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: 67 (1976)

Heft: 16

Artikel: Wechselrichterkippen bei Stromrichtern in Drehstrom-Brückenschaltung

Autor: Kloss, A.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915194

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: 09.07.2025

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

Wechselrichterkippen bei Stromrichtern in Drehstrom-Brückenschaltung

Von A. Kloss

621.314.55

Der Kommutierungsvorgang von netzgeführten Stromrichtern in Drehstrom-Brückenschaltung wird in bezug auf den Wechselrichterbetrieb theoretisch untersucht und mit charakteristischen Beispielen von Computerberechnungen des Wechselrichterkippens ergänzt.

Le processus de commutation de convertisseurs pilotés par le réseau, en montage en pont triphasé, est étudié théoriquement en ce qui concerne le fonctionnement en onduleur et complété par des exemples typiques de calculs, par calculateur électronique, de la relaxation d'onduleur.

1. Einführung

Die am meisten verbreitete Schaltung der netzgeführten Stromrichter ist die Drehstrom-Brückenschaltung [1][1]). Sie wird besonders zur Speisung von Gleichstrommaschinen verwendet. Das Ersatzschema eines solchen Antriebes ist in Fig. 1 zu ersehen. Die drei Wechselspannungsquellen u_x, u_y, u_z stellen das Drehstromsystem des speisenden Netzes dar, die Induktivitäten L_s ersetzen die Streuinduktivitäten des Netztransformators. Die Thyristoren $T_1 ... T_6$, die den Stromrichter bilden, werden als ideale Schalter angenommen. Im Gleichstromkreis stellt die Gleichspannungsquelle E die Ankerspannung der Maschine dar, und in L sind alle Induktivitäten des Gleichstromkreises konzentriert. Die ohmschen Widerstände und die Kapazitäten werden einfachheitshalber vernachlässigt.

Im motorischen Betrieb der Gleichstrommaschine arbeitet der Stromrichter als *Gleichrichter*, d. h., der Steuerwinkel α wird so verstellt, dass der Mittelwert U_d der Gleichspannung u_d positiv wird. Im stationären Zustand gilt $U_d = E$. Der Wechselspannungsanteil von u_d liegt an L (u_L).

Im generatorischen Betrieb der Gleichstrommaschine ist die Spannung E negativ. Der Stromrichter arbeitet als *Wechselrichter*, d. h., U_d ist mit Hilfe der Steuerung negativ eingestellt; im stationären Zustand gilt wieder $U_d = E$.

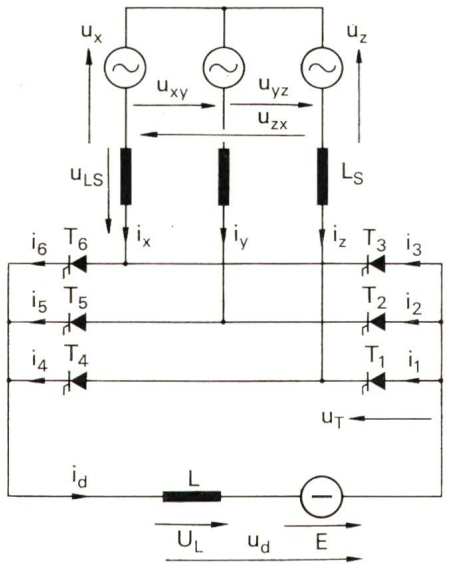

Fig. 1 Vereinfachtes Ersatzschema des Stromrichters in Drehstrom-Brückenschaltung

u_{xy}, u_{yz}, u_{zx}	verkettete Spannung des Drehstromsystems mit idealen Spannungsquellen u_x, u_y, u_z
L_s	Induktivität des Kommutierungskreises
L	Induktivität des Gleichstromkreises
$T_1 ... T_6$	Thyristoren
E	Gleichspannungsquelle
u_d	Momentanwert der Gleichspannung
i_d	Momentanwert des Gleichstromes
$i_1 ... i_6$	Momentanwerte der Thyristorströme
i_x, i_y, i_z	Momentanwerte der Wechselströme
u_T	Thyristorspannung

Im Gleichrichterbetrieb wird die Energie von den Wechselspannungsquellen, vom Netz, in die Gleichspannungsquelle, die Gleichstrommaschine, geliefert. Im Wechselrichterbetrieb wird umgekehrt die Energie der Gleichspannungsquelle in das Drehstromsystem übertragen. In beiden Fällen ist die Richtung des Gleichstromes i_d gleich, nur die Gleichspannung U_d ändert die Polarität.

2. Kommutierung

Die Wirkungsweise des Stromrichters basiert auf der gezielten zyklischen Stromführung der einzelnen Thyristoren. Das entsprechende Schaltspiel der Thyristoren zeigt Fig. 2, und zwar für den Betriebszustand der *einfachen Kommutierung*. Während einer Periode spielen sich 12 unterschiedliche Schaltzustände ab.

Im Schaltzustand 1 führen T_1 und T_6 den Strom. Dann zündet T_5 (Zustand 2). Mit T_5 und T_6 sind die Phasen X und Y des Drehstromsystems kurzgeschlossen. Der Strom in T_5 nimmt rasch zu und baut den Strom in T_6 ab. Danach führen T_1 und T_5 den Strom (Schaltzustand 3). Der Übergang des Stromes von T_6 auf T_5 wird als Kommutierung bezeichnet. In zyklischer Folge führt jeder Thyristor den Strom. Innerhalb einer Periode spielen sich sechs Kommutierungen ab, immer abwechselnd einmal in der Thyristorgruppe 1, 2, 3 und einmal in der Gruppe 4, 5, 6. Im gezeichneten Betriebszustand ist der Gleichstrom i_d *lückenlos*, und jeder Thyristor führt den Strom ca. $^1/_3$ der Periode. Die Kommutierung dauert in der Regel viel kürzer als der kommutierungsfreie Zustand.

Bei kleinerer Strombelastung kann es zu *Lückbetrieb* kommen. Im Schaltzustand 1 (Fig. 2) z. B. erreicht i_1 Null vor der Zündung von T_5. Statt der Kommutierung im Schaltzustand 2 folgt also ein stromloser Zustand des Stromrichters, und dann zünden T_1 und T_5, so dass der Zustand 3 erreicht wird. Im Lückbetrieb muss jeder Thyristor innerhalb der Periode zweimal gezündet werden, im Zeitabstand von 60^0 el.

Bei sehr grosser Strombelastung zündet der Thyristor der folgenden Kommutierung (z. B. T_3, Schaltzustand 4) noch während der Kommutierung der vorherigen Gruppe (Schaltzustand 2). Es kommutieren dann gleichzeitig zwei Thyristorgruppen (z. B. T_5, T_6 und T_3, T_1), was mit *doppelter Kommutierung* bezeichnet wird.

Der normale Betriebszustand ist der Betrieb mit einfacher Kommutierung. Die Kommutierung kann nur dann erfolgreich verlaufen, wenn der in die Kommutierung eintretende Thyristor rechtzeitig gezündet wird, und wenn der Strom im Kommutierungskreis (z. B. in Fig. 2, Zustand 2, T_5 und T_6 sowie die Phasen X und Y) den abkommutierenden Thyristor löschen kann. Für den Stromrichter im Wechselrichterbetrieb spielt die Kommutierung eine besonders wichtige Rolle. Kommutierungsversagen beim Wechselrichter führt zu kurzschlussartigem Stromanstieg: Wechselrichterkippen.

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

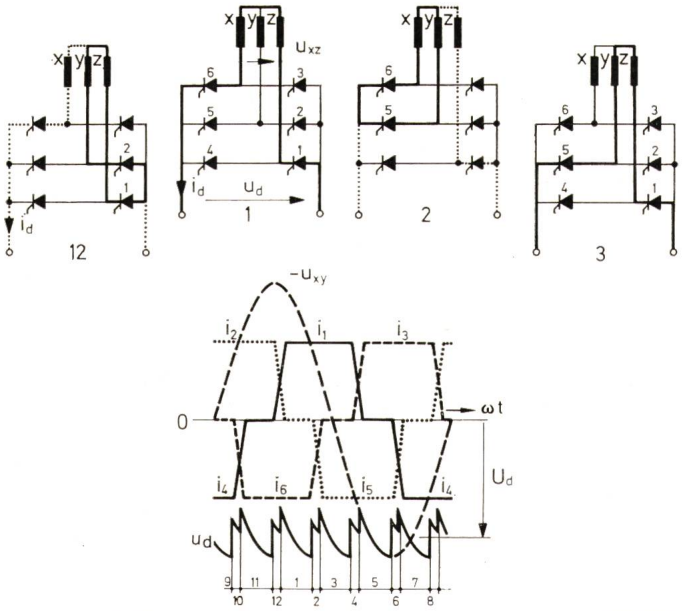

Fig. 2 Wirkungsweise der Drehstrom-Brückenschaltung im Wechselrichterbetrieb mit einfacher Kommutierung
Einzelne Schaltzustände 1...12 innerhalb einer Periode

3. Wechselrichter-Kippgrenze

Eine Darstellung des Kommutierungsvorganges beim Wechselrichter zeigt Fig. 3. Der Zeitabschnitt entspricht den Schaltzuständen 11, 12 und 1 in Fig. 2. Im Zustand 11 führen T_2 und T_6 den Strom, und die Gleichspannung u_d wird mit u_{xy} gebildet. Die Induktivität des Gleichstromkreises sei sehr gross ($L \to \infty$), so dass der Gleichstrom i_d glatt wird. Im Zeitwinkel α, vom Schnittpunkt von u_{xy} und $-u_{zx}$ gerechnet, zündet T_1. Damit werden die Phasen Y und Z über T_1 und T_2 kurzgeschlossen (Schaltzustand 12), und in diesem Kommutierungskreis entwickelt sich ein Strom

$$i_1 = I_k \, [\cos \alpha - \cos (\omega t + \alpha] \tag{1}$$

wobei $I_k = U_{vm}/2\,\omega L_s$ ist. Der Kommutierungsstrom i_1 verläuft symmetrisch zum Nulldurchgang der treibenden Spannung u_{yz}. Gl. (1) gilt für den aufkommutierenden Thyristor. Für den abkommutierenden Strom kann man mit i_0, dem Strom am Anfang der Kommutierung, schreiben:

$$i_2 = i_0 - i_1 \tag{2}$$

Die Kommutierung verläuft erfolgreich, wenn der abnehmende Strom i_2 den Nullwert noch vor dem Spannungsnulldurchgang u_{yz} erreicht. In Fig. 3 sind die drei möglichen Kommutierungsarten dargestellt. Mit dem Anfangsstrom i_{0a} dauert die Kommutierung den Zeitabschnitt 12 (Überlappungswinkel $\ddot{u}_a$). Die Gleichspannung u_d liegt dabei zwischen u_{yz} und $-u_{zx}$. Nach der Kommutierung löscht T_2 und T_1 und übernimmt den Strom. Gleichzeitig ist noch T_6 weiter stromleitend (Schaltzustand 1). Mit dem Anfangsstrom i_{0b} dagegen kann der Strom i_{2b} Null nicht mehr erreichen, da der Höchstwert des Stromes i_{1b} kleiner als i_{0b} ist. Der Strom i_{1b} nimmt daher nach dem Scheitelwert wieder ab und T_1 löscht, ohne den Strom für den vorgesehenen Schaltzustand 1 übernehmen zu können. T_2 bleibt weiter stromleitend, was wieder dem Schalt-

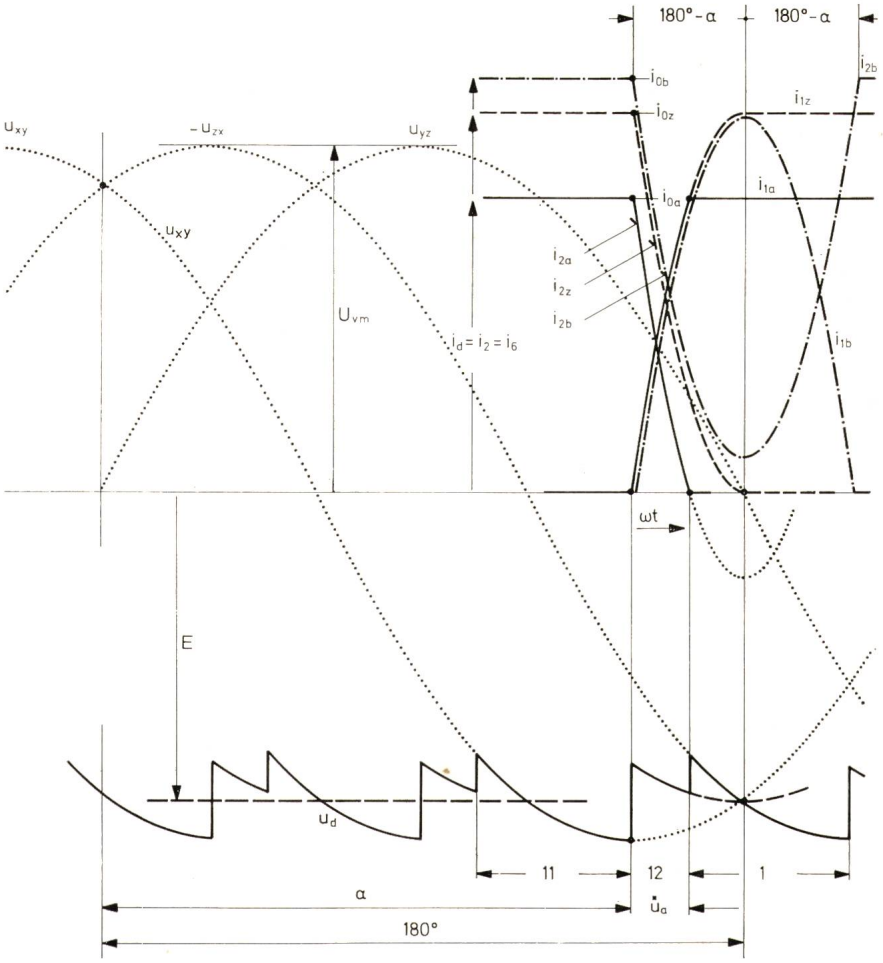

Fig. 3
Darstellung der Kommutierung beim Wechselrichter gemäss Fig. 1 mit $L/L_s = \infty$
a) erfolgreiche Kommutierung (Index a)
b) erfolglose Kommutierung (Kippen) (Index b)
c) Kommutierung an der Kippgrenze (Index z)

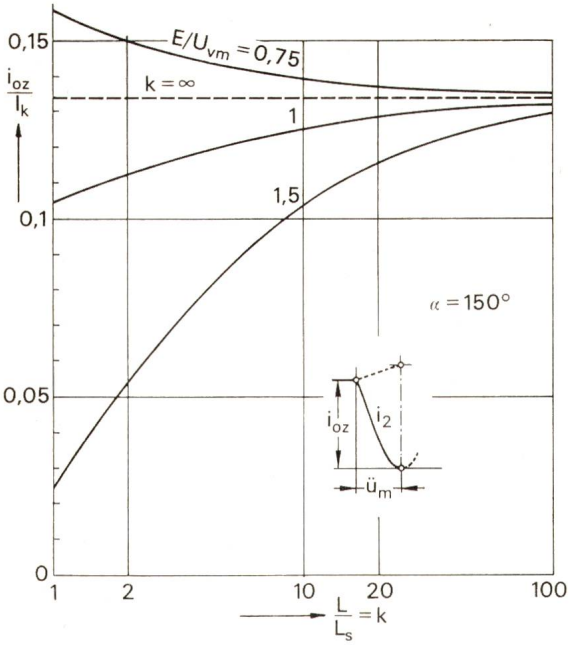

Fig. 4 Maximal zulässiger Strom am Anfang der Kommutierung i_{0z}, bezogen auf den Scheitelwert des Kurzschlußstroms im Kommutierungskreis I_k in Abhängigkeit von L/L_s und E/U_{vm}. Konstanter Steuerwinkel $\alpha = 150^0$

zustand 11 vor der Kommutierung entspricht. Damit fängt der Wechselrichter-Kippvorgang, wie noch gezeigt wird, an. Der maximal zulässige Strom am Anfang der Kommutierung i_{0z} entspricht dem Grenzfall, bei welchem der abkommutierende Strom i_{2z} genau bei Spannungsnulldurchgang von u_{yz} Null erreicht. Aus Gl. (1) folgt

$$i_{0z} = I_k (1 + \cos \alpha) \tag{3}$$

Der geschilderte Kommutierungsvorgang des Wechselrichters gilt unter der Voraussetzung, dass das Induktivitätsverhältnis L/L_s sehr gross ist. Die Annahme $L/L_s \to \infty$, die in der konventionellen Stromrichtertheorie üblich ist, kann allerdings nur bei den quasistationären Zuständen des Stromrichters angewendet werden. Bei der Untersuchung transienter Vorgänge (Störungsfälle) versagt diese Vereinfachung, da die

Daten zu den Beispielen des Kippvorganges Tabelle I

Fig.	α	L/L_s	E/U_{vm}	Kurzschlußstromkreis nach dem Kippen
6	140^0	5	1	Freilauf über 2 Thyristoren
7	145^0	5	1,33	Freilauf über 4 Thyristoren
8	155^0	5	1	Teilweise Freilauf und teilweise Drehstromsystem
9	120^0	100	3,4	Freilauf über 2 Thyristoren
10	165^0	100	3,4	Drehstromsystem

unendlich grosse Induktivität L keine Stromänderungen zulässt. Bei realen Induktivitätsverhältnissen bekommt man statt Gl. (1) und (2) die Ausdrücke

$$i_1 = I_m [\sin (\alpha + \varphi_1 + 60^0) - \sin (\omega t + \alpha + 60^0)] - I_E \, \omega t \tag{4}$$

$$i_2 = i_0 - I_m [\sin (\alpha + \varphi_2 + 60^0)] - \sin (\omega t + \alpha + \varphi_2 + 60^0)] - I_E \, \omega t \tag{5}$$

Hierin bedeuten

$$I_m = I_k \frac{\sqrt{3 + 3k + k^2}}{3/2 + k}$$

$$I_k = U_{vm}/2\omega L_s \qquad k = L/L_s \qquad I_E = \frac{E}{2\omega L_s (3/2 + k)}$$

$$\mathrm{tg}\varphi_1 = \frac{3 + k}{\sqrt{3}(1 + k)} \qquad \mathrm{tg}\varphi_2 = \frac{k}{\sqrt{3}(2 + k)}$$

Für den maximal zulässigen Anfangsstrom i_{0z}, mit dem die Kippgrenze des Wechselrichterbetriebes erreicht wird, sind das Induktivitätsverhältnis L/L_s und das Spannungsverhältnis E/U_{vm} massgebend. Aus den Kurven in Fig. 4 ist zu sehen, dass der Wechselrichter bei kleineren L/L_s und grösseren E/U_{vm} leichter kippt. Fig. 5 zeigt im Detail den abkommutierenden Stromverlauf für einen gewählten Punkt des Diagrammes in Fig. 4. Die Kippgrenze wird bei $L/L_s \neq \infty$ bei kleinerem Anfangsstrom i_{01} erreicht als im idealisierten Fall ($i_{d\infty}$). Weil sich der Gleichstrom i_{d1} während der Kommutierung im Gegensatz zum Fall mit $L/L_s \to \infty$ ändert, verschiebt sich das Minimum von i_{21} um $\Delta\beta$, d. h., dass die Kommutierung früher als im Spannungsnulldurchgang abgeschlossen werden muss.

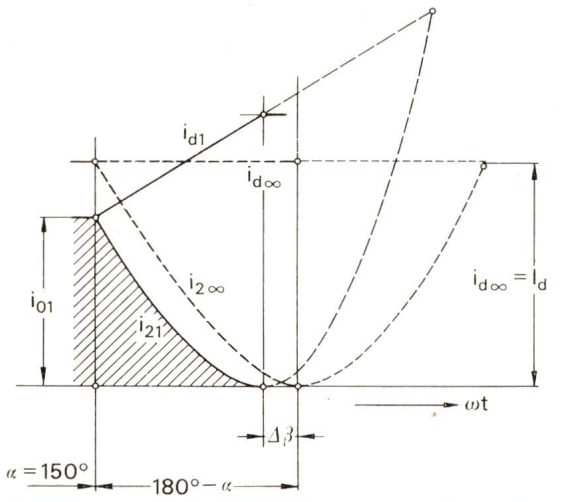

Fig. 5 Kommutierungsvorgang des Wechselrichters an der Kippgrenze für $E/U_{vm} = 1$ und $\alpha = 150^0$

i_{21} Thyristorstrom bei $L/L_s = 1$
$i_{2\infty}$ Thyristorstrom bei $L/L_s = \infty$

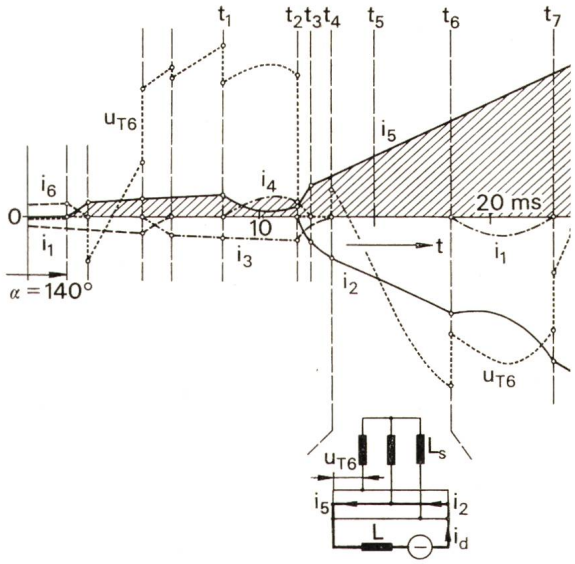

Fig. 6 Wechselrichterkippen mit einfachem Freilauf
Steuerwinkel $\alpha = 140^0$, $L/L_s = 5$, $E/U_{vm} = 1$

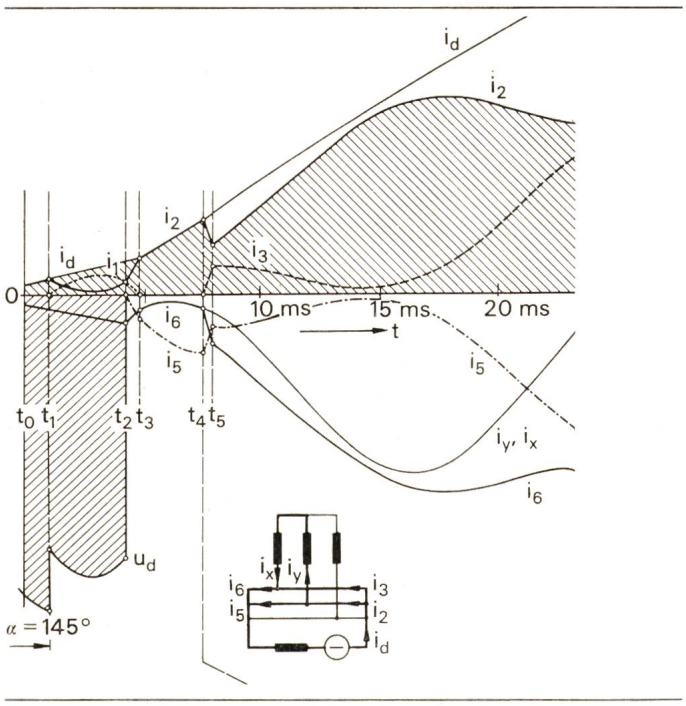

Fig. 7 Wechselrichterkippen mit doppeltem Freilauf
Steuerwinkel $\alpha = 145^0$, $L/L_s = 5$, $E/U_{vm} = 1{,}33$

4. Wechselrichter-Kippvorgang

Unter der Voraussetzung sehr grosser Gleichstrominduktivität ($L \rightarrow \infty$), was der konventionellen Stromrichtertheorie entspricht [1; 2; 3], bekommt man für die Kommutierungs-Grenzbedingungen einfache Beziehungen (Gl. 1...3). Die analytische Berechnung der Ströme in der Drehstrom-Brückenschaltung für reale Verhältnisse L/L_s [4] ist aber sehr komplex, wie aus den Gl. (4; 5) zu ersehen ist, die allerdings nur für einen Schaltzustand aufgestellt sind [5]. Erst die Anwendung von Computern hat es ermöglicht, mit Hilfe von entsprechenden Programmen die Ströme und Spannungen in der Drehstrom-Brückenschaltung während des Wechselrichterkippens bei verschiedenen Betriebsbedingungen zu berechnen.

Nachfolgend werden einige typische Resultate der Computerberechnungen des Wechselrichter-Kippvorganges graphisch dargestellt. Die Berechnungen gelten für das Ersatzschema in Fig. 1. Jede Berechnung wurde für konstante Parameter nach Tabelle I vom Einschaltaugenblick $i_d = 0$ bis zum Kippen durchgeführt. In den Fig. 6...10 wird nur der wichtigste Zeitabschnitt der Berechnung, kurz vor und nach dem Kippen, gezeigt.

Der gewählte Steuerbereich $120^0...165^0$ entspricht normalen Betriebszuständen des Wechselrichters. Das Spannungsverhältnis E/U_{vm} liegt gewöhnlich unter 0,9, d. h. dass die gewählten Werte als Netzspannungsstörungen mit Absenkungen auf ca. 90,75 und 25% der Nennspannung zu interpretieren sind.

Der Wechselrichter-Kippvorgang sei zuerst ausführlich anhand von Fig. 6 erläutert. Bis zum Zeitpunkt t_1 arbeitet der Wechselrichter normal, trotz verkleinerter Wechselspannung und daher zunehmendem Gleichstrom. Die Kommutierung läuft ordnungsgemäss ab. T_6 kommutiert auf T_5 (i_6, i_5) und T_1 auf T_3 (i_1, i_3). Im Augenblick t_1 führen T_5 und T_3 den Strom (Schaltzustand 5 in Fig. 2). Gleichzeitig zündet T_4 (Schaltzustand 6). Da der Gleichstrom stetig zunimmt, ist diese Kommutierung erfolglos, d. h. i_5 erreicht den Nullwert nicht mehr. Der normale Schaltzustand 7 wird nicht erreicht. Im Zeitpunkt t_2 zündet ordnungsgemäss T_2 (Schaltzustand 8, Fig. 2). Damit sind 4 Thyristoren gleichzeitig stromführend, T_3 kommutiert mit T_2 und T_4 mit T_5 (doppelte Kommutierung). In t_3 löscht T_4, und kurz danach (t_4) löscht auch T_3. Es bleiben nur zwei Thyristoren, T_2 und T_5, stromleitend. Diese stellen für die Gleichstromseite E und L eine Kurzschlussverbindung dar, die als *Freilauf* bezeichnet wird. Dieser Zustand ist in Fig. 6 unten im Schema angedeutet. Der Strom $i_d = i_2 = i_5$ nimmt nun linear zu, gemäss der Gleichung $i_d = Et/L$. In t_5 sollte T_6 zünden, da die Steuerimpulse weiter zugeführt werden. Die Thyristorspannung u_{T6} ist aber in diesem Augenblick negativ und T_6 bleibt gesperrt. Erst in t_6 zündet T_1 und versucht den Strom i_2 abzukommutieren, aber ohne Erfolg. Es bleiben also nach dem Kippen des Wechselrichters dauernd T_2 und T_5 stromleitend, und der Gleichstrom nimmt dauernd zu. Der Kurzschlußstrom wird aus der Gleichspannungsquelle E geliefert und kann nicht mehr vom Stromrichter beeinflusst werden.

Ein zweites charakteristisches Beispiel des Wechselrichterkippens zeigt Fig. 7. Kurz vor dem Kippen, im Zeitabschnitt $t_0 - t_1$ führen T_2 und T_6 den Strom (Schaltzustand 11, Fig. 2). Die nachfolgende Kommutierung zwischen T_1 und T_2 (Schaltzustand 12) verläuft erfolglos, d. h. dass der Strom i_2 den Nullwert nicht erreicht und nach dem Minimum wieder zunimmt. Im Zeitpunkt t_2 zündet T_5, und es kommt zur doppelten Kommutierung: den Strom führen jetzt gleichzeitig 4 Thyristoren: T_1, T_2 und T_5, T_6. Damit sind alle drei Phasen des Drehstromsystems kurzgeschlossen. Gleichzeitig ist auch die Gleichstromseite mit T_2 und T_5 kurzgeschlossen. Die

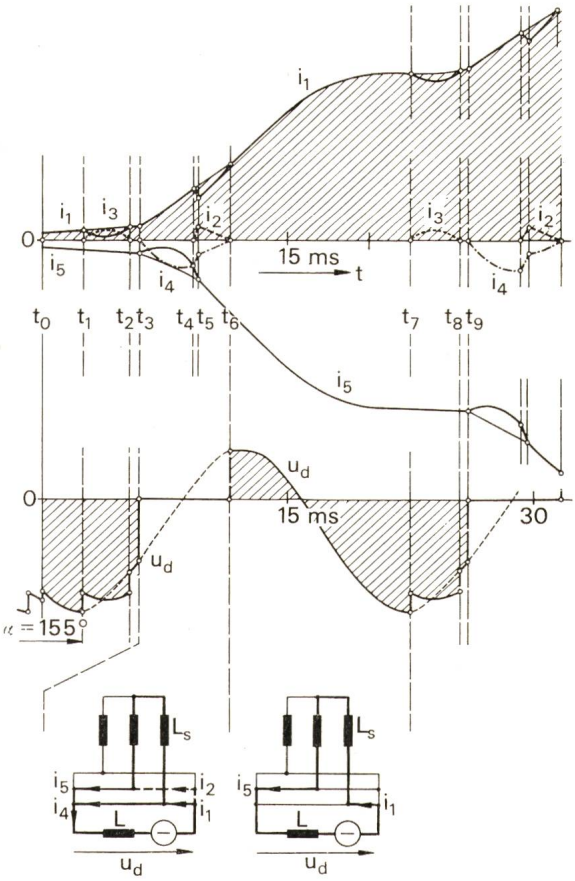

Fig. 8 Wechselrichterkippen mit einem Kurzschlußstromkreis teilweise über das Drehstromsystem und teilweise über den Freilauf
Steuerwinkel $\alpha = 155^0$, $L/L_s = 5$, $E/U_{vm} = 1$

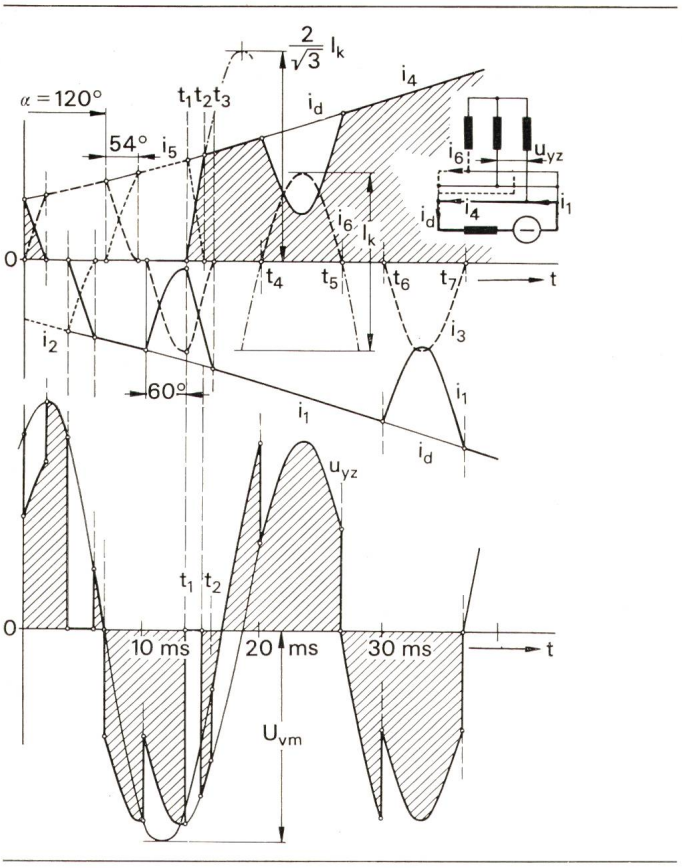

Fig. 9 Wechselrichterkippen mit einem unmittelbaren einfachen Freilauf
Steuerwinkel $\alpha = 120^0$, $L/L_s = 100$, $E/U_{vm} = 3{,}4$

Gleichspannung u_d bricht daher zusammen. In t_3 löscht T_1. Im Zeitabschnitt $t_2 - t_3$ kommutieren T_5 und T_6 erfolglos, und der Freilauf über T_2 und T_5 bleibt bestehen. In t_4 zündet T_3 und bildet mit T_6 einen parallelen Zweig zum Freilauf T_2 T_5. Dieser Doppelfreilauf bleibt für den gekippten Wechselrichter als Dauerzustand. Gleichzeitig bleiben die Phasen X und Y des Drehstromsystems dauernd kurzgeschlossen.

Einen weiteren Wechselrichter-Kippvorgang zeigt Fig. 8. Kurz vor dem Kippen befindet sich der Wechselrichter im Schaltzustand 3 (Fig. 2). Den Strom übertragen T_1 und T_5. Zum Kippen führt die erfolglose Kommutierung zwischen T_3 und T_1 im Zeitabschnitt $t_1 - t_2$. Wenn dann T_4 im Zeitpunkt t_3 gezündet wird, bildet T_1 T_4 einen Freilauf, wie es in Fig. 8 im Schema links unten dargestellt ist. Die Gleichspannung u_d wird null. Im Zeitabschnitt $t_4 - t_6$ bildet sich über T_2 T_5 noch ein zweiter Freilaufzweig. T_2 und T_4 löschen im Zeitpunkt t_6. Weiter bleiben T_1 und T_5 stromleitend, und die Gleichspannung folgt der verketteten Spannung u_{yz}. In t_7 befindet sich der Wechselrichter in der gleichen Lage wie in t_1 vor 20 ms, nur dass der Strom viel grösser geworden ist. Anschliessend wiederholt sich das Schaltspiel, und der Strom nimmt weiter zu. Im Gegensatz zu den Fällen gemäss Fig. 6 und 7, wo der Freilauf als Dauerzustand wirkt, ist hier der Freilauf nur teilweise vorhanden. Der Gleichstrom i_d nimmt daher nach dem Kippen langsamer zu.

In Fig. 9 findet sie letzte erfolgreiche Kommutierung zwischen T_5 und T_6 statt und dauert 54^0 (Schaltzustand 2, Fig. 2). Da der Strom weiter zunimmt, überschreitet die nachfolgende Kommutierung von T_1 und T_3 60^0, so dass T_4 zündet, noch während T_1 leitet (t_1). In t_2 kommutiert dann T_4 den T_5 ab, und bei t_3 löscht auch T_3. Im Zeitabschnitt $t_1 - t_2$ sind T_1, T_3, T_4 und T_5 durchgeschaltet, was für das Drehstromsystem einen vollen Kurzschluss bedeutet. Die im unteren Teil von Fig. 9 gezeigte verkettete Spannung u_{yz} bricht also in diesem Zeitabschnitt zusammen. Während dieser Zeit wird der Kommutierungsstrom von der Phasenspannung getrieben und von der Induktivität L_s begrenzt, im Gegensatz zur normalen Kommutierung, wo die treibende Spannung die verkettete ist und sich im Stromkreis zwei Induktivitäten L_s befinden. Die Amplitude des Kurzschlußstromes ist somit $2/\sqrt{3}$mal grösser. Ab t_3 befinden sich T_1 und T_4 im dauernden Freilauf, und der Gleichstrom i_d nimmt daher linear zu. Alle weiteren Kommutierungsversuche sind erfolglos.

Das letzte Beispiel zeigt in Fig. 10 den Wechselrichter bei hoher Aussteuerung, $\alpha = 165^0$. Der Wechselrichter kippt nach der erfolglosen Kommutierung von T_4 und T_6 (Schaltzustand 10). Der Gleichstrom i_d wird dann dauernd über T_2 und T_4 geführt. Nur kurzzeitig, während der erfolglosen Kommutierungen, werden noch T_1 und T_6 stromführend. T_1 bildet dann mit T_4 einen kurzzeitigen Freilauf. Die Gleichspannung u_d ist nach dem Kippen nur mit der verketteten Spannung u_{yz} gebildet. T_3 und T_5 können nicht mehr gezündet werden, da ihre Spannungen u_{T3}, u_{T5} im Zündaugenblick negativ sind.

5. Zusammenfassung

Aus den graphischen Darstellungen des Wechselrichter-Kippvorganges ist zu ersehen, dass sich das Wechselrichterkippen prinzipiell in folgenden Stromkreisen abspielen kann:

a) Der Kurzschlußstrom fliesst von der Gleichstromseite über zwei Phasen des Drehstromsystems (Fig. 11a).

b) Der Kurzschlußstrom fliesst von der Gleichstromseite direkt über Thyristoren im Freilauf (Fig. 11b).

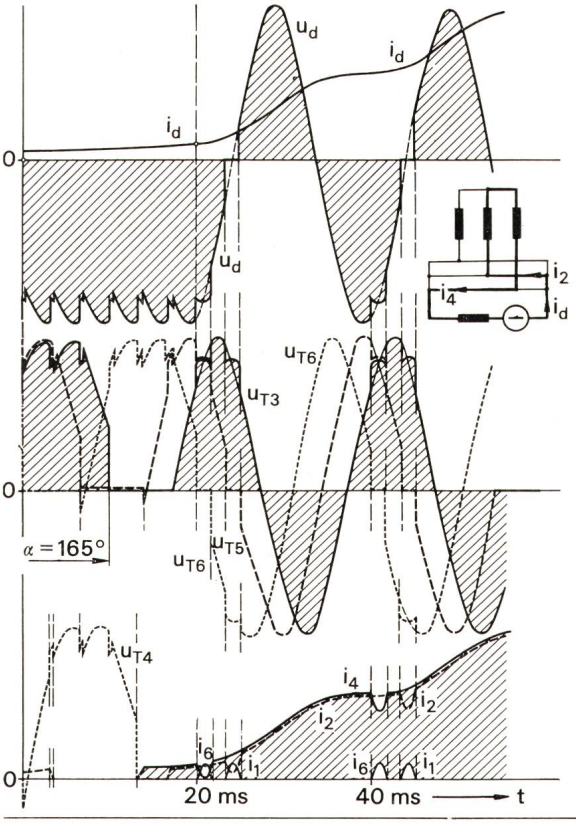

Fig. 10 Wechselrichterkippen mit einem Kurzschlusskreis überwiegend über das Drehstromsystem
Steuerwinkel $\alpha = 165^0$, $L/L_s = 100$, $E/U_{vm} = 3{,}4$

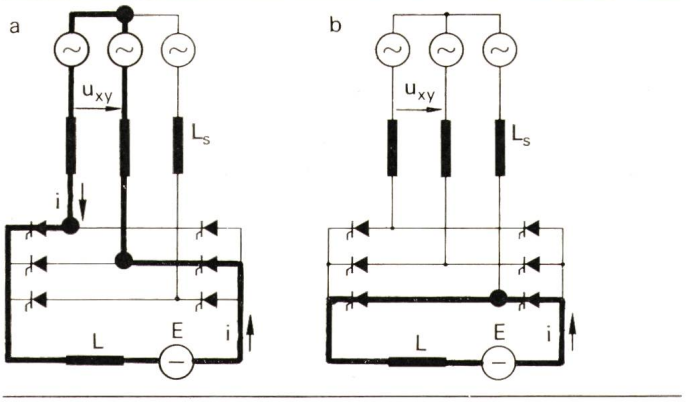

Fig. 11 Typische Kurzschlußstromkreise beim Wechselrichterkippen

a) Der Kurzschlußstrom fliesst über das Drehstromsystem, z. B. über die Phasen X und Y, T_2 und T_6

b) Der Kurzschlußstrom fliesst über den Stromrichter im Freilauf, z. B. über T_1 und T_4 (Bezeichnung gemäss Fig. 1)

Je nach den Umständen, die von den Parametern α, L/L_s und E/U_{vm} abhängig sind, können die beiden Formen des Kippens entweder abwechselnd erscheinen (Fig. 8; 10), was bei grösseren Steuerwinkeln der Fall ist, oder es entsteht ein einfacher (Fig. 6, 9) oder doppelter (Fig. 7) Freilauf, was bei kleineren Steuerwinkeln dann typisch ist.

Diese Resultate gelten für das widerstandslose Ersatzschema der Drehstrom-Brückenschaltung gemäss Fig. 1. Die ohmschen Widerstände im Kommutierungskreis [6; 7] vermindern die Kippgrenze des Stromrichters.

Die genauen Kenntnisse der Bedingungen, die zum Kippen des Stromrichters im Wechselrichterbetrieb führen, und über den Ablauf der Ströme und Spannungen nach dem Kippen, sind Voraussetzung für die Auslegung des Stromrichters, für die Einstellung der Steuerelektronik und für den Entwurf eines wirksamen Schutzkonzeptes.

Literatur

[1] *T. Wasserrab:* Die Drehstrombrückenschaltung für Stromrichter. E und M 59(1941)1/2, S. 3...9.

[2] *F. Hoelters:* Current and voltage conditions from no-load to short circuit in three-phase bridge circuits. Direct Current 5(1961)4, p. 112...121.

[3] *L. Freris:* The universal characteristics of the three-phase bridge converter. Direct Current 6(1961)7, p. 198...201.

[4] *O. Lacina:* Analyse einer dreiphasigen gesteuerten Gleichrichterbrücke im stationären Zustand. Elektrotechnicky Obzor 57(1968)8, S. 431...438.

[5] *A. B. Posse:* Commutation processes in the operation of the three-phase bridge circuit during transient phenomena. Direct Current 4(1958)1, p. 19...32.

[6] *M. Depenbrock:* Kommutierungsverhältnisse bei Stromrichtern mit Widerstand und Induktivität in den Kommutierungsstromkreisen. Arch. Elektrotechn. 51(1968)6, S. 358...363.

[7] *V. H. Jones* and *W. J. Bonwick:* Three-phase bridge rectifiers with complex source impedance. Proc. IEE 122(1975)6, p. 630...636.

Adresse des Autors

Albert Kloss, Fachassistent Abt. EIS, BBC AG Brown, Boveri & Cie., 5400 Baden.