

DISS. ETH Nr. 21625

High-Power DC-DC Converter Technologies for Smart Grid and Traction Applications

A dissertation submitted to
ETH ZURICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by
GABRIEL ORTIZ

born 13. September 1984,
citizen of Calama, Chile

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Johann Walter Kolar, examiner
Prof. Dr. Dushan Boroyevich, co-examiner

2014

Abstract

Electric transformers, either utilized in electric power systems or within a power electronics-based converter, are fundamental components of modern highly-efficient energy supply chains, as they provide the voltage adaptation between networks with different voltage levels. In traction applications for example, the power for the drive system is provided through a single-phase Medium Voltage (MV) catenary line, whereas the traction machine is fed by a Low Voltage (LV) three-phase inverter. It is therefore necessary to step this MV down to the required LV level through a Low Frequency (LF) transformer which needs to be carried by the driving locomotive. Since the performance of these traction solutions is tightly linked to the weight of the energy supply system, which is to a large extent determined by the step-down and isolation transformer, lower weight energy supply concepts for modern traction solutions are highly desirable and cannot be fulfilled by classical concepts.

In electric power systems, transformers also perform the fundamental task of adapting the voltage between the generation, transmission and distribution levels. In modern electric power systems, high flexibility in power delivery is becoming mandatory, as new types of sources, e.g. renewable energy generators, and dynamic loads are integrated into the power grid. Given the dynamic behavior of these sources/loads, a smart energy routing concept, i.e. a Smart Grid, which ensures a stable and reliable operation of the network is required. This task of fast and active response to variations in the grid conditions cannot be met by standard LF transformers, as they are intrinsically passive components.

These limiting factors for future traction solutions and Smart Grid implementation can be overcome by integrating more controllable components within these supply chains. In the case of traction applications, this would mean the integration of the isolation stage within the converter system in order to enable the operation of this component at higher frequencies, and therefore a reduction in its weight. Considering Smart Grids energy routing solutions, the main requirement is the flexibility in power delivery, which results in the partial or total processing

of the transformer's power by controllable active devices, i.e. power semiconductor switches, in order to actively adapt the operating point of the transformer to the grid conditions. The integration of power semiconductor switches together with an isolation transformer is often referred to as Solid-State Transformer (SST), where numerous options for the realization of this component have been considered. A three-stage approach comprising an active front-end rectifier, a high-power DC-DC conversion stage performing the isolation and voltage adaptation at higher frequencies and finally a load-end inverter represents the most attractive solution given its modularity and low coupling between the different power conversion stages. Within this three-stage SST concept, the key component is the high-power DC-DC conversion stage, as it is now responsible for the isolation and voltage adaptation at higher frequency levels.

This thesis deals with the conception and design of one cell of such DC-DC converter stage (2 kV/400 V, 166 kW, 20 kHz). The first topic to be addressed is the requirement of soft-switching modulation and the respective DC-DC converter topologies which enable this type of switching transitions. Furthermore, the performance of the semiconductor switches on the MV side of the DC-DC converter under these soft-switching modulation schemes is experimentally analysed, whereby models for the analytical estimation of the switching losses are presented. Moreover, on the LV side of the converter, alternative bridge arrangements comprising combinations of MOSFET and IGBT switches in order to maximize the efficiency of the system are considered. The optimized design of the key component within the DC-DC converter, the Medium Frequency (MF) transformer, is presented for two types of transformers with different core materials and cooling concepts, where the trade-offs between these two types are clearly visualized. For each of these parts of the DC-DC converter, i.e. the MV side bridge, the LV side bridge and the MF transformer, a detailed description of the constructed prototypes' mechanical arrangement is presented at the end of the respective chapters.

In order to test the designed systems, a back-to-back arrangement was constructed based on two fully-rated bidirectional DC-DC converters. With this setup, the testing of the system within standard laboratory conditions can be achieved, obtaining experimental data and verification of the proposed converter design.

Kurzfassung

Transformatoren sind wichtige elektrische Komponenten, die für den Einsatz in elektrischen Verteilnetzen oder in leistungselektronischen Konvertern unerlässlich sind, da sie als Bindeglieder zwischen Netzen verschiedener Spannungslevel agieren.

Beispielsweise in Antriebssystemen hoher Leistung muss der Transformator die hohe Speisespannung, die vom Netz zur Verfügung gestellt wird, auf ein niedrigeres Spannungsniveau heruntersetzen um die Maschine versorgen zu können. Bei Traktionsanwendungen spielt das Gewicht des Antriebs eine wichtige Rolle und da dieses Gewicht zu einem grossen Teil vom Transformator bestimmt wird, ist es notwendig, Möglichkeiten zu entwickeln, die eine leichte und kleine Baugrösse des Transformators erlauben.

Auch in elektrischen Verteilnetzen erfüllen Transformatoren den Zweck, die Spannungen von Netzen verschiedener Spannungsniveaus anzupassen. Moderne leistungselektronische Systeme erfordern einen hohen Grad an Flexibilität, um der sich ständig ändernden Nachfrage nach Blind- und Wirkleistung nachzukommen, insbesondere weil die Anzahl neuer Energiequellen im Netz, z.B. regenerativer Energieerzeuger, zunimmt. Das elektrische Verteilnetz, das dadurch ein sehr dynamisches Verhalten aufweist, benötigt daher ein intelligentes Konzept, vielfach als Smart Grid bezeichnet, um einen stabilen und zuverlässigen Betrieb zu garantieren. Diese Aufgabe kann mit niederfrequenten (50Hz) Transformatoren nicht gewährleistet werden, da diese Komponenten rein passiv sind. Eine hohe Dynamik kann für diese Systeme dadurch erreicht werden, dass steuerbare (aktive) Komponenten verwendet werden. Für Antriebssysteme bedeutet dies, dass die Transformation der Spannung mittels eines leistungselektronischen Konverters vorgenommen wird, was eine höhere Betriebsfrequenz und dadurch ein geringeres Gewicht des Transformators erlaubt. Auch die hohe geforderte Dynamik des Leistungsflusses in Smart Grids kann durch einen leistungselektronischen Konverter erreicht werden, der den benötigten Blind- und Wirkleistungsbedarf des Netzes über den Transformator durch aktives Schalten steuert. Die Kombination aus aktiven

Schaltern mit einem isolierenden Transformator wird oft als Solid-State Transformator bezeichnet, für den es mehrere Realisierungsmöglichkeiten gibt. Ein dreistufiges System, bestehend aus aktivem eingangsseitigem Gleichrichter, einem DC-DC Konverter und einem ausgangsseitigen Wechselrichter, erlaubt einen hohen Grad an Modularität und stellt eine geringe Kopplung zwischen den einzelnen Stufen sicher. Der DC-DC Wandler erfüllt dabei die Aufgabe der galvanische Trennung und der Spannungsübersetzung bei hoher Schaltfrequenz, was eine kleine Baugröße des Transformators erlaubt.

Diese Arbeit beschreibt den analytischen Entwurf, den Aufbau und die experimentelle Verifikation eines Moduls des für die beschriebenen Anwendungen essentiell wichtigen DC-DC Konverters (2kV/400V, 166kW, 20kHz). Als erstes werden mehrere Topologien und Modulationsverfahren der aktiven Schalter beschrieben, die ein weiches, d.h. verlustarmes Schalten der Leistungshalbleiter ermöglichen. Die analytischen Modelle werden dabei experimentell auf der Mittelspannungsseite des Konverters validiert. Auf der Niederspannungsseite des Konverters werden mehrere Realisierungsmöglichkeiten bestehend aus Kombinationen von IGBTs und MOSFETs vorgestellt, implementiert und messtechnisch miteinander verglichen.

Für den Transformator, der das Herzstück des Konverters darstellt, werden zwei Realisierungen, die sich hinsichtlich der Materialien und Kühlkonzepte unterscheiden, gezeigt und deren Eigenschaften einander gegenübergestellt.

Der mechanische Aufbau der Niederspannungsseite, des mittelfrequenten Transformators und der Mittelspannungsseite, wird detailliert zum Schluss der jeweiligen Kapitel beschrieben. Für die messtechnische Validierung des Gesamtsystems werden zwei Konvertersysteme antiparallel geschaltet um eine Zirkulation des Leistungsflusses zu ermöglichen. Dies erlaubt den Nennleistungsbetrieb des Konverters unter Laborbedingungen und damit die experimentelle Verifikation der theoretisch ermittelten Konvertermodelle.