**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:** 15.07.2025

**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. Darüber hinaus ist es wünschenswert, den Gehalt an Oberschwingungen vor allem bei niederer Ausgangsfrequenz gering zu halten. Diese Forderungen werden mit dem hier entwickelten System erfüllt. Hiebei 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 hiedurch 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 Pulszahl 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 Pulszahl und somit verminderter Oberschwingungsreduktion dort leichter erfüllt werden bzw. kann dann die Pulsung ganz entfallen.

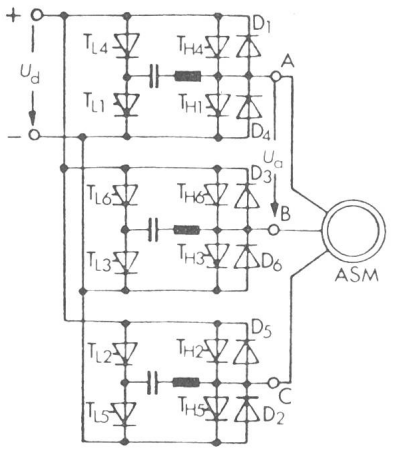


**Fig. 1 Dreiphasiger selbstgeführter Wechselrichter (Pulswechselrichter)**
Hier z.B. für drehzahlvariablen Antrieb des Asynchronmotors ASM
$T_{Hi}$, $T_{Li}$ ($i = 1...6$) Hauptthyristoren
$T_{Li}$ Löschthyristoren
$D_i$ Freilauf- bzw. Rückarbeitsdioden
$U_d$ Speisegleichspannung
$u_a$ Ausgangsspannung mit Amplitude der Grundharmonischen $u_{a1}$

## 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 $\alpha$ aller Impulse. Nach [4] sind folgende Werte von $k$ sinnvoll möglich: $k = 4$, 8, 12, 16, 20, ..., 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 $f_{th}$ der Thyristoren (bzw. Umladefrequenz der Löschkreise) und anderseits der Oberschwingungsgehalt der Ausgangsspannung $u_a$. Für Fig. 2a gilt

$$f_{th} = 2 f_a \tag{1}$$

und für $k = 2$ allgemein

$$f_{th} = (k - 2) f_a \tag{2}$$

wobei $f_a$ die Frequenz der Wechselrichter-Ausgangsspannung ist. $f_{th}$ ist deshalb besonders wichtig, weil damit die Thyristor-Umschaltverluste und die Verluste der Kondensatorumladun-

*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).

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

$$a_\nu = \frac{4\,U_d}{\pi\,\nu} \sin\frac{\nu\alpha}{2}\,\frac{\sin \nu\pi/3}{\sin 2\,\pi\nu/3\,k} \tag{3}$$

wobei $\nu$ die Ordnungszahl der Harmonischen ist, bezogen auf die jeweilige Frequenz der Grundharmonischen in $u_a$, und $\alpha$ 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 $\alpha$ (bis etwa $20^0...30^0$) 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

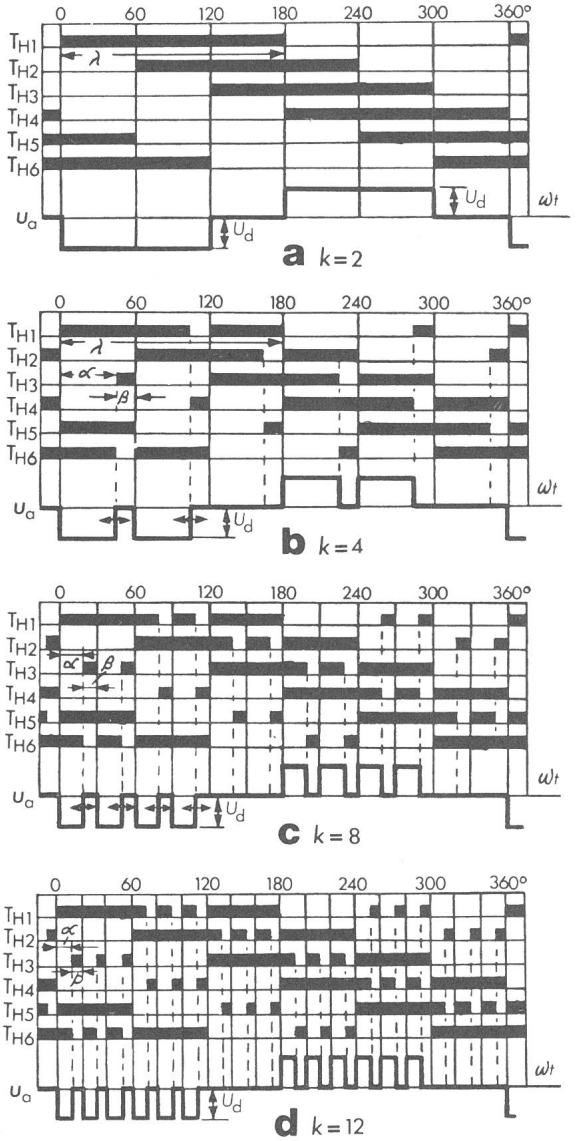


**Fig. 2 Ausgangsspannung $u_a$ gebildet durch Schalten der Thyristoren $T_{Hi}$ gemäss der (schwarz gezeichneten) Blöcke für verschiedene Impulszahlen $k$ in $u_a$ pro Periode**

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

$\alpha$ Impulsbreitenwinkel
$\beta$ Pausenwinkel
$\lambda$ Thyristorleitbereitschaft bei ungepulstem Betrieb

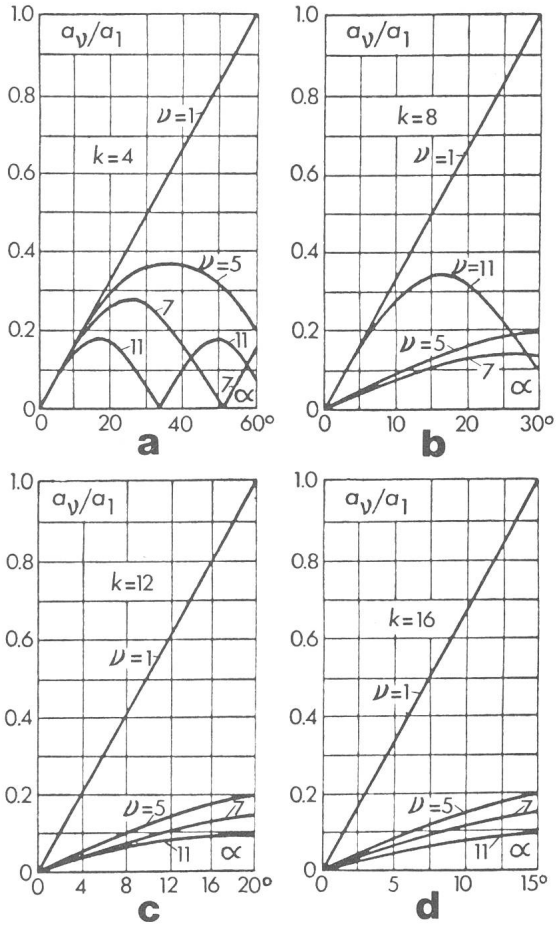


**Fig. 3 Amplituden $a_\nu$ der Ausgangsspannungsharmonischen, bezogen auf Amplitude der Grundharmonischen $a_1 = \hat{u}_{a1}$ in Abhängigkeit des Impulsbreitenwinkels $\alpha$**

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

Betrachtet man nun Anwendungen mit grossem Bereich der Ausgangsfrequenz $f_a$ (z.B. $0 \leq f_a \leq 150...300$ 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-

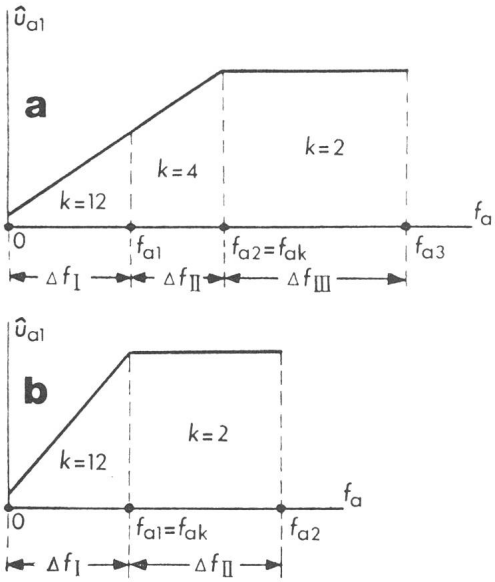


**Fig. 4** **Steuerkennlinien der Spannung $\hat{u}_{a1}$ in Abhängigkeit von der Ausgangsfrequenz $f_a$, üblich für drehzahlvariablen Asynchronmotorantrieb**

$f_{aM} = f_{a3}$ bzw. $f_{a2}$

Für b gilt für $0 \leq f_a \leq f_{ak}$: $\alpha = \alpha_0 \cdot (20^0 - \alpha_0)\, f_a/\Delta f_I$

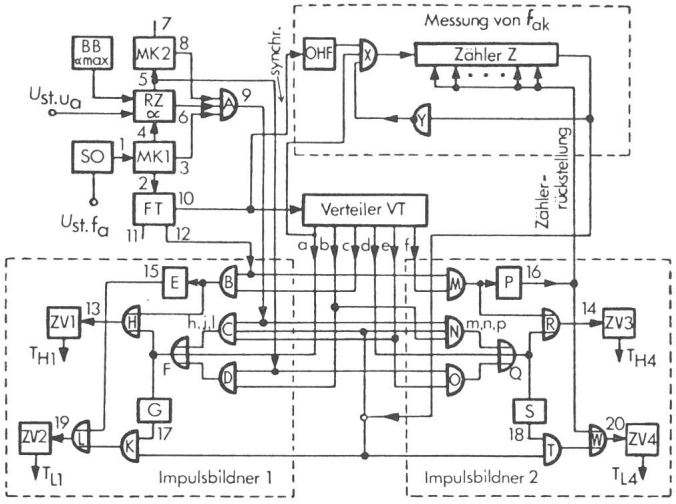


**Fig. 5** **Steuerungssystem für den Pulswechselrichter**

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 µs)

RZ steuerbares Zeitglied zur Erzeugung der Impulsdauer $t_d$ bzw. des Impulsbreitenwinkels $\alpha$

BB Begrenzer für $\alpha$ auf $\alpha_{max}$ (bzw. für $t_\alpha$ auf $t_{\alpha\,max}$)

FT Frequenzteiler (auf $\frac{1}{3}$)

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

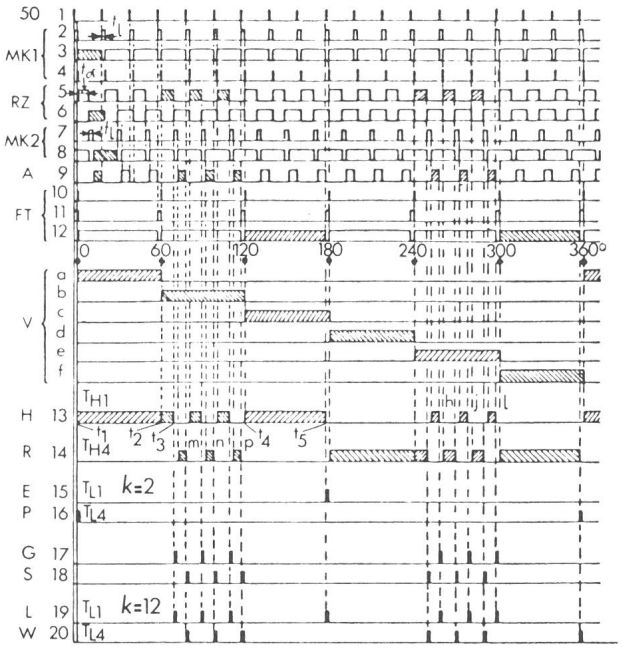


**Fig. 6** **Impulsmuster zur Schaltung Fig. 5**

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 Wirkschema 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 $T_{Hi}$. 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

$$f_{ak} = f_{OHF}/6M \tag{4}$$

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. Hiebei 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 $\alpha$ in 5, wobei $\omega_a t_\alpha = \alpha$ ist. Um den linearen Anstieg in Fig. 4 zu erhalten, braucht man nur $t_\alpha$ 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 verminderte Pausendauer $t_\beta$ nach Fig. 2, wodurch

$$\omega_a\,(t_\alpha + t_{\beta'} + 2t_k) = 20^0 \tag{5}$$

eingehalten wird. Wenn $t_k$ mit 20 µs 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 $t_\beta$ 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 $t_\alpha$ 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 langsamen Schaltungen, also grossem $t_k$, zu unnötig langen Zündimpulsen führte. 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.