

# Ein kompakter 690-V-Umrichter mit integriertem Sinus-Ausgangsfiler und SiC-Schottky-Freilaufdioden

Benno Weis, Siemens AG, Erlangen

## Kurzfassung

In dieser Veröffentlichung wird ein Frequenzumrichter mit 690 V Anschlussspannung im Leistungsbereich 7,5 kW bis 37 kW und integriertem Sinus-Ausgangsfiler vorgestellt. Zur Verringerung des Volumens des Sinusfilters und somit des gesamten Gerätes arbeitet der Umrichter mit einer hohen Schaltfrequenz von 16 kHz. Die hierbei anfallenden Verluste werden durch den Einsatz von SiC-Schottkydioden als Freilaufdiode minimiert. Der Umrichter stellt den ersten kommerziellen Einsatz von SiC-Leistungshalbleitern in der Umrichtertechnik dar. Durch das Sinus-Ausgangsfiler können lange Motorleitungen verwendet werden, die Verluste im Motor und die Anforderungen an die Motorisolation werden reduziert. Auf der Netzseite verwendet der Umrichter eine rückspeisefähige Topologie sowie ein EMV-Filter der Klasse C2.

## 1 Einleitung

In einem Antriebsstrang mit Frequenzumrichter und Motor wird der Motor üblicherweise mit gepulsten Ausgangsspannungen versorgt. Die hochfrequenten Anteile der Ausgangsspannung führen bekanntermaßen zu einer Reihe von Schwierigkeiten. So verursachen beispielsweise die hochfrequenten Spannungsanteile hochfrequente Stromanteile im Motor, die nicht in mechanische Energie umgewandelt werden, sondern lediglich zur unerwünschten Erwärmung des Motors beitragen. Darüber hinaus wird durch die hochfrequente Spannung die Motorisolation stark beansprucht. Weiterhin können die EMV-Grenzwerte gemäß IEC 61800-3 nur durch den Einsatz von geschirmten Motorleitungen eingehalten werden. Diese Motorleitungen sind teurer als ungeschirmte Leitungen, zudem ist die maximal zulässige Motorleitungslänge begrenzt.



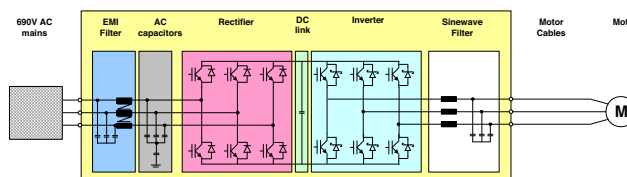
**Bild 1** Umrichter mit standardmäßigem Sinusfilter, 5,5 kW

Aus diesen Gründen hat sich in einigen Anwendungen, z. B. der chemischen Industrie, der Einsatz von Sinus-Ausgangsfilern durchgesetzt. Mit einem Sinusfilter können die beschriebenen Nachteile vermieden werden. Allerdings ist ein solcher Sinusfilter heute großvolumig und teuer (s. Bild 1), so dass seine Akzeptanz im allgemeinen Markt begrenzt ist.

Die Reduzierung der Größe und des Gewichtes eines Sinusfilters ist daher ein wichtiges Entwicklungsziel.

## 2 Umrichterdesign

### 2.1 Übersichtsschaltbild



**Bild 2** Blockschaltbild des Umrichters

Der innovative Hauptbestandteil des vorgestellten Frequenzumrichters besteht in dem Motorwechselrichter und dem integrierten Sinus-Ausgangsfiler. Die Freilaufdioden des Motorwechselrichters bestehen aus Siliziumkarbid (SiC). Die Schaltfrequenz von 16 kHz liegt etwa um den Faktor 8 über dem Standardwert, heutiger 690-V-Geräte. Für den nachgeschalteten Sinusfilter bedeutet dies, dass dessen Bauteile kleiner als heute üblich dimensioniert werden können, so dass

der Sinusfilter in den Umrichter integriert werden kann.

Auf der Netzseite besitzt der Umrichter eine rückspeisefähige Topologie, die in der Literatur unter dem Begriff F3E (Fundamental Frequency Front End) bekannt ist. In dieser Topologie wird ein netzseitiger IGBT immer dann eingeschaltet, wenn seine zugehörige Freilaufdiode leitend ist. Damit verhält sich der netzseitige Stromrichter wie ein Diodengleichrichter, ist jedoch über die IGBTs in der Lage, die Stromrichtung im Zwischenkreis umzukehren und somit Energie in das Netz zurück zu speisen. Neben der Rückspeisefähigkeit besitzt diese Topologie den Vorteil, dass die im Netz erzeugten Oberschwingungen gegenüber standardmäßigen Umrichtern reduziert sind.

Auch die Kapazität des Zwischenkreises des vorgestellten Umrichters kann gegenüber Standardumrichtern mit Diodeneinspeisung etwa um den Faktor 100 niedriger dimensioniert werden. Wegen der geringeren erforderlichen Kapazität können zudem Folienkondensatoren statt Elektrolytkondensatoren eingesetzt werden, wodurch sich ein Vorteil in der Lebensdauer des Gerätes ergibt.

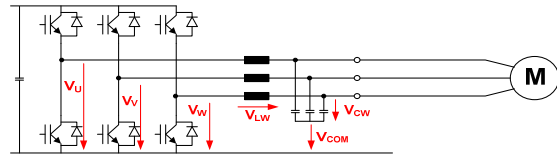
Auf der Netzseite werden zusätzlich AC-Filterkondensatoren eingesetzt, um die schaltfrequenten Ströme des Wechselrichters vom Netz fernzuhalten. Optional kann in dem Umrichter noch ein EMV-Filter zur Einhaltung der Grenzwertklasse C2 verwendet werden.

## 2.2 Design des Sinusfilters

Die wesentliche Aufgabe des ausgangsseitigen Sinusfilters besteht darin, die schaltfrequenten Spannungsanteile aus der Umrichterausgangsspannung heraus zu filtern, so dass am Motor eine sinusförmige Spannung anliegt. Für die Baugröße des Sinusfilters ist dessen Resonanzfrequenz maßgeblich:

$$f_{res} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \quad (1)$$

Diese Resonanzfrequenz ist auf die zu filternden Spannungsanteile abzustimmen. Das für die Filterbelastung relevante Ersatzschaltbild des Umrichters ist in dargestellt:



**Bild 3** Dreiphasiges Ersatzschaltbild des Umrichters

Der Sinusfilter soll für die „Differential mode“-Ausgangsspannung des Umrichters (Leiter-Leiter) konzipiert werden. Die „Differential mode“-Spannungsanteile können aus der gepulsten Ausgangsspannung und der „Common mode“-Spannung (z. B. für Phase W) berechnet werden:

$$V_{WD} = V_W - V_{COM} \quad (2)$$

mit:

$V_{WD}$ : „Differential mode“-Spannung Phase W

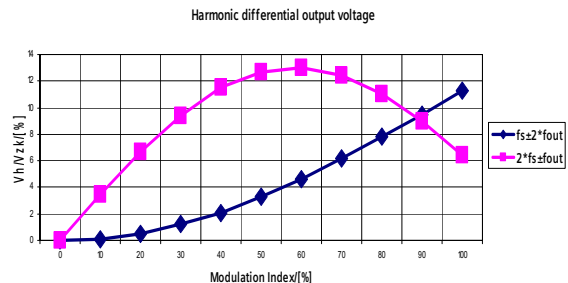
$V_W$ : gepulste Spannung Phase W

$V_{COM}$ : „Common mode“-Ausgangsspannung

Die „Common mode“-Spannung kann hierbei aus den drei gepulsten Ausgangsspannungen berechnet werden:

$$V_{COM} = \frac{V_U + V_V + V_W}{3} \quad (3)$$

Die zu filternden hochfrequenten Spannungsanteile der „Differential mode“-Ausgangsspannung sind vom Aussteuergrad des Umrichters abhängig. Im Spektrum der „Differential mode“-Spannung sind neben der Grundfrequenz die Seitenbänder der Pulsfrequenz sowie die Seitenbänder der Vielfachen der Pulsfrequenz anzutreffen. Mit steigender Ordnungszahl der Pulsfrequenz nehmen die Amplituden der Seitenbänder ab. In Bild 4 sind daher die Amplituden der Seitenbänder der Pulsfrequenz und der doppelten Pulsfrequenz als Funktion des Aussteuergrades aufgetragen:

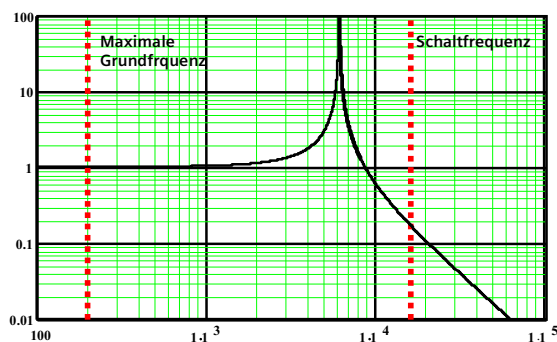


**Bild 4** Seitenbänder der Schaltfrequenz in Abhängigkeit des Aussteuergrades

Diese Spannungsanteile führen in dem Sinusfilter zu Ripple-Strömen und bestimmen somit dessen Ausle-

gung. Da der Ripple-Strom in der Filterdrossel aufgrund deren induktivem Verhalten mit steigender Frequenz abnimmt, führt die Spektrallinie mit der niedrigsten Frequenz zu dem höchsten Ripple-Strom und bestimmt somit die Dimensionierung der Drossel. Im vorliegenden Fall ist die Amplitude des Seitenbandes der einfachen Pulsfrequenz bei größter Aussteuerung maximal und beträgt etwa 11% der Zwischenkreisspannung. Bei einer Zwischenkreisspannung von ca. 1000 V ist somit mit einem Spektralanteil von ca. 110 V zu rechnen.

Als Ziel der Sinusfilterdimensionierung soll ein Spektralanteil der Seitenbänder der einfachen Pulsfrequenz von 30 V nicht überschritten werden. Dies bedeutet, dass die Amplitudenreduzierung bei Pulsfrequenz etwa den Faktor 4 bis 5 betragen soll. Betrachtet man die theoretische Kennlinie eines Filters zweiter Ordnung, so ist im vorliegenden Fall aufgrund der Pulsfrequenz von 16 kHz eine Filtereckfrequenz von ca. 6 kHz zu wählen.

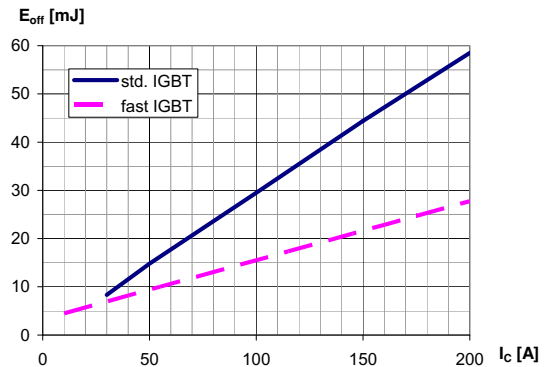


**Bild 5** Übertragungsfunktion des Sinusfilters

Bei der Dimensionierung der Filterkomponenten und gegebener Filtereckfrequenz ist letztendlich noch die Größe von Filterdrossel und Filterkondensator zu bestimmen. Eine sehr kleine Filterdrossel mit entsprechend großem Kondensator ist zwar kostengünstig, weil die Drossel i. a. teurer als der Kondensator ist. Allerdings führt diese Auslegung zu einem hohen Ripple-Strom, der die Halbleiter belastet. Im vorliegenden Fall wird für eine Umrichterleistung von 18,5 kW eine Filterdrossel von 700  $\mu\text{H}$  und ein Filterkondensator von 1  $\mu\text{F}$  (Sternschaltung) gewählt. Damit ergibt sich ein Ripple-Strom von ca.  $\pm 15\%$  des Umrichtermennstromes. Die Filterdrossel ist so klein, dass der Spannungsabfall bei Grundfrequenz weniger als 1% der Umrichterausgangsspannung beträgt. Dies ist ein weiterer Vorteil der hohen Umrichterschaltfrequenz.

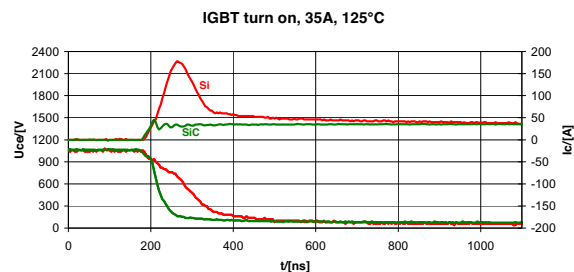
## 2.3 Leistungshalbleiter

Durch die hohe Schaltfrequenz des Umrichters müssen dessen Leistungshalbleiter auf minimale Schaltverluste optimiert werden. Deshalb wird als IGBT für den Wechselrichter ein Typ ausgewählt, der im Vergleich zu einem Standard-IGBT nur etwa 50% der Schaltverluste aufweist.



**Bild 6** Ausschaltverluste eines Standard-IGBT und eines IGBT für hohe Schaltfrequenz

Als Freilaufdiode wird eine Schottkydiode verwendet. Diese zeigt beim Ausschalten keine Rückstromspitze und schaltet dadurch nahezu verlustfrei ab. Darüber hinaus werden die im IGBT entstehenden Einschaltverluste auf etwa 30% gegenüber einem Abschaltvorgang mit einer pn-Diode reduziert.

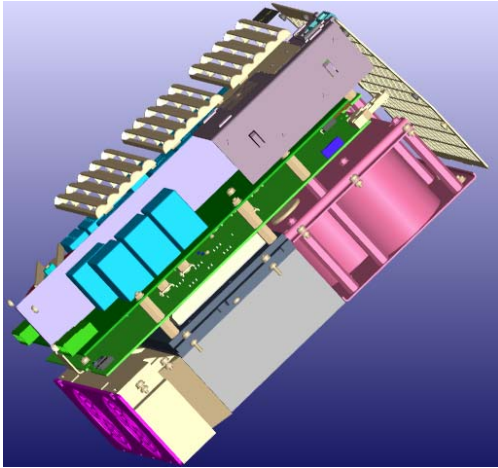


**Bild 7** Schaltverhalten einer Si-Diode und einer SiC-Diode

Schottkydioden besitzen v.a. bei hoher Sperrspannung den Nachteil, dass sie hohe Durchlassverluste aufweisen. Deshalb sind Schottkydioden aus Silizium nur bis ca. 200V überhaupt verfügbar. Mit dem Halbleitermaterial Siliziumkarbid ist es jedoch möglich, Schottkydioden bis zu einer Sperrspannung von ca. 3kV mit gutem Durchlasswiderstand herzustellen. Diese Bauteile werden im vorgestellten Umrichter weltweit erstmals in einem kommerziellen Produkt der Antriebstechnik eingesetzt.

## 2.4 Mechanisches Design

In Bild 8 ist das mechanische Design des Umrichters dargestellt. Hierzu ist die Außenwand des Gerätes ausgeblendet:



**Bild 8** Mechanische Konstruktion des Umrichters

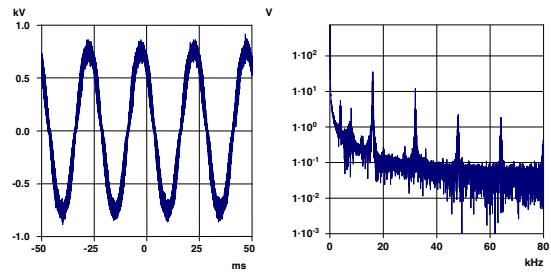
Im unteren Teil des Gerätes ist der Kühlkörper zu erkennen, auf den die Halbleitermodule montiert sind. Dieser Kühlkörper wird mit forcierter Luftkühlung entwärmt. Hinter dem Kühlkörper sind die Sinusfilterdrosseln angeordnet, die somit ebenfalls forciert gekühlt werden. Die Oberkante des Kühlkörpers und das obere Abdeckblech des Drosselpaketes bilden eine Trennlinie, die den Luftstrom der forcierten Kühlung vom oberen Teil des Gerätes fernhält.

Im oberen Teil des Gerätes sind die Elektronikbaugruppen zu erkennen. Diese werden nur durch Eigenkonvektion gekühlt. Beim Einsatz des Umrichters in verschmutzter Umgebung kann somit ein sehr robustes Verhalten erreicht, weil die verschmutzte Kühlluft nicht in Berührung mit den Elektronikbaugruppen kommt.

## 3 Experimentelle Ergebnisse

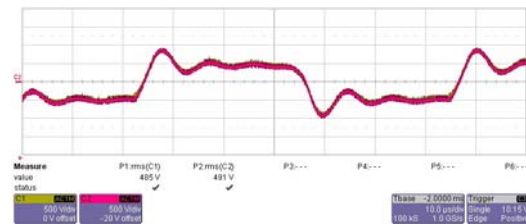
### 3.1 Spektrum der Ausgangsspannung

In Bild 9 ist der zeitliche Verlauf und das Spektrum der verketteten Motorausgangsspannung zu sehen. Die Amplitude der Seitenbänder der Schaltfrequenz von 16 kHz ist auf unter 30 V reduziert, was der Zielstellung der Auslegung des Sinusfilters entspricht.



**Bild 9** Zeitverlauf und Spektrum der Ausgangsspannung des Umrichters

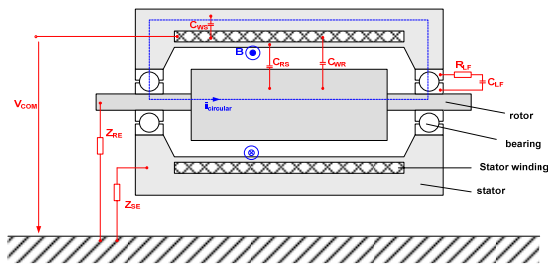
In Bild 10 ist der zeitliche Verlauf der Leiter-Erde-Spannung am Umrichteranschluss (gelb) und am Motoreingang (rot) dargestellt. Für die Leiter-Erde-Spannung existiert kein Sinusfilter, so dass die „Common mode“-Anteile der gepulsten Spannung theoretisch keine Filterung erfahren. Allerdings bildet die symmetrische Sinusfilterdrossel in Verbindung mit parasitären Kapazitäten der Motorleitung und des Motors ebenfalls ein Filter, das als  $dU/dt$ -Filter wirkt und somit die Steilheit der Leiter-Erde-Spannung begrenzt. Dadurch werden Leitungsreflexionen vermieden, so dass beide Spannungsverläufe in Bild 10 nahezu identisch sind. Die Beanspruchung der Motorisolation wird dadurch deutlich reduziert.



**Bild 10** Leiter-Erde-Spannung an Umrichteranschluss und Motoreingang

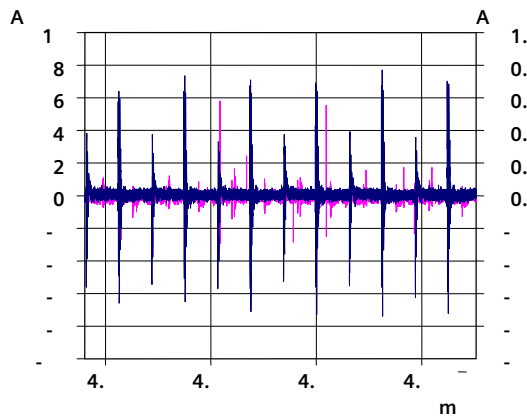
### 3.2 Lagerströme

Lagerströme sind in der Antriebstechnik ein weithin bekanntes Phänomen. Diese Ströme führen bei Motoren zu einer Schädigung der Lager und begrenzen die Lebensdauer. Lagerströme sind bereits aus den Anfängen des Elektromaschinenbaus bekannt, mit Einführung der Umrichtertechnik ist die Belastung der Motorlager jedoch deutlich angestiegen. In der Literatur wird zwischen verschiedenen Arten von Lagerströmen (Zirkularströme, EDM-Ströme, kapazitive Rotorerdströme) unterschieden. In Bild 11 ist die Entstehung von Zirkularströmen dargestellt, die häufig den größten Anteil der Lagerströme darstellen.



**Bild 11 Entstehung von Lagerströmen**

Durch den Abfluss von kapazitiven Strömen von der Statorwicklung zum Motorgehäuse wird ein hochfrequentes magnetisches Feld in Drehrichtung der Motorwelle induziert. Proportional zur zeitlichen Änderungen dieses Magnetfeldes werden Ströme in der gestrichelt gezeichneten Leiterschleife induziert. In dieser Leiterschleife liegen die Motorlager als leitfähige Elemente. Da die elektrische Kontaktfläche in Kugel- oder Rollenlagern sehr klein ist, werden in dem Lager sehr hohe Stromdichten erreicht, die zu einer Schädigung des Lagers führen können.

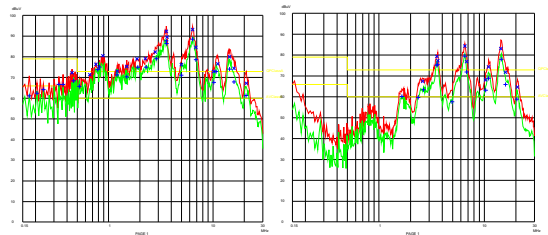


**Bild 12 Lagerstrommessung mit und ohne Sinusfilter**

Durch den Einsatz des Sinusfilters werden die Lagerströme in dem Motor deutlich reduziert. In Bild 12 sind die Lagerströme mit und ohne Sinusfilter gemessen, wobei die linke Größenachse für die Ströme ohne Sinusfilter gilt. Durch den Sinusfilter werden die Lagerströme etwa um den Faktor 10 reduziert, so dass die Lebensdauer des Motors stark verbessert wird.

### 3.3 EMV

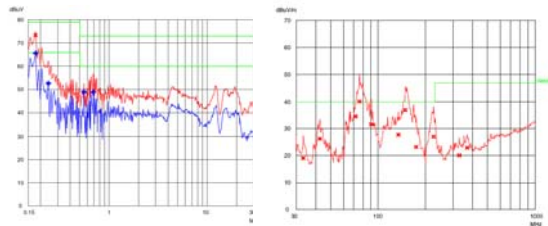
Ein weiterer interessanter Punkt ist der Einfluss des Sinusfilters auf das EMV-Verhalten des Umrichters. In Bild 13 sind zwei EMV-Messungen an dem Umrichter mit einer ungeschirmten Motorleitung von 100 m Länge dargestellt, wobei im linken Bild der Sinusfilter entfernt wurde.



**Bild 13 Einfluss des Sinusfilters auf leitungsgebundene Funkstörspannung**

Durch den Sinusfilter kann das gemessene Spektrum der Funkstörspannung im Bereich bis 2 MHz um bis zu 30 dBµV abgesenkt werden. In diesem Frequenzbereich werden die geforderten Grenzwertkurven der Klasse C2 erreicht. Unter 2 MHz wirkt hauptsächlich die Funkentstördrossel des EMV-Filters, so dass diese durch den Sinusfilter kleiner gewählt werden kann.

Im Bereich ab 2 MHz wirken in erster Linie hochfrequente Ströme über Kapazitäten der Motorleitung als Störquelle. Diese können über einen kleinen zusätzlichen EMV-Filter mit optimierten HF-Eigenschaften vom Netz ferngehalten werden.



**Bild 14 Erreichung der C2-Grenzwerte trotz ungeschirmter Motorleitungen**

Bild 14 zeigt eine Messung mit einem solchen zusätzlichen EMV-Filter am Umrichter Ausgang, wobei im linken Teil die Funkstörspannung, im rechten die HF-Feld-Abstrahlung dargestellt ist. Beide Messkurven halten die Grenzwerte der Klasse C2 ein. Der vorgestellte Umrichter hält somit die Grenzwertklasse C2 selbst mit ungeschirmter Motorleitung ein.

## 4 Zusammenfassung

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass mit dem vorgestellten Umrichter ein Gerät realisiert wurde, das einen Sinusfilter für die Motorspannung im Umrichtergehäuse integriert. Der Umrichter verwendet erstmals in der Antriebstechnik SiC-Freilaufdioden im Wechselrichter und arbeitet standardmäßig mit einer Taktfrequenz von 16 kHz. Durch den Sinusfilter werden hochfrequente Stromanteile

vom Motor ferngehalten, der grundfrequente Spannungsabfall an der Filterdrossel ist geringer als bei standardmäßigen Sinusfiltern. Die Belastung des Motors bzgl. Lagerströmen und Isolationsbeanspruchung ist stark reduziert. Der Umrichter ist in der Lage, auch mit ungeschirmten Motorleitungen die EMV-Grenzwerte der Klasse C2 einzuhalten.

Auf der Netzseite verwendet der Umrichter eine rückspeisefähige Topologie mit grundfrequent getakteten IGBTs. Die Größe des Zwischenkreises ist stark reduziert, Elektrolytkondensatoren sind durch Folienkondensatoren ersetzt. Dadurch wird die Lebensdauer des Umrichters verbessert. Die niederfrequenten Netzurückwirkungen des Umrichters sind gegenüber Standardumrichtern verbessert.

Das mechanische Design des Umrichters verzichtet auf eine forcierte Kühlung von Elektronikbaugruppen. Mit dieser Maßnahme ist die Robustheit des Umrichters in verschmutzter Umgebung verbessert.

## 5 Literatur

- [1] Bruckmann,M; Baudelot,E; Weis,B; Mitlehner,H: Switching behavior of diodes based on new semiconductor materials and silicon – a comparative study, EPE'97, Vol.1, pp 513 – 517, Trondheim 1997
- [2] Goepfrich,K; Rebbereh,C; Sack,L: Fundamental frequency front end converter (F3E) – a DC link drive converter without electrolytic capacitor, PCIM Europe 2003, Internat. exhibition and conference f. power electronics, intelligent motion, power quality, Nuremberg, DE, May 20 – 22, 2003
- [3] Piepenbreier,B; Sack,L: Regenerative drive converter with line-frequency switched rectifier and without dc link components, 35<sup>th</sup> IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference 2004, Aachen, DE, 20 – 25 Jun, 2004, pp 3917 - 3923
- [4] Denzner,M: Umrichtersystem für sinusförmige Ein- und Ausgangsgrößen mit hohen Pulsfrequenzen und optimierten Filtern, Dissertation Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen 2004
- [5] Weis, B.: Kompakter 690V-Umrichter mit SiC-Schottkydioden für sinusförmige Ausgangsspannung, Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen 2008