

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: 69 (1978)

Heft: 24

Artikel: Netzstromoberschwingungen bei Direktumrichtern

Autor: Kloss, A.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-914972>

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: 03.04.2026

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

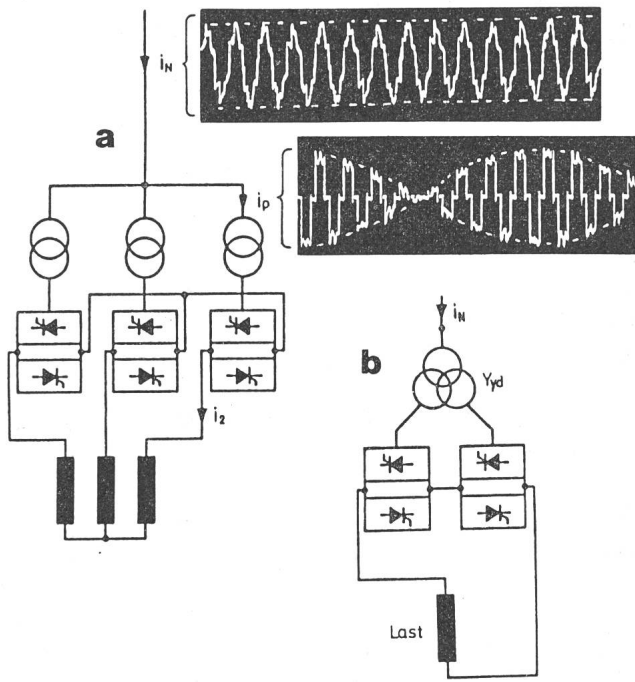


Fig. 2 Dreiphasiger Direktumrichter
 a Prinzipschema
 b Einphasiger Direktumrichter mit zwölfpulsigen Stromrichtern
 (Jedes Stromrichtersymbol stellt eine Drehstrombrücke dar)

f_0 wird auch der Umrichter geführt. Es ist immer nur eine Brücke in Betrieb, so dass zwischen den beiden Brücken *kein Kreisstrom* entstehen kann. Die Freigabe der nachfolgenden Brücke folgt erst nach einem kurzen stromlosen Zustand des Umrichters²⁾. Die Ausgangsfrequenz f kann kontinuierlich von null (Gleichstrom) bis zu ca. $1/3$ der Netzfrequenz f_0 geändert werden. Die Ausgangsspannung u_d verläuft entweder sinusförmig (Spannungsamplitude u_{2m} kleiner als die maximal erreichbare Gleichspannung U_{di0}) oder trapezförmig (Fig. 7 oben), wobei die Amplitude der Spannungsgrundschwingung im Extremfall den Wert $4/\pi U_{di0}$ erreicht.

Die Ausgangsspannung u_d ist aus Abschnitten der verketeten Netzspannung (bzw. Transformator-Sekundärspannung) u_N gebildet und weicht also vom idealen Sinusverlauf relativ stark ab (Fig. 1c). Der Strom i_2 kann aber mit einer Induktivität L im Lastkreis geglättet werden und dann für die theoretischen Untersuchungen einfachheitshalber als ideal sinusförmig angenommen werden. Die Lastphasenverschiebung φ_2 kann beliebig gefahren werden.

In der Drehstrombrücke führt jeder Thyristor $1/3$ der Netzspannungsperiode den Strom (i_T). Der Netzstrom i_N setzt sich aus zwei Thyristorströmen zusammen und ist gleich dem Transformatorprimärstrom $i_p = i_N$ (Fig. 1b). Da der Laststrom i_2 sinusförmig verläuft, folgt auch i_N mit den einzelnen Amplituden diesem Verlauf und ist somit mit der Frequenz $2f$ moduliert.

Der Direktumrichter gemäss Fig. 1 formt die Dreiphasenspannung U_N der Frequenz f_0 in eine Einphasenspannung u_d der Frequenz f um. Drei solche Schaltungen können zu einem *Dreiphasenumrichter* erweitert werden (Fig. 2a). Die einzelnen Spannungen u_d sind gegenseitig um 120° versetzt. Der Netzstrom i_N setzt sich aus drei Transformatorströmen i_p zusammen, die mit der Frequenz $2f$ moduliert sind, und weist die Modulationsfrequenz $6f$ auf. Die Schwankungen des Netz-

stromes sind beim Dreiphasenumrichter somit viel kleiner als beim Einphasenumrichter. Den Direktumrichter kann man, ähnlich wie die normalen Stromrichter, auch zwölfpulsig ausführen, indem man immer zwei um 30° versetzte Drehstrombrücken in Serie oder parallel schaltet.

3. Netzstrom-Oberschwingungen des idealen einphasigen Direktumrichters

Bei der analytischen Untersuchung der Netzstrom-Oberschwingungen des einphasigen Direktumrichters (Fig. 1) wird zuerst einfachheitshalber vorausgesetzt, dass der Laststrom i_2 ideal sinusförmig verläuft und dass das Netz sowie der Transformator impedanzlos sind (Kommutierung ohne Überlappung). Im Extremfall für $f = 0$ wird der Netzstrom des Direktumrichters i_1 aus 120° breiten Rechteckblöcken gebildet und ist also gleich wie bei einem sechspulsigen Stromrichter. Für diese Stromform liefert die Fourieranalyse bekanntlich [11] folgende Ordnungszahlen der Oberschwingungen: $n = 5, 7, 11, 13, \dots (k \cdot 6n \pm 1)$. Ihre Amplitude nimmt indirekt proportional mit der Ordnungszahl n ab:

$$\hat{i}_{Nn} = 1/n \hat{i}_{N1}$$

Die Frequenz der Stromgrundschwingung \hat{i}_{N1} stimmt dabei mit der Netzfrequenz f_0 überein. Das gilt allerdings nur im stationären Zustand, bei konstantem Steuerwinkel α .

Bei dynamischen Zuständen des Stromrichters ist der Steuerwinkel α nicht konstant, und die Frequenz des Stromes stimmt nicht mehr mit der Netzfrequenz f_0 überein (Fig. 3). Bei der Zunahme der Spannung u_d ist die Netzstromfrequenz höher ($f_0 + \Delta f$), bei der Abnahme der Spannung u_d niedriger ($f_0 - \Delta f$) als im stationären Zustand. Dies gilt für den Gleichrichterbetrieb des Stromrichters. Im Wechselrichterbetrieb ist es umgekehrt.

Beim Direktumrichter wird der Steuerwinkel α im Steuerbetrieb dauernd verstellt, d.h. die Netzstromfrequenz ist entweder höher ($f_1 = f_0 + \Delta f$) oder niedriger ($f_2 = f_0 - \Delta f$) als die Netzspannungsfrequenz f_0 , stimmt aber nie genau mit ihr

²⁾ Es wird also hier nur der «klassische» kreisstromfreie Direktumrichter betrachtet, der allerdings bei den Grossanlagen die wichtigste Rolle spielt.

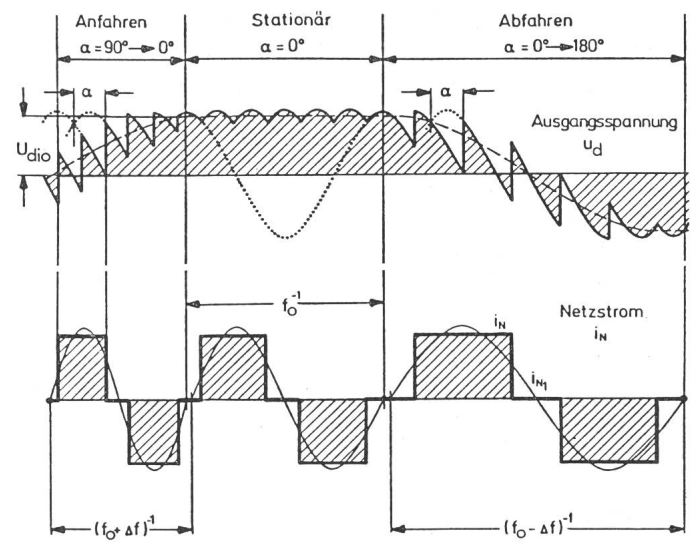


Fig. 3 Gleichspannung u_d und Netzstrom i_N bei Drehstrombrückenschaltung im dynamischen Zustand (Gleichrichterbetrieb)

überein ($\Delta f = 0$). Die Stromamplituden des Netzstromes sind noch dazu niederfrequent mit der Frequenz $2f$ moduliert.

Wie man den Netzstrom des Direktumrichters konstruieren kann, zeigt Fig. 4 vereinfacht für $\varphi_2 = 0$. Aus den rechteckigen Wechselströmen (idealisierte Form der Drehstrom-Brückenschaltung) i_1 (Aufsteuerung) und i_2 (Absteuerung) mit den Kreisfrequenzen ω_1, ω_2 werden durch Ausblendung Impulspakete i_1 und i_2 mit $2\Omega = 4\pi f$ gebildet. Nach der anschließenden Sinus-Modulation mit ω bekommt man schliesslich die Netzstromform. Das Vorgehen kann analytisch mittels Fourierreihen wie folgt beschrieben werden:

$$i_N = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \left\{ \left[\left(\cos\omega_1 t - \frac{1}{5} \cos 5\omega_1 t + \dots \right) \left(\frac{1}{2} - \frac{2}{\pi} \sin 2\Omega t - \frac{2}{3\pi} \sin 6\Omega t - \dots \right) + \left(\cos\omega_2 t - \frac{1}{5} \cos 5\omega_2 t + \dots \right) \left(\frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \sin 2\Omega t + \frac{2}{3\pi} \sin 6\Omega t + \dots \right) \right] \cdot \cos\Omega t \right\}$$

Für den maximalen Steuerbetrieb, $r = u_{dm}/U_{dio} = 1$, gilt dann $\omega_1 = \omega_0 + \Omega$, und $\omega_2 = \omega_0 - \Omega$

Setzt man diese Werte in die Gleichung ein und führt die Berechnung durch, so ergibt sich, dass sich der Netzstrom i_N aus folgenden Schwingungen zusammensetzt:

- Grundschiwingung ω_0 mit den Seitenschwingungen $\omega_0 \pm 2\Omega; \omega_0 \pm 4\Omega; \dots$
- Oberschwingungen $5\omega_0$ mit den Seitenschwingungen $5\omega_0 \pm 2\Omega; 5\omega_0 \pm 4\Omega; \dots$
- $7\omega_0$ mit den Seitenschwingungen $7\omega_0 \pm 2\Omega; 7\omega_0 \pm 4\Omega; \dots$ usw.

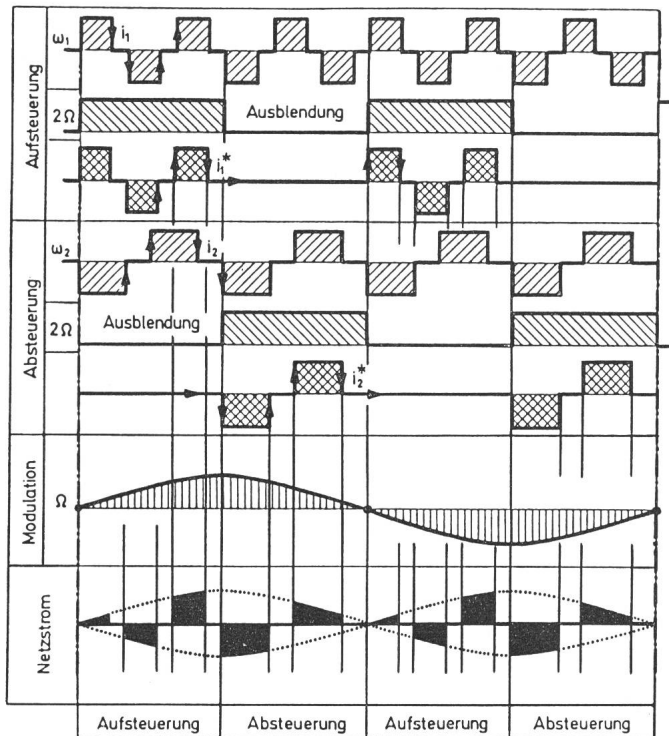


Fig. 4 Synthese des Direktumrichter-Netzstromes
Maximaler Steuerumrichterbetrieb $\varphi_2 = 0$
 $\omega_1 = 2\pi f_1; \omega_2 = 2\pi f_2; \Omega = 2\pi f$

Das entsprechende Amplitudenspektrum zeigt Fig. 5.

Für zwei weitere Extremfälle, $\omega_1 = \omega_2 = \omega_0 + \Omega$, was der Lastphasenverschiebung $\varphi_2 = 90^\circ$ entspricht, und $\omega_1 = \omega_2 = \omega_0$, was einer minimalen Aussteuerung gleich ist ($u_{dm} \rightarrow 0$), sind die Amplitudenspektren in Fig. 6 dargestellt. Man sieht also, dass beim Direktumrichter im Vergleich zum normalen sechspulsigen Stromrichter neben den Basisüberschwingungen (Trägern) $n = 1, 5, 7, 11, \dots$ noch Seitenschwingungen im Abstand von 2Ω entstehen. Die Amplituden der Oberschwingungen sind vom Aussteuerungsgrad $r = u_{dm}/U_{dio}$ und vom Verschiebungswinkel φ_2 abhängig [8; 10]. Am Beispiel der

Oberschwingungsfamilie mit Trägerfrequenz $n = 5$ zeigt Fig. 7 den Einfluss des Aussteuerungsgrades r bei konstantem Phasenwinkel $\varphi_2 = 0$, und Fig. 8 den Einfluss des Phasenwinkels φ_2 , bei konstantem $r = 0,4$. Die Basis- und Seitenschwingungen erreichen beim Direktumrichter maximal den Wert, der dem normalen Stromrichterbetrieb entspricht, d.h. die Oberschwingungen $n = 5; 5 \pm 2f; 5 \pm 4f; 5 \pm 6f$ usw. sind immer kleiner als $1/5$ der Grundschiwingung I_{N1} .

Im Trapezbetrieb des Direktumrichters weist der Netzstromverlauf neben den höheren und niedrigen Frequenzen $f_0 \pm \Delta f$ im vollausgesteuerten Zustand auch noch die eigene Netzfrequenz f_0 auf. Die in Fig. 3 gezeigte Spannung u_d entspricht prinzipiell dem Trapez-Umrichterbetrieb, und die drei

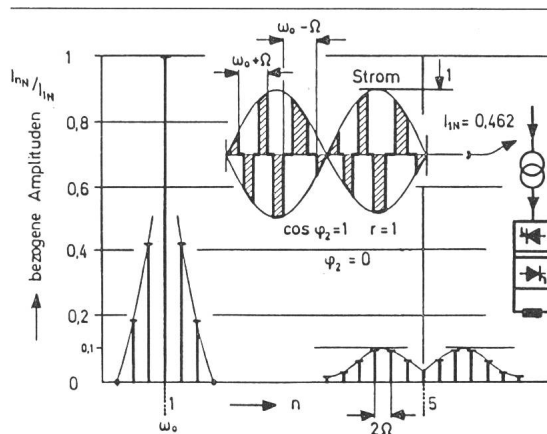


Fig. 5 Netzstrom-Amplitudenspektrum des idealen einphasigen Direktumrichters im maximalen Steuerbetrieb und bei $\varphi_2 = 0$

Netzstromfrequenzen sind hier deutlich zu erkennen (der Strom ist allerdings nicht moduliert aufgezeichnet). Im Extremfall der Rechteckspannung verläuft der Netzstrom nur mit der Netzfrequenz (selbstverständlich noch mit $2f$ moduliert), d.h. prinzipiell gleich wie beim Steuerbetrieb mit minimalem Aussteuerungsgrad (Fig. 6b).

Die Lastfrequenz f beeinflusst nicht die Amplituden der Oberschwingungen, sondern nur die Breite der Seitenbänder, wie es Fig. 9 veranschaulicht. Bei $16^{2/3}$ -Hz-Lastfrequenz ent-

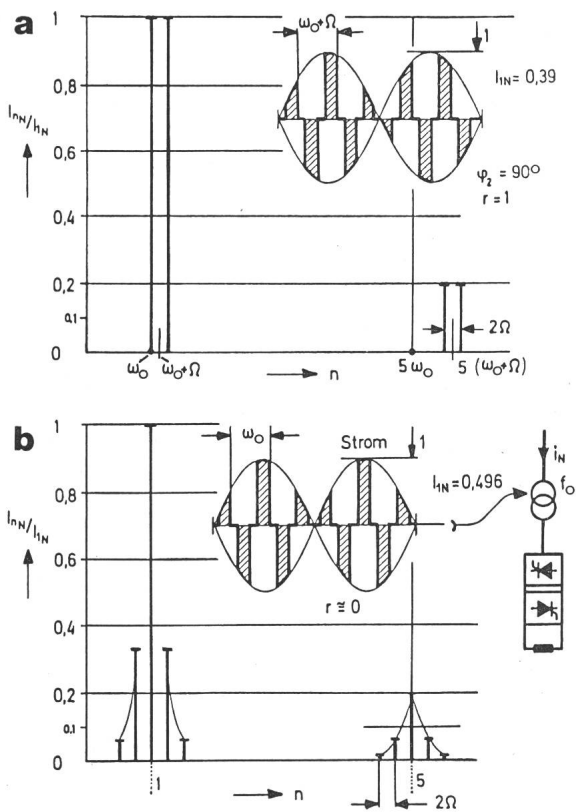


Fig. 6 Netzstrom-Amplitudenspektrum des idealen einphasigen Direktumrichters
 a im maximalen Steuerbetrieb bei $\varphi_2 = 90^\circ$
 b im minimalen Steuerbetrieb bei $\varphi_2 = 0^\circ$

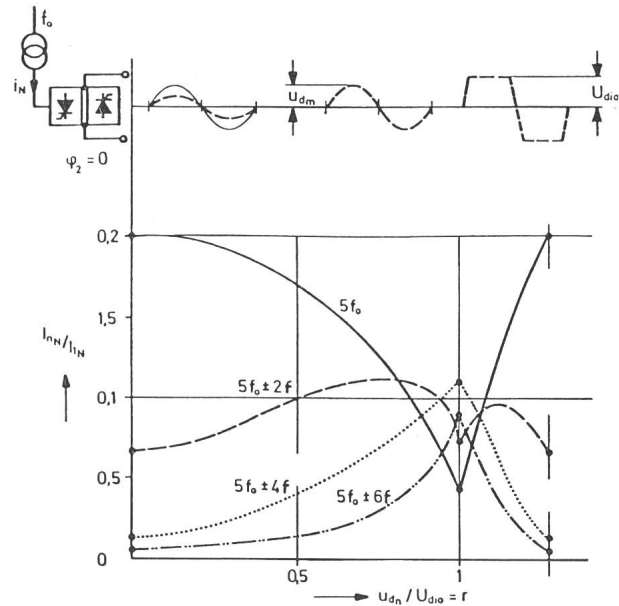


Fig. 7 Abhängigkeit der 5. Stromüberschwingung und deren Seitenschwingungen vom Aussteuerungsgrad u_{dm}/U_{dio} des einphasigen Direktumrichters
 Konstanter Phasenwinkel $\varphi_2 = 0$. Beim dreiphasigen Direktumrichter fallen die Bänder $\pm 2f$ und $\pm 4f$ aus.

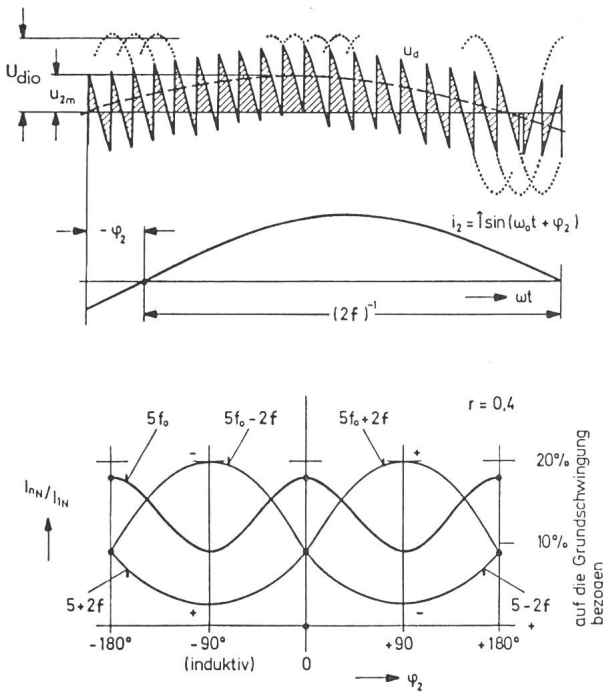


Fig. 8 Abhängigkeit der 5. Stromüberschwingung und der nächsten Seitenschwingungen vom Phasenwinkel φ_2
 Aussteuerungsgrad $u_{dm}/U_{dio} = 0,4$. Beim dreiphasigen Direktumrichter fällt die Seitenschwingung mit $2f$ aus (es bleibt $5 \pm 6f$)

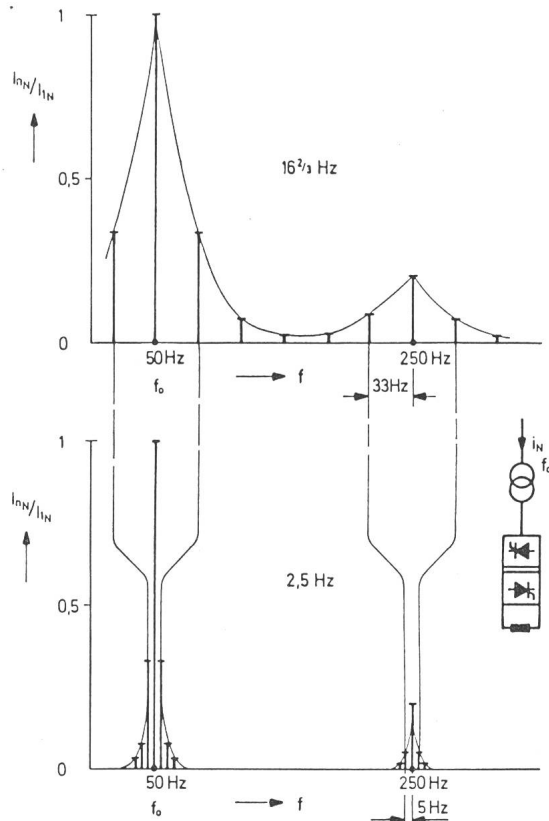


Fig. 9 Netzstrom-Amplitudenspektrum beim idealen einphasigen Direktumrichter bei zwei verschiedenen Lastfrequenzen ($f = 16^{2/3}$ Hz und 2,5 Hz)

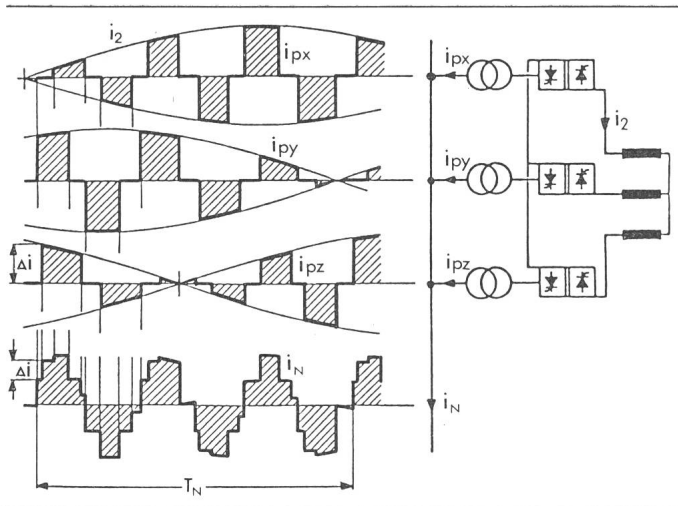


Fig. 10 Netzstrom i_N des dreiphasigen Direktumrichters
 Er wird aus drei um 120° el. versetzten Transformatorströmen i_p der einzelnen Umrichterphasen gebildet (idealisiert).
 Maßstab $i_N/i_p = 1/2$

stehen z.B. neben der Trägerfrequenz 250 Hz mit der Amplitude $0,2 I_{1N}$ Seitenfrequenzen 283 Hz und 217 Hz mit den Amplituden von $0,07 I_{1N}$. Bei 2,5 Hz Lastfrequenz sind die ersten Seitenfrequenzen der gleichen Trägerfrequenzen 255 Hz und 245 Hz, wobei sich die Amplituden aber nicht geändert haben.

4. Netzstromüberschwingungen des idealen dreiphasigen Direktumrichters

Der dreiphasige Direktumrichter (Fig. 2a) formt das Drehstromnetzsystem der Frequenz f_0 in das niederfrequente Drehstromsystem der Frequenz f um. Jede Umrichterphase wird aus einem einphasigen Direktumrichter (Fig. 1), deren Ausgangsspannungen u_a um 120° versetzt sind, gebildet. Der Netzstrom des dreiphasigen Umrichters i_N setzt sich aus drei Transformatorströmen i_p der einzelnen Umrichterphasen zusammen (Fig. 10). Nach 3 Perioden wiederholt sich hier die Netzstromform i_N . Im Netzstromspektrum fallen beim dreiphasigen Direktumrichter die Seitenfrequenzen $\pm 2f, \pm 4f, \pm 8f \dots$ aus, da sie sich aufheben.

Der Oberschwingungsgehalt des Netzstroms (Klirrfaktor)

$$k_0 = \frac{\sqrt{\sum_n I_{nN}^2}}{I_N}$$

beträgt bei $\varphi_2 = 0$ und $r = 1$ beim

dreiphasigen Direktumrichter	$k_0 = 0,22 \dots 0,3$
einphasigen Direktumrichter	$k_0 = 0,51 \dots 0,74$
Stromrichter in Drehstrom-Brückenschaltung	$k_0 = 0,30$

Also ist die gesamte Netzstromverzerrung des dreiphasigen Direktumrichters sogar besser als diejenige der einfachen Stromrichter-Sechspulsschaltung.

5. Netzstromüberschwingungen des Direktumrichters bei realen Verhältnissen

In Wirklichkeit ist der Laststrom des Direktumrichters nie ideal sinusförmig, sondern weist eine gewisse Welligkeit auf, die von der Pulszahl der Stromrichterschaltung abhängt. Ausserdem wirkt die Stromregelung nicht ideal, und der Stromnulldurchgang verläuft nicht augenblicklich. Bei der Umschaltung von einer auf die andere Stromrichtung befindet sich der Direktumrichter eine gewisse Zeit im stromlosen Zustand. Weiter entstehen bei der Kommutierung der Stromrichterventile Stromüberlappungen (i_i).

Der Einfluss dieser Parameter ist besonders in Extremfällen, d.h. bei sehr grossem Frequenzverhältnis f_0/f , bei sehr kleiner oder sehr grosser Strombelastung und bei sehr kleinem Aussteuerungsgrad U_{am}/U_{dio} bemerkbar. Als Beispiel dient Fig. 11. Man sieht, dass in diesem Falle ($f_0/f = 3$, $u_{am}/U_{dio} = 0,9$ und $\varphi_2 \approx 60^\circ$) die Oberschwingungsspektren den einzelnen Phasenströmen i_R, i_S, i_T nicht gleich sind und ausserdem vom Idealwert stark abweichen (Computer unterstützte Untersuchung).

Experimentell ermittelte Netzstromspektren bei dreiphasigen Direktumrichtern sind in Fig. 12 dargestellt. Die Oszillogramme zeigen noch die entsprechenden Stromverläufe. In beiden Fällen handelt es sich um sechspulsige Drehstrombrücken.

Mit zwölfpulsiger Schaltung werden die Oberschwingungsbänder der 5. und 7. Trägerschwingung noch erheblich reduziert: theoretisch auf null, praktisch auf ca. 20% der sechspulsigen Werte.

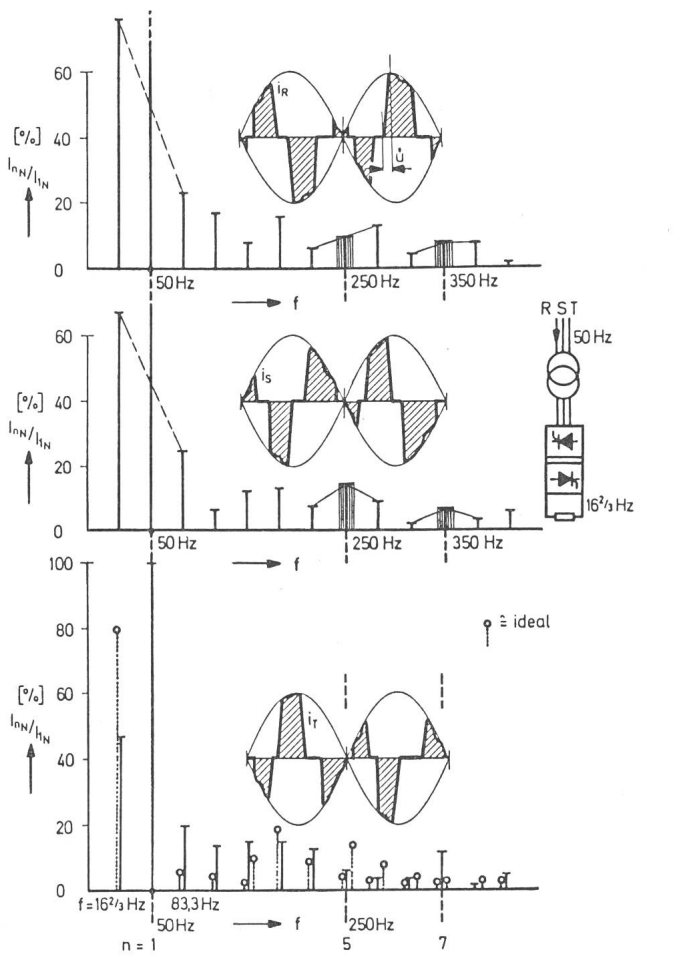


Fig. 11 Oberschwingungsspektrum des Netzstromes beim wirklichkeitsnahen, einphasigen Direktumrichter
 $f = 16,66$ Hz; $u_{am}/U_{dio} = 0,9$; $\varphi_2 = 60^\circ$
 Computergestützte Untersuchung.
 Für Phase T auch Vergleich mit dem Idealfall

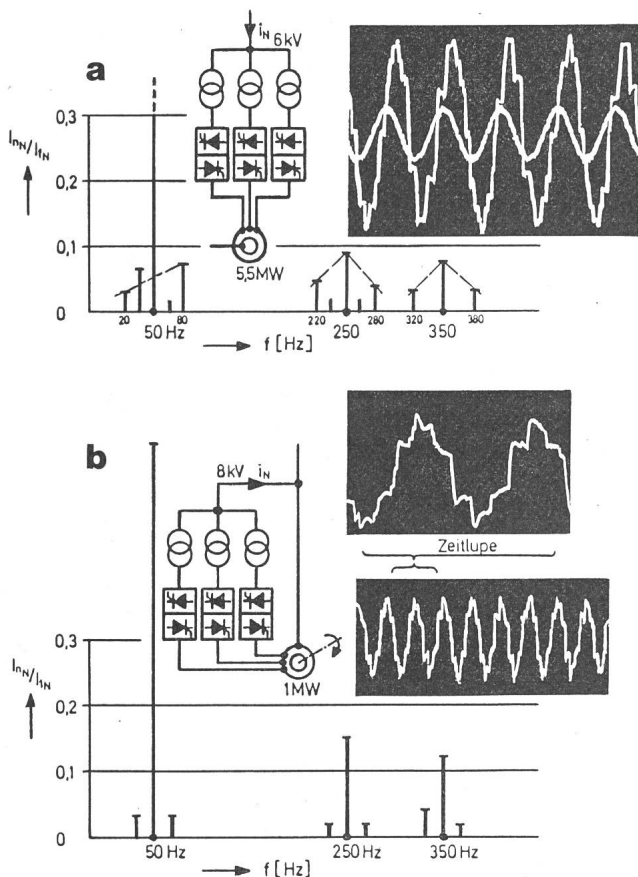


Fig. 12 Gemessenes Netzstromspektrum von dreiphasigen Direktumrichteranlagen
 a Zementmühlenantrieb: Trapezbetrieb;
 $u_{2m}/U_{d10} \approx 1,1$; $f = 5$ Hz
 b Kaskade für Netzkupplungsumformer;
 Versuchsaufbau $f = 3$ Hz $u_{dm}/U_{d10} \approx 0,4$

6. Schlussbemerkungen

Bei der harmonischen Analyse des Netzstromes des Direktumrichters wird als Grundlage die niederfrequente Periode ($1/f$) angenommen. In Wirklichkeit ist aber nicht immer die Wiederholungsperiode des Netzstromes gleich der Laststromperiode, d.h. der Netzstromverlauf (bei einphasigen Direktumrichtern) wiederholt sich exakt oft erst nach einigen niederfrequenten Perioden. Das führt dazu, dass einige Oberschwingungen zeitliche Schwankungen aufweisen können.

Selbstverständlich liefert die Fourieranalyse der einzelnen Netzstromperioden ganz andere Resultate als eine Analyse über längere Zeitperiode. Dies veranschaulicht Fig. 13.

Für die allgemeine Bewertung der Netzrückwirkung des Direktumrichters ist die Netzspannungsverzerrung [12] und nicht nur die Stromoberschwingungen selbst wichtig. Die Netzkapazitäten können zum Beispiel zu Resonanzerscheinungen führen [13]. Wie weit man die Netzrückwirkung des Direktumrichters als störend betrachten muss und welcher Parameter dabei die entscheidende Rolle spielt, hängt von den Eigenschaften der angeschlossenen Geräte ab. Mit Filtern an der Netzseite des Direktumrichters oder am Eingang des Verbrauchers kann man die Oberschwingungen vermindern. Die vorliegenden theoretischen Erkenntnisse können als Grundlage für die Auslegung der entsprechenden Filteranlagen dienen.

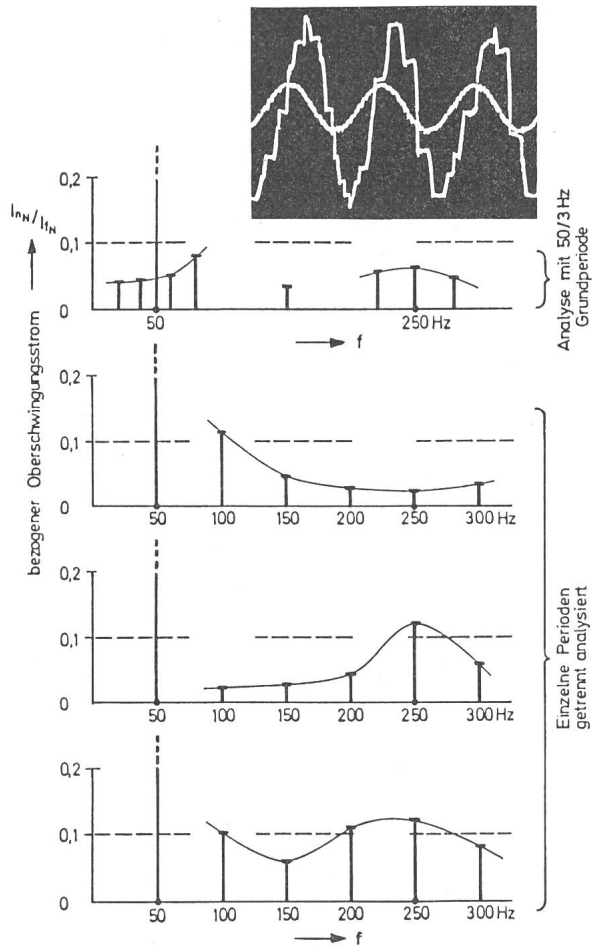


Fig. 13 Das Amplitudenspektrum von einzelnen Netzstromperioden ist ganz anders gestaltet als das Spektrum bei einer Langzeitanalyse Dreiphasiger Direktumrichter im Trapezbetrieb

Literatur

- [1] M. Schenkel: Technische Grundlagen und Anwendungen gesteuerter Gleichrichter und Umrichter. ETZ 53(1932)32, S. 761...770.
- [2] C. Ehrensperger: Umrichter mit Strom- und Spannungsglätter zur elastischen Kupplung eines Dreiphasen-Netzes, 50 Perioden, mit einem Einphasen-Netz $16\frac{2}{3}$ Perioden. Brown Boveri Mitt. 21(1934)6, S. 95...112.
- [3] K.W. Kanngiesser und S. Klingler: Ein 2-MVA-Umrichter zur Stromversorgung einer Stumpfschweissmaschine. BBC-Nachrichten 45(1963)9, S. 441...453.
- [4] J. Langer: Umrichterspeisung von Synchronmotoren für Rohrmühlen. Brown Boveri Mitt. 57(1970)3, S. 112...120.
- [5] K. Isch, A. Ablinger und H. Wolf: Anwendung getriebeloser Antriebe für grosse Rohrmühlen. Brown Boveri Mitt. 64(1977)10, S. 580...586.
- [6] R. Lundberg: Die Stromversorgung für den elektrischen Zugbetrieb der Schwedischen Staatsbahnen. Elektr. Bahnen 46(1975)6, S. 132...136, Nr. 7, S. 170...174 + Nr. 8, S. 192...200.
- [7] H. Stemmler: Wirk- und Blindleistungsregelung von Netzkupplungsumformern $50/16\frac{2}{3}$ Hz mit Umrichter-kaskade. Neue Technik 16(1974)6, S. 215...227.
- [8] B.R. Pelly: Thyristor phase-controlled converters and cycloconverters. Operation, control and performance. New York a.o., Wiley-Interscience, 1971.
- [9] W. McMurray: The theory and design of cycloconverters. Cambridge (Mass.) and London, MIT Press, 1972.
- [10] L. Gyugyi and B.R. Pelly: Static power frequency changers. Theory, performance and application. New York, a.o., Wiley-Interscience, 1976.
- [11] A. Kloss: Stromrichter-Oberschwingungen. Elektroniker 16(1977)2, S. EL 1 bis EL 8.
- [12] A. Kloss: Stromrichter-Netzspannungsverzerrung. Elektroniker 16(1977)8, S. EL 1...EL 7.
- [13] A. Kloss: Stromrichter-Resonanzerscheinungen. Elektroniker 17(1978)5, S. EL 1...EL 7.

Adresse des Autors

Albert Kloss, Fachassistent Abt. EIS, BBC Aktiengesellschaft Brown, Boveri & Cie., 5401 Baden.