

Diss. ETH No. 19755

Ultra-Compact and Ultra-Efficient Three-Phase PWM Rectifier Systems for More Electric Aircraft

A dissertation submitted to the
ETH Zurich

for the degree of
DOCTOR OF SCIENCES

presented by

MICHAEL HARTMANN

Dipl.-Ing., M.Sc. TU-Wien
born 26th Mai 1978
citizen of Zwischenwasser, Austria

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. J.W. Kolar, examiner
Prof. Dr. P. Mattavelli, co-examiner

2011

Abstract

In order to improve the efficiency and to reduce the environmental impact of aircraft, global efforts for reducing the aircraft weight are under way. One of the key issues thereto is the wide application of electric systems instead of heavy mechanical, pneumatic and hydraulic driven equipment. This change in the power supply structure of an aircraft is known as More Electric Aircraft (MEA). In the course of this concept unidirectional active three-phase rectifiers in the power range of several kW are required, mainly for electrically driven actuators for flight control. In modern civil aircraft a three-phase AC mains with a voltage level of either 115 V or 230 V and a variable mains frequency of 360 Hz . . . 800 Hz exists.

In this work unidirectional three-phase rectifiers are evaluated which are able to meet the enhanced requirements of aircraft application. Starting with a brief survey on the power supply structure and the demanding requirements to be met such as the power factor or input current quality, a survey on three-phase rectifier topologies suited for aircraft applications is given. There, also passive and hybrid (active/passive) systems are considered. Based on this evaluation, the two-level three-phase Δ -switch rectifier is found to be an ideal solution for a mains voltage of 115 V and the three-phase three-level Vienna Rectifier topology optimally fits the requirements for a 230 V mains.

Initially, the specific characteristics and control approaches of the well known Vienna Rectifier topology are summarized. The MEA concept calls for a minimization of volume and weight and hence a single-objective optimization of the three-phase Vienna Rectifier

topology regarding maximum possible power density is performed which finally results in a 10 kW rectifier system with a power density of 14.1 kW/dm³. Several limitations of the power density optimizations are addressed. A magnetically coupled damping layer is proposed for reducing the switching transients oscillations caused by the high-speed switching. It is shown how the turn-off delay of power MOSFETs degrades the input current quality and how the switching losses can be minimized. These effects can clearly be illustrated with a η -THD_I-Pareto Curve.

Furthermore, a purely digital implementation of a high-speed controller using an FPGA is developed which achieves a total control cycle time of 490 ns. Also substantial improvements of the current controller, mainly for operation at the high mains frequencies of 360 Hz...800 Hz, are shown which finally results in a THD_I of the input current below 2%. A considerably improved noise model of the Vienna Rectifier system is derived considering parasitic capacitances to the heat sink and to earth. Also a novel concept for eliminating the CM voltage of the output is proposed and analyzed in detail. Measurements taken from the implemented prototype finally confirm the proper operation of the rectifier circuit and the effectiveness of the discussed improvements.

Next to the Vienna Rectifier topology, a two-level Δ -switch rectifier system is analyzed. Basic operation of the topology is discussed, detailed loss models are derived and a digital PWM current controller/modulation concept is developed where all three phases are controlled simultaneously. The proposed, phase related controller concept is able to handle a single phase loss without any changes in the controller structure. A detailed study on reactive power capability is performed and it is analyzed to what extent this feature can be used to compensate capacitive currents drawn by the EMI filter capacitors. The discussion is accompanied by measurements taken from the implemented 5 kW laboratory prototype.

In the course of this thesis, several Vienna Rectifier systems with different switching frequencies have been built. Using the data of the constructed rectifier systems permits to derive a Pareto Curve regarding efficiency and power density of this topology. Also the actually achievable volume reduction due to an increase in switching frequency can clearly be illustrated.

Kurzfassung

Die Erhöhung des Wirkungsgrads und die Reduzierung der Schadstoffemission sind Ziele in der Flugzeugindustrie die gegenwärtig mit großem Hochdruck verfolgt werden um den Flugverkehr wirtschaftlicher zu gestalten. Vor allem die Reduzierung des Gesamtgewichts des Flugzeugs spielt dabei eine entscheidende Rolle. Dies soll in erster Linie dadurch erreicht werden, dass bestehende hydraulisch, mechanisch oder pneumatisch angetriebene Geräte durch elektrische Systeme ersetzt werden. Dieser strukturelle Umbruch in der Energieversorgung ist unter dem treffenden Namen "More Electric Aircraft" (MEA) bekannt. Im Zuge dieses Umbruchs werden massiv unidirektionale aktive dreiphasige Gleichrichtersysteme in einem Leistungsbereich von mehreren kW benötigt, vor allem für elektrisch betriebene Aktuatoren zur Steuerung und Stabilisierung der Flugbahn des Flugzeugs. Moderne zivile Flugzeuge besitzen ein AC-Stromnetz mit einer Spannung von entweder 115 V oder 230 V und einer Netzfrequenz von 360 Hz . . . 800 Hz.

Im Rahmen dieser Arbeit werden unidirektionale Gleichrichterstrukturen hinsichtlich der erhöhten Anforderungen in Flugzeuganwendungen untersucht. Nach einem Überblick über geeignete Gleichrichterstrukturen, der neben aktiven Gleichrichtersystemen auch passive und hybride Topologien beinhaltet, werden zwei vielversprechende Gleichrichterstrukturen unter der Berücksichtigung von Anforderungen wie Leistungsfaktor und Eingangsstromverzerrungen für weitere Untersuchungen ausgewählt. Während der dreiphasige 2-Level Δ -Switch Rectifier für eine Netzspannung von 115 V vorteilhaft ist, erfüllt die dreiphasige 3-Level Vienna Rectifier Topologie die Anforderungen für das höhere Netzspannungsniveau von 230 V optimal.

Ein Hauptpunkt des MEA-Konzepts stellt die Reduzierung der Baugröße und des Gewichts der eingesetzten Aktuatoren dar. Im Hinblick auf diese zentralen Anforderungen wird eine detaillierte Optimierung der Vienna Rectifier Struktur hinsichtlich Leistungsdichte vorgenommen, welche in einem 10 kW Gleichrichtersystem mit einer Leistungsdichte von 14.1 kW/dm^3 resultiert. Im Zuge dieser Optimierung werden verschiedenste limitierende Faktoren für eine Erhöhung der Leistungsdichte diskutiert. Ein neuartiges, magnetisch gekoppeltes PCB-integriertes Snubber-Konzept zur Reduktion der transienten Schaltüberspannungen bei MOSFETs mit sehr hoher Schaltgeschwindigkeit wird vorgestellt. Es wird weiters gezeigt, dass die nichtlineare Ausgangskapazität der eingesetzten MOSFETs die Stromqualität signifikant verschlechtert und diskutiert wie Schaltverluste bei hohen Schaltfrequenzen in Grenzen gehalten werden können. Der Zusammenhang zwischen Wirkungsgrad und Verzerrung der Eingangsströme kann hier sehr anschaulich in einer η -THD_I-Pareto Front dargestellt werden.

Im Zuge der Realisierung des optimierten Gleichrichtersystems wird die Implementierung eines voll-digitalen dreiphasigen Stromreglers mit einer Berechnungszeit von nur 490 ns unter Verwendung eines modernen FPGAs behandelt. Zusätzlich werden effektive Verbesserungen der bestehenden Regelansätze implementiert, wodurch letztendlich ein THD_I der Netzströme von unter 2 % erzielt werden kann. Aufgrund der hohen Schaltfrequenzen muss zudem ein verbessertes EMV Modell der Vienna Rectifier Gleichrichterstruktur erarbeitet werden welches auch parasitäre Kapazitäten der Halbleiter zum Kühler und gegen Erde berücksichtigt. Es wird eine EMV-Filterstruktur vorgeschlagen und im Detail analysiert, welche die störende hochfrequente Gleichtaktspannung am Ausgang des Gleichrichters unterdrückt. Die diskutierten und vorgeschlagenen Verbesserungen werden durch Messungen am realisierten Gleichrichtersystem bestätigt.

Darauf folgend wird eine dreiphasige 2-Level Δ -Switch Gleichrichterstruktur im Detail analysiert. Neben einer Diskussion der grundlegenden Funktion des Systems und einer Ableitung von detaillierten Verlustmodellen wird ein neuartiges phasenorientiertes Regelungskonzept entwickelt, bei dem stets alle drei Phasenströme geregelt werden. Die vorgeschlagene Regelungsstruktur ermöglicht im Falle eines Phase-

nausfalls den fortlaufenden Betrieb mit reduzierter Ausgangsleistung ohne Änderungen in der Regelungsstruktur vornehmen zu müssen. Das Δ -Switch Gleichrichtersystem ermöglicht ausserdem den Betrieb mit eingeschränkter Phasenverschiebung zwischen Phasenspannung und Phasenstrom und es wird gezeigt, dass diese Eigenschaft zur Kompensation der Blindleistung der Filterkondensatoren am Eingang und somit zur Verbesserung des Leistungsfaktors verwendet werden kann. Die diskutierten Punkte werden jeweils durch Messungen an einem realisierten 5 kW Gleichrichtersystem bestätigt.

Im Zuge dieser Dissertation wurden mehrere Vienna Rectifier Prototypen mit unterschiedlichen Schaltfrequenzen realisiert. Die Daten und Performance-Indizes dieser Systeme werden verwendet um eine Pareto Front hinsichtlich Wirkungsgrad und Leistungsdichte zu erstellen. Darauf basierend wird auch die effektiv über Erhöhung der Schaltfrequenz erzielbare Reduktion des Volumens kritisch diskutiert.