



Die richtige Verbindung

Frequenzumrichter für die Bahnstromversorgung
Gerhard Linhofer, Philippe Maibach, Niklaus Umbricht

Elektrische Bahnen benötigen viel Strom. Tatsächlich betreiben viele Bahngesellschaften eigene Hochspannungsnetze und einige sogar eigene Kraftwerke. Doch kaum eine Bahn ist vollständig autonom, da ein Energieaustausch mit dem Landesnetz stattfinden muss. Dies ist nicht so einfach, wie es klingt, denn aus historischen Gründen werden viele Bahnnetze mit anderen Frequenzen betrieben als das örtliche Stromnetz. Hinzu kommt, dass die Netze nicht immer synchron sind.

Früher wurden rotierende Maschinen verwendet, um Strom von einer Frequenz zu anderen umzuwandeln. Eventueller Frequenzschlupf wurde mithilfe zusätzlicher Maschinen ausgeglichen – allerdings nur in begrenztem Maße. Neuerdings werden hierfür große leistungselektronische Frequenzumrichter eingesetzt, die sich gegenüber ihren rotierenden Vorgängern durch eine Reihe von Vorteilen wie kürzere Reaktionszeiten und eine bessere Blindleistungsregelung auszeichnen.

Stromrichter

Leistungselektronische Frequenzumrichter zur Kopplung nichtsynchronisierter Netze bzw. Netze mit unterschiedlichen Frequenzen gibt es seit vielen Jahren. Diese basieren meist auf netzkommutierten Thyristoren. Erst seit neuerer Zeit werden dafür Umrichter mit abschaltbaren Halbleitern in Form von Spannungszwischenkreis-Umrichtern eingesetzt. Eine besondere Herausforderung stellt die Stromversorgung von einphasigen Bahnnetzen dar. Erst seitdem Umrichter mit Spannungszwischenkreis zur Verfügung stehen, haben sich auch auf diesem Gebiet leistungselektronische Systeme durchgesetzt und die früher üblichen rotierenden Frequenzumformer verdrängt.

Rückblick und heutiger Stand

Für elektrische Vollbahnen werden heute im Wesentlichen drei unterschiedliche Stromsysteme verwendet.

In Ländern oder Regionen, in denen die Bahnen erst sehr spät elektrifiziert wurden (nachdem auch leistungselektronische Geräte für die Drehzahlregelung von Antriebsmotoren zur Verfügung standen), werden die Fahrdrahlleitungen häufig aus dem öffentlichen Netz mit einer Frequenz von 50 oder 60 Hz versorgt. Die Fahrdrahlspannung beträgt meist 25 kV.

Bevor leistungselektronische Geräte zur Verfügung standen, mussten andere Stromversorgungssysteme verwendet werden. In einigen Ländern, in denen die Bahnen schon wesentlich früher elektrifiziert wurden, wurde Gleichstrom (mit einer typischen Fahrdrahlspannung von 1,5 und 3 kV) gewählt, da sich die Drehzahl von Gleichstrommotoren einfach regeln lässt. In anderen Ländern wiederum entschied man sich für Wechselstrom und verwendete Wechselstrom-Kommutatormotoren. Deren Drehzahl ist zwar auch einfach regelbar, doch da eine Frequenz von 50 oder 60 Hz für den Kommutator zu hoch gewesen wäre, wurde eine niedrigere Frequenz gewählt.

Bahnen, die mit Einphasen-Wechselstrom niedriger Frequenz betrieben werden, finden sich zum Beispiel

- an der Ostküste der USA (25 Hz),
- in Norwegen und Schweden (16,7 (16 $\frac{2}{3}$) Hz),
- in Deutschland, Österreich und der Schweiz (16,7 (16 $\frac{2}{3}$) Hz).

Zum Energieaustausch mit dem dreiphasigen Landesnetz wurden früher rotierende Netzumformer eingesetzt, die aus zwei elektrischen Maschinen mit unterschiedlicher Polpaarzahl auf einer gemeinsamen mechanischen Welle bestehen. Dabei gibt es zwei unterschiedliche Bauarten: In den USA und in Skandinavien werden für beide Netzseiten Synchronmaschinen verwendet, sodass die Netze quasi „synchronisiert“ sind. Das Frequenzverhältnis ist fix und unveränderbar. In Mitteleuropa haben die Bahnbetreiber von Anfang an eigene Kraftwerke mit Einphasenmaschinen aufgebaut und ein eigenes, vom dreiphasigen Landesnetz unabhängiges Hochspannungs-Übertragungsnetz betrieben. Die beiden Netze sind somit nicht fest „synchronisiert“, sondern das Frequenzverhältnis ist innerhalb bestimmter Grenzen flexibel, weshalb rotierende Frequenzumformer besonderer Bauart (die sog. Scherbius-Maschinen) erforderlich waren. Nur auf der Einphasenseite wurden Synchronmaschi-

nen verwendet. Am Dreiphasennetz kam eine Asynchronmaschine mit bewickeltem Rotor und Schleifringen zum Einsatz. Zusätzliche (kleine) Maschinensätze regeln dabei die Schlupffrequenz im Rotor und gestatten Drehzahländerungen innerhalb eines gewissen Bereichs.

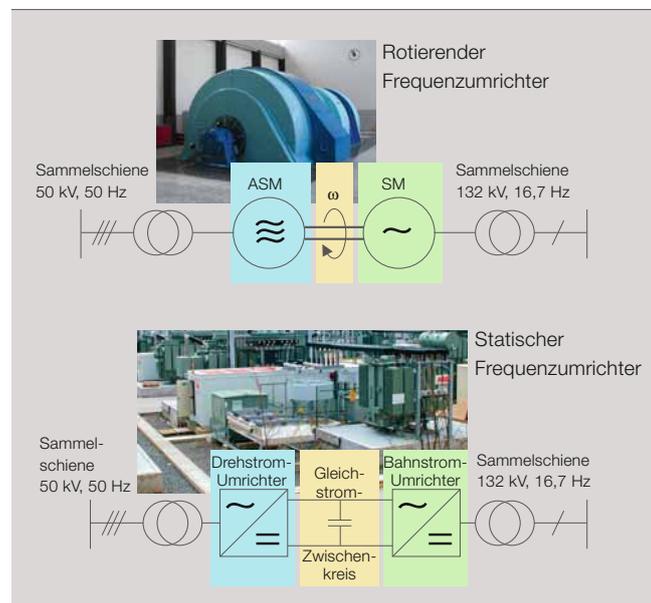
Seit einigen Jahren haben sich für diesen Zweck leistungselektronische Frequenzumrichter in Form von Spannungsumrichtern durchgesetzt. Rotierende Frequenzumformer werden nicht mehr gebaut. Stattdessen wurden in den letzten 15 Jahren Frequenzumrichter mit einer Gesamtleistung von fast 1.000 MW in Betrieb genommen. Ungefähr zwei Drittel davon wurden von ABB geliefert. Zurzeit sind weitere derartige Frequenzumrichter mit einer Gesamtleistung von etwa 600 MW im Bau oder bestellt. Rund 500 MW davon werden von ABB geliefert.

Vergleich mit rotierenden Umformern

Herkömmliche netzgeführte Stromrichter kamen zur Versorgung von derartigen Einphasennetzen nie in Frage. Bei Einphasennetzen ist im Gegensatz zu Dreiphasennetzen eine Vielpulsigkeit nicht realisierbar, was zu nicht tragbaren Spannungsverzerrungen führt. Dennoch wurden vereinzelt Direktumrichter (sog. Cyclo-Converter) gebaut, doch die auf beide Netze rückwirkenden Oberwellen sind sehr groß und stören den Netzbetrieb. Ein weiterer Nachteil dieser Bauarten ist, dass die ins Einphasennetz abgegebene Leistung mit der doppelten Netzfrequenz des Einphasennetzes fluktuiert und diese Leistungsfluktuation sich dann auch im Dreiphasennetz störend bemerkbar macht.

Erst nachdem leistungsstarke abschaltbare Halbleiter in Form von GTOs (Gate-Turn-Off-Thyristoren) zur Verfügung standen, konnten selbstgeführte Umrichter mit Spannungszwischenkreis gebaut werden.

1 Rotierender Frequenzumrichter mit Asynchronmaschine (ASM) und Synchronmaschine (SM) (oben) und statischer Frequenzumrichter in Freiluftaufstellung (unten).



2 IGCT (Integrated Gate-Commutated Thyristor) mit dem Halbleiterbauelement in seinem Presspack-Gehäuse (links) und der Ansteuer-einheit (rechts). Die Ansteuer-einheit ist extrem niederinduktiv über eine mehrlagige Leiterplatte mit dem Halbleiter verbunden.



Die Kopplung eines Dreiphasennetzes mit einem Einphasennetz stellt höhere Anforderungen an rotierende Umformer und leistungselektronische Umrichter als die Kopplung von zwei Dreiphasennetzen. Ein wesentlicher Grund dafür ist, dass die Leistung im Einphasennetz mit dem doppelten der Netzfrequenz pendelt. Bei rotierenden Umformern werden diese Drehmoment- und Leistungsfluktuationen von den rotierenden Massen aufgenommen und gedämpft. Die dabei entstehenden Vibrationen müssen jedoch von den mechanischen Verankerungen und dem Fundament aufgenommen werden, was wiederum eine komplexere Konstruktion und Ausführung sowohl des Maschinensatzes als auch des Fundaments erfordert.

Bei Spannungsumrichtern wird diese Aufgabe von einem Schwingkreis bestehend aus einer Kondensatorbank und einer Induktivität übernommen, der auf die doppelte Betriebsfrequenz des Einphasennetzes abgestimmt ist.

Eine weitere Herausforderung besteht darin, dass eine derartige Anlage nicht nur als Spannungs- und Blindleistungsquelle fungieren muss, sondern bei Netzstörungen auch in der Lage sein muss, den unterbrechungslosen Übergang vom Verbundbetrieb zum Inselbetrieb zu beherrschen. Außerdem muss sie einen Speiseabschnitt auch alleine versorgen können und nach

Behebung einer Netzstörungen wieder in den Verbundbetrieb rücksynchronisierbar sein **1**.

Beispiele für Frequenzumrichter

Die statische Umrichtertechnik hat bei ABB eine lange Tradition. Die ersten Umrichter für die Bahnstromversorgung wurden in Schweden in Betrieb genommen. Die dabei verwendete Technik eignete sich allerdings nicht sehr gut für den Einsatz in Mitteleuropa, wo die Struktur des Bahnstromnetzes ganz anders und die Anforderungen an die Spannungsqualität höher waren. Die ersten beiden modernen Frequenzumrichter mit einer Leistung von je 25 MVA gingen 1994 in Giubiasco (Schweiz) in Betrieb. Basierend auf diesem erfolgreichen Projekt wurde die GTO-Technik weiterentwickelt, und 1996 konnte in Bremen (Deutschland) ein Umrichter mit einer Nennleistung von 100 MVA in Betrieb genommen werden. Dieser Umrichter war bereits mit „hart“ angesteuerten GTOs bestückt. Dies waren GTOs mit einem konzentrischen Gate und einer Ansteuer-einheit, die das Steuersignal über eine extrem niederinduktive Zuleitung zum Gate brachte. Das Ergebnis war ein wesentlich verbessertes Schaltverhalten der GTOs. Diese Technik wurde schließlich auch in einer Bahnstromrichteranlage in Karlsruhe (Deutschland) eingesetzt, die 1999 mit einer Nennleistung von zweimal 50 MW/67 MVA in Betrieb ging.

Der nächste Schritt war die Entwicklung eines neuen Halbleiterelements, des IGCT (Integrated Gate-Commutated Thyristor)¹⁾. Hierbei handelt es sich um eine Weiterentwicklung des GTO mit wesentlich besseren Schalteigenschaften, geringeren Verlusten und der niederinduktiven Ansteuer-einheit als integriertes „Bauelement“. Die kompaktere Bauweise führte schließlich zur Entwicklung von standardisierten Umrichtermodulen, mit denen sich Umrichter verschiedener Leistungsklassen bauen lassen. Heute sind 21 Umrichter der Leistungsklasse von 15 bis 20 MW zur vollsten Zufriedenheit der Kunden in Betrieb. Aufgrund des modularen Aufbaus lassen sich auch andere Leistungsklassen problemlos realisieren. Dies erfolgt sinnvollerweise in Stufen von 15 MW durch einfaches Parallelschalten der Umrichtermodule und der darauf basierenden Umrichter.

Diese Umrichtergeneration setzte neue Maßstäbe im Hinblick auf Performance, Platzbedarf und kurze Montage- und Inbetriebsetzungszeiten. Die positiven Rückmeldungen der Kunden zeigen, dass ABB mit dem standardisierten Bahnstromumrichter die Bedürfnisse ihrer Kunden ausgezeichnet abdeckt.

Fußnote

¹⁾ Mehr zum Thema IGCTs lesen Sie im Artikel „Kleiner Punkt mit großer Wirkung“ auf Seite 15 dieses Hefts.

Stromrichter

Das Grundmodul

Das „Herz“ eines Umrichtermoduls, der IGCT, ist in **2** dargestellt. Der IGCT vereinigt die Vorteile von GTO und IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), d. h. Robustheit, geringe Schalt- und Durchlassverluste sowie ein schnelles Schaltvermögen. Die Eigenschaften dieses Halbleiterbauelements für die hier beschriebene Anwendung (Hochleistung, Mittelspannung) sind nach wie vor unerreicht. So weist ein IGBT für dieselbe Anwendung (Hochspannungs-IGBT, IEGT) im Verhältnis zur selben Siliziumfläche vergleichbare Schaltverluste, aber wesentlich höhere Durchlassverluste auf. Des Weiteren erlaubt der IGCT ein praktisch beschaltungsloses Stromrichterdesign. So ist für ein Phasenmodul lediglich eine einfache Beschaltung notwendig, wohingegen jeder GTO aufwändig beschaltet werden muss. Dies wiederum birgt Vorteile hinsichtlich Kosten, Kompaktheit und Verluste.

Verluste entstehen immer dann, wenn ein Halbleiter Strom leitet und schaltet. Diese Verluste können durch Reduzierung der Schaltfrequenz minimiert werden. Andererseits sollte die Schaltfrequenz aufgrund der erzeugten Oberwellen nicht zu tief gewählt

werden. Somit besteht ein Optimierungspotenzial zwischen Verlusten und Oberwellen. Eine elegante Möglichkeit, dieses Dilemma teilweise zu überwinden, ist die Wahl einer Multi-Level-Topologie. Dies erlaubt es, den Stromrichter mit einer relativ geringen Schaltfrequenz zu betreiben und trotzdem gute Ergebnisse bezüglich der Oberwellen zu erzielen.

Verwendet werden Dreipunkt-Phasenbausteine, um aus einer Gleich- eine Wechselfspannung zu erzeugen. Solche Bausteine können vereinfacht als Umschalter mit drei Positionen betrachtet werden, dessen Ausgang auf das positive (+), Null- (0) oder negative Potenzial (-) des Zwischenkreises geschaltet werden kann **3**.

Zwei derartige Phasenmodule werden zu einem Dreipunkt-Doppelphasenmodul kombiniert. Alle IGCTs werden beidseitig gekühlt. Das Kühlmedium (ein Wasser/Glykologemisch) wird den Kühlkörpern über Schlauchverbindungen zugeführt. Das mechanische Design des Doppelstapels ermöglicht eine äußerst kompakte Bauweise. So können die erforderlichen geringen Streuinduktivitäten im Stapel erreicht und die Halbleiter optimal genutzt werden. Trotzdem ist der Zugriff auf

alle Halbleiter im Stapel möglich, um einen problemlosen Austausch zu gewährleisten. So kann jeder Halbleiter mithilfe eines einfachen Werkzeugs ohne Unterbrechung des Kühlwasserkreislaufs ausgetauscht werden. Die Ausführung eines solchen Doppelstapels ist in **4** dargestellt.

Umrichteranlage der Leistungsklasse 15–20 MW

5 zeigt das Prinzipschaltbild einer kompletten Umrichteranlage.

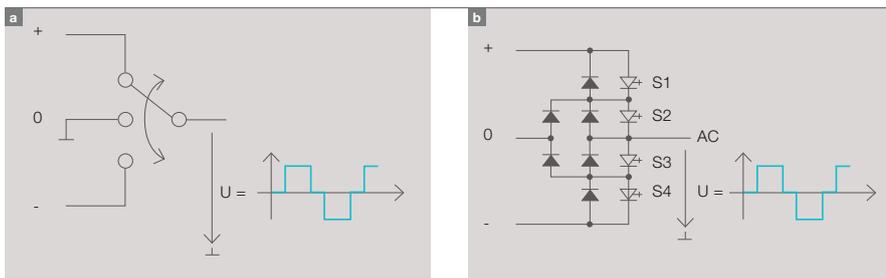
50-Hz-Umrichter

Der 50-Hz-Umrichter **5a** besitzt folgende Merkmale:

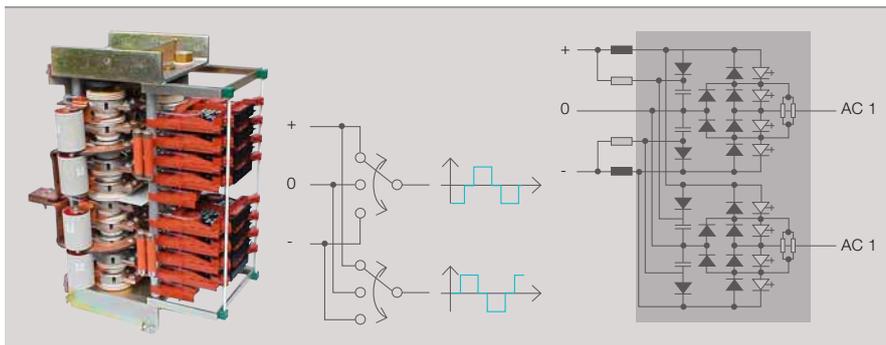
- **Konstruktion:** Der Umrichter besteht aus zwei dreiphasigen Standard-Dreipunkteinheiten. Je zwei Phasen sind in einem Spanverband zu einem Doppelphasenmodul kombiniert. Ein Doppelphasenmodul einer Dreipunkteinheit besteht aus acht IGCTs in Kombination mit acht Freilaufdioden und vier Freilaufdioden am Nullleiter. Die Ansteuereinheit (Gate Unit) bildet mit dem GCT eine integrierte Einheit, den IGCT. Die Zusatzbeschaltung (Clamp) dient als di/dt- und Spannungsbegrenzer. Sie besteht aus Strombegrenzungsdrosseln, Kondensatoren und Clampdioden mit Widerständen.

- **Schaltung und Steuerverfahren:** Der 50-Hz-Umrichter wird in echter 12-Puls-Schaltung gebaut. Somit werden nur 12-pulsige charakteristische Oberschwingungen ($n = 12 \cdot k \pm 1$; $k = 1, 2, 3, 4, \dots$) erzeugt. Durch Optimierung des Schaltmusters können einige der übrigen Oberschwingungen eliminiert werden. Falls erforderlich, können die Oberschwingungen mithilfe von Netzfiltern noch weiter gedämpft werden.

3 Funktionsprinzip des Dreipunkt-Umrichtermoduls und seine schaltungstechnische Umsetzung



4 Mechanischer Aufbau und elektrisches Schaltbild eines Doppelstapels



16,7-Hz-Umrichter

Der 16,7-Hz-Umrichter **5b** besitzt folgende Merkmale:

- **Konstruktion:** Der Umrichter besteht aus vier zweiphasigen Standard-Dreipunkteinheiten. Je zwei Phasen sind in einem Spanverband zu einem Doppelphasenmodul kombiniert. Damit lässt sich eine einphasige H-Brücke bilden. Ein Doppelphasenmodul besteht aus den gleichen Elementen wie der oben beschriebene 50-Hz-Umrichter.



- **Schaltung und Steuerverfahren:** Der 16,7-Hz-Umrichter ist achtstufig ausgeführt. Die Umrichterstufen werden durch transformatorische Reihenschaltung der Ausgangsspannungen der vier versetzt getakteten Dreipunkt-H-Brücken geschaltet. Die einzelnen H-Brücken werden mit einem konventionellen Pulsweitenmodulationsverfahren (PWM) in Dreifachtaktung betrieben.

Spannungsbegrenzer

Überschreitet die Zwischenkreisspannung einen oberen Schwellwert, wird der Zwischenkreis über einen Widerstand entladen, bis ein unterer Schwellwert erreicht ist [5e]. Die Steuerung des Spannungsbegrenzers arbeitet unabhängig von der Steuerung des bahn- und drehstromseitigen Stromrichters. Hierdurch wird sichergestellt, dass die Zwischenkreisspannung jederzeit innerhalb des definierten Bereichs bleibt.

Zwischenkreis

Alle Doppelphasenmodule des Stromrichters sind auf der Gleichspannungsseite durch eine gemeinsame Zwischenkreisverschaltung miteinander verbunden. An ihr befinden sich Abgänge für die einzelnen Stromrichtermodule, für die direkt angekoppelten Zwischenkreiskondensatoren sowie für die Zwischenkreis-Filterbänke und die Spannungsmessungen.

Der Zwischenkreis bildet die Verbindung vom 50-Hz-Umrichter zum 16,7-Hz-Umrichter und besteht aus den folgenden Hauptkomponenten:

- Direkt angekoppelte Kondensatorbank als Energiespeicher

- 33,4-Hz-Filter zur Aufnahme der Leistungsfuktuation aus dem Bahnnetz [5e]
- Hochpassfilter zur Aufnahme der niederfrequenten Oberschwingungen aus dem Bahnnetz, insbesondere der ausgeprägten dritten und fünften Harmonischen des Bahnnetzes [5f]

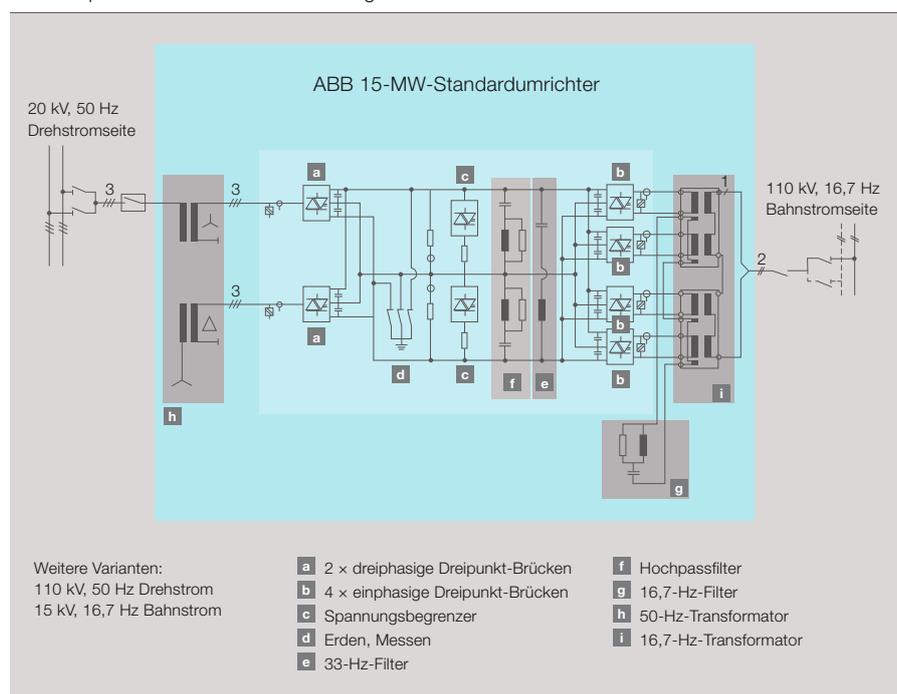
Beide Zwischenkreis-Filter, zusammen mit den direkt angekoppelten Kondensatoren, dienen gleichzeitig als Energiespeicher, der aus regeltechnischen Gründen notwendig ist. Die Kapazität des Energiespeichers reicht aus, um einen plötzlichen Lastabwurf von $P = 100\%$ schnell genug auszuregulieren, sodass die Zwischenkreisspan-

nung innerhalb spezifizierter Grenzen bleibt.

33,4-Hz-Filter

Das 33,4-Hz-Saugfilter dient zur Aufnahme der Leistungspulsationen aus dem Bahnnetz [5a]. Trotz des hohen Gütefaktors von ca. 200 (d. h. schwach gedämpft) besitzt das Filter dank seiner großen Kapazitätsleistung eine relativ breitbandige Charakteristik um die Abstimmfrequenz. Damit können die spezifizierten Bahnfrequenzabweichungen aufgefangen werden. Außerdem sind die Filterverluste relativ gering, da die Kondensatoren generell wesentlich kleinere Verluste aufweisen als die Drosseln.

5 Prinzipschaltbild einer Umrichteranlage



Stromrichter

Hochpassfilter

Das Hochpassfilter dient zur Aufnahme der vorwiegend aus dem Bahnnetz stammenden niederfrequenten Oberschwingungsspannungen. Das Filter ist als gedämpfter Saugkreis zweiter Ordnung mit einer Abstimmung unterhalb der fünften Harmonischen der Bahngrundwelle ausgeführt. Der Grund hierfür liegt in der ausgeprägten dritten und fünften Harmonischen der Bahnnetzspannung, die sich als zweite, vierte und sechste im Zwischenkreis widerspiegeln. Die höherfrequenten Oberschwingungen aus dem Bahn- und Drehstromnetz sowie die durch die Taktung verursachten

Oberschwingungen werden teilweise durch dieses Filter, vorwiegend jedoch durch die direkt angekoppelten Kondensatoren des Stromrichters aufgenommen. Somit werden auch die zu erwartenden Oberwellen in den Netzen durch die Dimensionierung dieser Komponenten berücksichtigt.

Stromrichtercontainer

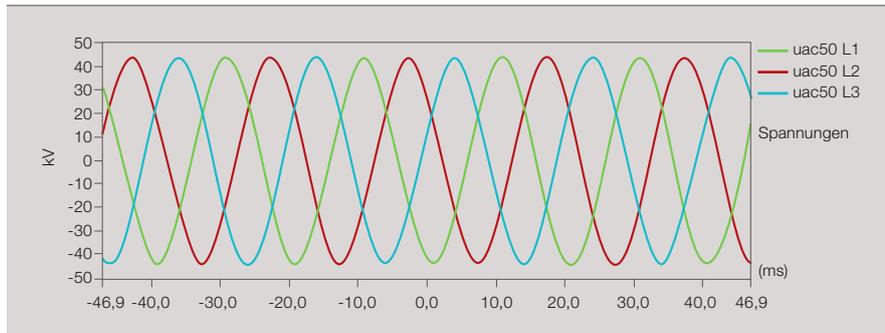
Der Stromrichter sowie dessen Steuerung werden komplett verdrahtet und geprüft in einem wetterfesten Container geliefert. Die Lieferung der Kühlung erfolgt in einem separaten Container. Beide Container werden auf Streifenfundamenten montiert. **6** zeigt

ein Schnittbild des Stromrichtercontainers.

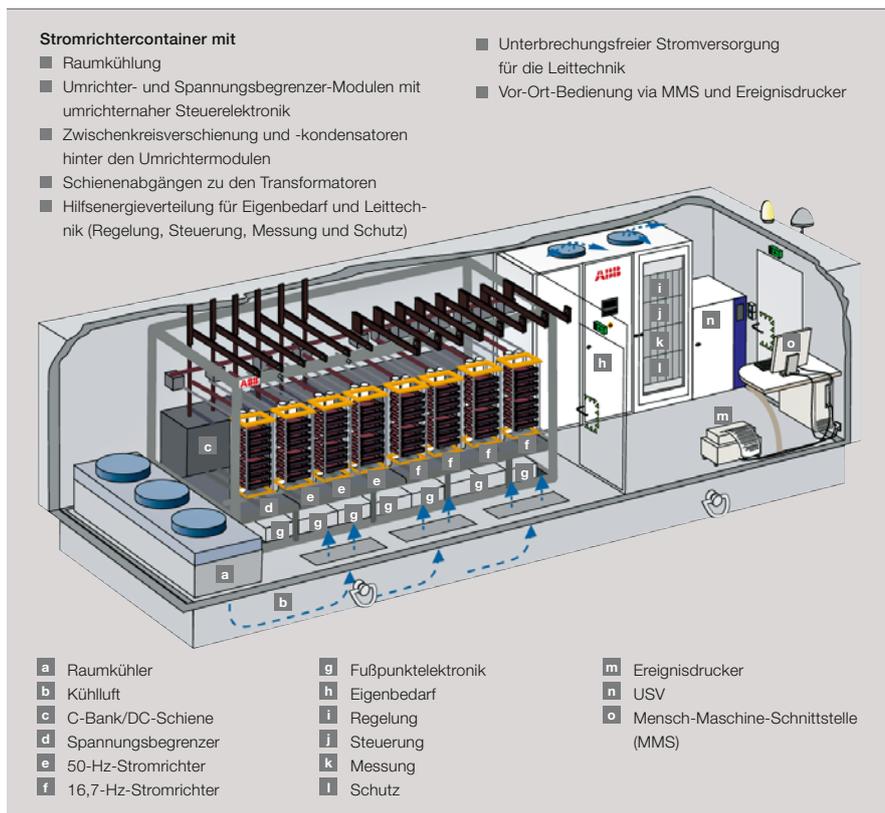
Stromrichtertransformatoren

■ **50-Hz-Transformator:** Der 50-Hz-Transformator des 50-Hz-Umrichters dient zur Speisung der beiden IGCT-Drehstrombrücken. Ein Dreiphasen-Transformator besteht aus einem dreischenkigen Kern in Doppelstockausführung mit Zwischenjoch oder aus zwei dreischenkigen Kernen in einem Kessel. Jeder (Teil-)Schenkel trägt jeweils eine Hochspannungswicklung und eine Ventilwicklung. Die beiden Hochspannungsteilwicklungen werden in Reihe und die Hochspannungswicklung wird in Stern geschaltet. Die beiden Ventilwicklungen sind um 30° elektrisch geschwenkt (Y/D-Schaltung), um eine 12-pulsige Rückwirkung der Stromrichter zu ermöglichen. Daraus ergibt sich folgende Schaltung: YN y0 d11.

7 Die drei Phasenspannungen am Anschlusspunkt des 50-Hz-Netzes



6 Stromrichtercontainer



Infobox Vorteile von statischen (leistungselektronischen) Frequenzumrichtern im Vergleich zu rotierenden Umformern

Kosten

Unter Berücksichtigung der Gesamtkosten einschließlich Nebenbetrieben, Bau und Montage sind die Investitions- und Unterhaltskosten für statische Umrichter deutlich geringer.

Wirkungsgrad

Statische Umrichter haben über einen weiten Betriebsbereich einen Wirkungsgrad von etwa 97 % (einschließlich der Transformatoren auf beiden Netzseiten). Bei rotierenden Umformern liegt der Wirkungsgrad je nach Baugröße und Betriebspunkt im Bereich von < 90 bis etwa 95 %.

Verfügbarkeit

Aufgrund der längeren Stillstandszeiten bei Wartungsarbeiten und der längeren Reparaturzeiten ist die Verfügbarkeit von rotierenden Umformern wesentlich geringer.

Betriebsverhalten

Da statische Umrichter keine rotierenden Massen besitzen, sind die Ausregelzeiten deutlich geringer. Potenzielle Stabilitätsprobleme bei Netzstörungen aufgrund von Rotorpendelungen entfallen.

■ **16,7-Hz-Transformator:** Der Transformator des 16,7-Hz-Umrichters dient der Aufsummierung der vier Teilspannungen in eine annähernd sinusförmige einphasige Spannung mit der Nennfrequenz von 16,7 Hz. Der Transformator besteht aus vier Einphasen-Einheiten. Die Teilspannungen in Rechteckform werden mithilfe von vier einphasigen IGCT-Umrichterbrücken aus einer Gleichspannungsquelle (Spannungszwischenkreis) nach dem Pulsweitenmodulationsverfahren gebildet und den vier Ventilwicklungen des Transformators zugeführt. Die Aufsummierung und Anpassung an die Bahnnetzspannung erfolgt in der Hochspannungswicklung. An die in Reihe geschalteten Tertiärwicklungen wird ein Filter zur Reduzierung der Netzurückwirkungen angeschlossen.

Netzfilter

Auf der 16,7-Hz-Netzseite wird ein Filter zur Reduzierung der Netzurückwirkungen eingesetzt. Auf der 50-Hz-Seite ist dies nur in Ausnahmefällen nötig.

Die Ausgangsspannungen der IGCT-Stromrichter bilden Rechteckpulse mit einer steuerbaren Breite. Das Frequenz-

spektrum der aus den einzelnen Stufen gebildeten Ausgangsspannung weist im Gegensatz zu dem typischen Frequenzspektrum von Maschinen nur sehr geringe Harmonische niedriger Ordnungszahl auf. Der Umrichter stellt in Bezug auf das Netz eine Oberschwingungs-Spannungsquelle dar. Die Induktivität der Transformatoren wirkt insbesondere für die höheren Stromharmonischen dämpfend, was sich positiv auf die Qualität der Netzspannung auswirkt. Um die Wirkung der Transformatorinduktivität noch zu verstärken, ist ein Filter zur weiteren Reduzierung der Oberschwingungsspannungen vorgesehen. Die daraus resultierenden Oberschwingungsverzerrungen bleiben unter den normalerweise geforderten Werten. **7** veranschaulicht die gute Qualität der Spannung am Netzanschlusspunkt eines Umrichters (Oszillogramm, aufgenommen während der Inbetriebsetzung).

8 zeigt eine Umrichtergruppe in einer Schaltanlage mit vier Umrichtern der Leistungsklasse von 15 bis 20 MW.

Ausblick

Der relativ große Marktanteil von ABB für diese Art von Anlagen zeigt, dass die zielgerechte Entwicklung der Umrichtertechnik den Bedürfnissen der

Kunden entspricht. Darüber hinaus ermöglicht der modulare Ansatz eine flexible Reaktion auf unterschiedliche Leistungsanforderungen. Umrichtereinheiten mit Nennleistungen von 30 MW und höher sind derzeit in Bau, und ABB unternimmt große Anstrengungen, ihren Erfolg auf diesem Markt mit dieser anspruchsvollen Technik fortzusetzen.

Gerhard Linhofer

Philippe Maibach

Niklaus Umbricht

ABB Automation Products

Turgi, Schweiz

gerhard.o.linhofer@ch.abb.com

philippe.maibach@ch.abb.com

niklaus.umbricht@ch.abb.com

8 Frequenzumrichteranlage der Leistungsklasse von 15 bis 20 MW für den Leistungsaustausch zwischen dem 50-Hz-Landesnetz und dem einphasigen 16,7-Hz-Bahnstromnetz. Links der 50-Hz-Transformator mit Drehstromfiltern auf dem darüber liegenden Portal, in der Mitte der Umrichtercontainer und rechts der Einphasen-Niederfrequenztransformator



Literaturhinweise

- [1] **Gaupp, O., Linhofer, G., Lochner, G., Zanini, P.:** „Leistungsstarke statische Frequenzumrichter für den Bahnverkehr durch die Alpen“, *ABB Technik* 5/95, S. 4–10
- [2] **Lönard, D., Northe, J., Wensky, D.:** „Statische Bahnstromrichter – Systemübersicht ausgeführter Anlagen“, *Elektrische Bahnen* 6/95, S. 179–190
- [3] **Mathis, P.:** „Statischer Umrichter Giubiasco der Schweizerischen Bundesbahnen“, *Elektrische Bahnen* 6/95, S. 194–200
- [4] **Steimer, P., Grüning, H., Werninger, J., Dähler, P., Linhofer, G., Boeck, R.:** „Serienschaltung von GTO-Thyristoren für Frequenzumrichter hoher Leistung“, *ABB Technik* 5/96, S. 14–20
- [5] **Steimer, P., Grüning, H., P., Werninger, J., Carroll, E., Klaka, S., Linder, S.:** „IGCT – eine neue, zukunftsweisende Technik für kostengünstige Hochleistungs-Umrichter“, *ABB Technik* 5/1998, S. 34–42
- [6] **Meyer, M., Thoma, M.:** „Netzkompatibilitätsstudie und -messungen für die Umrichteranlage Wimmis“, *Elektrische Bahnen* 12/2006, S. 567–574
- [7] **Jampen, U., Thoma, M.:** „Statische Frequenzumrichteranlage Wimmis“, *Elektrische Bahnen* 12/2006, S. 576–583