

Desaturation Control-based Turn-off of Single and Double Gate Low-Saturation IGBTs for Reduced Turn-off Energy Losses

A Dissertation submitted
in fulfillment for the award of the degree of

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

by

Vishwas Acharya Nayampalli, M. Sc.

**Universität
Rostock**



Traditio et Innovatio

**Institute of Electrical Power Engineering
Faculty of Electrical Engineering and Computer Science
University of Rostock**

Rostock, 30.01.2026

Abstract

The increasing number of medium to high voltage and power applications of power electronic converters have provided further impetus to research and development of modern Insulated Gate Bipolar Transistors (IGBTs). Advancements in chip technologies are making it possible to produce IGBTs with low on-state voltage drop coupled with increasing current ratings. Such low-saturation voltage IGBTs are advantageous in converter applications with low switching frequencies. However, such IGBTs also feature increased turn-off energy losses due to the large amount of plasma in the device.

This thesis deals with turn-off of modern low-saturation IGBTs with desaturation control. The objective is to reduce the excess plasma in the device during the desaturation duration in order to decrease the losses during the commutation transient.

Firstly, it will be shown that the feedforward based desaturation control suffers from disadvantages that necessitates more sophisticated approaches. Following this, the low voltage active clamping based desaturated turn-off method is presented and investigated through extensive TCAD simulations as well as measurement results where devices are available. The potential of the desaturated turn-off in modern IGBTs of voltage classes 1.2 kV, 3.3 kV and 6.5 kV will be brought out through extensive TCAD simulation results. Desaturated turn-off of double gate IGBTs is a trending topic that is next investigated. Measurement results on experimental 1.2 kV double gate IGBTs will be provided to demonstrate the extraordinary turn-off energy loss reduction in this device. TCAD simulations on double gate IGBT models of different voltage classes will further show the advantages and potential of this device in 1.2 kV, 3.3 kV and 6.5 kV IGBTs. Importantly, the close correspondence between measurement results and TCAD simulation results regarding reduction in turn-off energy losses in 1.2 kV low saturation voltage IGBTs supports the optimism that results indicated by simulations can also be reproduced in devices of voltage classes 3.3 kV and 6.5 kV. The desaturated turn-off transients will feature large dv/dt values during the commutation transients, that poses the question of dynamic avalanche in the post-desaturation transient. This topic is investigated through TCAD simulations, where it will be shown that high dv/dt will not be a matter of concern regarding dynamic avalanche. Finally, the desaturated turn-off is considered in the context of converter operation, where short duty cycles are encountered. A straightforward switching control scheme for such situations are presented, which can be implemented without major effort in higher level converter control.

Zusammenfassung

Die zunehmende Anzahl von Mittel- und Hochspannungsanwendungen von leistungselektronischer Umrichter hat der Forschung und Entwicklung moderner Insulated Gate Bipolar Transistors (IGBTs) weitere Impulse verliehen. Fortschritte in der Chip-Technologie ermöglichen die Herstellung von IGBTs mit niedriger Durchlassspannung auch bei steigenden Nennströmen. Solche IGBTs mit niedriger Durchlassspannung sind vorteilhaft in Umrichteranwendungen mit niedrigen Schaltfrequenzen. Allerdings weisen solche IGBTs aufgrund der hohen Plasmamenge im Bauelement auch erhöhte Ausschaltverluste auf.

Diese Arbeit befasst sich mit dem Ausschalten moderner IGBTs mit niedriger Durchlassspannung unter Verwendung der Entsättigungssteuerung. Das Ziel besteht darin, das überschüssige Plasma im Bauelement während der Entsättigungsdauer zu reduzieren, um die Verluste während des Kommutierungsübergangs zu verringern.

Zunächst wird gezeigt, dass das Feedforward-basierte Entsättigungssteuerung Nachteile aufweist, die komplexere Ansätze erforderlich machen. Anschließend wird das auf aktiver Klemmschaltung bei niedriger Spannung basierende entsättigte Ausschaltverfahren vorgestellt und sowohl mittels umfangreicher TCAD-Simulationen als auch anhand von Messergebnissen verfügbarer Bauelemente untersucht. Das Potenzial des entsättigten Ausschaltens in modernen IGBTs der Spannungsklassen 1,2 kV, 3,3 kV und 6,5 kV wird anhand umfangreicher TCAD-Simulationsergebnisse aufgezeigt. Das entsättigte Ausschalten von Double-Gate-IGBTs stellt ein aktuelles Forschungsthema dar und wird im Anschluss untersucht. Messergebnisse an experimentellen 1,2-kV-Double-Gate-IGBTs werden präsentiert, um die starke Reduktion der Ausschaltenergieverluste in diesem Bauelement zu demonstrieren. TCAD-Simulationen an Double-Gate-IGBT-Modellen unterschiedlicher Spannungsklassen verdeutlichen darüber hinaus die Vorteile und das Potenzial dieses Bauelements für IGBTs der Spannungsklassen 1,2 kV, 3,3 kV und 6,5 kV. Von besonderer Bedeutung ist die enge Übereinstimmung zwischen Messergebnissen und TCAD-Simulationen hinsichtlich der Reduktion der Ausschaltenergieverluste bei 1,2-kV-IGBTs mit niedriger Sättigungsspannung. Diese Übereinstimmung stützt den Optimismus, dass die durch Simulationen aufgezeigten Ergebnisse auch bei Bauelementen der Spannungsklassen 3,3 kV und 6,5 kV reproduzierbar sind. Die entsättigten Ausschalttransienten weisen während der Kommutierung hohe dv/dt -Werte auf, was die Frage nach Dynamischer Avalanche in post-Entsättigungstransienten aufwirft. Dieses Thema wird

mittels TCAD-Simulationen untersucht, wobei gezeigt wird, dass hohe dv/dt -Werte im Hinblick auf Dynamische Avalanche keine kritische Rolle spielen. Abschließend wird das entsättigte Ausschalten im Kontext des Umrichterbetriebs betrachtet, bei dem kurze Tastverhältnisse auftreten. Hierfür wird ein einfaches Steuerungskonzept vorgestellt, das ohne größeren Aufwand in übergeordnete Umrichterregelungen integriert werden kann.