

# Gehirn trifft Muskel: FPGA steuert Leistungshalbleiter an

*In einem Umrichter müssen Regelungs- und Leistungsteil reibungslos ineinandergreifen. Wie Software, Leistungshalbleiter und thermisches Management perfekt harmonieren, zeigt dieses Beispiel.*

THOMAS VETTER, MARTIN SCHULZ \*

Für einen Sportler liegt der Erfolg in der optimal abgestimmten Funktion von Gehirn und Muskeln. Geistige und körperliche Leistungen exzellent zu kombinieren, ist auch eine besondere Herausforderung für Umrichter in mobilen Anwendungen. Dieses gilt insbesondere, wenn wie im Konzept des Wechselrichters VECTOPOWER (Bild 1) nicht nur Motoren und Generatoren betrieben werden sollen, sondern auch Funktionen erfüllt werden müssen, die bei mobilen oder dezentralen Antriebsanwendungen zusätzlich gefordert sind. Darunter fallen die Kopplung an Stromnetze, AC/DC-Wandler auch bidirektional, die bidirektionale Kopplung an Batterien und/oder Kondensatoren

\* Thomas Vetter  
... ist CEO der ARADEX, Lorch.

Dr. Martin Schulz  
... arbeitet im Application Engineering bei Infineon Technologies, Warstein.

und die Erzeugung von Bord- und Inselnetzen. Bild 2 zeigt zusammenfassend die möglichen Einsatzszenarien eines VECTOPOWER-Umrichters.

Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit, der Logistik und insbesondere der weltweiten Ersatzteilversorgung bedarf es eines fortschrittlichen Konzeptes. Der Schlüssel hierzu ist, identische Hardware durch Nutzung von Software- oder Parametervariationen für alle Funktionalitäten bereitzustellen. Dieses Ziel lässt sich unter Berücksichtigung einiger weniger Punkte kompromisslos erreichen.

## FPGA wertet drei Strom- und Spannungsmessungen aus

Damit dieselbe Topologie mit sechs Transistoren die große Bandbreite aller Anwendungen vom Motorwechselrichter bis zum DC/DC-Wandler umsetzen kann, sind FPGAs als zentrales Steuerelement naheliegend. Besondere Vorteile ergeben sich, wenn dem

FPGA nicht nur die Erzeugung von Pulsmustern für die Transistoren, sondern auch die Bearbeitung extrem schneller Regelschleifen, insbesondere für die Stromregelung, obliegt. Das FPGA in der vorliegenden Anwendung wertet drei Strom- und drei Spannungsmessungen aus, durchläuft die Regelalgorithmen und steuert die Leistungstransistoren an. Die Zykluszeit beträgt dabei nur 2  $\mu$ s. Flexible Firmware des FPGA ist dabei der Schlüssel, die Umsetzung aller in Bild 2 dargestellten Anwendungen zu ermöglichen.

Ein breites Funktionsspektrum und die schnelle feinfühligeregelung ist das eine. Das andere, gerade bei mobilen Anwendungen, sind die besonders hohen Ansprüche an Schutzfunktionen. Zu einem großen Temperaturbereich und starken mechanischen Beanspruchungen gesellen sich Anforderungen an hohe Zyklenfestigkeit, Beherrschung stark wechselnder Lasten und die Forderung nach einem sicheren Umgang mit stark schwankenden Spannungen.

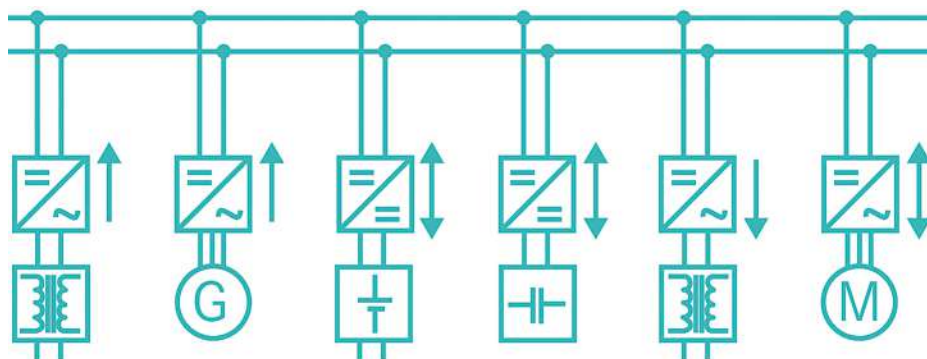
Bei Kurzschlüssen oder hohen Stromüberlasten muss innerhalb weniger  $\mu$ s eine sichere Reaktion erfolgen. Thermische Vorgänge im Innern der Leistungshalbleiter infolge normaler Lastschwankungen sind im Zeitraaster von deutlich unter 1 ms zu betrachten. Detaillierte und verlässliche Angaben des Leistungshalbleiter-Herstellers sind dazu unabdingbar. Mit ausgefeilten Methoden und modellbasierten Berechnungen in harter Echtzeit im FPGA gelingt es, je nach Anwendung und Betriebspunkt, bis zu 20% mehr Strom mit denselben Halbleitern bereitzustellen. Sowohl hinsichtlich Baugröße und Gewicht als auch unter Aspekten der Wirtschaftlichkeit, ist dies für die Applikation von Vorteil. Dies umso mehr, wenn gleichzeitig ein optimaler Schutz vor allen Extremfällen in der Anwendung erreicht wird.

Voraussetzung für dies alles ist eine Stromregelung die sich deterministisch verhält, sehr schnell und vorausberechenbar ist und die auch bei schärfsten Änderungen Über-



**Bild 1:** Der Wechselrichter VECTOPOWER ist für eine Spitzenleistung von 250 kW/350 kVA ausgelegt und kommt mit einem Bauvolumen von 10 l aus.

Bild: Mark Titz/ARADEX



**Bild 2:** Die unterschiedlichen Funktionen und Anwendungsmöglichkeiten von VECTOPOWER

schwinger im Strom vermeidet. Mit üblichen Prozessoren ist diese Anforderung nicht zu meistern. Die vorliegende Lösung basiert daher auf einem Ansatz mit FPGA in dem viele hart-parallele Prozesse und robuste State-Machines an der Abarbeitung beteiligt sind.

### Höhere Spitzenleistung durch Nutzung von Zeitkonstanten

Gerade bei Traktionsantrieben sind höhere Leistungen für einige Sekunden gefordert. Eine während der aktiven Momentenregelung fliegend umschaltbare PWM-Frequenz gestattet höhere Überlasten oder die Verwendung kleinerer IGBT und damit Kostensenkungen. Die Wahl der geeigneten PWM-Frequenz ist als Optimum aus verschiedenen Anforderungen zu sehen. Höhere PWM-Frequenzen senken die Wärmeentwicklung im Motor durch Reduktion des Strom-Ripples, erhöhen aber die Verluste der Leistungshalbleiter.

Ein Vergleich der thermischen Verhältnisse zeigt, dass eine Reduktion der Schaltfrequenz von 9 auf 4,5 kHz eine Erhöhung des Ausgangsstromes um 40 bis 45% gestattet. Mittels der FPGA-basierten Regelung gelingt es, die PWM-Frequenz fliegend umzuschalten, ohne dass im erzeugten Motormoment größere Einflüsse zu sehen sind. Dies ermöglicht es, von den im Normalbetrieb vorteilhaften 9 kHz für bestimmte Betriebszustände auf 4,5 kHz und zurück zu wechseln. Die thermische Zeitkonstante der Leistungshalbleiter liegt im Bereich unter 100 ms; die von Motoren deutlich oberhalb 100 s. Für eine starke Beschleunigungsphase oder für eine Anfahr-situation etwa aus einem Schlagloch heraus (Elektromobilität) bietet es sich an, dieses Verhalten zu nutzen und für z. B. 10 s die Schaltfrequenz abzusenken.

Die FPGA-Regelungstechnik stellt ein Werkzeug dar, den Aufbau von Endstufen preisgünstiger zu gestalten. Es ergeben sich zusätzlich weitere Möglichkeiten, speziell bei

Motoren mit Permanent-Magneten. Die Magnete solcher Motoren reagieren sehr empfindlich auf unerlaubt hohe äußere Magnetfelder. Es genügen wenige  $\mu\text{s}$  an Überlast, um eine irreversible Teilentmagnetisierung auszulösen.

Aus diesem Grund dimensionieren Motorenbauer ihre Motoren mit entsprechender magnetischer Reserve. Wenn wie hier, durch sichere Beherrschung der Ströme bis in den  $\mu\text{s}$ -Bereich Überschwinger sehr klein bleiben, lassen sich Motoren realisieren, die bei gleichem Drehmoment, gleicher Leistung, gleichem Wirkungsgrad und gleichen Abmessungen bis zu 30% weniger Magnetmaterial benötigen. Die strategische Abhängigkeit vom Rohmaterial und die hohen Preise für diese Magnete zeigen, dass eine Einsparung dieser Größenordnung wirtschaftlich entscheidend ist.

Der Leistungshalbleiter stellt die Kernkomponente dar, die die Kontrolle des Leistungsflusses ermöglicht. Um der anspruchsvollen Aufgabe gewachsen zu sein sind neben den elektrischen Eigenschaften zusätzlich mechanische sowie thermische Gegebenheiten zu berücksichtigen. Während der Entwicklungsphase sind der Leistungshalbleiter, der Kühlkörper und das Lastprofil als untrennbare Einheit zu betrachten. Genaue Kenntnisse über diese Einheit ermöglicht die exakte Bestimmung der Chiptemperatur sowie des zu erwartenden Temperaturhubes.

Üblicherweise stellen Halbleiterhersteller Informationen zur Verfügung, die es dem Entwickler gestatten, auf Basis des prognostizierten Temperaturhubes die Anzahl an Lastzyklen zu bestimmen, die ein Halbleiter in einer Applikation übersteht. Mit Kenntnis der Applikation und der zu erwartenden Zyklen pro Tag ergibt sich aus dieser Zyklenzahl eine Nutzungsdauer.

Anforderungen für die Applikation Elektro-Bus für den öffentlichen Personen-Nahverkehr sehen bis zu 60.000 Betriebsstunden in 15 Jahren Nutzungsdauer vor, was einer

Laufleistung von 1 Mio. km entspricht. Um diesen hohen Anforderung genügen zu können, kamen Leistungsmodule vom Typ EconoDUAL 3 zum Einsatz. In der Entwicklung dieser neuen Modulgeneration sind umfassende Veränderungen eingeflossen, die die mechanische Robustheit, die thermische Kopplung und die elektrischen Eigenschaften verbessern. Anhand von den in Bild 3 dargestellten Details lassen sich die Veränderungen und ihre Auswirkungen auf das Design erklären.

Der Wechsel von ehemals eingesteckten Lastanschlüssen hin zu nun eingespritzten Terminals (Bild 3A) dient der Verbesserung der Vibrationsfestigkeit. Mikrobewegungen der Terminals früherer Generationen konnten hier zu zusätzlicher mechanischer Belastung der Bondverbindungen zwischen Terminal und DCB führen.

Als eine sowohl thermisch als auch elektrisch wirksame Veränderung ist die neue System-Bondung anzusehen. Als System-Bondung gelten alle Bonddrähte, die entweder verschiedene Substrate miteinander verbinden oder die elektrische Kontaktierung zwischen DCB und Anschlüssen am Modulrahmen gewährleisten. In (Bild 3B) ist ein Ausschnitt der System-Bondung gezeigt. Statt wie bisher mit Aluminiumdraht zu arbeiten erfolgte hier die Verwendung von Kupfermaterial.

Die höhere spezifische Leitfähigkeit ermöglicht es, den gewachsenen Modulstrom zu transportieren, ohne die Anzahl der Bonddrähte zu erhöhen. Dies ist aus Platzgründen häufig auch gar nicht möglich. Die geringeren ohmschen Verluste an den Kupferdrähten führen darüber hinaus zu geringeren Temperaturen. Das Material ermöglicht da-



**Bild 3:** Details im Leistungshalbleitermodul, die die Lebensdauer beeinflussen; hier gezeigt ist das EconoDUAL-3-Modul für 600 A/1200 V.

mit die Einhaltung aller Temperaturgrenzen, die für den Bau und Betrieb von Halbleitermodulen vorgegeben sind.

Ebenfalls auf eine Verbesserung der externen Verbindungsqualität zielt der Ersatz der Löttechnik durch Einpresstechnik. In anspruchsvollen Applikationen sind Lotstellen über lange Einsatzdauer hinweg sowohl hohen Temperaturhüben als auch mechanischer Belastung durch Vibration ausgesetzt. Die kontinuierliche Zerrüttung der Lotverbindung führt auf sogenannte kalte Lotstellen zurück, deren elektrischer Kontakt zunächst intermittierend, im Extremfall völlig zerstört ist.

Die neu eingeführten PressFIT-Kontakte (Bild 3C) gehen mit dem Platinenmaterial eine Verbindung in Form einer Kaltver-

schweißung ein. Diese Verbindung erweist sich als gasdicht, vibrationsresistent und elektrisch hochwertig. Gemessen an den aus der Literatur bekannten Ausfallraten ist die eingepresste Verbindung um den Faktor 100 zuverlässiger als eine vergleichbare Löt- oder Federkontaktstelle.

Eine weitere thermische Verbesserung besteht in der ab Werk aufgetragenen Schicht (Bild 3D), die nach der Montage des Moduls die thermische Anbindung an den Kühlkörper bewerkstelligt. Das speziell für diese Art Module entwickelte thermische Interface-Material (TIM) besteht aus einer phasenwechselnden Trägermatrix, auf der ein thermisch aktiver Füllstoff aufliegt. Die Auftragung im Werk erfolgt mittels vollautomatisierten Prozess mit präziser Prozesskontrolle. Hiermit ist sichergestellt, dass die vorbestimmte Menge an Material aufgetragen ist.

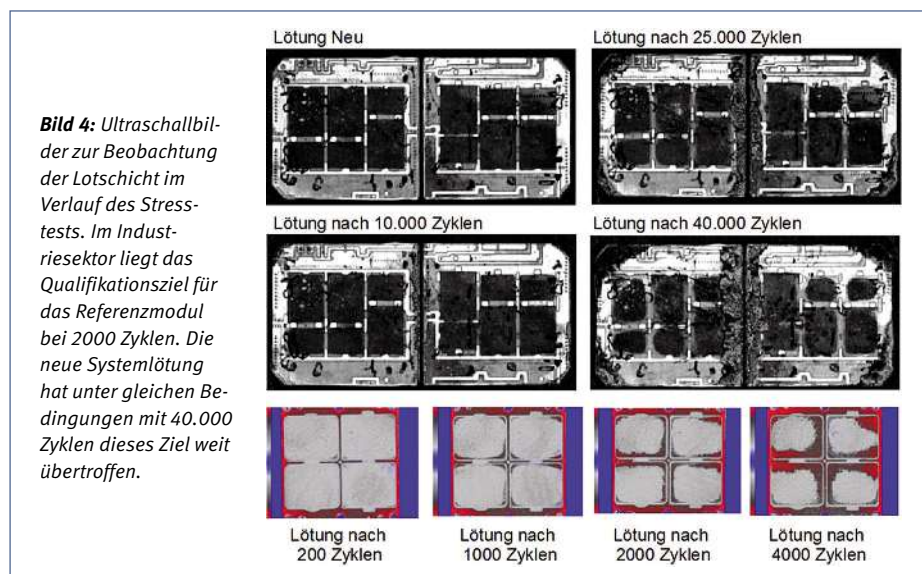
Das im Bild 3 erkennbare Muster korreliert mit der makroskopischen Geometrie der Bodenplatte; über die verschiedenen großen Waben lässt sich lokal das benötigte Minimalvolumen auftragen. Die durch diese Maßnahme wachsenden Flächen ohne TIM erzeugen direkten Metall-Metall-Kontakt, was der thermischen Kopplung des Moduls dienlich ist.

In ausgiebigen Testreihen, untermauert durch jahrelange Felderfahrung, hat sich das Material als thermisch herausragend und mechanisch belastbar dargestellt. Der als kritisch einzustufende Fehlermechanismus Auspumpen von Wärmeleitpaste tritt an dem neuen Material nicht auf.

Eine Neuentwicklung speziell für Module in der Anwendung Commercial and Agricultural Vehicles (CAV) besteht in einer hoch zuverlässigen Systemlötung. Die Systemlötung ist die Verbindungsstelle zwischen den Trägersubstraten und der Modulbodenplatte. Durch geringe Abweichungen in den thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Kontaktpartner entsteht an diesem Übergang eine mechanische Spannung, die zur Delamination in der Lotschicht führt. Eine solche Schädigung verringert den Querschnitt, der für den thermischen Transfer zur Verfügung steht. Der Fehlermechanismus erfährt eine positive Rückkopplung, da weniger abtransportierte Wärmeenergie zu noch höheren Temperaturen führt. Bild 4 zeigt Auswertungen aus der Ultraschallmikroskopie, die den Test mit der neuen Systemlötung dokumentieren. Zum Vergleich ist ein Industriemodul mit herkömmlicher Lötung abgebildet.

Weiterführende Links zu den Produkten im Onlinebeitrag 42606954. // KU

Infineon  
+49(0)89 23425869



**Bild 4:** Ultraschallbilder zur Beobachtung der Lotschicht im Verlauf des Stress-tests. Im Industriesektor liegt das Qualifikationsziel für das Referenzmodul bei 2000 Zyklen. Die neue Systemlötung hat unter gleichen Bedingungen mit 40.000 Zyklen dieses Ziel weit übertroffen.