

DIE WECHSELWIRKUNGEN VON AN SCHWACHEM NETZ ARBEITENDEN DREIPHASIGEN GESTEUERTEN BRÜCKENSCHALTUNGEN

Von
A. KÁRPÁTI

Lehrstuhl für Automatisierung, Technische Universität, Budapest

Eingegangen am 5. Oktober 1979
Vorgelegt von Prof. Dr. R. TUSCHÁK

1. Einleitung

In einigen praktischen Fällen ist bei Untersuchung des Betriebes von Stromrichtern die Wirkung der endlichen Kurzschlußleistung des speisenden Netzes nicht vernachlässigbar. Ein solcher Fall ergibt sich z. B. bei der Verwendung von Stromrichtern von verhältnismäßig großer Leistung, wenn die Betriebsparameter der Einrichtung auch bei ausgeschalteten Siebkreisen bestimmt werden sollten. Ein ähnliches Problem ergibt sich auch, wenn die Stromrichtereinheiten von einem Mehrwicklungstransformator gespeist werden und der zulässige Kopplungsfaktor der Wicklungssysteme bestimmt werden muß.

In den folgenden Untersuchungen werden zwei, von gemeinsamen Netz betriebene, gesteuerte Brückenschaltungen angenommen, s. Abb. 1. Die zwei

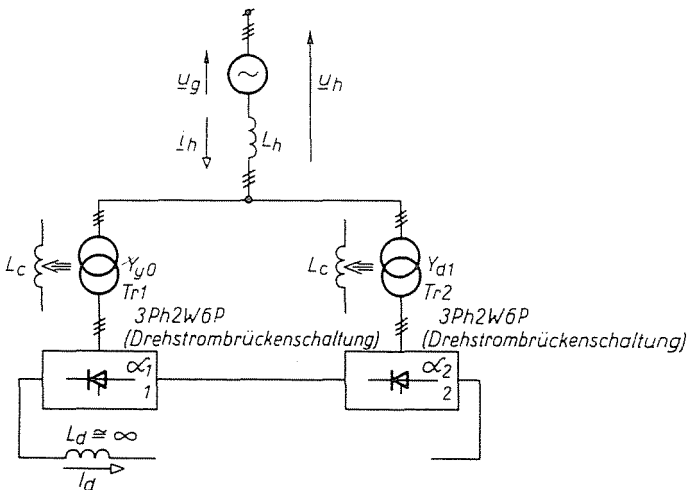


Abb. 1. Die schematische Darstellung von an schwachem Netz arbeitenden, dreiphasigen Brückenschaltungen

Stromrichter sind symmetrisch, der Gleichstrom I_d ist bei beiden Einheiten gleich und oberwellenfrei. Die Transformatoren weichen voneinander nur in den Schaltungsgruppen ab. Das Netz ist symmetrisch.

Die theoretischen Untersuchungen werden bei beliebigen Zündwinkeln α_1 und α_2 durchgeführt. Durch Berechnungen wird die Wechselrichtertrittgrenze im Pessimalfall untersucht.

2. Die qualitative Untersuchung der Wechselwirkungen

Bekanntlich treten in der Phasenspannung bei Stromrichtern mit Transformator von gerader Stundenzahl 4 Spannungssprünge während einer Periode auf. Sie seien der Reihe nach durch die Kennzahlen 11, 12, 13, 14 gekennzeichnet. Bei Transformatoren von ungerader Stundenzahl ergeben sich 6 Spannungssprünge, sie werden durch die Kodezahlen 21, 22, ..., 26 gekennzeichnet.

Es soll zuerst der Fall untersucht werden, wenn die Anfangszeiten der Kommutationen zusammenfallen. Der Zusammenhang zwischen den Zündwinkeln ist in diesem Falle der folgende:

$$\begin{aligned}\alpha_{11} &= \left(\alpha_2 - \frac{\pi}{6} \right) + \frac{\pi}{3} (j-1) \\ \alpha_{12} &= \left(\alpha_2 - \frac{5\pi}{6} \right) + \frac{\pi}{3} (j-1) \\ \alpha_{13} &= \left(\alpha_2 - \frac{7\pi}{6} \right) + \frac{\pi}{3} (j-1) \\ \alpha_{14} &= \left(\alpha_2 - \frac{11\pi}{6} \right) + \frac{\pi}{3} (j-1)\end{aligned}\tag{1}$$

wobei $j=1, 2, \dots, 6$, und $21, 22, \dots, 2j, \dots, 26$, die durch die zweiten Grundeinheit verursachten Spannungssprünge kennzeichnen. Durch α_{11} wird z. B. jener Zündwinkel α_1 gekennzeichnet, bei dem der Spannungssprung 11 der ersten Grundeinheit mit dem Spannungssprung $2j$ der zweiten Grundeinheit zusammenfällt.

In Tafel 1 wurden die Richtungen der Änderungen der Phasenspannungen im Treffpunkt der Spannungssprünge verschiedener Kodezahlen zusammengefaßt. Die Tafel enthält auch die zu den einzelnen Spannungsprün-

Bezeichnung	21	22	23	24	25	26	Fall
	$a \rightarrow b$	$3 \rightarrow 1$	$b \rightarrow c$	$1 \rightarrow 2$	$c \rightarrow a$	$2 \rightarrow 3$	
11							2
$3 \rightarrow 1$	X	X	X	X	X	X	1
12							2
$1 \rightarrow 2$	X	X	X	X	X	X	1
13							2
$c \rightarrow a$	X	X	X	X	X	X	1
14							2
$a \rightarrow b$	X	X	X	X	X	X	1
Phase	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	

1 Fall Y_0
2 " Y_d

Bezeichnung	21	22	23	24	25	26
	$a \rightarrow b$	$3 \rightarrow 1$	$b \rightarrow c$	$1 \rightarrow 2$	$c \rightarrow a$	$2 \rightarrow 3$
$\frac{11}{3 \rightarrow 1}$	E	E	F	K	K	F
$\frac{12}{1 \rightarrow 2}$	K	F	F	E	F	K
$\frac{13}{c \rightarrow a}$	K	K	F	E	E	F
$\frac{14}{a \rightarrow b}$	E	F	K	K	F	E

Die Werte von α_1 bei den Treiffpunkten; $\alpha_2 = \frac{5\pi}{6}$;

Bezeichnung	21	22	23	24	25	26
	$a \rightarrow b$	$3 \rightarrow 1$	$b \rightarrow c$	$1 \rightarrow 2$	$c \rightarrow a$	$2 \rightarrow 3$
$\frac{11}{3 \rightarrow 1}$	$\frac{2\pi}{3}$ F	π E	$\frac{4\pi}{3}$ F	$\frac{5\pi}{3}$ K	2π K	$\frac{\pi}{3}$ F
$\frac{12}{1 \rightarrow 2}$	0 K	$\frac{\pi}{3}$ F	$\frac{2\pi}{3}$ F	π E	$\frac{4\pi}{3}$ F	$\frac{5\pi}{3}$ K
$\frac{13}{c \rightarrow a}$	$\frac{5\pi}{3}$ K	0 K	$\frac{\pi}{3}$ F	$\frac{2\pi}{3}$ F	π E	$\frac{4\pi}{3}$ F
$\frac{14}{a \rightarrow b}$	π E	$\frac{4\pi}{3}$ F	$\frac{5\pi}{3}$ K	0 K	$\frac{\pi}{3}$ F	$\frac{2\pi}{3}$ F

gen gehörenden Kommutationen. Beim Studieren der Tafel können drei Fälle unterschieden werden. Diese sind die folgenden:

- Der Fall „E“, wo die durch die zwei Einheiten hervorgerufenen Spannungssprünge in den zwei Phasen einander verstärken.
- Der Fall „F“, wo die durch die zwei Einheiten hervorgerufenen Spannungssprünge in einer Phase einander verstärken, in der anderen aber einander entgegengerichtet sind.
- Der Fall „K“, wo die durch die zwei Einheiten hervorgerufenen Spannungssprünge in beiden Phasen einander entgegengerichtet sind.

Die Spannungssprünge treffen sich zu einer bestimmten Zeit immer nur in zwei Phasen.

Auf Grund des Gesagten kann man annehmen, daß im Falle „E“ der Wert L_h verstärkt auftritt. Im Falle „F“ wird schon die Kopplung loser, die kleinste Kopplung kann man im Falle „K“ erwarten. Die zum Treffen gehörenden Zündwinkel wurden in Tafel 3 zusammengefaßt.

3. Die rechnerische Untersuchung des Falles „E“

$$\left(\alpha_1 = \alpha_2 - \frac{\pi}{6} ; j = 1 \right)$$

Abb. 2 zeigt das Ersatzschaltbild. Auf Grund der Tafel 3 kann man annehmen, daß in der ersten Einheit eine Kommutation unter den Ventilen $3 \rightarrow 1$, in der zweiten Einheit aber die Kommutation unter $a \rightarrow b$ stattfindet. Beim Transformator der Schaltung $Yd1$ wurde neben den Induktivitäten L_C die Phasendrehung des Transformators durch entsprechende Drehmatrizen berücksichtigt. Durch die Drehmatrizen werden die verketteten Spannungen und Linienströme an zwei Seiten des ideellen Drehelements verbunden. Die Verbindung wird mathematisch folgenderweise geschrieben [1]:

$$u_v^* = \mathbf{T}_{fvu}^* \cdot u_v \quad \text{und} \quad i_v^* = \mathbf{T}_{vfi}^* \cdot i_v \quad (2)$$

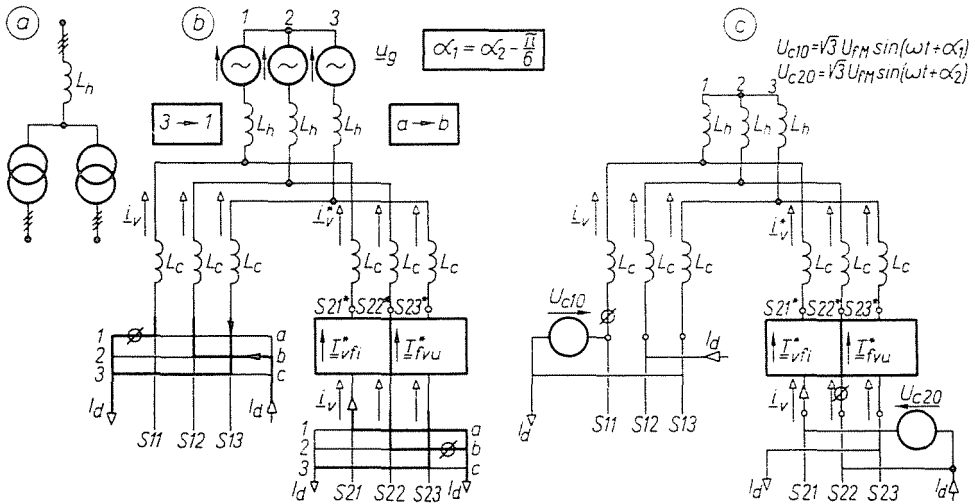


Abb. 2. Ersatzschaltbild zur Berechnung der Kommutation

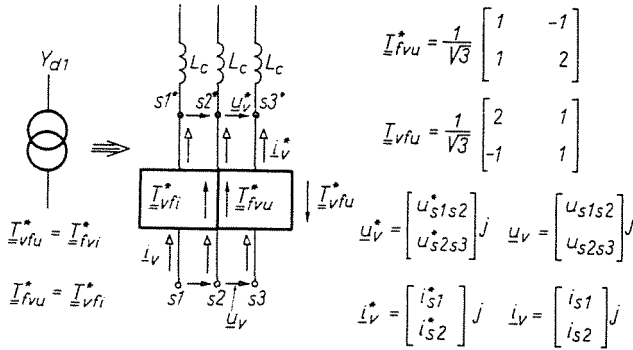


Abb. 3. Das Ersatzschaltbild des Transformators von Schaltung Yd1

Die Definitionen der Größen in der Gl. wurden in der Abb. 3 angegeben. Abb. 2c zeigt das in den Berechnungen unmittelbar angewandte Ersatzschaltbild. Es stammt von Abb. 2b durch Verwendung des Theveninschen Satzes. Nach Aufschreiben der Netzgleichungen, Vereinfachung und Ordnen ergeben sich für die Ströme der zwei kommutierenden Einheiten die folgenden Zusammenhänge:

$$\frac{di_{s21}}{dt} 2(L_c + L_h)(1 - x^2) = -u_{c20} + u_{c10}x = u_{c2e}$$

$$\frac{di_{s11}}{dt} 2(L_c + L_h)(1 - x^2) = -u_{c10} + u_{c20}x = u_{c1e}$$

wobei

$$u_{c2e} = \sqrt{3} U_{fM} \sqrt{1 + x^2 - \sqrt{3}x} \sin(\omega t - \pi + \alpha_2 + \beta) \tag{3}$$

$$u_{c1e} = \sqrt{3} U_{fM} \sqrt{1 + x^2 - \sqrt{3}x} \sin\left(\omega t - \pi + \alpha_2 - \frac{\pi}{6} - \beta\right)$$

$$\sin \beta = \frac{1}{2} \frac{x}{\sqrt{1 + x^2 - \sqrt{3}x}}; \quad x = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{l}{1+l}; \quad l = \frac{L_h}{L_c}.$$

Die Anfangs- (k) und Endwerte (v) der Ströme sind: $i_{s21}(k) = I_d$; $i_{s21}(v) = 0$; $i_{s11}(k) = 0$; $i_{s11}(v) = -I_d$.

Auf Grund von ausführlicheren Untersuchungen kann festgestellt werden, daß die Kommutation im geprüften Falle (die Feststellung der pessimalen Wechselrichtertrittgrenze) auf drei Wegen zustande kommen kann. Diese sind:

— 1MT (1. Arbeitsbereich). Die Ströme i_{s21} und i_{s11} ändern sich nach dem Zünden gleichzeitig. Die Änderung des Stromes i_{s11} ist schneller, deshalb die Kommutation der ersten Einheit früher beendet, als die der zweiten. Der Überlappungswinkel in der zweiten Einheit sei $\mu_{11,1}$. Die zweite Einheit wird schon allein weiterkommutieren.

— 2MT (2. Arbeitsbereich). Die Kommutation fängt in beiden Einheiten so an, wie es oben beschrieben wurde. Wegen des Vorzeichenwechsels der Kommutierungsspannung wächst aber i_{s21} wieder auf den ursprünglichen Wert, die Kommutation in der zweiten Einheit hört auf, i_{s11} ändert sich allein weiter. Die Kommutation in der zweiten Einheit kann nur nach Beenden der Kommutation der ersten Einheit wieder anfangen. In den letzten zwei Phasen des Arbeitsbereiches setzt sich die Kommutation schon, wie bekannt, fort [2], so ist hier die Berechnung verhältnismäßig einfach.

— 3MT (3. Arbeitsbereich). Zuerst kommutiert die erste Einheit unabhängig von der zweiten. Nur nachher beginnt die Stromänderung in der zweiten Einheit. (Es werden Zündimpulse von entsprechender Länge angenommen).

Der Betrieb in den verschiedenen Arbeitsbereichen kann durch die zeitliche Änderung der resultierenden Kommutierungsspannungen veranschaulicht werden. Die Zeigerdiagramme, die die resultierenden Kommutierungsspannungen zeigen, wurden in Abb. 4 zusammengefaßt. Die Abb. 4a, c, beziehen sich auf den 1MT. Die Abb. 4b dient zur Feststellung der

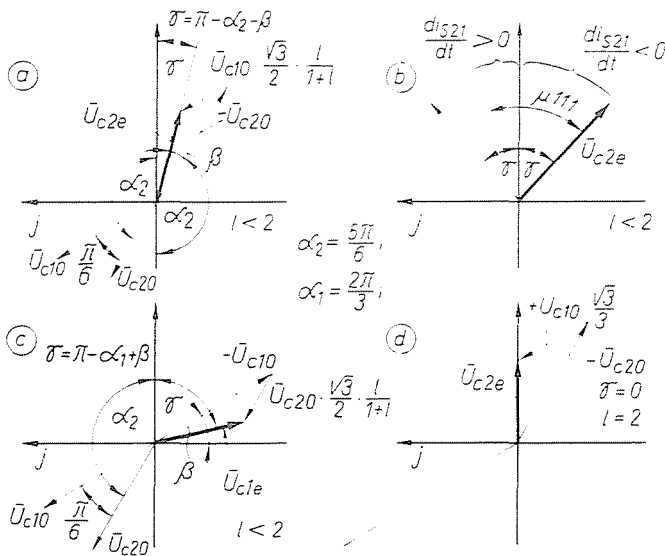


Abb. 4. Zeigerdiagramme zur Begrenzung der Arbeitsbereiche

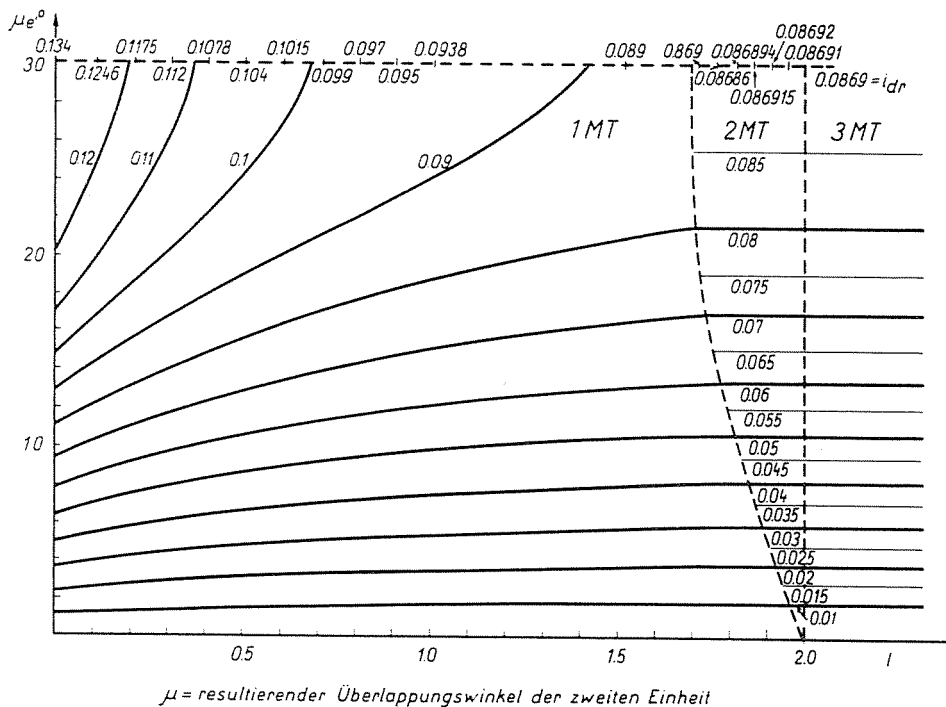


Abb. 5. Die Änderung des resultierenden μ_e Überlappungswinkels als Funktion des relativen Gleichstromes i_{dr} und des Kopplungsfaktors l

Grenze des 2MT-es. Die Abb. 4d zeigt bei der oberen Grenze des dritten Arbeitsbereiches den Wert der resultierenden Kommutierungsspannung.

Wie es zu sehen ist, ist die Berechnung der Kommutierungsvorgänge ziemlich langwierig. In Abb. 5 wurde das wichtigste Endergebnis der Berechnungen dargestellt. Die Abb. zeigt den resultierenden Überlappungswinkel der zweiten Einheit als Funktion von l und i_{dr} . l wurde in der Formel (3) definiert. i_{dr} ist der relative Gleichstrom, der durch die folgende Formel angegeben wird:

$$i_{dr} = I_d / (\sqrt{3} U_{fM} / (2\omega(L_C + L_h))) \quad (4)$$

Mit Hilfe der Abb. 5 kann man feststellen, daß in praktischen Fällen die Kommutation der Stromrichter im ersten Arbeitsbereich vor sich geht. In 2MT und 3MT wird der resultierende Überlappungswinkel nicht mehr beeinflußt. In Abb. 5 trennen sich die einzelnen Arbeitsbereiche sehr gut. Für die Praxis ist aber Abb. 6 viel besser benutzbar, wo i_{dr} die unabhängige Variable und l der

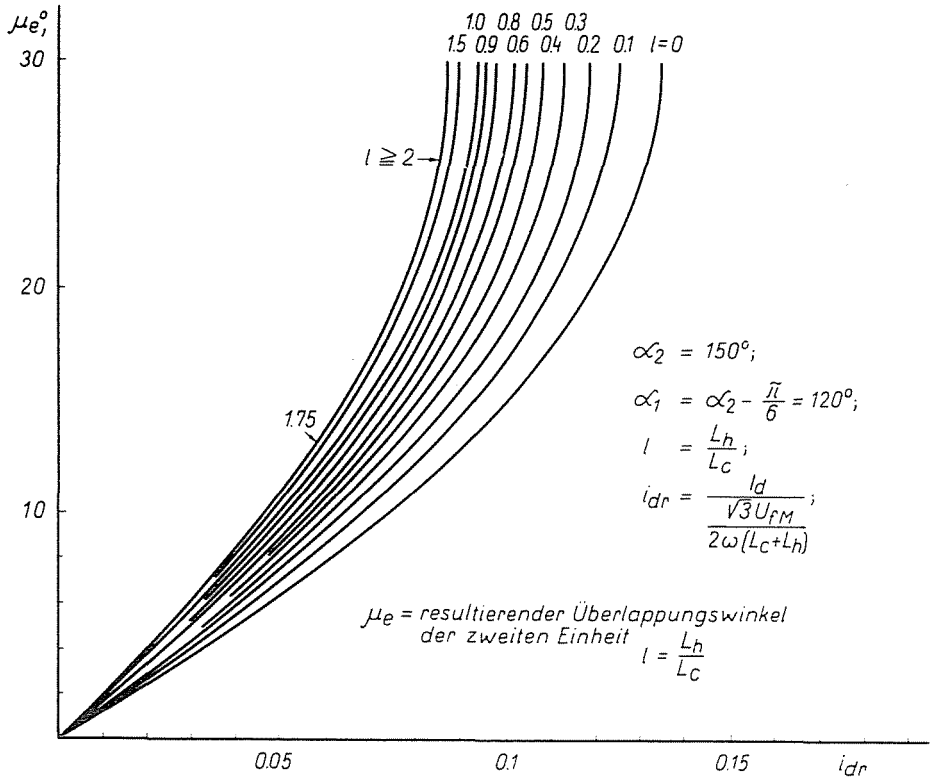


Abb. 6. Die Änderung des resultierenden Überlappungswinkels μ_e als Funktion des relativen Gleichstromes i_{dr} und des Kopplungsfaktors l

Parameter ist. Mit Hilfe der Tafel kann man einfach feststellen, wie der Gleichstrom zu vermindern ist, um das Kippen im Wechselrichterbetrieb zu vermeiden.

4. Die Untersuchung des Falles „E“

$$\left(a_1 = \alpha_2 - \frac{\pi}{6} + \delta; \quad j=1 \right)$$

Der Zündwinkel der ersten Einheit wird um δ vergrößert. Die Kommutation in der zweiten Einheit tritt also etwas früher auf, als in der ersten. Das Ziel ist wieder die Bestimmung des resultierenden Überlappungswinkels der zweiten Einheit, d.h. die Untersuchung der Wechselrichterkippgrenze. Wegen der neuen Veränderlichen ergeben sich viele Variationen, die die Untersuchung komplizierter machen. Die Berechnungen werden den typischen Wert $i_{dr}=0,1$

angenommen durchgeführt, indem die Werte l und δ variiert werden. Die Kommutation geht jetzt folgenderweise vor sich:

— Zuerst kommutiert die zweite Einheit entsprechend dem Wert δ allein, ($\mu_{21,1} = \delta$). Demnach wird die erste Einheit gezündet und es kommt der Abb. 2 entsprechende Zustand zustande. Hier werden zwei Überlappungswinkel $\mu_{21,2}$ und $\mu_{11,2}$ definiert. Die zwei Überlappungswinkel werden so bestimmt, daß auf Grund der Abb. 2 die Kommutierungszeiten der Ströme i_{s21} und i_{s11} berechnet werden. Auf dieser Grundlage können zwei Arbeitsbereiche unterschieden werden:

— Im *ersten Arbeitsbereich* ($\mu_{21,2} > \mu_{11,2}$); kommutiert die zweite Einheit nach dem Beenden der Kommutation der ersten allein weiter.

— Im *zweiten Arbeitsbereich* ($\mu_{11,2} > \mu_{21,2}$), wird die Kommutation der zweiten Einheit früher beendet.

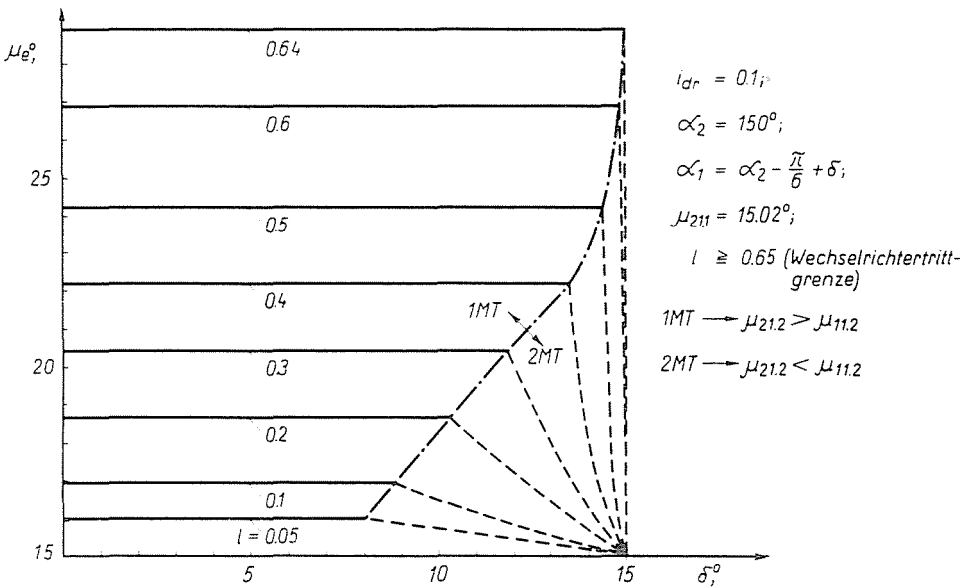


Abb. 7. Die Änderung des resultierenden Überlappungswinkels μ_e als Funktion von δ

Die Ergebnisse der Berechnungen bei der gewählten Parameterkombination wurden in Abb. 7 zusammengefaßt. Man kann sehen, daß der resultierende Überlappungswinkel der zweiten Einheit nie größer wird, als der Wert, der zu $\delta = 0$ gehört.

5. Die rechnerische Untersuchung des Falles „F“

$$\left(\alpha_1 = \alpha_2 - \frac{\pi}{2}; \quad j=6 \right)$$

Die Berechnungen werden wieder auf Grund des in Abb. 2 angegebenen Ersatzschaltbildes durchgeführt. Der Unterschied ist nur, daß entsprechend den Tafeln 1, 2, 3 in der zweiten Einheit eine 2→3 Kommutation angenommen wird. Nach Aufschreiben der Gleichungen, Ordnen und Vereinfachungen ergeben sich für die Ströme der kommutierenden Phasen die folgenden Gleichungen:

$$\begin{aligned} \frac{di_{s22}}{dt} 2(L_C + L_h) &= u_{C20} \\ \frac{di_{s11}}{dt} 2(L_C + L_h) &= -u_{C10} \end{aligned} \quad (5)$$

$$u_{C20} = \sqrt{3} U_{fM} \sin(\omega t + \alpha_2)$$

$$u_{C10} = \sqrt{3} U_{fM} \sin\left(\omega t + \alpha_2 - \frac{\pi}{2}\right)$$

Nach Gl. 5 ist die Kommutation in den zwei Einheiten voneinander unabhängig. Die Kippgrenze in Wechselrichterbetrieb ist also vorteilhafter als im Falle „E“. Deshalb wird jetzt dieser Fall weiter nicht untersucht.

6. Die rechnerische Untersuchung des Falles „K“

$$\left(\alpha_1 = \alpha_2 - \frac{5\pi}{6}, \quad j=5 \right)$$

Die Berechnungen können auch jetzt mit Hilfe des in Abb. 2 angegebenen Ersatzschaltbildes durchgeführt werden. Der Unterschied ist nur, daß auf Grund der Tafeln 1, 2, 3 in der zweiten Einheit eine c→a Kommutation angenommen wird. Nach Aufschreiben der Gleichungen, Ordnen und Vereinfachungen bekommt man die folgenden Ergebnisse:

$$\begin{aligned} \frac{di_{s21}}{dt} 2(L_C + L_h)(1-x^2) &= u_{C20} + u_{C10}x = u_{C2e} \\ \frac{di_{s11}}{dt} 2(L_C + L_h)(1-x^2) &= -u_{C10} - u_{C20}x = u_{C1e} \end{aligned} \quad (6)$$

wobei

$$u_{C10} = \sqrt{3} U_{fM} \sin\left(\omega t + \alpha_2 - \frac{5\pi}{6}\right)$$

$$u_{C20} = \sqrt{3} U_{fM} \sin(\omega t + \alpha_2)$$

Die Anfangs- und Endwerte der Ströme sind die folgenden:

$$i_{s21}(k)=0; \quad i_{s21}(v)=I_d; \quad i_{s11}(k)=0; \quad i_{s11}(v)=-I_d;$$

Durch ausführlichere Untersuchungen kann man beweisen, daß in diesem Falle, bei $\alpha_2=150^\circ$ und bei der zweiten Einheit, die Kopplung über die Netzreaktanz auf die Kommutation eine beschleunigende Wirkung hat. Bei der Bestimmung der pessimalen Wechselrichterkopplung muß also dieser Fall nicht berücksichtigt werden.

7. Zusammenfassung

Der Artikel beschäftigt sich mit der Untersuchung der Kommutationsvorgänge von zwei, an schwachen Netz arbeitenden, gesteuerten dreiphasigen Brückenschaltungen bei beliebigen Zündwinkelvariationen. Auf Grund von qualitativen Untersuchungen werden die typischen Grundfälle der einander beeinflussenden Kommutationen bestimmt. Es wird eine Rechenmethode für die Untersuchungen angegeben. Als Rechenergebnis werden Kurvenscharen für die Verminderung der Belastbarkeit in Wechselrichterbetrieb angegeben.

Literatur

1. KÁRPÁTI, A.—CSABA, B.—IPSITS, I.—HERMANN, I.: Áramirányítók túlfeszültségvédelme légköri túlfeszültségekre. *Elektrotechnika*, 71. 333—339, 1978.
2. CSÁKI, F.—GANSZKY, K.—IPSITS, I.—MARTI, S.: *Teljesítményelektronika (Leistungselektronik)*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1971.

Dr. Attila KÁRPÁTI, H-1521 Budapest