

DISS. ETH NO. 23280

**Medium Voltage
AC-DC Converter Systems for
Ultra-Fast Charging Stations
for Electric Vehicles**

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

FELIX THOMAS JAUCH
MSc ETH EEIT, ETH Zurich

born on 19.01.1986
citizen of Villmergen AG, Switzerland

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Jürgen Biela, examiner
Prof. Dr. ir. Johan Driesen, co-examiner

2016

Abstract

The environmental impact of petroleum-based transportation infrastructure gained more and more significance during the last decade as fossil fuel powered vehicles lead to high emissions of CO₂ and other greenhouse gases. With the electric mobility becoming a real solution for a sustainable future by using renewable energy sources, the emissions of carbon and in general greenhouse gases can be substantially reduced in order to mitigate the induced ecological effects.

For today's electric vehicles already featuring suitable (but limited) ranges and having advantages over vehicles driven by internal combustion engines as higher engine efficiency, regenerative braking and reduced noise emission, the key element for their success are the charging systems as well as the battery technology. To overcome the range limitations given through the long charging times so-called ultra-fast charging stations have to be developed with a charging power of several 100 kW preferably connected to the medium voltage AC grid which substantially increase the autonomy and the flexibility of electric vehicle drivers.

After presenting a brief motivation for the topic of the electric mobility in **Chapter 1** together with today's charging methods as well as available charging infrastructure, state-of-the-art research approaches for an ultra-fast charging station for electric vehicles with integrated energy storages are summarized.

In **Chapter 2** the design aspects for an ultra-fast charging station are given from which concepts for the realization are developed and the specifications and requirements for the power electronic converter system and the energy storage can be stated.

Then, state-of-the-art medium voltage bidirectional isolated AC-DC converter topologies suitable for the grid interface of an ultra-fast charging station are evaluated in **Chapter 3** with the focus set on the integration of a battery energy storage system as well as the integration of the galvanic isolation on module level from which two single-stage converter systems are identified for a further investigation.

The first converter system is the cascaded AC-DC dual active bridge

converter for a split battery energy storage system proposed in **Chapter 4**. For the topology, suitable modulation and control schemes both on module as well as on system level are developed and a hardware prototype of a module is designed and built to experimentally verify the proposed modulation schemes. The overall battery energy storage system is simulated to validate the given theoretical analysis.

The second converter system is the cascaded AC-DC multi-port converter for a split battery energy storage system introduced in **Chapter 5**. For a three-phase AC-DC multi-port converter module, a new modeling approach for the power flows at the AC and the DC ports is presented and suitable modulation schemes are developed. Moreover, the converter module is simulated applying the different modulation schemes to validate the given theoretical analysis.

For the comparison of the proposed single-stage converter systems on module level to the state-of-the-art two-stage solution utilizing an AC-DC H-bridge module connected to a DC-DC dual active bridge converter in terms of efficiency and power density, a multi-objective optimization is implemented and the underlying power component models are described in **Chapter 6**. From the optimization results obtained the efficiencies achieved at a power density of 2.5 kW/L are for the single-stage AC-DC dual active bridge module 96.6 %, for the single-stage AC-DC multi-port module 93.5 % and for the two-stage AC-DC H-bridge module connected to a DC-DC dual active bridge converter 97.1 %.

Finally, **Chapter 7** summarizes and concludes the main achievements of the thesis and presents an outlook on possible future research work.

Kurzfassung

Im letzten Jahrzehnt gewannen die Auswirkungen der auf Erdöl basierten Transportinfrastruktur auf die Umwelt mehr und mehr an Bedeutung. Fahrzeuge betrieben mit fossilen Brennstoffen führen zu hohen Emissionen von CO₂ und weiteren Treibhausgasen. Mit der Elektromobilität eröffnen sich Möglichkeiten für eine nachhaltige Zukunft durch den Einsatz erneuerbarer Energiequellen, um die Emissionen von Kohlenstoff und im Allgemeinen von Treibhausgasen wesentlich reduzieren zu können.

Heutige Elektrofahrzeuge verfügen bereits über eine angemessene wenn auch eingeschränkte Reichweite und bieten einige Vorteile gegenüber Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren wie eine höhere Motoreffizienz, das regenerative Bremsen sowie die reduzierte Geräuschemission. Das Schlüsselement für den Erfolg sind die Ladesysteme sowie die Batterietechnologie. Um die Limitierung der Reichweite durch die langen Ladezeiten zu überwinden, müssen Schnellladestationen mit einer Ladeleistung von einigen 100 kW, vorzugsweise für den Anschluss an das AC Mittelspannungsnetz, entwickelt werden. Somit können die Autonomie und die Flexibilität der Benutzer von Elektrofahrzeugen gesteigert werden.

Nach einer kurzen Motivation zum Thema Elektromobilität in **Kapitel 1** mit ihren heutigen Lademethoden sowie der vorhandenen Ladeinfrastruktur, werden aktuelle Forschungsansätze für eine Schnellladestation für Elektrofahrzeuge mit integriertem Energiespeicher vorgestellt. In **Kapitel 2** werden die Designaspekte für eine Schnellladestation diskutiert, mit Hilfe derer Realisierungskonzepte erarbeitet und die Spezifikationen und Anforderungen an das leistungselektronische Konvertersystem und den Energiespeicher aufgestellt werden können. Danach werden in **Kapitel 3** bidirektionale isolierte AC-DC Konvertertopologien für die Mittelspannungsanbindung gemäss dem Stand der Technik hinsichtlich der Verwendung in einer Schnellladestation evaluiert mit dem Fokus der Integration eines Batteriespeichersystems sowie der Integration der galvanischen Trennung auf Modulebene. Zur weiteren Betrachtung werden zwei einstufige Konvertersysteme identifiziert.

Das erste Konvertersystem stellt den kaskadierten AC-DC Dual Active Bridge Konverter für ein gesplittetes Batteriespeichersystem vorgeschlagen in **Kapitel 4** dar. Für die Topologie werden geeignete Modulations- und Steuerverfahren auf Modul- sowie Systemebene entwickelt, welche mittels dem Design und Aufbau eines Hardwareprototyps experimentell verifiziert werden. Zudem wird das gesamte Batteriespeichersystem simuliert, um die theoretische Analyse zu validieren.

Das zweite Konvertersystem stellt den kaskadierten AC-DC Multi-Port Konverter für ein gesplittetes Batteriespeichersystem eingeführt in **Kapitel 5** dar. Für ein dreiphasiges AC-DC Multi-Port Konvertermodul werden ein neuer Modellierungsansatz für die Leistungsflüsse an den AC und DC Ports beschrieben sowie geeignete Modulationsverfahren entwickelt. Des Weiteren wird ein Konvertermodul zur Verifikation der theoretischen Analyse der verschiedenen Modulationsverfahren simuliert. Zum Vergleich der vorgeschlagenen einstufigen Konvertersysteme auf Modulebene mit dem zweistufigen Ansatz der Stand der Technik bestehend aus einem AC-DC Vollbrückenmodul verbunden mit einem DC-DC Dual Active Bridge Konverter hinsichtlich Effizienz und Leistungsdichte wird in **Kapitel 6** eine mehrkriterielle Optimierung implementiert sowie die zugrundeliegenden Modelle der Leistungskomponenten erläutert. Anhand der Resultate der Optimierung kann bei einer Leistungsdichte von 2.5 kW/L mit dem einstufigen AC-DC Dual Active Bridge Konvertermodul eine Effizienz von 96.6 %, mit dem einstufigen AC-DC Multi-Port Konvertermodul eine Effizienz von 93.5 % und mit dem zweistufigen AC-DC Vollbrückenmodul verbunden mit einem DC-DC Dual Active Bridge Konverter eine Effizienz von 97.1 % erreicht werden.

Abschliessend werden in **Kapitel 7** die wichtigsten Errungenschaften dieser Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick auf mögliche zukünftige Forschungsthemen gegeben.