

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:	70 (1979)
Heft:	13
Artikel:	Steuerungsgesetze für Pulswechselrichter mit grossem Ausgangsfrequenzbereich und geringem Oberschwingungsgehalt
Autor:	Zach, F. / Sabrodin, J. S.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-905393

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: 17.01.2026

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

Steuerungsgesetze für Pulswechselrichter mit grossem Ausgangsfrequenzbereich und geringem Oberschwingungsgehalt

Von F. Zach und J.S. Sabrodin

621.314.57;

Für moderne Antriebe (Wechselstrommotoren mit Pulswechselrichtern) ist es notwendig, Frequenz und Amplitude der Grundharmonischen der Pulswechselrichterausgangsspannung in weiten Bereichen zu variieren. Darauf hinaus ist es wünschenswert, den Gehalt an Oberschwingungen vor allem bei niedriger Ausgangsfrequenz gering zu halten. Diese Forderungen werden mit dem hier entwickelten System erfüllt. Hierbei wird der Frequenzbereich vorzugsweise in zwei Teilbereiche zerlegt; die Steuerungsgesetze für jeden Teilbereich werden angegeben sowie die hiezu notwendige Schaltung, die auch das Umsteuern zwischen den Teilbereichen ermöglicht.

Pour des entraînements modernes (moteurs à courant alternatif avec onduleurs à pulsations) il est nécessaire de pouvoir modifier dans une large gamme la fréquence et l'amplitude de la tension de sortie de l'onduleur. En outre, il convient de maintenir aussi faible que possible la teneur en harmoniques, surtout dans le cas d'une fréquence de sortie peu élevée. Ces exigences sont satisfaites par le système décrit. La gamme des fréquences est de préférence partagée en deux gammes, pour chacune desquelles les lois de commande sont indiquées, ainsi que les circuits nécessaires qui permettent également des commutations entre elles.

1. Einleitung

Bei selbstgeführten Wechselrichtern, die aus einer nicht steuerbaren Gleichspannungsquelle gespeist werden (bzw. Zwischenkreiswechselrichter mit nicht steuerbarer Zwischenkreisspannung), erweist sich die Impulsbreitensteuerung als dominierende Methode zur Erzeugung von Ausgangsspannungen einstellbarer Frequenz und Amplitude. Die dann meist als Pulswechselrichter bezeichneten Systeme [1] gewinnen immer mehr Bedeutung in Anwendungen, z.B. bei Antrieben der Industrie und Traktion [2; 3]. Da die Ausgangsspannung durch Schaltvorgänge im Wechselrichter selbst gesteuert wird und keine Eingriffe z.B. bei der speisenden Gleichspannung notwendig sind, können sich hiervon oft Vorteile infolge relativ einfacher Gesamt-Systemsteuerung ergeben.

Eine zusätzliche Forderung, nämlich nach geringem Oberschwingungsgehalt der Ausgangsspannung, kann für niedere Frequenz durch Anwendung spezieller Steuerungsgesetze erfüllt werden [1]. Hier soll aus Gründen der leichten Realisierbarkeit ein Steuerungsgesetz zugrunde gelegt werden, das nach Fig. 3 [4] für die Praxis in vielen Fällen hinreichend geringen Oberschwingungsgehalt ergibt. Bei höheren Frequenzen muss die Pulzahl pro Periode wegen der zunehmenden Schaltverluste bzw. der beschränkten Schaltgeschwindigkeiten reduziert

werden, weshalb verschiedene Arbeitsbereiche der Steuerung benötigt werden. Diese Problematik wird hier diskutiert, wobei geschlossen werden kann, dass – ebenfalls zusammenhängend mit leichter Realisierbarkeit – in der Praxis in vielen Fällen Systeme mit nur zwei Arbeitsbereichen verwendet werden sollten. Da wegen des induktiven Lastcharakters bei Antrieben die Oberschwingungen der Ausgangsspannung bei höheren Ausgangsfrequenzen geringere Auswirkungen zeigen, kann die Forderung nach geringerer Pulzahl und somit verminderter Oberschwingungsreduktion dort leichter erfüllt werden bzw. kann dann die Pulsung ganz entfallen.

2. Steuerungsgesetze für die Bildung der Ausgangsspannung

Fig. 1 zeigt die Prinzipschaltung eines dreiphasigen selbstgeführten Wechselrichters und Fig. 2 mögliche Formen der verketteten Ausgangsspannung, die auf Grund der verschiedenen eingetragenen Leitdauern der einzelnen Hauptthyristoren entstehen. Fig. 2a zeigt die Grundform der Ausgangsspannung für jeweils 180° leitende Thyristoren [1], wobei sich 120° lange Ausgangsspannungsblöcke ergeben und deren zwei (deshalb $k = 2$) pro Periode auftreten. Fig. 2b...2d zeigen Impulsbreitensteuerungen: Hier ist das Leitdauermuster der einzelnen Thyristoren zwar auch phasenverschoben gleich, aber es tritt eine verschiedene Anzahl von Blöcken pro Periode auf. Die Steuerung der Ausgangsspannungsgrundharmonischen erfolgt durch gleichzeitige Veränderung der Breite α aller Impulse. Nach [4] sind folgende Werte von k sinnvoll möglich: $k = 4, 8, 12, 16, 20, \dots$, wobei die ersten drei Fälle in Fig. 2 berücksichtigt wurden.

Wesentliche Kriterien für die Auswahl von k und darüber hinaus im allgemeinen für die Wahl der Steuerungsgesetze sind – wie bereits kurz angedeutet – einerseits die (höchste) Schaltfrequenz f_s der Thyristoren (bzw. Umladefrequenz der Löschkreise) und anderseits der Oberschwingungsgehalt der Ausgangsspannung u_a . Für Fig. 2a gilt

$$f_u = 2 f_a \quad (1)$$

und für $k > 2$ allgemein

$$f_u = (k - 2) f_a \quad (2)$$

wobei f_a die Frequenz der Wechselrichter-Ausgangsspannung ist. f_u ist deshalb besonders wichtig, weil damit die Thyristor-Umschaltverluste und die Verluste der Kondensatorumladun-

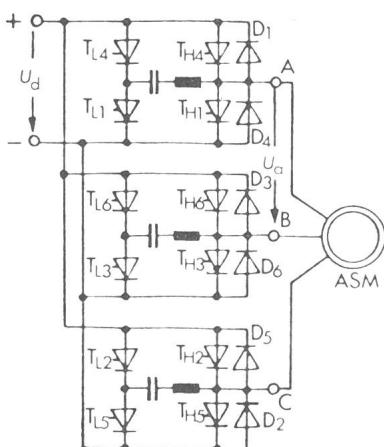


Fig. 1 Dreiphasiger selbstgeführter Wechselrichter (Pulswechselrichter)

Hier z.B. für drehzahlvariablen Antrieb des Asynchronmotors ASM

T_L: (1...6) Hauptthyristoren

T_H: Löschthyristoren

D_i: Freilauf- bzw. Rückarbeitsdioden

U_d: Speisegleichspannung

u_a: Ausgangsspannung mit Amplitude der Grundharmonischen u_{1a}

Maximale Wechselrichter-Ausgangsfrequenzen f_a [Hz] bei verschiedenen k und f_{uM}

Tabelle I

k	2	4	8	12	16
f_{uM}	$2 f_a$	$6 f_a$	$10 f_a$	$14 f_a$	$18 f_a$
f_a $f_{uM} = 300$	150	50	30	21,4	16,7
f_a $f_{uM} = 500$	250	83,5	50	35,7	27,8
f_a $f_{uM} = 600$	300	100	60	42,8	32,4
f_a $f_{uM} = 1000$	500	167	100	71,5	55,5

gen zusammenhängen. Man kann damit auch die Maximalfrequenz f_{uM} so definieren, dass bei ihr die maximal zulässigen Verluste auftreten (Tabelle I).

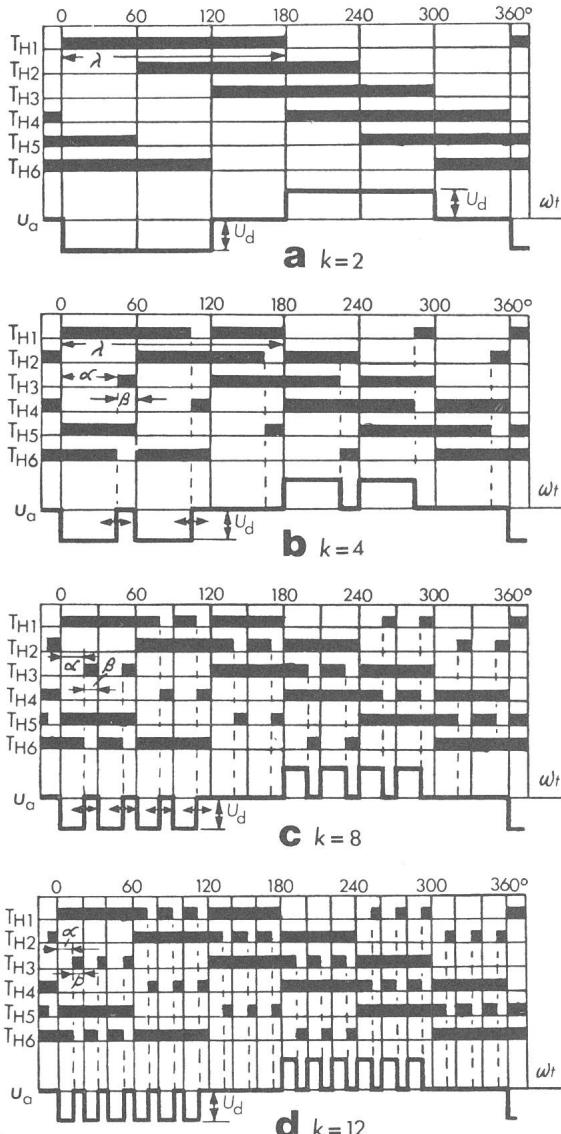


Fig. 2 Ausgangsspannung u_a gebildet durch Schalten der Thyristoren T_{H1} gemäss der (schwarz gezeichneten) Blöcke für verschiedene Impulszahlen k in u_a pro Periode

Gleichzeitige Zündung von jeweils drei Thyristoren T_{H1} für u_a unabhängig vom induktiven Lastanteil.

α Impulsbreitenwinkel

β Pausenwinkel

λ Thyristorleitbereitschaft bei ungepulstem Betrieb

Das zweite Auswahlkriterium für k , nämlich der Oberschwingungsgehalt in u_a , lässt sich wie folgt angeben: Die Oberschwingungsamplituden a_v in u_a betragen

$$a_v = \frac{4 U_d}{\pi v} \sin \frac{v\alpha}{2} \frac{\sin v\pi/3}{\sin 2\pi v/3 k} \quad (3)$$

wobei v die Ordnungszahl der Harmonischen ist, bezogen auf die jeweilige Frequenz der Grundharmonischen in u_a , und α den Impulslängenwinkel bedeutet. Fig. 3 zeigt die graphische Darstellung von Gl. (3). Zwar wird bei $k = 4$ relativ hohes f_a erreicht, aber der Oberschwingungsgehalt ist hoch. Für niederes f_a ist $k = 4$ daher kaum in Betracht zu ziehen, ferner ist kleines α (bis etwa 20° ... 30°) besonders unvorteilhaft. Bei $k = 8$ ergibt sich zwar ein besseres Gesamt-Oberschwingungsverhalten als bei $k = 4$, aber es tritt eine starke 11. Harmonische auf. Die Verhältnisse für $k = 12$ und $k = 16$ sind bezüglich Oberschwingungen nahezu gleichwertig, so dass bei

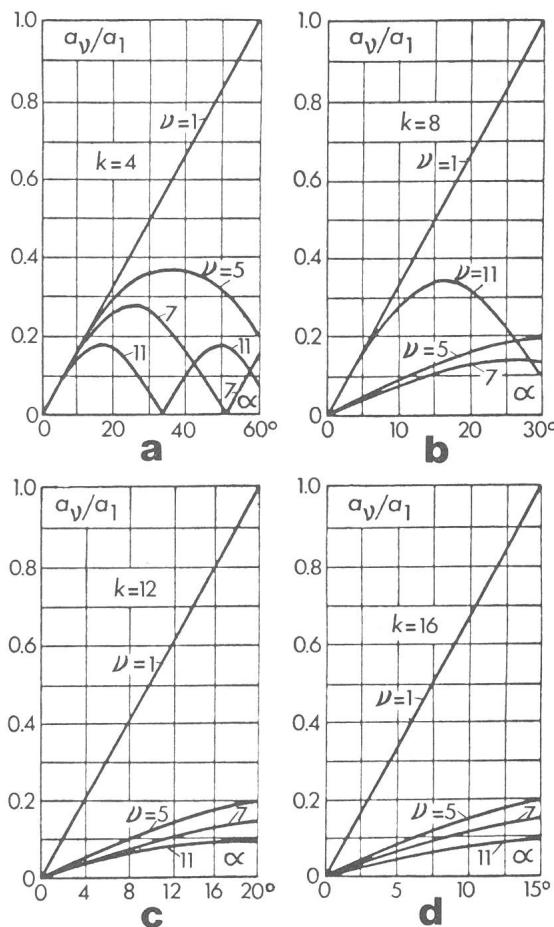


Fig. 3 Amplituden a_v der Ausgangsspannungsharmonischen, bezogen auf Amplitude der Grundharmonischen $a_1 = u_{a1}$ in Abhängigkeit des Impulsbreitenwinkels α

einer Auswahl zwischen diesen beiden Varianten wohl immer $k = 12$ wegen des kleineren f_a gewählt werden wird.

Betrachtet man nun Anwendungen mit grossem Bereich der Ausgangsfrequenz f_a (z. B. $0 \leq f_a \leq 150 \dots 300$ Hz, wie oft für Asynchronmotoren gefordert), so liegt es nahe, für kleines f_a k relativ gross zu wählen, um speziell hier kleine Harmonische der Ausgangsspannung zu erhalten. Man wird deshalb den ganzen Steuerbereich von f_a z. B. in Abschnitte mit $k = 2, 4$ und 12 unterteilen, da $k = 8$ und $k = 16$ zwei zusätzliche Be-

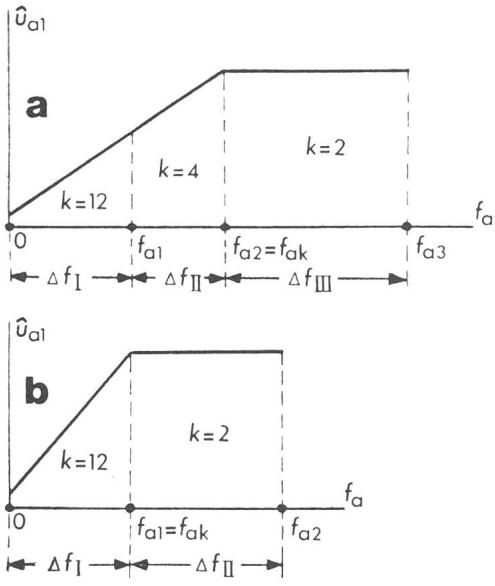


Fig. 4 Steuerkennlinien der Spannung \hat{u}_{a1} in Abhängigkeit von der Ausgangsfrequenz f_a , üblich für drehzahlvariablen Asynchronmotorantrieb

$f_{aM} = f_{a3}$ bzw. f_{a2}
Für b gilt für $0 \leq f_a \leq f_{a1}$: $\alpha = \alpha_0 + (20^\circ - \alpha_0) f_a / \Delta f_I$

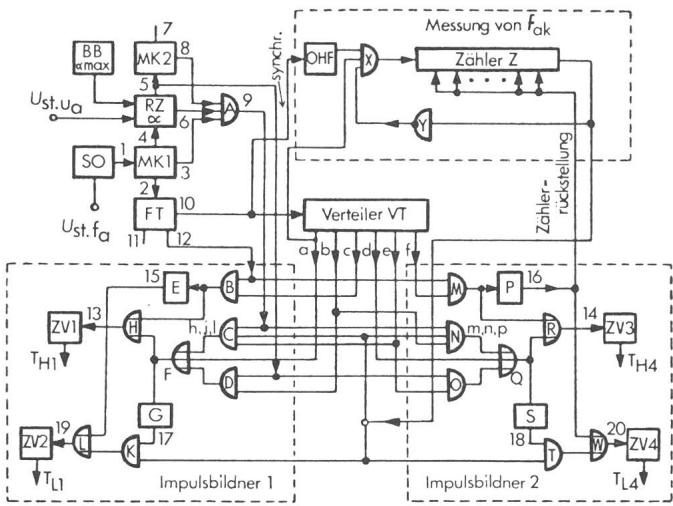


Fig. 5 Steuerungssystem für den Pulswechselrichter

- SO steuerbarer Oszillator mit Frequenzbereich $18 \cdot (\Delta f_I + \Delta f_{II})$
- MK1, MK2 monostabile Kippstufen zur Erzeugung der Pausenzeiten t_k , entsprechend den Umschwingzeiten der Löschkreise (typisch 40...50 μ s)
- RZ steuerbares Zeitglied zur Erzeugung der Impulsdauer t_α bzw. des Impulsbreitenwinkels α
- BB Begrenzer für α auf α_{max} (bzw. für t_α auf $t_{\alpha max}$)
- FT Frequenzteiler (auf $1/3$)
- VT Impulsverteiler, Schieberegister
- A Erzeugung der Impulspausen (exakt: verkürzt um die zweifache Umschwingzeit t_k , somit $t_\beta = 2 t_k$)
- B ... H, K, L ... Bildung der Impulse für die Thyristoren T_{H1} und T_{L1} (Impulsbildner 1)
- M ... T, W ... Bildung der Impulse für T_{H4} und T_{L4} (Impulsbildner 2)
- OHF Oszillator mit hoher Frequenz
- X, Y logische Elemente zur Messung von f_{a1}
- Z Impulszähler
- ZV1 ... ZV4 Impulsverstärker

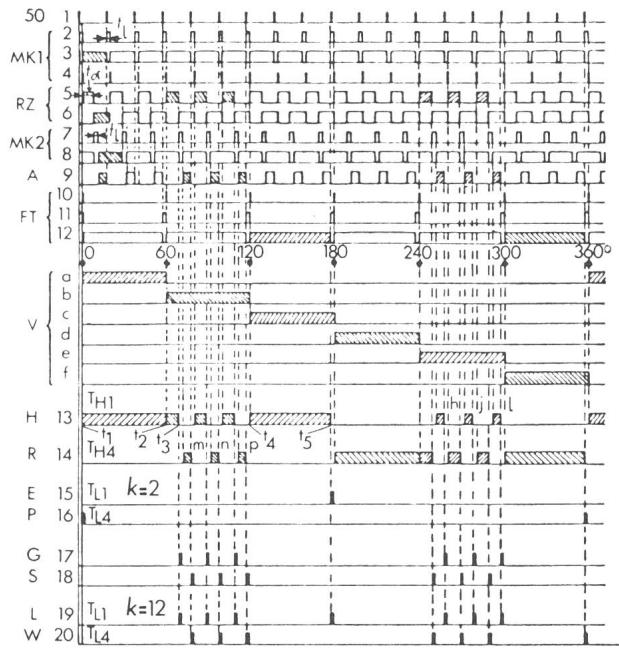


Fig. 6 Impulsmuster zur Schaltung Fig. 5

reiche mit Umsteuerlogik erforderten, aber keine grundlegend bessere Arbeitsweise brächten. Da Asynchronmotoren vorzugsweise mit konstantem Moment betrieben werden, ergibt sich die Notwendigkeit eines in erster Näherung linearen Ansteigens der Amplitude \hat{u}_{a1} der Ausgangsspannungsgrundschwingung mit der Frequenz (Fig. 4). Um hier aber die Forderung an die Höhe von \hat{u}_{a1} nicht zu weit zu treiben und auch in den unteren Frequenzbereichen nicht zu kleines Moment zu haben, lässt man \hat{u}_{a1} mit f_a zunächst stärker ansteigen, muss dann aber begrenzen. Der hiedurch entstehende Knickpunkt liegt z.B. bei $f_{ak} = 0,4 f_{aM}$. In Fig. 4 sind zwei Beispiele von Bereichseinteilungen angegeben, wobei Fig. 4a für grossen, Fig. 4b für kleineren Gesamtbereich von f_a gelte. Letzterer Fall ($k = 2$ und 12) ist relativ günstig bezüglich praktischer Realisierung und soll auch hier weiter verfolgt werden.

3. Steuerungssystem für den Pulswechselrichter

Fig. 5 zeigt ein neu entwickeltes Steuerungssystem für die im vorigen Abschnitt angegebenen Bedingungen, wobei nur das Wirksschema für eine Phase, somit z.B. für den Polwechsler A (Fig. 1), gezeichnet ist. Fig. 6 zeigt die zur Erklärung der Wirkungsweise notwendigen Impulsmuster.

In Fig. 5 sieht man zunächst den gleichwertigen Aufbau der Impulsbildner 1 und 2, wobei die Impulseingänge a bis f so wirken, dass zwischen den beiden Systemen eine Phasenverschiebung von 180° besteht. Zur prinzipiellen Struktur der Impulse ist zu sagen, dass für $k = 2$ Löschimpulse (Zündimpulse auf die Löschthyristoren) der Form 15 und 16 (Fig. 6) zur Erzeugung von Fig. 2a notwendig sind, für $k = 12$ Form 19 und 20 korrespondierend zu Fig. 2d. Die Impulse 19 und 20 kann man durch Addition von 17 und 18 zu 15 und 16 gewinnen. Dies deutet auch auf die Möglichkeit hin, stets 19 und 20 vorzusehen, aber bei $k = 2$ die Impulse nach 17 und 18 zu unterdrücken. Analoges gilt für die Zündimpulse der Haupt-

thyristoren T_{H1} . Hier gelten Impulsmuster 13 und 14, wobei die Impulse h, j, l und m, n, p (Fig. 6) für $k = 2$ unterdrückt werden müssen. Dies und die Unterdrückung der Löschimpulse 17 und 18 erfolgt durch Auswertung des Zählerausganges: Der Zähler Z erhält die Impulse des Oszillators OHF, die zwecks höherer Genauigkeit mit der Periode T_a von u_a synchronisiert werden; die Zähldauer beträgt $T_a/6$, was durch Glied X mit Eingang a erreicht wird. Ist f_a klein, also $T_a/6$ gross, erreicht der Zähler (bei entsprechender Auslegung) innerhalb $T_a/6$ an seiner höchsten Binärstelle zh den Zustand 1, so dass anschliessend mit den Elementen Y und X ein Weiterzählen verhindert wird und die genannten Impulse durchgelassen werden. Für $f_a > f_{ak}$ reicht $T_a/6$ nicht aus, um bis $zh = 1$ fortzuschreiten. Offenbar muss gelten

$$f_{ak} = f_{OHF}/6M \quad (4)$$

wobei f_{OHF} die Frequenz des Impulsgenerators am Zählereingang ist und $M = 2^{r-1}$ mit r der Stellenzahl des Zählers (d.h. M = Anzahl der gezählten Impulse bei Erreichen des Zustandes $zh = 1$).

Die eigentliche Abblockung der nicht zugelassenen Zünd- und Löschimpulse erfolgt an den Elementen C, N und K, T. Man kann sich somit bei den weiteren Überlegungen auf die Erzeugung der Impulse für $k = 12$ beschränken: Von SO werden Impulse mit 18facher Ausgangsfrequenz (f_a) geliefert, die in MK1 entsprechend geformt werden und nur von f_a abhängig sind. Hierbei entspricht die Impulslänge t_k von 2 der zu erwartenden längsten Umschwingzeit der Löschkreise. Die Ausgänge von RZ sind auch von u_a abhängig: Man erkennt α in 5, wobei $\omega_a t_x = \alpha$ ist. Um den linearen Anstieg in Fig. 4 zu erhalten, braucht man nur t_x konstant zu halten; bei grösseren Anforderungen wird Eingang u_{st} für u_a in Fig. 5 notwendig, der dann in einem geschlossenen Regelkreis mit dem Antriebsmotor liegen wird. Ausgang 7 wurde eingetragen, um hier wieder t_k darstellen zu können. Der komplementäre Ausgang 8 wird in A mit 3 und 6 verknüpft und gibt bei 9 einen Impuls, der $\beta' = (\beta - 2\omega_a t_k)$ entspricht. $t_{\beta'} = (t_{\beta} - 2t_k)$ ist also die um die zweifache Umschwingdauer vermindernde Pausendauer t_{β} nach Fig. 2, wodurch

$$\omega_a (t_x + t_{\beta'} + 2t_k) = 20^0 \quad (5)$$

eingehalten wird. Wenn t_k mit $20 \mu s$ angenommen werden kann, gilt bei nicht zu grossem f_a (bis 150 Hz, manchmal bis 300 Hz für Drehstromantriebe) $t_{\beta} \approx t_{\beta'}$. Man kann also sagen, dass 9 in erster Näherung der Pause t_{β} entspricht.

Die nur von f_a abhängigen Impulse 2 werden in FT zu 10, 11 und 12 frequenzmässig gedrittelt. Das Schieberegister (Impulsverteiler VT) arbeitet sowohl auf die Haupt- als auf die Löschthyristoren. Hier soll Impulsbildner 1 besprochen werden, somit die Impulse 13 und 19. Impuls 13 zwischen t_1 und t_2 entspricht a vom Verteiler, weshalb a über die Oder-Glieder F und H direkt wirken kann. Die drei folgenden Impulse der Länge t_x zwischen t_2 und t_4 werden von D als (5 & b) bereitgestellt. Zwischen t_4 und t_5 gilt (12 & c), was durch B bewirkt wird. Impulse h, j, l ergeben sich mit C aus (9 & e), wobei noch die besprochene Inhibitierung bei $zh = 0$ erfolgt. Somit bleibt also T_{H1} bei $k = 2$ zwischen t_1 und t_5 , entsprechend $(180^0 - \omega_a t_1)$, leitend (Impulse 17 wirken nicht). Es ergibt sich weiters für $k = 12$ das in Fig. 6 bei 13 angegebene Leitmuster, so dass bis auf die Umschwingzeiten t_k das Muster nach Fig. 2d produziert wird.

Die Löschimpulse 15 werden so gewonnen, dass (12 & c) aus B an der negativen Flanke differenziert (d.h. z. B. durch nachgeschaltete Dioden nur die differenzierten Impulse einer Polarität berücksichtigt werden) und geformt wird. Im Prinzip könnte man auch (11 & c) verwenden, hätte aber dann Zündimpulse der Länge t_k , was bei langsamem Schaltungen, also grossem t_k , zu unnötig langen Zündimpulsen führt. Die Impulse 17 lassen sich durch Differentiation der negativen Flanken des Ausganges von F, also angefangen bei t_3 , und nachfolgende Formung bilden. 15 und 17 addiert ergeben 19.

Literatur

- [1] F. Zach: Leistungselektronik, Wien/New York, Springer-Verlag, 1979.
- [2] F. Zach: Entwicklungsproblematik der modernen Leistungselektronik. E und M 92(1975)2, S. 79...91.
- [3] C.-O. Naydowski, D. Pohl und H.-C. Skudelny: Untersuchungen an elektrischen Strassenfahrzeug-Antrieben. ETZ-A 98(1977)1, S. 27...31.
- [4] J. S. Sabrodin: Pulswechselrichter. Moskau, Verlag Energie, 1977.

Adressen der Autoren

- A. o. Prof. Franz Zach, Leiter der Abt. für Leistungselektronik, Technische Universität Wien, Gusshausstrasse 27, A-1040 Wien.
Juri S. Sabrodin, Dozent für Ind. Elektronik, Hochschule für Energetik, Moskau; zurzeit TU Wien.