Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 64 (1973)

Heft: 13

Artikel: Der Oberwellengehalt der Spannung von pulsgesteuerten Wechselrichtern

Autor: Haubitzer, W.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915571

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: 09.07.2025

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

Der Oberwellengehalt der Spannung von pulsgesteuerten Wechselrichtern

Von *W. Haubitzer*

621.314.572:621.374

1. Allgemeines

Beim selbstgeführten Wechselrichter konventioneller Bauart lässt sich die Ausgangswechselspannung durch die Höhe der zugeführten Gleichspannung oder bei konstanter Speisespannung durch Verkürzung der Brenndauer (Anschnittsteuerung) während einer Spannungshalbwelle beeinflussen. Hingegen wird beim Wechselrichter mit Pulssteuerung durch Änderung des Einschaltverhältnisses bei konstanter Speisespannung die Ausgangswechselspannung gesteuert. Die Änderung des Einschaltverhältnisses kann auf verschiedene Weise erfolgen:

a) Änderung der Einschaltdauer bei konstanter Pulsfrequenz (Pulsbreitensteuerung).
b) Änderung der Pulsfrequenz bei konstanter Einschaltdauer bzw. bei konstanter Ausschaltdauer (Pulsfolgesteuerung).

Der Vorteil der Pulssteuerung besteht darin, dass die niederfrequenten Oberschwingungen gegenüber denen bei Anschnittsteuerung stark zurücktreten und daher die Stromoberwellen bei induktiver Last ohne besondere Massnahmen unterdrückt werden. Die Ein- und Ausschaltzeiten sind bei der Pulssteuerung so kurz, dass der Strom wegen der vorhandenen Induktivitäten (magnetischer Energiespeicher) kontinuierlich verläuft.

Im folgenden Abschnitt sei der Fall der Pulssteuerung bei konstanter Pulsfrequenz untersucht.

2. Fourieranalyse der Ausgangsspannung des Wechselrichters bei Pulssteuerung

Fig. 1 zeigt die Impulsfunktion bei konstanter Pulsfrequenz zur Erzeugung einer sinusförmigen Wechselspannung.

Bezeichnet man mit $t_{e\mu}$ die jeweilige Einschalt- und mit $t_{a\mu}$ die zugehörige Ausschaltdauer, so ist die Summe

$$t_{e\mu} + t_{a\mu} = t_s \tag{1}$$

gleich der konstanten Spieldauer t_s. Die Pulsfrequenz f_p ist daher:

$$f_p = \frac{1}{t_s} \tag{2}$$

Bezeichnet man mit m die Anzahl der Schaltspiele in einer Viertelperiode der Wechselspannungsgrundwelle und mit T die Periodendauer der Wechselspannungsgrundwelle, so gilt für die Spieldauer

$$t_s = \frac{T}{4\,m} \tag{3}$$

und für die Pulsfrequenz

$$f_p = 4\,mf \tag{4}$$

Soll die in Fig. 1 dargestellte Impulsfunktion die Sinusfunktion möglichst gut wiedergeben, so ist es notwendig, dass nicht nur die Mittelwerte beider Funktionen übereinstimmen, sondern es muss auch jede einzelne Impulszeitfläche mit der ihr entsprechenden Spannungszeitfläche aus der Sinusfunktion übereinstimmen. Je höher man die Pulsfrequenz wählt, desto besser lässt sich die vorgegebene Sinusfunktion annähern. Eine obere Grenze der Pulsfrequenz ist durch die Freiwerdezeit der in der Wechselrichterschaltung verwendeten Halbleiterelemente gegeben. Aus diesem Grunde wurde zur Erzeugung einer Grundwelle von 50 Hz eine Impulsfrequenz von f_p = 2000 Hz gewählt.

Für eine sinusförmige Spannung $u = \hat{U} \sin \omega t$ erhält man für den ersten Impuls die Einschaltdauer:

$$t_{e1} = \frac{1}{A}\int_0^{2t_s} u\,(t)\,\mathrm{d}t = \frac{\hat{U}}{A}\int_0^{2t_s} \sin \omega t\,\mathrm{d}t = \frac{\hat{U}}{A\omega}[1 - \cos 2\,\omega t_s] \tag{5}$$

Bezeichnet man mit

$$t_\mu = \mu t_s \qquad \mu = 2, 3, \ldots, m\text{–}1 \tag{6}$$

den Einschaltzeitpunkt aller weiteren Impulse in der ersten Viertelperiode, so gilt für die Einschaltdauer dieser Impulse:

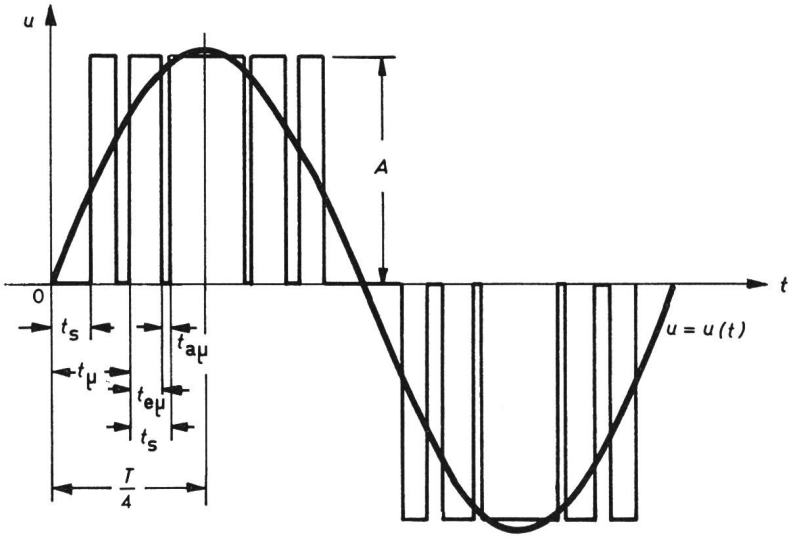

Fig. 1
Impulsfunktion bei konstanter Pulsfrequenz zur Erzeugung einer sinusförmigen Wechselspannung

u Wechselspannungsgrundwelle
t Zeit
T Periodendauer der Wechselspannungsgrundwelle
A Amplitude der Impulsfunktion
t_s Spieldauer
t_μ Einschaltzeitpunkt
$t_{e\mu}$ Einschaltdauer
$t_{a\mu}$ Ausschaltdauer

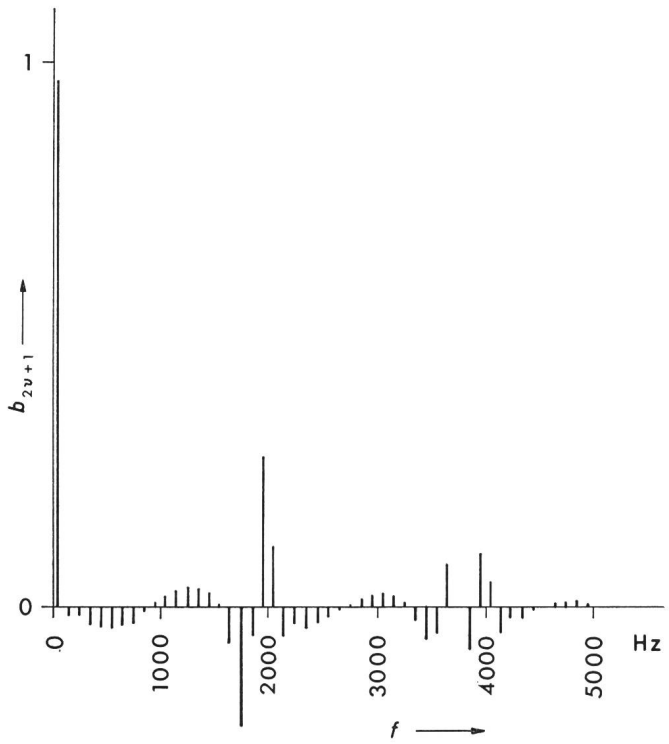

Fig. 2
Frequenzspektrum der Pulssteuerung bei konstanter Pulsfrequenz von 2000 Hz für eine Grundwelle der zu erzeugenden Wechselspannung von 50 Hz

b_{2v+1} Fourier-Koeffizienten
f Frequenz

$$t_{e\mu} = \frac{1}{A}\int_{t_\mu}^{t_\mu+t_s} u(t)\cdot \mathrm{d}t = \frac{\hat{U}}{A}\int_{t_\mu}^{t_\mu+t_s} \sin\omega t\cdot \mathrm{d}t = \tag{7}$$

$$= \frac{\hat{U}}{A\omega}[\cos\omega t_\mu - \cos\omega(t_\mu + t_s)] \qquad (\mu = 2, 3, \ldots, m-1)$$

Lässt man symmetrisch zum Höchstwert der Sinusfunktion zwei Impulse ohne Ausschaltdauer unmittelbar aneinandergrenzen (s. Fig. 1), so erhält man aus Gl. (7) eine Bestimmungsgleichung für das Amplitudenverhältnis k:

$$k = \frac{\hat{U}}{A} = \frac{\omega t_s}{\sin\omega t_s} \tag{8}$$

Setzt man für $\omega t = x$, so erhalten die Gl. (1), (3), (5), (6), (7) und (8) die normierte Gestalt:

$$x_{e\mu} + x_{a\mu} = x_s \tag{1'}$$

$$x_s = \frac{\pi}{2m} \tag{3'}$$

$$x_{e1} = k\,[1 - \cos 2x_s] \tag{5'}$$

$$x_\mu = \mu x_s \qquad \mu = 2, 3, \ldots, m-1 \tag{6'}$$

$$x_{e\mu} = 2k\sin\frac{x_s}{2}\cdot\sin\left(\frac{1}{2}+\mu\right)x_s \qquad \mu = 2, 3, \ldots, m-1 \tag{7'}$$

$$k = \frac{x_s}{\sin x_s} \tag{8'}$$

Die normierte Impuls-Funktion $y(x)$ erfüllt folgende Symmetriebedingungen:

$$\begin{aligned} y(-x) &= -y(x) \\ y(x+\pi) &= -y(x) \\ y(\pi - x) &= y(x) \end{aligned} \tag{9}$$

und es lautet daher die Entwicklung der Fourier-Koeffizienten:

$$b_{2v+1} = \frac{4}{\pi}\int_0^{\frac{\pi}{2}} y(x)\cdot\sin(2v+1)x\,\mathrm{d}x \qquad (v = 0, 1, 2, \ldots) \tag{10}$$

$$b_{2v+1} = \frac{4}{\pi k}\left\{\int_{x_s}^{x_s+x_{e1}} \sin(2v+1)x\,\mathrm{d}x + \sum_{\mu=2}^{m-1}\int_{x_\mu}^{x_\mu+x_{e\mu}} \sin(2v+1)x\,\mathrm{d}x\right\} =$$

$$= \frac{4}{\pi k(1+2v)}\cdot\left\{\cos(2v+1)x_s - \cos[(2v+1)(x_s+x_{e1})] + \right.$$

$$\left. + \sum_{\mu=2}^{m-1}\left(\cos(2v+1)x_\mu - \cos[(2v+1)(x_\mu + x_{e\mu})]\right)\right\}$$

Nach einer kleinen Umformung erhält man schliesslich:

$$b_{2v+1} = \frac{8}{\pi k(1+2v)}\left\{\sin\left(\frac{2v+1}{2}x_{e1}\right)\cdot\sin\left[(2v+1)\left(x_s+\frac{x_{e1}}{2}\right)\right] + \right.$$

$$\left. + \sum_{\mu=2}^{m-1}\sin\frac{2v+1}{2}x_{e\mu}\sin\left[(2v+1)\left(x_\mu+\frac{x_{e\mu}}{2}\right)\right]\right\} \qquad (v = 0, 1, 2, \ldots) \tag{11}$$

Der Grenzwert, dem die Fourier-Koeffizienten für sehr hohe Pulsfrequenzen zustreben, lässt sich leicht bestimmen.

Für $m \to \infty$ wird:

$$\begin{aligned} x_s &= \mathrm{d}x \\ x_{e1} &= 0, \\ x_\mu &= x, \\ k &= 1, \\ x_{e\mu} &= \sin x\,\mathrm{d}x \end{aligned}$$

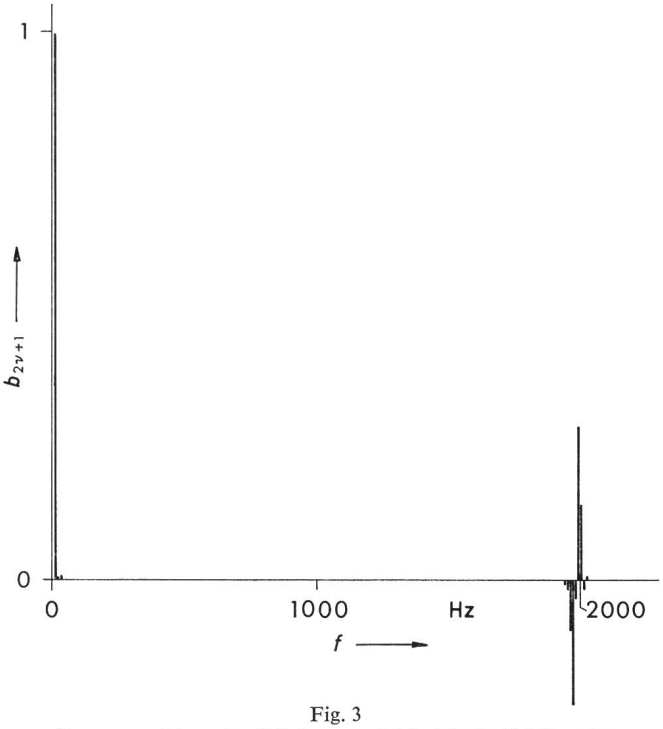

Fig. 3
Frequenzspektrum der Pulssteuerung bei konstanter Pulsfrequenz von 2000 Hz für eine Grundwelle der zu erzeugenden Wechselspannung von 10 Hz

b_{2v+1} Fourier-Koeffizienten
f Frequenz

und somit folgt aus Gl. (11):

$$\lim_{m\to\infty} b_{2v+1} = \frac{4}{\pi}\int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin x \cdot \sin(2v+1)x\,dx = \begin{cases} b_1 = 1, \\ b_{2v+1} = 0, \\ \qquad v \neq 0 \end{cases} \tag{12}$$

Die Figuren 2 und 3 zeigen das Frequenzspektrum der Pulssteuerung bei einer konstanten Pulsfrequenz von 2000 Hz, und zwar Fig. 2 für eine Grundwelle der zu erzeugenden Wechselspannung von 50 Hz und Fig. 3 für 10 Hz. Die numerische Auswertung der Gl. (11) wurde mit einem Digitalrechner durchgeführt. Aus Fig. 2 und Fig. 3 erkennt man, dass die Oberwellen in der Nähe der Pulsfrequenz und deren Vielfache stärker hervortreten, während sie in den zwischenliegenden Bereichen sehr klein sind. Gl. (11) gestattet eine Vorausberechnung der benötigten Siebelemente von pulsgesteuerten Wechselrichtern.

Literatur

[1] *K. Heumann* und *A. C. Stumpe:* Thyristoren. Eigenschaften und Anwendungen. 2. Auflage. Stuttgart, Teubner-Verlag, 1970.

Adresse des Autors:
Dr. techn. *Walter Haubitzer,* Assistent am Institut für Elektrotechnik der Mont. Hochschule, A-8700 Leoben.

Spannendes über eine Amerikareise

Von *H. Prinz*

917:621.3:001.891

Aus Anlass einer in Las Vegas stattgefundenen Konferenz über Blitz- und Statikelektrizität, über deren Verlauf getrennt berichtet werden soll, war dem Verfasser Gelegenheit geboten, auf einem 12 000-km-Rundflug, der über Kanada bis an die pazifische Küste und von dort in den Süden Floridas führte (Fig. 1), neben den Schönheiten des Landes einige bedeutende Institutionen aus Naturwissenschaft und Technik kennenzulernen.

Mit New York als Ausgangspunkt hat sich zunächst ein Besuch des kanadischen Institut de Recherche de l'Hydro Québec (IREQ) angeboten, dessen Höchstspannungsprüffeld, als das derzeit grösste Hochspannungslaboratorium der Welt vor einiger Zeit in Betrieb gehen konnte. Dann war es das Lightning and Transients Research Institute (LTRI) in Minneapolis, dessen Besichtigung einen interessanten Einblick in die vielgestaltige Thematik des Blitzschutzes von Flug- und Raumfahrzeugen vermittelt hat und zugleich erkennen liess, welche Aufgaben in dieser Hinsicht noch gelöst werden müssen.

Nach einem Kurzaufenthalt in Chicago, dem ein Besuch des dortigen Museum of Science and Industry, des grössten technischen Museums der Vereinigten Staaten, gewidmet war, führte der Flug weiter nach dem Westen über die Rocky Mountains von New Mexico hinweg bis nach Las Vegas als der Wüstenmetropole der Vergnüglichkeit mit ihren eleganten Spielkasinos und faszinierenden Wasserspielen. Von dort aus war es naheliegend, die Maxwell Laboratories in San Diego zu besuchen, die in den letzten Jahren bemerkenswerte Fortschritte auf dem Gebiete einer Kompakt-Impulstechnik höchster Spannungen erzielt haben.

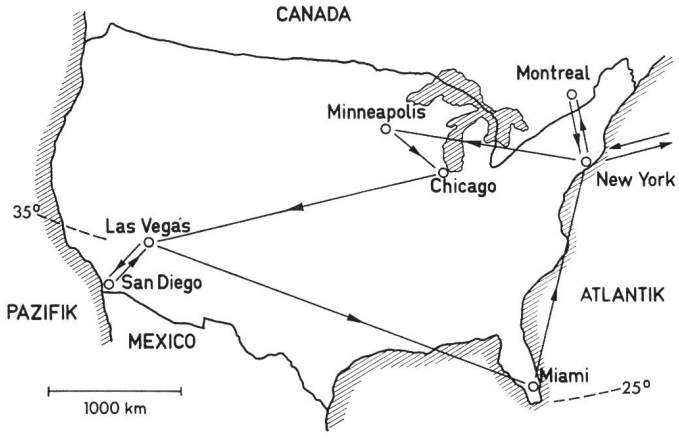

Fig. 1
Flugroute

Zum Abschluss konnte noch das einzigartige Forschungsschiff Thunderbolt[1]) mit seiner 10 Millionen Volt Stossanlage in Miami Beach besichtigt werden, das sich durch seine Experimentierkünste mit getriggerter Wolkenelektrizität einen hervorragenden Namen gemacht hat.

Bei der Einmaligkeit dieser Reise erschien es angebracht zu sein, ihren Ablauf in einigen bemerkenswerten Phasen vorzustellen und dabei auch über nützliche Erfahrungen zu berichten.

Das IREQ-Höchstspannungsprüffeld

Von verantwortungsbewusster und zugleich zielstrebiger Denkweise durchdrungen, hat sich die Hydro Québec als führendes Unternehmen einer kanadischen Elektrizitätsversorgung vor einigen Jahren dazu entschlossen, auf einem 2,4 km² umfassenden Areal in Varennes, etwa 30 km nordöstlich von Montreal und unweit der 735-kV-Schaltanlage Boucherville, ein Höchstspannungsprüffeld zu errichten mit dem Ziel, eine zukünftige UHV-Technik bis zu 1500 kV Drehstrom und 2000 kV Gleichstrom wissenschaftlich zu erforschen und soweit zu entwickeln, dass in nicht allzu ferner Zeit mit dem Bau einer ersten UHV-Übertragung begonnen werden kann. Insbesondere wird daran gedacht, die an der James Bay anfallende Wasserkraft von rund 14 000 MW auszubauen und über eine möglicherweise mit 1200 kV Drehstrom betriebenen UHV-Leitung nach dem Süden des Landes zu transportieren.

Das in formschöner Architektur hochgezogene Bauwerk beinhaltet nach dem in Fig. 2 dargestellten Grundriss eine Höchstspannungshalle 1 mit einem sich daran anschliessenden Anbau 2 und einen davon abgesetzten Bürotrakt 3. Seine Dominante bildet naturgemäss die Halle, die allein aus der Sicht ihrer lichten Abmessungen mit 82 m Länge, 67 m Breite und 50 m Höhe dem Besucher einen nachhaltigen Eindruck vermittelt und unter Hinzurechnung der Wand- und Deckenkonstruktion eine Kubatur von 374 000 m³ umfasst. Je nach Art der jeweils vorliegenden Untersuchungen lässt sich die Halle entweder in drei voneinander unabhängige Bereiche mit eigenen Steuerständen aufteilen oder sie kann für ein Experimentieren im UHV-Gebiet als ein einziges Prüffeld betrieben werden.

Besonderer Wert musste verständlicherweise auf eine wohlerwogene Auslegung der Prüfanlagen gelegt werden, um nach Möglichkeit auch eine zukünftig zu erwartende Prüftechnik mit-

[1]) = Donnerkeil