

BAURAUMOPTIMIERTER AUFBAU EINES UNIVERSELLEN MEHRPHASENWECHSELRICHTERS FÜR AUTOMOBILE ANWENDUNGEN

N. Langmaack

1 EINLEITUNG

Elektrofahrzeuge für den Individualverkehr bergen durch ihre Unabhängigkeit von Primärenergieträgern ein enormes Zukunftspotenzial. Die Erschließung des weiten Sektors der batteriebetriebenen Elektrofahrzeuge erfordert neben der Weiterentwicklung optimierter Antriebsmaschinen, innovativer mechanischer Konzepte und flexibler Karosseriegestaltung auch neue Konzepte und Strategien im Bereich der Leistungselektronik.

Die Anforderungen für einen Antriebswechselrichter im Fahrzeug unterscheiden sich grundlegend von den Anforderungen an Industriewechselrichter. Zu diesen Anforderungen gehören eine optimierte Nutzung des zur Verfügung stehenden Bauraums, eine Gewicht sparende Bauweise, eine hohe Toleranz gegen Vibrationen und je nach Einbauort im Fahrzeug Dichtigkeit gegen Spritzwasser und Verschmutzung, um nur einige Punkte zu nennen. Auch die Spannungsniveaus im Fahrzeug sind frei definierbar. Sie variieren möglicherweise mit der Batteriespannung in einem weiten Bereich und sind nicht durch starre Versorgungsnetze vorgegeben.

Im Folgenden werden ein am Institut entwickeltes Konzept für einen besonders flexiblen Wechselrichter sowie der kompakte exemplarische Aufbau eines Versuchsträgers präsentiert.

2 ANTRIEBSKONZEPTE MIT MEHRPHASENWECHSELRICHTERN

Der entwickelte Mehrphasenwechselrichter mit sechs baugleichen und individuell ansteuerbaren Halbbrücken an einem gemeinsamen Spannungszwischenkreis eröffnet vielfältige Möglichkeiten im Hinblick auf den Einsatz sowohl in Laborumgebungen als auch in Elektrofahrzeugen. **Bild 01** zeigt den prinzipiellen Aufbau der Leistungselektronik.

Zu den interessantesten mit dieser Topologie realisierbaren Aufbauten gehören:

- Betrieb einer einzelnen dreisträngigen Drehstrommaschine mit Einzelstrangspeisung
- Betrieb zweier dreiphasiger Drehstrommaschinen als Antriebsmaschinen
- Betrieb eines Prüflings und einer Belastungsmaschine in einem Versuchsaufbau

Insbesondere im Hinblick auf eine hohe Ausnutzung des Wechselrichters ist auch der mögliche Betrieb mehrsträngiger (z.B. $m_s=5$ oder $m_s=6$) elektrischer Maschinen zu beachten.



Bild 01: Sechsheisiger Brückenwechselrichter mit Spannungszwischenkreis

2.1 Dreisträngige Drehstrommaschine mit Einzelstrangspeisung

Dieses Konzept, bei dem die drei Stränge einer Drehfeldmaschine jeweils durch einen Vierquadrantensteller gespeist werden, bietet insbesondere im Hinblick auf die Ausnutzung der zur Verfügung stehenden Zwischenkreisspannung interessante Vorteile. Da im Gegensatz zur klassischen Kombination aus einem Wechselrichter in B6-Brückenschaltung und einer im Stern verschalteten Maschine bei der Einzelstrangspeisung die volle Zwischenkreisspannung als Strangspannung an der Maschine zur Verfügung steht, gewinnt man bei der Auslegung der Spannungsniveaus an Flexibilität. Besonders bei der direkten Kopplung von Zwischenkreisspannung und Batteriespannung ist dies von großer Bedeutung.

Um beispielsweise eine Standardmaschine mit 230 V Strangspannung zu betreiben, ist bei einem Wechselrichter in Brückenschaltung eine Zwischenkreisspannung von mindestens 565 V nötig. Wird diese Spannung unter Last von einer Batterie geliefert, muss das gesamte System, je nach Batterietyp, im Extremfall bereits auf eine Ladeschlussspannung von etwa dem zweifachen Wert, also ca. 1000 V ausgelegt werden. Die gleiche Maschine ließe sich mit Einzelstrangspeisung bereits aus einem Zwischenkreis von 326 V versorgen. Es ergibt sich zur Auslegung eine Ladeschlussspannung von ca. 650 V.

2.2 Zwei dreiphasige Antriebsmaschinen

Antriebskonzepte für Elektroautomobile mit zwei oder vier Antriebsmaschinen eröffnen interessante Möglichkeiten des regelungstechnischen Eingriffs in die Fahrdynamik wie "torque vectoring" oder "active jaw".

Die Variante, zwei Antriebsmaschinen an einem gemeinsamen, integrierten, mehrsträngigen Wechselrichter zu betreiben, liefert hier eine raumsparende und effiziente Lösung, da verschiedene Wechselrichterkomponenten wie die Zwischenkreisüberwachung und die Steuerungselektronik gemeinsam verwendet werden können. Der Aufwand für Verkabelung und Verrohrung der Kühlung wird minimiert.

Auch im Hinblick auf Sicherheitsaspekte ist die Integration zweier logischer Maschinenregelungen in einer Wechselrichtersteuerung vorteilhaft, da auch in einem Fehlerfall, der nur eine Maschine betrifft, beide Antriebsmaschinen gleichermaßen und unmittelbar in einen sicheren Zustand überführt werden können.

2.3 Maschinenprüfstand mit integriertem Doppelwechselrichter

Die komfortabelste Vermessung einer zu prüfenden Maschine lässt sich durch den Betrieb an einer Belastungsmaschine realisieren. Nur so kann der Betrieb in allen vier Quadranten unter gleich bleibenden Bedingungen untersucht werden. Auch hierbei ergeben sich Vorteile durch die Integration zweier Wechselrichter zu einem Mehrphasenwechselrichter.

So kann die Auswertung aller elektrischer Klemmengrößen, sowohl auf Seiten des Prüflings als auch auf Seiten der Belastungsmaschine, direkt in der Wechselrichtersteuerung erfolgen. Auch das Prüfprotokoll einer (teilweise) automatisierten Vermessung kann zentral im Wechselrichter erzeugt und überwacht werden.

Durch die unmittelbare Kopplung der Teilwechselrichter über den gemeinsamen Zwischenkreis reduziert sich der Aufwand für die Ein- und Rückspeiseeinheit des Prüfaufbaus drastisch. Die Leistung der Einspeisung muss lediglich die auftretenden Verluste und die Beschleunigungsleistung abdecken. Die ausschließlich beim Abbremsen der Anordnung wieder zurückgespeiste Energie kann in einem Bremssteller umgesetzt werden.

3 EXEMPLARISCHER AUFBAU

Der entwickelte Mehrphasenwechselrichter stellt eine Plattform bereit, die die Erprobung verschiedener Antriebstopologien und Regelstrategien ermöglicht. Im Vordergrund stehen dabei die Flexibilität und Erweiterbarkeit. Zugleich ist er aber auch ein Beispiel für einen bauraumoptimierten Aufbau mit einem innovativen Kühlkonzept. Er soll in einem am Institut entwickelten Elektrofahrzeug eingesetzt und als Untersuchungs- und Anschauungsobjekt in Studentenpraktika zum Thema Leistungselektronik verwendet werden.

3.1 Leistungshalbleiter

Im aufgebauten Wechselrichter kommen IGBT-Module der Firma Semikron zum Einsatz. Sie zeichnen sich durch hohe Leistung und Effizienz aus und erlauben durch ihre flache Bauform einen Bauraum sparenden Aufbau bei dennoch günstigen thermischen Eigenschaften. Die gewählten Module haben eine zulässige Sperrspannung von 1200 V und einen Nennstrom von 450 A.

Bild 02 zeigt das Halbbrückenmodul im SEMiX3s-Gehäuse mit der entwickelten Treiberplatine. Die Treiberschaltung zeichnet sich neben dem kompakten Aufbau durch vielfältige Sicherheitsfunktionen wie Kurzschlussüberwachung und Active-Clamping zur Begrenzung von Schaltüberspannungen aus. Die Treiberleistung ist ausreichend für Schaltfrequenzen von über 25 kHz.



Bild 02: IGBT-Halbbrückenmodul mit Treiberplatine

3.2 Zwischenkreis

Aufgrund ihrer höheren Pulsstrombelastbarkeit und längeren Lebensdauer finden speziell für den Einsatz als Zwischenkreiskapazität entwickelte Folienkondensatoren Verwendung. Die verfügbare quaderförmige Bauform bietet sich für einen dicht gepackten Aufbau an.

Die parallele Anordnung der Halbbrückenmodule ermöglicht zusammen mit den ausgewählten Zwischenkreiskondensatoren eine besonders kompakte und niederinduktive Verschienung des Zwischenkreises. Diese wird in Form zweier deckungsgleicher Aluminiumplatten ausgeführt, die in geringem Abstand übereinander angeordnet werden. **Bild 03** zeigt den Aufbau der Verschienung sowie die direkt an den Modulklemmen montierten Snubber-Kondensatoren vor dem Einbringen der Isolierfolien.



Bild 03: Verschienung von IGBT-Modulen und Zwischenkreiskondensatoren

3.3 Kühlung

Wie vorangegangene Untersuchungen am Institut bestätigt haben, handelt es sich bei der direkten Wasserkühlung mittels der von Danfoss entwickelten Shower Power Technologie um ein besonders effizientes Kühlverfahren. Die direkte turbulente Anströmung der Modulbodenplatte eliminiert die thermischen Widerstände am Übergang zwischen Modul und üblichen geschlossenen Flüssigkeitskühlern. Der gesamte Wärmewiderstand zwischen den Halbleitern und dem Kühlmedium wird hierdurch deutlich verringert.

Der ausschlaggebende Vorteil gegenüber Infineons ähnlich effizienter Pin-Fin-Technik ist, dass keine speziell angefertigten Module benötigt werden, sondern handelsübliche Modulgehäuse mit glatter Bodenplatte auf dem Kühlkörper montiert werden können.

Der in **Bild 04** gezeigte Kühlkörper mit den von Danfoss zur Verfügung gestellten Shower Power Inlets wurde in der Institutswerkstatt angefertigt. Die sechs Halbbrückenmodule werden darauf mit minimalem Abstand zueinander parallel angeordnet.



Bild 04: Shower Power Kühlkörper für sechs IGBT-Module

3.4 Steuerungselektronik

Die entwickelte Elektronik zur Steuerung und Überwachung des Wechselrichters verwendet einen zentralen Mikrocontroller aus der aktuellen dsPIC-Baureihe der Firma Microchip. Er erlaubt dank seiner neun PWM-Generatoren und einer großen Zahl an AD-Wandler-Kanälen eine Skalierung des Wechselrichteraufbaus auf drei, sechs oder neun Halbbrücken. Zum Einsatz im automobilen Umfeld wird auch die Verwendung einer CAN-Schnittstelle vorbereitet.

Die Messung aller einzelnen Lastströme erlaubt die Implementierung flexibler Regelungen in allen möglichen Verschaltungstopologien. Für Plausibilitätsprüfungen wird auch eine Zwischenkreisstrommessung vorgesehen.

Das Sicherheitskonzept des Wechselrichters umfasst eine Hardwareüberwachung mit einstellbaren Grenzwerten für alle gemessenen Ströme, Spannungen und Temperaturen. Zusätzlich ist eine Überwachung aller Mess- und Regelgrößen im Mikrocontroller möglich.

Für eine einfache Integration des Wechselrichters erzeugt sich die Steuerungselektronik die benötigten Versorgungsspannungen aus einer einzelnen 12V-Versorgung.

Die Anordnung der Steuerungsplatinen auf einem Schirmblech über der Leistungselektronik ist in **Bild 05** in der Seitenansicht dargestellt.

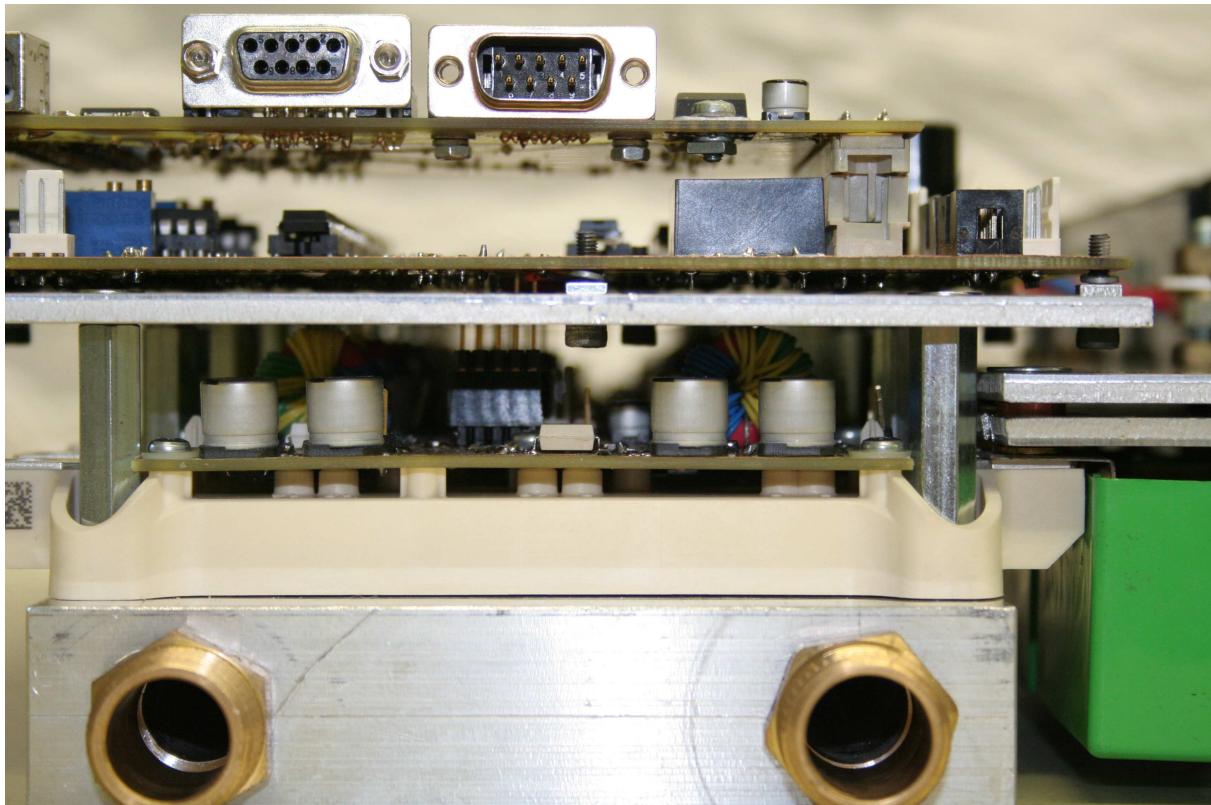


Bild 05: Anordnung von Kühlkörper, IGBT-Modulen, Treiberplatinen, Schirmblech und Steuerungselektronik

3.5 Leistungsdaten

Zum Vergleich der unterschiedlichen möglichen Schaltungstopologien ist es sinnvoll, die jeweils maschinenseitig bereitstellbare Scheinleistung des Wechselrichters zu berechnen. Dazu wird hier jeweils von einer Auslegungszwischenkreisspannung von 600 V, einem Strommaximalwert entsprechend dem Nennstrom der IGBT-Module von 450 A sowie einem Betrieb mit sinusförmigen Spannungs- und Stromverläufen ausgegangen.

Für den Betrieb mit Einzelstrangspeisung erhält man eine Wechselrichterscheinleistung von 405 kVA. Beim Betrieb zweier dreisträngiger Maschinen an B6-Teilwechselrichtern erhält man $2 \cdot 234 \text{ kVA} = 468 \text{ kVA}$. Die Ausnutzung des Wechselrichters verschlechtert sich durch den Betrieb mit Einzelstrangspeisung bei konstanter Zwischenkreisspannung also nur um etwa 15 %.

Die äußersten Abmessungen des kompletten, in **Bild 06** dargestellten Aufbaus betragen 400 mm · 345 mm · 105mm. Ein quaderförmiges Gehäuse hätte also ein Innenvolumen von 14,5 l. Bei einer Wechselrichterausgangsleistung von 468 kVA in einer 2xB6-Konfiguration entspricht das einer Leistungsdichte von etwa 32 kVA pro Liter.



Bild 06: Ansicht des fertig gestellten Versuchsträgers im Prüffeld

4 ZUSAMMENFASSUNG

Die dargestellte Topologie eines Mehrphasenwechselrichters eröffnet innovative Möglichkeiten zum flexiblen Antriebsentwurf. Sowohl die Vorteile der hohen Ausnutzung der Zwischenkreisspannung im Betrieb mit Einzelstrangspeisung als auch Konzepte mit mehreren Antriebsmaschinen an einem integrierten Wechselrichter können bei der zukünftigen Entwicklung von Elektroautomobilen eine Überlegung wert sein.

Die Shower Power Kühlung ist eine der effektivsten derzeit verfügbaren Flüssigkeitskühlungstechnologien und lässt sich problemlos mit üblichen Halbleitermodulgehäusen kombinieren.

Anhand des Versuchsaufbaus konnte gezeigt werden, wie mit moderner Technik ein äußerst dicht gepackter Wechselrichter mit höchster Leistungsdichte realisiert werden kann.

LITERATUR

[1] N. Langmaack: Entwicklung und Aufbau eines universellen Mehrphasenwechselrichters für automobiler Anwendungen, Diplomarbeit am IMAB, 2010

[2] I. Koch, N. Lescow: Vergleich verschiedener Methoden der Flüssigkeitskühlung, IMAB Jahresbericht 2008

[3] Klaus Olesen: Innovative Cooling Concept for Power Modules, Danfoss Silicon Power GmbH, BodosPower906

[4] Danfoss Silicon Power: DEDDS Technology "Shower Power", Mai 2003