

DISS. ETH NO. 21377

**A MAGNETICALLY LEVITATED
500 000 RPM ELECTRICAL DRIVE
SYSTEM**

A dissertation submitted to
ETH ZURICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by
THOMAS IVAR BAUMGARTNER
Dipl. El.-Ing. ETH Zurich
born 23. May 1983
citizen of Zuzwil BE, Switzerland

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Johann W. Kolar, examiner
Prof. Ir. Robert-H. Munnig Schmidt, co-examiner

2013

Abstract

A clear trend towards higher rotational speeds can be observed in a wide range of applications of electrical drive systems. Long lifetimes at rotational speeds of 200 000 to 500 000 revolutions per minute (rpm) are required in devices such as high-speed optical scanning systems used for non-invasive imaging in medicine. Today, speed and lifetime of ultra-high-speed machines are mainly limited by the bearing type. Contactless concepts such as active magnetic bearings (AMB) are promising candidates for long-lived high-speed systems. However, no running AMB systems have so far been documented in literature for the projected speed range.

The main goal of this thesis is to develop a bearing technology that enables high rotational speeds while guaranteeing a lifetime of several thousand hours. For this, a machine topology is proposed and a prototype machine is developed and realized. The machine topology overcomes several limitations of previously presented high-speed AMB systems, most of all it enables rotational speeds beyond the speed limitations of state-of-the-art AMB systems.

A slotless self-bearing permanent-magnet synchronous machine employing an ironless rotor is identified to be the most promising candidate for highest rotational speeds. All six degrees of freedom of the rotor are actively controlled in the bearing and machine control loop. The machine topology features low high-frequency losses, especially on the rotor, and it enables high bearing actuator bandwidths and a robust rotor construction. The drawback of the employed Lorentz-force-based actuators is the comparatively low load capacity of the magnetic bearing.

In contrast to reluctance-force-based AMB concepts, the proposed design features linear and frequency independent force-to-current relationships. Hence, centralized linear multivariable state feedback ma-

gnetic bearing control can be applied directly without linearization of bearing actuators. Therefore, a control algorithm based on linear quadratic Gaussian (LQG) control is proposed. A mechanical and electrical model for the employed bearing and motor windings is proposed and a rotor dynamic model is presented. Furthermore, an inverter system for the control of the bearing winding currents and a printed-circuit-board-based rotor position sensor device are developed.

Finally, the design of a 300 W demonstrator is presented. Several considerations such as system integration, mechanical design of the rotor, thermal design and optimization of the stator geometry are included. The prototype is successfully operated up to 505 000 rpm. To the author's knowledge, this is the highest speed achieved by magnetically levitated electrical drive systems so far.

The overall performance of the prototype is very promising for future applications in high-speed optical scanning systems or reaction wheels used for attitude control of small satellites in orbit.

Kurzfassung

Ein Trend zu höheren Drehzahlen ist in verschiedenen Anwendungen von elektrischen Antriebssystemen festzustellen. Eine lange Lebensdauer bei Drehzahlen von 200 000 bis 500 000 Umdrehungen pro Minute (U/min) wird in zahlreichen Anwendungen, wie zum Beispiel in optischen Hochgeschwindigkeitsscannern im Medizinalbereich, angestrebt. Heutzutage werden die Lebensdauer und die maximale Geschwindigkeit von Hochgeschwindigkeitsantriebssystemen hauptsächlich durch die Lagerung der Welle limitiert. Die Lebensdauer bei höchsten Drehzahlen kann markant erhöht werden, wenn die Welle berührungsfrei gelagert wird. Ein vielversprechendes Verfahren ist das aktive Magnetlager. Trotz der aussichtsreichen Technologie wurde bis heute kein funktionelles System für diesen Geschwindigkeitsbereich dokumentiert.

Das Hauptziel dieser Dissertation ist es, eine Lagerungstechnologie zu entwickeln, die höchste Drehzahlen und eine Lebensdauer von mehreren tausend Stunden ermöglicht. Dafür wird eine Maschinentopologie vorgeschlagen und eine Prototypenmaschine entwickelt, aufgebaut und getestet. Die Maschinentopologie überwindet verschiedene Limitierungen von herkömmlichen Magnetlagern. Damit sind Drehzahlen jenseits der bisher bekannten Grenzen möglich.

Die nut- und lagerlose Permanentmagnetsynchronmaschine wird als die aussichtsreichste Maschinentopologie für höchste Drehzahlen eruiert. Alle sechs Freiheitsgrade des Rotors werden aktiv magnetisch gelagert. Diese Topologie zeichnet sich durch tiefe Hochfrequenzverluste (vor allem auf dem Rotor) und hohe Aktuatorbandbreite aus. Die eisenlose Rotorkonstruktion ist sehr robust und hält den Materialbelastungen bei höchsten Drehzahlen stand. Aufgrund der verwendeten Lorentzkraftaktuatoren ist die maximale Lagerkraft relativ klein.

Im Gegensatz zu Reluktanzkraftmagnetlagern, resultieren in der

gewählten Topologie lineare und frequenzunabhängige Lagerstrom/ Lagerkraft-Zusammenhänge. Daher können lineare schwergewichtsbezogene Mehrgrößenregelungsverfahren ohne die sonst nötige Linearisierung der Aktuatoren angewandt werden. Deshalb wird eine beobachterbasierte lineare Zustandsregelung vorgeschlagen. Im Weiteren wird ein elektromechanisches und ein rotordynamisches Modell des verwendeten Magnetlagers vorgestellt. Ferner wird ein leistungselektronisches System für die Versorgung der Magnetlager und ein leiterplattenbasierter Rotorpositionssensor entwickelt.

Zum Schluss wird ein 300 W Prototyp ausgelegt und aufgebaut. Dabei werden verschiedene Aspekte wie die Systemintegration, die mechanische Konstruktion des Rotors und die thermische Auslegung und Optimierung der Statorgeometrie berücksichtigt. Mit diesem Prototyp wurde eine Drehzahl von 505 000 U/min erreicht. Soweit dem Autor bekannt, ist dies die höchste Drehzahl, welche jemals mit einem magnetisch gelagerten Antriebssystem erreicht wurde.

Die experimentellen Ergebnisse sind vielversprechend für zukünftige Anwendungen. Die vorgeschlagene Motortechnologie könnte zum Beispiel in optischen Hochgeschwindigkeitsscannern im Medizinalbereich oder in Reaktionsrädern zur Lagesteuerung von kleinen Satelliten zum Einsatz kommen.