

Selbstgeführter Zwischenkreis-umrichter mit eingepprägtem Strom für Drehstrom-Asynchronmotoren

Wolfgang Landeck und Ulrich Putz

Es wird ein selbstgeführter Umrichter für Asynchronmotoren beschrieben, der sich durch eine einfache Stromrichter-schaltung auszeichnet. Diese Schaltung ist in der Lage, den Motor in allen vier Quadranten zu betreiben. Die Kommutierung des Umrichters wird näher behandelt und die Beanspruchung der Halbleiterventile angegeben. Oszillogramme und Kennlinien, die an ausgeführten Beispielen aufgenommen wurden, bestätigen die theoretischen Überlegungen.

1 Allgemeines

Die bekannteren Umrichterschaltungen – wie beispielsweise der AEG-Pulsumrichter und der Umrichter Semiverter® [1] – haben alle einen Gleichspannungs-Zwischenkreis. Die Gleichspannung wird durch einen Zwischenkreiskondensator im interessierenden Frequenzbereich konstant gehalten, der Maschine wird eine Spannung aufgeschaltet und die Amplitude sowie die Phasenlage des Stromes stellen sich dann je nach Belastung des Motors ein. Im Gegensatz hierzu läßt sich der Zwischenkreis auch als Gleichstrom-Zwischenkreis ausbilden. In ihm wird der Gleichstrom durch eine Glättungsdrossel nahezu konstant gehalten, in die Maschine wird ein Strom

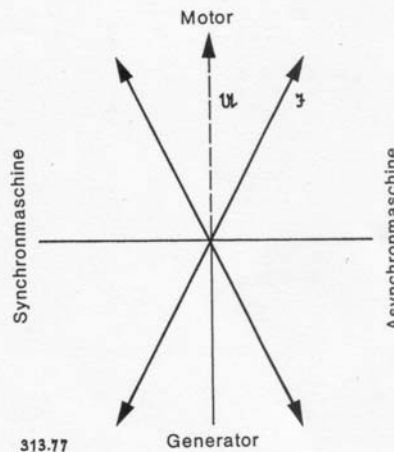


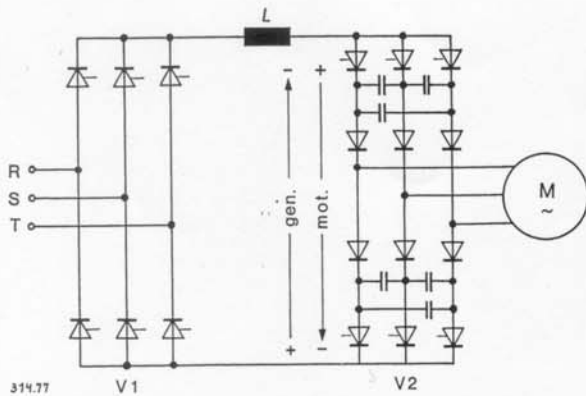
Bild 1. Betriebsquadranten der stromrichter-gespeisten Synchron- und Asynchronmaschine

eingepragt, und die Amplitude sowie die Phasenlage der Spannung stellen sich je nach Belastung ein.

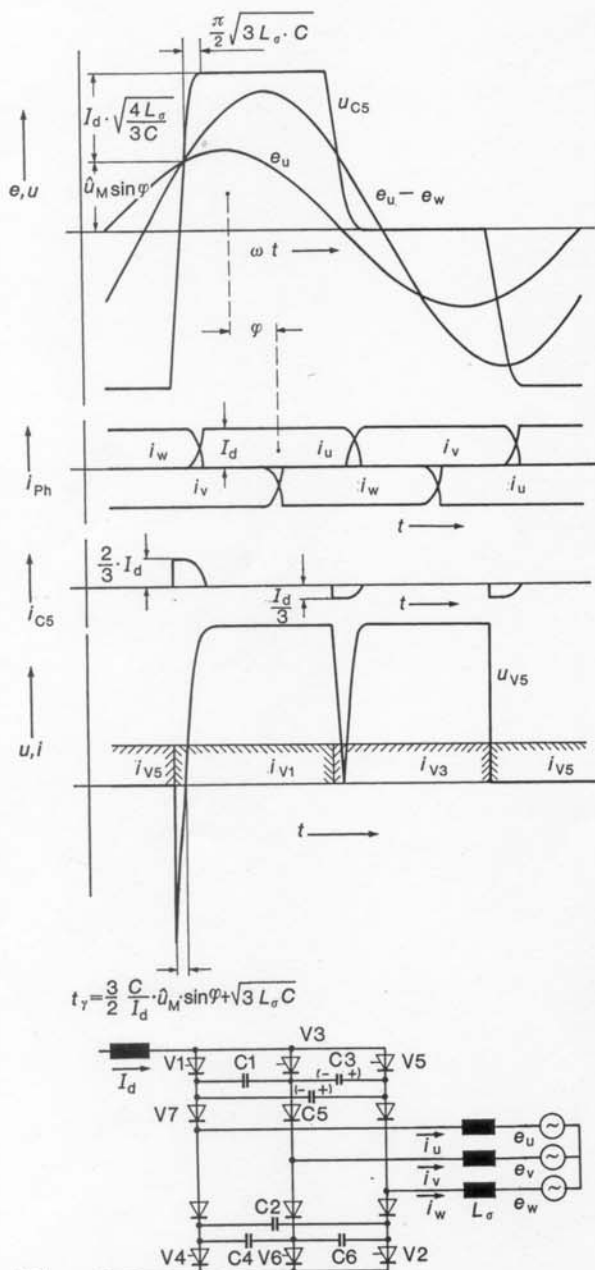
Der Umrichter arbeitet also ähnlich wie ein Stromrichter-motor synchroner Bauart, nur in den beiden anderen Quadranten der komplexen Ebene der elektrischen Zeiger: der Strom eilt der Spannung immer nach. Um eine Kommutierung zu ermöglichen, muß der Umrichter durch eine Löschschtaltung ergänzt werden. Bild 1 zeigt die Betriebsquadranten des Umrichters mit eingepprägtem Zwischenkreisstrom bei Belastung mit einer Asynchronmaschine und im Vergleich dazu mit einer Synchronmaschine [2] – bürstenloser (BL)-Motor – im Zeigerdiagramm.

2 Schaltung des Umrichters

Bild 2 zeigt die Umrichterschaltung mit eingepprägtem Zwischenkreisstrom zur Speisung eines Asynchronmotors mit variabler Frequenz. Diese Schaltung zeichnet sich dadurch aus, daß sie einen geringen Aufwand an steuerbaren Halbleiterventilen erfordert. Sie besteht aus einem Netzstrom-



314.77
Bild 2. Schaltung des Umrichters mit eingepprägtem Strom
V 1 Netzstromrichter L Zwischenkreisdrossel V 2 Wechselrichter



315.77

richter, dem Gleichstrom-Zwischenkreis, hier eine einfache Drosselspule, dem Wechselrichter mit sechs Thyristoren, sechs Kommutierungskondensatoren und sechs Blockdioden; letztgenannte haben die Aufgabe, die Kommutierungskondensatoren vom Motor zu entkoppeln. Da sich in dieser Schaltung die Phasenlage zwischen Motorstrom und -spannung selbsttätig je nach Belastung einstellt, ist der Umrichter auch in der Lage, Energie zurückzuspeisen: bei generatorischem Schlupf der Asynchronmaschine, $s < 0$, stellt sich ein Phasenwinkel $\varphi > 90^\circ$ ein; das hat zur Folge, daß die Zwischenkreisspannung ihre Polarität wechselt, so daß bei gleichbleibender Stromrichtung der Netzstromrichter im Wechselrichterbetrieb Energie in das Netz zurückspeist.

2.1 Kommutierung des Wechselrichters

Wie in Bild 3 angedeutet, wird der Gleichstrom I_d derart über den Wechselrichter auf die Phasen des Motors geschaltet, daß in jede Phase 120° -lange Stromblöcke eingepragt werden. Zum Umschalten des Gleichstroms sind die sechs Kommutierungskondensatoren notwendig, die beim Zünden des Folgethystor den Strom übernehmen und an den stromabgebenden Thyristor kurzzeitig eine negative Sperrspannung legen. Da der Kommutierungsvorgang von grundlegender Bedeutung für die Funktion des Wechselrichters ist, soll auf ihn näher eingegangen werden.

Betrachtet sei die Kommutierung des Gleichstromes I_d von Thyristor V 5 auf V 1. Der Kondensator C 5 sowie die Reihenschaltung der Kondensatoren C 1 und C 3 sind in der in Bild 3 eingetragenen Polarität aufgeladen. Sobald V 1 gezündet wird, übernimmt V 1 den Strom schlagartig, C 5 übernimmt zwei Drittel des Stromes I_d , während das restliche Drittel über die Reihenschaltung von C 1 und C 3 fließt und die Kondensatoren zeitlinear umlädt. Steigt die Kondensatorspannung über den Momentanwert der verketteten induzierten Spannung, so wird die Diode V 7 leitend, und der Strom in der Phase u steigt an, während er in der Phase w im selben Maß abnimmt, da die Summe aus beiden den konstant angenommenen Strom I_d ergeben muß. Der Übergang des Stromes von Phase w auf u vollzieht sich wegen der Induktivitäten in Form einer Schwingung mit der Kreisfrequenz

$$\omega_e = \frac{1}{\sqrt{2 L_\sigma \cdot \frac{3}{2} C}} = \frac{1}{\sqrt{3 L_\sigma C}}$$

wobei sich die Kondensatoren um den Betrag

$$\Delta U_c = I_d \cdot Z_o = I_d \cdot \sqrt{\frac{2 L_\sigma}{\frac{3}{2} C}} = I_d \cdot \sqrt{\frac{4 L_\sigma}{3 C}}$$

überladen.

In den Formeln für die Eigenfrequenz und Schwingimpedanz treten die Werte $2 L_\sigma$ und $3 C/2$ auf, da die Reihenschaltung zweier Induktivitäten und die Dreieckschaltung der Kondensatoren den Schwingkreis bestimmen.

In Bild 3 ist der Verlauf der elektrischen Größen während der Kommutierung dargestellt. Man erkennt, daß sich die Kondensatorspannung aus einem der Motorspannung proportionalen Anteil $e_u - e_w$ und einem stromabhängigen Anteil $I_d \cdot Z_o$ zusammensetzt; selbst bei kleinen Werten der Maschinenspannung – im Grenzfall Null im Stillstand – laden sich die Kondensatoren noch auf einen für die Kommutierung ausreichend hohen Wert auf. Listenmäßige Asynchronmaschinen weisen immer eine derart hohe Streuinduktivität auf, daß die Kommutierungskondensatoren nach dem Gesichtspunkt der Kondensatorüberladung und nicht dem der

Bild 3 (links). Verlauf der elektrischen Größen

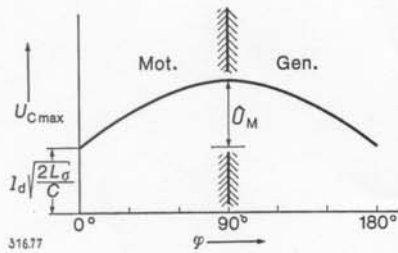


Bild 4. Verlauf der maximalen Kondensatorspannung in Abhängigkeit vom Verschiebungswinkel φ der Maschine

Schonzeit der Thyristoren dimensioniert werden müssen. Die Kapazitäten müssen wesentlich größer sein, als sie in Umrichtern mit Gleichspannungs-Zwischenkreis sind. Je nach Streuung der Maschine wird man die sechs- bis zehnfache Kapazität installieren müssen. Solch große Kapazitäten ergeben aber gleichzeitig große Schonzeiten, so daß in den meisten Fällen – von Anwendungsfällen mit hohen Frequenzen abgesehen – gewöhnliche Thyristoren für den Netzbetrieb mit relativ hoher Freiwerdezeit, jedoch hohem Sperrvermögen verwendet werden können.

2.2 Beanspruchung der Halbleiterventile

Wie aus Bild 3 zu entnehmen ist, werden die Thyristoren sowohl in positiver als auch in negativer Richtung mit der Kondensatorspannung beansprucht.

Die Strombelastung beträgt im arithmetischen Mittel $I_d/3$, wobei jedoch bei niedrigen Frequenzen die thermische Zeitkonstante des Thyristors beachtet werden muß.

Die Ein- und Ausschaltverluste sind wegen der hohen di/dt -Beanspruchung zu berücksichtigen und gegebenenfalls durch den Einbau linearer oder Stufendrosseln in dem Kommutierungskreis zu reduzieren. Die Blockdioden werden ebenfalls mit $I_d/3$ belastet, jedoch treten an ihnen hohe Spannungen auf. Diese Beanspruchungen ergeben sich aus der Tatsache, daß an ihnen die Summe aus Motor- und Kondensatorspannung liegt. Diese Summe ist im generatorischen Betrieb am höchsten und kann den doppelten Wert der Kondensatorspannung erreichen.

2.3 Beanspruchung des Motors

Der Motor wird mit einem Gesamteffektivwert belastet, der

$$I_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_d \text{ beträgt.}$$

Die Grundschiwingung der 120°-langen Stromblöcke beträgt

$$I_{1 \text{ eff}} = \frac{3}{\pi} \cdot I_{\text{eff}} .$$

Nur diese ist für die Leistungsbildung maßgebend, so daß der Gesamtleistungsfaktor

$$\lambda = \frac{3}{\pi} \cdot \cos \varphi \text{ wird.}$$

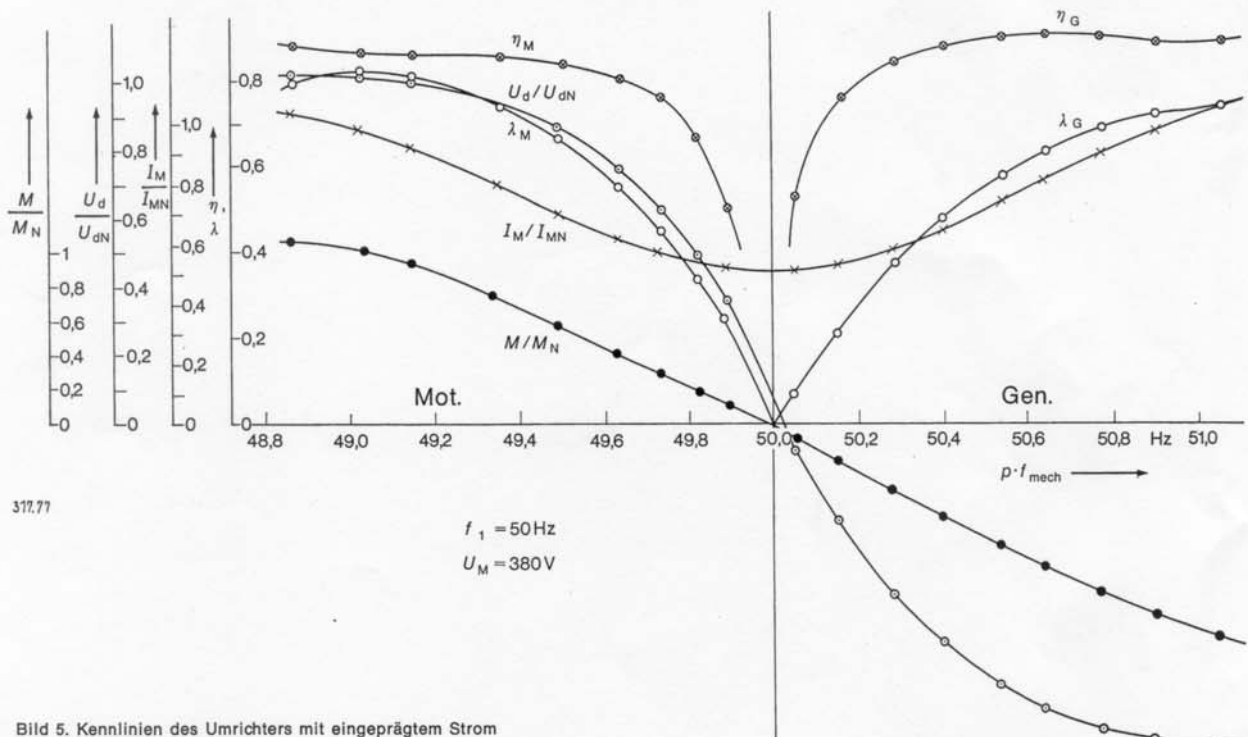
$\cos \varphi$ ist der aus den Listen zu entnehmende Verschiebungsfaktor.

In dieser Schaltung werden, unter Vernachlässigung der Stromverdrängung, in der Maschine die $\pi^2/3^2 = 1,1$ -fachen Verluste auftreten, oder man kann bei gleichen Gesamtverlusten die Maschine nur mit 95 % ihrer Leistung betreiben. Berücksichtigt man die Stromverdrängung, so wird man je nach Läuferart den Strom weiter herabsetzen müssen. Weitere Aussagen hierüber sind nur bei genauer Kenntnis der Wirbelstromverhältnisse der Maschine möglich; als Anhaltswert mag jedoch für übliche Listensmotoren mit Doppelkäfig eine Reduktion der Leistung auf 90 % gelten. Im Gegensatz zur Speisung über Umrichter mit eingepprägter Spannung, bei der der Oberschwingungsgehalt stark von der Streuung (Anlaufstrom) der Maschine abhängt, wird hier jeder Motor mit einem definierten Oberschwingungsspektrum, unabhängig von seinen Streuwerten, belastet:

$$I_{\nu \text{ eff}} = \frac{1}{\nu} \cdot I_{1 \text{ eff}} \text{ mit } \nu = 5, 7, 11, 13 \dots (6n \pm 1).$$

3 Leistungserhöhung durch Betrieb mit höheren Frequenzen

Schaltet man einen Listensmotor 380 V, 50 Hz von Stern in Dreieck um, so beträgt seine Klemmenspannung bei 50 Hz nur 220 V. Durch weiteres Steigern von Frequenz und Span-



317.77

$f_1 = 50 \text{ Hz}$
 $U_M = 380 \text{ V}$

Bild 5. Kennlinien des Umrichters mit eingepprägtem Strom

nung über den Umrichter läßt sich seine Spannung auf 380 V bei 86,6 Hz erhöhen, wobei der Motor dann immer noch mit Nennfluß betrieben wird. Die Maschine kann also bei 173 % der Drehzahl noch das Nennmoment abgeben, was einer Leistungserhöhung auf ebenfalls 173 % entspricht. Eine weitere Erhöhung der Frequenz – ohne die Spannung zu erhöhen – führt den Motor in den Feldschwächbereich bei konstanter Leistung, wobei vorausgesetzt werden muß, daß diese Drehzahlsteigerungen mechanisch zulässig sind.

4 Betriebskennlinien

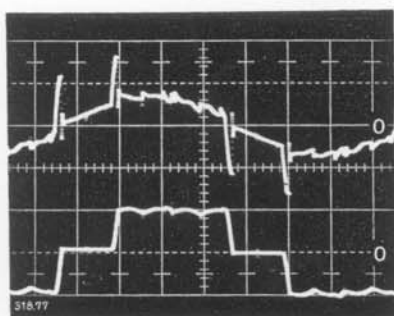
Bild 5 zeigt den Verlauf von Drehmoment, Zwischenkreisspannung und Motorstrom über der mechanischen Drehfrequenz des Läufers. Die geprüfte Maschine wurde hierbei mit Nennfluß betrieben. Man erkennt aus dem Verlauf des Stromes, daß im Leerlauf noch der Magnetisierungsstrom fließt, die Zwischenkreisspannung aber bis auf einen kleinen Anteil zur Deckung der Verluste nahezu verschwindet. Die Kurvenzüge für den Wirkungsgrad η und den totalen Leistungsfaktor λ wurden aus den Motordaten, Gleichspannung und -strom

im Zwischenkreis errechnet, wobei die Verluste im Wechselrichter berücksichtigt wurden.

In Bild 6 sind einige Oszillogramme der elektrischen Größen an einem Umrichter 380 V, 60 kW aufgenommen. Die Oszillogramme bestätigen im wesentlichen die theoretischen Verläufe aus Bild 3.

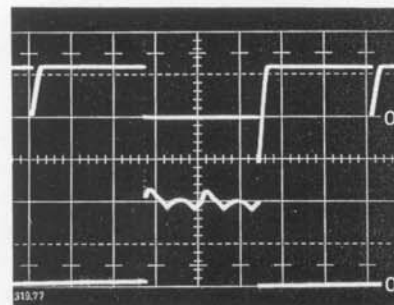
5 Zusammenfassung

Der Zwischenkreisumrichter mit eingepprägtem Strom eignet sich vorzüglich zur Speisung von Asynchronmaschinen. Er wird vorwiegend dort Verwendung finden, wo der Käfigläufermotor als verschleißarmer, robuster und bürstenloser Antrieb Vorteile gegenüber der Gleichstrommaschine bietet. Obwohl der Stromrichter durch die Selbstkommutierung teurer ist als ein Stromrichter für die Gleichstrommaschine, steht diesen Mehrkosten ein erheblich billigerer Motor gegenüber. Als Anwendungsgebiet seien vor allem Lüfter, Pumpen, Zentrifugen, Extruder in der chemischen Industrie, Antriebe für Werkzeugmaschinen und Holzverarbeitende Industrie genannt.



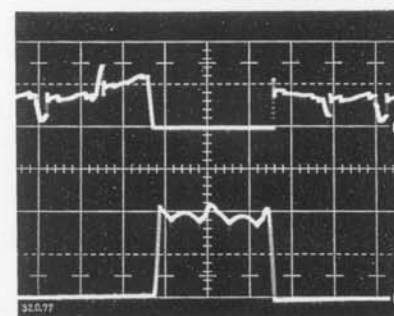
Motorphasenspannung

Motorphasenstrom



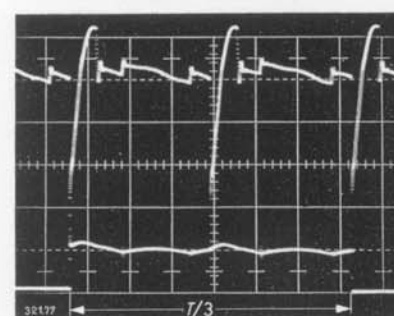
Thyristorspannung

Thyristorstrom



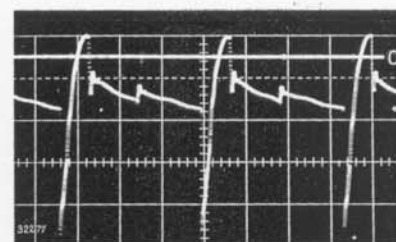
Diodenspannung

Diodenstrom

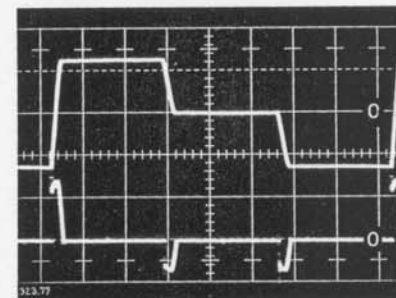


Zwischenkreisspannung

Thyristorstrom

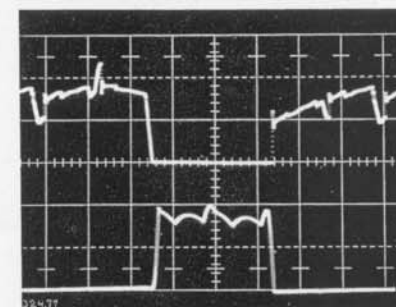


Zwischenkreisspannung



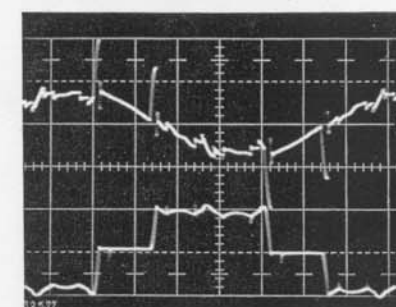
Kondensatorspannung

Kondensatorstrom



Diodenspannung

Diodenstrom



Motorphasenspannung

Motorphasenstrom

Bild 6. Oszillogramme der elektrischen Größen links: motorischer Betrieb rechts: generatorischer Betrieb

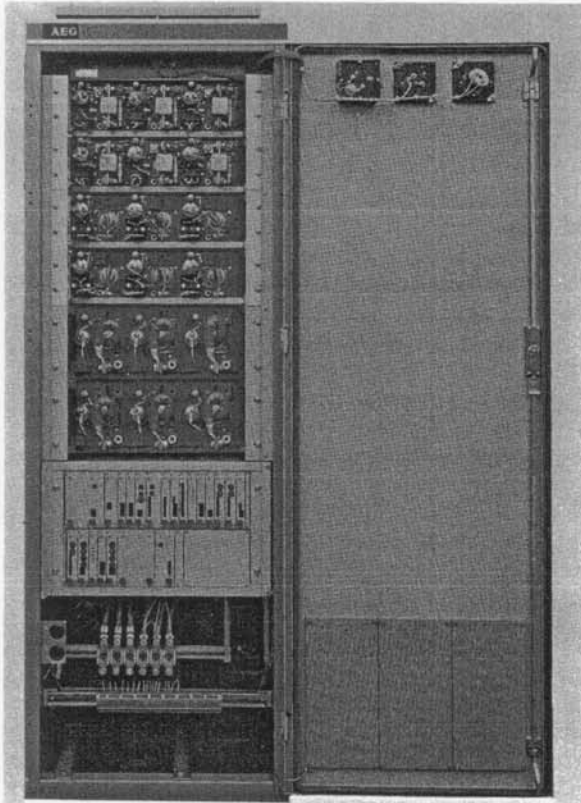


Bild 7. Aufbau eines Umrichters mit eingepägtem Strom, $3 \times 380 \text{ V}$, 60 kW , Abmessungen $600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm} \times 1800 \text{ mm}$

Gegenüber dem Zwischenkreisumrichter mit eingepägter Spannung weist der mit eingepägtem Strom folgende Vorteile auf:

Leistungsumkehr wird durch Spannungsumkehr im Zwischenkreis erreicht, daher ist kein Mehraufwand erforderlich; der Antrieb ist dem Gleichstromantrieb mit gegenparallel arbeitenden Stromrichtern gleichzusetzen.

Es können normale Thyristoren für Netzbetrieb verwendet werden.

Ein Zwischenkreiskondensator ist nicht erforderlich. Freilaufdioden entfallen.

Das Schutzproblem ist wesentlich entschärft, da kein Zwischenkreiskondensator existiert.

Im Umrichter treten keine zusätzlichen Schwingströme auf, die eine Vorbelastung der Halbleiterelemente ergeben.

Dem stehen folgende Nachteile gegenüber:

Der Umrichter ist nicht leerlaufest, d. h., er muß immer mit einer (bekannten) Maschine abgeschlossen sein.

Es fließen 120° -lange Stromblöcke in der Maschine; bei kleinen Frequenzen treten Rüttelmomente auf. Dieser Nachteil kann jedoch durch geeignetes mehrfaches Umschalten innerhalb einer Halbschwingung gemildert werden.

Speisung aus der Gleichspannungsschiene ist nur über Gleichstromsteller möglich.

Wegen der genannten Vorteile und vor allem wegen des kostengünstigen Motors ist zu erwarten, daß diese Umrichterart besonders im Bereich von 10 bis 500 kW breite Anwendung finden wird. Im Bereich unter 10 kW wird wohl der Transistorumrichter kostengünstiger sein, während über 500 kW der maschinenkommutierte Stromrichtermotor synchroner Bauart [2] mit seinem einfachen Stromrichter die preisgünstigere Antriebslösung darstellt.

E 44-B

Schrifttum

- [1] G. Beinhold u. K. Wegener: Semiverter®, ein Vierquadranten-Umrichter für Drehstrom-Rollgangmotoren. Techn. Mitt. AEG-TELEFUNKEN 67 (1977) 1, S. 6–11.
- [2] R. Saupe u. K. Senger: Maschinengeführter Umrichter zur Drehzahlregelung von Synchronmaschinen. Techn. Mitt. AEG-TELEFUNKEN 67 (1977) 1, S. 20–25.
- [3] K. Heumann u. K.-G. Jordan: Das Verhalten des Käfigläufermotors bei veränderlicher Speisefrequenz und Stromregelung. AEG-Mitteilung 54 (1964) 1/2, S. 107–116.
- [4] W. Farrer u. J. D. Miskin: Quasi-sine-wave-fully regenerative inverter. Proc. IEE 120 (1973) 9, S. 969–976.
- [5] F. Blaschke, H. Ripperger u. H. Steinkönig: Regelung umrichter gespeister Asynchronmaschinen mit eingepägtem Strom. Siemens-Zeitschrift 42 (1968) 9, S. 773–777.
- [6] Nopirakowski: Thyristorstromrichter für den Antrieb eines Turbomechanismus mit einer Leistung von $3,5 \text{ MW}$. Elektrie 26 (1972) 12, S. 286.
- [7] H. Münzing: Für konstantes Drehmoment, ein Zwischenkreisumrichter mit eingepägtem Strom. Elektrotechnik 57 (1975) 3, S. 10–13.
- [8] D. Schröder: Selbstgeführter Stromrichter mit Phasenlöschung und eingepägtem Strom. Elektrotechn. Z.-A. 96 (1975) 11, S. 520–523.