

Universität Rostock



Traditio et Innovatio

Ansteuerung rückwärts leitfähiger IGBT mit einer ausgeprägten Abhängigkeit des Diodenverhaltens von der Gate-Emitter Spannung

Dissertation

zur

Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

der Fakultät für Informatik und Elektrotechnik
der Universität Rostock

vorgelegt von

Daniel Lexow, geb. am 09.08.1987 in Neuruppin

aus Rostock

Rostock, 20.03.2025

Zusammenfassung

Der IGBT ist heute in Spannungsklassen bis 6,5 kV in elektrotechnischen Anwendungen unverzichtbar. Seine vielfältigen Anwendungsgebiete reichen von Frequenzumrichtern für Bahnantriebe und Windkraftanlagen bis hin zur Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung sowie der Elektromobilität. Die steigende Nachfrage nach leistungsfähigeren Halbleiterbauelementen, die höhere Leistungsdichte, Robustheit und Lebensdauer bieten, wird durch den RC-IGBT adressiert. Verglichen mit herkömmlichen IGBT-Modulen bietet der RC-IGBT eine höhere Stromtragfähigkeit, verbesserte Robustheit gegen Diodenstoßströme sowie eine verlängerte Lebensdauer aufgrund der thermomechanischen Entlastung durch die Ein-Chip-Technologie. Diese Vorteile resultieren aus der Integration der Diodenfunktionalität in den IGBT-Chip, wodurch eine bidirektionale Stromleitfähigkeit ermöglicht wird. Allerdings bringt die Technologie (erste Generation) auch Herausforderungen mit sich. Insbesondere die starke Abhängigkeit des Diodenleitverhaltens von der Gate-Emitter-Spannung, die eine komplexe stromrichtungsabhängige Steuerungslogik erfordert, schränkt den Einzug des RC-IGBTs in breite industrielle Anwendung bislang ein.

Weiterentwicklungen des RC-IGBTs (zweite Generation) zielen darauf ab, die Schwächen der ersten Generation durch technologische Verbesserungen zu überwinden. Insbesondere werden Konzepte entwickelt, um den Betrieb ohne stromrichtungsabhängige Ansteuerung zu ermöglichen. Diese führen jedoch zu höheren Diodenschaltverlusten, was insbesondere bei höheren Spannungen die Anwendungseffizienz negativ beeinflusst. Aus diesem Grund ist die derzeitige Anwendung der RC-IGBT-Technologie nahezu auf Spannungsebenen bis maximal 1700 V beschränkt.

Angesichts der zunehmenden Relevanz energieeffizienter Technologien im Kontext des Klimawandels wird der Bedarf an innovativen Leistungshalbleitern immer dringender. Diese Arbeit untersucht die technologische Machbarkeit der RC-IGBT-Integration in hochsperrende leistungselektronische Anwendungen, insbesondere in Spannungsklassen über 1700 V. Dabei werden die Herausforderungen und Potenziale der ersten und zweiten RC-IGBT-Generation aus einer ansteuerungstechnischen Perspektive analysiert und Lösungen aufgezeigt, die ein breiteres Anwendungsspektrum ermöglichen könnten.

Abstract

The IGBT has become indispensable in the electrical engineering field today, with voltage classes reaching up to 6.5 kV. Its diverse applications range from frequency converters for rail drives and wind turbines to high-voltage direct current (HVDC) transmission and electric mobility. The increasing demand for more powerful semiconductor components, which offer higher power density, robustness, and lifetime, is being addressed by the RC-IGBT. Compared to conventional IGBT modules, the RC-IGBT provides higher current-carrying capacity, improved robustness against diode surge currents, and an extended lifespan due to thermomechanical relief achieved through single-chip technology. These advantages stem from the integration of diode functionality into the IGBT chip, enabling bidirectional current conductivity. However, this technology (first generation) also brings challenges. In particular, the diode's conduction behavior is highly dependent on the gate-emitter voltage, necessitating a complex control logic dependent on current direction, which has so far limited the RC-IGBT's adoption in broad industrial applications.

Advancements in RC-IGBT technology (second generation) aim to overcome the limitations of the first generation through technological improvements. Specifically, concepts are being developed to enable operation without current direction-dependent control. However, these solutions lead to higher diode switching losses, which, especially at higher voltage-levels, negatively impact application efficiency. For this reason, the current application of RC-IGBT technology is mostly restricted to voltage levels of up to a maximum of 1700 V.

In light of the growing relevance of energy-efficient technologies in the context of climate change, the need for innovative power semiconductors is becoming increasingly urgent. This study examines the technological feasibility of RC-IGBT integration into high-blocking power electronic applications, particularly in voltage classes above 1700 V. The challenges and potentials of the first and second RC-IGBT generations are analyzed from a gate control perspective, and solutions are identified that could enable broader applications.