

Tamm, Karl-Heinz; Gens, Wolfgang :

***Bewertung möglicher Zwangskommutierungsschaltungen für
Spannungswechselrichter in Drehstrombrückenschaltung***

Zuerst erschienen in:

Wissenschaftliche Zeitschrift // Technische Hochschule Ilmenau. -
Ilmenau : Techn. Hochschule, ISSN 0043-6917, Bd. 26 (1980), 1, S.
135-150

K.-H. TAMM/ W. GENS

Bewertung möglicher Zwangskommütierungsschaltungen für Spannungswechselrichter in Drehstrombrückenschaltung

1. Einleitung

In der Entwicklung elektrischer Antriebe mit frequenzgesteuerten Drehstromasynchronmotoren deutet sich an, daß Einzelantriebe vorwiegend mit selbstgelöschten Stromwechselrichtern und Gruppenantriebe ausschließlich mit selbstgelöschten Spannungswechselrichtern ausgeführt werden. Die Gesteuerungskosten des meist als Drehstrombrücke geschalteten Wechselrichters werden wesentlich vom Bauelementeaufwand des Leistungsteils bestimmt. Dieser besteht bei größerer Betrachtung aus den energetischen Elementen, die den Laststrom führen müssen und jenen, mit denen die Zwangskommütierung der Ströme durch die 6 Halbleiterschalter in den 3 Brückenzeigen zu vollziehen ist. Die möglichen Strukturierungen der Zwangskommütierungsschaltung bei selbstgelöschten Spannungswechselrichtern sind sehr vielfältig und der Aufwand dafür sehr unterschiedlich. Es wird der Versuch unternommen, diese zu systematisieren und unter Beachtung des spezifischen Betriebsverhaltens die Auswahl der optimalen Variante weitgehend zu objektivieren.

2. Bemerkungen zum selbstgelöschten Spannungswechselrichter

2.1. Wirkungsweise

Bei allen selbstgelöschten Spannungswechselrichtern wird die Ausgangswchselspannung dadurch gebildet, daß mit Hilfe von speziellen Schaltern nach einem vorgegebenen Steueralgorithmus

mus die Polarität der dem Lastzweipol eingeprägten Spannung u_a gewechselt wird. Der Grundbaustein eines mehrsträngigen Wechselrichters auf Halbleiterbasis ist der sogenannte Polwechsler (Bild 1).

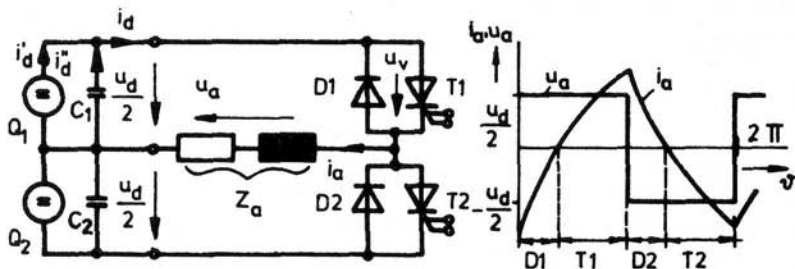


Bild 1: Polwechsler, Schaltung und Verlauf von u_a und i_a

In der angedeuteten Schaltung werden die beiden Halbleiterschalter (Thyristor//Diode) im geöffneten Zustand nur mit einer Spannungspolarität ($+u_v$) und im geschlossenen Zustand mit beiden Stromrichtungen beansprucht.

Die Wirkungsweise des Wechselrichters verlangt die zwangsweise Unterbrechung des Stromes durch die Thyristoren. Diese "Zwangslöschung", gewöhnlich in Verbindung mit einer Zwangskommütierung des Stromes auf einen anderen Stromzweig, ist ausführbar mittels

- Einzellöschung
- Gegentaktlöschung oder Phasenlöschung
- Phasenfolgelöschung
- Summenlöschung.

2.2. Steuerverfahren

Zur Steuerung der Amplitude und Frequenz von u_a und i_a wendet man die Rechteck- sowie die Pulssteuerung an. Bei der Rechtecksteuerung erfolgt pro Halperiode von u_a ein Ein- und ein Ausschalten der beiden Halbleiterschalter des Polwechslers (Bild 1). Die Frequenz von u_a wird durch die Schaltfrequenz festgelegt. Auf die Amplitude der Grundschiwingung von u_a kann nur über u_d Einfluß genommen werden. i_a stellt sich als Funktion u_a und Z_a frei ein.

Bei der Pulssteuerung erfolgt das Ein- und Ausschalten pro Halperiode von u_a mehrmals, um durch Impulsbreitenmodulation von u_a indirekt (Bild 2) oder durch hysteresebefahfete Zweipunktregelung von i_a direkt eine weitgehende Annäherung von i_a (ψ) an die Sinusform mit vorgegebener Amplitude und Frequenz zu erreichen.

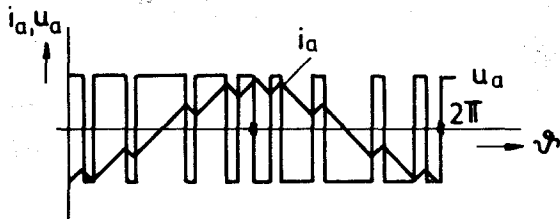


Bild 2 : Pulssteuerung durch Pulsbreitenmodulation

Gewöhnlich wird bei einem weiten Frequenzstellbereich im oberen Teil die Rechteck- und im unteren Teil die Pulssteuerung angewendet. Das Steuerverfahren bestimmt maßgeblich das anwendbare Löschrinzip für die Halbleiterschalter des Wechselrichters. Die Phasenfolgelöschung ist für das Pulssteuerungsverfahren grundsätzlich nicht geeignet, die Summenlöschung im allgemeinen nicht zweckmäßig. Beide Verfahren werden von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen.

2.3. Energieaufnahme und Energieabgabe

Vielfach müssen Wechselrichter und zugeordnete Gleichspannungsquelle Q (Bild 1) den motorischen und generatorischen Betrieb der angeschlossenen Asynchronmaschine ermöglichen. Er ist dadurch gekennzeichnet, daß der Phasenwinkel zwischen Strangspannung u_a und Strangstrom i_a bei Motorbetrieb im Bereich $0 < \varphi < \frac{\pi}{2}$ und bei Generatorbetrieb im Bereich $\frac{\pi}{2} < \varphi < \pi$ liegt. Bei Betrachtung nur eines Maschinenstranges sind u_a und i_a identisch mit den Größen des Lastzweigs des auf Bild 1 dargestellten Polwechslers. Die in Z_a umgesetzte Energie ist

$$W_Z = \int_0^T u_a i_a dt.$$

Bei positivem Integral liegt Energieaufnahme, anderenfalls Energieabgabe vor. Die in der Gleichspannungsquelle umgesetzte Energie ist

$$W_Q = \int_0^T u_d i_a dt.$$

Energieabgabe liegt bei negativem Vorzeichen, Energieaufnahme bei positivem Vorzeichen des Integrals vor.

Die Umkehr der Energieflußrichtung im Wechselrichter ist ohne besondere Maßnahmen möglich, da die dazu erforderlichen beiden Richtungen des Stromes durch Z_a ohnehin auch bei Energieaufnahme gewährleistet sein müssen.

Die Energieaufnahme durch die Gleichspannungsquelle setzt voraus, daß der Strom i_d' im Vergleich zur Energieabgabe zeitweise sein Vorzeichen umkehren muß. Besteht die Quelle aus netzgelöschten Gleichrichtern, müssen folglich zwei antiparallele Einheiten angeordnet werden.

3. Strukturen selbstgelöschter Spannungswechselrichter und ihre Systematisierung auf der Basis möglicher Zwangskommütierungsschaltungen

3.1. Prinzipschaltungen für die Zwangslöschung eines Thyristors

Die Zwangslöschung eines Thyristors in einem Polwechsler kann realisiert werden, indem ein Stromimpuls in die Antiparallelschaltung von Thyristor und Diode entgegen der Thyristorstromrichtung eingeprägt wird oder dem Thyristor ein Sperrspannungsimpuls eingeprägt wird. Die Einprägung der Impulse kann parallel zum Thyristor oder in Reihe zu diesem erfolgen. Diesen Möglichkeiten entsprechend existieren die vier Löschrinzipien:

- Stromimpuls parallel zum Thyristor (Bild 3.1.)
- Spannungsimpuls parallel zum Thyristor (Bild 3.2.)
- Spannungsimpuls in Reihe zum Thyristor (Bild 3.3.)
- Stromimpuls in Reihe zum Thyristor (Bild 3.4.).

Die durch Bild 3 (nächste S.) gegebene Erläuterung der Löschrinzipien erfolgt mit folgenden Vereinfachungen:

- Es existieren abstrakte Spannungs- und Stromimpulsquellen, die mit einem Hilfsth Thyristor zugeschaltet werden können und durch die Gleichungen

$$u_I = \hat{u}_I \cos \omega_I t \quad u_I - \text{Spannung der Impulsquelle}$$

$$i_I = \hat{i}_I \sin \omega_I t \quad i_I - \text{Strom der Impulsquelle}$$

$$\omega_I - \text{Kreisfrequenz der Impulsquelle}$$

$$t - \text{Zeit}$$

charakterisiert sind.

- Während der Löschung eines Thyristors und der resultierenden Zwangskommütierung des Wechselstromes i_a gilt

$$i_a = I_{a0} = \text{konst.}$$

Beim Löschrinzip Stromimpuls parallel zum Thyristor (Bild 3.1.) besteht folgende Besonderheit. Der Zeitpunkt des Nulldurchganges des Thyristorstromes und die Ausbildung der Freihaltezeit t_{fh} werden von

- den Induktivitäten, die durch den realen Schaltungsaufbau bedingt sind und den Dioden- und Thyristorzweigen zugeordnet werden müssen sowie

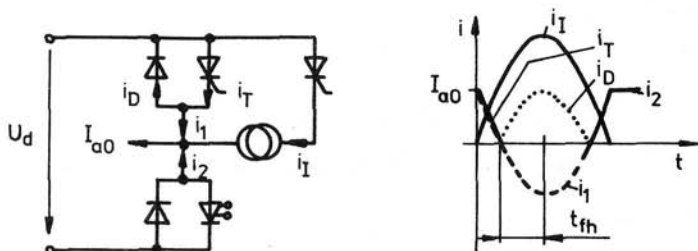


Bild 3.1.: Stromimpuls parallel zum Thyristor

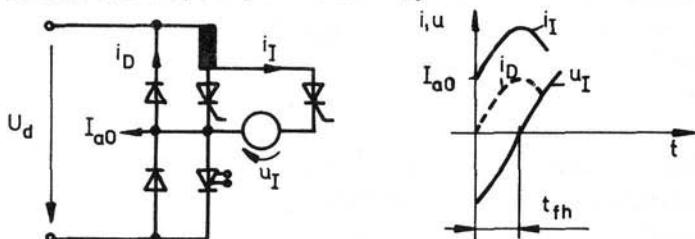


Bild 3.2.: Spannungsimpuls parallel zum Thyristor

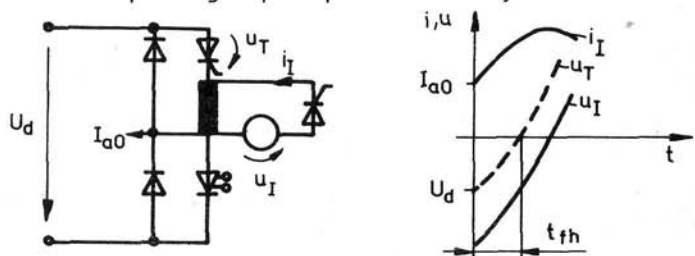


Bild 3.3.: Spannungsimpuls in Reihe zum Thyristor

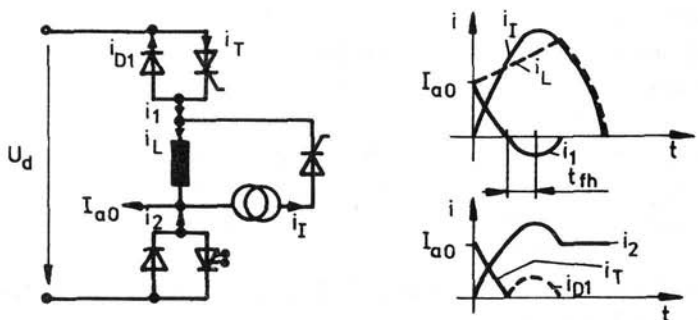


Bild 3.4.: Stromimpuls in Reihe zum Thyristor

- der Durchlaßspannung von Thyristor und Diode, die durch deren Schleusenspannung angenähert werden kann beeinflusst. Unter der Voraussetzung $L_D \gg L_T$ mit L_D - Induktivität des Diodenzweiges und L_T - Induktivität des Thyristorzweiges ist der Nulldurchgang des Thyristorstromes und der frühestmögliche Beginn der Freihaltezeit gesichert. Bei Berücksichtigung der Abhängigkeit der Freiwerdezeit des Thyristors von der Sperrspannung ist die Beziehung

$$L_D \cdot \frac{di_D(t=t_1)}{dt} \gg U_{SD}$$

L_D - Induktivität des Diodenzweiges

i_D - Diodenstrom

t_1 - Zeitpunkt des Nulldurchganges des Thyristorstromes

U_{SD} - Schleusenspannung der Diode

die Voraussetzung für eine eindeutige Ausbildung der Freihaltezeit. Den genannten Voraussetzungen kann durch die Anordnung einer definierten Induktivität im Diodenzweig entsprochen werden.

Für das Löschrinzip Stromimpuls in Reihe zum Thyristor (für das die oben genannte Besonderheit gleichfalls gilt) ergibt sich prinzipiell ein höherer Aufwand als für die übrigen Löschrinzipien, da

- gegenüber dem Löschrinzip Stromimpuls parallel zum Thyristor bei gleichen Werten von ω_I und \hat{i}_I die Freihaltezeit kleiner ist und eine zusätzliche Induktivität angeordnet werden muß und
- gegenüber den Löschrinzipien mit einer Spannungsimpulsquelle ein wesentlich größerer Induktivitätswert erforderlich ist.

Eine genauere Analyse dieses Löschrinzips ist deshalb nicht lohnend.

Die spezifischen Eigenschaften der Löschrinzipien lassen sich nur anhand konkreter Impulsquellen bestimmen. Die Realisierung der Impulsquellen erfolgt in der Art, daß mit der Zündung eines Hilfsthystors ein Reihenschwingkreis zur Wirkung kommt, dessen Kapazität im Einschaltmoment definiert aufgelad-

den ist. Dadurch wird dem Polwechsler der gewünschte Löschimpuls eingeprägt (Bild 4). Im Fall der Einprägung eines Spannungsimpulses dient die bereits im Hauptstromnetzwerk angeordnete Induktivität als Schwingkreiselement.

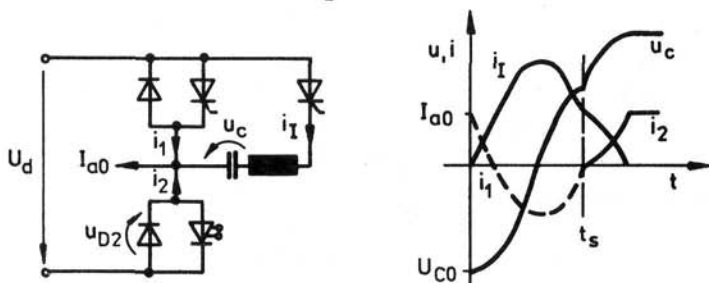


Bild 4.1: Stromimpuls parallel zum Thyristor

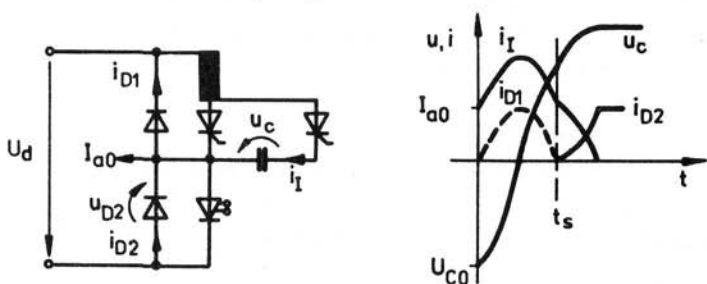


Bild 4.2: Spannungsimpuls parallel zum Thyristor

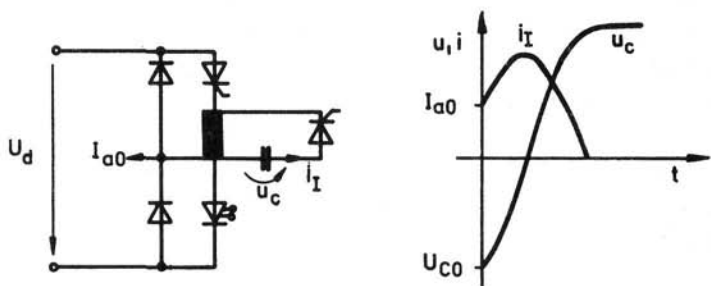


Bild 4.3: Spannungsimpuls in Reihe zum Thyristor

Bild 4: Löschrinzipien mit konkreten Impulsquellen

Aus der Analyse eines Löschvorganges mit konkreten Impulsquellen werden folgende Erkenntnisse gewonnen:

- Unabhängig vom Löschrinzip erfährt der für einen Löschimpuls notwendige Anfangswert der Spannung an der Kapazität U_{CO} während des Löschvorganges eine Vorzeichenänderung und Betragserhöhung. Aufgrund der Vorzeichenänderung ist für aufeinanderfolgende Löschimpulse die Löschbereitschaft der Impulsquelle zu sichern.
- Bei den Löschrinzipien mit einer Impulsquelle parallel zum Thyristor tritt während des Löschvorganges ein Umschaltzeitpunkt t_s auf, bei dem die eine Antiparallelschaltung von Thyristor und Diode stromlos wird und die andere Antiparallelschaltung mit der Stromführung beginnt. Für die mathematische Formulierung des Vorganges, der mit einem Löschimpuls verbunden ist, bedeutet dies eine Änderung der Netzwerkstruktur.
- Im Umschaltzeitpunkt muß die Voraussetzung

$u_{D2}(t = t_s) > 0$	u_{D2} - Spannung über der Diode D2
	t_s - Umschaltzeitpunkt

 erfüllt sein, da sonst während des Löschvorganges eine Konstantstromladung der Kapazität stattfindet, die wegen ihrer stromabhängigen Dauer im allgemeinen nicht zugelassen werden kann.

3.2. Elementare Zwangskommutierungsschaltungen

Als Zwangskommutierungsschaltungen werden die Schaltungen bezeichnet, die eine wiederholte Zwangslöschung bzw. als Folge dessen eine wiederholte Zwangskommutierung des Wechselstromes ermöglichen. Eine scharfe Trennung nach Schaltungsbestandteilen, die ausschließlich zur Zwangslöschung, zur Sicherung der Löschbereitschaft oder zur Führung des Wechselstromes dienen, ist im allgemeinen nicht möglich. Unabhängig vom Löschrinzip lassen sich bei den Zwangskommutierungsschaltungen vier prinzipielle Varianten der Zuordnung der Impulsquelle zum Hauptstromnetzwerk unterscheiden:

- eine Impulsquelle je Hauptthyristor (Bild 5.1.)
- eine Impulsquelle je Brückenhälfte (Bild 5.2.)
- eine Impulsquelle je Polwechsler (Bild 5.3.)
- eine Impulsquelle je Brücke (Bild 5.4.)

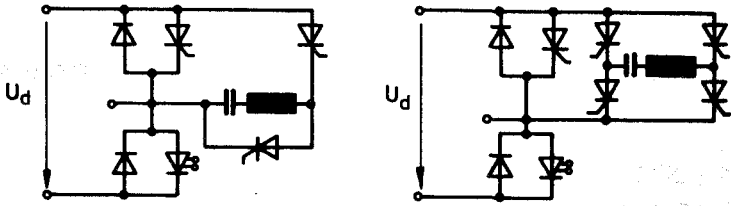


Bild 5.1: Eine Impulsquelle je Hauptthyristor

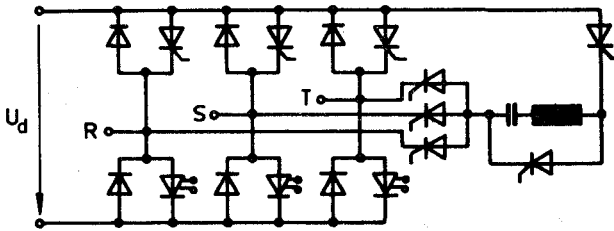


Bild 5.2: Eine Impulsquelle je Brückenhälfte

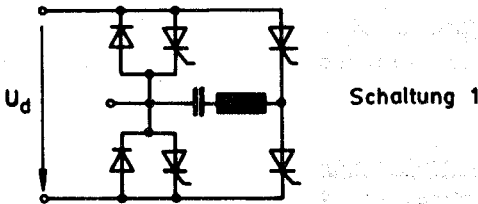


Bild 5.3: Eine Impulsquelle je Polwechsler

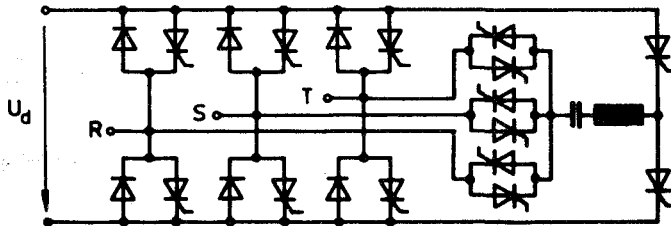


Bild 5.4: Eine Impulsquelle je Brücke

Bild 5: Zuordnung der Impulsquelle zum Hauptstromnetzwerk am Beispiel des Löschrinzips
 Stromimpulsquelle parallel zum Thyristor

Die Löschbereitschaft wird bei den elementaren Zwangskommütierungsschaltungen mit einer Impulsquelle je Hauptthyristor und einer Impulsquelle je Brückenhälfte mittels separater Umschwingkreise oder die Zuschaltung der Impulsquelle über eine Brückenschaltung aus Hilfsthyristoren (Bild 5.1.) gesichert. Bei den Zwangskommütierungsschaltungen mit einer Impulsquelle je Polwechsler und einer Impulsquelle je Brücke geschieht dies durch wechselweises Auslösen von Löschimpulsen für die beiden Thyristoren eines Polwchslers bzw. für die Thyristoren der beiden Brückenhälften.

Sind der Wert der Gleichspannung und des zu kommutierenden Wechselstromes konstant, so existiert ein stationärer Betriebszustand der Zwangskommütierungsschaltungen. Er ist dadurch gekennzeichnet, daß in der Aufeinanderfolge der Löschimpulse keine Änderung des Anfangswertes der Spannung an der Kapazität der Impulsquelle erfolgt und deshalb für jeden Löschvorgang die gleiche Freihaltezeit gesichert ist. Der stationäre Betriebszustand ergibt sich als Gleichgewichtszustand zwischen der Energie, die der Impulsquelle während des Löschvorganges zugeführt wird und der Energie, die der Impulsquelle durch die widerstandsbehafteten realen Schwingkreise während des Löschvorganges und der Wiederherstellung der Löschbereitschaft entzogen wird. Bei betriebsbedingten Änderungen der Gleichspannung und des zu kommutierenden Wechselstromes ergibt sich eine Abhängigkeit des Minimalwertes der Freihaltezeit von diesen Änderungen. Sie ist durch das Löschrinzip und die jeweilige mit diesem Löschrinzip mögliche Betriebsart der Zwangskommütierungsschaltung bestimmt. Die Abhängigkeit des Minimalwertes der Freihaltezeit von den betriebsbedingten Änderungen der Gleichspannung und des zu kommutierenden Wechselstromes stellt die für den ökonomisch-technischen Variantenvergleich entscheidende Betriebseigenschaft dar. In (Tamm, K.-H. /1/) sind Betriebsarten und Betriebseigenschaften der Zwangskommütierungsschaltungen ausführlich behandelt.

3.3. Praktisch bedeutsame Zwangskommütierungsschaltungen

Zur Verbesserung der Betriebseigenschaften und zur Aufwandsreduzierung werden die elementaren Zwangskommütierungsschaltungen modifiziert, indem ihre Netzwerkstruktur verändert und/oder eine Nachladeeinrichtung für die Kapazität der Impulsquelle verwendet wird. Die Verbesserung der Betriebseigenschaften beinhaltet die Elimination der Abhängigkeit des Minimalwertes der Freihaltezeit von der Änderung der Gleichspannung und des zu kommütierenden Wechselstromes. Die Aufwandsreduzierung wird durch Verringerung der Spannungsbelastung der Dioden und Thyristoren und/oder Verringerung der Zahl der Hilfsthristoren erreicht.

Beim Vergleich des zahlenmäßigen Aufwandes an Hilfsthristoren für einen Spannungswechselrichter in Drehstrombrückenschaltung erweisen sich die elementaren Zwangskommütierungsschaltungen mit einer Impulsquelle je Polwechsler als die günstigsten. Diese Schaltungen und ihre Modifikation sind deshalb für den ökonomisch-technischen Variantenvergleich von Interesse. Dabei erübrigt sich die gesonderte Analyse der Modifikationen mit einer Nachladeeinrichtung, da durch die Nachladung der prinzipielle Vorgang, der mit einem Löschimpuls verbunden ist, nicht beeinflußt wird.

Von der elementaren Zwangskommütierungsschaltung mit einer Impulsquelle je Polwechsler und dem Löschrinzip Stromimpuls parallel zum Thyristor sind mehrere Modifikationen bekannt. Die als Schaltung 2 und 3 (Bild 6 und 7) bezeichneten Modifikationen, die aufgrund ihrer Betriebseigenschaften und Betriebsarten der elementaren Schaltung, die als Schaltung 1 (Bild 5.3.) bezeichnet wird, technisch gleichwertig sind, erfordern den gleichen zahlenmäßigen Aufwand an Hilfsthristoren wie die elementare Schaltung. Modifikationen mit einem geringeren zahlenmäßigen Aufwand an Hilfsthristoren oder günstigeren Betriebseigenschaften existieren nicht. Die ökonomisch-technisch günstigste Variante unter den Schaltungen 1 bis 3 muß mittels quantitativer Analyse bestimmt werden.

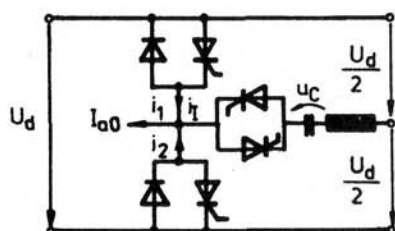


Bild 6: Schaltung 2

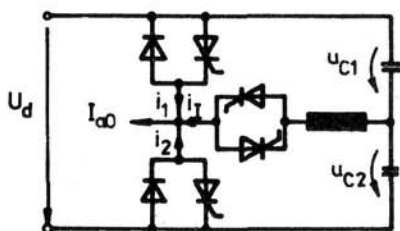
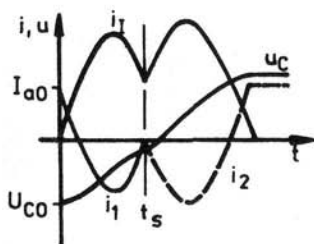
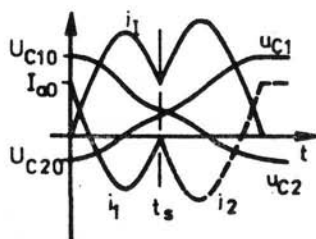


Bild 7: Schaltung 3



Die elementare und die modifizierte Zwangskommütierungsschaltungen mit einer Impulsquelle je Polwechsler und dem Löschrinzip Spannungsimpuls parallel zum Thyristor weisen ungünstigere Betriebseigenschaften auf oder erfordern einen höheren Aufwand als andere Zwangskommütierungsschaltungen. Sie werden deshalb bei der Bestimmung der ökonomisch-technisch günstigsten Schaltungen ausgeschlossen.

Die wesentlichste Modifikation der elementaren Zwangskommütierungsschaltung mit einer Impulsquelle je Polwechsler und dem Löschrinzip Spannungsimpuls in Reihe zum Thyristor ist die als Gegentaktlöscher bekannte Schaltung 4 (Bild 8), bei der die Einprägung des Löschimpulses mittels Transformator erfolgt. Sie stellt die Zwangskommütierungsschaltung mit dem geringsten Aufwand an Thyristoren und Dioden dar. In ihr ist

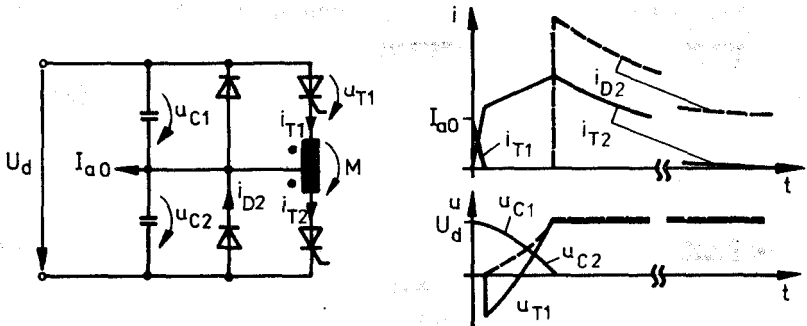


Bild 8: Schaltung 4

jedoch mit jedem Löschimpuls ein "Kreisstrom" verbunden, dessen Dauer ein Mehrfaches der Freihaltezeit beträgt und der einen Energieverlust bewirkt.

4. Aussagen zu den Ergebnissen der quantitativen Analyse praktisch bedeutsamer Zwangskommütierungsschaltungen

Bei der quantitativen Analyse der Schaltungen 1 bis 3 besteht die Aufgabe, den stationären Betriebszustand zu ermitteln, indem die Energieverluste der realen Schwingkreise berücksichtigt werden. Die Berücksichtigung der Energieverluste geschieht näherungsweise durch die Anordnung eines konzentrierten ohmschen Widerstandes in Reihe zur Impulsquelle. Die Ermittlung des stationären Betriebszustandes ist nur numerisch möglich und erfolgt zweckmäßig durch Simulation der Aufeinanderfolge der Löschvorgänge mittels Digitalrechner.

Die dominierenden Kriterien für den ökonomischen Vergleich der Schaltungen 1 bis 3 sind die Spannungsbelastung der Halbleiterschalter und der Energieverlust je Löschvorgang, denen die durch den Stromeffektivwert hervorgerufene Belastung der Thyristoren und Dioden, die relative Freihaltezeit und der Aufwand zur Realisierung der Kapazität und In-

duktivität untergeordnet sind. Im Vergleich dieser Schaltungen ergibt sich, daß die Schaltung 1 wegen der wesentlich größeren Spannungsbelastung der Hilfsthystoren und des großen Energieverlustes je Löschimpuls gegenüber den Schaltungen 2 und 3 unvorteilhaft ist. Der Vergleich der Schaltungen 2 und 3 muß anhand konkreter Einsatzbedingungen geführt werden. Ausschlaggebend ist dabei die Gegenüberstellung des Mehraufwandes, der sich bei der Schaltung 2 aus der Notwendigkeit der Bereitstellung eines Gleichspannungsmittelpunktes ergibt und der bei der Schaltung 3 durch die höhere Spannungsbelastung der Kapazität bedingt ist.

Bei der quantitativen Analyse der Schaltung 4 wird die magnetische Verkopplung der Teilspulen des Transformators durch den Koppelfaktor berücksichtigt, während die Güte der Schwingkreise vernachlässigt wird. Die quantitative Analyse umfaßt die Bestimmung des Ablaufes eines Löschvorganges und die Bestimmung der Abhängigkeit charakteristischer Größen des Löschvorganges von quasistationären Änderungen der Gleichspannung und des zu kommutierenden Wechselstromes. Sie ist nur numerisch möglich und erfolgt zweckmäßig mittels Digitalrechner. Aus den Ergebnissen der quantitativen Analyse der Schaltung 4 werden folgende Erkenntnisse gewonnen:

- Der Energieverlust je Löschimpuls ist 5 bis 10mal größer als in den Schaltungen 2 und 3.
- Eine betriebsbedingte Verdoppelung der Gleichspannung bewirkt mindestens eine Verdoppelung des Energieverlustes je Löschvorgang, so daß die Schaltung 4 für den Betrieb mit variabler Gleichspannung ungeeignet ist.
- Bei einer betriebsbedingten Reduzierung des zu kommutierenden Wechselstromes kann ein größerer Energieverlust je Löschvorgang auftreten als beim Maximalwert des zu kommutierenden Wechselstromes. Diese Möglichkeit läßt sich ausschließen, indem die Schaltung so dimensioniert wird, daß ein bestimmter Wert des Wellenwiderstandes der Impulsquelle nicht unterschritten wird.

Der technische Vergleich der Schaltung 4 mit Schaltung 2 und 3 zeigt, daß die Schaltung 4 für den Betrieb mit in weiten Bereichen veränderlicher Gleichspannung ungeeignet ist und aufgrund der Kreisstromdauer nur wesentlich kleinere Löschimpulsfolgefrequenzen gestattet. Der ökonomische Vergleich dieser Schaltungen muß unter konkreten Einsatzbedingungen erfolgen. Dabei sind die Energieverluste je Löschvorgang und der Aufwand an Hilfsthristoren die dominierenden Kriterien.

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen der wissenschaftlich-technischen Zusammenarbeit mit dem Kombinat VEB LEW Hennigsdorf, dem die Verfasser für die gewährte Unterstützung danken.

Literatur

- /1/ Tamm, K.-H.
Beitrag zur theoretischen Analyse ausgewählter Zwangskommutierungsschaltungen für Spannungswechselrichter
Dissertation der TH Ilmenau, 1978
(mit 38 weiterführenden Literaturstellen)

Verfasser:

Dr.-Ing. Karl-Heinz Tamm

Institut für Apothekenwesen, Außenstelle Frankfurt/O.

12 Frankfurt, Gubener Str. 9

Doz. Dr.-Ing. Wolfgang Gens, Technische Hochschule Ilmenau,
Sektion Elektrotechnik, 63 Ilmenau, Postschließfach 327

Eingang des Manuskripts: 27. April 1979