Ein Beitrag zur Fehlerfrüh- und Fehlerdiagnose von elektromechanischen Antriebseinheiten in der Automatisierungstechnik

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Stuttgart zur Erlangung
der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

von
Dipl.-Ing. Joachim Hirschmann
aus Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h. c. E. Westkämper
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Bertsche

Tag der Einreichung: 24. Mai 2006
Tag der mündlichen Prüfung: 27. Oktober 2006

Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb der Universität Stuttgart
Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung Stuttgart, 2007

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis verwendeter Formelzeichen und Abkürzungen 11

Abbildungsverzeichnis 17

1 Einleitung 19

2 Ausgangssituation und Ziel der Arbeit 20
- 2.1 Problembeschreibung 20
- 2.2 Ziele 21
- 2.3 Grundidee der Arbeit 22

3 Stand der Forschung und Technik 25
- 3.1 Überwachung und Diagnose als Elemente der Instandhaltungsstrategie 25
- 3.2 Schädigungen an elektromechanischen Antriebseinheiten - Ursache der Instandhaltung 27
- 3.3 Prinzipien und Verfahren zur zustandsabhängigen Fehlerfrüh- und Fehlerdiagnose 31
  - 3.3.1 Verfahren der Merkmalsextraktion und Symptomgenerierung 32
  - 3.3.2 Verfahren der Merkmalsinterpretation und Diagnosefindung 37
- 3.4 Methoden und Verfahren zur Überwachung und Diagnose von elektromechanischen Antriebseinheiten 47

4 Anforderungen und Lösungsansatz 51
- 4.1 Anforderungen an die Überwachung und Diagnose von elektromechanischen Antriebseinheiten 51
- 4.2 Prinzipien des neuen Lösungsansatzes 53

5 Physikalisch-technische Grundlagen des Diagnosemodells 56
- 5.1 Physikalische Grundlagen tribologischer Systeme 56
- 5.2 Minimalmodelle zur Beschreibung des Zeitverhaltens von tribologischen Systemen 64
  - 5.2.1 Trennung der coulomb´schen und viskosen Reibung mit dem Superpositionsverfahren 67
  - 5.2.2 Trennung des viskosen und coulomb´schen Reibanteils durch Auslaufversuch 68
- 5.3 Minimal- und Relativmodell zur Beschreibung des Temperaturverhaltens von tribologischen Systemen 71
  - 5.3.1 Modellbildung 71
  - 5.3.2 Kompensation von Temperatureinflüssen und Berücksichtigung von Belastungen 68
- 5.4 Ermittlung des Spiels 76
- 5.5 Detektion periodisch auftretender Fehler 77

6 Merkmalsaufbereitung und Symptomgenerierung 78
6.1 Gewinnung von Merkmalen mit Minimalmodellen 78
6.2 Statistische Auswertung der Merkmale 79
6.3 Verwendung von Gradienten zur Fehlerfrühdiagnose 81
6.4 Symptomgenerierung 82
7 Interpretation der Messwerte und extrahierten Merkmale 84
7.1 Darstellung des Diagnosemodells 85
7.1.1 Beschreibung der tribologischen Systeme 87
7.1.2 Auswirkungen von Veränderungen am tribologischen System 93
7.1.3 Konstant und periodisch auftretende Leicht- und Schwergängigkeit 95
7.1.4 Spiel 97
7.2 Modellbasierte Interpretation der Symptome 99
8 Verifizierung der Methoden mittels einer Versuchseinrichtung 103
8.1 Beschreibung der Versuchseinrichtung 103
8.2 Instandhaltungsbedingte Auslegung der Versuchseinrichtung 106
8.3 Darstellung der Messergebnisse 109
8.4 Verifizierung der Modelle 112
8.5 Fehlerfrühdiagnose anhand der beobachteten Temperaturen und des Stromes 115
9 Bewertung und Diskussion weiterer Anwendungen 117
10 Zusammenfassung 119
11 Summary 120
Literatur 125

1 Einleitung

Unerwartete Stillstände von verketteten Maschinen und Anlagen in der automatisierten Produktion führen zu kritischen Produktionsausfällen. Um diese zu vermeiden, müssen geeignete Maßnahmen zum frühzeitigen Erkennen sich anbahnender Störungen und Ausfälle getroffen und während einer geplanten Instandhaltung die Fehler schnell behoben werden. Für die Planung und Durchführung der Instandhaltung geeignete Strategien und Methoden werden unter dem Begriff zustandsorientierte Instandhaltung zusammengefasst. Ziel der zustandsorientierten Instandhaltung ist es, bei optimaler Ausnutzung der Verschleißreserven die Verfügbarkeit zu erhöhen sowie die geforderte Sicherheit und Produktqualität sicherzustellen. Gemäß DIN 40042 ist die Verfügbarkeit, die Wahrscheinlichkeit, ein System zu einem gegebenen Zeitpunkt in einem funktionsfähigen Zustand anzutreffen.

Die Umsetzung dieser Anforderungen in die Praxis erfordert eine Fehlererkennung und Diagnose, die bestimmten Kriterien genügt. Sie muss während des Betriebs und ohne Demontage der zu diagnostizierenden Maschinen kostengünstig durchführbar sein. Die dafür notwendigen Messgrößen müssen möglichst ohne zusätzliche Sensorik erfasst werden können und aussagefähige Informationen über den momentanen Zustand jedes einzelnen Maschinenelements liefern.

Anlagen und Maschinen in der Automatisierungstechnik haben als wichtigste Baugruppe elektromechanische Antriebseinheiten zum Positionieren und Bewegen von Objekten. Versagt eine Antriebseinheit, so kommt es zum Ausfall der gesamten Maschine oder Anlage. Deshalb ist bereits mit der Inbetriebnahme eine Fehlererkennung und Diagnose sicherzustellen. Die im Feld gewonnenen Erkenntnisse an einem oder mehreren identischen Antriebssträngen müssen zur Validierung, Verifizierung und Konkretisierung des vorhandenen Diagnosewissens genutzt und dafür als Wissensbasis gespeichert werden.

Schäden von Maschinenelementen in elektromechanischen Antriebssträngen kündigen sich oft durch ein geändertes Zeit- und Temperaturverhalten an. Ursache ist ein verändertes Reibverhalten oder Spiel, z.B. als Folge von Schmierstoffmangel bzw. Verschleiß. Eine Interpretation des reibungsbedingten Verhaltens im Sinne einer Fehlererkennung und Diagnose ist bis heute nicht zufriedenstellend gelöst.

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Fehlererkennung und Diagnose durch eine kombinierte Auswertung der Veränderungen im Zeit- und Temperaturverhalten entwickelt. Zur Auswertung werden Minimalmodelle definiert, die analog zum Vorgehen des Instandhaltungsexperten das für bestimmte Betriebszustände typische Zeit- und Temperaturverhalten abbilden. Die Interpretation der mit den Minimalmodellen extrahierten Merkmale erfolgt anhand von Regeln, die die Veränderungen des Zeit- und Temperaturverhaltens der Antriebseinheit beschreiben.

10 Zusammenfassung

In elektromechanischen Antriebseinheiten sind die hochbelasteten Gleit- und Wälzkontakte die ausfallkritischen Elemente des mechanischen Teils des Antriebsstrangs. Dafür wird eine Fehlerfrühdiagnose zur Vorhersage einer sich anbahnenden Störung oder eines sich abzeichnenden Ausfalls in dieser Arbeit vorgestellt. Bei einem Ausfall wird aus der Vorgeschichte auf die Fehlerursache und die fehlerhafte Baugruppe bzw. das ausgefallene Maschinenelement geschlossen.

Grundlage ist ein modellgestützter Ansatz, der durch die Verwendung von sogenannten Minimalmodellen eine isolierte Ermittlung einzelner, den Fehler charakterisierende Merkmale erlaubt. Die Minimalmodelle basieren auf physikalischen Grundlagen und liefern bei bestimmten Betriebszuständen unmittelbar einzelne Merkmale zum Zeit- und Temperaturverhalten, die einzeln oder kombiniert, redundante Rückschlüsse auf Veränderungen in den tribologischen Systemen der elektromechanischen Antriebseinheiten erlauben. Die Modellansätze werden durch Versuche bestätigt.

Nicht die absoluten Werte der Merkmalsgrößen werden für eine Fehlerfrühdiagnose herangezogen, sondern deren zeitlicher Verlauf. Aus den Trends lassen sich sichere Vorhersagen ableiten. Die als fehlerrelevant erkannten Merkmalsänderungen werden zu Symptomen, die unter Verwendung einer Regelbasis interpretiert werden. Ergebnis ist eine Aussage über den zu erwartenden Fehler, dessen Eintrittszeitpunkt und Ursache.

Aus der Sicht des Anwenders ist die Auswertung nachvollziehbar, da die Verwendung von Minimalmodellen der Denkweise des Instandhalters entspricht. Dadurch ist es für den Instandhalter möglich, die Plausibilität der vom eingesetzten Regelinterpreter gezogenen Schlüsse nachzuvollziehen und zu überprüfen. Der Anwender wird angeregt, die Regelbasis durch seine gesammelten Erfahrungen zu ergänzen.

Der Aufwand für die Hardware hält sich in Grenzen, da die mit modernen Antriebsreglern verbundene hohe wert- und zeitmässige Auflösung bei der Strom- und Lagemessung direkt als Eingangsgrößen für die Minimalmodelle genutzt werden können. Lediglich für die Temperaturmessung an den Reibstellen werden zusätzliche Sensoren benötigt. Mikroelektronische Temperatursensoren mit integrierter drahtloser Übertragung befinden sich im Endstadium der Entwicklung. Lager mit integrierten Temperatursensoren werden angeboten.

Die Auswertung kann in die Antriebssteuerung integriert werden. Die Diagnosekomponente ist integraler Bestandteil zukünftiger elektromechanischer Antriebseinheiten. Die Einbindung der Fehlerdiagnose in die Steuerung der Maschine reduziert den hardwaremäßigen Aufwand für die Merkmalsinterpretation und erlaubt es, erfahrungsbasierte Spezifika der Maschine als Memoryeffekt bei der Fehlerdiagnose mit einzubeziehen.

11 Summary

If interconnected machines and equipment in an automated production environment are suddenly brought to a halt, a significant loss of production is the result. To prevent unexpected stoppages, appropriate measures are needed for the early identification of imminent failures and breakdowns, and defects found during routine maintenance need to be rapidly rectified. Strategies and methods for planning and executing maintenance activities are embraced by the term ‘condition-based maintenance’. The objective of condition-based maintenance is to increase availability while making optimum use of the wear reserve and ensuring the required safety and product quality. According to DIN 40042, availability expresses the probability that a system is operable at any given time.

Satisfying these requirements in day-to-day business requires a fault detection and diagnosis system that fulfills certain criteria. For one thing, execution on running systems should be possible, without dismantling the machines and at low cost. In addition, the measuring of necessary parameters should not require additional sensory mechanisms to deliver valuable information on the current state of each machine part.

In automation technology, the most important subassemblies of equipment and facilities are electromechanical drive units for positioning and moving objects. If a drive unit fails, the complete machine or facility will break down. Therefore, provisions for fault detection and diagnosis should be made before putting a machine into operation. Practical insights from one or more identical drive units must be exploited to validate, verify and substantiate the existing diagnostic knowledge and therefore need to be stored in a knowledge base.

Damages to machine parts in electromechanical drive trains are often revealed by changes in time and temperature behavior. They are due to a modified frictional behavior or play, for example caused by a lack of lubricants, or wear. As yet, no satisfactory interpretation of frictional behavior exists useable for fault detection and diagnosis.

The aim of the present work is to develop a fault detection and diagnosis system by bringing together the evaluation of changes in both time and temperature behavior. For evaluation purposes, minimal models are defined which map the typical time and temperature behavior for certain operating states just like a maintenance expert would do. The interpretation of characteristics extracted by the minimal models is based on rules describing the changes in a drive unit’s time and temperature behavior.

Often, signal analysis can be ruled out in automation technology. Model-based methods are only rarely used because of the modeling effort and their insufficient accuracy.

Objective

This work aims to develop a fault detection and diagnosis system for electromechanical drive units in automation technology. The term ‘electromechanical drive unit’ describes an arrangement in which an electric motor moves an end-effector. Apart from an electric motor, it takes gears, screw drives, rack and pinion drives, synchronous belt drives, as well as bearings or guideways to generate the necessary movements, forces and moments.

The method to be developed draws on the experience and troubleshooting procedure of a maintenance expert building in his mind individual partial models—so-called minimal models—that allow him to emulate the physical behavior at certain operating states with sufficient accuracy while examining individual characteristics in isolation. The characteristic values of several minimal models are taken as a basis for an overall evaluation to identify the type, cause, location, and effect of a fault.

Consequently, it is the task of a monitoring and diagnosis system to extract fault-relevant characteristics from the preprocessed values collected for different operating states, making use of minimal models. The characteristic values are passed on to a rule interpreter storing the failure behavior of the complete electromechanical drive unit, being thus able to draw conclusions on the imminent or actual failure of a machine part. To avoid failure-relevant information going missing, the long-term failure trend must be recorded, while discrete events should be stored and their frequency and intensity be incorporated into the diagnostic process.

Further requirements to be met by the monitoring and diagnosis system are:

- Easy adaptation to different electromechanical drive units
- Usable right from the start of the first drive unit
- Providing a comprehensible interpretation for the maintenance engineer through clear minimal models and the application of rules
- Not only the mechanical but the thermal effects as well are used as failure indicators
- Learning from experience, thus implicating models of a higher order
- Delivering the greatest possible information value based on few sensors only

What is needed is a monitoring and diagnosis system using minimal models along with a rule interpreter that is able to identify imminent failures or defective machine parts.

Results of the work and discussion

For electromechanical drive units, the combined evaluation of motor current and temperatures at the contacts that are in relative motion to each other allows to assess the state of the tribological systems in bearings, guideways and gears. The motor current is used to capture the frictional behavior of the total system. The temperature measurement is used to record the temperature rise at the individual friction points caused by the resulting frictional energy.

The motor current is measured for different operating states, while the coefficient of friction is determined using the super position technique. The local temperature measurements are continuously recorded. In addition, the coefficient of friction can be determined with the deceleration test, while the Coulomb friction of the drive system can be identified during the slow reference run, i.e. the viscous and the Coulomb friction share can be determined by two independent techniques. Viscous and coulomb frictions are calculated twice by two independent techniques. The redundancy of this procedure allows for a reliable assessment of changes in the total system's frictional behavior, making it usable for early fault detection. If, at an increased number of revolutions or speed, the friction coefficients change, this is mainly due to altered lubricant characteristics, such as lubricant viscosity. Changes in coulomb friction often result from variations in load. A shift in the ratio of coulomb to viscous friction suggests a change in the frictional state. This may be caused by wear. The relative variations of temperatures recorded at the individual tribological systems are being assessed. Variations of individual temperature measurements deviating from the long-term stable ratio of temperature measurements signal a change in the tribological system, e.g. of a bearing assembly. Thus, the measured temperatures along with a concurrent change in total friction suffice to create a redundant system for early fault detection. To assess the lubrication state, it is also possible to consult the viscosity ratio $\kappa=\gamma/\gamma_1$ with reference viscosity γ_1 and service viscosity γ. In addition, the measured temperature can be used to correct the service viscosity in case of temperatures deviating from the reference value, thus rectifying the friction coefficients based on temperature. Using the changes in friction coefficients together with the energy dissipation to assess failure-prone tribological systems helps to create a redundant diagnosis system. The redundancy is essential to enable a reliable assessment of the small variations that are prime indicators of a breakdown. The new method does not employ the absolute values of characteristics for assessing the current frictional state, but their variations to identify clear tendencies based on gradients.

Additionally, for the purpose of recording the circumferential backlash, both the position transducer and the increase in current can serve as indicators for the right and left edge contacts. The position-dependent recording of current rises and drops also allows finding out if the drive system can be easily moved or not.

The high-resolution measurement of current is possible for modern and digital current converters with a high sampling frequency. Measuring temperature at bearings and other tribological contacts is only cost-efficient if new microelectronic temperature sensors are used. Thus, temperature measurements can be transmitted wirelessly and directly from the sensors attached to the object. It is a method with a promising future.

This model-based approach competes with the signal-based techniques; their advantage being the fact that even minor changes at the contacts lead to structure-borne and airborne emissions, which can be captured with acoustic sensors. The drawback of this approach is that the assessment of noise emissions occurs in the time and frequency domain. The correlation between noise emissions and their causes is hard to understand. For the most part, conclusions about imminent failures or breakdowns are very unreliable.

The difficulty with the model-based approach developed here is to obtain reliable measurements to draw conclusions about the physical states of the tribological contact. However, conclusions about possible failure causes are easy to derive if reliable measurements based on physical relationships are available. The minimal models introduced in this work, together with the gradient evaluation and the relative assessment of the temperature measurements, mitigate the drawbacks of the model-based approach. Reliable fault diagnosis is supported both by individual parameters obtained for selected operating states and by the given redundancy. The method developed here sets the stage for practically applying the model-based approach.

The application of the approach is not confined to electromechanical drive units in automation technology. As electronically controlled drives are increasingly found in many products and processes, e.g. in materials handling technology and process engineering, it would make sense to integrate the analysis of the current, the implementation of the deceleration test, and the recording of temperatures including their evaluation, into the converters and inverters. The same applies to DC drives in vehicles.

The strategic goal is to replace today’s method of limit value monitoring of motor current and motor temperature by analyzing the time behavior of the drive in order to reliably and early predict imminent failures based on trends.