



Doctoral Thesis

20MW Halbleiter-Leistungsmodulator-System

Author(s):

Bortis, Dominik

Publication Date:

2009

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005782872> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH Nr. 18180

20MW Halbleiter- Leistungsmodulator-System

ABHANDLUNG
Zur Erlangung des Titels
DOKTOR DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN
der
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE
ZÜRICH

vorgelegt von

DOMINIK BORTIS

Dipl.Ing. ETH Zürich
geboren am 29. Dezember 1980
von Fiesch, Schweiz

Angenommen auf Antrag von:
Prof. Dr. J.W. Kolar, Referent
Prof. Dr. H. Güldner, Korreferent

2009

Kurzfassung

Die Erzeugung von Hochspannungs- und Hochleistungspulsen durch Leistungsmodulatoren bildet einen wesentlichen Bestandteil in einer Vielzahl von Anwendungen, wie z.B. in Linearbeschleunigern, in Radarsystemen oder in Geräten zur Tumorbestrahlung. Die dabei spezifizierten Pulsleistungen reichen von einigen kW bis zu mehreren hundert TW, die im ps- bis ms-Bereich an die Last übertragen werden. Zudem sind in Abhängigkeit der zugrundeliegenden Anwendung hohe Anforderungen an die Pulsform bezüglich Pulsanstiegszeit, Überschwingen und Pulsdach gestellt.

Die vorliegende Arbeit beschreibt zusammenfassend die Forschungsergebnisse eines kompakten und modularen 20 MW Leistungsmodulator-Systems mit abschaltbaren Hochleistungs-Halbleitern, welches die Erzeugung von rechteckförmigen 170 kV-Pulsen mit Anstiegszeiten von weniger als 500 ns und variabler Pulsbreite im Bereich von 2-7.5 μ s ermöglicht.

Typische Systeme dieser Leistungsklasse und entsprechender Pulsbreite sind Leistungsmodulatoren basierend auf einer PFN-Struktur (*Pulse-forming Network*), welche mittels nicht abschaltbaren Gaschaltern, wie z.B. Thyratrons, über einen Pulstransformator entladen werden. Wesentliche Nachteile von PFN-Leistungsmodulatoren sind dabei die nötige manuelle Abstimmung des PFNs, die durch das PFN vorgegebene feste Pulsbreite sowie die begrenzte Lebensdauer des Thyratrons. Diese Schwächen bilden zugleich die Motivation dieser Arbeit, in welcher durch den Einsatz von modernen Hochleistungs-Halbleitern eine wesentliche Verbesserung der Funktionseigenschaften erzielt werden sollen.

Nach einer kurzen Einleitung bezüglich der Anwendungsgebiete von

Leistungsmodulatoren, werden basierend auf den festgelegten Spezifikationen mögliche Schaltungstopologien untersucht und einander gegenübergestellt. Der hauptsächliche Teil der Arbeit befasst sich mit der Analyse des resultierenden Leistungsmodulators, welcher sich aus einem Pulstransformator und vier identischen magnetisch parallel geschalteten Pulsgeneratoren mit niederinduktiver Anbindung zusammensetzt. In den nachfolgenden Kapiteln werden dabei aufeinanderfolgend die wesentlichen Teilkomponenten detailliert beschrieben.

Der Pulsgenerator wiederum besteht im Wesentlichen aus einer Kondensatorbank mit hoher Energiedichte und geringer Serieninduktivität, dem ebenfalls niederinduktiven Freilaufpfad zum Abbau der Magnetisierungsenergie des Pulstransformators und dem Halbleiter-Schaltelement, wobei hierfür vier der momentan leistungsstärksten 1700 V-3600 A-IGBT-Module eingesetzt werden (Stand 2008). Im Gegensatz zu den häufig in Traktionsanwendungen verwendeten IGBT-Modulen wurde zur Erzielung der erforderlichen Schaltzeiten, wie z.B. der erreichten Einschaltdauer von 120 ns, ein aufsteckbarer und leistungsstarker Gatetreiber entwickelt. Zur Steigerung der Ausschaltgeschwindigkeit und gleichzeitiger Reduktion der Schaltverluste wird dabei der Ausschaltvorgang vom Gatetreiber zweistufig ausgeführt. In Kombination mit geeigneten Schutzfunktionen kann zudem eine weitere Verbesserung der Ausschaltflanke erzielt werden.

Eine zusätzliche Herausforderung stellt die Parallelisierung der IGBT-Module mit symmetrischer Stromverteilung dar. Dazu gelangt eine aktive Gateregelung zur Anwendung, welche es erlaubt, mittels einer präzisen Messung der Pulsströme von 7 kA, die Gatesignale und optional die Gatespannungen derart zu regeln, dass eine symmetrische Stromverteilung erreicht wird. Durch die Erweiterung der aktiven Gateregelung mittels einer überlagerten Spannungsflankensymmetrierung kann die Zuverlässigkeit bezüglich Schaltzeitpunkte gesteigert und zugleich simultane Strom- und Spannungsflanken garantiert werden.

Der Pulstransformator, welcher die vier Pulsgeneratoren magnetisch verkoppelt, bildet die eigentliche Schlüsselkomponente des Leistungsmodulators, da die erreichbare Pulsform, insbesondere die Flankenzeiten und das Überspringen am Ende der ansteigenden Flanke, durch die parasitären Streuelemente, die Wicklungstopologie, das Design und das Kernmaterial bestimmt werden. Nach Herleitung der Dimensionierungsbedingungen und der Ermittlung der geeignetsten Wicklungstopologie werden mit Hilfe eines analytischen Modells die verteilte Kapazität so-

wie die Streuinduktivität basierend auf den resultierenden elektrischen und magnetischen Feldern berechnet. Daraus kann die berechnete elektrische Energie auf das verwendete 6C-Transformator-Ersatzschaltbild überführt werden, was eine Verifizierung durch sechs unterschiedliche FEM-Simulationen sowie sechs entsprechende Impedanzmessungen erlaubt. Des Weiteren werden neben den geometrischen Anforderungen auch die Ansprüche an das Kernmaterial und dessen magnetische Eigenschaften zu Grunde gelegt, damit eine kompakte Bauweise mit reduzierten Kernverlusten realisierbar wird. Diesbezüglich folgt zur Verbesserung der Ausnutzung des Kernmaterials die Untersuchung von passiven und aktiven Vormagnetisierungsschaltungen, da aufgrund der unipolaren Spannungspulse der Kern nur einseitig angesteuert wird. Beginnend bei der passiven Vormagnetisierung und deren Optimierung, ermöglicht schlussendlich die aktive Vormagnetisierung trotz hohem Realisierungsaufwand eine Rückgewinnung der Magnetisierungsenergie und resultiert somit in einer verlustarmen und kompakten Vormagnetisierungsschaltung. Zusätzlich führt das dabei entwickelte Verfahren zur symmetrischen Flussregelung unabhängig von der Grösse der Kernverluste zu einer optimalen symmetrischen Kernaussnutzung.

Abschliessende Messungen zum Gesamtsystem mit Hilfe der drei realisierten Prototypen *Modulator I-III* vervollständigen die Untersuchungen zum 20 MW-Halbleiter-Leistungsmodulator. Ergänzend dazu wird im letzten Teil dieser Arbeit das Leistungsmodulator-System als Ganzes betrachtet, wobei zusätzlich die Regelung einer DC-Spannungsversorgung für Anwendungen mit pulsformigen Lastzyklen hergeleitet wird. Die Regelung erlaubt es dabei dem zwischen Netz und Leistungsmodulator geschalteten AC-DC-Konverter trotz pulsformiger bzw. diskontinuierlicher Last eine konstante Leistung mit sinusformigen Strömen vom Netz zu entnehmen.

Abstract

High voltage and high power pulses generated by power modulators are used in a wide variety of applications, such as accelerators, radar systems or medical radiation. The specified pulsed power ranges from several kW to hundreds of TW and the pulse width in the range of ps to ms. Additionally, in many of these applications the requirements for the generated pulses regarding rise/fall time, overshoot and pulse flatness are high.

The present thesis contains the research results of a 20 MW power modulator system with modern high power turn-off semiconductors to generate rectangular 170 kV pulses with rise/fall times faster than 500 ns and variable pulse duration in the range of 2-7.5 μ s.

A well known technology used for modulators with the given technical specifications is the pulse forming network (PFN) switched by a thyatron and followed by a step-up pulse transformer. Disadvantages of the thyatron-switched PFN type modulator are, for example, the fixed pulse duration, the unwanted voltage ripple on top of the pulse, the limited lifetime of the thyatron, the high primary voltage and the high stress of the high voltage capacitors during each charge and discharge cycle. Therefore, the aim of this thesis is to develop a new modulator that replaces the PFN and the thyatron with modern solid state technologies, which avoids the mentioned drawbacks and leads to an improved performance of the power modulator system.

After a short introduction concerning the field of application, possible circuit topologies for the power modulator are explored and compared, based on the given technical specifications. The main focus of the present work is the analysis of a power modulator consisting of four paralleled low inductive pulse generation units and a special pulse transformer. In

the following chapters the main component parts of the power modulator are described in detail.

The low inductive pulse generation unit consists of a high energy density capacitor bank, a freewheeling path for demagnetizing the pulse transformer and a high power semiconductor switch, whereas the present most powerful 1700 V-3600 A IGBT-modules are used (2008). In contrast to traction applications, the IGBT-modules have to be turned on and off extremely fast in pulsed power applications. Therefore, a new powerful plug-in gate driver was designed, where turn on times of 120 ns are achieved. Additionally, in order to improve the turn off behavior with reduced switching losses a multi-stage turn off operation in combination with over-voltage and over-current protection circuits is implemented.

A further challenge is to achieve an equal current distribution in the parallel connected power switches. Therefore, a precise current measurement of the peak currents (7kA) of each IGBT-Module has been implemented. Then, with a supervisory control unit the IGBT gate signals are adjusted to guarantee simultaneous turn on and off. The extension of the current edge control with a superimposed voltage edge control improves the reliability of the edge detection and ensures simultaneous edge times.

The pulse transformer, which magnetically couples the four pulse generator units, is one of the key components of the power modulator. Due to the parasitic elements, the design and the core material significantly influence the achievable shape of the high power pulse concerning overshoot, rise and fall times. After deduction of the design criteria and the evaluation of the optimal winding topology, an analytical model for calculating the distributed capacitance and the resulting leakage inductance, based on the stored electric and magnetic energy in the system, is presented. Hence, with the calculated electrical energy a transformer equivalent circuit with six independent capacitors is derived and validated by FEM-simulations and impedance measurements. Furthermore, different core materials are compared regarding its magnetic properties, such as maximum flux density, relative permeability and resulting core losses, where the most suitable core material leads to a further improvement of the pulse shape. Due to the unipolar voltage pulse applied to the pulse transformer, an unipolar flux swing results in the core material. To achieve a better utilization of the core material and hence to reduce the transformer volume, passive and active premagnetization

circuits are explored. In the according chapter, the passive premagnetization circuit is described, analytically optimized concerning the overall losses and validated by experimental measurements. Due to the possibility to recover the energy stored in the magnetic components, the active premagnetization circuit results in a further reduction of the losses and improves the performance of the system. There, a novel control is presented to achieve symmetrical flux swing in the transformer core.

Three prototypes *Modulator I-III* have been realized to validate the analysis and calculations with experimental measurements. In the final chapter, the power modulator is completed with the corresponding dc power supply for pulse load applications, where a continuous power consumption from the mains is achieved.