

Diss. ETH No. 17529

# Optimal Modulation and Wideband Current Sensing for Three-Level PWM Rectifiers

A dissertation submitted to the  
ETH ZURICH

for the degree of  
DOCTOR OF TECHNICAL SCIENCES

presented by

LUCA DALESSANDRO

M.Sc. El. Eng. Politecnico di Bari  
born 29. April 1978  
Italian citizen

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Johann W. Kolar, examiner  
Prof. Dr. Paolo Mattavelli, co-examiner

2007

# Abstract

For high power three-phase rectifiers the use of unity power factor control is becoming an industrial requirement. In particular, multilevel voltage-source-rectifiers are of special interest as they offer reduced input current ripple and lower switching device blocking voltages. Besides the advantages related to the converter's topology, further improvement of the overall system performance, in terms of efficiency and realization effort, depends on the modulation strategy employed. Furthermore, high switching frequency is desirable to increase the power density and to improve current control dynamic performance. While a switching frequency of few kHz is sufficient in most inverter applications, a PFC converter is operated at higher frequency, e.g., 20-200 kHz in the kilowatt power range. Thus, a wide current sensor bandwidth is required and more important for PFC circuits than for inverters.

With this scenario, the Dissertation deals in its first part with innovative and optimal modulation strategies for three-phase three-level PWM rectifiers. Both direct and indirect methods are considered and the advantages and drawbacks of conventional techniques critically presented. The novel current control concepts are based on decoupling hysteresis current control and voltage oriented control (Space Vector Modulation), respectively.

The design of a high-performance current sensor is addressed in the second part of this Dissertation. Current sensor technologies are reviewed and the sensor's design parameters that facilitate broadband performance are analyzed. Since the current sensor proposed has a current transformer as the main sensing device, the frequency-dependent characteristics of ferrite wound components are analyzed in detail.

The contribution presented for the direct modulation deals with a hysteresis current control concept for three-phase three-level PWM rectifiers based on a virtual connection of the output center point and the mains star point and achieves a decoupling of the three phases. This control technique, named Decoupling Hysteresis Control, besides having the advantages of a classical hysteresis

## Abstract

control, provides a more regular switching of the power transistors and an intrinsic stability of the output center point voltage, and allows a full utilization of the modulation range. Furthermore, a pre-control and synchronization signal for the hysteresis band is implemented to obtain coordinated switching between the phases and results in a near constant switching frequency and a current ripple performance that is similar to conventional carrier-based PWM controllers. These modulation strategies have been verified on a 5 kW *Vienna Rectifier*.

The presented technique to balance the output center-point voltage of a hysteresis current-controlled three-level PWM rectifier is based on adding an offset to the input current-reference. It is shown that the strategy of augmenting the current reference by an offset in direct (hysteresis) modulated three-level rectifiers is equivalent to the utilization of the redundant switching-states in indirect (voltage-oriented) PWM modulation. The space-vector representation of the input rectifier voltage and current is chosen to explain the effect of the current-offset injection on the output center-point voltage. The influence of the offset-current injection on the mains currents as well as the control and center-point characteristics are analyzed and verified by measurements.

A further new contribution of the Dissertation is the implementation and experimental verification of two discontinuous pulse-width modulation (DPWM) methods for three-phase, three-level rectifiers. DPWM's features, such as improved waveform quality, lower switching losses, reduced AC-side passive component size, are investigated and compared to the conventional continuous pulse-width modulation (CPWM). These features allow higher power density and/or efficiency to be achieved and are important targets for the next generation of power rectifiers. The implementation of the two DPWM strategies is explained by means of a space-vectors representation and modulation functions. The analysis of the center point loading capability and of the interdependence of AC-side and DC-side optimal PWM controllers is presented.

The design of a high-performance current sensor, to which is devoted the second part of the Dissertation, is presented as the result of a detailed analysis of the frequency dependent characteristics of ferrite wound components, which enhance broadband performance.

A permeance model of the core is implemented to model the magnetic circuit. The model includes a linear lumped element equivalent circuit to approximate the non-linear complex permeability of the core, which was measured empirically. The measured and simulated results of open-circuit impedance from the secondary winding and the transimpedance gain of the current sensor are compared and discussed. The flux distribution within the ferrite is modeled using the electromagnetic wave propagation theory and the dimensional resonance effect is explained. Derivations for the losses in the core and in the winding are included. A review of the literature dealing with the calculation

of the frequency-dependent winding resistance is presented and the winding impedance for the case study is calculated by a modified Dowell formula.

Particular emphasis is given to the calculation of transformer's parasitics, in particular of its self capacitance, which is a fundamental step for predicting the frequency behavior of the device, to reduce the capacitance's value and moreover for more advanced aims of capacitance integration and cancellation. A comprehensive procedure for calculating all contributions to the self-capacitance of high-voltage transformers is presented, as well as a detailed analysis of the problem, based on a physical approach.

Finally, a novel, planar current sensor, comprised of a magnetic current transformer and a Hall-effect element is presented. The sensor has a broad frequency bandwidth from DC up to 30 MHz, a high current rating (40 A DC), superior linearity, high EMI immunity, small size, robustness and low realization cost. The main design formulations are given analytically; simulations and finite element results are presented for verification. Experimental results of current step response and  $dv/dt$  immunity are included.

# Kurzfassung

Für leistungselektronische Dreiphasen-Gleichrichtersysteme ist in der Industrie zunehmend der Einsatz von Leistungsfaktorkorrektur-Schaltungen erforderlich. Besonders Multilevel-Spannungsgleichrichter sind von besonderem Interesse, da diese eine geringere Eingangsstromwelligkeit und niedrigere Sperrspannungen der Schalter aufweisen. Allerdings hängt die Systemperformance hinsichtlich Wirkungsgrad und Realisierungsaufwand in hohem Mass von der angewandten Modulationsstrategie ab. Daher beschäftigt sich der erste Teil der vorliegenden Dissertation mit innovativen, optimalen Modulationsstrategien für dreiphasige Drei-Level PWM-Gleichrichter. Dabei werden sowohl direkte als auch indirekte Modulationsmethoden betrachtet und die Vor- und Nachteile gegenüber konventionellen Techniken aufgezeigt.

Um die Leistungsdichte von Gleichrichtersystemen zu erhöhen und das dynamische Verhalten der Stromregelung zu verbessern, sind generell hohe Schaltfrequenzen erstrebenswert. Während für die meisten Motor-Umrichter eine Schaltfrequenz von einigen Kilohertz ausreichend ist, wird ein Konverter mit Leistungsfaktorkorrektur (PFC) im Kilowattbereich typischerweise mit 20-200 kHz betrieben. Aus diesem Grund wird eine grosse Bandbreite der für die Regelung notwendigen Stromsensoren benötigt. Der zweite Teil dieser Dissertation widmet sich daher der Analyse und dem Design eines breitbandigen Stromsensors. Dabei werden unterschiedliche Stromsensortechniken untersucht und die Designparameter für die Stromsensoren, welche die Messbandbreite bestimmen, analysiert. Da der vorgeschlagene Stromsensor als Hauptkomponente einen Stromtransformator besitzt, werden die frequenzabhängigen Charakteristika von bewickelten Ferritelementen detailliert analysiert.

Der Beitrag zur direkten Modulationsmethode im ersten Teil der Arbeit befasst sich mit einem Hysteresestrom-Regelungskonzept für dreiphasige Drei-Level-PWM-Gleichrichter und basiert auf einer virtuellen Verbindung des Ausgangsmittelpunktes zum Netzsternpunkt. Dadurch wird eine Entkopplung der drei Phasen erreicht. Diese Regelungsmethode wird als Decoupled Hystere-

sis Control (Entkopplte Hystereseregung) bezeichnet. Sie besitzt die Vorteile einer klassischen Hystereseregung, bietet jedoch zusätzlich den Vorteil nahezu konstanter Schaltfrequenz der Leistungstransistoren, eine inhärente Stabilität der Ausgangsmittelpunktspannung und erlaubt die vollständige Nutzung der Modulationsbreite. Um ein koordiniertes Schalten zwischen den Phasen und somit eine nahezu konstante Schaltfrequenz zu erhalten, wird ein Vorregelungs- und Synchronisationssignal implementiert. Die resultierende Stromwelligkeit ist vergleichbar mit konventionellen Trägersignal-basierten PWM Regelungen. Diese Modulationsstrategien werden an einem 5 kW *Vienna* Gleichrichter experimentell nachgewiesen.

Im darauffolgenden Teil wird eine Technik zum Abgleich der Ausgangsmittelpunktspannung eines Hysteresestrom-geregelten Drei-Level PWM-Gleichrichters durch Hinzufügen eines Offsets zur Eingangstromsreferenz vorgestellt. Es wird gezeigt, dass diese Strategie in direkten (Hysteres-) modulierten Drei-Level-Gleichrichtern gleichbedeutend mit der Verwendung von redundanten Schaltzuständen bei der indirekten (spannungsorientierten) PWM-Modulation ist. Die Raumzeigerdarstellung der Eingangsgleichrichter-Größen (Spannung und Strom) wird zur Erklärung der Auswirkung des Stromoffsets auf die Ausgangsmittelpunktspannung gewählt. Der Einfluss des Stromoffsets auf den Netzstrom, ebenso wie die Regelung und die Mittelpunktcharakteristik werden analysiert und durch Messungen verifiziert.

Anschliessend werden zwei diskontinuierliche pulsweitenmodulierte (DPWM) Methoden für dreiphasige Drei-Level-Gleichrichter implementiert und experimentell untersucht. Die Besonderheiten der DPWM, so wie zum Beispiel veringertes Strom-Oberwellenanteil, geringere Schaltverluste und geringere Komponentengröße der netzseitigen, passiven Elemente werden untersucht und mit der konventionellen kontinuierlichen Pulsweitenmodulation (CPWM) verglichen. Diese Eigenschaften erlauben sowohl eine höhere Leistungsdichte als auch einen besseren Systemwirkungsgrad, was wichtige Ziele für die zukünftige Generation von leistungselektronischen Gleichrichtersystemen sind. Die Implementierung der zwei DPWM-Strategien wird mittels Raumzeigerdarstellung und Modulationsfunktionen erklärt. Abschliessend werden die Belastungsfähigkeit des Mittelpunktes und die Unabhängigkeit von Gleichspannungs- und Wechselspannungsseite der optimalen PWM-Regler analysiert.

Der zweite Teil der Dissertation ist der detaillierten Analyse der frequenzabhängigen Charakteristika von bewickelten Ferritkomponenten und dem Design eines breitbandigen Hochleistungsstromsensors gewidmet. Zunächst wird ein Permanenzmodell des Kerns entwickelt, um den magnetischen Kreis zu modellieren. In diesem Modell sind die Ersatzschaltbilder mit linear konzentrierten Elementen enthalten, um die nichtlineare komplexe Permeabilität des Kerns zu approximieren, welche empirisch gemessen wurde. Die gemessenen

und simulierten Ergebnisse der Leerlaufimpedanz der Sekundärwicklung und die Transferimpedanz-Verstärkung der Stromsensoren werden verglichen und diskutiert. Die Flussverteilung im Ferrit wird unter Verwendung der elektromagnetischen Wellenausbreitungstheorie modelliert und das Ausmass der Resonanzeffekte erläutert. Zusätzlich werden die Verluste im Kern und in den Windungen hergeleitet. Ein Überblick über die Literatur zur Berechnung des frequenzabhängigen Wicklungswiderstandes wird präsentiert und die Wicklungsimpedanz wird für den vorliegenden Fall mit einer abgewandelten Dowell-Formel berechnet.

Ein besonderer Schwerpunkt wird auf die Berechnung der parasitären Eigenschaften des Transformators gelegt, vor allem der Eigenkapazität. Dies stellt eine wichtige Grundlage zur Vorhersage des Frequenzverhaltens des Bauteils dar, sowie zur Reduktion des Kapazitätswerts, wie auch zur Integration und auch Auslöschung der Kapazität. Es wird eine umfassende Prozedur zur Berechnung aller Anteile der Eigenkapazität von Hochspannungstransformatoren vorgestellt, ebenso wie eine detaillierte Analyse des Problems, basierend auf physikalischen Methoden.

Zum Abschluss wird ein neuer, planarer Stromsensor präsentiert, der einen magnetischen Stromtransformator und ein Halleffektelement beinhaltet. Der Sensor hat eine Bandbreite vom Gleichstrombereich bis zu Frequenzen von 30 MHz, eine hohe Strombelastbarkeit (40 A Gleichstrom), ausgezeichnete Linearität, hohe Robustheit gegenüber elektromagnetischer Störbeeinflussung, eine geringe Grösse, eine hohe mechanische Robustheit und geringe Herstellungskosten. Das Design wird analytisch erarbeitet und Ergebnisse aus Simulationen und Finite-Elemente-Berechnungen werden als Bestätigung präsentiert. Abschliessend wird das Design mittels experimenteller Ergebnisse der Stromsprungantwort und der  $dv/dt$ -Störfestigkeit bestätigt.