

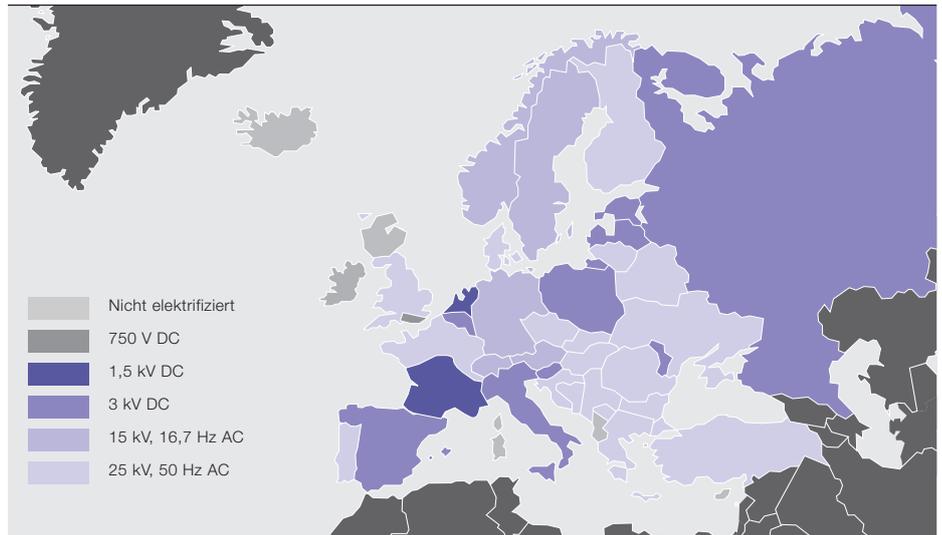


Kleiner, leichter, effizienter

Ein leistungselektronischer Traktionstransformator (PETT)

MAX CLAESSENS, DRAZEN DUJIC, FRANCISCO CANALES, JÜRGEN K. STEINKE, PHILIPPE STEFANUTTI, CHRISTIAN VETTERLI – Was klein ist, gilt häufig als schön. Wenn es jedoch um Technik geht, gibt es noch viele weitere Gründe, warum kleiner besser ist. In vielen Anwendungen haben Gewicht und Platzbedarf unmittelbare Auswirkungen auf die Produktivität, weshalb viel Forschungsaufwand in die Verkleinerung von Komponenten investiert wird. Bei Leistungstransformatoren wird die Mindestgröße weitgehend von den Gesetzen der Physik bestimmt, da der Kern aufgrund des Magnetfelds eine gewisse Größe besitzen muss. Ein besonders anspruchsvolles Einsatzgebiet für Transformatoren ist die Eisenbahn. Je mehr Platz der Transformator im Zug

einnimmt, desto weniger Raum bleibt für Passagiere. Das Gewicht ist ein weiterer Faktor, der sich im Hinblick auf die zulässige Achslast und die zur Beschleunigung benötigte Energie bemerkbar macht. Zum Glück bieten die Gesetze der Physik eine Möglichkeit, diese Komponente kleiner und leichter zu gestalten: die Frequenz. Je höher die Frequenz, desto kleiner kann der Kern sein. Dieses Prinzip wird auch bei Kleinleistungsgeräten wie Laptop-Netzteilen genutzt. Die Anwendung auf große Hochleistungsgeräte wie Traktionstransformatoren erfordert jedoch etwas mehr als eine simple Skalierung. ABB hat sich dieser Herausforderung gestellt und den Prototyp eines leistungselektronischen Transformators entwickelt, der zurzeit in einer echten Lokomotive getestet wird.



Heute gibt es historisch bedingt verschiedene Bahnstromsysteme, die sich häufig danach richten, was zu Beginn der Elektrifizierung in dem jeweiligen Land bzw. der jeweiligen Region Stand der Technik war → 1.

mit den geringen Übertragungsverlusten der Hochspannungs-Wechselstromtechnik kombinieren. Im Wesentlichen besteht die Herausforderung also darin, das Gewicht des Transformators zu reduzieren.

In den Anfangstagen der Eisenbahnelektrifizierung war Gleichstrom (DC) die am häufigsten verwendete Energiequelle. Da die Spannung damals noch nicht an Bord der Lokomotiven heruntertransformiert werden konnte, musste der Strom vom Unterwerk mit einer niedrigen

Bei traditionellen lokomotivbespannten Zügen ist der schwere Transformator nicht unbedingt von Nachteil, denn er unterstützt die Haftung auf der Schiene. Die maximale Kraft, die eine Lokomotive zum Ziehen der Wagons aufwenden kann, ohne die Haftung auf den Schienen zu verlieren,

wird durch das Gewicht der Lokomotive begrenzt. Im modernen Personenverkehr werden jedoch verstärkt Triebzüge eingesetzt, bei denen die Antriebstechnik nicht allein in einer Lokomotive, sondern über

Leider sind die Größe und das Gewicht eines Transformators den Gesetzen der Physik unterworfen. Die minimale Größe eines Transformators wird dabei unter anderem durch die Frequenz und die Nennleistung bestimmt, wobei niedrigere Frequenzen größere Transformatoren erfordern. Ein Transformator für höhere Frequenzen ermöglicht Einsparungen sowohl beim Gewicht als auch beim Platzbedarf. Dies ist der Ansatz des leistungselektronischen Traktionstransformators (Power-Electronic Traction Transformer, PETT) von ABB.

Da die meisten Großtransformatoren stationär eingesetzt werden, dürfte der Eisenbahnsektor wohl der Bereich sein, der am meisten von einer Gewichtsreduzierung profitiert.

Spannung (zwischen 750 und 3.000 V) zum Zug übertragen werden, damit er direkt in die Traktionsmotoren eingespeist werden konnte. Die niedrige Spannung war jedoch mit hohen Leistungsverlusten im Fahrdrat verbunden.

Später reduzierte man die Übertragungsverluste durch die Verwendung von Einphasen-Wechselstrom (AC) mit höheren Spannungen (15 kV/16,7 Hz und 25 kV/50 Hz). Der Preis hierfür war jedoch, dass nun große, schwere Transformatoren im Zug mitgeführt werden mussten.

die gesamte Länge des Zuges verteilt in den Passagierwagen untergebracht ist. Durch die größere Zahl von Antriebsachsen spielt die Haftung als einschränkender Faktor für die Beschleunigung des Zuges keine gewichtige Rolle mehr – das Gewicht und die Größe des Transformators stellen aber nach wie vor eine bedeutende Einschränkung für die Konstrukteure von Schienenfahrzeugen dar.

Ein idealer Zug würde das niedrige Gewicht und den geringen Platzbedarf der Ausrüstung von Gleichstromzügen

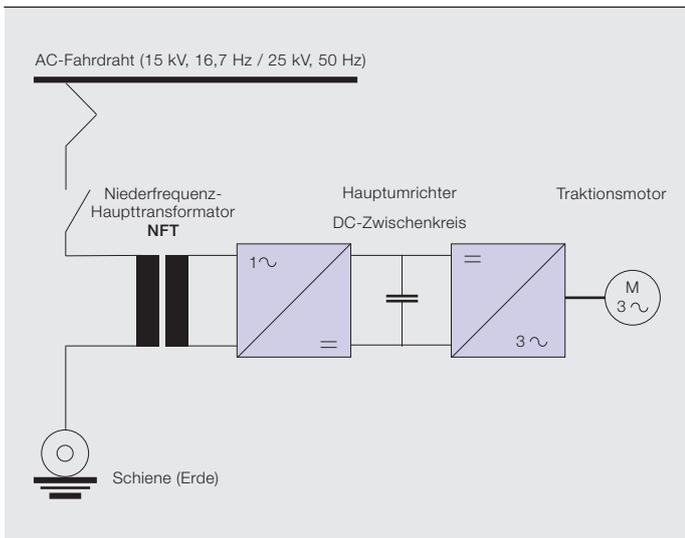
Funktionsprinzip des PETT

Abbildung → 2 zeigt die Stromwandlung in einem modernen Wechselstromzug. Der Strom aus dem AC-Fahrdrat (Oberleitung) fließt durch die Primärwicklungen eines Niederfrequenz-Transformators (NFT) zur Schiene (die als Rückleitungs-pfad fungiert). Die abgesenkte Spannung an den Sekundärwicklungen des Transformators wird in einen Vierquadrantensteller gespeist, der die DC-Zwischenkreisspannung bereitstellt. Diese wird schließlich von einem Wechselrichter in Wechselstrom mit variabler Frequenz

Titelbild

Die Rangierlokomotive Ee 933 der Schweizerischen Bundesbahnen (SBB), auf der der PETT-Demonstrator von ABB installiert ist.

2 Stromwandlung in einem modernen Wechselstromzug

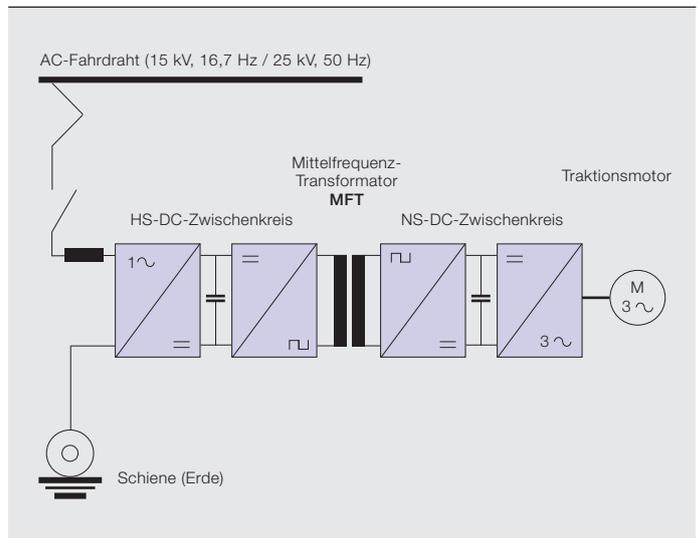


und variabler Spannung für die Traktionsmotoren umgewandelt. Hilfsbetriebe können ebenfalls vom DC-Zwischenkreis gespeist werden.

Für die Verwendung eines Mittelfrequenz-Transformators (MFT) muss ein Frequenzumrichter vor den Transformator geschaltet werden → 3. Auf der Sekundärseite des Transformators wandelt ein Gleichrichter die Spannung in die DC-Zwischenkreisspannung um.

Eine der großen Herausforderungen dieser Topologie besteht darin, dass auf der Hochspannungsseite ein Umrichter erforderlich ist. Da aktuelle Halbleiter-elemente nicht in der Lage sind, die in

3 Stromwandlung mit einem Mittelfrequenz-Transformator



AC-Bahnstromnetzen verwendeten Spannungen zu sperren, wird eine Reihenschaltung benötigt. Statt einer massenhaften Reihenschaltung von Halbleitern zu einzelnen Ventilen verwendet die von ABB entwickelte Lösung eine Kaskadenschaltung von Umrichtermodulen auf der Hochspannungsseite, wobei die Ausgänge auf der DC-Seite parallel geschaltet sind → 4. Durch diese Topologie ist die Lösung skalierbar und bietet Möglichkeiten für eine redundante Ausführung („M von N“-Prinzip).

Bevor der Wechselstrom aus dem Fahrdrabt das erste Umrichtermodul erreicht, fließt er durch eine Filterdrossel. Jedes Modul des Umrichters besteht aus einer aktiven Einspeiseeinheit (Active Front End, AFE) und einem DC/DC-Umrichterblock → 5. Der AFE-Block ist im Wesentlichen eine H-Brücke, die das Laden der Zwischenkreiskondensatoren reguliert. Mit dieser Topologie ist auch eine aktive Leistungsfaktorregelung möglich.

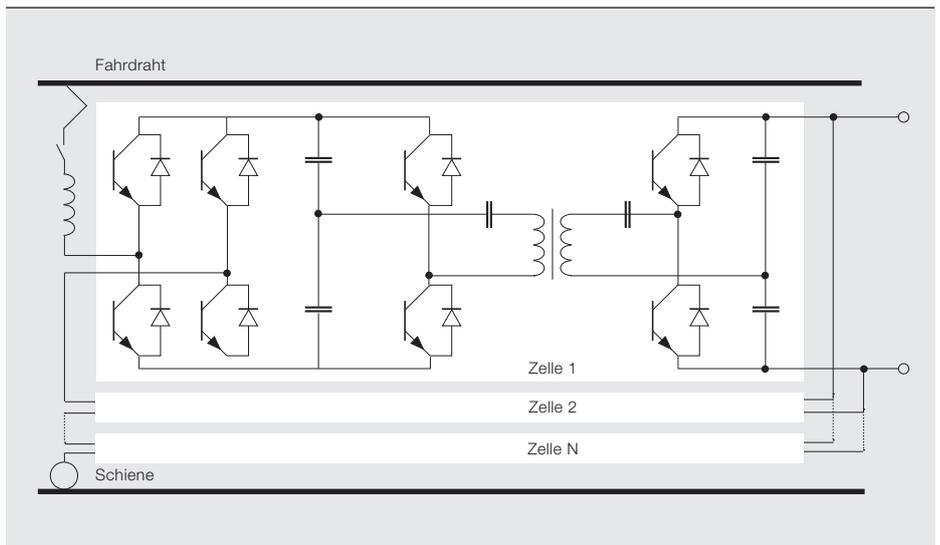
Umrichter in Kaskadenschaltung

Ein weiterer Vorteil der Kaskadentopologie besteht darin, dass jedes Modul unabhängig geschaltet werden kann. Dies ermöglicht eine Verschachtelung der Schaltmuster der H-Brücken.

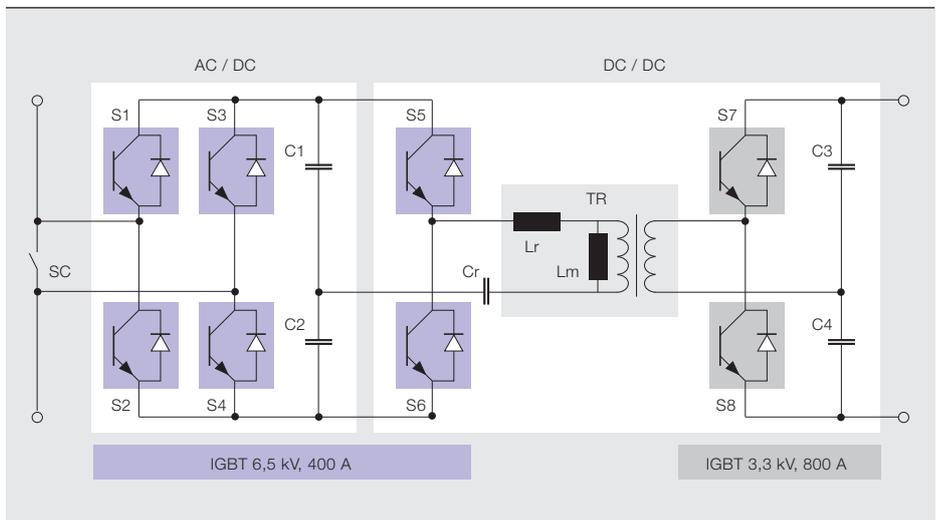
Bei einer gleichmäßigen Verschachtelung (d. h. um $360^\circ/N$ versetzt, wobei N der Anzahl der Stufen entspricht) ist auf der Netzseite des Umrichters eine scheinbare (äquivalente) Schaltfrequenz zu beobachten, die $2N$ -mal höher ist als die tatsächlichen Schaltfrequenzen der einzelnen H-Brücken. Diese hohe Schein-

Heute gibt es historisch bedingt verschiedene Bahnstromsysteme, die sich häufig danach richten, was zu Beginn der Elektrifizierung jeweils Stand der Technik war.

4 PETT mit Umrichtermodulen in Kaskadenschaltung auf der Primärseite und parallel geschalteten Ausgängen auf der Sekundärseite



5 Jedes Modul besteht aus einem AFE- und einem DC/DC-Umrichterblock.

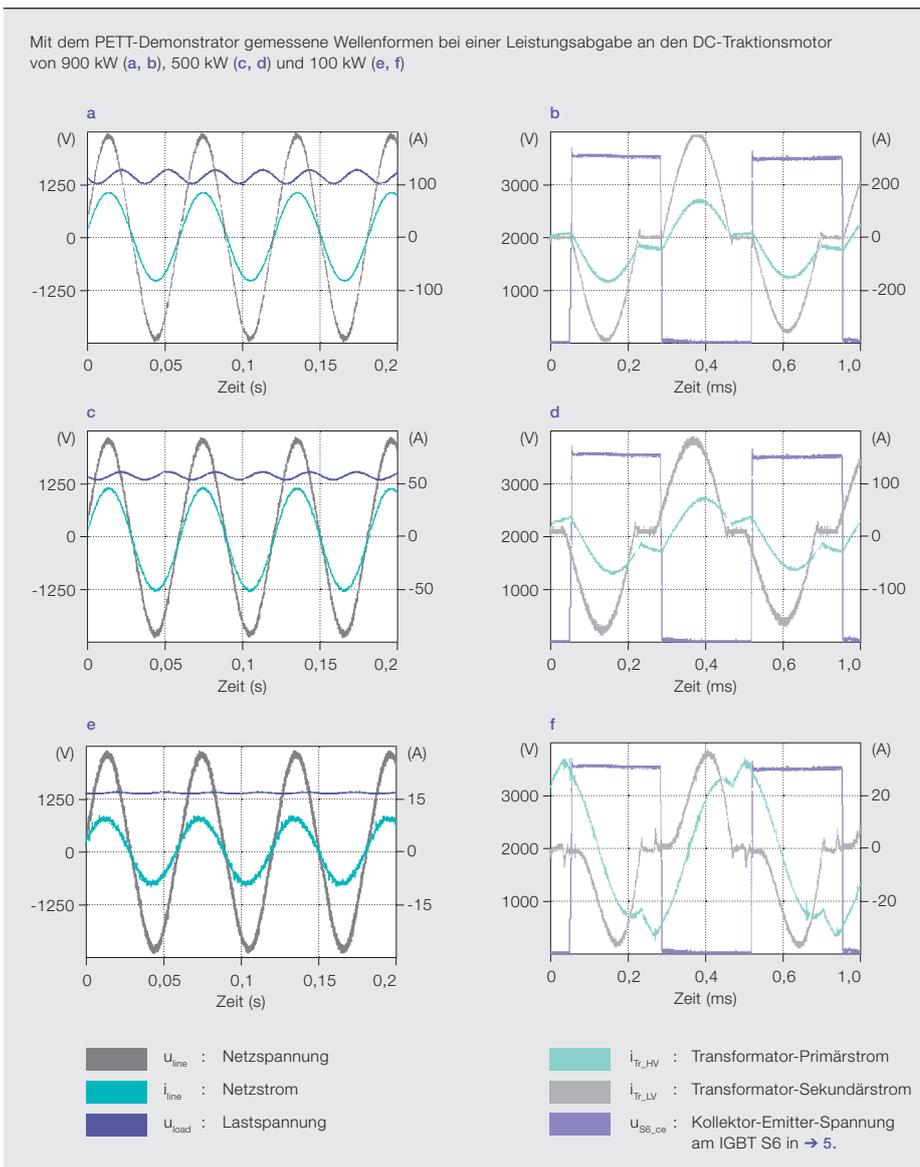


Der AC 800PEC-Controller von ABB erlaubt die Integration von schnellen und langsamen Regelungsfunktionen.

schaltfrequenz (verbunden mit der höheren Zahl von Spannungszwischenstufen) führt zu einer geringeren harmonischen Verzerrung, als sie mit herkömmlichen Traktionsumrichtern möglich ist, sodass die Filteranforderungen am Eingang reduziert werden. Beispiele für entsprechende Wellenformen sind in → 6 dargestellt.

Mittelfrequenz-Transformatoren

Mittelfrequenz-Transformatoren erfüllen drei Hauptaufgaben. Zunächst sorgen sie für eine galvanische Trennung der netzseitigen Hochspannung und der mit der Last verbundenen Niederspannungsseite. Ihre zweite Aufgabe ist die Bereitstellung einer geeigneten Spannungsanpassung zwischen der DC-Lastspannung von 1,5 kV und der DC-Zwischenkreisspannung im Eingangsmodul von 3,6 kV. Und drittens sollen sie ein weiches Schal-



Dank seiner kompakten Abmessungen kann der PETT leicht unter dem Wagenboden oder auf dem Zugdach untergebracht werden, wodurch mehr Platz für die Passagiere zur Verfügung steht und der Energieverbrauch sinkt.

ten der IGBT-Module (Insulated-Gate Bipolar Transistor) in den LLC-Resonanzkreisen (siehe unten) unterstützen. Da die dielektrischen Herausforderungen mit der Reduzierung der Gesamtgröße steigen, muss dieser Aspekt sorgfältig untersucht werden.

Im derzeitigen PETT-Demonstrator teilen sich alle neun Transformatoren ebenso wie die Netzdrossel und der Vorladekreis denselben ölgefüllten Kessel \rightarrow 7.

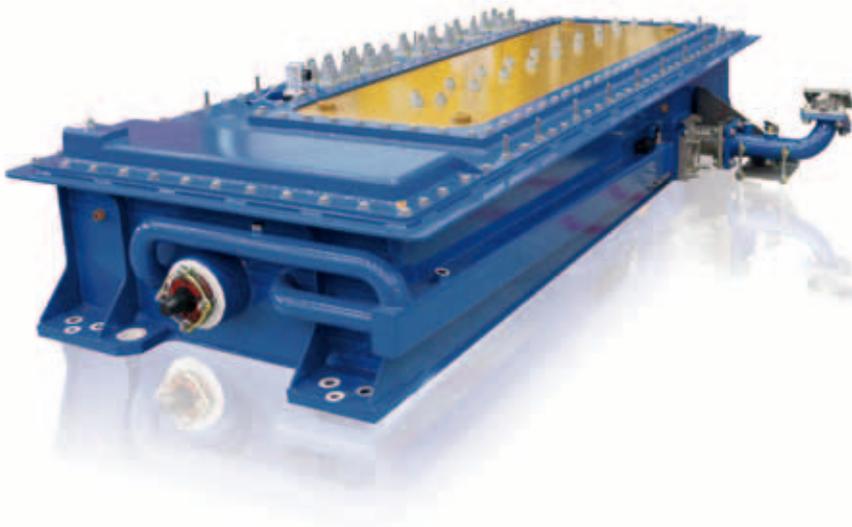
LLC-Schaltmodus

Jeder der neun Mittelfrequenz-Transformatoren ist Teil des entsprechenden DC/DC-Umrichters \rightarrow 4. Durch Nutzung der Streu- und Magnetisierungsinduktivitäten des Transformators und der Kondensatoren des externen Stromkreises entsteht ein LLC-Resonanzkreis (L_r , L_m

und C_r in \rightarrow 5). Zu den Vorteilen eines LLC-Kreises gehören:

- ein großer Ausgangsregelbereich,
- Senkung der Schaltverluste auf der Primärseite durch spannungsloses Schalten (Zero Voltage Switching, ZVS) über den gesamten Lastbereich hinweg,
- bauartbedingter niedriger Abschaltstrom (kein echtes stromloses Schalten (Zero Current Switching, ZCS)),
- Geringe Spannungsbelastung und ZCS am sekundärseitigen Diodengleichrichter,
- lastunabhängiger Betrieb bei Resonanzfrequenz.

Da ein LLC-Kreis auf dem Resonanzprinzip basiert, kann die Veränderung der Schaltfrequenz zur Regelung der Ausgangsspannung genutzt werden. Im der-



zeitigen PETT-System wird dies jedoch nicht genutzt. Stattdessen wird der LLC-Resonanzumrichter rückkopplungsfrei mit einer festen Schaltfrequenz von 1,75 kHz betrieben, die unterhalb der Resonanzfrequenz liegt.

Regelungssystem

Die Regelungsvorgaben können wie folgt zusammengefasst werden:

- Erhaltung eines sinusförmigen Eingangstroms
- Nahezu Leistungsfaktor eins
- Konstante durchschnittliche DC-Zwischenkreisspannung

- Abschottung gegen Netzüberschwingungen

Als Hardware dient der AC 800PEC-Controller von ABB, der die Integration von schnellen und langsamen Regelungsfunktionen erlaubt.

PETT-Demonstrator in der SBB-Lokomotive Ee 933

Dank einer langjährigen Partnerschaft zwischen den Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) und ABB wird derzeit eine PETT-Piloteinheit auf einer Rangierlokomotive vom Typ Ee 933 (→ **Titelbild**) getestet. Anfang 2008 begann ABB mit den umfangreichen Forschungs- und Engineeringarbeiten an den Teilsystemen. Im Frühjahr 2011 wurde der PETT-Demonstrator fertiggestellt und umfassenden elektrischen Prüfungen im Labor unterzogen, bevor die Piloteinheit in Betrieb genommen wurde.

Der vorhandene Traktionstransformator und der GTO-Gleichrichter der Ee 933 wurden entfernt, um Platz für den PETT zu schaffen. Außerdem mussten einige mechanische Komponenten und elektronische Schnittstellen angepasst werden.

Die Lokomotive wird im Bahnstromnetz mit 15 kV/16,7 Hz betrieben. Die Piloteinheit wurde Mitte 2011 fertiggestellt und Ende des Jahres vom Schweizerischen Bundesamt für Verkehr (BAV) zugelassen. Im Februar 2012 nahm die

Dank einer langjährigen Partnerschaft zwischen den Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) und ABB wird derzeit eine PETT-Piloteinheit auf einer Rangierlokomotive vom Typ Ee 933 getestet.



Die Piloteinheit wurde Mitte 2011 fertiggestellt und Ende des Jahres vom Schweizerischen Bundesamt für Verkehr (BAV) zugelassen.

Lokomotive im Bahnhof Genf Cornavin den Rangierbetrieb auf.

Der PETT → 8 verfügt über neun Module in Kaskadenschaltung, von denen allerdings nur acht für den Betrieb notwendig sind (das neunte steht als Redundanz zur Verfügung). Die Einheit hat eine Nennleistung von 1,2 MW und kann kurzzeitig eine Spitzenleistung von 1,8 MW liefern. Die DC-Ausgangsspannung beträgt 1,5 kV. Das Gesamtgewicht einschließlich Kühlung liegt bei 4.500 kg. Vergleicht man dies mit Traktionstransformatoren gleicher Nennleistung, muss berücksichtigt werden, dass der PETT nicht nur den eigentlichen Transformator, sondern auch den NS-Gleichrichter ersetzt (vergleiche → 2 und → 3).

Das Hauptziel der Piloteinheit besteht darin, die Praktikabilität der Technologie zu untersuchen. Ein weiterer Aspekt war die Gewichtsoptimierung. Die Leistungsdichte heutiger Kombinationen aus Transformator und Gleichrichter liegt im Bereich von 0,2 bis 0,35 kVA/kg. Die zukünftige Generation des PETT, die zurzeit entwickelt wird, soll mit 0,5 bis 0,75 kVA/kg noch deutlich darüber liegen.

Weitere Vorteile sind:

- Steigerung des Wirkungsgrads vom AC-Eingang bis zum DC-Ausgang von bisher 88–90 % auf über 95 % (Der durchschnittliche Wirkungsgrad heutiger eigenständiger Traktionstransformatoren für 15 kV/16,7 Hz liegt bei 90–92 %.)
- Verbesserte EMV und reduzierte Oberschwingungen
- Geringere Geräuschemissionen

Alle diese Faktoren sind ideale Voraussetzungen für das erklärte Ziel des PETT, eine kleine, leichte und dennoch leistungsfähige Umrichterlösung zu bieten, die sich problemlos in die Züge von morgen integrieren lässt und in unmittelbarer Nähe zu den Passagieren betrieben werden kann.

Der Transformator von morgen?

Da die meisten Großtransformatoren stationär eingesetzt werden, dürfte der Eisenbahnsektor wohl der Bereich sein, der am meisten von einer Gewichtsreduzierung profitiert. Deshalb sollte diese Innovation auch zuerst in diesem Bereich Anwendung finden.

Auch wenn der hier beschriebene PETT in einer Rangierlokomotive installiert ist, liegt sein wahres Potenzial im Einsatz in Triebzügen für den Personenverkehr wie

Nahverkehrs- oder Hochgeschwindigkeitszügen. Dank seiner kompakten Abmessungen kann der PETT leicht unter dem Wagenboden oder auf dem Zugdach untergebracht werden, wodurch mehr Platz für die Passagiere zur Verfügung steht und der Energieverbrauch des Zuges sinkt.

Max Claessens

ABB Power Products, Transformers
Zürich, Schweiz
max.claessens@ch.abb.com

Dražen Dujic

Francisco Canales
ABB Corporate Research
Baden-Dättwil, Schweiz
drazen.dujic@ch.abb.com
francisco.canales@ch.abb.com

Jürgen K. Steinke

ABB Power Electronics
Turgi, Schweiz
juergen.steinke@ch.abb.com

Philippe Stefanutti

Christian Vetterli
ABB Sécheron SA
Genf, Schweiz
philippe.stefanutti@ch.abb.com
christian.vetterli@ch.abb.com