

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: 81 (1990)

Heft: 23

Artikel: Oberschwingungen in Netzen mit Stromrichteranlagen

Autor: Kloss, Albert

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-903192>

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: 14.02.2026

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

Oberschwingungen in Netzen mit Stromrichteranlagen

Albert Kloss

Durch den stetig steigenden Einsatz der Leistungselektronik in der Industrie und der Energietechnik wird das Problem der Stromrichter-Oberschwingungen immer aktueller. Der Artikel fasst die wichtigsten allgemeinen Aspekte dieser Problematik kurz zusammen und weist darüber hinaus auch auf einige neuere Erkenntnisse aus dem Gebiete der Hochleistungsstromrichter hin.

L'utilisation sans cesse croissante de l'électronique de puissance dans l'industrie et les techniques de l'énergie fait croître l'actualité du problème des harmoniques générées par convertisseurs. L'article récapitule l'essentiel des aspects généraux de cette problématique et rappelle en outre quelques connaissances récemment acquises dans le domaine des convertisseurs à hautes performances.

Grundsätzliches

Die Abweichung der Netzspannung vom idealen Sinusverlauf lässt sich quantitativ am besten mittels der *harmonischen Analyse* ermitteln. Das Zeitbild der Spannung wird gemäss Fourier in eine Reihe von Sinusschwingungen unterschiedlicher Frequenz, Amplitude und Phasenlage zerlegt. Die Schwingung, deren Frequenz mit der Netzfrequenz übereinstimmt, wird als Grundschwingung bezeichnet, alle anderen Schwingungen werden Oberschwingungen (Harmonische) genannt. Je mehr Oberschwingungen die Netzspannung beinhaltet, je höher die Oberschwingungsamplituden liegen, desto verzerrter ist sie. Um die Qualität der Netzspannung auf einem für den Benutzer noch akzeptablen Niveau halten zu können, dürfen die Oberschwingungen bestimmte Grenzwerte nicht überschreiten. Der Oberschwingungsgehalt stellt ein quantitatives Mass für die «Netzverschmutzung» dar.

Oberschwingungen führen einerseits zu einer Erhöhung der Übertragungsverluste in den Netzen, andererseits vermindern sie den Wirkungsgrad bei den meisten Verbrauchern der elektrischen Energie. Sie können bei verschiedenen Geräten, insbesondere bei elektronischen Geräten, Funktionsstörungen verursachen. Im speziellen gefährden die Oberschwingungen auch Kompensationsanlagen. Als Quellen von Oberschwingungen kommen alle Komponenten mit *nichtlinearen Charakteristiken* wie Eisendrosseln oder Halbleiterelemente (z.B. auch jene in den Fernsehapparaten) und alle Verbraucher, deren Belastung nicht konstant ist, in Frage.

Neben den Oberschwingungen der Netzspannung werden oft auch Oberschwingungen des Netzstromes in Betracht gezogen. Man unterscheidet

weiter noch zwischen den geradezahligen und ungeradezahligen sowie zwischen den ganzzahligen und nichtganzzahligen (zwischenharmonischen) Oberschwingungen. Dabei gibt die Ordnungszahl der Oberschwingungen an, um welchen Faktor ihre Frequenz höher ist als die Netzfrequenz. Im Zusammenhang mit den Stromrichtern wird noch der Begriff der typischen (charakteristischen) und der untypischen (nicht charakteristischen) Oberschwingungen angewendet.

Um die Oberschwingungsbelastung der öffentlichen Netze auf einem erträglichen Niveau halten zu können, werden durch Normen sowohl auf der nationalen (SEV) als auch auf der internationalen (IEC) Ebene für die Oberschwingungserzeuger zulässige Grenzwerte festgelegt. Andererseits wird auch angegeben, mit wie starker Verschmutzung des Netzes durch Oberschwingungen die Verbraucher rechnen müssen.

Stromrichter-oerschwingungen in der Übersicht

Da die Stromrichter aus nichtlinearen Bauelementen, Dioden und Thyristoren, aufgebaut sind und noch dazu als geregelte Stellglieder eine nichtstationäre Belastung darstellen, gehören sie zu den bedeutenden Quellen der Netzoerschwingungen. In erster Näherung kann man die Stromrichter bezüglich Oberschwingungen als Stromquellen betrachten, da die Netzparameter den Stromrichter-Netzstrom relativ wenig beeinflussen. Zu der Verzerrung der Netzspannung kommt es dann zufolge der nichtsinusförmigen Spannungsabfälle, die der nichtsinusförmige Strom an den Netzimpedanzen verursacht. Oder anders gesagt: Die Spannungserschwingungen er-

Adresse des Autors

Albert Kloss, ABB Drives AG, 5300 Turgi

geben sich als Produkt der Stromober-schwingungen und der Impedanzen.

Im *stationären Betriebszustand* liefert jeder Stromrichter ein für seine Schaltung *charakteristisches* diskretes Oberschwingungsspektrum. So enthält der Netzstrom einer einfachen Drehstrom-Brückenschaltung (6-Puls-Stromrichter) nur Oberschwingungen von Ordnungszahlen, die sich durch die Formel

$$n = 6k \pm 1$$

mit $k = 1, 2, 3, \dots$ ergeben. Es sind dies Oberschwingungen mit den Ordnungszahlen $n = 5, 7, 11, 13, \dots$ (d.h. Oberschwingungen mit Frequenzen von 250 Hz, 350 Hz, 550 Hz, 650 Hz...). Weder die Last- oder Netzparameter noch der Steuerwinkel des Stromrichters haben auf dieses Frequenzspektrum einen Einfluss. Im Betrieb des Stromrichters kann es lediglich zur Veränderung der Amplituden der einzelnen Stromober-schwingungen kommen, die Frequenzen dagegen bleiben konstant.

Andere als nur die schaltungstypischen Oberschwingungen liefert der Stromrichter dann, wenn die *Last variabel* ist, wenn das Netz- und Steuersystem *nicht ideal symmetrisch* ist oder wenn die Grundschialtung in ein *Umrichtersystem* integriert wird. Im Gegensatz zu den charakteristischen Oberschwingungen, die einigen relativ einfachen Gesetzmässigkeiten unterworfen sind, lassen sich diese sogenannten *nichtcharakteristischen* Oberschwingungen viel schwieriger voraus-berechnen. Aus der praktischen Sicht sind jene nichtcharakteristischen Oberschwingungen von der grössten Bedeutung, die durch die Umrichter verursacht werden.

Umrichteroverschwingungen

Unter dem Begriff Stromrichter versteht man in der Regel leistungselektronische Grundschialtungen, die entweder als Gleichrichter oder Wechselrichter wirken können. Als Umrichter bezeichnet man Einrichtungen, die als Frequenzumformer dienen. Die am häufigsten verwendete Umrichterschaltung besteht aus einem Gleichrichter und einem Wechselrichter, die intern durch einen Gleichstrom- oder Gleichspannungszwischenkreis verbunden sind.

In der Antriebstechnik dienen die Umrichter zur Drehzahlregelung von Drehstrommotoren (je nach der Ausführung spricht man von U-Umrich-

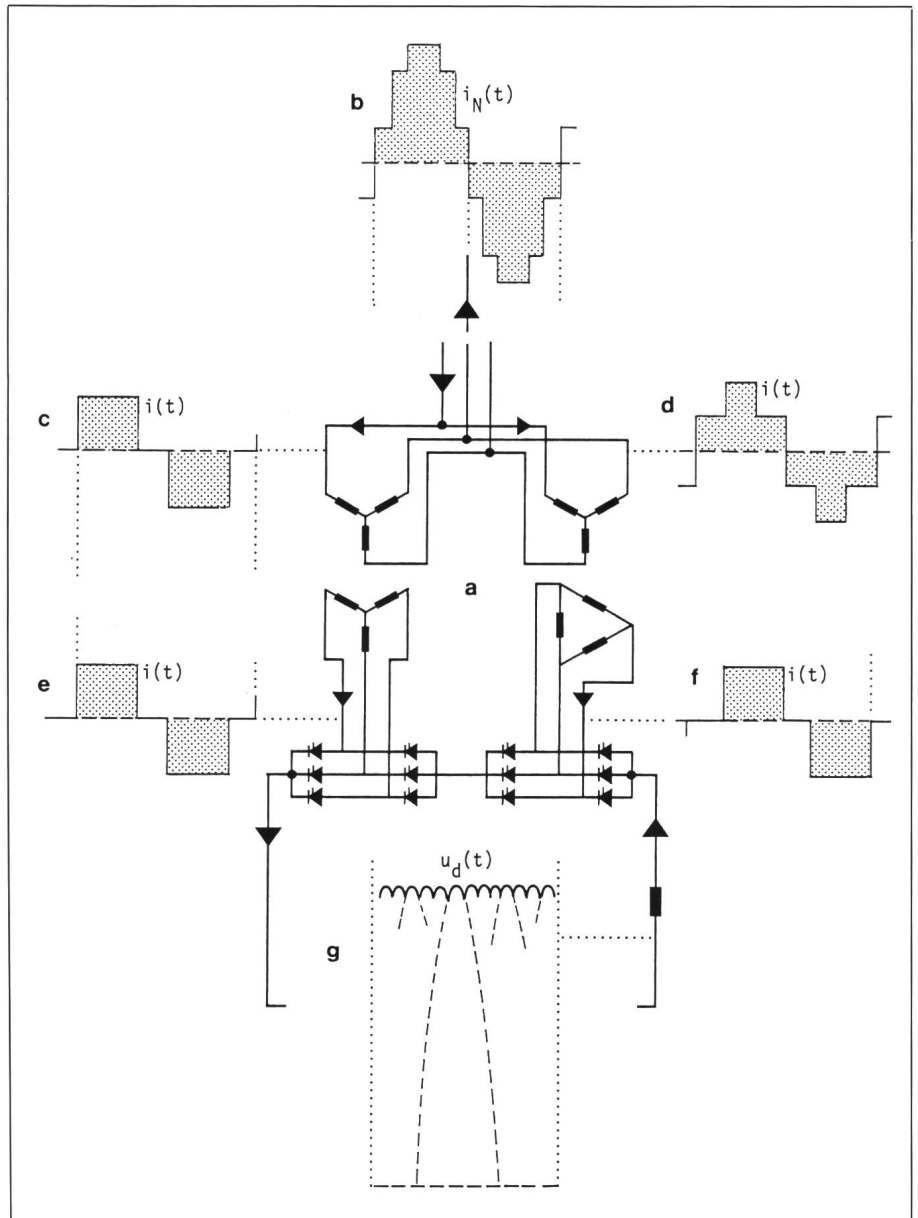


Bild 1 Zwölfpulsiger Stromrichter mit zwei seriegeschalteten Drehstrombrücken

- a Prinzipschema
- b idealisierter Verlauf des Netzstromes $i_N(t)$ mit Oberschwingungen für $n = 11, 13, 23, 25, \dots$; $I/I_1 = 1,0115$; die Oberschwingungen für $n = 5, 7, 17, 19, \dots$ von c und d heben sich hier auf
- c, f idealisierte Stromverläufe; die Ströme enthalten die Oberschwingungen der Ordnungszahlen $n = 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, \dots$ mit einem Oberschwingungsverhältnis von $I/I_1 = 1,0472$; die Ströme c und d unterscheiden sich nur in der *Polarität* der Oberschwingungen für $n = 5, 7, 17, 19, \dots$
- g die Klemmenspannung $u_d(t)$ (Gleichspannung) enthält nur die Oberschwingungen für $n = 12, 24, \dots$
- I Effektivwert des gesamten Stromes
- I_1 Effektivwert der Strom-Grundschiwingung
- t Zeit

ter, I-Umrichter, Stromrichter-Synchronmotor oder untersynchroner Stromrichter (Kaskade). In der Energietechnik verwendet man die Umrichter zur unterbrechungsfreien Notstromversorgung, zur Netzkupplung, bei Windkraftwerken usw.

Bei netzseitigen Gleichrichtern von Umrichtern wird in der Regel die sechspulsige Brückenschaltung angewendet. Wäre nun der netzseitige Gleichrichter vom lastseitigen Wechselrichter durch den Zwischenkreis vollständig entkoppelt, dann hätte der Netzstrom

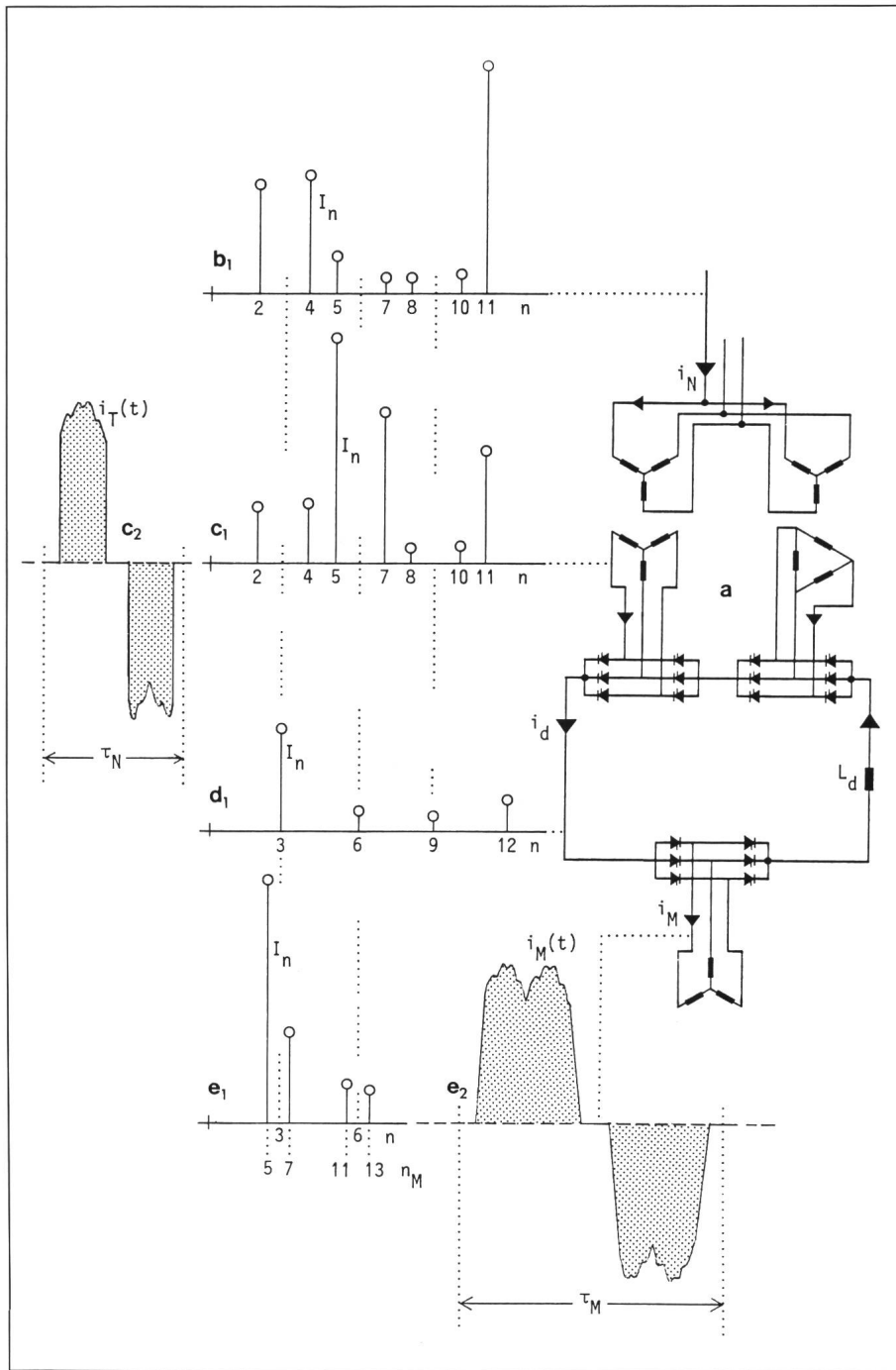


Bild 2 Unsymmetrische (12-Puls-/6-Puls-) Umrichterschaltung

Beispiel einer Computer-Simulation für Frequenzverhältnis $f_M = 0,5 f_N$. Im Spektrum des Netzstromes (b_1) sind untypische Oberschwingungen ($n = 2, 4, 5, 7, 8, 10$) deutlich erkennbar.

f_N Netzfrequenz; Periode $\tau_N = 1/f_N$

f_M Ausgangsfrequenz (Motorfrequenz); Periode $\tau_M = 1/f_M$

i_N Netzstrom

$i_T(t)$ Verlauf des Transformatorstromes i_T

$i_M(t)$ Verlauf des Laststromes i_M

a Prinzipschema

b_1, \dots, e_1 Frequenzspektrum des Netzstromes $i_N(b_1)$, des Transformatorstromes $i_T(c_1)$, des Gleichstromes $i_d(d_1)$ und des Motorstromes $i_M(e_1)$; alle ohne die Grundschwingung dargestellt

I_n Effektivwerte der Oberschwingungen der Ordnungszahl n ; bezogen auf den Effektivwert I_1 der Grundschwingung betragen jene der Oberschwingungen bei b_1 : $I_{11}/I_1 \approx 0,10$, bei c_1 : $I_5/I_1 \approx 0,20$, bei d_1 : $I_3/I_0 \approx 0,10$ und bei e_1 : $I_5/I_1 \approx 0,20$

n, n_M Ordnungszahlen der Oberschwingungen, bezogen auf die Netzfrequenz (n_N) und auf die Ausgangsfrequenz (n_M)

t Zeit

nur die für die sechspulsige Schaltung charakteristischen Oberschwingungen $n = 5, 7, 11, 13$ usw. Zuzufolge der nicht-idealen Entkopplung übertragen sich aber Oberschwingungen der Lastseite (bei den geregelten Antrieben sind die Frequenzen der Motorüberschwingungen drehzahlabhängig) in das Netz, wo sie sich als *nichtcharakteristische Oberschwingungen* präsentieren, da sie nur selten mit den für den Netzgleichrichter typischen Ordnungszahlen übereinstimmen. Die Amplituden der nichtcharakteristischen Netzstrom-Oberschwingungen des Umrichters hängen vom Entkopplungsgrad (d.h. von der Gleichstrominduktivität) ab, und die Frequenzen werden durch die Frequenz der Last bestimmt.

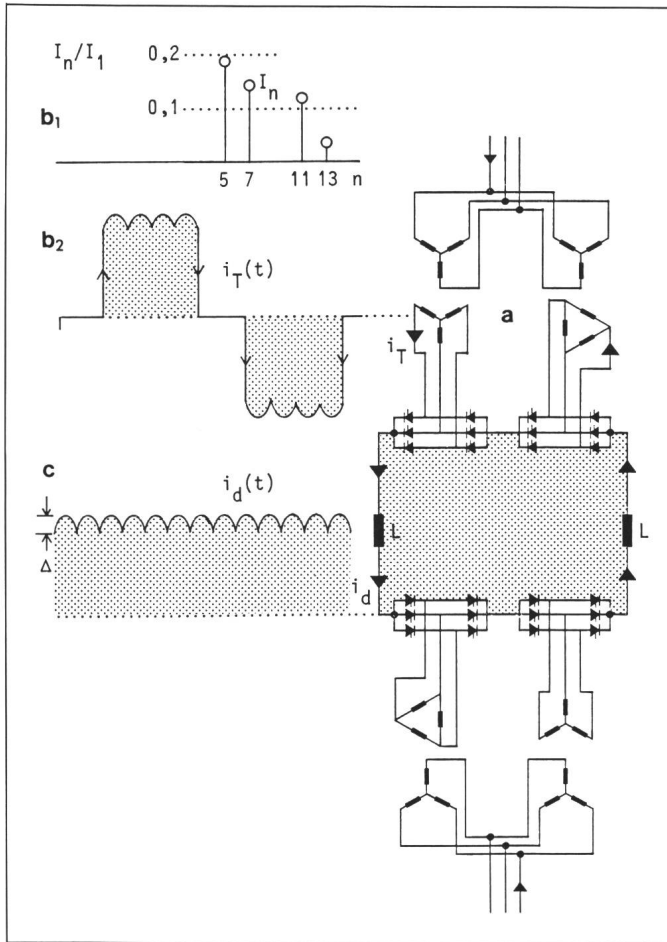
Die Übertragung der Oberschwingungen aus der Drehstrom-Lastseite in die Drehstrom-Netzseite spielt sich in zwei Stufen ab. In der ersten Stufe wird der Gleichstrom im Zwischenkreis durch den Laststrom moduliert, d.h. im Gleichstromkreis entstehen zuerst (aus der Sicht des Netzgleichrichters) fremde Strom-Oberschwingungen. In der zweiten Stufe erfolgt dann die Übertragung der fremden gleichstromseitigen Oberschwingungen in das Netz. Jede Gleichstrom-Oberschwingung der Frequenz f_g teilt sich im Netzstrom der Frequenz f_n in ein Oberschwingungspaar der Frequenzen $f = f_g \pm f_n$ auf.

Die Amplituden dieses Paares liegen bei etwa 50% der ursprünglichen Amplitude der Gleichstromoverschwingung.

Bei Gleichstromoverschwingungen mit $f_g < 2 f_n$ ergibt sich $f < f_n$, d.h. im Netzstrom erscheinen Schwingungen, die unterhalb der Netzfrequenz f_n liegen («Unterschwingungen»). Der Extremfall $f_g = f_n$ führt zu $f = 0$, was bedeutet, dass nun im Netzstrom eine Gleichstromkomponente vorhanden ist.

Oberschwingungen beim zwölfpulsigen Stromrichter

Die einfache Drehstrom-Brückenschaltung wirkt sechspulsig: im erzeugten Gleichstrom sind innerhalb einer Netzperiode 6 Pulse erkennbar, und die erste Oberschwingung im Gleichstrom weist die Ordnungszahl $n = 6$ aus. Bei grösseren Stromrichterleistungen werden die Brücken über Anpassungstransformatoren am Netz angeschlossen. Die Schaltung der Transformatorwicklungen – Dreieck, Stern – ist dabei frei wählbar, sie hat auf die Wir-



- $i_d(t)$ Verlauf des Gleichstromes i_d
 $i_T(t)$ Verlauf des Transformatorstromes i_T
 a Prinzipschema
 b_1 Frequenzspektrum des Transformatorstromes i_T ;
 I_n : Oberschwingungen des Transformatorstromes
 I_1 : Grundschiwingung des Transformatorstromes
 c Strom im Zwischenkreis; Δ : Anteil der dominanten Oberschwingung mit $n = 12$
 L Gleichstrominduktivität
 t Zeit

kungsweise des Stromrichters keinen Einfluss. Werden nun aber zwei gleiche Brücken, deren Transformatoren unterschiedlich (der eine Stern, der andere Dreieck) geschaltet sind, in Serie oder parallel an der Gleichstromseite zusammengeschlossen, dann kommt es zu einer Verdoppelung der Pulszahl: der Stromrichter wirkt nun 12pulsig. Die $n = 6$ Oberschwingung im Gleichstrom wird durch die Zusammenschaltung aufgehoben (Bild 1).

Auch der Netzstrom des Stromrichters wird durch die Bildung der 12-Puls-Schaltung beeinflusst: die Oberschwingungen $n = 5, 7, 17, 19, \dots$ sind nicht mehr vorhanden, und das niedrigste Oberschwingungspaar weist die Ordnungszahlen $n = 11$ und 13 auf. Der Oberschwingungsgehalt im Netz-

Bild 4
Zwölfpulsiges
Umrichtersystem mit
zwei Gleichstrom-
zwischenkreisen

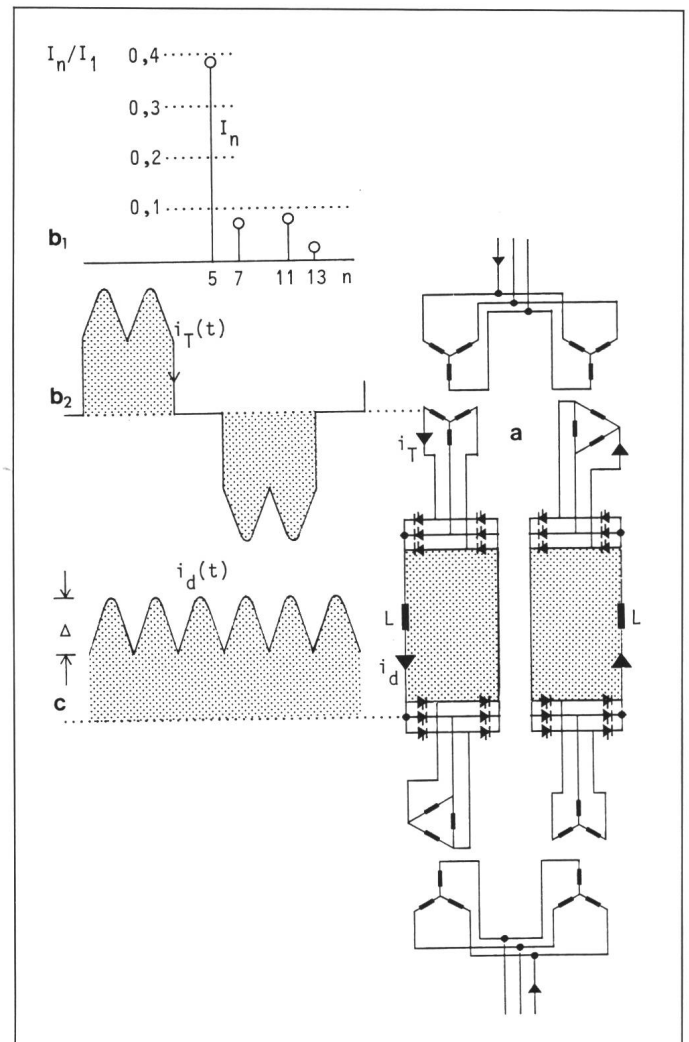
Bild 3
Zwölfpulsiges
Umrichtersystem mit
gemeinsamem
Gleichstromzwi-
schenkreis

strom des 12-Puls-Stromrichters entspricht nur etwa 50% desjenigen der 6pulsigen Schaltung. Die charakteristischen Oberschwingungen der 12-Puls-Schaltung ergeben sich durch die Formel

$$n = 12 \cdot k \pm 1$$

mit $k = 1, 2, 3, \dots$

Die Art der Brücken-Zusammenschaltung (in Serie oder parallel) hat grundsätzlich weder auf den Gleichstrom noch auf den Netzstrom einen Einfluss. Der Transformatorstrom weist bei der Parallelschaltung die gleiche Form auf wie beim einfachen 6-Puls-Stromrichter; bei der Serieschaltung



- $i_d(t)$ Verlauf des Gleichstromes i_d
 $i_T(t)$ Verlauf des Transformatorstromes i_T
 a Prinzipschema
 b_1 Frequenzspektrum des Transformatorstromes i_T ;
 I_n : Oberschwingungen des Transformatorstromes
 I_1 : Grundschiwingung des Transformatorstromes
 c Strom im Zwischenkreis; Δ : Anteil der dominanten Oberschwingung mit $n = 6$
 L Gleichstrominduktivität
 t Zeit

sieht er dagegen ganz anders aus (außer beim ideal glatten Gleichstrom, wo die beiden Verläufe identisch sind). In beiden Fällen beinhaltet der Transformatorstrom zwar Oberschwingungen der gleichen Ordnungszahl ($n = 5, 7, 11, 13, \dots$), deren Amplituden sind aber nicht identisch (anderes Spektrum). Mit zunehmender Welligkeit des Gleichstromes nehmen diese Unterschiede zu.

Da die 12-Puls-Schaltung im Vergleich zum 6-Puls-Stromrichter die Oberschwingungsbelastung des Netzes reduziert, wird sie überall dort, wo sie wirtschaftlich tragbar ist – was vorwiegend bei höheren Leistungen der Fall ist –, eingesetzt. So werden Umrichter im MW-Bereich oft an der Netzseite 12pulsig aufgebaut.

Zwölfpulsiger Umrichter

Wie beim 6pulsigen Zwischenkreis-Umrichter treten auch bei der 12pulsigen Ausführung im Netzstrom grundsätzlich nichtcharakteristische Oberschwingungen auf. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn der Umrichter nicht symmetrisch aufgebaut wird, d.h. wenn die Lastseite im Gegensatz zur Netzseite 6pulsig arbeitet (Bild 2).

Der zweiseitige 12pulsige Umrichter (Netzseite und Lastseite 12pulsig) kann intern entweder mit einem gemeinsamen oder mit zwei getrennten Zwischenkreisen verwirklicht werden. Was die Netzurückwirkung betrifft, so sind die beiden Schaltungsvarianten gleichwertig. In bezug auf die Transformator-Oberschwingungsbelastung existieren aber bedeutende Unterschiede. Mit einem gemeinsamen Zwischenkreis entspricht die Transformatorbelastung derjenigen einer 12-Puls-Schaltung, bei zwei parallelen Zwischenkreisen derjenigen einer 6-Puls-Schaltung (Bilder 3 und 4).

Die Beeinflussung der Stromrichterwirkung durch das Netz

In erster Näherung kann der Stromrichter in bezug auf das Netz als Stromquelle für Oberschwingungen betrachtet werden. Bei genaueren Untersuchungen muss allerdings der Einfluss der Netzparameter auf die Stromrichterwirkung berücksichtigt werden. Das trifft insbesondere bei sehr «weichen» Netzen oder Netzen mit grossen Kondensatoreinheiten zu, denn sie können den Verlauf der Kommutierung des Stromrichters so stark beeinflussen, dass sich dies im Oberschwingungsspektrum des Netzstromes widerspiegelt (Verstärkung der Ober-

schwingungen für $n = 7$ und Reduktion der Oberschwingungen für $n = 5$).

Auch die Netzspannungsverzerrung (verursacht durch andere Verbraucher) kann unter Umständen die Wirkungsweise des Stromrichters beeinträchtigen. So wie die Oberschwingungen des Gleichstromes in den Netzstrom übertragen werden, können sich auch die Oberschwingungen der Netzspannung in die Stromrichter-Gleichspannung transformieren. Die $n=5$ -Netzspannungs-Oberschwingung erscheint zum Beispiel auf der Gleichspannungsseite des 12-Puls-Stromrichters als eine $n=6$ -Komponente, welche die 12pulsige Wirkung stört (Bild 5).

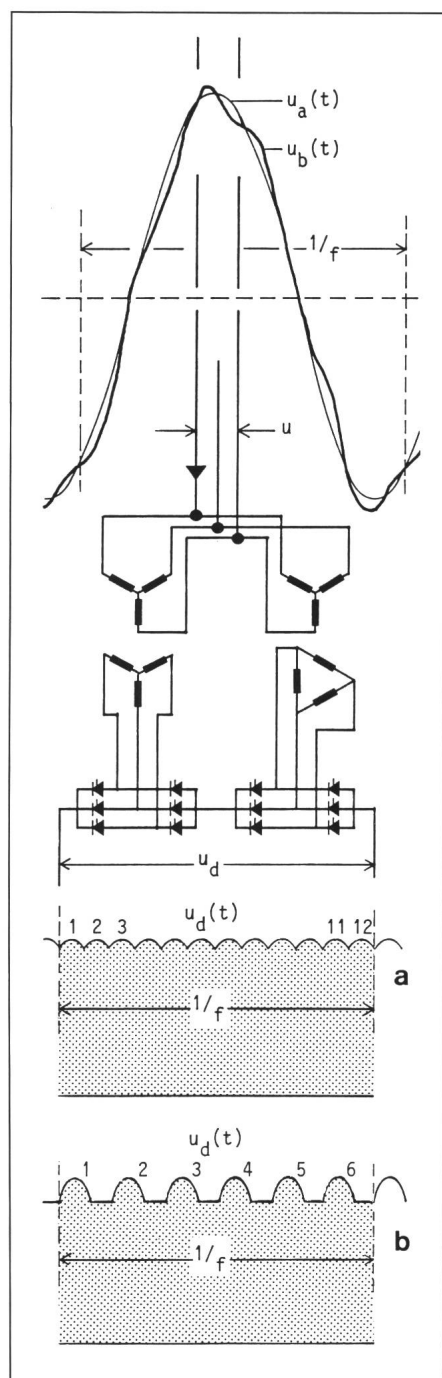


Bild 5 Transformation der $n = 5$ -Spannungs-Oberschwingung von der Netz- auf die Gleichstromseite des Zwölfpulsstromrichters

- a ideale Spannungsverläufe: Gleichspannung $u_d(t)$ bei ideal sinusförmiger Netzspannung $u_b(t)$
- b gestörte Spannungsverläufe: Gleichspannung $u_d(t)$ bei Netzspannung $u_b(t)$ mit starker Oberschwingung bei $n=5$
- u Netzspannung
- f Netzfrequenz
- u_d Gleichspannung
- t Zeit

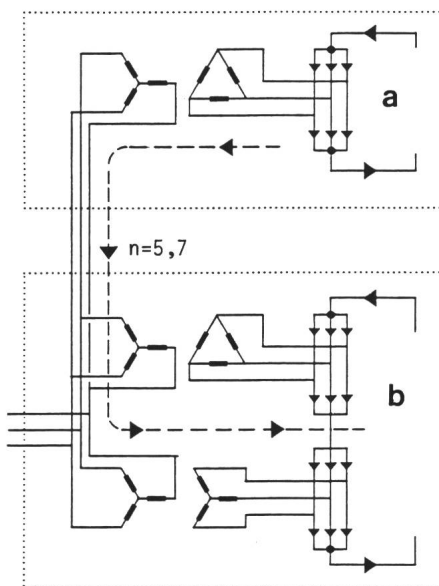


Bild 6 Wechselwirkung zwischen Stromrichtern

Schematische Darstellung von Zwölf- und Sechspulsstromrichtern am gemeinsamen Netz. In der Gleichspannung der Zwölfpulschaltung (b) erscheint dann die $n=6$ -Oberschwingung der Sechspulschaltung (a) über die Netzotherschwingungen bei $n = 5, 7, \dots$

Zu einer solchen Störung eines 12-Puls-Stromrichters kann es z.B. dann kommen, wenn er gemeinsam an ein Netz mit 6-Puls-Stromrichtern angeschlossen wird (Bild 6).

Literatur

- [1] Begrenzung niederfrequenter Beeinflussungen in Stromversorgungsnetzen. ETG-Informationstagung, Donnerstag, 12. November 1987, Kongresshaus Zürich, Reihe ETG: Band 2 d – Zürich, SEV, 1987.
- [2] A. Kloss: Oberschwingungen. Beeinflussungsprobleme der Leistungselektronik. Berlin, VDE-Verlag, 1989.

HAEFELY



300 kV

Haefely hat speziell für die Schweizer Netzverhältnisse Strom-, Spannungswandler und Messgruppen mit einer dauernd zulässigen Betriebsspannung von 300 kV entwickelt.

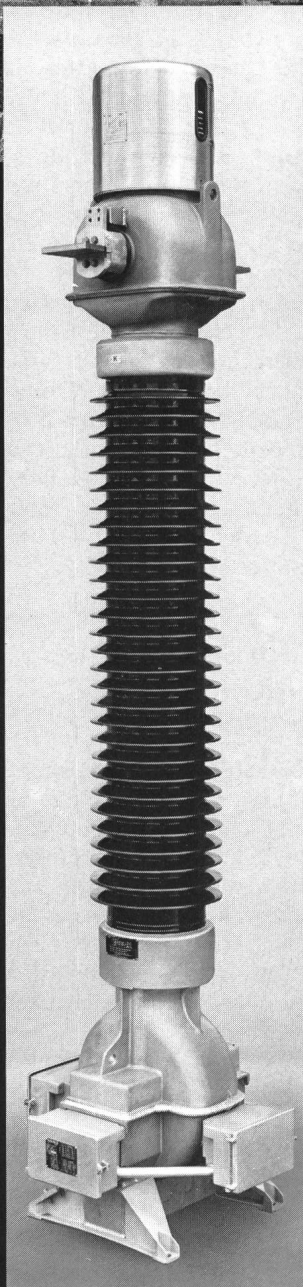
Die Prüfwechselspannung wurde auf 510 kV erhöht.

Die Wandler entsprechen den Anforderungen nach IEC 185 (44-1), 186 (44-2), 44-3, der Isolations-Koordinierung 71-1 und der SEV-Regel 3304-1986 Teilentladungsmessung an Messwandlern.

Haefely a développé spécialement pour les conditions des réseaux Suisses, des transformateurs de mesure TI, TP et groupes combinés pour une tension de service permanente de 300 kV.

La tension d'essai a été portée à 510 kV.

Les transformateurs de mesure correspondent aux exigences IEC 185 (44-1), 186 (44-2), 44-3, à la coordination de l'isolation 71-1 et à la règle de l'ASE pour la mesure des décharges partielles.



**dauernd
zulässige Betriebsspannung
tension de service permanente**

Höchstzulässige Betriebsspannung	Prüfwechselspannung	Schaltstoss-Haltespannung (SIL)	Blitzstoss-Haltespannung
Tension la plus élevée pour le matériel Um	Tension nominale de tenue de court durée à fréquence industrielle 1 min	Tension nominale de tenue aux chocs de manœuvre positif nass/sous pluie 250/2500 µ sec	Tension nominale de tenue aux chocs de foudre 1,2/50 µ sec
Effektivwert Valeur efficace	Effektivwert Valeur efficace	Scheitelwert Valeur de crête	Scheitelwert Valeur de crête
245	395	650	
300	460	750	
	510	850	

Emil Haefely & Cie AG

Lehenmattstrasse 353
4028 Basel
Tel. 061-315 51 11

Suisse romande:
Sotero SA
36, rue des Charpentiers
1110 Morges
Téléphone 021-801 59 76