

<b>Zeitschrift:</b>	Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses
<b>Herausgeber:</b>	Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen
<b>Band:</b>	67 (1976)
<b>Heft:</b>	16
<b>Artikel:</b>	Wechselrichterkippen bei Stromrichtern in Drehstrom-Brückenschaltung
<b>Autor:</b>	Kloss, A.
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-915194">https://doi.org/10.5169/seals-915194</a>

### 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:** 26.01.2026

**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]<sup>1)</sup>. 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  $T_1 \dots T_6$ , 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 einfacheitshalber vernachlässigt.

Im motorischen Betrieb der Gleichstrommaschine arbeitet der Stromrichter als *Gleichrichter*, d. h., der Steuerwinkel  $\alpha$  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  $U_d = E$ .

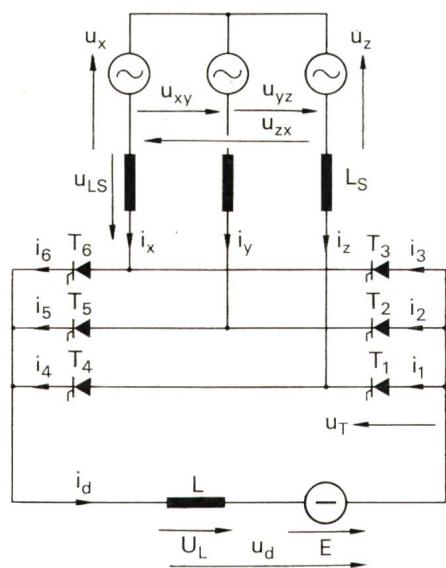


Fig. 1 Vereinfachtes Ersatzschema des Stromrichters in Drehstrom-Brückenschaltung

$u_{xy}, u_{yz}, u_{zx}$  verkettete Spannung des Drehstromsystems mit idealen Spannungsquellen  $u_x, u_y, u_z$

- $L_s$  Induktivität des Kommutierungskreises  
 $L$  Induktivität des Gleichstromkreises  
 $T_1 \dots T_6$  Thyristoren  
 $E$  Gleichspannungsquelle  
 $u_d$  Momentanwert der Gleichspannung  
 $i_d$  Momentanwert des Gleichstromes  
 $i_1 \dots i_6$  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  $60^\circ$  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 kurzschnittartigem Stromanstieg: Wechselrichterkippen.

<sup>1)</sup> Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

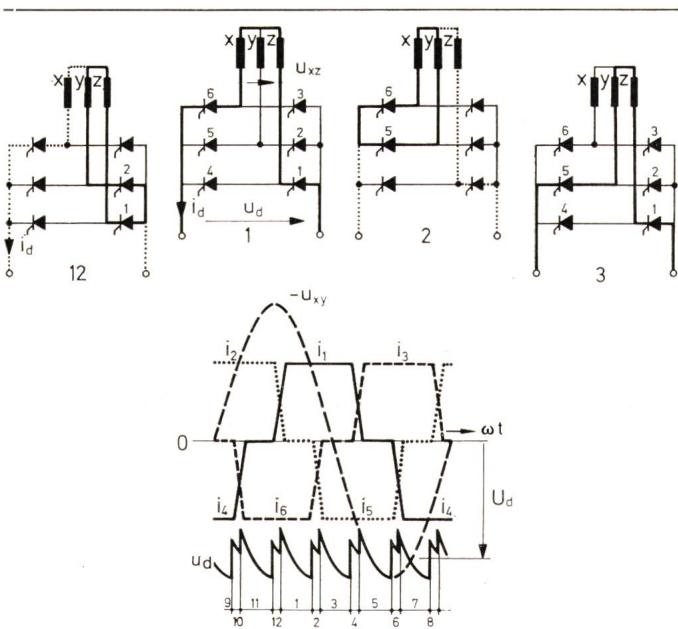


Fig. 2 Wirkungsweise der Drehstrom-Brückenschaltung im Wechselrichterbetrieb mit einfacher Kommutierung  
Einzelne Schaltzustände 1...12 innerhalb einer Periode

### 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<sub>2</sub> und T<sub>6</sub> den Strom, und die Gleichspannung u<sub>d</sub> wird mit

$u_{xy}$  gebildet. Die Induktivität des Gleichstromkreises sei sehr gross ( $L \rightarrow \infty$ ), so dass der Gleichstrom  $i_d$  glatt wird. Im Zeitwinkel  $\alpha$ , vom Schnittpunkt von  $u_{xy}$  und  $-u_{zx}$  gerechnet, zündet T<sub>1</sub>. Damit werden die Phasen Y und Z über T<sub>1</sub> und T<sub>2</sub> kurzgeschlossen (Schaltzustand 12), und in diesem Kommutierungskreis entwickelt sich ein Strom

$$i_1 = I_k [\cos \alpha - \cos (\omega t + \alpha)] \quad (1)$$

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 aufkommunizierenden Thyristor. Für den abkommunizierenden Strom kann man mit  $i_0$ , dem Strom am Anfang der Kommutierung, schreiben:

$$i_2 = i_0 - i_1 \quad (2)$$

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  $\tilde{\alpha}_a$ ). Die Gleichspannung  $u_d$  liegt dabei zwischen  $u_{yz}$  und  $-u_{zx}$ . Nach der Kommutierung löscht T<sub>2</sub> und T<sub>1</sub> und übernimmt den Strom. Gleichzeitig ist noch T<sub>6</sub> 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<sub>1</sub> löscht, ohne den Strom für den vorgesehenen Schaltzustand 1 übernehmen zu können. T<sub>2</sub> bleibt weiter stromleitend, was wieder dem Schalt-

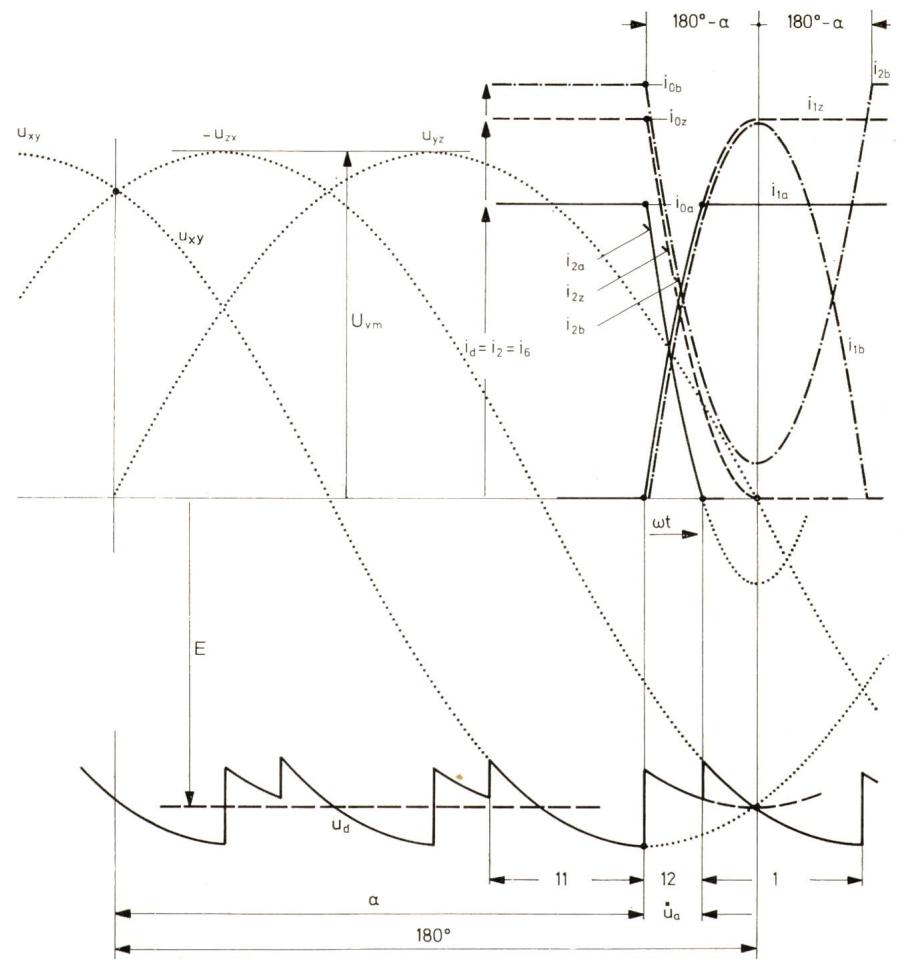


Fig. 3  
Darstellung der Kommutierung beim Wechselrichter gemäss Fig. 1 mit  $L/L_s = \infty$

- a) erfolgreiche Kommutierung (Index a)
- b) erfolglose Kommutierung (Kippen) (Index b)
- c) Kommutierung an der Kippgrenze (Index z)

Daten zu den Beispielen des Kippvorganges

Tabelle I

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

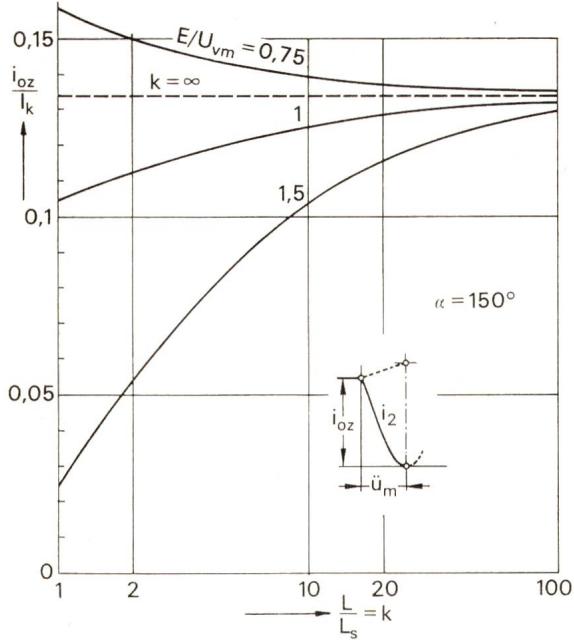


Fig. 4 Maximal zulässiger Strom am Anfang der Kommutierung  $i_{0z}$ , bezogen auf den Scheitelwert des Kurzschlußstroms im Kommutierungskreis  $I_k$  in Abhängigkeit von  $L/L_s$  und  $E/U_{Vm}$ . Konstanter Steuerwinkel  $\alpha = 150^\circ$

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 abkommunizierende Strom  $i_{2z}$  genau bei Spannungsnulldurchgang von  $u_{yz}$  Null erreicht. Aus Gl. (1) folgt

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

Der geschilderte Kommutierungsvorgang des Wechselrichters gilt unter der Voraussetzung, dass das Induktivitätsverhältnis  $L/L_s$  sehr gross ist. Die Annahme  $L/L_s \rightarrow \infty$ , 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

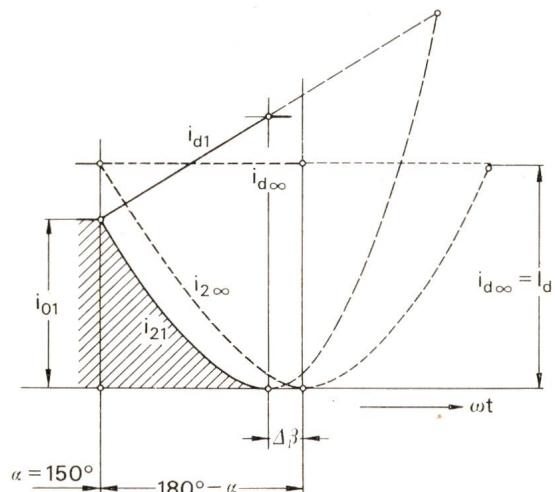


Fig. 5 Kommutierungsvorgang des Wechselrichters an der Kippgrenze für  $E/U_{Vm} = 1$  und  $\alpha = 150^\circ$

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

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

$$i_1 = I_m [\sin(\alpha + \varphi_1 + 60^\circ) - \sin(\omega t + \alpha + 60^\circ)] - I_E \omega t \quad (4)$$

$$i_2 = i_0 - I_m [\sin(\alpha + \varphi_2 + 60^\circ) - \sin(\omega t + \alpha + \varphi_2 + 60^\circ)] - I_E \omega t \quad (5)$$

Hierin bedeuten

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

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

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

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 abkommunizierenden Stromverlauf für einen gewählten Punkt des Diagrammes in Fig. 4. Die Kippgrenze wird bei  $L/L_s = \infty$  bei kleinerem Anfangsstrom  $i_{01}$  erreicht als im idealisierten Fall ( $i_{d\infty}$ ). Weil sich der Gleichstrom  $i_d$  während der Kommutierung im Gegensatz zum Fall mit  $L/L_s \rightarrow \infty$  ändert, verschiebt sich das Minimum von  $i_{21}$  um  $\Delta\beta$ , d. h., dass die Kommutierung früher als im Spannungsnulldurchgang abgeschlossen werden muss.

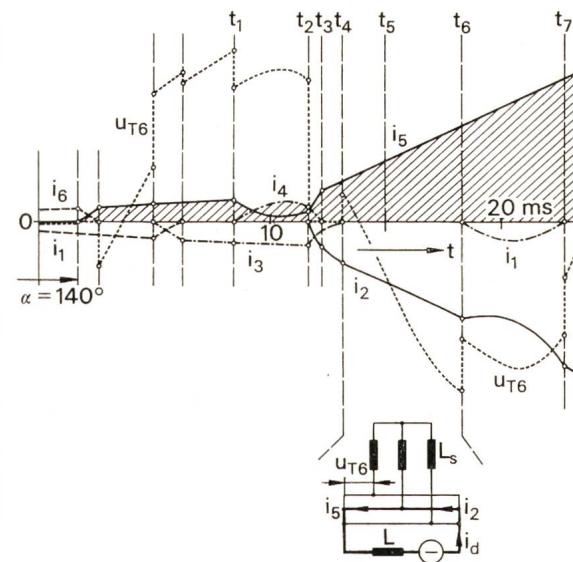


Fig. 6 Wechselrichterkippen mit einfacherem Freilauf  
Steuerwinkel  $\alpha = 140^\circ$ ,  $L/L_s = 5$ ,  $E/U_{Vm} = 1$

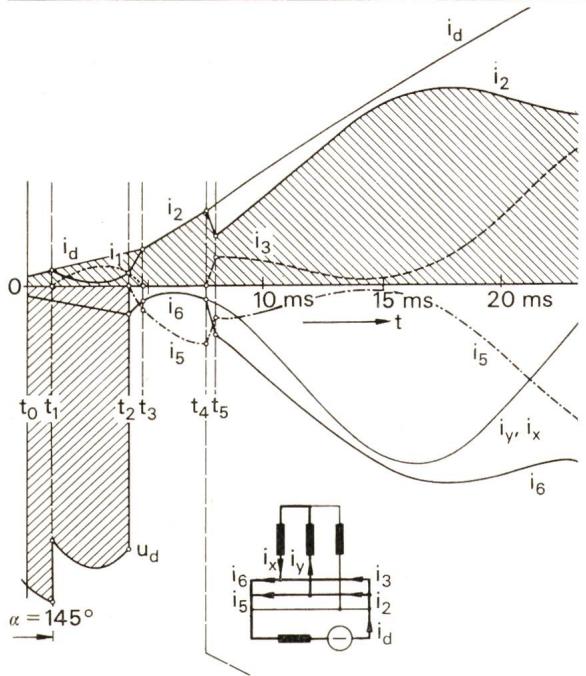


Fig. 7 Wechselrichterkippen mit doppeltem Freilauf

Steuerwinkel  $\alpha = 145^\circ$ ,  $L/L_s = 5$ ,  $E/U_{Vm} = 1,33$

#### 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  $120^\circ \dots 165^\circ$  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  $i_2$  abzukommunizieren, 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  $t_0 \dots t_1$  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

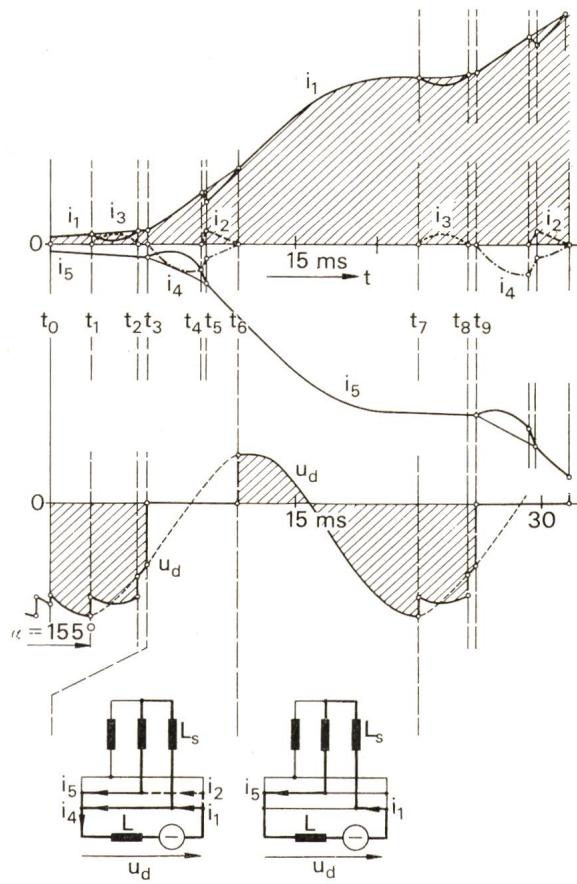


Fig. 8 Wechselrichterkippen mit einem Kurzschlussstromkreis teilweise über das Drehstromsystem und teilweise über den Freilauf  
Steuerwinkel  $\alpha = 155^\circ$ ,  $L/L_s = 5$ ,  $E/U_{Vm} = 1$

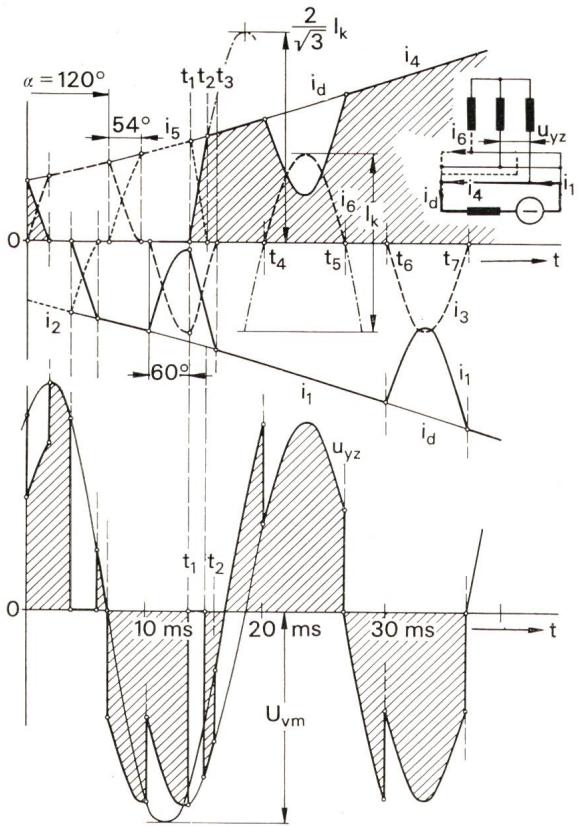


Fig. 9 Wechselrichterkippen mit einem unmittelbaren einfachen Freilauf

Steuerwinkel  $\alpha = 120^\circ$ ,  $L/L_s = 100$ ,  $E/U_{vm} = 3,4$

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  $54^\circ$  (Schaltzustand 2, Fig. 2). Da der Strom weiter zunimmt, überschreitet die nachfolgende Kommutierung von  $T_1$  und  $T_3$   $60^\circ$ , 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,  $\alpha = 165^\circ$ . 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 kurzezeitigen 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:

- Der Kurzschlussstrom fliesst von der Gleichstromseite über zwei Phasen des Drehstromsystems (Fig. 11a).
- Der Kurzschlussstrom fliesst von der Gleichstromseite direkt über Thyristoren im Freilauf (Fig. 11b).

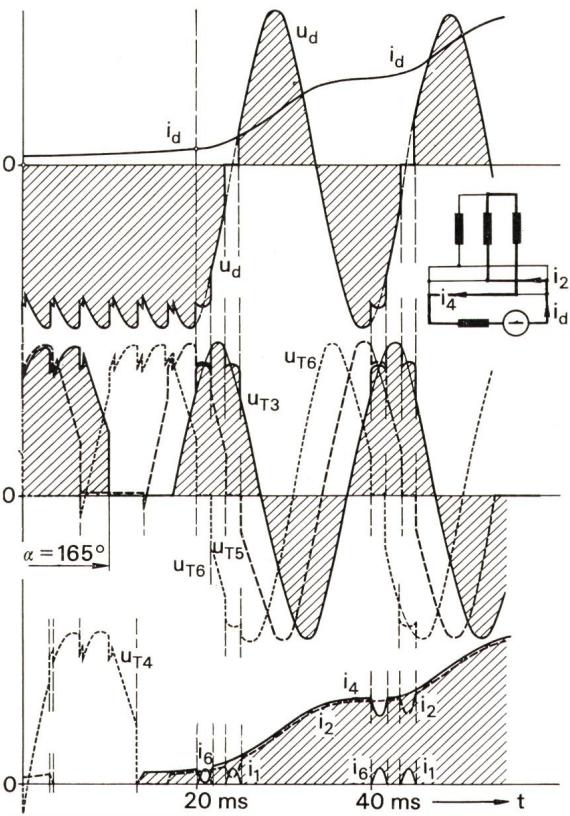


Fig. 10 Wechselrichterkippen mit einem Kurzschlusskreis überwiegend über das Drehstromsystem

Steuerwinkel  $\alpha = 165^\circ$ ,  $L/L_s = 100$ ,  $E/U_{vm} = 3,4$

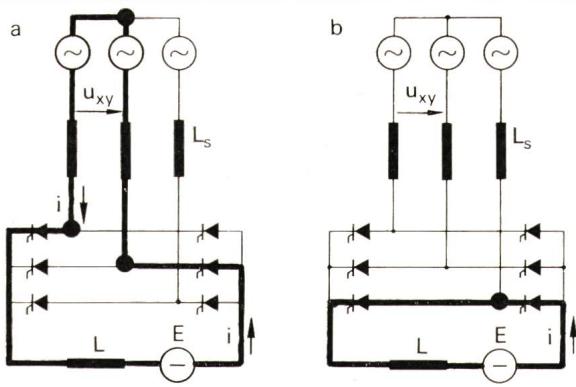


Fig. 11 Typische Kurzschlußstromkreise beim Wechselrichterkippen

- a) Der Kurzschlußstrom fließt über das Drehstromsystem, z. B. über die Phasen X und Y, T<sub>2</sub> und T<sub>6</sub>
- b) Der Kurzschlußstrom fließt über den Stromrichter im Freilauf, z. B. über T<sub>1</sub> und T<sub>4</sub> (Bezeichnung gemäss Fig. 1)

Je nach den Umständen, die von den Parametern  $\alpha$ ,  $L/L_s$  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.