



Doctoral Thesis

Aktive magnetische Lagerung und Rotorkonstruktion elektrischer Hochgeschwindigkeits-Antriebe

Author(s):

Viggiano, Franco

Publication Date:

1992

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-000665944> →

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. 9746

Aktive Magnetische Lagerung und Rotorkonstruktion Elektrischer Hochgeschwindigkeits-Antriebe

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

vorgelegt von
FRANCO VIGGIANO
Dipl. Masch.-Ing. ETH
geboren am 15. Dezember 1964
Italienischer Staatsangehöriger

Angenommen auf Antrag von
Prof. Dr. G. Schweitzer, Referent
Prof. Dr. J. Hugel, Korreferent

ADAG Administration & Druck AG
Zürich 1992

KURZFASSUNG

Es besteht weltweit eine ausgeprägte Tendenz, die Drehzahl schnellaufender maschinentechnischer Systeme, wie z.B. Kompressoranlagen, bis an die technischen Grenzen zu erhöhen. Solche Systeme werden bis anhin über elektrische Motoren mit Getrieben oder direkt über Turbinen angetrieben, verwenden also Antriebe mit kleinem Wirkungsgrad, begrenzter Regelbarkeit und Zuverlässigkeit. Die Fortschritte in der Magnetlagertechnik und der Leistungselektronik zeigen heute neue Möglichkeiten für den Bau leistungsstarker, elektrischer Hochgeschwindigkeits-Antriebe. Diese führen gegenüber konventionellen Antriebslösungen zu einer wesentlichen Erweiterung der technischen Leistungen. So wird eine stufenlose Drehzahlanpassung bis hin zu höchsten Drehzahlen ermöglicht. Zudem ist eine vollkommen berührungsfreie Lagerung möglich, womit nicht nur ein Getriebe sondern auch die ganze Ölversorgung eingespart werden kann.

In dieser Arbeit werden die theoretischen und praktischen Grundlagen für die *aktive magnetische Lagerung und Rotorkonstruktion elektrischer Hochgeschwindigkeits-Antriebe* erarbeitet und am Beispiel eines Prototypen mit 100 kW Leistung bei einer Maximaldrehzahl von 30'000 U/min umgesetzt.

Zu Beginn dieser Arbeit wird die Festigkeit und die Konstruktion schnellaufender Antriebsrotoren besprochen. Die zunehmende Anzahl von Schadenfällen bei schnellaufenden Antriebsrotoren zeigt einerseits, dass diese aufgrund physikalischer Randbedingungen an der Festigkeitsgrenze betrieben werden und verdeutlicht andererseits die Notwendigkeit einer angepassten festigkeitstechnischen Auslegung. Die Auslegung des Ankers, welcher die "mechanische Schwachstelle" des Antriebsrotors ist, führt auf ein sehr komplexes, nichtlineares Festigkeitsproblem, welches nur noch mit numerischen

Methoden zu lösen ist. Hierzu wird in dieser Arbeit die Finite Element Methode verwendet. Dabei werden nicht nur das elastisch-plastische Materialverhalten sondern auch die nichtlinearen Randbedingungen an den Kontaktstellen zwischen Ankerkäfig und Motorenblech berücksichtigt. Anhand der Analyse eines zerborstenen schnellen Antriebes wird der Einfluss der Nutgeometrie auf die Festigkeit des Motors gezeigt. Die festigkeitstechnische Auslegung und Konstruktion des Prototyp-Rotors wird beschrieben. Für die Übergangsstelle vom Motorenblech zum Kurzschlussring wird schliesslich eine konstruktive Lösung gefunden, welche Relativverschiebungen, z.B. infolge Wärmedehnungen, zwischen den anliegenden Komponenten zulässt.

Der zweite Teil dieser Arbeit beschreibt die aktive magnetische Lagerung (AMB) des Hochgeschwindigkeits-Rotors. Dabei müssen mechanische, elektrotechnische und regelungstechnische Probleme gelöst werden. Die dazu notwendige Vorgehensweise wird am Beispiel des erwähnten Prototyp-Antriebes von der Rotorkonstruktion bis hin zur Inbetriebnahme des digital geregelten AMB-Systems beschrieben. Bei der Modellbildung des AMB-Systems bildet die Modellierung des biegeelastischen Antriebsrotors den Schwerpunkt. Ein spezieller, durch die Eigendynamik des Ankerkäfigs verursachter Schwingungseffekt bei Käfigläufern wird diskutiert. Äussere Einflüsse auf die Dynamik des Antriebsrotors durch dessen Koppelung an die Lastmaschine und durch den einseitigen elektromagnetischen Zug in Drehstrommotoren werden besprochen. Die weiteren Komponenten des AMB-Systems (Magnetlager, Filter, etc.) werden beschrieben und zu einem linearen Gesamtmodell zusammengefasst. Die Auslegung der digitalen Regelung und deren Realisierung mit einem Signalprozessor-System werden dargestellt.

Am Ende dieser Arbeit wird die Inbetriebnahme des AMB-Systems für den Prototyp-Antrieb beschrieben. Die Berücksichtigung regelungstechnischer Aspekte bereits beim Entwurf des AMB-Systems erlaubte, die angestrebte Drehzahl von 30'000 U/min schnell zu erreichen. Mit der realisierten Konstruktion für den Prototyp-Antrieb wurde schliesslich eine für Asynchronmotoren sehr hohe Umfangsgeschwindigkeit von 185 m/s erreicht.

ABSTRACT

There is a world-wide tendency to increase the rotational speed of high speed machinery up to the technical limits, e.g. for compressors in gas transportation systems. At present these machines are driven by low-speed electric motors via gears or directly by turbines. Such drives have low efficiencies and are limited in controllability and reliability. Recent progress in magnetic bearing technology and power electronics has considerably facilitated the realization of powerful direct electric high-speed drives. Compared to conventional drive systems such drives lead to an essential extension of technical performance. Thus, an adjustable speed control becomes possible even for very high rotational speeds and therefore mechanical gears between drive and load are no longer necessary. In addition, a completely contactless support of the rotor is possible without any lubrication system for gears and bearings.

The goal of this research is to provide the theoretical and practical knowledge for the *active magnetic support and rotor design of electric high-speed drives* and to show its applicability by means of the realization of a 100 KW prototype drive with a maximum speed of 30'000 rpm.

At the beginning of this research the strength and the design of high-speed-drive rotors is discussed. The increasing number of rotor failures in electric high-speed drives due to high centrifugal forces show that, because of physical limitations, these rotors are often operating near the strength limit. This indicates that there is a necessity for an appropriate strength design. The rotor part which contains the squirrel cage is considered to be the weakest part of the high-speed-drive rotor. Its design leads to a very complex and nonlinear strength problem which can only be solved by using numerical methods. Consequently the finite element method is used. Both,

elastic-plastic material behaviour and nonlinear boundary conditions at the contact areas between squirrel cage and motor lamination are considered. By analyzing the plastic deformation in a failed high-speed drive, the influence of the slot geometry on the strength of the motor lamination is shown. The strength design and construction of the prototype rotor is described. Finally, for the contact area of the motor lamination and the short-circuit ring, a construction is found which allows relative movements, i.e. due to thermal expansion in the adjoining components.

The second part of this work describes the active magnetic support of the high-speed rotor. Therefore mechanical, electrical and control problems have to be solved. The solution procedure is shown for the prototype high-speed drive starting from the rotor design and ending with the start-up of the digitally controlled active magnetic bearing (AMB) system. For the modelling of the AMB system special emphasis is put on the elastic high-speed rotor. A special vibration effect caused by the dynamics of the squirrel cage is discussed. External influences on the dynamics of the high-speed-drive rotor caused by its coupling to the load or due to the unbalanced magnetic pull in induction machines are discussed. The other components of the AMB system (magnetic bearing, filter, etc.) are described and combined in an overall, linear model. The layout of the digital controller and its realization with a signal processor system are illustrated.

At the end of this research the start-up of the AMB system for the prototype drive is described. Since control-specific aspects were already considered in the early stages of AMB-system design the intended maximum rotational speed of 30'000 rpm could quickly be achieved. Finally, the realized construction allows the prototype drive to reach a notable circumferential speed of 185 m/s.