Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 77 (1986)

Heft: 23

Artikel: Das Verhalten des Stromrichter-Synchronmotors im Anlaufbereich

Autor: Tamagni, C.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904307

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 11.12.2025

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

Das Verhalten des Stromrichter-Synchronmotors im Anlaufbereich

C. Tamagni

Der Aufsatz befasst sich mit der Analyse einer umrichtergespeisten Synchronmaschine (Stromrichtermotor), wobei ein besonderes Gewicht auf dessen Verhalten bei sehr tiefen Drehzahlen gelegt wird. Nach einer einleitenden Beschreibung des Antriebes werden der natürlich kommutierende Betrieb, die möglichen Grenzen für die Anwendung der Taktung im Anlaufbereich und die Umschaltung beider Betriebsarten mittels Computersimulation und Labormessungen untersucht.

L'article analyse les caractéristiques d'un moteur synchrone alimenté par convertisseur de courant, spécialement dans la plage des faibles vitesses de rotation. Après la description de l'entraînement, une analyse détaillée du fonctionnement avec commutation naturelle, les limites d'utilisation de la pulsation de courant au démarrage et le changement entre ces deux modes de fonctionnement seront analysés au moyen d'une simulation et de mesures au laboratoire.

Adresse des Autors

Claudio Tamagni, Dipl. El.-Ing. ETH, Institut für Automatik und Industrielle Elektronik, ETH-Zentrum, 8092 Zürich.

1. Einleitung

Unter dem Begriff Stromrichter-Synchronmotor versteht man eine umrichtergespeiste Synchronmaschine mit Gleichstromzwischenkreis (Fig. 1). In dieser Figur ist eine sechspulsige Variante für die beiden Thyristorbrükken gewählt worden. Über den Netzstromrichter und die Drossel L_g im Zwischenkreis wird ein gesteuerter Gleichstrom i_g im Ankerkreis der Maschine eingeprägt. Die Drossel L_g dient der Glättung des Stromes i_g und entkoppelt die Oberwellen von u_{g1} und u_{g2}.

Durch eine geeignete Zündung der Thyristoren der maschinenseitigen Brücke ist es möglich, die Wicklungen der Synchronmaschine so zu schalten, dass ein Drehfeld erzeugt wird. Die Aufgabe dieser Brücke lässt sich mit dem Kommutator einer Gleichstrommaschine vergleichen, der die Ankerdurchflutung weiterschaltet, wobei in der Synchronmaschine Rotor und Stator vertauscht sind. Deswegen wird in der Literatur für den Stromrichtermotor auch der Name «Bürstenlose Gleichstrommaschine» verwendet.

Da der Maschine Ströme vorgegeben werden, bilden sich Klemmenspannungen aus, deren Kurvenverlauf je nach Belastung und Drehzahl sehr stark von der idealen Sinusform abweichen kann. Weil die Synchronmaschine im übererregten Zustand die nötige Kommutierungsblindleistung für die maschinenseitige Brücke liefert, kann diese, abgesehen vom speziellen Anfahrbereich, auch ohne Löscheinrichtungen betrieben werden.

Im Hinblick auf eine möglichst günstige Dimensionierung der Synchronmaschine wird die Brücke 2 mit dem Zündwinkel $\alpha_2 = 0$ oder an der Wechselrichterkippgrenze α_{2max} betrieben, so dass der Leistungsfaktor der Synchronmaschine optimal wird. Der

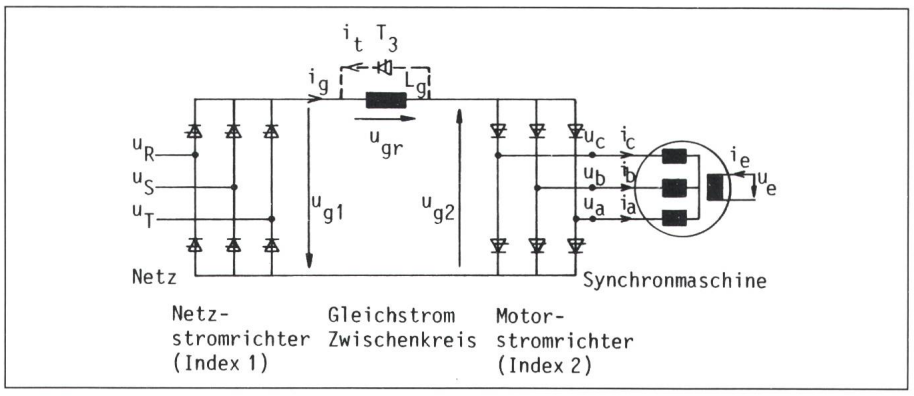


Fig. 1 Stromrichtermotor mit natürlich kommutierenden Thyristoren

L_g	Zwischenkreisinduktivität
T_3	Freilaufthyristor
u_R, u_S, u_T	Netzspannung
u_a, u_b, u_c	Maschinenspannung (Phasenspannung)
u_{g1}, u_{g2}	Zwischenkreisspannung
u_{gr}	Spannung über der Zwischenkreisinduktivität
u_e	Erregerspannung
i_a, i_b, i_c	Maschinenstrom
i_g	Zwischenkreisstrom
i_t	Strom im Freilaufthyristor T_3
i_e	Erregerstrom

Strom i_g (dem Drehmoment entsprechend) lässt sich mit dem Zündwinkel α_1 der Brücke 1 verändern.

1.1 Steuerung der Thyristorbrücken

Die netzseitige Brücke ist an einem starren Netz angeschlossen, so dass man ein gewöhnliches Zündgerät verwenden kann. Hingegen hängt die maschinenseitige Brücke an einem schwachen und verzerrten Netz (die Synchronmaschine), dessen Periodendauer und Spannungswert von der Drehzahl abhängig sind. Die Polradspannung einer Synchronmaschine ist proportional zur Drehzahl n. Bei niedrigen Drehzahlen, insbesondere im Stillstand, lassen sich daher die Zündimpulse für die Brücke 2 nicht von den Maschinenspannungen direkt ableiten. Deshalb müssen andere Steuerungsmethoden eingesetzt werden. In diesem Zusammenhang unterscheidet man zwischen fremd- und maschinengetakteten Stromrichterschaltungen.

Bei der *Fremdtaktung* erhält der Stromrichter einen externen Taktgeber, der den Kommutierungstakt und damit die Ausgangsfrequenz bestimmt. Die damit gespeiste Maschine zeigt das bekannte Verhalten am starren Netz. Sie kann z.B. bei Überlast ausser Tritt fallen. Die Drehzahl lässt sich variieren, indem die Clockfrequenz des Taktgebers langsam verändert wird (0,1–0,2 Hz/s) [1]. Diese Steuerungsmethode wird häufig eingesetzt, um Gasturbinen oder grosse Pumpen in Kraftwerken nach einem bestimmten Fahrplan langsam hochzufahren. Wird die Taktgebung in irgendeiner Weise von der Synchronmaschine abgeleitet (*maschinengetaktet*), so schaltet die Brücke 2 den Gleichstrom i_g erst dann auf eine Ankerwicklung, wenn das Polrad die erforderliche Stellung erreicht hat, d.h. wenn es um einen Winkel $2\pi/p$ (p: Pulszahl der Brücke) weitergelaufen ist. In diesem Fall kann die Synchronmaschine bei zunehmender Belastung nicht mehr kippen, da auch bei Überlast der nächste Thyristor nur gezündet wird, falls die erforderliche Polradlage erreicht ist. Als Polradgeber werden optische Scheiben mit einem binären Gray-Code (8–10 bit) oder ein parallel laufendes Synchronmaschinen-Modell [2] verwendet. Bezüglich dieser Referenz lassen sich die Zündimpulse mit einem Winkel α_2 beliebig einstellen. Mit Maschinentaktung werden Antriebe für den höheren Leistungsbereich (ab 500 kW) oder auch für die Traktion [3] realisiert.

1.2 Der Vierquadrantenbetrieb

Der Stromrichtermotor nach Figur 1 erlaubt durch geeignete Steuerung die Umkehrung des Leistungsflusses. Nach Definition arbeitet die Synchronmaschine im Motorbetrieb, wenn sie Energie aus dem Zwischenkreis bezieht. In diesem Fall arbeiten der Netz- und der Motorstromrichter entsprechend im Gleich- bzw. Wechselrichterbetrieb. Im generatorischen Betrieb vertauschen sich ihre Rollen. Weil die Brücke 2 entweder mit $\alpha_2 = 0$ oder an der Wechselrichterkippgrenze $\alpha_{2\max}$ betrieben wird, entstehen für den Zweiquadrantenbetrieb folgende Beziehungen:

Motorbetrieb	*Generatorbetrieb*
$u_{g1}>0 \quad 0<\alpha_1<90°$	$u_{g1}<0 \quad 90°<\alpha_1<\alpha_{1\max}$
$\alpha_2 = \alpha_{2\max}$	$\alpha_2 = 0°$

Die Erweiterung zum Vierquadrantenbetrieb wird durch Vertauschen der Zündreihenfolge des Motorstromrichters erreicht. Dabei kehrt die Drehrichtung des Drehfeldes um, wodurch auch eine Drehzahlumkehr erzielt wird.

Figur 2 zeigt die prinzipielle Funktionsweise des Stromrichtermotors beim Übergang Generator–Motorbetrieb. Voraussetzungen für diese Figur sind ein sehr gut geglätteter Zwischenkreisstrom i_g und schwache Belastung.

Die Verwendung eines sechspulsigen Motorstromrichters und die Einprägung eines konstanten Stromes erzeugen einen springenden Stromraumvektor mit sechs diskreten Stellen. Daher ist das Drehmoment nicht konstant, sondern weist eine Welligkeit auf, die der Pulszahl des Motorstromrichters entspricht.

In den nächsten Kapiteln werden folgende Voraussetzungen und Daten angenommen:

- maschinengetaktete Thyristorbrücke 2
- Betrieb mit konstantem mittlerem Nennfluss der Synchronmaschine ψ_s
- Angaben in bezogenen Grössen (pu)
- Daten der Labormaschine (Impedanzen x, r; Zeitkonstanten T)

$x_d = 0.8$	$x_d' = 0.31$	$x_d'' = 0.10$
$x_q = 0.74$		$x_q'' = 0.16$
$T_d' = 0.05$		$T_d'' = 0.0025$
$T_q'' = 0.0025$		
$T_m = 0.75$	$r_s = 0.03$	
$P = 10\,\text{kW}$		

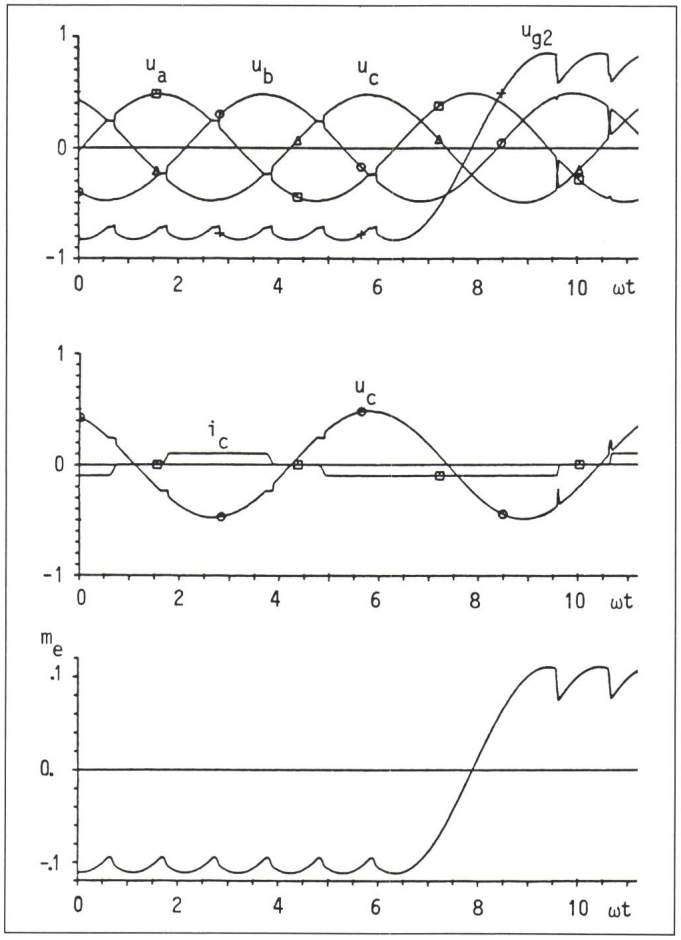


Fig. 2
Prinzipielle Arbeitsweise des Stromrichtermotors beim Übergang vom Generator- auf Motorbetrieb
m_e Elektrisches Drehmoment der Synchronmaschine

Die verschiedenen Resultate stammen aus einem Simulationsprogramm und aus der Laborrealisierung des Stromrichtermotors. Da eine gute Übereinstimmung der Resultate beider Methoden entstanden ist, kann das Programm auch für andere Stromrichtermotoren angewandt werden.

2. Der Stromrichtermotor im maschinenkommutierten Bereich

Wie erwähnt, kann die Synchronmaschine die Führung des maschinenseitigen Stromrichters übernehmen. Dabei ist zu beachten, dass die im Normalbetrieb vernachlässigbar kleinen ohmschen Spannungsabfälle der Statorwicklungen mit abnehmender Drehzahl im Vergleich zur Kommutierungsreaktanz x_k immer stärker ins Gewicht fallen. Dadurch wird eine Vergrösserung des Überlappungswinkels verursacht, so dass der Kommutierungsvorgang nicht mehr im ganzen Bereich einwandfrei abgeschlossen werden kann. Deswegen ist die Bestimmung der maximal möglichen Ströme und des Drehmomentes bei tieferen Drehzahlen von Bedeutung. Figur 3 zeigt den zeitlichen Verlauf der Klemmenspannung u_a, des Stromes i_a und des Drehmomentes m_e bei einem Betrieb mit Nennstrom und 5% Drehzahl. Man erkennt den bekannten Kurvenverlauf an der Wechselrichterkippgrenze. Hingegen weicht der Spannungsverlauf sehr stark von der idealen Sinusform ab. Wegen des nichtsinusförmigen Stromverlaufes pulsiert das Drehmoment m_e. Diese Ergebnisse entsprechen dem Verhalten der kleinen Labormaschine, aber sie treten auch bei grösseren Maschinen in sehr ähnlicher Form auf.

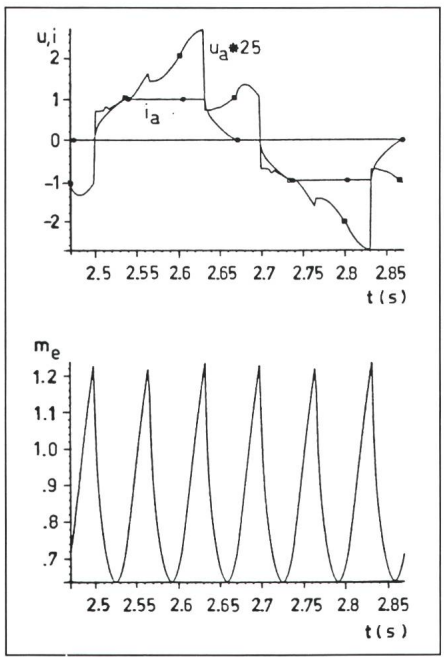


Fig. 3 Spannungs-, Strom- und Drehmomentverlauf im stationären Zustand

Labormaschine

Betriebspunkt: $u_e = 1.68$, $i_g = 1.0$, $\psi_s = 1.0$, $n = 0.05$

ψ_s Statorflussverkettung

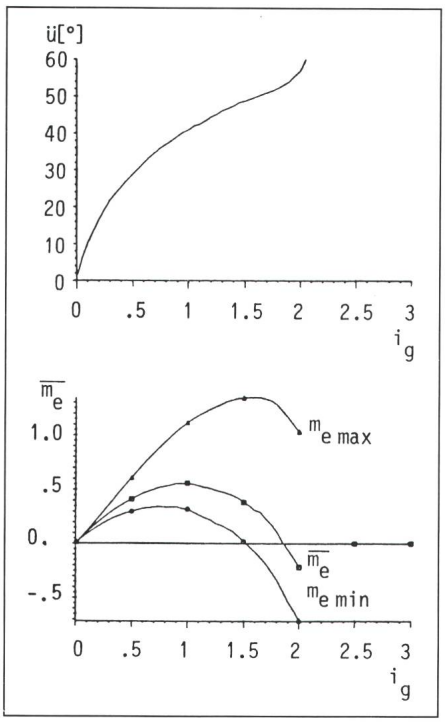


Fig. 4 Verhalten des Stromrichtermotors an der Wechselrichterkippgrenze

Maximal möglicher Überlappungswinkel $\ddot{u} = 60°$, entsprechend $i_g = 2$

Betriebspunkt: $n = 0.02$, $\psi_s = 1$

$\ddot{u}$ Überlappungswinkel der maschinenseitigen Brücke

$m_{e\,min}$, $m_{e\,max}$ Schwankungsband von m_e

Der Betrieb an der Wechselrichterkippgrenze ist durch den maximalen Strom gekennzeichnet, der bei einer bestimmten Drehzahl und bei einem Zündwinkel α_{2max} noch kommutiert werden kann. Dieser wird durch den Verlauf des abkommutierenden Stromes (z.B. der Phase i_a) bestimmt. Als Beispiel lassen sich für die Drehzahl n=0.02 die Grenzkurven der Labormaschine in Abhängigkeit des Stromes i_g bestimmen (Fig. 4). Die Überlappungskurve $\ddot{u}$ zeigt, dass die Synchronmaschine trotz der niedrigen Drehzahl einen Strom bis zum doppelten Nennstrom einwandfrei kommutieren kann.

Die Drehmomentkurve zeigt ein Maximum beim Nennstrom. Der Wert sinkt dann mit zunehmendem Strom kontinuierlich ab und erreicht beim doppelten Nennstrom sogar einen negativen Betrag, d.h. dass die Synchronmaschine elektrische und mechanische Energie bezieht, um die ohmschen Verluste zu decken. Mit zunehmendem Strom weist das Drehmoment eine stärkere Pulsation auf, wie es die Schwankungsbandkurven m_{emin} und m_{emax} dokumentieren. Dieser Drehmomentverlauf ist charakteristisch für den Stromrichtermotor; er wird verlangsamt, aber fällt bei dieser Überlastung nicht ausser Tritt. Dies führt infolge der negativen Drehmomentkennlinie zu Betriebsinstabilitäten.

Nach diesen ersten Ergebnissen stellt sich die Frage, wie diese Kurven von der Drehzahl n beeinflusst werden. Deshalb wurden verschiedene Simulationsläufe mit n als Parameter durchgeführt, deren Resultate in der Figur 5 dargestellt sind. Für die vier

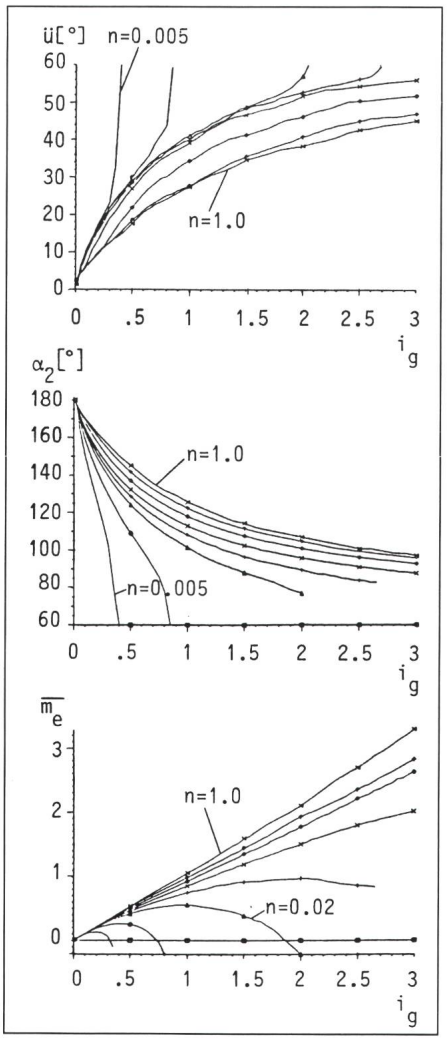


Fig. 5 Grenzkurven des Stromrichtermotors an der Wechselrichterkippgrenze für $\psi_s = 1$

Labormaschine

n 0.005; 0.01; 0.02; 0.03; 0.05; 0.10; 0.2; 1.0

α_2 maschinenseitiger Zündwinkel

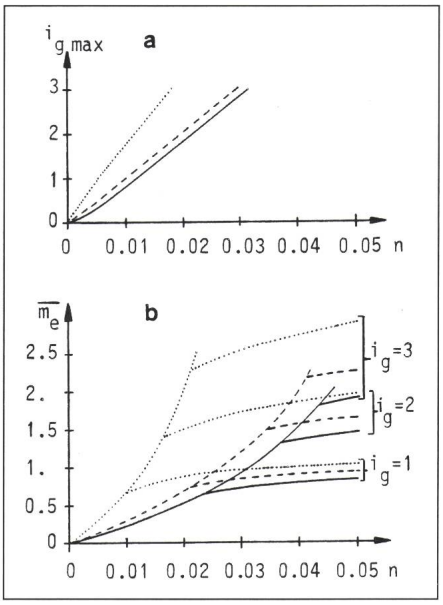


Fig. 6 Grenzkurven eines Stromrichtermotors an der Wechselrichterkippgrenze

——— Daten der Labormaschine (10 kW)
------- Daten eines Synchronmaschinenantriebes (300 kW)
····· Daten der Synchronmaschine eines Pumpspeicherwerkes (30 MW)

a) maximaler Kommutierungsstrom in Funktion der Drehzahl
b) maximales (mittleres) Drehmoment in Funktion der Drehzahl unter Berücksichtigung der Strombegrenzung (i_g = 1; 2; 3)

kleinsten Drehzahlwerte wird die Kippgrenze $\ddot{u}$ = 60° erreicht. Erwartungsgemäss reduziert sich der Überlappungswinkel $\ddot{u}$ mit zunehmender Drehzahl, da der Einfluss des Statorwiderstandes auf die Kommutierung kleiner wird.

Die Drehmomentkurven zeigen auch, dass für $n > 0.05$ und bis zum gesetzten maximalen Strom i_g = 3 ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen dem Strom i_g und dem Drehmoment $\overline{m}_e$ besteht. Dies ist für die Regelung sehr vorteilhaft.

Damit ein Vergleich mit anderen Maschinendaten möglich wird, sind einige charakteristische Grössen auf einer gemeinsamen Figur (Fig. 6) dargestellt. Das maximal erreichbare Drehmoment (Fig. 6b) wird nicht nur von der Drehzahl n, sondern auch vom zulässigen grössten Zwischenkreisstrom i_g bestimmt. Lässt man den Strom i_g nach Figur 6a ansteigen, so ergibt sich mit zunehmender Drehzahl ein der Exponentialfunktion ähnlicher Drehmomentanstieg. Nachdem der maximale Stromwert erreicht ist und bei grösseren Drehzahlen auf diesem Wert konstantgehalten wird, weist die Drehmomentkurve nur noch einen leichten Anstieg auf. Dies wird durch den günstigeren Überlappungs- und Polradwinkel bei höheren Drehzahlen verursacht.

Allgemein lässt sich aus dieser Figur der bessere Drehmomentverlauf der grösseren Maschinen bei sehr niedrigen Drehzahlen erkennen. Sie zeigt auch, dass das Hochfahren unter Last unmöglich ist, weil im Stillstand kein Drehmomentmittelwert bezogen werden kann. Deswegen werden für das Hochfahren verschiedene spezielle Methoden verwendet.

3. Anlaufverhalten

3.1 Methoden der Steuerung

Das Anfahren und der Betrieb der belasteten Synchronmaschine bei niedrigen Drehzahlen ist nur möglich, wenn besondere Kommutierungsmassnahmen getroffen werden. Dazu gibt es verschiedene Lösungsvorschläge:

- keine Massnahmen
- Zwischenkreistaktung mit oder ohne Freilaufthyristor
- Zwangskommutierung
- Methoden, die einen speziellen Schaltungs- und Motoraufbau erfordern.

Die erste Methode ist nur für die unbelastete Synchronmaschine geeignet. Es ist zu beachten, dass wohl der Drehmomentmittelwert im Stillstand den Wert null aufweist, der zeitliche Verlauf kann jedoch durch geeignete Steuerung der maschinenseitigen Thyristoren einen genügend langen positiven Wert aufweisen, während dem die Synchronmaschine beschleunigt wird. Falls sie beim ersten Kommutierungstakt eine genügend hohe Drehzahl erreicht hat, wird der Anlaufvorgang erfolgreich abgeschlossen.

Eine viel wichtigere Variante ist die *Zwischenkreistaktung* (Fig. 7), deren Eigenschaften im nächsten Abschnitt genau untersucht werden. Um das Verfahren anschaulicher darzustellen, wurde eine niedrige Netzspannung und eine gute Glättung des Zwischenkreisstromes gewählt. Sie erfordert keine oder nur bescheidene Erweiterungen des Umrichters und stellt daher eine besonders günstige Lösung dar. Die Kommutierung der Strangströme wird umgangen, indem vor der notwendigen Weiterschaltung der Ankerdurchflutung, zur Erzeugung des Drehfeldes, der Zwischenkreisstrom auf null gebracht wird. Dies geschieht durch Umschaltung des Netzstromrichters auf die Wechselrichterkippgrenze. Im stromlosen Zustand kann dann ein neues Paar von Thyristoren der Brücke 2 gezündet werden; danach wird der Zwischenkreisstrom wieder auf den erforderlichen Sollwert geregelt. In diesem Fall spricht man von der *Zwischenkreistaktung ohne Freilaufthyristor*.

Die dynamischen Eigenschaften der Maschine mit Zwischenkreistaktung lassen sich erheblich verbessern, wenn parallel zur Glättungsdrossel ein Freilaufthyristor geschaltet wird (*Zwischenkreistaktung mit Freilaufthyristor*). Während der Stromabbauphase wird mit der Steuerung des netzseitigen Stromrichters im Wechselrichterbetrieb gleichzeitig der Freilaufthyristor T_3 gezündet (Fig. 1). Die Drossel wird kurzgeschlossen und deren Strom fliesst, abgesehen von ohmschen Verlusten, in der gleichen Grösse durch diesen Freilaufweg. Die Änderungsgeschwindigkeit von i_g hängt jetzt nur von den netzseitigen Reaktanzen und den Maschineninduktivitäten ab. Es ist zu beachten, dass der Freilaufthyristor nur dann zu leiten beginnt, wenn die Spannung u_{gr} negativ wird, wodurch kleine Verzögerungen auftreten können. Der Aufbau des Motorstromes auf die neuen Wicklungsstränge vollzieht sich sehr schnell, weil der

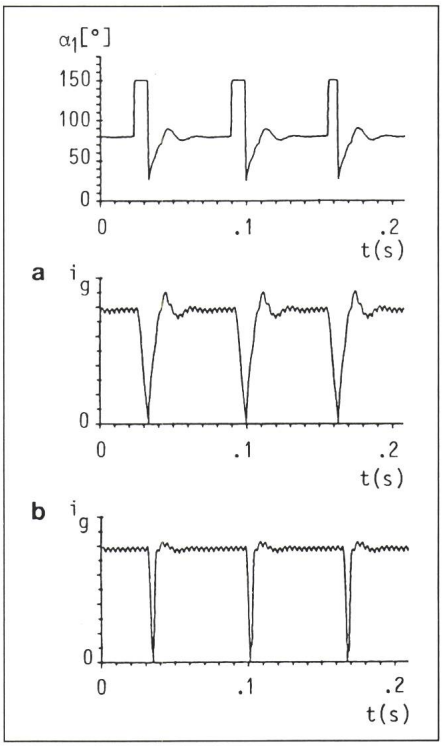


Fig. 7 Taktphase eines Stromrichtermotors ohne (a) und mit (b) Freilaufthyristor

n = 5% L_g = 50 mH
α_1 netzseitiger Zündwinkel

Strom in der Glättungsdrossel seinen Wert vor dem Kommutierungszeitpunkt beibehalten hat. Die Drehmomentreduktion wird dementsprechend klein.

Die *dreiphasige Zwangskommutierung* des Motorstromrichters ist die beste und auch die teuerste Lösung, die für das Hochfahren der Maschine angewendet werden kann. Das volle Drehmoment steht dauernd zur Verfügung, weil die Kommutierung der Strangströme unterbrechungsfrei erfolgen kann.

Neuere Methoden, die eine Doppelsternwicklung und gekoppelte Glättungsdrosseln erfordern, werden vorläufig nur für Traktionsanwendungen im Bahnbereich verwendet [3].

3.2 Zwischenkreistaktung

Schaltungsvariante mit Freilaufthyristor

Durch den Taktvorgang wird eine starke Drehmomentpulsation und eine leichte Verminderung des Drehmomentmittelwertes verursacht. Deswegen ist es wichtig, die Dauer dieses Vorganges genau zu kennen (Fig. 8). Die Länge der Taktung besteht aus der Summe der folgenden drei Zeitabschnitte:

- Die Totzeit τ: Sie ist die Zeit zwischen dem Befehl «Taktung» und dem möglichen frühesten Zündzeitpunkt des Freilaufthyristors T_3 (d.h. $u_{gr} \leqq -u_f$, Flussspannung des Thyristors)
- der Stromabbau in den Maschinensträngen auf null: t_{ab}
- der Stromaufbau in den Maschinensträngen auf dem Sollwert: t_{auf}.

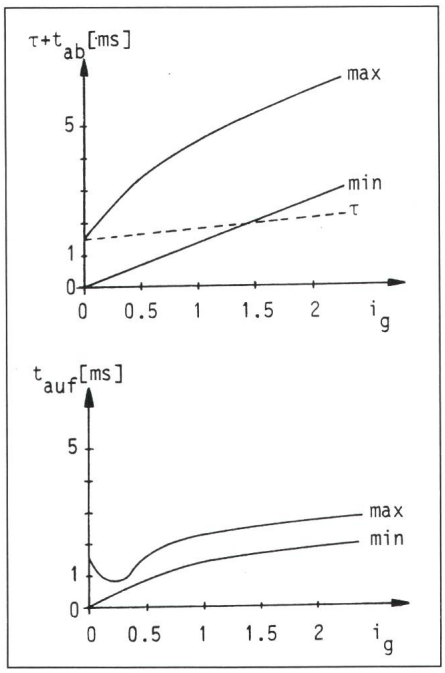
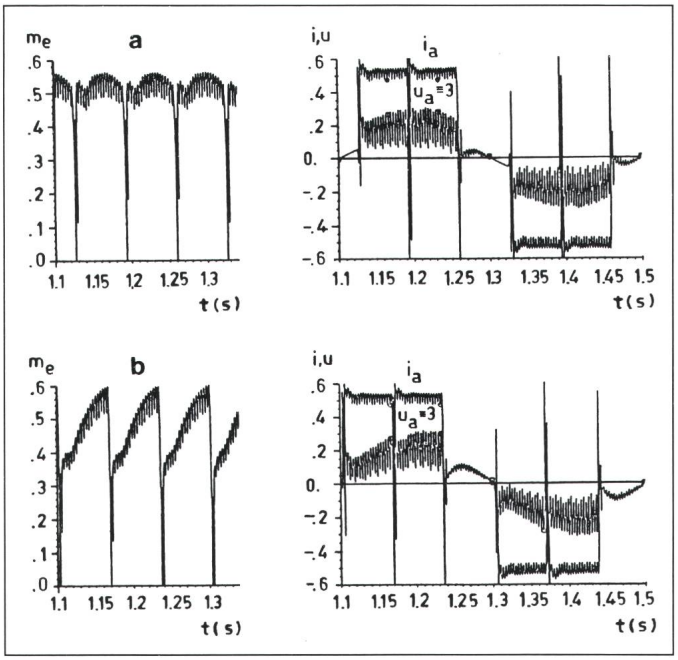


Fig. 8 Dauer eines Taktvorganges (Labormaschine)
Minimale und maximale Dauer der stromabbauenden Phase ($\tau + t_{ab}$) und der stromaufbauenden Phase t_{auf}

Durch die unterschiedliche Phasenlage des Speisenetzes beim Taktbefehl entsteht der Streubereich dieser Figur. Der Zusammenhang mit der Drehzahl n lässt sich besser erkennen, wenn die Länge eines Taktvorganges auf die Periodendauer der Maschinenspannung (360°) bezogen wird. Die Taktwinkel sind dann extrem klein, z.B. etwa 4° bei Nennstrom und 5% Drehzahl. Dementsprechend ist die Drehmomentverminderung durch die Taktung klein.

Während des Anlaufs fällt die Bedingung des Betriebes an der Wechselrichterkippgrenze der Brücke 2 weg. Die Phasenlage zwischen Maschinenspannung und Maschinenstrom kann frei eingestellt werden. Deswegen steht ein zusätzlicher Freiheitsgrad für die Regelung des Stromrichtermotors zur Verfügung, dessen Wirkung durch eine Veränderung des Zündwinkels α_2 sofort ersichtlich wird (Fig. 9). Der Vergleich von Figur a und b zeigt, dass die Drehmomentschwankungen nach jedem Taktvorgang am kleinsten sind, falls die Grundwellen der Maschinenspannung u_a und des Maschinenstromes i_a in Phase sind. Der Einfluss der 300-Hz-Strompulsation auf das Drehmoment ist auch eindeutig erkennbar.

Fig. 9 Drehmoment-, Spannungs- und Stromverlauf während des getakteten Betriebes
Labormaschine,
$\psi_s = 1$, $n = 0.05$
a) $\alpha_2 = 160°$ $u_e = 1.06$
b) $\alpha_2 = 140°$ $u_e = 1.21$



Als nächstes werden die Mittelwerte der Drehmomentverläufe bestimmt und in Figur 10 in Funktion des Zündwinkels α_2 mit dem Strom i_g als Parameter eingetragen. Die Überstromkurven können nicht über den ganzen Zündwinkelbereich gezeichnet werden, da die Steuerung auf Nennfluss ψ_s nicht überall möglich ist [4]. Der Verlauf der Kurvenschar zeigt mit zunehmendem Strom ein stark ausgeprägtes Maximum. Es fällt auch auf, dass jeder erwünschte Drehmomentmittelwert durch die Kombination verschiedener Strom- und Zündwinkelpaare erzielt werden kann. Der ausgewählte Betriebszustand hängt von den Anforderungen an den Stromrichter-

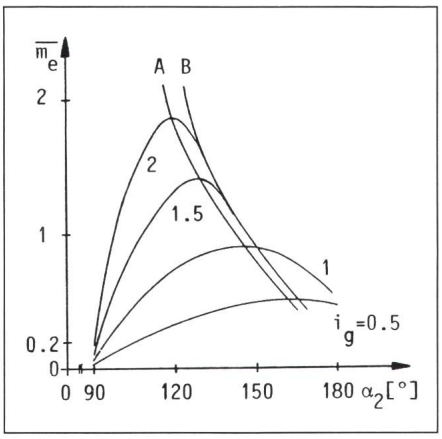


Fig. 10 Drehmomentmittelwert $\overline{m}_e$ während des getakteten Betriebes
Labormaschine
Zwischenkreisstrom i_g als Parameter
Drehzahl: $n < 0.1$, Flussverkettung: $\psi_s = 1$

motor ab. Ist beispielsweise ein minimaler Strom erwünscht, so ist α_2 entsprechend dem Maximum von Figur 10 (Kurve A) einzustellen. Eine andere Wahl von α_2 ist für minimale Drehmomentpulsation erforderlich (Kurve B). Schliesslich ist für die Umschaltung auf natürliche Kommutierung zu berücksichtigen, dass die nötige Freiwerdezeit gewährleistet ist und ein stetiger Drehmomentübergang erfolgt.

Schaltungsvariante ohne Freilaufthyristor

Figur 11 zeigt das Streuband für die Dauer der Stromabbauphase t_{ab}, das der Summe $\tau + t_{ab}$ (Fig. 8) des Betriebes mit Freilaufthyristor entspricht. Da die Grösse der Glättungsdrossel L_g einen sehr grossen Einfluss auf die Taktung hat, werden deren Wirkungen durch den zusätzlichen Parameter L_g dominant. Der Wertebereich wird schrittweise von 20 mH bis zum Grenzwert null verkleinert, der dem Betrieb ohne Glättungsdrossel entspricht.

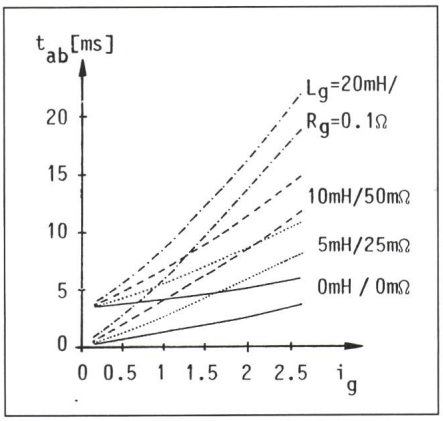


Fig. 11 Länge der stromabbauenden Phase t_{ab} während eines Taktvorganges ohne Freilaufthyristor (Labormaschine)
Parameter: Induktivität der Glättungsdrossel L_g

Der Einfluss des gepulsten Betriebes auf das Drehmoment hängt im Gegensatz zur Taktlänge nicht nur vom Strom i_g, sondern auch von der Erregerspannung der Synchronmaschine, vom Zündwinkel α_2 und von der Glättungsinduktivität L_g ab. Deshalb werden aus den verschiedenen Betriebsvarianten des vorherigen Abschnittes jene mit der minimalsten Drehmomentschwankung (Fig. 10, Kurve B) ausgewählt und unter den gleichen Voraussetzungen auch für den Betrieb ohne Freilaufthyristor untersucht (Fig. 12a).

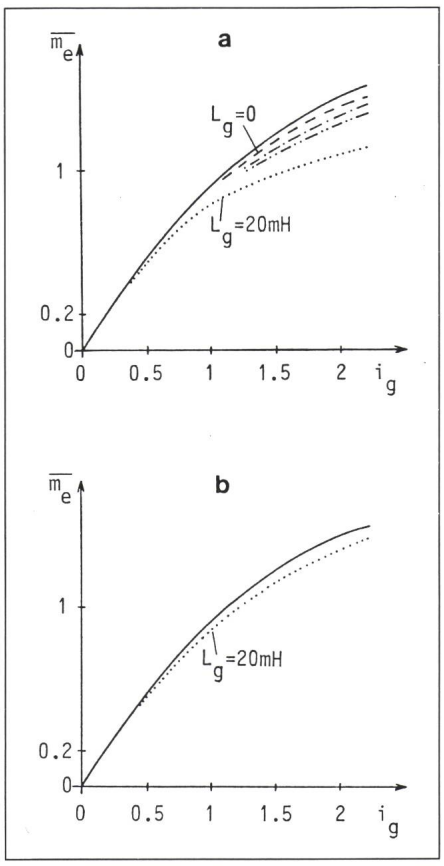


Fig. 12 Drehmoment m_e der Labormaschine bei minimalen Drehmomentschwankungen
($\psi_s = 1$; $n = 0.05$)
ausgezogene Kurve:
idealer Drehmomentmittelwert
$L_g = 0$; 5; 10; 20 mH
a ohne Freilaufthyristor
b mit Freilaufthyristor

Daneben wird in der Figur 12b auch der Kurvenverlauf der Schaltungsvariante mit Freilaufthyristor dargestellt, um den Vergleich zwischen diesen beiden Varianten anschaulicher zu machen. Dazu wird der ideale Drehmomentmittelwert angegeben, der unter der Annahme, dass die maschinenseitige Taktung unendlich schnell erfolgen kann, berechnet wird. Dieses Drehmoment stellt die physikalische Grenze dar, die auch bei Verwendung einer maschinenseitigen Thyristorschaltung mit Zwangslöschung nicht überschritten werden kann.

In der Variante ohne Freilaufthyristor fällt der starke Drehmomentverlust auf, falls grosse Ströme und ein gut geglätteter Zwischenkreisstrom erforderlich sind. Es rührt von der starken Drehmomentpulsation während des Taktvorganges ab. Der Vergleich der Figuren 12a und 12b zeigt auch, dass durch den Freilaufthyristor praktisch der Drehmomentmittelwert eines Stromrichtermotors ohne Glättungsdrossel ($L_g = 0$) erzielt werden kann. Das gleiche Ergebnis liefert auch der Vergleich der Taktlängen in den Figuren 8 und 11.

Betrachtet man hingegen eine nach wirtschaftlicher Methode dimensionierte Drossel (in diesem Fall L_g = 5 mH), so fällt auf, dass der Drehmomentmittelwert mit dem zusätzlichen Freilaufthyristor nicht erheblich verbessert werden kann. Trotzdem bleibt die Variante mit Freilaufthyristor überlegen, falls ein Antrieb mit minimaler Drehmomentwelligkeit in der Anlaufphase erforderlich oder falls eine starke Entkopplung der Netz- und Maschinenspannungen erwünscht ist.

Diese Resultate zeigen, dass durch optimale Taktung eine nur sehr kleine Reduktion des Drehmomentmittelwertes erzielt wird, so dass diese Methode auch für schwere Anläufe problemlos eingesetzt werden kann.

4. Umschaltschwelle für die natürlich kommutierende Thyristorbrücke

Nach dem Anlauf mit Zwischenkreistaktung ist der zweckmässige Zeitpunkt zum Übergang auf die natürlich kommutierende, maschinenseitige Thyristorbrücke zu bestimmen. Die Grenzkurven mit natürlicher Kommutierung (z.B. Fig. 5) zeigen eine starke Drehzahlabhängigkeit, so dass eine Drehzahlumschaltschwelle $n_G = f(n, i_g, ...)$ zwischen getaktetem und natürlich kommutierendem Betrieb gesucht werden muss. Dazu können folgende Kriterien verwendet werden:

a) Umschaltung bei der minimal möglichen Drehzahl n, die die Kommutierung des Stromes i_g durch die Synchronmaschine erlaubt.
b) Umschaltung, nachdem das erforderliche Drehmoment auch im natürlich kommutierten Betrieb der Synchronmaschine erzielt werden kann.
c) Umschaltung mit einem möglichst stetigen Drehmomentübergang.

Die Grenzkurven für den Fall a) sind in der Figur 6a enthalten. Der Betrieb oberhalb der angegebenen Kurven ist nur mit Zwischenkreistaktung, unterhalb auch natürlich kommutiert möglich. Einer tiefen Drehzahlumschaltschwelle steht das kleine Drehmoment $\overline{m_e}$ nach der Umschaltung auf natürliche Kommutierung (Fig. 5) entgegen. Dadurch wird das Hochfahren

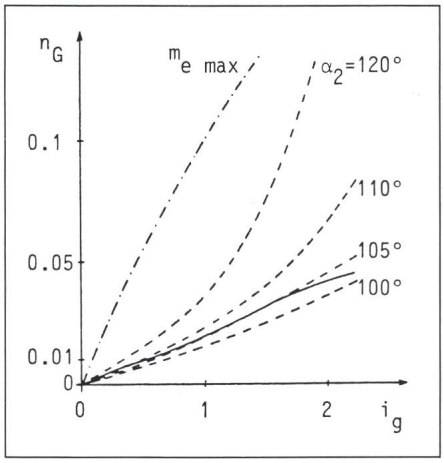


Fig. 13 Umschaltschwelle n_G für natürliche Kommutierung

Labormaschine

——— stetiger Drehmomentübergang

------- mit α_2 als Parameter, während der Taktung

-·-·-·-·- mit $m_{e\,max}$ als Parameter, während der Taktung

erschwert, so dass diese Methode nur mit Einschränkungen anwendbar ist.

Eine Verbesserung bringt die Umschaltung nach der Methode b). Die dazugehörigen Kurven in Abhängigkeit des Zündwinkels α_2 während der Taktung sind gestrichelt in Figur 13 angegeben. Nach der Umschaltung sind der Zündwinkel α_2 und die Erregerspannung u_e für einen Betrieb an der Wechselrichterkippgrenze mit Nennfluss $\psi_s = 1$ einzustellen, so dass eine kurzzeitige Drehmomentschwankung entsteht, die aber rasch abklingt, sofern man einen Erregerstoss anwendet. Eine weiter verbesserte Methode c) strebt einen möglichst stetigen Drehmomentübergang an. Damit dies erfüllt wird, muss vor und nach der Umschaltung der gleiche Drehmomentmittelwert (wie in der Methode b) und zusätzlich ein möglichst kleiner Einfluss auf die Flussverkettung ψ_s (d.h. auf die Erregerspannung u_e) erreicht werden. Aus den gestrichelten Kurven in Figur 13, die die erste Bedingung erfüllen, werden diejenigen Punkte bestimmt, die eine minimale Anpassung der Erregerspannung nach der Umschaltung erfordern [4]. Daraus resultiert die ausgezogene Kurve in Figur 13. Die Figur 14 zeigt den Verlauf verschiedener Grössen bei einer Umschaltung nach dieser letzten Methode.

Die Umschaltung erfolgt bei einem kleineren Drehmoment als bei Methode b). Deswegen kann sie nicht verwendet werden, falls ein Antrieb mit maximal möglichem Anfahrdrehmoment erwünscht ist. In einem solchen Fall ist der Methode b) der Vorzug zu geben. Die Methode c) kommt in Frage, wenn hohe Anforderungen an einen stetigen Drehzahlverlauf gestellt werden.

5. Der Laboraufbau

5.1 Zündsteuerung des maschinenseitigen Stromrichters

Der drehstromseitige Anschluss der von der Synchronmaschine geführten Brückenschaltung entspricht einem schwachen Netz mit hoher Impedanz und mit veränderlicher Spannung und Frequenz. Die Verwendung dieses Netzes zur Erzeugung der Zündimpulse ist wegen der starken Spannungsverzerrung nur mit besonderen Vorkehrungen zulässig.

Wesentlich unproblematischer ist es, anstelle der Klemmenspannung die Polradlage der Synchronmaschine zu verwenden. Dazu wird an die Welle der Maschine ein Winkelcodierer angebracht, der die Polradlage θ in digitaler Form liefert. Die Daten des Codierers können für die Adressierung eines Speichers (EPROM) verwendet werden, dessen Inhalt die Zündimpulssignale $w_{1...6}$ der verschiedenen maschinenseitigen Thyristoren für einen bestimmten Zündwinkel α_2 enthält.

Damit die Synchronmaschine an der Wechselrichterkippgrenze betrieben wird, muss ein bestimmter Zündwinkel α_2 eingegeben werden. Die Zündreihenfolge ist unabhängig vom Zündwinkel α_2, so dass die Zündwinkelverstellung durch Addition eines konstanten Wertes auf den Polradwinkel θ zurückgeführt werden kann. Dies ist das Grundprinzip des realisierten Zündgerätes, dessen Blockschaltbild in der Figur 15 dargestellt ist.

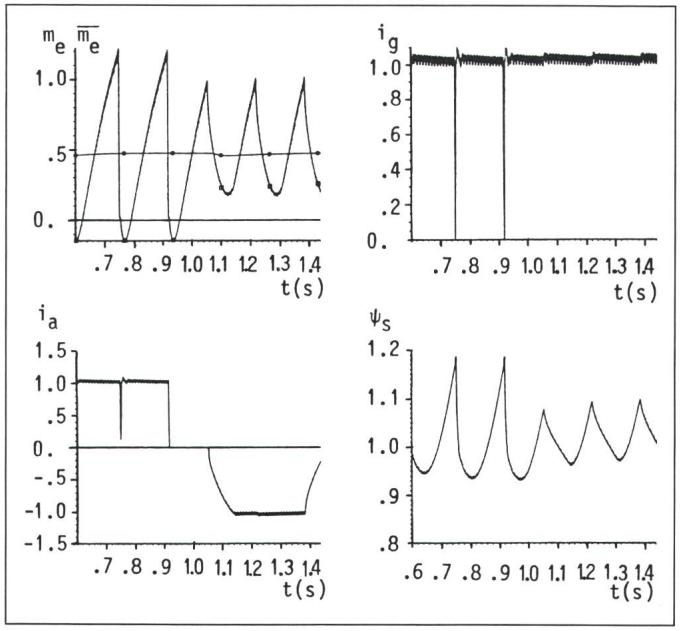


Fig. 14 Verlauf des Drehmomentes, der Ströme und der Flussverkettung bei der Umschaltung nach Methode c

Labormaschine
Betriebspunkt:
$n = 0{,}02$; $i_g = 1$

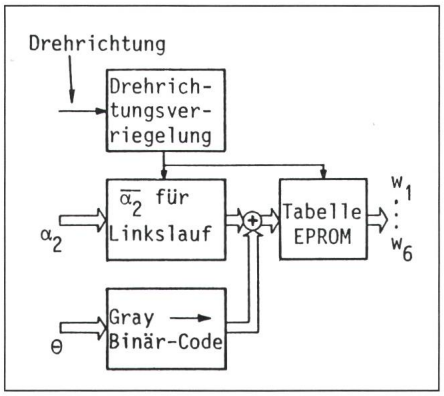


Fig. 15 Blockschaltbild der digitalen Zündsteuerung

$w_1 ... w_6$ Zündsignale

Die Information des Polradgebers wird zuerst durch eine sequentielle Schaltung mit EXOR-Toren in einen Binärcode umgewandelt. Diese Daten, zusammen mit dem Zündwinkel α_2, werden einem Addierer zugeführt, dessen Ausgang die Adresse der nachgeschalteten Tabelle (EPROM) ist, welche die programmierte Zündreihenfolge ($w_1 ... w_6$) enthält. Die gewünschte Drehrichtung lässt sich mit Hilfe einer zusätzlichen Adressleitung bestim-

men, und die Verriegelungslogik verhindert, dass dieses Adressbit während des Betriebes verändert wird, was zu Kurzschlüssen führen könnte.

Für die Regelung des Stromrichtermotors ist es vorteilhaft, wenn eine Vergrösserung von α_2 für beide Drehrichtungen einer Zündwinkelvergrösserung entspricht. Dies wird erreicht, indem das Signal α_2 für den Linkslauf invertiert wird.

5.2 Regelung des Stromrichtermotors

Es hat sich gezeigt, dass die Drehmomentsteuerung über den Zwischenkreisstrom i_g bei Betrieb der maschinenseitigen Thyristorschaltung an der Kippgrenze eine sehr günstige Variante darstellt, da der Leistungsfaktor der Synchronmaschine maximal wird. Hält man durch eine geeignete Erregerstromsteuerung die Flussverkettung ψ_s auf ihrem Nennwert, so lässt sich die Maschine bis zur thermischen Belastungsgrenze betreiben. Im weiteren entfällt der nichtlineare Zusammenhang des Zwischenkreisstromes i_g mit dem Drehmoment $\overline{m}_e$ für Drehzahlen n grösser als 0.05 und bis zu einem realistischen Überstrom $i_g = 3$ fast vollständig. Dieser günstige Zustand kann auch im getakteten Betrieb durch eine geeignete Wahl des Zündwinkels α_2 [4] erreicht werden.

Unter diesen Voraussetzungen lässt sich eine Regelungsvariante realisieren, deren vereinfachtes Blockschaltbild in Figur 16 dargestellt ist. Der Leistungsteil des Antriebes besteht aus dem netzgeführten Stromrichter 1, dem maschinengeführten Stromrichter 2 und dem Stromzwischenkreis mit dem Freilaufthyristor. Für die Konstanthaltung des Maschinenflusses auf dem Nennwert ist der netzgeführte Stromrichter 3 eingesetzt. Die Drehzahlregelung erfolgt nach dem Kaskadenprinzip (bekannt von der Regelung von Gleichstrommaschinen) mit unterlagerter Regelung des Stromzwischenkreises i_g bzw. des elektrischen Drehmomentes m_e der Synchronmaschine. Die Dimensionierung der verschiedenen Regler erfolgt nach einer in [5] ausführlich behandelten Methode. Als zusätzliche zentrale Einheit gewährleistet ein 8086-Rechnersystem einen Betrieb an der Wechselrichterkippgrenze (Zündwinkel α_2) mit Nennfluss (Erregerstrom i_e). Dieses System ist auch verantwortlich für die Ein- und Ausschaltung der Zwischenkreistaktung.

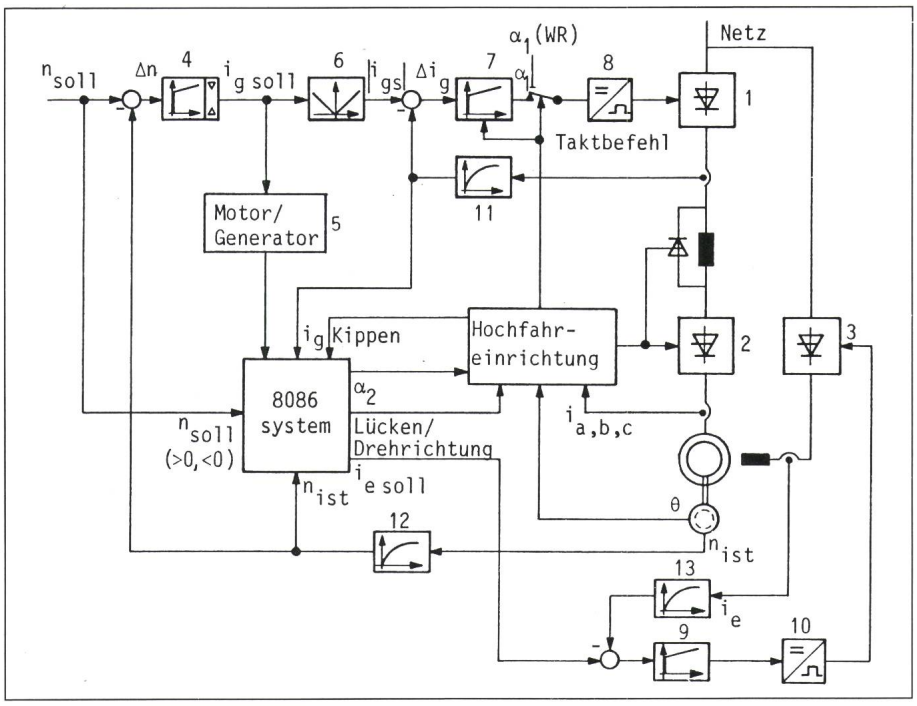


Fig. 16 Blockschaltbild der Regelung

1	Netzgeführter Stromrichter 1	7	Stromregler
2	Maschinengeführter Stromrichter 2	8	Netzseitiges Zündgerät
3	Netzgeführter Stromrichter für die Erregung	9	Erreger-Regler
4	Drehzahlregler mit Begrenzung von i_g	10	Zündgerät für die Erregung
5	Vorzeichendetektor von i_g (Motor- bzw. Generatorbetrieb)	11, 12, 13	Tiefpassfilter
6	Betragsbilder	WR	Wechselrichterbetrieb

Literatur

[1] *T. Peterson* and *K. Frank:* Starting of Large Synchronous Motor Using Static Frequency Converter. IEEE Trans. PAS 92(1972)1, p. 172...179.

[2] *U. Kirberg* and *P.K. Sattler:* State Estimation of an Inverter-Fed Synchronous Motor. Congrès européen en Electronique de puissance et applications, Bruxelles, 16...18 octobre 1985.

[3] *A. Cossié:* La locomotive BB 10004 de 5600 kW à courant monophasé à moteurs synchrones autopilotés. Revue générale des Chemins de fer 102(1983)5, S. 260...270.

[4] *C. Tamagni:* Untersuchung des Stromrichter-Synchronmotors im Anlaufbereich. Dissertation Nr. 8099 der ETH Zürich, 1986.

[5] *H. Bühler:* Einführung in die Theorie geregelter Drehstromantriebe. Band 1: Grundlagen. Band 2: Anwendungen. Basel, Birkhäuser-Verlag, 1977.