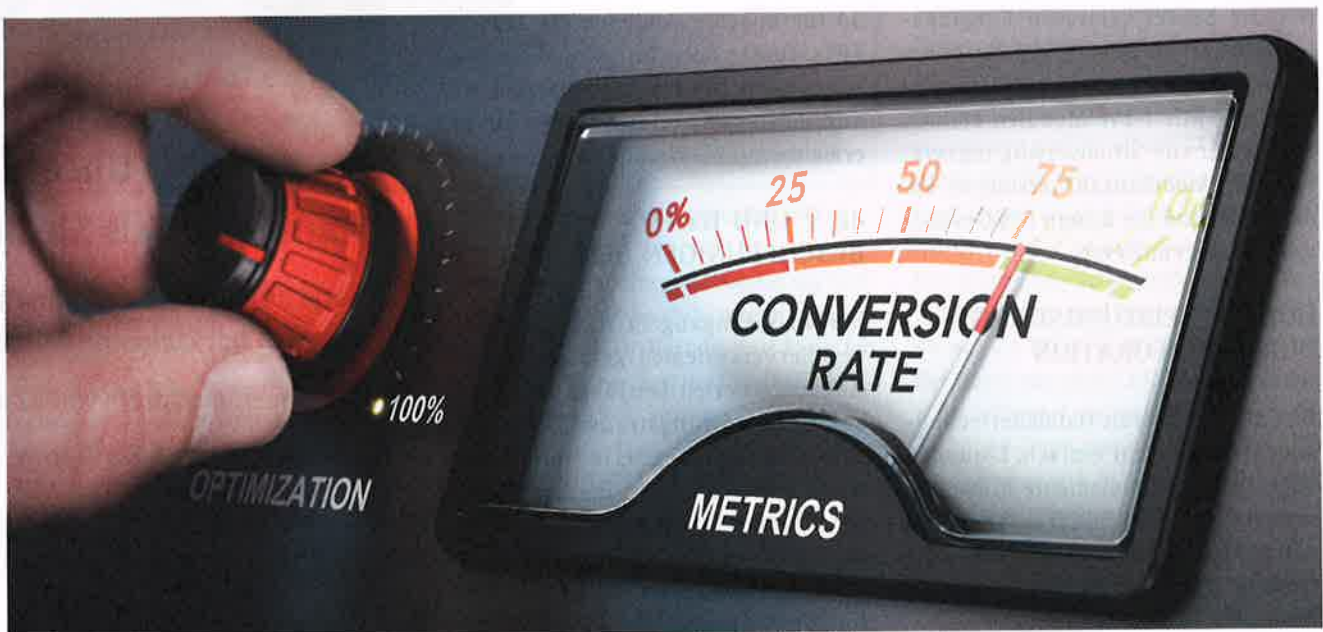


NEUE TOPOLOGIE FÜR EFFIZIENTE LEISTUNGSWANDLER

BORGNA-KONVERTER

Obwohl moderne Leistungswandler beachtliche Wirkungsgrade erreichen, sind Schaltverluste weiter eine der größten Hürden. Der Borgna-Konverter vermeidet mit einer neuen Topologie Schaltverluste fast vollständig. Mit ihm lassen sich einfach zu regelnde, kostengünstige und störteste Wandler entwickeln. Von Prof. Urs W. Muntwyler, Luciano Borgna und Daniel Gfeller



(Bild: Olivier Le Moal | Shutterstock)

Ob Abwärtswandler, Aufwärtswandler oder Inverswandler; heutige Gleichspannungswandler verfügen über keine galvanische Trennung zwischen Ein- und Ausgang. In Schaltnetzteilen dagegen kommen zumeist Sperrwandler zum Einsatz, diese arbeiten galvanisch getrennt. Alle Schaltregler zerlegen zunächst die Eingangsspannung durch Transistoren wie MOSFETs oder IGBTs und glätten sie anschließend durch eine Spule und Kondensatoren wieder. Die durch diese Transformation entstehenden Schaltverluste sind in einem herkömmlichen Leistungswandler für ungefähr die Hälfte der gesamten Verlustleistung verantwortlich. Das Dilemma der Entwickler: Nur schnelles Schalten kann die Verlustleistung verringern, generiert jedoch Wechselströme mit hohen Frequenzen und damit elektromagnetische Störungen. Für die Entstörung entsteht wiederum hoher Aufwand.

EINE NEUE HERANGEHENSWEISE

„Warum bin ich da nicht selber draufgekommen?“ – Diese Frage dürfte Entwicklern von Stromversorgungen als ers-

tes durch den Kopf gehen, wenn sie die Funktionsweise des Borgna-Konverters betrachten. Das Grundprinzip der neuen Leistungswandler-Technologie besticht vor allem durch Einfachheit. Grundsätzlich besteht der nach seinem Erfinder benannte Borgna-Konverter aus zwei parallel geschalteten, im Lückbetrieb arbeitenden Teilwandlern. Im einfachsten Fall haben diese Teilwandler die Topologie eines Abwärtswandlers, eines Aufwärtswandlers oder eines Inverswandlers. Der Unterschied sind zwei zusätzliche Komponenten: Ein kleiner Koppelkondensator und parallel dazu ein kleiner Kurzschlusschalter. Die beiden Komponenten sind so platziert, dass sie die Chopper-Spannungen der beiden Teilwandler miteinander verbinden. Mit dieser einfachen Modifikation und der richtigen zeitlichen Ansteuerung schalten die Leistungswandler stromlos ein und nahezu spannungslos aus. **Bild 1b** zeigt die Topologie am Beispiel eines Abwärtswandlers. Die folgende Funktionsbeschreibung setzt Kenntnisse über die grundsätzliche Funktion eines Aufwärtswandlers im Lückbetrieb (Discontinuous Conduction Mode, DCM) voraus und geht nur auf die spezifischen Eigenheiten des Borgna-

Konverters ein. Die Komponenten L_1 , S_1 und D_1 bilden den ersten Teilwandler. L_2 , S_2 und D_2 den zweiten Teilwandler. C_c ist der Koppelkondensator und S_3 ist der Kurzschlusschalter. Die Betrachtung beginnt zum Zeitpunkt der Stromlücke, wenn beide Hauptschalter und beide Dioden sperren. Trotz der Bezeichnung ‚Stromlücke‘ fließt ein kleiner Querstrom durch die beiden Spulen und den Kurzschlusschalter, welcher zu diesem Zeitpunkt eingeschaltet ist. **Bild 2a** zeigt diesen Zustand und dass, aufgrund des Querstroms, der Strom in der ersten Spule leicht positiv und in der zweiten Spule leicht negativ ist.

ABLAUF EINES BORGNA-SCHALTZYKLUS

Ein Schaltzyklus beginnt mit dem gleichzeitigen Einschalten der beiden Hauptschalter. Da die Schaltung im Lückbetrieb arbeitet, erfolgt dieses Einschalten stromlos und ist damit praktisch verlustfrei. Nach dem Einschalten steigen die Spulenströme linear an. Aufgrund des initialen Querstroms eilt die Stromstärke der zweiten Spule der Stromstärke der ersten Spule leicht hinterher, wie im Timing-Diagramm in **Bild 3** gut zu erkennen ist. Während diesem Stromanstieg wird der Kurzschlusschalter ausgeschaltet (**Bild 2b**).

Sobald der Spulenstrom seinen gewünschten Spitzenwert erreicht, wird der erste Hauptschalter abgeschaltet. Nun kommt der Koppelkondensator zum Einsatz. Im Gegensatz zu einem konventionellen Aufwärtswandler wird der Strom der ersten Spule nach dem Ausschalten des Hauptschalters nicht direkt in den Ausgang, sondern zunächst in den Koppelkondensator umgeleitet. Dadurch wird der Koppelkondensator auf die Ausgangsspannung aufgeladen (**Bild 2c**). Dieser Ladevorgang dauert ein Vielfaches länger als die Ausschaltzeit der verwendeten Leistungsschalter. Deshalb wird der erste Hauptschalter stromlos, bevor die Schaltspannung nennenswert angestiegen ist. Als Folge davon schaltet er nahezu spannungslos aus, was Schaltverluste fast gänzlich vermeidet. Ausserdem verhindert der langsame Spannungsanstieg den Grossteil der EMV-Störungen, die sonst bei einer harten Schaltflanke entstehen würden. Sobald die Spannung des Koppelkondensators die Ausgangsspannung erreicht, wird die erste Diode in Vorwärtsrichtung polarisiert und damit leitend. Dadurch fließt der Spulenstrom des ersten Teilwandlers in den Ausgang (**Bild 2d**). Die Schaltenergie bleibt vorerst im Koppelkondensator zwischengespeichert.

Danach wird der zweite Hauptschalter ausgeschaltet. Analog zum ersten Hauptschalter führt dies dazu, dass der Strom der zweiten Spule zunächst in den Koppelkondensator umgeleitet wird. Nun fließt der Strom aber in entgegengesetzter Richtung durch den Koppelkondensator, dadurch wird dieser entladen. Das Resultat ist wieder eine langsame Schaltflanke, welche, wie auch beim Abschalten des ersten Hauptschalters, Schaltverluste eliminiert und für ein gutes EMV-Verhalten sorgt. Außerdem wird nun die zuvor im Koppelkondensator zwischengespeicherte Energie in den Ausgang transferiert (**Bild 2e**). Sobald der Koppelkondensator wieder vollständig entladen ist, wird auch die Diode des zweiten Teilwandlers in Vorwärtsrichtung polarisiert und damit leitend. Somit trans-

ferieren nun beide Spulen ihre Energie in den Ausgang. Die Spulenströme fallen linear ab. Der Koppelkondensator hat nun seinen Zweck erfüllt und wird durch Einschalten des Kurzschlusschalters überbrückt (**Bild 2f**).

Sobald der erste Spulenstrom null erreicht, beginnt die erste Diode zu sperren. Da die Diode des zweiten Teilwandlers immer noch leitend ist und die Teilwandler gekoppelt sind, befindet sich der rechte Anschluss der Spule noch auf Ausgangspotential. Dadurch sinkt der Strom der ersten Spule leicht ins Negative (**Bild 2g**). Das ist die Ursache für den Querstrom, welchen wir ganz zu Beginn während der Stromlücke beobachten konnten. Der Kurzschlusschalter

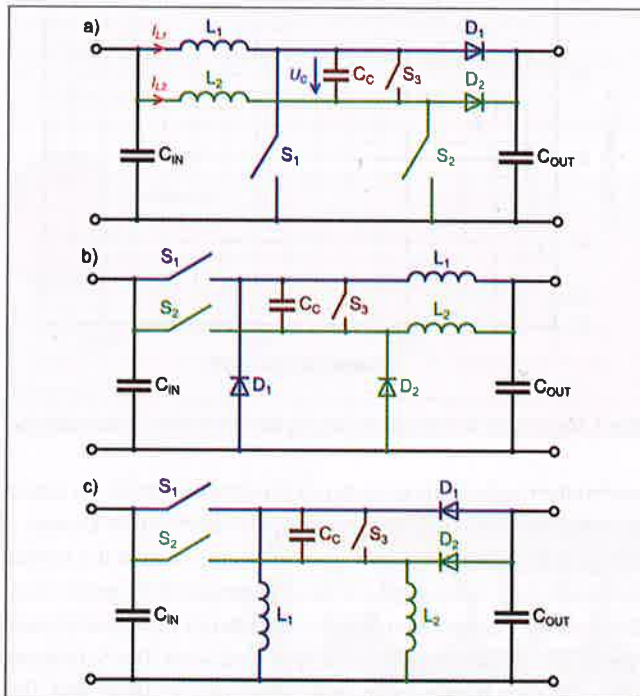


Bild 1. Grundtopologien des Borgna-Aufwärtswandlers (a), des Borgna-Abwärtswandlers (b) und des Borgna-Inverswandlers (c). (Bild: bfh.ch)

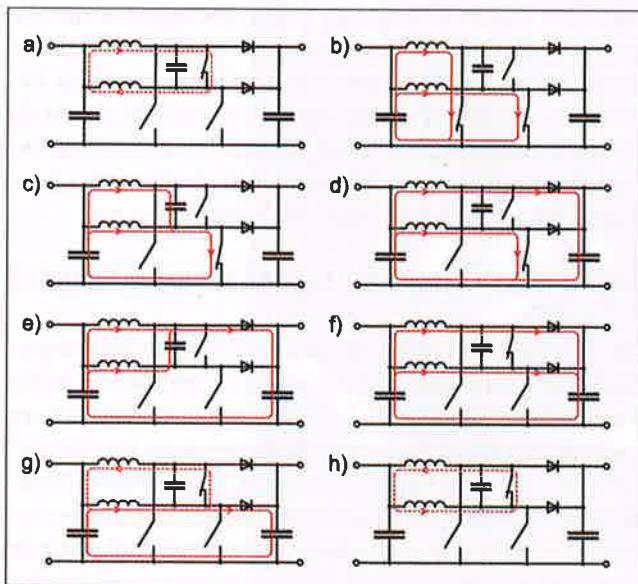


Bild 2. Arbeitsschritte des Borgna-Aufwärtswandlers. (Bild: bfh.ch)

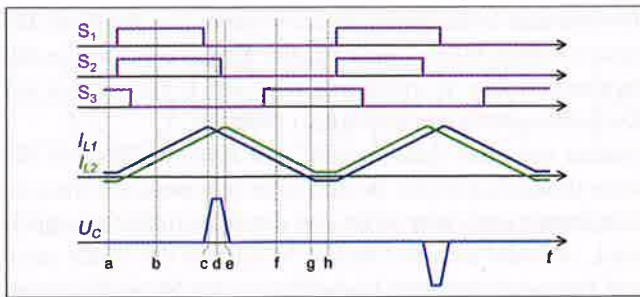


Bild 3. Timing-Diagramm des Borgna-Aufwärtswandlers. Die Kleinbuchstaben a bis h markieren die Situationen gemäß Bild 2. (Bild: bfh.ch)

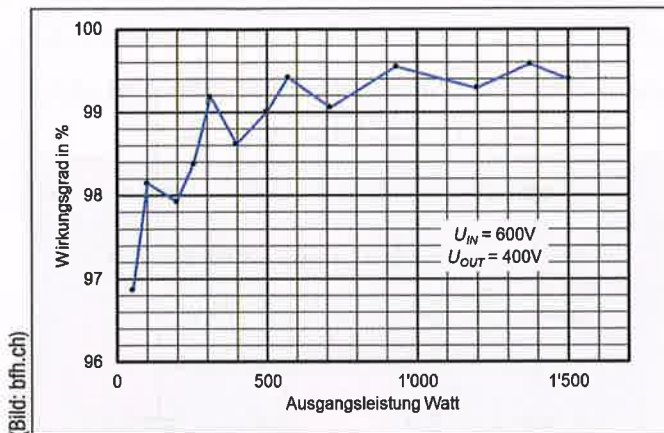


Bild 4. Resultat der Wirkungsgradmessung des optimierten 2-kW-Prototyps.

verhindert jedoch, dass es durch diesen Querstrom zu einem unerwünschten Aufladen des Koppelkondensators kommt. Kurze Zeit später wird der Punkt erreicht, an dem die beiden Spulenströme betragsgleich, aber gegensätzlich gepolt sind. Die Summe der Spulenströme beträgt damit null, womit auch die zweite Diode stromlos und sperrend wird. Die Schaltung befindet sich jetzt wieder in der Stromlücke (Bild 2h). Der Unterschied zur Situation ganz zu Beginn der Erklärung ist jedoch, dass der Querstrom nun in entgegengesetzter Richtung fließt. Deswegen wird im nächsten Schaltzyklus zuerst der zweite Spulenstrom seinen gewünschten Spitzenwert erreichen. Folglich muss dann der zweite Hauptschalter zuerst abgeschaltet werden, was wiederum zur Folge hat, dass der zweite Spulenstrom zuerst null erreicht, womit die Polarität des Querstroms erneut dreht. Die Reihenfolge der Abschaltung der Hauptschalter sowie die Richtung des Querstroms kehren sich also bei jedem Schaltzyklus um.

MODIFIKATIONEN FÜR UMFASSENDE EINSATZ

Die Ansteuerung von Leistungshalbleitern über den Borgna-Konverter ist einfach. Die Steuerung muss lediglich die beiden Hauptschalter simultan ein- und mit einem kleinen Zeitversatz wieder ausschalten, wobei die Reihenfolge der Abschaltung von Schaltzyklus zu Schaltzyklus alterniert. Ferner muss im Bereich der Stromlücke der Kurzschlusschalter eingeschaltet werden, damit es dort nicht zu einer Aufladung des Koppelkondensators kommt. Dasselbe Funktionsprinzip lässt sich direkt auf Abwärtswandler (Bild 1b) und Inverswandler

(Bild 1c) übertragen. Ferner können bei allen gezeigten Topologien die Dioden durch ein weiteres Paar Leistungsschalter ersetzt werden, was einen bidirektionalen Energiefluss und somit einen 2-Quadranten-Betrieb ermöglicht. Auch wenn es sich bei den gezeigten Schaltungen grundsätzlich um DC-DC-Wandler handelt, so lassen sich durch Modulation der Ausgangsspannung auch Wechselspannungen generieren. Dies erlaubt es, die Vorzüge des Borgna-Converters auch bei Gleich- und Wechselrichtern zu nutzen. So kann etwa durch die Kombination von drei bidirektionalen Abwärtswandlern ein vollwertiger, dreiphasiger Wechselrichter realisiert werden, der kaum Schaltverluste hat und nur sehr wenig elektromagnetische Störungen erzeugt.

APPLIKATIONEN & WIRTSCHAFTLICHKEIT

Der Borgna-Konverter ist mit seiner hohen Flexibilität für den Einsatz in unterschiedlichsten Anwendungen geeignet. Er kann als Wechselrichter in Photovoltaik- und Windkraftanlagen, als Ladegerät für Akkumulatoren oder auch als Traktionsumrichter verwendet werden. Die Nachfrage nach effizienten, elektronischen Leistungswandlern ist groß und wird mit der zunehmenden Elektrifizierung im Rahmen der Energiewende weiter steigen. Damit stellt sich die Frage nach der Wirtschaftlichkeit. Auf den ersten Blick schneidet der Borgna-Konverter diesbezüglich eher schwach ab, denn schließlich sind alle leistungselektronischen Komponenten doppelt vorhanden. Doch durch das Wegfallen der Schaltverluste und das gute EMV-Verhalten kann in der Halbleiterkühlung und Entstörung viel Material gespart werden. Die Autoren gehen davon aus, dass dies die Zusatzkosten für die Elektronik in vielen Fällen kompensiert, abhängig von der jeweiligen Implementierung. Schon heute sind viele große Konverter aus Gründen der Skalierbarkeit modular mit parallelen Teilwandlern aufgebaut. Die Teilwandler könnten jeweils paarweise gekoppelt und als Borgna-Konverter betrieben werden – der Zusatzaufwand wäre minimal. Werden die Kosten über die gesamte Lebensdauer betrachtet, fällt die Einschätzung noch positiver aus. Durch den hohen Wirkungsgrad treten viel weniger Energieverluste auf, was auf Dauer große Vorteile gegenüber konventionellen, hart schaltenden Convertoren ergeben kann.

ERFAHRUNGEN MIT DEM PROTOTYP

Das Erfinder-Team der Berner Fachhochschule (BFH) hat das Funktionsprinzip des Borgna-Konverters mit einem funktionalen Prototyp getestet. Der Prototyp war zunächst als bidirektionaler Abwärtswandler mit 800 V Eingangsspannung, 400 V Ausgangsspannung und 2 kW Nennleistung ausgelegt. In dieser Konfiguration konnten die Forscher bereits einen Spitzenwirkungsgrad von nahezu 99,4 Prozent erreichen. Ein respektabler Wert, doch es ging noch mehr. Für die weitere Optimierung wurden die Komponenten für den Betrieb im zweiten Quadranten entfernt; der Prototyp arbeitete damit nur noch als unidirektionaler Abwärtswandler. Im Testing stellen die Wissenschaftler fest, dass der Wirkungsgrad mit

einer Reduktion der Eingangsspannung auf 600 V nochmals ansteigt. In dieser Konfiguration wurde eine erneute Wirkungsgradmessung durchgeführt, deren Ergebnis in **Bild 4** dargestellt ist. Der Spitzenwirkungsgrad erreichte knapp 99,6 Prozent, was die Forscher als sensationell einstufen. Beachtenswert ist ebenfalls, dass der Wirkungsgrad bereits ab 500 W konstant über 99 Prozent liegt.

VERLUSTE DURCH RESONANZPHÄNOMEN

Ein kleiner Wermutstropfen ist der deutlich erkennbare Rippel der Wirkungsgradkurve. Dieser entsteht aufgrund eines Resonanzphänomens während der Stromlücke. In der Phase, in der beide Leistungsschalter und beide Dioden sperrend sind, bilden die Spulen zusammen mit der parasitären Kapazität am Knotenpunkt der Chopper-Spannung einen Resonanzkreis. Wenn dann zu Beginn eines Schaltzyklus die Hauptschalter einschalten, wird diese parasitäre Kapazität, welche mehrheitlich durch die Ausgangskapazität der Hauptschalter entsteht, kurzgeschlossen und die darin gespeicherte Energie geht in Form von Wärme verloren. Deshalb ist der Wirkungsgrad stark vom Einschaltzeitpunkt der Hauptschalter abhängig, welcher wiederum von der Pulsweite und damit von der Ausgangsleistung abhängig ist. Dieses im Englischen als „Inductor Current Ringing“ bekannte Phänomen wurde bereits in Simulationen vor dem Bau des Prototyps als dominante Verlustquelle identifiziert. Beim Prototyp wurden Siliziumkarbid-MOSFETs als Hauptschalter verwendet, der hohe Wirkungsgrad ist aber ausdrücklich nicht den hohen Schaltgeschwindigkeiten der SiC-MOSFET geschuldet. Tatsächlich werden diese zur Verbesserung der EMV-Eigenschaften mit Gate-Vorwiderständen von 100 Ω betrieben und dadurch stark gebremst. Daher liegen die Pegel der leitungsgebundenen Störspannungen des Prototyps ohne jegliche Filtermassnahmen bei einer Messung nach CISPR-11 unter 80 dB μ V, was nach Einschätzung der Schweizer Wissenschaftler ebenfalls ein exzellenter Wert ist. Die gleiche exzellente Performance des Borgna-Konverters sollte sich nach Ansicht der Berner Forscher auch mit herkömmlichen MOSFETs erzielen lassen.

OPTIMIERUNG DER ANSTEUERUNG

Der Wirkungsgrad des Prototyps soll jetzt mit einer optimierten Ansteuerung weiter verbessert werden. Durch die gleichzeitige Modulation von Pulsweite und Schaltfrequenz ist es prinzipiell möglich, den Einschaltzeitpunkt der Hauptschalter so zu steuern, dass die Verluste des Inductor Current Ringing unabhängig von der Ausgangsleistung vermieden werden. Damit dürfte der Prototyp ab etwa 300 W Ausgangsleistung einen stabilen Wirkungsgrad von über 99 Prozent erreichen. Mit so einer Regelung spielt auch die Ausgangskapazität der MOSFET keine Rolle mehr, wodurch die SiC-MOSFETs durch kostengünstigere Silizium-MOSFET ersetzt werden können. Die Berner Fachhochschule hat den Borgna-Konverter zum Patent angemeldet, Lizenzen können gegen eine nur geringe Schutzgebühr erworben werden. UH



PROF. URS W. MUNTWYLER

ist Elektroingenieur FH/HTL und Leiter des Labors für Photovoltaiksysteme der Berner Fachhochschule. Vor seiner Lehrtätigkeit arbeitete er 35 Jahre in der Photovoltaik-Branche und gehört zu den Solarpionieren in der Schweiz.



LUCIANO BORGNA

ist diplomierter Elektroingenieur HTL und wissenschaftlicher Mitarbeiter am Labor für Photovoltaiksysteme der FH Bern mit Schwerpunkt Wechselrichterprüfungen. Er ist Erfinder und Namenspatre des Borgna-Konverters.



DANIEL GFELLER

ist diplomierter Elektroingenieur FH und ehemals wissenschaftlicher Mitarbeiter am Labor für Photovoltaiksysteme. Er war maßgeblich an der Entwicklung und Dokumentation des Borgna-Konverters beteiligt.

Power Devices



TAIWAN SEMICONDUCTOR



schukat.com

SCHUKAT
electronic