

Diss. ETH No. 23486

Analysis and Multi-Objective Optimization of Multi-Cell DC/DC and AC/DC Converter Systems

A thesis submitted to attain the degree of

DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

MATTHIAS JOACHIM KASPER

MSc ETH

born on 22.02.1986

citizen of Emmendingen, Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Johann W. Kolar, examiner

Prof. Dr. José A. Cobos, co-examiner

2016

Kurzfassung

Hinter vielen globalen Megatrends, die unser Leben als Individuen und als Gesellschaft in vielen verschiedenen Bereichen beeinflussen, steht die Leistungselektronik als eine der Schlüsseltechnologien, die diese Trends ermöglichen. Prominente Beispiele sind hierbei die sukzessive Umstellung der Energieversorgung von konventionellen, fossilen Energieträgern auf erneuerbare Energiequellen, die Reduktion der ausgestossenen Treibhausgase durch Elektrifizierung der Mobilität und der Trend in der Informationstechnologie zu cloud-basierten Anwendungen, die auch durch die Entwicklung von kostengünstigen, effizienten und kompakten leistungselektronischen Konvertersystemen ermöglicht werden. Um die zukünftigen Anforderungen an die Leistungselektronik erfüllen zu können, ist es daher wichtig, dass neue Wege zur Entwicklung von leistungselektronischen Systemen mit erhöhter Effizienz, Leistungsdichte und Zuverlässigkeit aufgezeigt werden.

Das Studium der Fachliteratur zeigt, dass die Fortschritte bei der Entwicklung von leistungselektronischen Systemen hauptsächlich entweder durch Weiterentwicklungen auf Ebene der Komponenten zustande kommen, oder auf der modifizierten Steuerung und Regelung bekannter Schaltungstopologien basieren. Diese beiden Ansätze sind evolutiv und versprechen daher auf absehbare Zeit nur schrittweise Verbesserungen gegenüber heutigen Konzepten.

Ein vielversprechender und grundlegend anderer Ansatz, um die zukünftigen Anforderungen an leistungselektronische Systeme zu erfüllen, ist die Entwicklung von Multizellen-Konvertersystemen, bei denen mehrere Teilsysteme (Zellen) in einem Verbund zusammenarbeiten. Bezüglich der Performancekriterien (z.B. Effizienz und Leistungsdichte) des Gesamtsystems ergeben sich hierbei Vorteile, da die einzelnen Zellen mit geringerer Leistung und daher mit geringerer Spannung und/oder geringeren Strömen arbeiten können, als ein entsprechendes Einzellenkonvertersystem. Die Entwicklung von Multizellenkonvertern eröffnet darüber hinaus neue Freiheitsgrade z.B. hinsichtlich der Zellenzahl und Koordination der Regelung der einzelnen Zellen im Kontext des Gesamtsystems. Es liegt allerdings bisher keine systematische Beschreibung aller Betriebskonzepte und Designmöglichkeiten von Multizellenkonvertern vor, welche jedoch für eine umfassende Mehrkriterien-Optimierung bzw. einen daraus resultierenden aussagekräftigen Vergleich mit derzeitigen Lösungen eine zwingende Voraussetzung darstellt.

Der Schwerpunkt der Dissertation liegt daher auf der umfassenden

Analyse und Beschreibung von Multizellensystemen für verschiedene Hauptanwendungsbereiche leistungselektronischer Konverter, wobei jeweils mittels Mehrkriterien-Optimierung einerseits ein neues System erstellt und andererseits z.B. hinsichtlich Effizienz und Leistungsdichte vorhandene Lösungen vergleichend gegenübergestellt werden. Hierzu werden in einem ersten Schritt in **Kapitel 2** die Vorteile von Multizellensystemen gegenüber Einzellenkonvertern auf Basis von Skalierungsgesetzen und theoretischen Modellen aufgezeigt.

Anschliessend werden für die Anwendung bei photovoltaischen Energiesystemen in **Kapitel 3**, für die Entwicklung eines hocheffizienten Netzteils für Datenzentren in **Kapitel 4** und für die Entwicklung einer Hilfsenergieversorgung mit hohem Spannungsübersetzungsverhältnis in **Kapitel 5** verschiedene Lösungsansätze mit Multizellenkonvertern analysiert. Hierbei werden jeweils auf Basis analytischer Beschreibungen und Simulationen umfassende Optimierungen durchgeführt. Ausserdem wird die Abhängigkeit zwischen den Zielgrössen Leistungsdichte und Effizienz bzw. der bei einem Design zwischen diesen Performanceindikatoren zu schliessende Kompromiss geklärt. Die Ergebnisse der Optimierungen werden jeweils durch Messungen an Laborprototypen verifiziert. Darüber hinaus werden auch die Freiheitsgrade in der Regelung bzw. im Zusammenspiel der einzelnen Zellen zu Etablierung der Gesamtfunktion analysiert und gegenüber konventionellen Lösungen evaluiert.

Abschliessend werden in **Kapitel 6** die wichtigsten Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst und mögliche zukünftige Forschungsthemen kurz diskutiert.

Abstract

One of the key enabling technologies behind many global megatrends, which are affecting our lives as individuals and as a society in many different areas, is power electronics. Prominent examples are the shift from conventional energy sources to renewable energy sources, the reduction of greenhouse gas emissions due to the electrification of mobility, and the trend towards cloud-computing in the information technology area, which are all based on the development of cost-effective, efficient and compact power electronic systems. In order to fulfill future requirements for power electronic systems, it is therefore of great importance to identify new ways to develop systems with higher efficiency, power density, and reliability.

The analysis of relevant literature reveals, that improvements of power electronic systems are to a great extent either based on the improvements of specific components or on the modification of known control algorithms and/or topologies. These improvement processes, however, are of evolutionary nature and are not going to provide significant steps of performance improvements compared to today's solutions for the foreseeable future.

A very promising and fundamentally different approach, in order to fulfill the future demands for power electronic systems, is the development of multi-cell converter systems consisting of multiple converter cells connected together. Several advantages are obtained with respect to different performance criteria (e.g. efficiency and power density) of the full system by employing multiple converter cells with lower power rating that share the voltage and/or the current. The development of multi-cell converter systems creates new degrees of freedom regarding e.g. the number of employed cells and the control of the individual cells of the multi-cell system. Until now there has not been a comprehensive analysis and investigation of possible modulation schemes and converter designs of multi-cell systems, which clearly indicates the mandatory requirement for a multi-objective optimization and a comprehensive comparison to state-of-the-art solutions.

The main focus of this thesis is thus set on the comprehensive analysis and description of multi-cell converter systems for different application areas. For each specific application a multi-objective optimization is performed for novel multi-cell converter solutions and compared to state-of-the-art solutions with respect to e.g. the achievable efficiency and power density. In a first step, different fundamental scaling laws

and theoretical models are derived in **Chapter 2**, which reveal the advantages of multi-cell systems compared to single-cell systems.

Consequently, different multi-cell converter solutions are analyzed for photovoltaic energy systems in **Chapter 3**, for the development of a high efficiency telecom power supply in **Chapter 4**, and for the development of an auxiliary power supply with high voltage conversion ratio in **Chapter 5**. Based on analytical descriptions of the converters and simulations, comprehensive multi-objective optimizations are performed, which identify the trade-off between the achievable power-density and efficiency. The results of the optimizations are then verified by measurements on hardware demonstrators. Furthermore, the additional degree of freedom in the control of the multi-cell system by controlling the individual cells is investigated and compared to conventional solutions.

Finally, **Chapter 6** summarizes and concludes the main achievements of the thesis and presents an outlook on possible future research work.