

Reduktion der Streuinduktivitäten

Leistungsmodul mit einem zusätzlichen niederinduktiven Strompfad

Eines der Hauptprobleme der Leistungsmodule sind parasitäre Induktivitäten, die sich insbesondere bei schnellen Schaltvorgängen bemerkbar machen. Um die parasitären Induktivitäten zu reduzieren, wurden bereits verschiedene komplexe Anordnungen des Gleichstrompfades mit Überlappung der Stromschienen untersucht. Dieser Beitrag stellt ein neues Konzept vor.

Die Induktivität verursacht Probleme in Leistungsmodulen. Beim Ausschalten eines Transistors kommt es zu einem Stromsprung, der durch die parasitären Induktivitäten eine Spannungsspitze verursacht, die sich nach der Formel berechnet:

$$V_{CE(\text{peak})} = V_{CE} + L \times di/dt$$

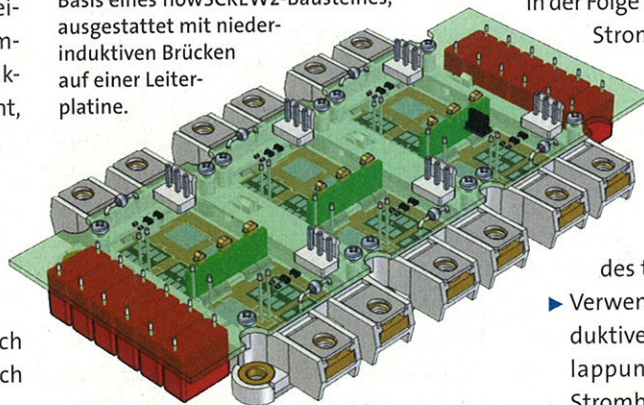
Diese Spannungsspitze stellt eine Gefahr für die Halbleiter dar und erfordert eine Anpassung der Sperrspannung. Im Transistor entstehen dadurch zusätzliche Energieverluste, die sich nach der Formel berechnen:

$$E_{\text{off}} = \int V(t) \cdot I_c(t) \cdot dt$$

Als Folge muss die maximal mögliche Schaltfrequenz reduziert werden. Die Überspannung ist linear Abhängig von der Induktivität und der Höhe des unterbrochenen Stromes. Daraus ergibt sich die Forderung nach Leistungs-Baugruppen mit sehr geringer Induktivität. Je höher der Schaltstrom, desto wichtiger wird es die Induktivität zu verringern.

Beispiel: Während bei 100 A und 700 V Zwischenkreisspannung Bauteile mit 1200 V Sperrspannung und einer Streuinduktivität von 10 nH akzeptabel sind, muss bei 500 A/700 V die Streuinduktivität auf 2 nH reduziert werden, um das gleiche Schaltverhalten zu erreichen. Im Gegensatz dazu steht der Bedarf an Strompfaden mit geringem Widerstand, was durch größere Stromschienen und Schraubenklemmen erreicht werden kann, aber zur unerwünschten Er-

Bild 1: Entwurfskonzept eines Moduls auf Basis eines flowSCREW2-Bausteines, ausgestattet mit niederinduktiven Brücken auf einer Leiterplatte.



höhung der parasitären Streuinduktivitäten führt. In der Realität liegen die Induktivitäten daher bei ca. 20 nH.

Aufbaukonzept zur Reduktion der Induktivität in Leistungsmodulen

Das Prinzip beruht auf einem separaten parallel geschalteten Strompfad für den transienten Strom. Während des Schaltvorganges fließt der transiente Strom durch einen niederinduktiven Strompfad, wobei der Dauerstrom durch einen Strompfad mit einem niedrigen Wirkwiderstand fließt (Bild 2).

Die elektrischen Verbindungen in Leistungsmodulen müssen für die Durchleitung des Dauerstromes dimensioniert werden. Man verwendet massive Stromschienen um eine Überhitzung zu vermeiden, was aber zur Erhöhung der Induktivität führt. Im Gegensatz dazu wird der zusätzliche Pfad für den transienten Strom nur während des Schaltvorganges bei hohem di/dt , für einige hundert Nanosekunden belastet. Wegen dieser kurzen Zeit bleibt die thermische Belastung des transienten Strompfades gering und muss nicht für hohe Verlustleistung dimensioniert werden.

Entwicklungsziele

In der Folge wird nun ein niederinduktiver Strompfad entworfen und der bereits vorhandene Strompfad mit geringem Leitungswiderstand für den Dauerstrom verwendet. Es gibt zwei Ansätze zur Reduzierung der Induktivität im Pfad des transienten Stromes:

- ▶ Verwendung eines extrem niederinduktiven Strompfades mit der Überlappung der Stromschienen (z. B. Strombahnen auf einer Leiterplatte, Verwendung von Kondensatorfolie als Verbindung, etc.)
- ▶ Parallelschaltung mehrerer Verbindungen. Die besten Ergebnisse bekommt man bei einer abwechselnden Polarität der Anschlüsse.

Entwicklungskonzept

Das Modul wird auf Basis eines standardisierten flowSCREW-Moduls entwickelt. Der Pfad für den transienten Strom besteht aus Leiterplattenbrücken im Modul, welche die DCB-Substrate miteinander verbinden. Die Leiterbahnen für den transienten Strompfad sind so angeordnet, dass sie einander vollständig überlappen. Das bedeutet, dass jede positive Leiterbahn auf einer Leiterplatte von einer anderen negativen Leiterbahn in einer anderen Lage der Leiterplatte völlig überlappt wird. Die Finger der kleineren Adapter-Leiterplatte sind in die rechteckigen Löcher der Haupt-Leiterplatte eingelötet. Ohne geeignete Maßnahmen zur Kompensation würden die erforderlichen Spannungsabstände zwischen dem positiven und negativen Finger würde eine parasitäre Streuinduktivität verursachen. Das Problem wird gelöst indem man in den Innen-

▶ AUTOR



Michael Frisch (Bild), Vincotech GmbH, Unterhaching und Temesi Ernő, Vincotech Kft., Bicske (Ungarn)

lagen des Fingers eine Leiterbahn mit dem entgegengesetzten Spannungspotential verlegt. Der negative Finger hat innen eine Kupferschicht mit einem positiven Potential und umgekehrt. Diese Anordnung führt dazu, dass in den Streuinduktivitäten der Lötverbindung weniger Energie gespeichert ist. Der Pfad für den transienten Strom ist mit Folienkondensatoren mit einer Gesamtkapazität von $1,2 \mu\text{F}$ verbunden. Um die Kapazität der Kondensatoren für alle Halbbrücken zu nutzen, sind die drei Module mit einer gemeinsamen Leiterplatte mit den Kondensatoren verbunden.

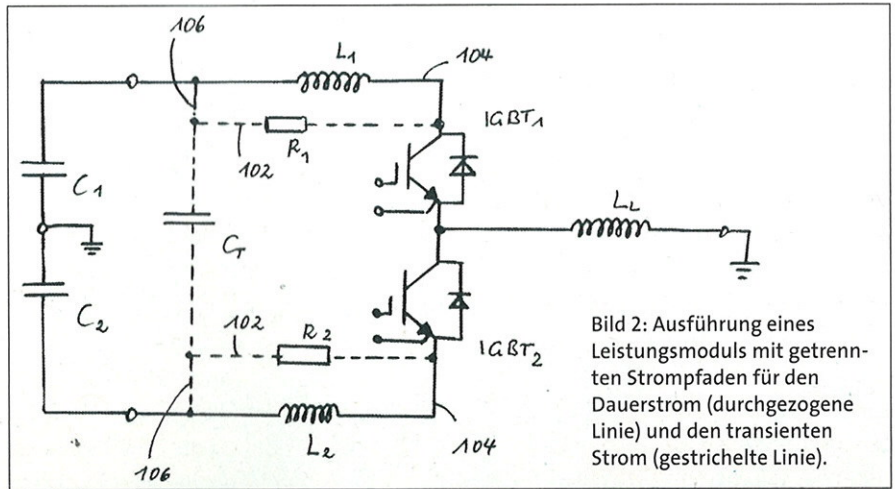


Bild 2: Ausführung eines Leistungsmoduls mit getrennten Strompfaden für den Dauerstrom (durchgezogene Linie) und den transienten Strom (gestrichelte Linie).

Überprüfung der Ergebnisse

Die Untersuchung beginnt mit der Analyse eines herkömmlichen Leistungsmoduls. Es gilt zu ermitteln, wie die Induktivität die Verwendung schneller Komponenten in Leistungsanwendungen einschränkt. Als Beispiel wird die Spannungserhöhung eines 600V/400A-Moduls im flowScrew2-Gehäuse gezeigt (Bild 3). In diesem Modul werden zwei 600V/200A-IGBT zu einer 400A-Halbbrücke parallelgeschaltet. Die parasitäre Streuinduktivität beträgt ca. 22 nH. Die Induktivität der externen Gleichstromverbindung wurde mitberücksichtigt. Diese Induktivität verursacht schon bei einem Strom von 700 A (bei 25°C) eine Überspannung von 370V. In diesem Versuch wurde die Gleichstromspannung auf 300V reduziert und lag dennoch immer noch über dem maximalen Spannungswert des IGBT.

Es werden Module mit niederinduktiven PCB-Brücken ausgestattet und dem gleichen Test unterzogen. Ein Vergleich dieser Testmodule mit den herkömmlichen standardisierten Modulen zeigt die Wirksamkeit des neuen Modulkonzepts. Der IGBT wurde bei einer Spannung von 350V und einem Strom von 720 A (bei 25°C) ausgeschaltet. Wenn die auf der Leiterplatte montierten Kondensatoren angeschlossen werden, wird die Induktivität bis auf 7 nH reduziert (Bild 4). Die Überspannung beträgt ca. 190V bei 720 A (25°C), was bedeutet, dass das Modul mit einer maximalen DC-Spannung über 400V betrieben werden kann. Es besteht die Möglichkeit, die Induktivität weiter auf bis zu ca. 5 nH zu reduzieren, wenn auch die Schrauben-

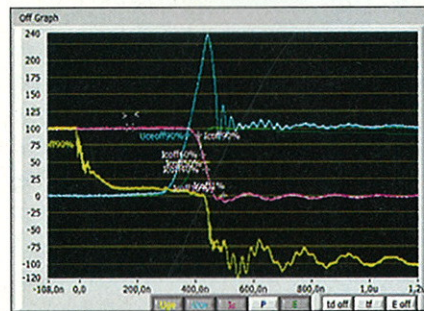


Bild 3: Abschaltkennlinie des IGBTs, untergebracht in einem herkömmlichen flowSCREW2-Baustein ohne Reduktion der parasitären Streuinduktivitäten.

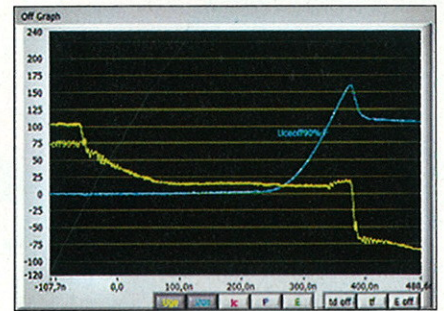


Bild 4: Abschaltkennlinie eines IGBT, untergebracht in einem herkömmlichen flowSCREW2-Baustein mit einem niederinduktiven Strompfad und angeschlossenen Kondensatoren.

klemmen parallel zu den Folienkondensatoren geschaltet sind.

Weitere Verringerung der parasitären Induktivität

Im einem weiteren Schritt kann durch Parallelschaltung der niederinduktiven Pfade für den transienten Strom eine weitere Verringerung der parasitären Induktivität erreicht werden. Dieser Ansatz ermöglicht die Anlage niederinduktiver Pfade für jeden einzelnen IGBT-Chip. In diesem Fall ist die Stromaufteilung in den parallel geschalteten Komponenten während der Ausschaltphase ebenso symmetrisch, wie auch die Aufteilung des Stromes im eingeschalteten Zustand. Dies ermöglicht die Entwicklung neuer Leistungsmodule, die für hohe Schaltfrequenzen geeignet sind.

Fazit

Parasitäre Streuinduktivitäten sind ein zentrales Problem für Anwendungen mit hoher Leistung und Schaltfrequenz. Die

Verluste begrenzen die Schaltfrequenz während die Überspannung die Zuverlässigkeit (RBSOA) des Invertersystems beeinträchtigt. Die Ergebnisse mit der neuen Modulgeneration, in denen der Strompfad in zwei separate Pfade für den transienten und statischen Strom aufgeteilt wurde, sind vielversprechend. Dabei wurde die Grenze für die Reduktion der Streuinduktivitäten noch nicht erreicht. Der neue Lösungsvorschlag ist ein wichtiger Meilenstein auf dem Weg zur Entwicklung von Leistungsmodulen mit hoher Leistung und niedriger Induktivität. Die Erhöhung der Schaltfrequenz der Leistungsmodule ermöglicht eine Minimierung der Abmessungen und des Gewichtes der Systeme, die diese Module verwenden. Das Ziel, die Induktivität bis auf 2 nH zu reduzieren, ist jetzt realistisch geworden. (jj)

infoDIRECT 555e1110
 Link zu Vincotech
www.elektronik-industrie.de