

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:	82 (1991)
Heft:	19
Artikel:	GTO-Frequenzumrichter mit Wechselrichtern mit zwei Abzweigungen für elektrische Hochgeschwindigkeits-Lokomotiven
Autor:	Alexa, Dimitrie
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-903019

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: 22.02.2026

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

GTO-Frequenzumrichter mit Wechselrichtern mit zwei Abzweigungen für elektrische Hochgeschwindigkeits-Lokomotiven

Dimitrie Alexa

Der Aufsatz beschreibt einen Frequenzumrichter für elektrische Lokomotiven mit Asynchronmotorantrieb, bei dem die Wechselrichter mit einer reduzierten Anzahl von GTO-Thyristoren auskommen. Das vorgeschlagene Steuerprogramm für die Thyristoren erlaubt eine Verringerung der Oberschwingungen niedriger Ordnung am Umrichterausgang. Das neue Konzept kann mit Vorteil bei Lokomotiven mittlerer und hoher Leistung eingesetzt werden.

L'article décrit un convertisseur de fréquence pour locomotives électriques entraînées par moteur asynchrone, dont les onduleurs se contentent d'un nombre réduit de thyristors GTO. Le programme de commande proposé pour les thyristors permet de réduire les harmoniques d'ordre faible à la sortie du convertisseur. Le nouveau concept peut être utilisé avec avantage pour les locomotives de moyenne et haute puissance.

Adresse des Autors

Prof.Dr.-Ing. Dimitrie Alexa, Lehrstuhl für Elektronik am Polytechnischen Institut Iassy, Strada 23 August Nr. 22, RO-6600 Iassy, Romania

In den letzten Jahren werden grosse Anstrengungen unternommen, die Konkurrenzfähigkeit des elektrischen Eisenbahnverkehrs, gegenüber dem Luft- und Autotransport auf mittleren Strecken, durch Züge mit Geschwindigkeiten zwischen 250 und 300 km/h zu verbessern. Um den aktuellen Ansprüchen im Transport gerecht zu werden, muss der elektrische Eisenbahnverkehr folgende Merkmale zum Tragen bringen [1, 2]:

- hohe Geschwindigkeit
- geringer Energieverbrauch
- Automatisierbarkeit bei hohem Sicherheitsgrad

Aus diesem Grund werden mehr und mehr Antriebssysteme mit Drehstromasynchronmotoren mit regelbarer Drehzahl, gespeist von einer Spannungsquelle konstanter Frequenz (Einphasenspeisungsnetz), eingesetzt. Solche Systeme können höhere technische Leistungen erbringen und kostengünstiger sein, so dass die herkömmlichen, mit Gleichstrommotoren

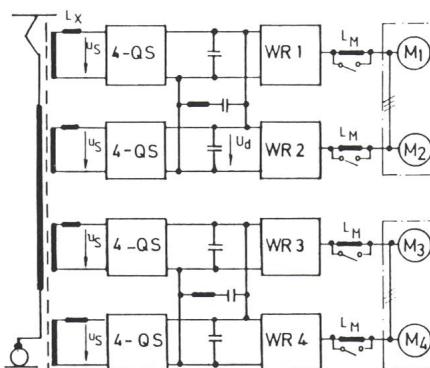


Bild 1 Antriebssystem elektrischer Lokomotiven der Klasse E 120
Prinzipschema des Antriebssystems mit vier Asynchronmotoren
4-QS Vierquadrantensteller
WR1...WR4 Drehstrom-Pulswechselrichter
M1...M4 Antriebsasynchronmotoren

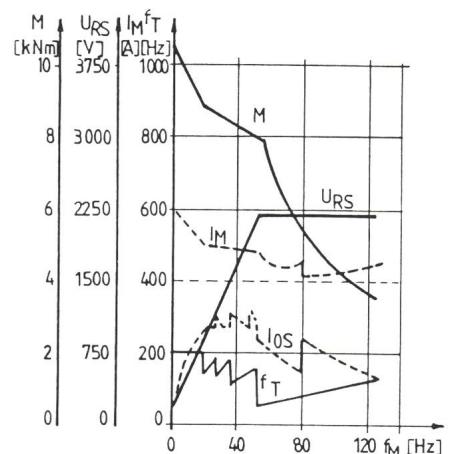


Bild 2 Statische Kenngrößen eines Antriebssystems mit einem 1,4-MW-Motor
M Motordrehmoment
U_RS Motor-Phasenspannung (Effektivwert)
I_M Motor-Phasenstrom (Effektivwert)
I_OS Oberschwingungsströme (Maximalwerte)
f_T Schaltfrequenz der Wechselrichter
f_M Grundfrequenz der Motorspeisung

ren betriebenen Antriebe ersetzt werden können [1...4].

Die statischen Frequenzumrichter der E-Loks wurden bis heute im allgemeinen mit konventionellen Frequenzthyristoren (SCR) gebaut. Die im letzten Jahrzehnt beschleunigte Entwicklung von abschaltbaren Thyristoren (GTO) begünstigte den Einsatz dieser neuen Halbleiterelemente auch in elektrischen Antrieben.

In Bild 1 ist als Beispiel das Prinzipschaltbild des Antriebssystems von elektrischen Lokomotiven der Klasse E 120, die in einigen europäischen Ländern auf elektrifizierten Eisenbahnstrecken mit einer maximalen Geschwindigkeit von 200 km/h verkehren, dargestellt [5, 6, 7]. Von einem Einphasentransformator werden vier Vierquadrantensteller gespeist [6, 8]. Diese Stromrichter wiederum spei-

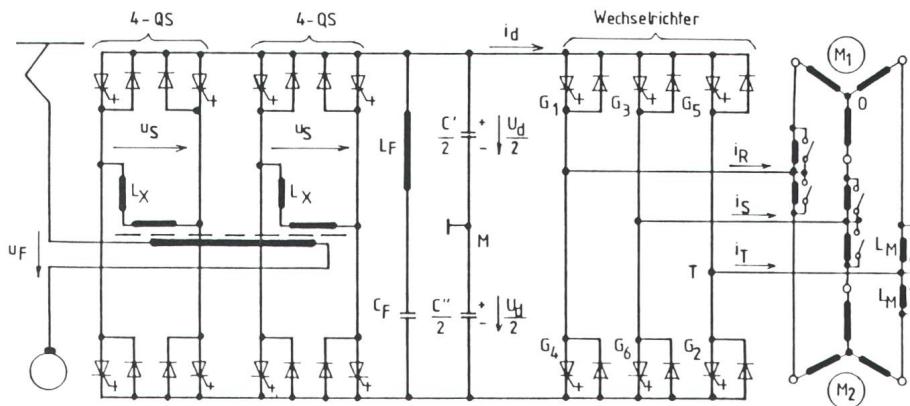


Bild 3 Frequenzumrichter mit GTO-Thyristoren und Wechselrichter mit drei Abzweigungen
Prinzipschaltbild eines statischen Frequenzumrichters für Hochgeschwindigkeitszüge vom Typ ICE

M_1, M_2 zwei der vier Asynchronmotoren einer ICE-Lokomotive
übrige Bezeichnungen: siehe Text

sen oder übernehmen (im Falle der Nutzbremsung elektrischer Lokomotiven) der Reihe nach Energie von vier nach dem PWM-Prinzip funktionierenden Drehstrompulswechselrichtern [9...14]. Die letzteren speisen mit variabler Spannung und Frequenz vier Antriebsasynchronmotoren mit einer Nennleistung von 1.4 MW und einer effektiven Nennspannung von 2200 V zwischen den Phasen. Ein solcher Motor hat ein kleineres Gewicht als ein Gleichstrommotor oder ein Motor mit Kollektor für Einphasenwechselstrom

mit gleicher Leistung. Die Wechselrichter der elektrischen Lokomotiven der Klasse 120 sind mit Frequenzthyristoren ausgestattet, die durch LC-Schaltkreise mit getrennten Kondensatoren gelöscht werden [5].

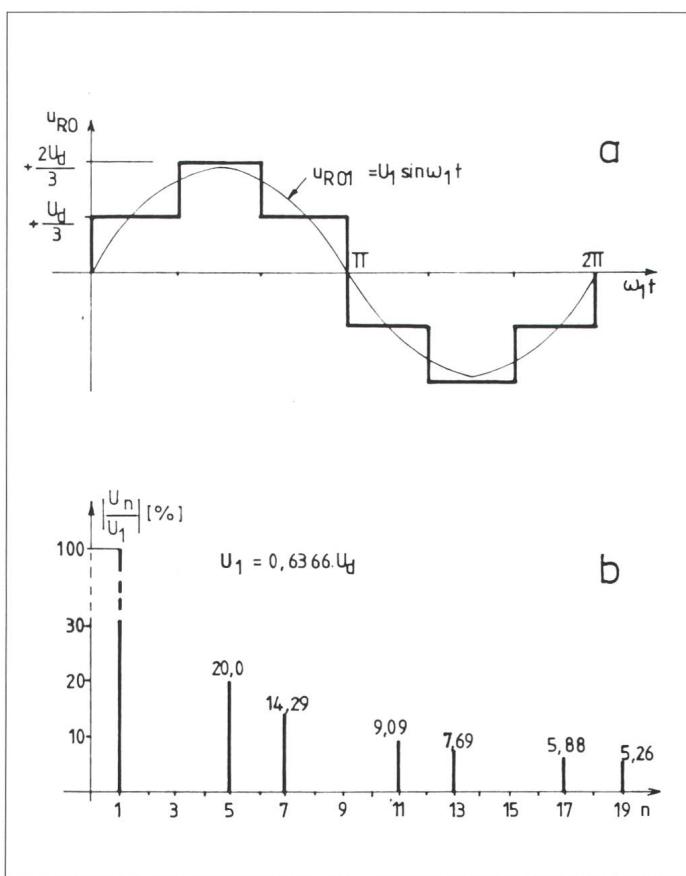
Die statischen Kenngrößen eines Antriebssystems mit einem Motor von 1,4 MW sind in Bild 2 wiedergegeben. Diese Kenngrößen sind: das Drehmoment (M), die effektive Phasenspannung (U_{RS}), der effektive Phasenstrom (I_M), der maximale Wert der Stromharmonischen (I_{OS}) und die

Schaltfrequenz (f_T) in Abhängigkeit von der Grundfrequenz der Motor speisung (f_M) [5]. In diesem Bild stellt man fest, dass eine Änderung der Speisespannung des Motors nur unterhalb seiner Nennfrequenz von 50 Hz erfolgt. Über diesem Frequenzwert bleibt die Spannung U_{RS} konstant, und somit arbeitet der Motor mit verringertem Ständerfluss. Ebenfalls stellt man fest, dass die Schaltfrequenz hier den Wert von 200 Hz nicht überschreitet. Dies ist ausreichend, um die Statorströme klein zu halten. Bei Speisefrequenzen unter 80 Hz wird zudem in Serie zu jeder Phase je eine Induktanz L_M geschaltet. Bei Motorfrequenzen über 80 Hz werden diese Induktanzen durch Kontaktgeber kurzgeschlossen.

In Bild 3 wird das Prinzipschaltbild eines statischen Frequenzumrichters mit GTO-Thyristoren für Hochgeschwindigkeitszüge vom Typ ICE wiedergegeben [15]. Der Umrichter dient zur Speisung von zwei parallel geschalteten Asynchronmotoren mit variabler Spannung und Frequenz. Für die 4 Motoren einer ICE-Lokomotive sind zwei dieser Frequenzumrichter notwendig. Ein solcher statischer Frequenzumrichter wird von einem Einphasentransformator gespeist und besteht aus zwei Vierquadrantenstellern (4-QS), einem Resonanzkreis $L_F C_F$ für die Resonanzfrequenz von $33\frac{1}{3}$ Hz, zwei Filterkondensatoren $C'/2$ und $C''/2$ und einem Pulswechselrichter mit GTO-Thyristoren ($U_{DRM} = 3,8$ kV, $I_{TQRM} = 3$ kA). Der Einphasentransformator arbeitet bei einer Frequenz von $16\frac{2}{3}$ Hz und hat eine Ausgangsspannung von 1450 V (Effektivwert). Der Wechselrichter wird mit einer konstanten Nennspannung von $U_d = 2,8$ kV gespeist und nimmt einen Gleichstrom von $I_d = 1$ kA auf. Für Ausgangsfrequenzen unter 50 Hz arbeitet der Wechselrichter nach dem Prinzip der Pulsbreitenmodulation (PWM), entsprechend Bild 2. Die zwei Vierquadrantensteller von Bild 3 sind parallel auf den Gleichstromteil geschaltet und arbeiten ebenfalls mit $4,5$ kV/3 kA-GTO-Thyristoren. Durch ihre Arbeitsweise nach dem PWM-Prinzip (die Schaltfrequenz ist 11mal grösser als die Netzfrequenz und hat einen Wert von $183\frac{1}{3}$ Hz) ist es möglich, für den Eingangsstrom des Einphasentransformators eine fast sinusförmige Wellenform und für den Leistungsfaktor am Eingang einen Wert praktisch gleich 1 zu erhalten [6, 7, 8].

Bild 4
Phasenausgangsspannungen des Wechselrichters

- a Phasenausgangsspannung u_{RO} der Frequenzumrichter nach Bild 1 und 3
- b Oberschwingungsspektrum der Phasenausgangsspannung u_{RO}
- u_{ROI} Grundschwingung der Phasenausgangsspannung u_{RO}
- U_n Amplitude der Oberschwingung n ter Ordnung
- U_1 Amplitude der Grundschwingung
- U_d Spannung am Gleichstromzwischenkreis (siehe Bild 3)



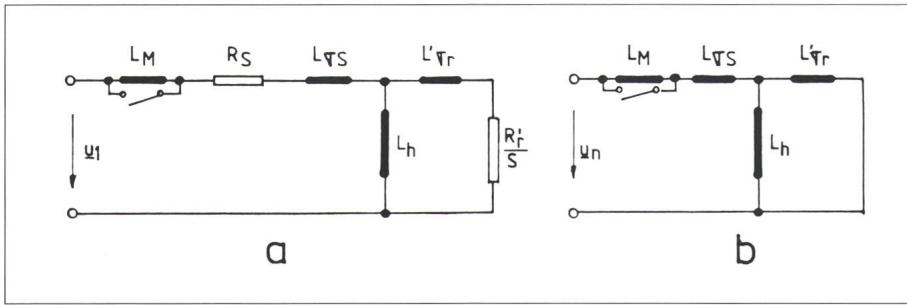


Bild 5 Ersatzschaltbild des Asynchronmotors

a Ersatzschaltbild für die Grundschwingung u_I
b Ersatzschaltbild für die Oberschwingungen $u_n (n > 1)$

Bei den in den Bildern 1 und 3 dargestellten statischen Frequenzumrichtern haben die Phasenausgangsspannungen (z.B. u_{RO}) für Ausgangsgrundfrequenzen grösser als 50 Hz eine Wellenform gemäss Bild 4, a. In Bild 4, b sind die Amplituden U_n der Harmonischen n ter Ordnung dieser Spannung in Prozent der Amplitude U_I der Grundschwingung wiedergegeben, wobei man feststellt, dass die Harmonischen 5ter und 7ter Ordnung bedeutende Werte erreichen. Aus diesem Grunde werden für Ausgangsfrequenzen im Bereich zwischen 50 und 80 Hz auf allen Phasen der Motoren die zusätzlichen Induktanzen beibehalten (in den Bildern 1 und 3 mit L_M bezeichnet), welche die genannten Harmonischen reduzieren sollen.

Die Ersatzschaltbilder der Asynchronmotoren sind in Bild 5, a für die Grundharmonische u_I und in Bild 5, b für die Oberschwingungen u_n der Speisespannung wiedergegeben [16, 17]. Mit Hilfe des letzten Bildes kann man die Harmonischen der Ständer- und Läuferströme berechnen. Sind diese Harmonischen bekannt, so können die zusätzlichen Verluste und die Pendelmomente der Antriebsmotoren bestimmt werden.

In folgenden wird nun eine Ausrüstungsvariante einer elektrischen Lokomotive vorgestellt, deren vier 1,4-MW-Motoren von statischen Frequenzumrichtern gespeist werden, die Wechselrichter mit nur zwei Abzweigungen an Stelle von drei haben. Dadurch erhält man eine Reduktion der installierten Leistung der elektronischen Leistungselemente (konventionelle Thyristoren oder GTO-Thyristoren und Leistungsdioden) im Vergleich zu den in den Bildern 1 und 3 wiedergegebenen Varianten. Die vorgeschlagene Variante kann auch für andere Anwendungen übernommen werden, wovon einige am Ende dieses

Aufsatzes erwähnt werden. Durch diese Methode erhält man für die statischen Frequenzumrichter reduzierte Kosten und Gewichte.

Statischer Frequenzumrichter mit einem Wechselrichter mit zwei Abzweigungen

In Bild 6 ist das Prinzipschaltbild des vorgeschlagenen statischen Frequenzumrichters zur Ausrüstung einer elektrischen Hochgeschwindigkeitslokomotive dargestellt. Am Eingang befinden sich sechs Vierquadrantensteller, die aus GTO-Thyristoren von 2,5 kV und 2 kA bestehen (z.B. rückwärtsleitende GTO-Thyristoren vom Typ CRG2001-25, welche Ströme von 2 kA blockieren). Die Vierquadrantensteller sind sowohl auf der Seite des Speisenetzes als auch auf der Seite

des Gleichstromes parallel geschaltet [18]. Im Gleichstromzwischenkreis befinden sich zwei Schwingkreise $L_F C_F$, in Reihe geschaltet, für die Frequenz von $33\frac{1}{3}$ Hz. Ebenfalls befinden sich im Gleichstromzwischenkreis zwei Kondensatoren C' und C'' , die auf Spannungen von $U_d/2$ aufgeladen werden, wobei U_d die Speisegleichspannung der Wechselrichter ist. Die parallelgeschalteten Asynchronmotoren M_1 und M_2 sind auf dem gleichen Drehgestell der Lokomotive montiert und werden mit variabler Spannung und Frequenz vom Wechselrichter mit zwei Abzweigungen $WR1$ gespeist. Die anderen beiden Motoren M_3 und M_4 befinden sich auf einem zweiten Drehgestell und werden vom Wechselrichter $WR2$ gespeist.

Die Ausgangsfrequenzen der zwei Wechselrichter sind gleich. Die GTO-Thyristoren von 4,5 kV und 3 kA der Wechselrichter werden so gesteuert, dass die Beziehungen

$$u_{RS} + u_{RS}'' = 0 \quad (1)$$

$$u_{ST} + u_{ST}'' = 0 \quad (2)$$

$$u_{TR} + u_{TR}'' = 0 \quad (3)$$

eingehalten werden. Unter der Annahme, dass die Asynchronmotoren identisch sind, folgt aus den Beziehungen (1)...(3)

$$i_R' + i_R'' = 0 \quad (4)$$

$$i_S' + i_S'' = 0 \quad (5)$$

$$i_T' + i_T'' = 0 \quad (6)$$

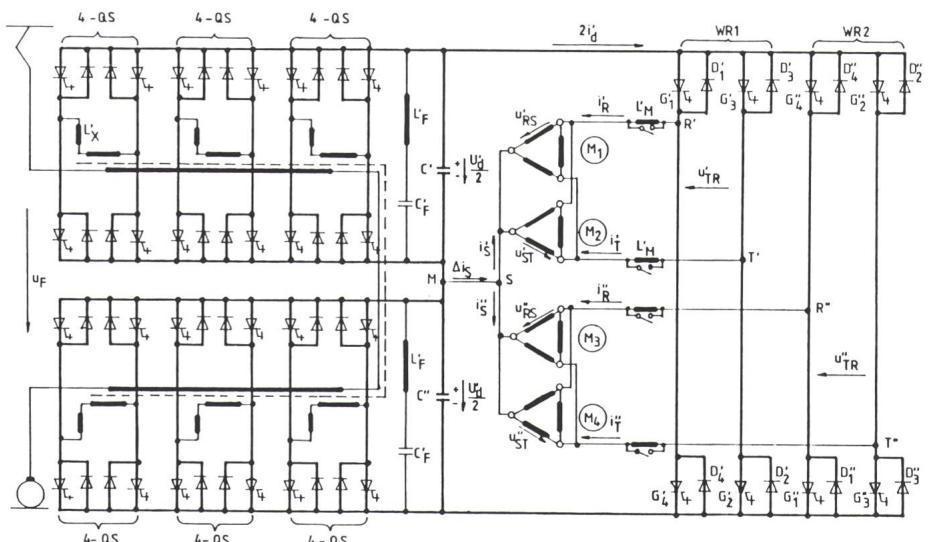


Bild 6 Frequenzumrichter mit zwei Wechselrichtern

Prinzipschaltbild des vorgeschlagenen Frequenzumrichters mit zwei Wechselrichtern mit zwei Abzweigungen

Bezeichnungen: siehe Text

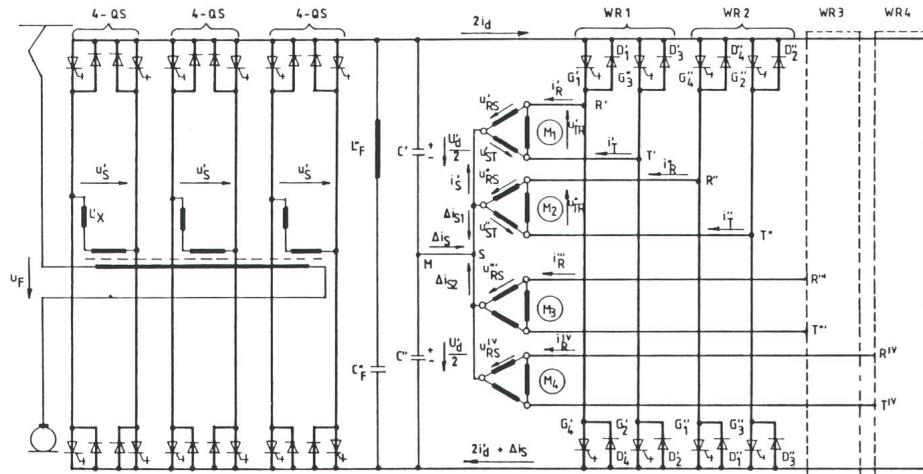


Bild 7 Umrichtersystem mit nur einem Gleichstromzwischenkreis

Variante zum vorgeschlagenen Frequenzumrichter
Bezeichnungen: siehe Text

Aus der Gleichung (5) kann man die Schlussfolgerung ziehen, dass der Strom Δi_S praktisch Null ist. Wenn die Motoren identisch und in gleicher Weise belastet wären, müssten die Thyristoren G'_1 mit G''_1 , G'_2 mit G''_2 , G'_3 mit G''_3 und G'_4 mit G''_4 simultan gesteuert werden.

Im Falle von reellen Motoren mit fast gleicher Belastung übersteigt der Strom Δi_S 10% der Werte i'_S und i''_S nicht, und kann teilweise durch die Kondensatoren C' und C'' und der Rest durch die an den Punkt M der sechs 4-QS geschalteten Gleichstromschranken abgeleitet werden.

Mit Hilfe der Steuer- und Regelschaltungen der zwei auf den beiden Drehgestellen montierten Antriebssysteme kann man zum Ausgleich der Motordrehmomente der vier Motoren die angelegten Spannungen in engen Grenzen entsprechend den folgenden Beziehungen einstellen:

$$u'_RS + u''_RS = \pm \Delta u \quad (7)$$

$$u'_ST + u''_ST = \pm \Delta u \quad (8)$$

$$u'_TR + u''_TR = \pm \Delta u \quad (9)$$

Nach dem oben beschriebenen Prinzip kann ein statischer Frequenzumrichter auch nach Bild 7 konzipiert werden, bei dem jeder Motor von einem Wechselrichter mit zwei Abzweigungen gespeist wird, ausgerüstet jedoch mit GTO-Thyristoren von 4,5 kV und 2 kA. Natürlich müssen auch in diesem Falle die Bedingungen (1)...(3) für die Wechselrichter WR1 und WR2 eingehalten werden, und zwar so, dass der Strom Δi_{S1} praktisch

dieser Zone), der Strom Δi_S praktisch Null ist. Die Speisung der vier Wechselrichter kann, wie in Bild 6, von sechs Vierquadrantenstellern ausgeführt werden [18]. Zur Vereinfachung wurden in Bild 7 die zusätzlichen, mit den Phasen von den Ausgängen der vier Wechselrichter mit zwei Abzweigungen in Reihe geschalteten Induktanzen nicht eingezeichnet. Diese Induktanzen können Stahlkerne haben, die bei grösseren Ausgangsfrequenzen der Wechselrichter, zum Beispiel bei 80 Hz, sättigen [5, 15, 16].

Im folgenden wird die Bildung der Ausgangsspannungen der in den Bildern 6 und 7 wiedergegebenen statischen Frequenzumrichter beschrieben. Bei Ausgangsgrundfrequenzen f_1 des Wechselrichters zwischen 50 und 120 Hz bleiben die Ausgangsspannungen konstant (siehe Bild 8). In den Bildern 9, a und b, sind die Wellenformen der Spannungen u'_RS und u''_ST dargestellt, deren Grundschwingungen u'_{RS1} und u''_{ST1} die Amplitude $U'_{1m} \approx 0,57 \cdot U'_d$ haben. Unter diesen Bedingungen halten sich die Winkel γ_1 und γ_2 auf konstanten Werten: $\gamma_1 = 12^\circ$ und $\gamma_2 = 10^\circ$. Bei den Antriebsmotoren mit einer Leistung von 1,4 MW und einer effektiven Phasenspannung von 1270 V [5] folgt, dass die Gleichspannung U'_d den Wert von 3140 V haben muss. Dieser letzte Wert kann durch GTO-Thyristoren von 4,5 kV eingestellt werden. Die Spannung u'_TR ist in Bild 9, c wiedergegeben und folgt aus der Bedingung

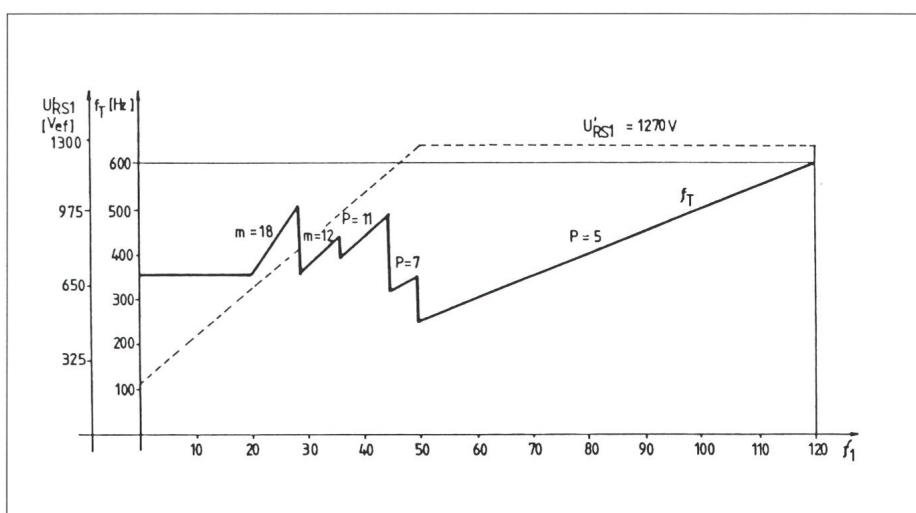


Bild 8 Betriebsparameter des Frequenzumrichters

U'_{RS1} Phasenspannung (Effektivwert der Grundschwingung)

f_T Wechselrichter-Schaltfrequenz

f_1 Grundfrequenz der Ausgangsspannung

P Pulszahl pro Periode der Grundfrequenz

m Verhältnis zwischen der Schaltfrequenz f_T und der Grundfrequenz f_1

$$u'_{RS} + u'_{ST} + u'_{TR} = 0 \quad (10)$$

Das Steuerprogramm der GTO-Thyristoren eines Wechselrichters mit zwei Abzweigungen, zum Beispiel *WR1*, ist ebenfalls in Bild 9, *a* und *b*, wiedergegeben. Hier ist eine Pulszahl für die GTO-Thyristoren von 5 vorgeschlagen, wenn f_1 zwischen 50 und 120 Hz variiert, und damit beträgt die maximale Frequenz dieser Thyristoren 600 Hz. Falls $f_1 = 120$ Hz beträgt, dann entspricht dem Winkel γ_2 eine minimale Zeitdauer von $231 \mu\text{s}$; dieser Wert ist akzeptabel für die heutigen und besonders für die zukünftigen GTO-Thyristoren [18]. Das Oberschwingungsspektrum der Ausgangsspannung, zum Beispiel von u'_{RS} , ist für dieses Steuerprogramm in Bild 9, *d* wiedergegeben.

Unterhalb der Nennfrequenz $f_{IN} = 50$ Hz der Antriebsmotoren muss gleichzeitig mit der Frequenz f_1 auch die Ausgangsspannung verändert werden (z.B. U'_{RS} gemäß Bild 8). Versteht man unter m das Verhältnis zwischen der Schaltfrequenz f_T des Trägersignals und der Grundfrequenz f_1 der Bezugsspannung u'_{RSb} (z.B. $m = 12$, gemäß Bild 10, *a* und *c*) im Falle des PWM-Prinzips, so werden folgende Programme in Funktion der Frequenz f_1 vorgeschlagen:

- $P = 7$ für Frequenzen f_1 ungefähr zwischen 45 und 50 Hz,
- $P = 11$ für Frequenzen f_1 ungefähr zwischen 35 und 45 Hz,
- $m = 12$ für Frequenzen f_1 ungefähr zwischen 28 und 35 Hz, gemäß Bild 10
- $m = 18$ für Frequenzen f_1 ungefähr zwischen 20 und 28 Hz
- konstante Schaltfrequenz von 350 Hz für f_1 zwischen 0 und 20 Hz. Auch in diesem letzten Fall wird das PWM-Prinzip zur Veränderung der Wechselrichterausgangsspannungen angewandt.

Der Gebrauch eines einzigen Gleichstromzwischenkreises anstatt derer zwei für eine Lokomotive (entsprechend Bild 1 und 3) kann eventuell als nachteilig empfunden werden, da im Falle eines Defektes an einem Vierquadrantensteller oder an einem Wechselrichter mit zwei Abzweigungen weniger Redundanzen vorhanden sind. Allerdings haben aber fast alle elektrischen Diesellokomotiven mit Gleichstrom- oder Wechselstrommotoren auch nur einen einzigen Synchronmotor oder Gleichstromge-

nerator, der die Antriebsmotoren durch einen Gleichstromkreis speist. (Im Falle von Wechselstrommotoren werden diese an Wechselrichter, die mit einzelnen Gleichstromschranken verbunden sind, angeschlossen.) Im allgemeinen haben auch alle elektrischen Lokomotiven mit Gleichstrom-

antriebsmotoren nur einen einzigen Gleichstromkreis zur Speisung der Motoren.

Schliesslich ist zu bemerken, dass die Wechselrichter mit zwei Abzweigungen gemäß Bild 6 und 7 natürlich auch in elektrischen Diesellokomotiven sowie in anderen elektrischen An-

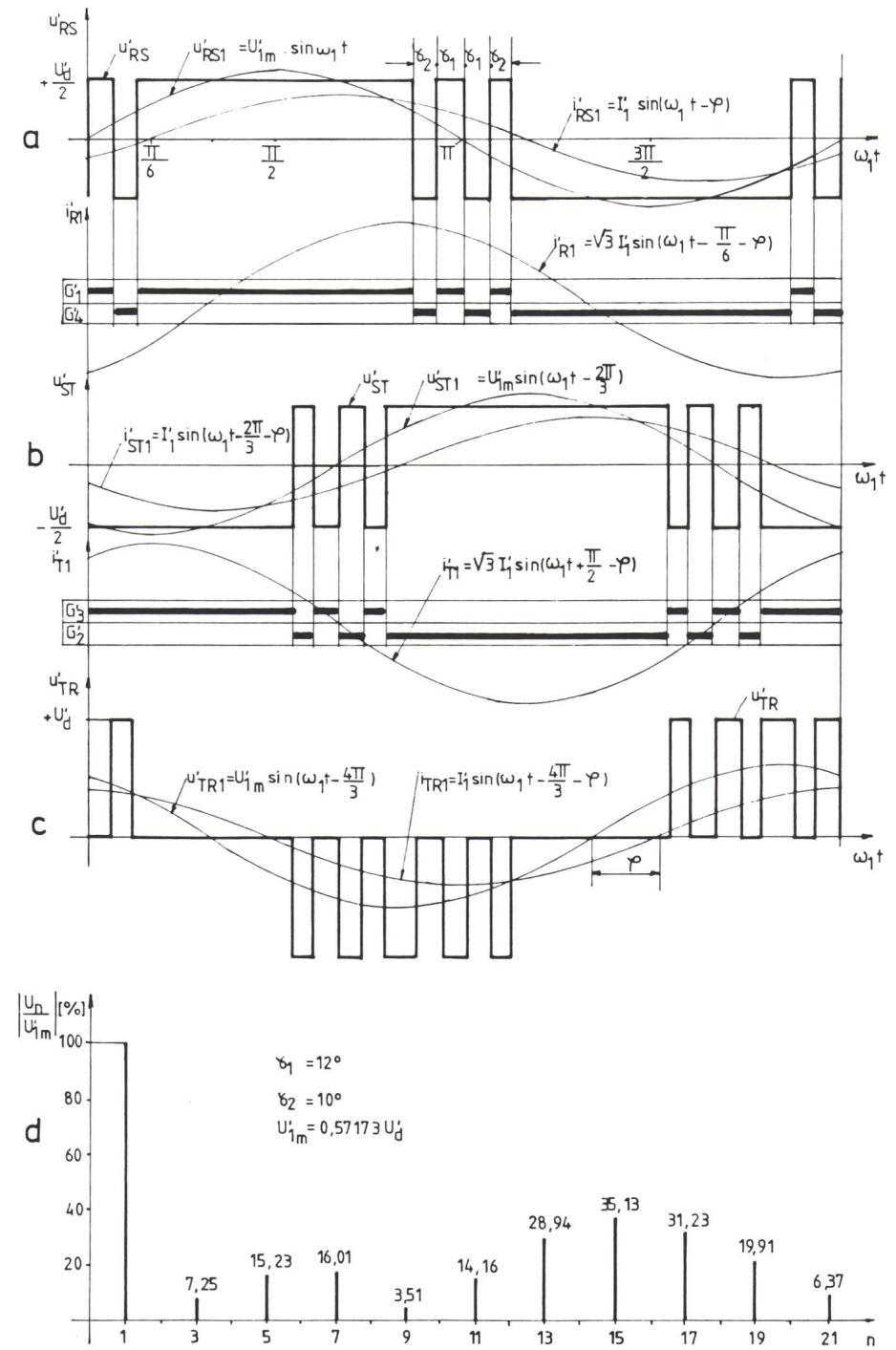


Bild 9 Pulsbreitenmodulationsverfahren für $P = 5$

a, b, c Ausgangsspannungen u'_{RS} , u'_{ST} und u'_{TR}

d Oberschwingungsspektrum der Ausgangsspannung u'_{RS}

U_n Amplitude der Oberschwingung n -ter Ordnung, enthalten in der Ausgangsspannung u'_{RS}

U'_{1m} Amplitude der Ausgangsspannungs-Grundschwingung u'_{RS}

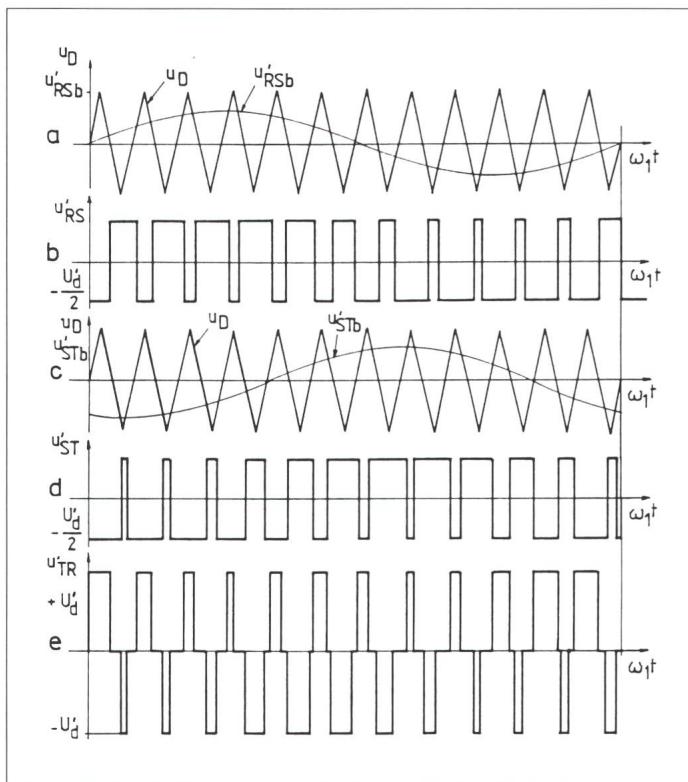


Bild 10
Pulsbreitenmodulationsverfahren für
 $m = 12$

a,c Bezugsspannungen u'_{RSb} und u'_{STb} sowie Trägersignal u_D
b,d,e Ausgangsspannungen u_{RS} , u_{ST} , u_{TR}

Literatur

- [1] H.P. Eggenberger: Renaissance der Eisenbahn. Bulletin SEV, 77(1986)5 S. 229...230.
- [2] Th. Rahn: Hochgeschwindigkeitszug der Deutschen Bundesbahn. Bulletin SEV, 77(1986)5, S. 231...234.
- [3] K. Milz: Beiträge für die elektrische Ausrüstung des Hochgeschwindigkeitszuges ICE. Bulletin SEV, 77(1986)5, S. 235...237.
- [4] W. Lienau, A. Müller-Hellmann and H.C. Skudelny: Power Converters for feeding Asynchronous Traction Motors of Single Phase AC Vehicles. IEEE Transactions on Industry Applications, January, February 1980.
- [5] P. Appun and W. Runge: Three-phase A.C. Traction Drives. International Conference on Electrical Machines, München, 1986, Survey Lectures, p. 10...20.
- [6] M. Depenbrock: Einphasen-Stromrichter mit sinusförmigem Netzstrom und gut geglätteten Gleichgrößen. ETZ-A, Elektrotech. Z. 94(1973)8, S. 466...471.
- [7] A. Steimel: Netzbelastung durch Wechselstrom-Triebfahrzeuge mit leistungselektronischer Steuerung usw. etz Archiv, 12(1990)3, S. 69...79.
- [8] P. Appun und W. Lienau: Der Vierquadrantensteller bei induktivem und kapazitivem Betrieb. etz Archiv, 6(1984)1, S. 3...8.
- [9] A. Schöning and H. Stemmler: Geregelter Drehstrom-Umkehrantrieb mit gesteuertem Umrichter nach dem Unterschwingungsverfahren. BBC-Nachrichten 46(1964)12, S. 699...721.
- [10] M. Boost and P.D. Ziogas: State of the art PWM techniques: a critical evaluation. PESC '86 Record, p. 425...433.
- [11] D. Alexa, L. Turic and D. Stiurcă: Umrichtersystem mit höherem Grundschwingungsgehalt für die Drehstromtraktion. Bulletin SEV, 76(1985)9, S. 490...492.
- [12] D. Alexa: Vergleich zwischen Pulsbreiten- und Pulsamplituden-Modulation zur Speisung von Drehstrom-Asynchronmotoren. Bulletin SEV, 77(1986)5, S. 238...242.
- [13] D. Alexa: Static frequency converter with PAM inverter having one LC-commutation circuit only. etz Archiv, 9(1987)3, p. 81...85.
- [14] D. Alexa: Analysis of the commutation processes for PAM inverter having one LC-commutation circuit only. Archiv für Elektrotechnik, 72(1989)3, p. 172...182.
- [15] R. Marquardt: High power GTO converters for the new german high speed train ICE. EPE Aachen 1989, p. 583...587.
- [16] E.Ch. Andresen, K. Biehni and R. Pfeiffer: Pendelmomente und Wellenbeanspruchungen von Drehstrom-Käfigläufermotoren bei Frequenzumrichterspeisung. etz Archiv, 4(1982)1, S. 25...33.
- [17] H. van der Broeck and H.C. Skudelny: Analytical Calculation of the Harmonic Effects of a Three Phase Induction Machine Fed by a Two Phase Voltage Fed Inverter Using Pulse Width Modulation with a High Switching Frequency. 17th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC'86, p. 476...485.
- [18] Achim Scharf: GTO Technologies and Applications. PCIM Europe, March/April 1991, p. 88...93.

triebssystemen mit mehreren drehzahlvariablen Asynchronmotoren eingesetzt werden können, zum Beispiel bei Bohrausrüstungen zur Erdölförderung, bei Kränen grosser Leistung usw.

Schlussfolgerungen

In bezug auf die in den Bildern 6 und 7 vorgeschlagenen Lösungen kann man folgende Schlussfolgerungen ziehen:

1) Durch die Annahme von Schaltfrequenzen grösser als 200 Hz für die GTO-Thyristoren (was bei der gegenwärtigen Entwicklung der Halbleiterbauelemente durchaus realistisch ist) lassen sich die Stromoberschwingungen der Speiseströme der Antriebsmotoren wesentlich verringern.

2) Die installierte Leistung der Leistungshalbleiter-Bauelemente (GTO-Thyristoren und Dioden) zur Ausrüstung einer elektrischen Lokomotive lässt sich im Vergleich zu anderen bekannten Lösungen reduzieren. Vergleicht man die Varianten aus Bild 3 und 7, so stellt man fest, dass für die Variante nach Bild 7 GTO-Thyristoren mit $I_{TQRM} = 2$ kA genügen, während bei der Variante nach Bild 3 Thyristoren mit $I_{TQRM} = 3$ kA für die Wechselrichter notwendig sind, dies bei gleicher Anzahl von GTO-Thyristoren, da im Falle der Variante nach Bild 3 eine elektrische Lokomotive zwei der dargestellten Antriebssysteme braucht.