Die Spannungsbeanspruchung von Asynchron-Normmotoren an Frequenzumrichtern mit eingeprägten Zwischenkreisstrom

Autor(en): **Keve, T.**

Objekttyp: **Article**

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

Band (Jahr): **73 (1982)**

Heft 1

PDF erstellt am: **28.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-904908

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Die Spannungsbeanspruchung von Asynchron-Normmotoren an Frequenzumrichtern mit eingeprägtem Zwischenkreisstrom

Th. Keve

1. Teil: Die Kommutierungsspannungsspitzen

Als Folge der Weiterentwicklung von Halbleiter-Bauelementen ist zu erwarten, dass in naher Zukunft Asynchronmotoren mit Speisung über Frequenzumrichter zunehmend an Bedeutung gewinnen. Dabei sind besonders Lösungen interessant, die den bewährten Drehstrom-Normmotor in der serienmässigen Ausführung als Käfigläufer in Verbindung mit Frequenzumrichtern mit wenig Schaltungsaufwand benutzen. Ab etwa 10 kW Motorleistung bei 1500 min^{-1} bietet der Umrichter mit Gleichstromzwischenkreis eine preiswerte Lösung (Fig. 1) [1].

Für den ordnungsgemässen Betrieb der Motoren ist u.a. ihre Spannungsbeanspruchung von Bedeutung. Sie wird wesentlich durch die Kommutierung des Wechselrichters bestimmt [2; 3]. Das Drehfeld im Motor entsteht durch zyklische Umschaltung des Zwischenkreisstromes auf die einzelnen Motorstränge. Diese Umschaltung wird durch Zwangskommutierung erreicht. Jeder Strang führt den Strom 120° lang mit 60° Pause.

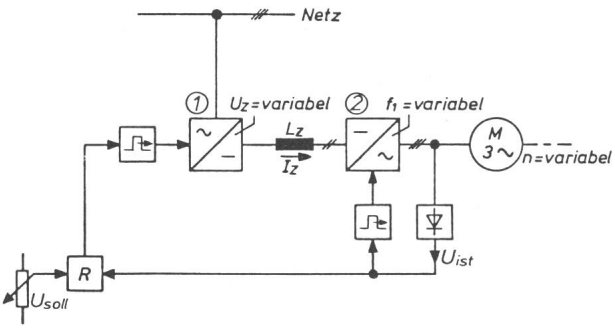

Fig. 1 Prinzipschaltung des Motors mit Umrichter und Regler

1. Kommutierung mit Phasenfolgelöschung

621.313.333;

Die weit verbreitete Kommutierungsschaltung mit dem geringsten Aufwand ist die sog. *Phasenfolgelöschung*. Die Schaltung des Wechselrichters zeigt Figur 2. Die aus 6 Thyristoren T_1 bis T_6 bestehende Drehstrombrückenschaltung hat als Kommutierungshilfe 6 Dioden D_1 bis D_6 und 6 Kondensatoren C_1 bis C_6. Die Motorwicklung ist dargestellt durch ihre Streuinduktivität L_σ und durch die innere Strangspannung U_h. Sowohl die Motorwicklungen mit den Klemmen U, V, W als auch die Kondensatoren sind in Sternschaltung dargestellt. Für die positive Zählrichtung gelten die angegebenen Pfeile. In den Figuren 2a bis 2d ist der Verlauf der Kommutierung erläutert für den Fall, dass der Strom von Strang 1 auf Strang 2 kommutiert. Die Kommutierungskondensatoren C_1 und C_2 sind entsprechend den eingezeichneten Polaritäten von Figur 2a aufgeladen, U_{C21} ist also negativ. Den Verlauf der Spannungen und eines Stromes zeigt Figur 3. Darin ist ein endlicher Kommutierungswinkel $u \approx 15^0$ angenommen. In diesem Falle kann man den idealisierten Stromblock mit guter Näherung [4] bei $u/2$ ansetzen. Die Grundwelle des Strangstromes $i_{\nu=1}$ ist gestrichelt angedeutet. Man erkennt, dass der Phasenverschiebungswinkel φ_1 zwischen der Grundwelle des Stromes $i_{\nu=1}$ und der Spannung u_1 ungefähr $\varphi_1 \approx 37{,}5^0$ beträgt, wobei die Asynchronmaschine motorisch betrieben wird. Der Vorteil der verwendeten Zählpfeilrichtungen ist hier ersichtlich: Wie aus Figur 3a hervorgeht, entspricht der Winkel zwischen der Klemmenspannung u_{21} und dem zugehörigen Leiterstrom i_2 (ideelle Flanke des Blockes) eben dem Phasenverschiebungswinkel φ_1. Damit lassen sich oszillographische Aufnahmen leichter auswerten.

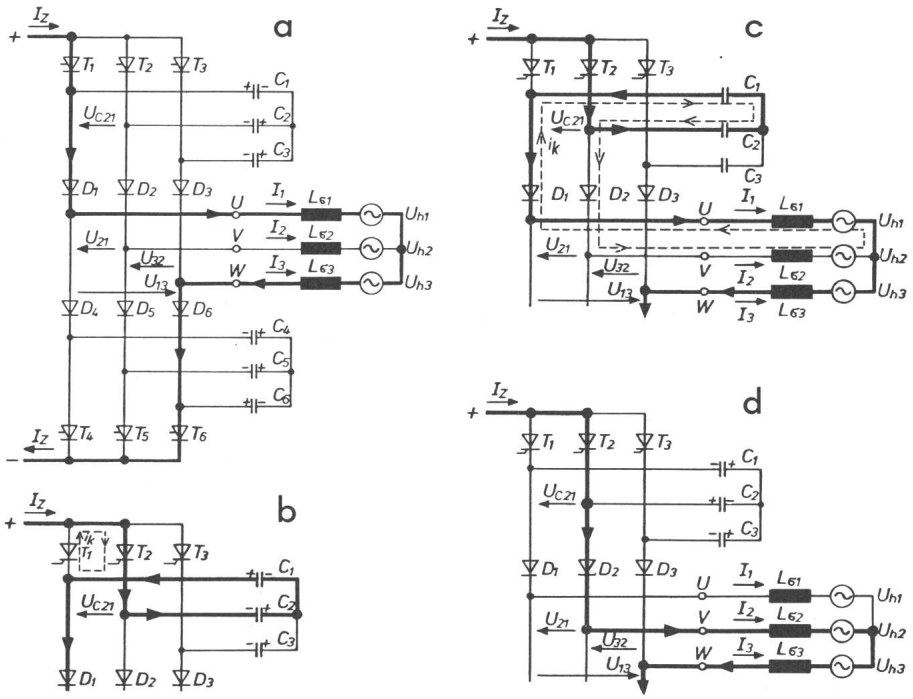

Fig. 2
Schaltung des Wechselrichters mit dem Motor bei Phasenfolgelöschung
a...d Phasen der Kommutierung (siehe Text)

In Figur 2a fliesst der Zwischenkreisstrom I_z durch Thyristor T_1, Diode D_1, Strang 1, sowie durch Strang 3, Diode D_6 und Thyristor T_6. Um die Kommutierung des Stromes auf Strang 2 einzuleiten, wird Thyristor T_2 im Zeitaugenblick t_0 (Fig. 3) gezündet. Die Kondensatorspannung u_{C21} wird dann über die Thyristoren T_1 und T_2 quasi kurzgeschlossen (Kurzschlußstrom i_k von Figur 2b), so dass der Strom sehr schnell von T_1 auf T_2 kommutiert. Er fliesst weiter über C_2, C_1 und D_1 und damit über Strang 1. Dabei werden die Kondensatoren C_1 und C_2 umgeladen. Ab t_1 wird der Thyristor T_1 in Sperrrichtung beansprucht. Ab t_2 ist die Kondensatorspannung u_{C21} grösser als die Klemmenspannung u_{21}, so dass an der Diode D_2 eine Spannung in Durchgangsrichtung anliegt (Fig. 2c). Damit kann sich ein Kommutierungs-Kurzschlussstrom i_K im Schwingkreis der Motorinduktivitäten und der Kondensator-Kapazitäten über Strang 1, D_1, C_1, C_2, Strang 2 ausbilden. Er ist dem Zwischenkreisstrom I_z überlagert. Beim Anwachsen von i_K wird die Umladung der Kondensatoren verzögert. Erreicht i_K die Grösse von I_z, so sperrt D_1. Damit ist die Kommutierung des Stromes von Diode D_1 auf D_2 zum Zeitpunkt t_3 abgeschlossen (Fig. 2d). Die Kondensatorspannung u_{C21} erreicht ihr positives Maximum und bleibt bis zur nächsten Kommutierung bestehen. Die Motorklemmenspannung verläuft so, dass u_{21} zwischen den Zeitpunkten t_2 und t_3 eine Spitzenspannung entsprechend der Ladespannung der Kondensatoren von U_{ck} aufweist. Trotz erheblicher Abweichung des Primärstromes von der Sinusform hat die Strangspannung und damit auch die verkettete Spannung eine deutlich ausgeprägte Grundharmonische. Entsprechend muss der Magnetisierungsstrom sinusförmig verlaufen, was nur durch eine entsprechende ausgleichende Wirkung der Läuferströme möglich ist [5]. Die Strangspannung des Motors kann man demnach zusammengesetzt denken aus der sinusförmigen Grundspannung u_h und den Kommutierungsspannungsspitzen U_{ck}. Für die rechnerische Auswertung der Kommutierungsspannungsspitzen U_{ck} über die Motorklemmenspannung, z. B. u_{21}, muss man den Winkel, der sich beim Kommutierungswinkel $u/2$ ergibt, berücksichtigen.

Figur 3b zeigt noch die Stromführungsdauer der hier betrachteten Dioden (D_1 bis D_3) und Thyristoren (T_1 bis T_3).

2. Kommutierungs-Spannungsspitzen

Figur 4 zeigt die schematische Bildung der Kommutierungsspannungsspitzen in der verketteten Spannung u_{21} bei Sternschaltung des Motors. Es sind jeweils die Strangspannungen u_1 und u_2 und die Strangströme i_1, i_2 dargestellt. Wegen der einfacheren Darstellung wird ein kleiner Kommutierungswinkel $u \approx 0$ angenommen. Figur 4 zeigt den motorischen Betrieb etwa mit dem Nennstrom entsprechend einem $\varphi_1 \approx 30^0$. Bei positiver Änderung des Stromes di/dt entsteht eine positive Spannungsspitze U_{ck}* und umgekehrt. Man sieht, dass die Strangspannung je Periode vier Kommutierungsspitzen aufweist. In der verketteten Spannung $u_{21} = u_2 - u_1$ entstehen 6 Kommutierungsspitzen mit unterschiedlicher Grösse, die mit den Buchstaben a bis f gekennzeichnet sind. Jedesmal, wenn die Ströme i_1 und i_2 gleichzeitig kommutieren, entstehen die doppelten Spannungsspitzen U_{ck} (a und d). Die übrigen Spitzen sind halb so gross. Für die Grösse der Motorklemmenspannung sind die Spitzen a und b bzw. d und e massgebend, da sich hierbei die Kommutierungsspannungsspitzen U_{ck} bzw. $U_{ck}/2$ zu der inneren Spannung addieren. Die Lage der ersten

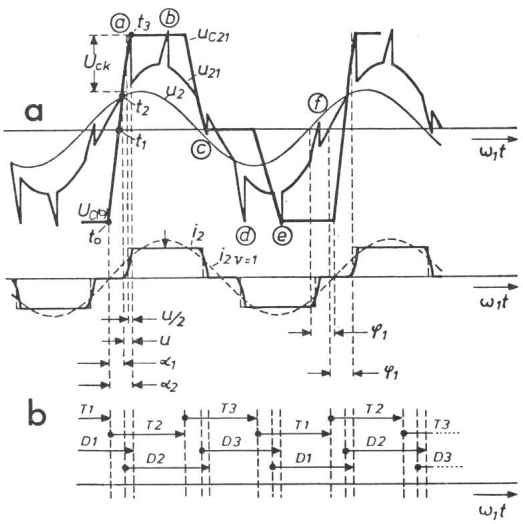

Fig. 3 Verlauf der inneren Motorspannung u_2, der Klemmenspannung u_{21}, der Kondensatorspannung u_{C21} und des Leiterstromes i_2
(a)...(f) Kommutierungsspitzen
a Verlauf der Spannungen und des Stroms
b Stromführungsdauer der Dioden und Thyristoren

grossen Spitze, z. B. a gegenüber der Klemmenspannung ist durch den Phasenverschiebungswinkel φ_1 zwischen der Grundwelle des Stromes $i_{v=1}$ und der inneren Spannung u_{h1} gegeben. Die nächste Spitze folgt 60^0 später. Die Grösse der Spitze ergibt sich aus dem Energieinhalt der Motorinduktivität und der Kondensatoren. Sie ist direkt proportional dem Zwischenkreisstrom. Damit ist sowohl die Lage als auch die Grösse der Spitze a von der Belastung abhängig (Fig. 5, motorischer Betrieb). Bei Leerlauf beträgt $\varphi_1 \approx 90^0$, so dass die Kommutierungsspitze a (U_{ck}) sich zu der Amplitude der Spannung addiert. Weil der Leerlaufstrom nur etwa 30 % des Nennstromes beträgt, sind die Spitzen entsprechend kleiner. Im generatori-

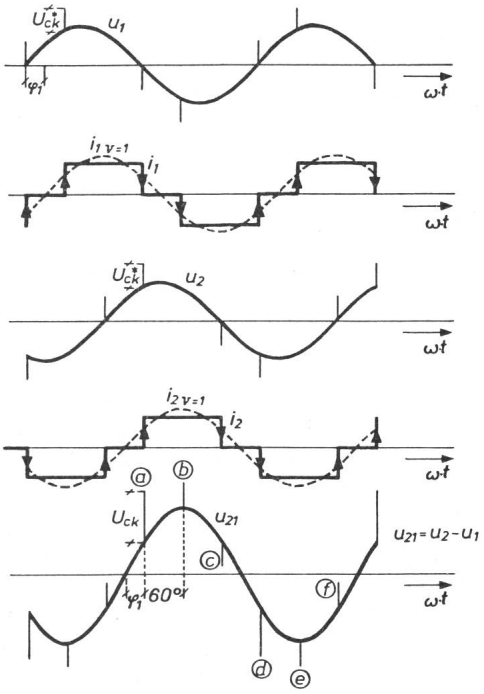

Fig. 4 Zur Bildung der Kommutierungsspannungsspitzen a bis f in der verketteten Spannung u_{21}

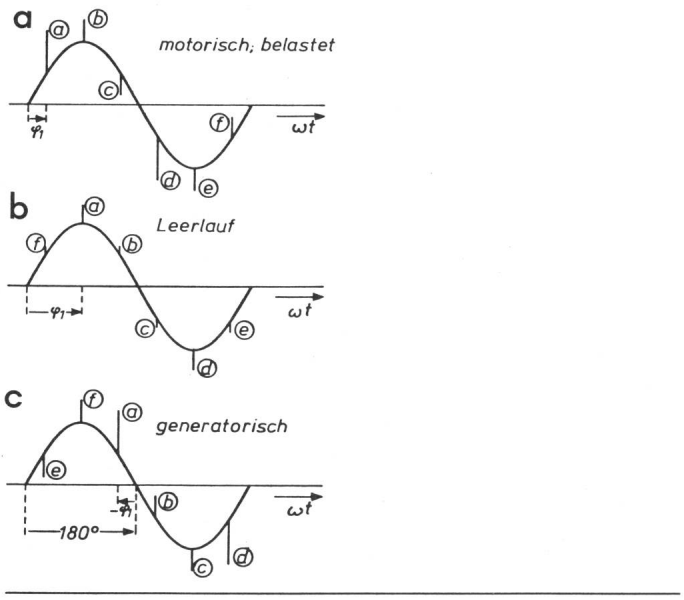

Fig. 5 Lage und Grösse der Kommutierungsspannungsspitzen je nach Last

schen Betrieb wandert die Spitze a entsprechend dem Winkel $(180^0 - \varphi_1)$.

Für die Spannungsbeanspruchung des Motors ist die während des Betriebes auftretende höchste Spannungsspitze U_{max} massgebend. Aus den dargelegten Gründen genügt es, den motorischen Betrieb zwischen Maximallast und Leerlauf zu betrachten. Je nach Dimensionierung der Kommutierungskondensatoren kann dann, abhängig von der Belastung, die Spitze a oder die Spitze b ausschlaggebend sein. Die Grösse der Kondensatoren wird nach den Kommutierungsbedingungen so festgelegt, dass die Spitze U_{ck} möglichst klein bleibt. Diese Kommutierungsbedingungen legt man bei der maximalen Motorspannung U_n und der maximalen Frequenz f_n fest. Dementsprechend gelten mit den Bezeichnungen von Figur 3a

– Die Schonzeit t_s des Thyristors muss kleiner sein als die Zeitspanne $\Delta t_1 = t_1 - t_0$. Der Kondensator wird von $U_C(0)$ in der Zeit Δt_1 mit dem Strom I_z entladen. Diese Bedingung wird üblicherweise für den Nennstrom aufgestellt. Sie ist bei Normmotoren allgemein unkritisch.

– Kommutierungswinkel α_1 entsprechend der Umladezeit der Kondensatoren $\Delta t_2 = t_2 - t_0$, bis die Diodenspannung null wird. Dieser Winkel ist kritisch bei Leerlauf, da dann I_z klein ist und damit die Umladung entsprechend länger dauert.

– Kommutierungswinkel u entsprechend der Umschwingzeit $\Delta t_3 = t_3 - t_2$. Sie entspricht $^1/_4$ der Periodendauer des Schwingkreises, bestehend aus Motorinduktivität und Kondensatorkapazität. Der Winkel u, der eigentliche Kommutierungswinkel, ist praktisch konstant, unabhängig von der Belastung.

Für eine einwandfreie Kommutierung müssen folgende Bedingungen eingehalten werden:

1. $\alpha_1 < 60^0$, wegen eines einwandfreien periodischen Betriebes.
2. $\alpha_1 + u = \alpha_2 < 120^0$, wegen der Vermeidung von Mehrfachkommutierung.
3. Bei der hier vorliegenden Schaltung kommt noch folgende Bedingung hinzu: Betrachtet man Figur 3a, so ist ersichtlich, dass die Kondensatorspannung u_{C21} ihren Wert bis zu der nächsten Kommutierung des Stromes i_2 beibehält. Wie gezeigt wurde, entsteht 60^0 nach $\omega_1 t_2$ eine zweite Kommutierungsspannungsspitze $U_{ck}/2$ beim Kommutieren des Stromes i_1 mit der Spannungsspitze U_b. Ist $U_b = u_{21} > u_{C21}$, so kann ein zusätzlicher Strom i_D in Durchlassrichtung der Diode D_1 fliessen. Dieser Zusatzstrom erzeugt eine Delle im Stromblock i_2 und einen positiven Stromimpuls beim Strom i_1, im Moment wo dieser gerade negativ werden sollte (Pfeil in Fig. 3a). Hierdurch treten im Motor unerwünschte Erscheinungen auf, die einen ordnungsmässigen Betrieb verhindern können. Aus diesem Grunde soll die Spannungsspitze $U_a \geqq U_b$ sein.

Bei der vorliegenden Schaltung bedingt die letzte Bedingung die Auslegung der Kommutierungskondensatoren.

3. Versuchsergebnisse zu Kommutierungsspannungsspitzen

Die hier dargelegten Betrachtungen wurden an mehreren Normmotoren überprüft; hier sollen die Ergebnisse am Normmotor 55 kW, 380/220 V, ⅄/Δ, 109/188 A, $\cos\varphi = 0{,}85$, 1460 min^{-1}, 50 Hz, IP 23, dargelegt werden. Tabelle I zeigt die Zusammenstellung der wichtigsten Messungen und Auswertungsergebnisse. Die Figuren 6...8 enthalten einige Bilder von charakteristischen Aufnahmen der in ⅄ geschalteten Wicklung. Die im Abstand $\omega_1 t = 60^0$ auftretenden Kommutierungsspannungsspitzen sind gut erkennbar. Sie führen zu beträchtlichen kurzzeitigen Überspannungen. Figur 6 zeigt die Aufnahme mit 47-µF-Kondensatoren bei $U_{1G} = 214$ V, $f_1 = 29$ Hz, Last 220 Nm. Die Motorspannung wurde mit einem Drehspulmessgerät mit Gleichrichter gemessen, weshalb die Bezeichnung U_{1G} gewählt wurde. Man erkennt, dass $U^a > U^b$ ist und dass die Spannungsspitzen $U_{ck}{}^b$ und $U_{ck}{}^c$ unsymmetrisch gross sind, $U_{ck}{}^c > U_{ck}{}^b$ und $U_{ck}{}^b < 1/2\ U_{ck}{}^a$. Figur 7 ist bei 50 Hz mit $U_{1G} = 370$ V bei etwa der gleichen Last aufgenommen. Die Spitzen sind nunmehr gleich gross, $U^a = U^b$. Figur 8 schliesslich zeigt die Aufnahme mit 69-µF-Kondensatoren und 50-Hz-Last, $U_{1G} = 370$ V. Hier ist in der Mitte des Stromblockes eine Delle zu beobachten (Pfeil), da $U^b > U^a$ ist.

Für die Bemessung der Kondensatoren ist die Grösse des Verhältnisses $U_{ck}{}^b/U_{ck}{}^a$ von Bedeutung, das 0,5 betragen soll. Die Messungen zeigen jedoch, dass $U_{ck}{}^b < 1/2\ U_{ck}{}^a$ ist und

Zusammenstellung der wichtigsten Messresultate — Tabelle I

Schaltung	Kommut.-Kondens.	Eingestellte Werte				Oszillogramm	Auswertung				
Δ/⅄	C µF	f_1 Hz	U_{1G} V	I_z A	M Nm	Figur Nr.	$U_{ck}{}^a$ V	$U_{ck}{}^b$ V	$U_{ck}{}^c$ V	$U_a ... U_b$	$U_C(0)$ V
Δ	47	50	215	160	211	–	457	185	277	>	590
	47	86	371	165	211	–	454	205	246	=	687
	69	50	210	170	224	–	400	164	225	>	533
	69	86	381	176	222	–	367	185	215	<	595/656
⅄	47	29	214	94	220	6	458	185	307	>	595
	47	50	365	100	230	7 (10)	485	225	246	=	717
	69	50	370	100	227	8	387	185	205	<	615/656

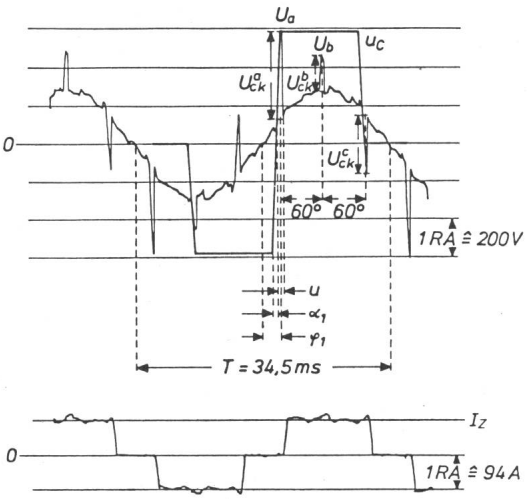

Fig. 6 Oszillographische Aufnahmen der Klemmenspannung und des Leiterstromes

λ-Schaltung der Motorwicklung, Kondensatoren 47 µF, 29 Hz, Last 220 Nm; RA = Rastermass

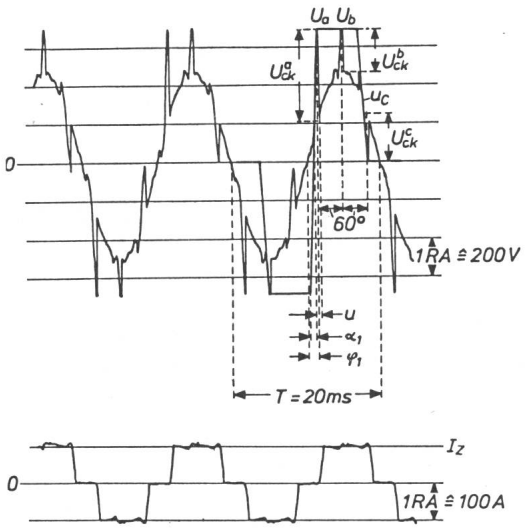

Fig. 7 Wie Figur 6, jedoch 50-Hz-Last

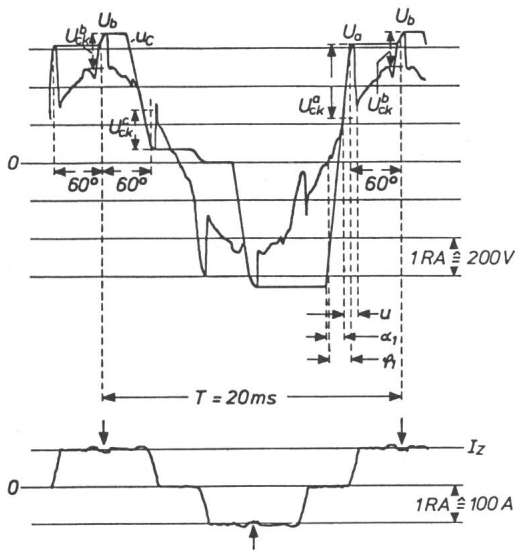

Fig. 8 Wie Figur 7, 50-Hz-Last, jedoch Kondensatoren 69 µF

$U_{ck}^c > 1/2\ U_{ck}^a$. Diese Erscheinung muss auf gewisse Unsymmetrien im Ablauf der Kommutierung zurückgeführt werden. Aus den Versuchen lässt sich feststellen, dass

– auf die unterschiedlichen Höhen der Kommutierungsspannungsspitzen U_{ck}^b und U_{ck}^c die Schaltung der Motorwicklung keinen Einfluss hat, $U_{ck}^c > U_{ck}^b$.

– unabhängig von der Motorschaltung eine Delle in der Mitte des Stromblockes auftritt, wenn $U^b > U^a$ ist.

2. Teil: Spannungsbeanspruchung der Motoren

4. Klemmenspannung

Die maximale Spannungsbeanspruchung der Motoren ergibt sich bei der maximal möglichen Grösse der Kondensatorkapazität. Dies ist der Fall, wenn man die Kondensatoren so bemisst, dass die Spannungsspitzen mit Nennstrom bei a und b gleich sind, $U^a = U^b$. Die übrigen Kommutierungsbedingungen werden dabei bei den Normmotoren gut erfüllt. Bezeichnet man die Kommutierungsspannungsspitze bei a mit U_{ck}, so tritt bei b theoretisch 0,5 U_{ck} auf. Mit dieser Rechnung liegt man auf der sicheren Seite, da alle bisherigen Messungen ergeben, dass der tatsächliche Wert bei Spitze b kleiner ist.

Mit $U^a = \hat{U}_{1h} \cdot \sin\varphi_1 + U_{ck}$
und $U^b = \hat{U}_{1h} \cdot \sin(\varphi_1 + 60^0) + 0{,}5\ U_{ck}$,
wird bei $U^a = U^b = U_{max}$;

$$U_{ck} = 2\ \hat{U}_{1h}\ [\sin(\varphi_1 + 60^0) - \sin\varphi_1] \quad \text{und} \qquad (1)$$

$$U_{max} = \hat{U}_{1h}\ [2\sin(\varphi_1 + 60^0) - \sin\varphi_1] \qquad (2)$$

($\hat{U}_{1h}$ = Amplitude der inneren verketteten Motorspannung)

Man erkennt, dass U_{max} um so grösser ist, je kleiner φ_1 wird. Dieser Winkel ist entsprechend dem Spannungsabfall an der Ständerstreureaktanz kleiner als der dem $\cos\varphi$ entsprechende Winkel φ. Die grösseren Normmotoren erreichen etwa einen Leistungsfaktor von $\cos\varphi = 0{,}9$. Bei ihnen beträgt der Differenzwinkel etwa 4^0, so dass für den inneren Phasenverschiebungswinkel $\cos\varphi_1 = 0{,}93$ wird. Berücksichtigt man noch, dass die innere Spannung $\hat{U}_{1h}$ etwa 4% kleiner ist als $\sqrt{2}\ U_n$, so wird

$$U_{ck} = 1{,}68\ U_n \text{ und } U_{max} = 2{,}18\ U_n \qquad (3, 4)$$

Bei 380-V-Netzen beträgt damit U_{ck} = 638 V, U_{max} = 828 V; bei 500-V-Netzen wird U_{ck} = 840 V, U_{max} = 1090 V.

Normmotoren sind Niederspannungsmotoren. Nach den DIN-Bestimmungen sollte die grösste vorkommende Spannung unter 1000 V liegen. Die gelegentliche geringfügige Überschreitung dieses Wertes bei maximaler Aussteuerung am 500-V-Netz bei grösseren Motortypen dürfte die Lebensdauer dieser Motoren jedoch nicht wesentlich beeinträchtigen. Allerdings sollen am Netz mit höherer Spannung Normmotoren auch nur bis 500 V betrieben werden, um die Motorwicklung nicht zu gefährden.

Nach diesen Überlegungen sollte die zulässige Kommutierungsspannung nach Gl. (1) die Grundlage für die Bemessung der Kondensatoren bei Normmotoren bieten. Allerdings hat eine Überprüfung bei Teillasten zu erfolgen, da es vorkommen kann, dass dabei Spitze b geringfügig grösser wird als Spitze a. Ebenso sollten die übrigen Kommutierungsbedingungen kontrolliert werden.

5. Kommutierungsschaltung mit Hilfsthyristoren

Eine andere, aufwendigere Kommutierungsschaltung als nach Figur 2 zeigt Figur 9, mit Hilfsthyristoren. Der Wechselrichter 2 wird aus 2 Gruppen von Thyristoren aufgebaut: Gruppe 2a besteht aus den Hauptthyristoren (T_{1a} bis T_{6a}); Gruppe 2b wird aus den Hilfsthyristoren (T_{1b} bis T_{6b}) gebildet. Die Hilfsthyristoren sind über die Löschkondensatoren C_1 bis C_3 mit der Gruppe der Hauptthyristoren verbunden. Der Ablauf der Kommutierung verläuft ähnlich wie in Figur 2 und 3 erläutert. Von den Bedingungen der einwandfreien Kommutierung sind die ersten beiden auch hier gültig. Die letzte Bedingung fällt jedoch weg. Tritt hier der Fall auf, dass die Kommutierungsspannungsspitze b grösser ist als a, $U^b > U^a$, so kann der Thyristor T_{1b} nicht mehr leitend werden, da er nicht mehr gezündet wird. Damit können die Kondensatoren grösser bemessen werden.

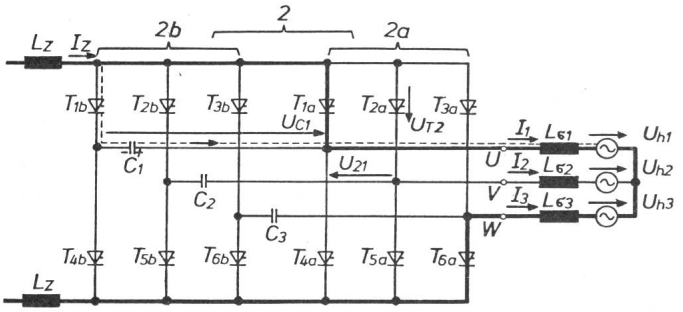

Fig. 9 **Schaltung des Wechselrichters mit dem Motor bei Phasenfolgelöschung mit Hilfsthyristoren**

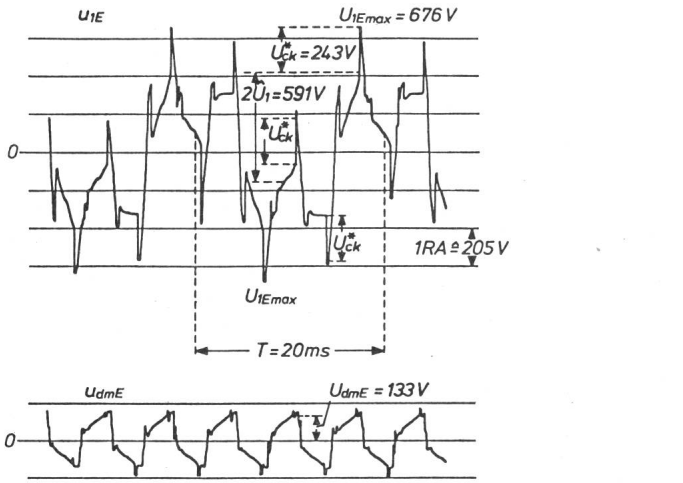

Fig. 10 **Oszillographische Aufnahmen der Klemmenspannung gegen Erde u_{1E} und des Mittelwertes der Gleichspannung gegen Erde u_{dmE}**

Motorwicklung in λ-Schaltung, Kondensatoren 47 µF, bei symmetrischer Schaltung der Zwischenkreisdrossel, 50-Hz-Last; RA = Rastermass

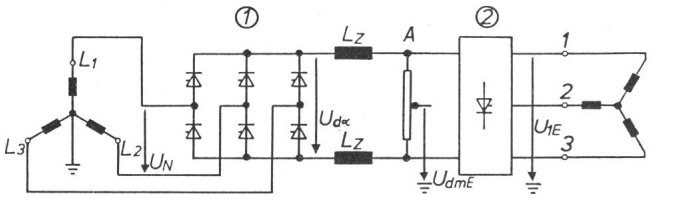

Fig. 11 **Prinzipschaltung zur Messung des Mittelwertes der Gleichspannung gegen Erde u_{dmE} bei geerdetem Netztrafo, mit symmetrischer Schaltung der Zwischenkreisdrossel**

Bei Normmotoren an 380-V-Netzen bringt dies keinen Vorteil. Es empfiehlt sich, die Kondensatoren entsprechend Gl. (1) zu bemessen. Bei Motoren an 500-V-Netzen soll man den Kondensator so wählen, dass $U_{max} < 1000$ V wird und damit die Gewähr besteht, dass die Bedingung für Niederspannungsmotoren auch bei voller Aussteuerung einwandfrei erfüllt wird. In diesem Falle tritt die maximale Spannung bei Spitze b auf. Daher gilt

$$U^b = \hat{U}_{1h} \sin(\varphi_1 + 60^0) + 0{,}5\, U_{ck} < 1000 \text{ V} \qquad (5)$$

Mit dem angenommenen Spannungsabfall von 4% und dem Differenzwinkel von 4^0 erhält man bei $\cos\varphi = 0{,}9$ den Wert von

$$U_{ck} \approx 640 \text{ V}. \qquad (6)$$

Damit ergeben sich die Spitze a zu $U^a = 892$ V und b zu $U^b = 992$ V.

6. Spannungsbeanspruchung der Motorwicklung gegen Erde

Bisher wurde der Verlauf der Klemmenspannung der Motoren betrachtet. Ist der Speisetransformator des Netzes, durch den der Motor mit dem Frequenzumrichter gespeist wird, im Sternpunkt geerdet, so ist auch der Verlauf der Klemmenspannung gegen Erde von Bedeutung. Die folgenden Figuren zeigen Aufnahmen mit Phasenfolgelöschung, und zwar bei Sternschaltung der Motorwicklung und mit 47-µ-F-Kondensatoren (Tabelle I). Figur 10 enthält eine oszillographische Aufnahme der Klemmenspannung der Phase 1 gegen Erde u_{1E} bei 50 Hz mit Belastung, und zwar wenn die Glättungsdrossel im Zwischenkreis *symmetrisch* in den beiden Zweigen des Gleichstromkreises verteilt geschaltet ist. Während in der Klemmenspannung die Grundharmonische einwandfrei erkennbar war, ist diese Grundharmonische an diesem Spannungsbild bei der ersten Betrachtung sehr schlecht erkennbar. Die maximalen Spannungsspitzen treten unregelmässig auf, sie betragen im Bild sowohl in der positiven als auch in der negativen Phase etwa $U_{max} = 676$ V.

Die Kommutierungsspitze in der Strangspannung U_{ck}* beträgt den halben Wert von U_{ck} (Tab. I: 485 V). Da die Asynchronmaschine ihre Spannung vom Zwischenkreis erhält, muss diese Erscheinung mit der Erdung des gleichrichterseitigen Transformators zusammenhängen. Figur 11 zeigt die Schaltung. Der Mittelwert der Gleichspannung u_{dmE} wird an einem Potentiometer im Zwischenkreis am Mittelpunkt gegen Erde gemessen, ebenso wird die Spannung des Stranges 1 gegen Erde u_{1E} gemessen. Bei unsymmetrischer Schaltung der Zwischenkreisdrossel befindet sich z.B. im unteren Zweig keine Drossel. In Figur 10 ist auch der Verlauf der Gleichspannung u_{dmE} aufgezeichnet. Man erkennt, dass die sprunghafte Änderung der Klemmenspannung gegen Erde u_{1E} mit dem Verlauf dieser Spannung u_{dmE} zusammenhängen kann.

Für die weiteren Betrachtungen ist es angebracht, zuerst die erforderliche Aussteuerung des Gleichrichters, je nach Motorbelastung (Leerlauf, Last) und Frequenz, zu betrachten. Figur 12 zeigt die Strangspannungen u_1 bis u_3 (mit den Amplituden $\hat{U}_1/\sqrt{3}$) und die Strangströme bei Sternschaltung des Motors. Das Bild zeigt den Fall etwa für Nennlast mit $\varphi_1 = 30^0$, entsprechend $\cos\varphi_1 = 0{,}866$. Die Motorwicklung ist mit dem

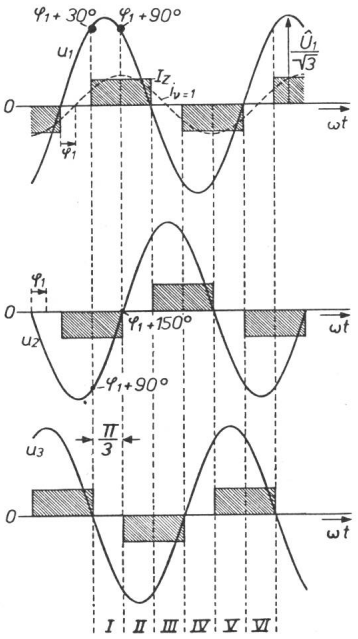

Fig. 12 Zur Bestimmung der erforderlichen Aussteuerung des Gleichrichters entsprechend Frequenz und Last des Asynchronmotors

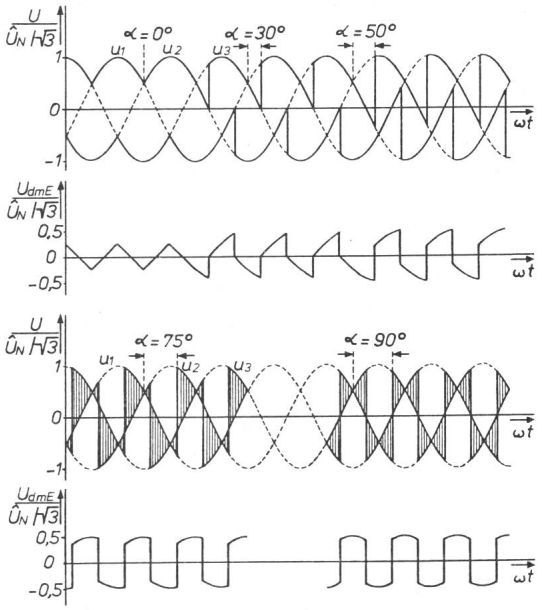

Fig. 13 Zur Konstruktion des Mittelwertes der Gleichspannung gegen Erde u_{dmE} aus den Strangspannungen bei verschiedenen Aussteuerungsgraden

Symmetrische Schaltung der Zwischenkreisdrossel, Bezugswert $\hat{U}_N \sqrt{3}$

Zwischenkreis über die Thyristoren des Wechselrichters verbunden. Sie sind leitend, wenn Strom fliesst. Damit muss der Gleichrichter den Mittelwert der Wechselspannung $U_{d\alpha}$ liefern, wenn gleichzeitig in einem Strang ein positiver und in einem anderen ein negativer Strom fliesst. Innerhalb einer Periode sind 6 Zeitintervalle I bis VI denkbar. In jedem dieser Abschnitte ist der Mittelwert der zu liefernden Gleichspannung gleich. Es genügt daher, den Mittelwert innerhalb eines Zeitintervalles (z.B. von I) mit dem Zeitwinkel $\pi/3$ zu bilden. Der Mittelwert der Gleichspannung für die positive und negative Halbwelle ergibt sich zu

$$U_{d\alpha} = \hat{U}_1 \cdot \frac{\sqrt{3}}{\pi} \left[-\cos\alpha \Big|_{\varphi_1+30^0}^{\varphi_1+90^0} - \cos\alpha \Big|_{\varphi_1+90^0}^{\varphi_1+150^0} \right] \qquad \ldots(7)$$

mit $\alpha = \omega\, t$ und bei 120⁰-Stromblock.

An einem bestimmten Netz (z.B. $U_N = 380$ V) liefert die vollgesteuerte Drehstrom-Brückenschaltung maximal die Gleichspannung $U_{d0} = 1{,}35\ U_N$ (z.B. $U_{d0} = 513$ V). Um die Gleichspannung $U_{d\alpha}$ zu liefern, muss der Gleichrichter entsprechend ausgesteuert werden:

$$U_{d\alpha} = U_{d0} \cdot \cos\alpha, \text{ also } \alpha = \arccos U_{d\alpha}/U_{d0} \qquad (8)$$

Aussteuerungswinkel α zu den Beispielen von Tabelle I Tabelle II

f_1	U_1	Netz 380 V, $U_{d0} = 513$ V					
		Last, $\varphi_1 = 30^0$			Leerlauf, $\varphi_1 = 75^0$		
Hz	V	$U_{d\alpha}/\hat{U}_1$	$U_{d\alpha}$ V	α ⁰	$U_{d\alpha}/\hat{U}_1$	$U_{d\alpha}$ V	α ⁰
50	380	0,827	444,4	30,0	0,247	132,8	75,0
29	220	0,827	257,8	59,8	0,247	77,0	81,4
10	76	0,827	88,9	80,0	0,247	26,6	87,0

In Tabelle II sind die erforderlichen Aussteuerungswinkel α des Gleichrichters zusammengestellt für etwa Nennlast mit $\varphi_1 = 30^0$ und für etwa Leerlauf mit $\varphi_1 = 75^0$ für die Frequenzen 50, 29 und 10 Hz bei Sternschaltung des Motors an einem Netz mit 380 V. Die Spannungsregelung erfolgt frequenzproportional. Wie man erkennen kann, variiert der Aussteuerungswinkel zwischen 30⁰ und 87⁰. Dabei ist der Spannungsabfall im Gleichstromkreis vernachlässigt.

Als nächstes soll die Form und Grösse des Mittelwertes der Gleichspannung u_{dmE} gegen Erde bei *symmetrischer* Schaltung der Zwischenkreisinduktivität L_z betrachtet werden. In diesem Falle wirken die Zwischenkreisinduktivitäten (Fig. 11) so, dass der Mittelwert der Gleichspannung gegen Erde dem Mittelwert der Spannungskurven zwischen den positiven und negativen Halbwellen der Drehstrom-Brückenschaltung gegen null entspricht. Figur 13 zeigt die graphische Konstruktion aus den Strangspannungen des Netzes $\hat{U}_N/\sqrt{3}$ zu verschiedenen Aussteuerungswinkeln α. Der Maximalwert des Gleichspannungsmittelwertes U_{dmE} schwankt zwischen 30⁰ und 90⁰ Aussteuerung nur geringfügig (0,455...0,5) $\hat{U}_N/\sqrt{3}$. Vergleicht man die Form der Gleichspannung zu $\alpha = 30^0$ mit der von Figur 10, so stellt man eine gute Übereinstimmung fest.

Figur 14 zeigt die graphische Konstruktion der Bildung der Gleichspannung gegen Erde u_{dmE} bei *unsymmetrischer* Schaltung der Zwischenkreisdrossel (Fig. 11 ohne L_z im unteren Zweig). Da sich die Drossel in der positiven Leitung des Zwischenkreises befindet, ist die Spannung an Klemme A um den Spannungsabfall an der Drossel kleiner. Sie entspricht bei sehr guter Glättung dem Differenzbetrag zwischen u_d und $U_{d\alpha}$. Addiert man zu den Spannungen u_1 bis u_3, wenn die entsprechenden Ventile leitend sind (positiver Pol), die Spannung an der Drossel, so erhält man den Verlauf der Spannung an Klemme A u_A. Die schraffierte Fläche entspricht dann der Gleichspannung. Bildet man hierzu den Mittelwert, so erhält man gegenüber der Nullinie u_{dmE}. Diese Spannung hat jetzt

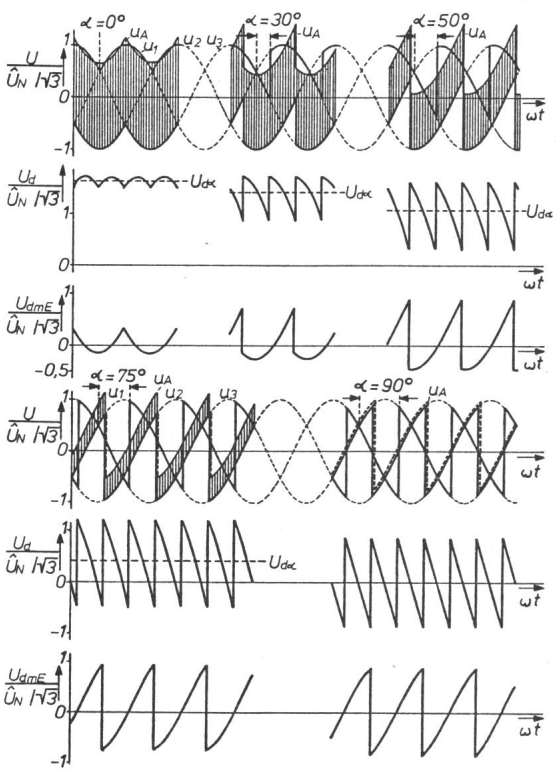

Fig. 14 Wie Figur 13, jedoch bei unsymmetrischer Schaltung der Zwischenkreisdrossel

u_d Gleichspannung
$U_{d\alpha}$ Gleichspannungsmittelwert

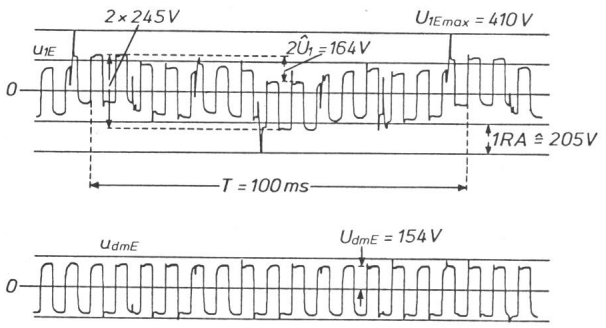

Fig. 15 Oszillographische Aufnahmen der Klemmenspannung gegen Erde u_{1E} und des Mittelwertes der Gleichspannung gegen Erde u_{dmE}

Motorwicklung in λ-Schaltung, Kondensatoren 47 µF, bei symmetrischer Schaltung der Zwischenkreisdrossel, 10-Hz-Last; RA = Rastermass

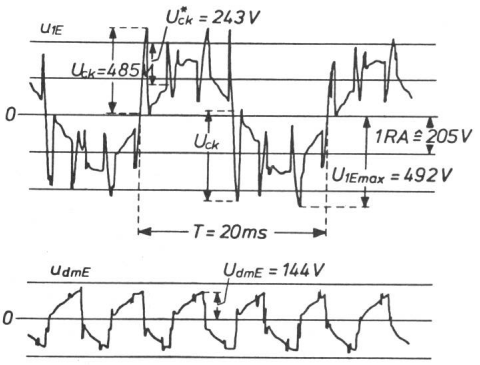

Fig. 16 Wie Figur 10, jedoch in einer anderen Schwebungsphase

eine andere Form und ist auch wesentlich grösser. Bei $\alpha = 90^0$ ist $U_{dmE} = 0{,}87\ \hat{U}_N/\sqrt{3}$.

Um die Überlagerung der Grundharmonischen der Strangspannung mit den Schwankungen des Gleichspannungsmittelwertes u_{dmE} zu überblicken, betrachtet man zunächst die Verhältnisse bei *symmetrischer* Schaltung der Zwischenkreisdrossel bei 10-Hz-Last des Motors entsprechend der Aufnahme in Figur 15. Man erkennt die gefundenen Schwankungen des Gleichspannungsmittelwertes u_{dmE} zwischen $\pm$ 154 V, was dem theoretischen Wert von $0{,}5\ \hat{U}_N/\sqrt{3} = 155$ V gut entspricht. Die Klemmenspannung gegen Erde wird durch die Überlagerung der Grundschwingung mit der Amplitude $\sqrt{2} \cdot U_{1G}/\sqrt{3} = \sqrt{2} \cdot 78/\sqrt{3} = 64$ V und der Gleichspannung gebildet. Damit schwankt sie zwischen $\pm$ 218 V rechnerisch, während $\pm$ 235 V gemessen wurden. Im Verlauf der Klemmenspannung ist erkennbar, dass in entsprechenden Abständen die Kommutierungsspannungsspitzen vorhanden sind.

Betrachtet man unter diesen Gesichtspunkten Figur 10 (Motor bei 50 Hz belastet), so erkennt man ähnliche Verhältnisse. Bei 50 Hz und in der Nähe dieser Frequenz treten jedoch Schwebungen auf, bedingt durch die Überlagerung der netzfrequenten Schwingungen mit denen des Asynchronmotors. Figur 16 zeigt bei gleichem Lastzustand wie Figur 10 eine Aufnahme, bei der die Grundharmonische einwandfrei zu erkennen ist; die Verzerrung durch Verlagerung infolge der Gleichspannung tritt kaum erkennbar auf. Auffallend ist jedoch, dass im Gegensatz zu Figur 10 in der Strangspannung die erste Kommutierungsspitze etwa beim Nulldurchgang der Spannung mit der doppelten Höhe entsprechend $U_{ck} = 485$ V zu sehen ist. Die nächste Spitze 60^0 später entspricht etwa $^1/_2\ U_{ck}$. Vorhanden ist auch eine dritte Spannungsspitze. Die Amplitude entspricht der Strangspannung $\hat{U}_1/\sqrt{3} = 290$ V (vgl. Fig. 2). In diesem Falle beträgt die maximale Spannung $U_{max} = 492$ V, während in Figur 10 676 V gemessen wurden.

Figur 17 zeigt noch den Leerlauf bei 50 Hz, $U_{1G} = 379$ V in einem ungünstigen Augenblick der Schwebung. Der Mittelwert der Gleichspannung beträgt entsprechend einem Aussteuerungsgrad $\alpha = 75^0$ (Fig. 13) $U_{dmE} = \sqrt{2}\ U_N/\sqrt{3} \cdot 0{,}5 = 155$ V (gemessen 154 V). Die maximale Spannung wurde mit $U_{max} = 940$ V sehr hoch festgestellt. Bemerkenswerterweise übertrifft dieser Wert den in der verketteten Spannung gemessenen Wert mit dem Betrag von 717 V.

Die nächsten Bilder zeigen Aufnahmen unter den gleichen Bedingungen wie vor, jedoch bei *unsymmetrischer* Schaltung der Zwischenkreisdrossel. In Figur 18 (10 Hz, Last) erkennt man, dass der Verlauf des Gleichspannungsmittelwertes u_{dmE} etwa Figur 14 ($\alpha = 90^0$) entspricht, wobei $U_{dmE} = 0{,}87 \cdot \sqrt{2}\ U_N/\sqrt{3} = 270$ V (gemessen 287 V) beträgt. Die maximale Spannung gegen Erde wurde mit 532 V gemessen. Figur 19 zeigt eine Messung bei 50-Hz-Last in einem bestimmten Zustand der Schwebung. Der Einfluss der Gleichspannungsschwankung auf den Verlauf der Spannung gegen Erde u_{1E} ist bedeutend; $U_{1E\,max} = 1168$ V. Der Verlauf des Gleichspannungsmittelwertes gegen Erde u_{dmE} entspricht etwa einem Aussteuerungswinkel von $\alpha = 50^0$ (Fig. 14) mit $U_{dmE} = 270$ V. Er wird jedoch durch die Kommutierungsspannungsspitzen stark gestört. Diese ist bei Leerlauf 50 Hz in Figur 20 noch grösser. Der Wert $U_{dmE} = 295$ V, entsprechend einem $\alpha = 75^0$, ist durch die Verzerrung infolge Kommutierung kaum erkennbar. Die maximale Spannungsspitze wurde hier mit 1270 V gemessen.

Wesentliche Ergebnisse der Untersuchungen bezüglich der maximalen Spannungsspitze gegen Erde $U_{1E\,max}$ Tabelle III

Schaltung Drossel L_z	f_1 Hz	Bemerkung	U_{dmE} V (1)	$\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} U_{1G}$ V (2)	U_{ck}* V (3)	$\sum U$ (1–3) V	$U_{1E\,max}$ V	Figur Nr.
Symmetrisch	10	Last	154	64	243	461	410	15
	29	Last	154	182	243	579	553	–
	50	Last a	133	296	243	672	676	–
	50	b	144	296	243	683	492	17
	50	Leerlauf	154	309			940	18
Unsymmetrisch	10	Last	187	61	243	591	532	19
	29	Last	300	174	243	717	574	–
	50	Last a	270	301	243	814	922	–
	50	b	270	301	243	814	1168	20
	50	Leerlauf a	295	301			943	–
	50	b	295	301			1270	21

Die Erfassung der Spannungsschwankungen gegen Erde wird wesentlich erschwert durch die auftretenden Schwebungen, insbesondere wenn die Maschinenfrequenz in der Nähe der Netzfrequenz liegt. Um einen Überblick zu schaffen, sind in der Tabelle III die wesentlichen Ergebnisse aller Messungen zusammengestellt: der Maximalwert des Mittelwertes der Gleichspannung gegen Erde U_{dmE}, die Amplitude der Strangspannung $\sqrt{2}\ U_{1G}/\sqrt{3}$, die Kommutierungsspannungsspitze U_{ck}* in der Strangspannung und der maximale Wert der gemessenen Spannung gegen Erde $U_{1E\,max}$. Allgemein lässt sich feststellen, dass die maximale Spannung $U_{1E\,max}$ bei unsymmetrischer Schaltung der Zwischenkreisdrossel grösser ist (bei gleichen Frequenzen). Die rechnerische Summe der Spannungen (1 bis 3) ist allgemein grösser als die gemessene maximale Spannung $U_{1E\,max}$. Ausnahmen bilden die bei der Schwebung auftretenden Spannungsspitzen, die insbesondere bei Leerlauf

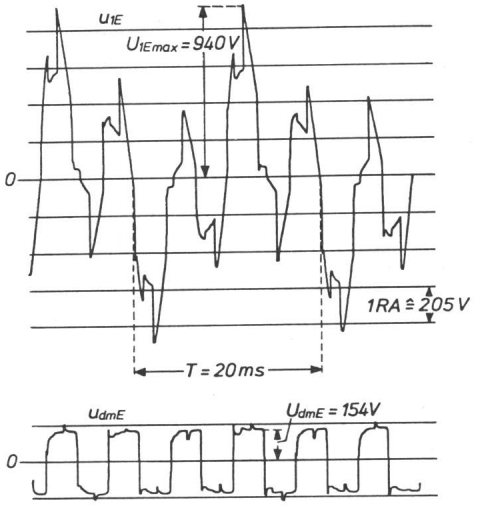

Fig. 17 Wie Figur 10, jedoch 50 Hz, Leerlauf

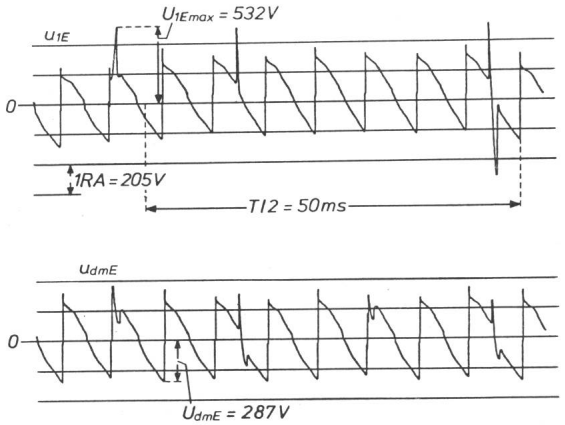

Fig. 18 Wie Figur 15, jedoch bei unsymmetrischer Schaltung der Zwischenkreisdrossel

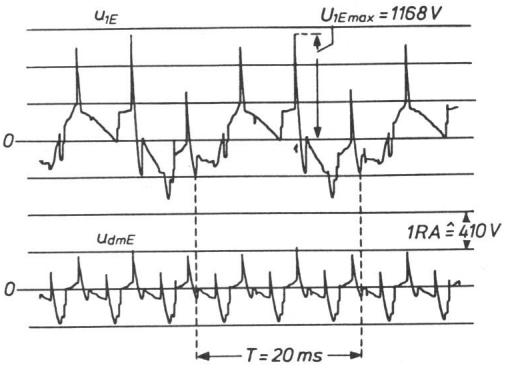

Fig. 19 Wie Figur 18, jedoch 50 Hz, Last

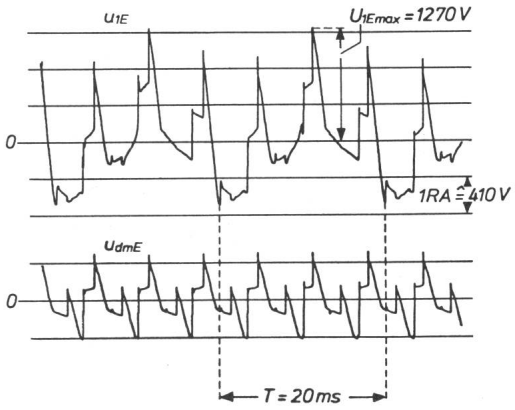

Fig. 20 Wie Figur 19, jedoch 50 Hz, Leerlauf

wesentlich grössere Werte aufweisen können. Dieser Wert kann sogar grösser sein als der maximale Wert in der Klemmenspannung.

Der Einfluss dieser intermittierend auftretenden Spannungsspitzen auf die Lebensdauer der Wicklungsisolation sollte gesondert untersucht werden. Man kann jedoch davon ausgehen, dass an 380-V-Netzen bei Motoren mit symmetrischer Schaltung der Zwischenkreisdrossel die maximale Spannungsbeanspruchung gegen Erde unter 1000 V bleibt. Diese zusätzliche Isolationsbeanspruchung tritt jedoch nicht auf, wenn der Sternpunkt des netzseitigen Trafos nicht geerdet ist. Diese Art der Betriebsführung ist daher insbesondere bei 500-V-Netzen, wie sie besonders in Idustriebetrieben vorkommen, zu empfehlen.

Literatur

[1] *P.G. Sperling:* Die umrichtergespeiste Asynchronmaschine im Betrieb mit eingeprägten Rechteckströmen. Siemens Z. 45(1971)8, S. 508...514.

[2] *G. Möltgen:* Grundlagen einer Theorie des Stromrichters in Drehstrom-Brükkenschaltung mit mehrstufiger LC-Kommutierung. Siemens Z. 43(1969)8, S. 680...685.

[3] *G. Backhaus* und *G. Möltgen:* Kommutierung beim sechspulsigen selbstgeführten Wechselrichter für Betrieb mit eingeprägtem Gleichstrom. ETZ-A 90 (1969)14, S. 327...339.

[4] *W. Lineau:* Untersuchung eines stromeinprägenden Wechselrichters, der zur Speisung einer frequenzgesteuerten Asynchronmaschine in einem Bahnbetrieb geeignet ist. Dissertation der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 1979.

[5] *H. Kleinrath:* Der Kommutierungsvorgang beim Asynchronmotor mit Speisung über Umrichter mit Gleichstromzwischenkreis. Arch. Elektrotechn. 56(1974)1, S. 12...24.

Adresse des Autors

Prof. Dr.-Ing. *Thomas Keve*, Fachhochschule Köln, Amselstrasse 16, D-4050 Mönchengladbach.