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: 76 (1985)

Heft: 9

Artikel: Die Gleichstrom-Zwischenkreisinduktivität bei der Untersynchronen Stromrichterkaskade

Autor: Kloss, A.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904596

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: 04.07.2025

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

Die Gleichstrom-Zwischenkreisinduktivität bei der Untersynchronen Stromrichterkaskade

A. Kloss

Anhand von experimentellen Resultaten und mittels Computersimulation wird gezeigt, wie die Wahl der Gleichstromdrossel das Verhalten und die Betriebseigenschaften der Untersynchronen Stromrichterkaskade beeinflusst und welch wichtige Rolle sie für eine optimale Auslegung der leistungselektronisch geregelten Asynchronschleifringmaschine spielt. Besonders betont wird der Einfluss der Zwischenkreisinduktivität im Bereich der höchsten Drehzahl.

Les résultats d'expériences et la simulation au moyen d'un ordinateur montrent l'influence de l'inductance en courant continu sur le comportement et les propriétés de service de la cascade sous-synchrone de redresseurs de courant et son rôle important pour une disposition optimale de la machine asynchrone à bagues, à réglage électronique de la puissance. Cette influence est particulièrement marquée dans le domaine de la vitesse de rotation maximale.

Adresse des Autors

A. Kloss, Abt. IES, BBC Aktiengesellschaft Brown, Boveri & Cie, 5401 Baden.

1. Einleitung

Unter dem Begriff Untersynchrone Stromrichterkaskade wird eine *verlustlose Drehzahlregelung* von Asynchronschleifringmotoren verstanden. Der Stromrichterteil wird durch einen *Stromzwischenkreisumrichter*, der den niederfrequenten Rotorstrom in einen netzfrequenzentsprechenden Strom umwandelt, gebildet. In den meisten Anwendungsfällen wird nur im oberen Drehzahlbereich der Maschine geregelt. Der Hochlauf spielt sich konventionell über Widerstände ab.

Die Untersynchrone Stromrichterkaskade ist eine elektronische Analogie zu der *Scherbius*-Maschinenkaskade aus dem Jahre 1905. Die Idee und auch die Bezeichnung der «Kaskadenschaltung» geht auf *Görges*, 1893, zurück. Den Vorschlag, einen Gleichrichter im Rotorkreis des Asynchronmotors anzuwenden, hat erstmals *B. Schäfer* in seiner Dissertation im Jahre 1912 unterbreitet [1]. Im Jahre 1921 schlägt *F.W. Meyer* die Anwendung von gesteuerten Stromrichtern im Rotorkreis der Asynchronmaschinen vor [2]. *M. Stöhr* und *R. Feinberg* beschreiben im Jahre 1932 als erste den Gleichstrom-Zwischenkreisumrichter [3; 4]. *Stöhr* ist vermutlich auch der erste, der sieben Jahre später über die Untersynchrone Stromrichterkaskade einen Artikel verfasst [5]. Durchsetzen konnten sich aber die Untersynchronen Stromrichterkaskaden erst seit den sechziger Jahren [6]. In der Schweiz wurde die erste grosse Anwendung dieser Technik im Jahre 1969, im Kernkraftwerk Mühleberg, realisiert [7].

In der russischen Literatur wurde eine kurze Beschreibung der Untersynchronen Stromrichterkaskade von *F.I. Butajew* und *E.L. Ettinger* schon im Jahre 1937 veröffentlicht. Im Jahre 1948 wurde dann in Moskau eine erste Anlage von 880 kW Motornennleistung und 40% Regelbereich in Betrieb gesetzt.

2. Hauptmerkmale des Zwischenkreisumrichters

Der Zwischenkreisumrichter der Untersynchronen Stromrichterkaskade wird durch zwei Drehstrombrükken, die durch einen gemeinsamen Gleichstromzwischenkreis verbunden sind, gebildet (Fig. 1). Die rotorseitige Brückenschaltung beinhaltet ungesteuerte Ventile, die statorseitige Brükke entspricht einer vollgesteuerten Thyristorschaltung. Die Diodenbrükke wirkt wie ein Gleichrichter. Seine primäre Wechselspannung ändert sich sowohl in der Amplitude als auch in der Frequenz in Abhängigkeit von der Drehzahl des Asynchronmotors. Die Thyristorbrücke arbeitet als ein netzgeführter Wechselrichter mit natürlicher Kommutierung. Im Gleichstromzweig zwischen Gleich- und Wechselrichter ist eine Drossel zwischengeschaltet.

Die Bauleistung des Umrichters hängt von der maximal übertragenen Schlupfleistung des Motors, d.h. vom Regelbereich ab. Darüber hinaus ist die Bemessung der Schaltung durch die Schutzphilosophie gegeben. Bei der Auslegung des Wechselrichters existieren keine grundsätzlichen Probleme, da es sich um einen konventionellen Stromrichter handelt (siehe z.B. [8]). Bei der Bemessung der Diodenbrücke muss auf die veränderliche Frequenz der Ventilströme geachtet werden. Darüber hinaus muss auch noch mit einer Zusatzbelastung, die unter Umständen im höchsten Drehzahlbereich auftreten kann, Rücksicht genommen werden. Eine zentrale Rolle spielt dabei die Induktivität der Gleichstromdrossel im Gleichstromzwischenkreis.

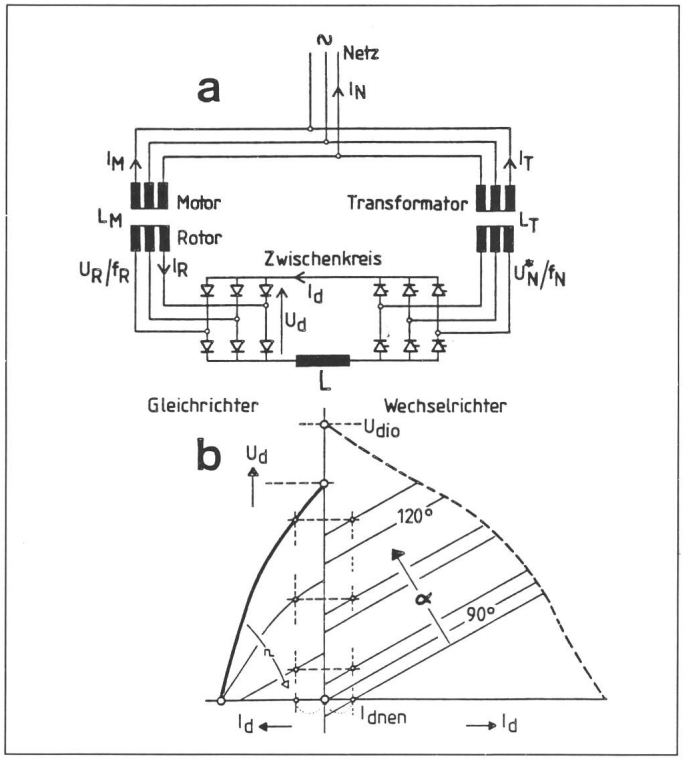


Fig. 1
Prinzipschema (a) und Belastungskennlinienfeld (b) der Untersynchronen Stromrichterkaskade

Der Arbeitspunkt der beiden Drehstrombrücken ist durch die gemeinsame Gleichspannung U_d und durch den gleichen Gleichstrom I_d eindeutig gegeben. Die Gleichrichter-Kennlinien sind von der Drehzahl n abhängig. f_R = Rotorspannungs-Frequenz.

Diese hat Einfluss auf:

1. das regeldynamische Verhalten des Antriebes,
2. das Oberschwingungsspektrum des Netzstromes,
3. die Strombelastung und den Leistungsfaktor im hohen Drehzahlbereich,
4. den Ablauf der Störungsfälle.

Wichtig ist nicht der Absolutwert der Drosselinduktivität L, sondern deren Verhältnis zur Induktivität des Motors L_M und des Transformators L_T.

3. Einfluss der Zwischenkreisinduktivität auf die Regelung

Die Gleichstrom-Spannungs-Kennlinien des gesteuerten Stromrichters sind nur bei glattem Gleichstrom, d.h. bei grossem Verhältnis der Drosselinduktivität zur Induktivität des Transformators, und im Kommutierungsbereich der Stromrichter-Arbeitsweise linear. Bei lückendem Gleichstrom sind die Belastungskennlinien nicht linear, d.h. einer kleinen Änderung des Gleichstrommittelwertes entspricht bei konstantem Steuerwinkel eine überproportional grosse Änderung des Gleichspannungsmittelwertes.

Das dynamische Verhalten des Stromrichters hängt vom Verhältnis der Gleichstrom- zur Wechselstrominduktivität ab. Bei unendlich grosser Gleichstrominduktivität, bei völlig glattem Gleichstrom also, kann keine Stromänderung realisiert werden. Bei realen Verhältnissen wird jedoch der Lückbetrieb bei schwacher Strombelastung des Stromrichters immer erreicht.

Die Nichtlinearität der Stromrichter-Belastungskennlinien bei Schwachlast spiegelt sich in den Moment-Drehzahl-Kennlinien der Maschine (Fig. 2) wider. Man strebt durch die Wahl der Drosselinduktivität an, den nichtlinearen Bereich unter den erwarteten Schwachlastgrenzpunkt zu drücken. Gleichzeitig muss aber auch die damit beeinflusste Zeitkonstante des Stromrichters [9] berücksichtigt werden.

4. Einfluss der Zwischenkreisinduktivität auf die Netzstromoberschwingungen

Der Netzstrom der Untersynchronen Stromrichterkaskade setzt sich, wie aus der Figur 1 ersichtlich ist, aus dem Motor- und Transformatorstrom zusammen. Der netzstromseitige Wechselrichter liefert über den Transformator ein festes, der Drehstrombrücke entsprechendes Oberschwingungsspektrum ins Netz. Die Glättung des Gleichstromes hat dabei nur auf die Amplituden der Oberschwingungen Einfluss, die Ordnungszahlen bleiben unbeeinflusst [10]. Der durch die Diodenbrücke verzerrte Rotorstrom weist zwar auch, bezogen auf die jeweilige Spannungsfrequenz, ein fest diskretes Spektrum auf, aber nach der Transformation in die Statorwicklung präsentieren sich die Oberschwingungen im Netz mit Ordnungszahlen, die drehzahlabhängig sind [11].

Wird im Gleichstromzwischenkreis eine sehr hohe Induktivität eingesetzt, dann ist der Gleichstrom völlig glatt, und die beiden Brücken können sich gleichstromseitig nicht beeinflussen. Bei realen Induktivitätsverhältnissen wird aber der Gleichstrom sowohl durch die Wirkung der Dioden als auch von der Thyristorbrücke moduliert. Im Gleichstrom sind so zwei Frequenzen deutlich merkbar, die starre sechsfache Netzfrequenz und die drehzahlabhängige sechsfache Rotorfrequenz. An der gegenseitigen Wechselstromseite treten dann diese Frequenzen als stromrichterschaltungsuntypi-

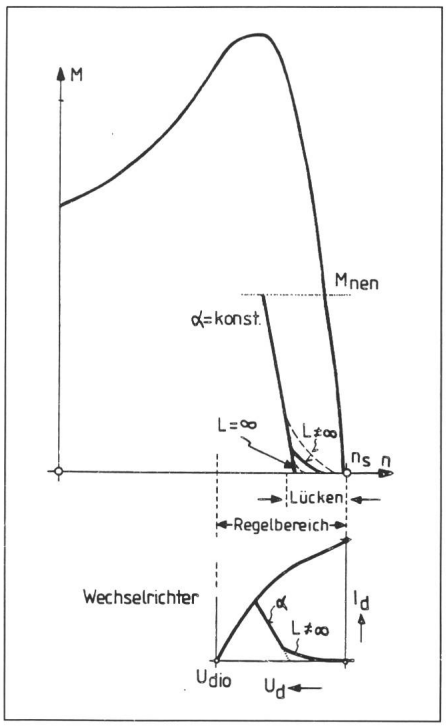


Fig. 2 Einfluss der Gleichstrominduktivität L auf die Moment-Drehzahl-Kennlinie des Asynchronmotors im Schwachlastbereich

Bei kleiner Gleichstromdrossel beginnt der Gleichstrom früher als bei grossen Drosseln zu lücken, und die Kennlinie wird stark unlinear.

M_{nen} Nenndrehmoment
α Thyristorsteuerwinkel
U_{dio} Ideelle Leerlaufgleichspannung

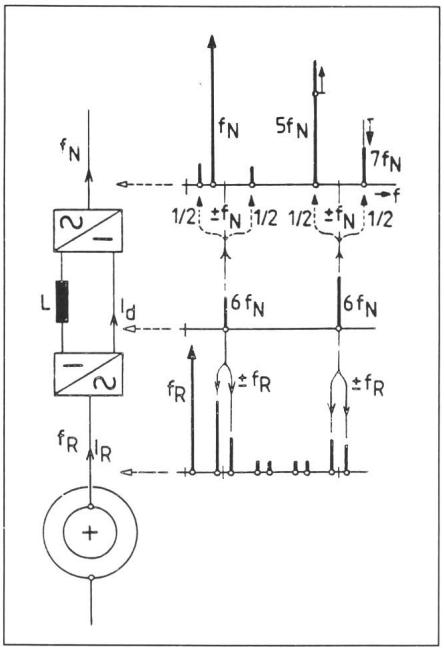


Fig. 3 Oberwellenbelastung

Die im Gleichstrom enthaltenen Oberschwingungen splittern sich in der Wechselstromleitung in untypische Oberschwingungspaare auf. Die Frequenz dieser Oberschwingungen hängt von der Drehzahl, die Amplituden von der Gleichstromdrossel ab.

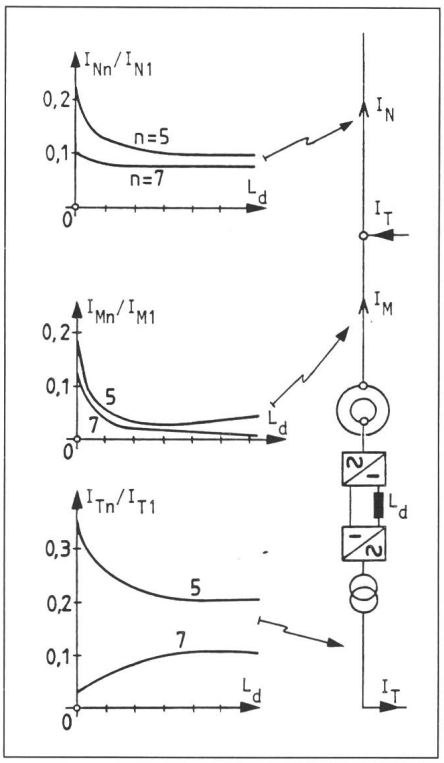


Fig. 4 Einfluss der Zwischenkreisinduktivität L_d auf die typischen Stromoberschwingungen

Experimentelle Untersuchung, bei der Drehmoment und Wechselrichter-Steuerwinkel konstant gehalten wurden. Die Werte beziehen sich auf die jeweilige Grundschwingung.

I_N Netzstrom
I_M Motorstrom
I_T Transformatorstrom
n Ordnungszahl der Oberschwingung
I_{N1}, I_{M1}, I_{T1}, Stromgrundschwingungen

sche Oberschwingungspaare auf (Fig. 3). Die Amplituden dieser Oberschwingungen hängen von der Gleichstromdrossel ab.

In Figur 4 ist an einem Beispiel die Abhängigkeit der typischen Oberschwingungen der Kaskade von der Grösse der Zwischenkreisinduktivität veranschaulicht.

5. Einfluss der Zwischenkreisinduktivität auf die Leistungsbilanz

Sieht man von den Verlusten ab, dann ist die mechanisch abgegebene Leistung des Motors gleich der vom Netz bezogenen Wirkleistung, wobei die überflüssige Schlupfleistung durch den Umrichter wieder dem Motor zurückgeführt wird. Die Grundschwingung des Rotorstroms wird allerdings durch die Gleichrichterwirkung verschoben, so dass der Motor, bezogen auf die konventionelle Widerstandsregelung, eine höhere Blindleistung vom Netz bezieht. Auch der Wechselrichter verbraucht zusätzlich eine vom Steuerwinkel abhängige Blindleistung. Diese Blindleistungskomponenten sind von der Gleichstrominduktivität praktisch unabhängig.

Eine Diodendrehstrombrücke weist allgemein folgende Arbeitszustände auf [8]:

- Lückstrombetrieb,
- Betrieb bei Einfachkommutierung,
- Betrieb bei Doppelkommutierung.

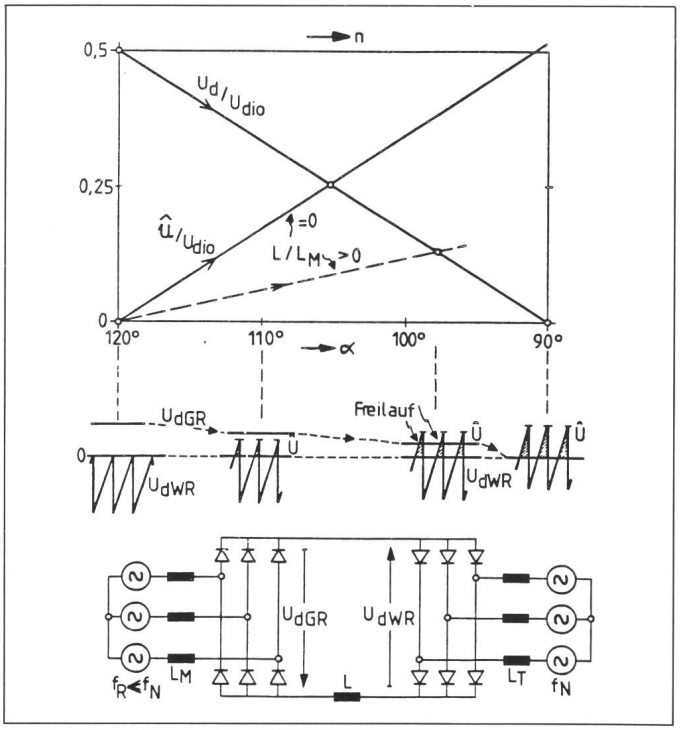
Dies gilt für eine Belastung, die durch eine Induktivität und eine Gleichspannungsquelle gebildet wird. Im Zwischenkreisumrichter arbeitet zwar der Diodengleichrichter auch auf eine Gleichspannungslast, allerdings ist diese Gegenspannung nicht vollkommen glatt, sondern, da sie durch die Anschnittsteuerung des Wechselrichters realisiert wird, stark verzerrt. Bei Steuerwinkeln unter 120° el. erscheint in der Wechselrichtergleichspannung eine positive Komponente, die dann bei α = 90° el. gleich gross wie die negative wird (Fig 5). Bei etwa 105° el. ist der Höchstwert dieser positiven Spannungsspitzen $\hat{u}$ gleich dem Mittelwert der Gleichstromzwischenkreisspannung U_d. Im Steuerbereich 105° el. bis 90° el. gibt dann der Wechselrichter teilweise Spannung, die über der Diodensperrspannung liegt, ab, so dass der Gleichrichter im Freilauf betrieben wird.

Im Freilaufzustand leiten alle sechs Dioden des Gleichrichters. Damit wird sowohl der Gleichstromzwischenkreis als auch der Rotor kurzgeschlossen

Fig. 5
Kennlinienfeld

Mit abnehmender Gleichspannung des Gleichrichters U_{dGR} nehmen im Steuerbereich ab α = 120° el. die positiven Gleichspannungsspitzen des Wechselrichters $\hat{u}$ zu, bis sie ab einem bestimmten Punkt, der durch das Induktivitätsverhältnis L/L_M gegeben ist, das Gleichrichterspannungsniveau überschreiten und zur Freilaufdurchschaltung des Diodengleichrichters führen.

n Drehzahl
U_{dio} ideelle Wechselrichter-Gleichspannung



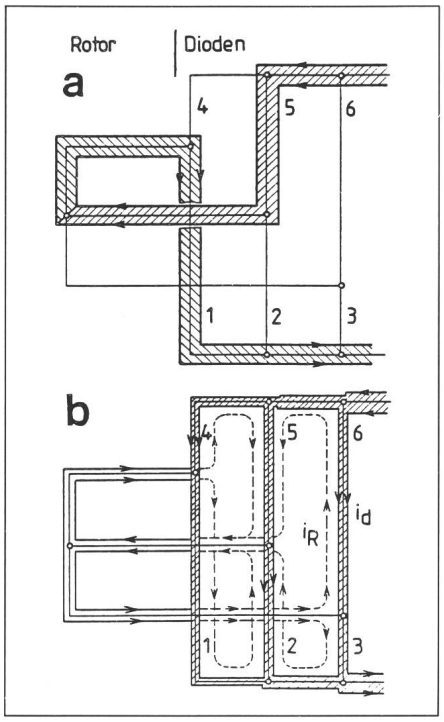


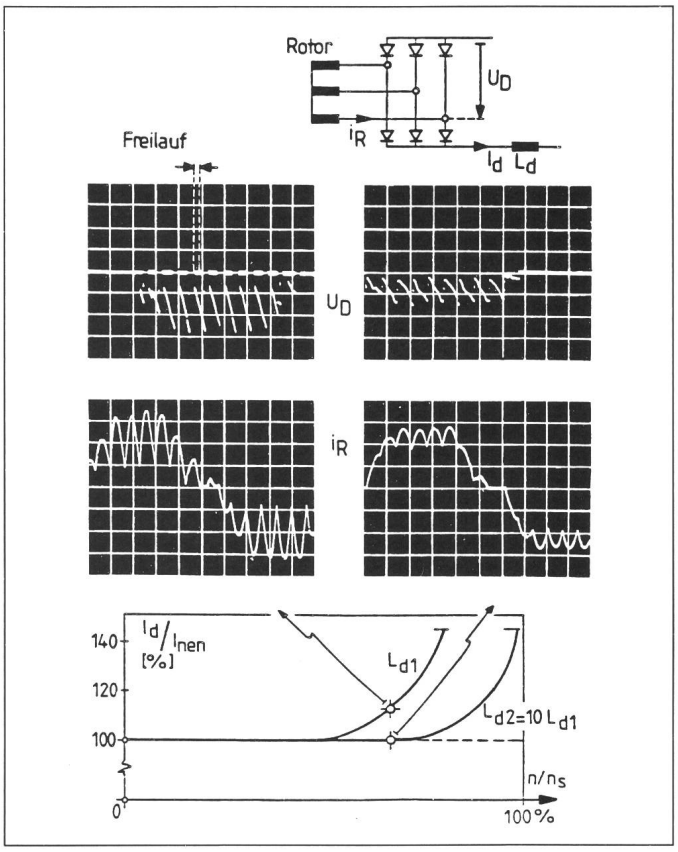
Fig. 6 Gleichrichter im normalen Betriebszustand (a) und im Freilauf (b)

Der Freilauf dauert so lange, bis die Rotorströme die in den entsprechenden Dioden (2, 3, 4, 6) fliessenden Ströme wieder auf null abbauen. Die Bedingungen für den Freilaufeffekt sind aus Figur 9 ersichtlich.

Fig. 7 Abhängigkeit des Gleichstroms von der Drehzahl bei zwei verschiedenen Gleichstrominduktivitäten

Oszillographische Aufnahmen von Rotorstrom und Diodenspannung. Der Freilaufzustand ist an der Diodenspannung (U_D) bei kleinerer Drosselinduktivität (links oben) klar zu erkennen. Das Beispiel entstammt einer experimentellen Untersuchung bei konstantem Drehmoment der Maschine. Die Untersynchrone Stromrichterkaskade ist für den vollen Drehzahlbereich ausgelegt. Leistungsniveau: 20 kW.

n_S Synchrondrehzahl
U_D Diodenspannung
i_R Rotorstrom



(Fig. 6). Der normale Schaltzustand des Gleichrichters wird wieder hergestellt, sobald in den durchfluteten Dioden der Rotorgegenstrom i_R die Gleichstromkomponente i_d zu Null abbaut. Der Freilaufzustand spielt sich insgesamt sechsmal in der Netzperiode ab. Die Dauer des Freilaufs hängt vom Steuerwinkel α des Wechselrichters, vom Verhältnis der Transformator- zur Rotorspannung U_N/U_R und vom Verhältnis der Gleichstrominduktivität L zur Motorinduktivität M bzw. zur Transformatorinduktivität L_T ab.

Durch die Freilaufwirkung wird der Mittelwert der Gleichspannung vermindert. Um die Wirkleistung, die man in das Netz durch den Gleichstromzwischenkreis überträgt, konstant zu halten, muss der Gleichstrom I_d erhöht werden. Das Resultat der Freilauferscheinung im höchsten Drehzahlbereich der Maschine ist daher eine höhere Strombelastung des Gleichstromkreises, des Wechselrichters und des Transformators. Damit wird auch die Blindleistung in der Rückspeisung erhöht.

Die Gleichstromdrossel hat auf die Freilauferscheinung einen entscheidenden Einfluss. Je grösser die Drosselinduktivität L bezogen auf die Induktivität des Motors L_M ist, desto später, d.h. bei desto höherer Drehzahl n, setzt der Freilauf ein und desto kleiner ist auch die Gleichstromerhöhung. Mit zunehmender Bauleistung der Drossel nehmen die Transformator- und Wechselrichterbauleistung ab. Die Wahl der Drossel ist daher ein *Optimierungsprozess,* in dem ein wirtschaftliches Optimum gesucht wird.

Die Figur 7 verdeutlicht an einem experimentellen Beispiel die Zunahme des Gleichstromes mit der Drehzahl bei zwei unterschiedlichen Gleichstrominduktivitäten. In Figur 8 sind anhand einer Computersimulation die Ströme im Rotor und Zwischenkreis im Detail zu ersehen. Zum Vergleich ist hier auch noch eine Aufnahme der Gleichstrom- und Gleichspannungsform aus einer Grossanlage aufgeführt. Während des Freilaufs ist der Gleichstrom i_d grösser als der Rotorstrom i_s. Um diese Differenz ist der Zwischenkreis, Wechselrichter und Transformator mehr belastet. Wie die Form des Gleichstroms durch die Gleichstrominduktivität verändert wird, zeigt anschaulich die Figur 9. Bei der grössten Induktivität $2L_d$ kommt es zu keinem Freilauf mehr. Die Auswirkung des Freilaufs ist in Figur 10,

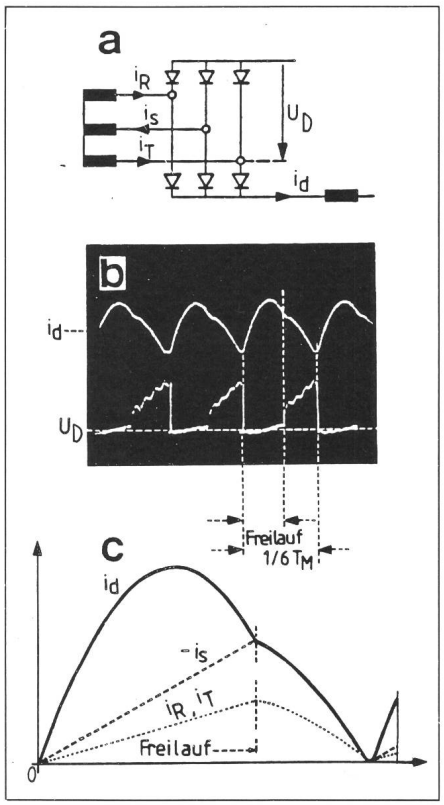


Fig. 8 Verlauf des Gleichstroms i_d und der Rotorströme i_{RST} im höchsten Drehzahlbereich

Computersimulation und oszillographische Aufnahme aus dem Betrieb einer Grossleistungskaskade. Leistungsniveau: 7,3 MW.

T_M Netzspannungsperiode
U_D Diodenspannung (gegenüber Fig. 7 umgekehrte Polarität)

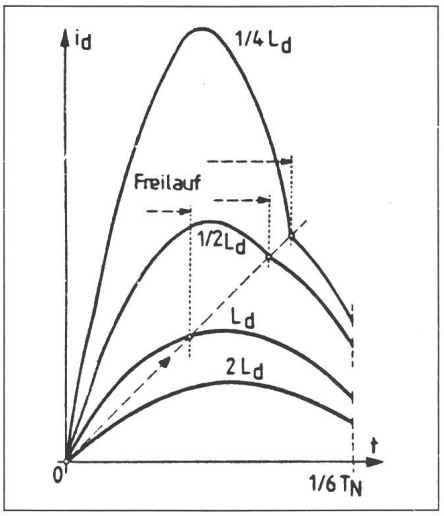


Fig. 9 Beeinflussung des Gleichrichter-Freilaufbereichs durch Gleichstrominduktivität L_d

Bei 2 L_d tritt im Beispiel kein Freilauf mehr auf. Alle Parameter der Schaltung ausser L_d wurden bei der Computersimulation konstant gehalten.

T_N Netzspannungsperiode
L_d Gleichstrominduktivität

bei verändertem Zeitmassstab, dann noch einmal bei der Gegenüberstellung des Gleichstroms mit dem Motorstrom, klar zu erkennen. Wie sich der Gesamtleistungsfaktor λ der Kaskade mit der Gleichstrominduktivität ändert, zeigt die Figur 11.

6. Einfluss der Zwischenkreisinduktivität auf den Ablauf der Störungsfälle

Der wahrscheinlichste Störungsfall im Betrieb der Untersynchronen Stromrichterkaskade ist der Netzspannungszusammenbruch. Sinkt die Netzspannung zufolge eines Kurzschlusses ab, dann erscheint an der Rotorseite der Asynchronmaschine eine netzfrequente Überspannung. Die Höhe dieser Überspannung hängt von der jeweiligen Drehzahl der Maschine sowie von der Art der Störung ab und erreicht im Grenzfall den Wert der Rotorstillstandspannung. Bei zweipoligem Netzkurzschluss schwingt die Störspannung mit der doppelten Netzfrequenz. Im Zwischenkreisumrichter spiegelt sich die erhöhte Rotorspannung im erhöhten Strom wider (Figur 12).

Die Energie der Störung im Rotorkreis wird der mechanischen Energie der Maschine entnommen. Der Anstieg des Störstromes im Zwischenkreis und deren Wechselstromkomponenten kann durch die Gleichstromdrossel begrenzt werden. Erfolgt die Netzstörung im stromlosen Zustand des Umrichters, dann wirkt die Drossel wie ein Spannungsteiler und schützt somit die Thyristoren gegen Überspannung.

7. Schlussbemerkung

Die Drehzahlregelung der Asynchronmotoren mit Schleifringmotor mittels Gleichstrom-Zwischenkreisumrichter wird wegen der Energieersparnisse und ausreichenden regeldynamischen Eigenschaften bei vielen Antrieben im MW-Leistungsbereich angewendet. Dank der Hochleistungsthyristoren, deren Parameter zurzeit bei 2000 A und 4000 V liegen, können kompakte kurzschlussfeste Umrichter gebaut werden.

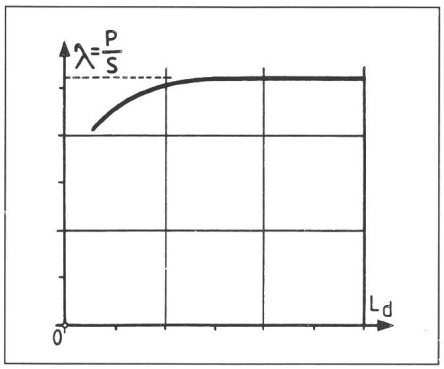


Fig. 11 Abhängigkeit des Leistungsfaktors λ der Untersynchronen Stromrichterkaskade von der Gleichstrominduktivität L_d

Resultat einer experimentellen Untersuchung. Alle Stromkreisparameter sowie Drehmoment und Drehzahl sind konstant gehalten.

P Wirkleistung des Asynchronmotors
S totale Scheinleistung am Eingang der Kaskade

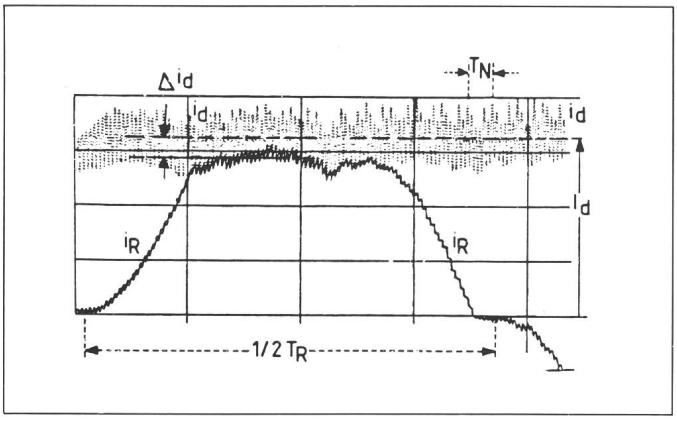


Fig. 10 Zufolge des Freilaufzustandes der Dioden liegt der Mittelwert I_d des Gleichstromes i_d um den Betrag Δi_d höher als der Mittelwert des Rotorstromes i_R im kommutierungslosen Zeitabschnitt

Beispiel einer Computersimulation

T_N Netzspannungsperiode
T_R Rotorspannungsperiode

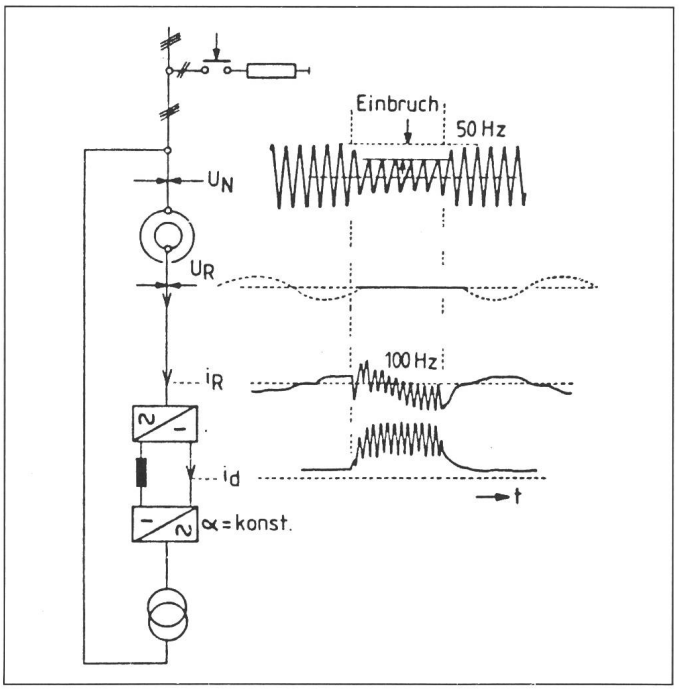


Fig. 12 Netzspannungseinbruch beim Betrieb der Untersynchronen Stromrichterkaskade

Zweipoliger Netzkurzschluss über Widerstand bei konstant gehaltenem Steuerwinkel des Wechselrichters. Beispiel einer experimentellen Untersuchung.

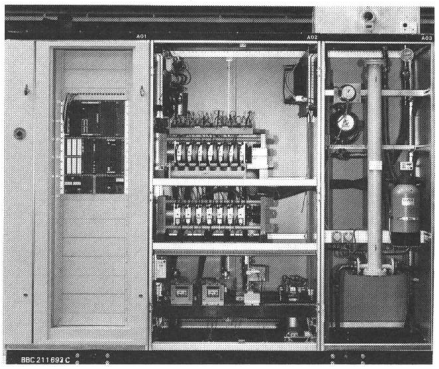


Fig. 13 Umrichter für eine Untersynchrone Stromrichterkaskade

Motornennleistung 7,4 MW

Von links nach rechts: Regelelektronik, Leistungsteil mit wassergekühlten Thyristoren, Kühlungsgruppe.

Die Induktivität der Zwischenkreisdrossel spielt für das Betriebsverhalten der Untersynchronen Stromrichterkaskade eine zentrale Rolle. Sie beeinflusst wesentlich sowohl die Netzrückwirkungen als auch den Leistungsfaktor des Antriebes und darüber hinaus auch deren regeldynamisches Verhalten und den Ablauf der Störungsfälle. Obwohl die Kaskade prinzipiell auch ohne eine Gleichstromdrossel funktionsfähig ist, kann auf sie aus gesamtwirtschaftlichen Gründen in der Regel nicht verzichtet werden. Die Untersuchung bezieht sich auf die einfachste Schaltungsvariante der Kaskade. Wird der Wechselrichter zwölfpulsig ausgeführt oder der Gleichrichter mit Thyristoren bestückt, dann gelten die obigen Resultate selbstverständlich nur bedingt.

Literatur

[1] *B. Schaefer:* Über Quecksilberdampf-Gleichrichter für grosse Leistungen. Dissertation der Technischen Hochschule Darmstadt, 1913.

[2] *F.W. Meyer:* Die freiströmende Elektrizität der technischen Elektronik und die Entwicklung der Starkstromtechnik und des Maschinenbaus. ETZ 42(1921)27, S. 725...728.

[3] *M. Stöhr:* Technische Grundlagen der elastischen Kupplung von Wechselstromnetzen mittels gesteuerter Entladungsgefässe. Arch. Elektrotechn. 26(1932)3, S. 143...167.

[4] *R. Feinberg:* Zur Theorie der Drehstrom-Einphasenstrom-Umformung mit Gleich- und Wechselrichtern. Arch. Elektrotechn. 26(1932)3, S. 200...213.

[5] *M. Stöhr:* Vergleich zwischen Stromrichtermotor und untersynchroner Stromrichterkaskade. E und M 57(1939)49/50, S. 581...591.

[6] *M. Meyer:* Über die untersynchrone Stromrichterkaskade. ETZ-A 82(1961)19, S. 589...596.

[7] *H. Pisecker:* Schaltfeste untersynchrone Stromrichterkaskade. Bull. SEV/VSE 65(1974)2, S. 85...96.

[8] *A. Kloss:* Leistungselektronik ohne Ballast. München, Franzis-Verlag, 1980.

[9] *A. Kloss:* Die Stromrichter-Zeitkonstante. Elektroniker 21(1982)3, S. EL1...EL6.

[10] *A. Kloss:* Stromrichter-Netzrückwirkungen in Theorie und Praxis. EMC der Leistungselektronik. Aarau/Stuttgart, AT Verlag, 1981.

[11] *A. Kloss:* Oberschwingungen bei untersynchronen Stromrichterkaskaden. Elektroniker 21(1982)16, S. EL25...EL30.