck und M. Meyer: Die asynchrone Umrichtermaschine, ein kontaktloser, drehzahlregelbarer Umkehrantrieb. Siemens Z. 37(1963)4, S. 287...290.
- [13] B. Anniés: Steuerumrichter für Käfigläufermotoren. AEG-Mitteilungen 54(1964)1/2, S. 123...125.
- [14] L. Abraham, K. Heumann und F. Koppelman: Wechselrichter zur Drehzahlsteuerung von Käfigläufermotoren. AEG-Mitt. 54(1964)1/2, S. 89...106.
- [15] A. Schöning und H. Stemmler: Geregelter Drehstrom-Umkehrantrieb mit gesteuertem Umrichter nach dem Unterschwingungsverfahren. BBC Nachrichten 46(1964)12, S. 699...721.
- [16] K. Heintze, H. Tappeiner und M. Weibelzahl: Pulswechselrichter zur Drehzahlsteuerung von Asynchronmaschinen. Siemens Z. 45(1971)3, S. 154...161.
- [17] D. Naunin: Der Einfluss der Läuferfrequenz auf das Drehmomentverhalten von frequenzgesteuerten Asynchronmaschinen. Bull. SEV 61 (1970)3, S. 118...123.
- [18] H. Stemmler: Steuerverfahren für ein- und mehrpulsige Unterschwingungswechselrichter zur Speisung von Kurzschlussläufermotoren. Dissertation der Technischen Hochschule Aachen, 1970.
- [19] D. Naunin: Berechnung des Drehmomentverlaufes einer Asynchronmaschine bei Speisung mit gepulsten Rechteckspannungen. Bull. SEV 62(1971)18, S. 879...884.
- [20] P.-G. Sperling: Die umrichter gespeiste Asynchronmaschine im Betrieb mit eingepägten Rechteckströmen. Siemens Z. 45(1971)8, S. 508...514.
- [21] U. Patzschke: Zwangskommutierte Stromrichterventile als elektronische Regelschalter im Läuferkreis der Asynchron-Schleifringläufermaschine. Dissertation der Technischen Hochschule Hannover, 1971.
- [22] A. Safacas: Untersuchung des stationären und dynamischen Betriebsverhaltens einer Drehstromasynchronmaschine mit Läuferstromregelung über Stromrichter. Dissertation der Technischen Universität Karlsruhe, 1971.
- [23] H. Stemmler: Speisung einer langsamlaufenden Synchronmaschine mit einem direkten Umrichter. VDE-Fachtagung Elektronik 1969. Generalthema: Elektronik in der Energietechnik. S. 177...189.
- [24] D. Riehlein: Getriebeloser Antrieb für eine Zementmahlanlage. Siemens Z. 45(1971)4, S. 189...191.
- [25] A. Haböck: Speisung von Synchronmaschinen über Umrichter mit eingepägtem Strom im Zwischenkreis. VDE-Fachtagung Elektronik 1969. Generalthema: Elektronik in der Energietechnik. S. 163...175.
- [26] A. Boehringer: Ein neues Umrichtersystem zur Speisung von Mittelfrequenzmotoren. ETZ-A 93(1972)1, S. 8...15.
- [27] G. Kracke: Rotierende Stromrichterregung von Synchronmotoren, Blindleistungsmaschinen und Stromrichtermotoren. Siemens Z. 44 (1970)5, S. 305...309.
- [28] M. Depenbrock: Fremdgeführte Zwischenkreisumrichter zur Speisung von Stromrichtermotoren mit sinusförmigen Anlaufströmen. ETZ-A 87(1966)26, S. 945...951.

### Adresse des Autors:

Prof. Dr.-Ing. D. Naunin, II. Institut für allgemeine Elektrotechnik der Technischen Universität Berlin, Einsteinufer 19, D-1 Berlin 10.