

# Antriebszustandsdiagnose einer permanentmagneterregten Synchronmaschine durch Ausnutzung von Körperschall und Stromverlauf

David Franck, Thomas Herold und Kay Hameyer

Institut für elektrische Maschinen, RWTH Aachen, 52056 Aachen, Deutschland

E-Mail: david.franck@iem.rwth-aachen.de

## Einleitung

Durch die Antriebszustandsdiagnose (Condition Monitoring) soll der aktuelle Zustand eines Antriebssystems erfasst werden. Dazu werden Signale mittels Sensoren aufgenommen und ausgewertet. Zustandsdiagnosesysteme dienen der Erhöhung der Verfügbarkeit von Antriebssystemen und gewinnen stetig an Bedeutung. Diese Systeme basieren zumeist auf empirischen Ansätzen. Der hier vorgestellte Ansatz zur Überwachung des Antriebszustands ist die modellbasierte Auswertung der Oberflächenschnelle des Gehäuses der elektrischen Maschine und des aufgenommenen Stroms hinsichtlich Abweichungen vom Sollzustand. Damit lassen sich beispielsweise Fertigungstoleranzen in der Magnetisierung und Exzentrizität oder abweichende Windungszahlen des Antriebsmotors diagnostizieren. Weiterhin kann der Zustand der nachgeschalteten Applikation durch Auswertung der Drehmomentrückwirkung überwacht werden.

Dieser Aufsatz behandelt die Simulation von Abweichungen im System „elektrische Maschine“. Eine Nachbildung von Zuständen mittels Simulationen hat den Vorteil, dass Algorithmen zur Auswertung und Diagnose offline erstellt, getestet, bewertet und angepasst werden können. Für die Diagnose der verschiedenen Betriebszustände müssen angepasste Modelle erstellt werden, welche die hinreichende Nachbildung der relevanten Systemzustände ermöglichen. Der in dieser Arbeit verfolgte Ansatz besteht aus der Verwendung parametergestützter analytischer Modelle. Die Parameter werden aus Finite Elemente Berechnungen extrahiert. Dieses Vorgehen verbindet die schnelle Simulationsgeschwindigkeit von analytischen Ansätzen mit der Genauigkeit von numerischen Lösungsverfahren.

## Simulative Untersuchung von Fehlerfällen

Zur Simulation der Fehlerfälle wird ein erweitertes dq-Modell der Maschine angewandt, das aus numerischen Feldberechnungen erweiterte Ersatzschaltbildgrößen ableitet. Das erweiterte Modell ermöglicht dynamische Simulationen unter Berücksichtigung von Fehlerfällen. Der modellbasierte Ansatz zur Fehlererkennung soll beispielhaft an zwei permanentmagneterregten Synchronmaschinen (PMSM) vorgestellt werden. Das Bewertungskriterium bei Maschine 1 ist der Strom und bei Maschine 2 die Oberflächenschnelle.

Die wichtigen Maschinenparameter sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Tabelle 2 zeigt eine Übersicht und Beschreibung der vier untersuchten Fehlerfälle.

Der Einfluss der oben untersuchten Fehlerfälle Magnetisierung, Wicklungszahl, statische und dynamische Exzentrizität auf die Phasenströme wird in einer Vielzahl

von Veröffentlichungen diskutiert. Beispielsweise wird in [1] hergeleitet, dass durch statische und dynamische Exzentrizität Seitenbänder im Strom erzeugt werden. Dabei wird die Beziehung

$$f = \left[ 1 \pm \frac{2k-1}{p} \right] \cdot f_{strom}, k \in \mathbb{N} \quad [\text{Hz}] \quad (1)$$

zur Bestimmung der möglichen Stromharmonischen angegeben, wobei  $k$  eine ganzzahlige Zählvariable ist,  $p$  die Polpaarzahl der Maschine und  $f_{strom}$  die Grundfrequenz des Stroms. Im Vergleich werden auch Magnetisierungsfehler untersucht. Diese regen potentiell alle ungeradzahigen Vielfachen der Stromgrundfrequenz an. Weiter Untersuchungen sind in [2] diskutiert. Eine generelle Unterscheidbarkeit der untersuchten Fehler wird in den genannten Veröffentlichungen beschrieben. Basierend auf den bekannten Ergebnissen werden Simulationen der Fehler durchgeführt.

Tabelle 1: Maschinenparameter.

Maschinenparameter	Maschine 1	Maschine 2
Typ	Oberflächen PM, synchron	Oberflächen PM, synchron
Leistung P	2 kW	5 kW
Drehzahl n	3000 min <sup>-1</sup>	3000 min <sup>-1</sup>
Nutzahl N <sub>l</sub>	9	24
Polzahl 2p	6	22
Lochzahl q <sub>l</sub>	0.5	0.36

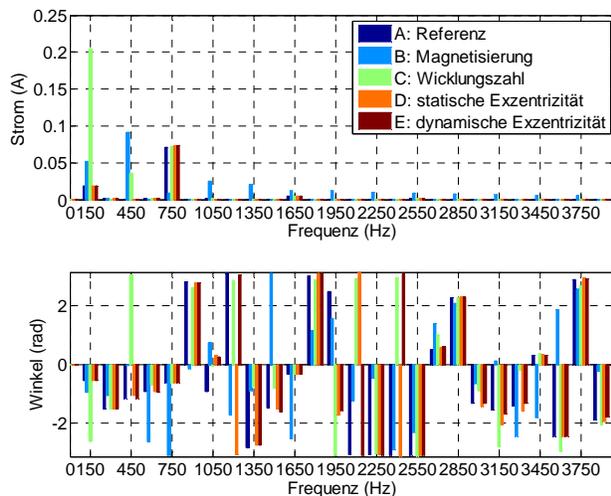
Tabelle 2: Untersuchte Fehler.

Fehlerart	Bezeichnung	Beschreibung
Referenz	A	Alle Parameter ideal
Magnetisierung P	B	ein PM: Remanenz-induktion um 30% reduziert
Wicklung	C	Eine Spule: N 20% reduziert
Statische Exzentrizität	D	Verschiebung des Stators um 26% (Maschine 1) bzw. 20% (Maschine 2) der Luftspaltweite
Dynamische Exzentrizität	E	Verschiebung des Rotors um 26% (Maschine 1) bzw. 20% (Maschine 2) der Luftspaltweite

## Simulationsergebnisse

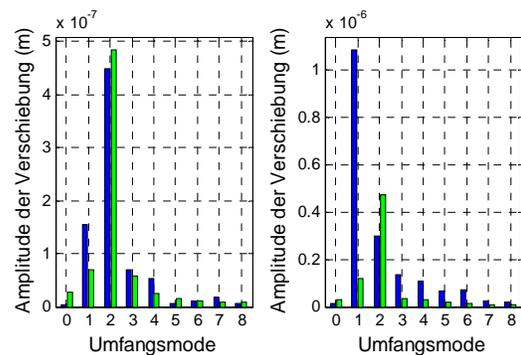
Für Maschine 1 werden die Stromsignaturen der beschriebenen Fehler simuliert. Der untersuchte Betriebszyklus umfasst einen Hochlauf auf  $n=3000\text{min}^{-1}$  und einen Laststoß mit Bemessungsmoment nach 0,1s.

Während dieses Zyklusses bleibt der Drehzahl Sollwert konstant. Ein Vergleich der Stromspektren der einzelnen Fehler zur Referenzmaschine ist in Abbildung 1 dargestellt. Im Fall des Magnetisierungsfehlers werden alle ungeraden Vielfachen der Stromgrundfrequenz stark erhöht. Der Fehler in der Wicklungszahl einer Spule zeichnet sich durch eine Erhöhung der 3. und 9. Harmonischen im Strom aus. Die aus der Literatur vorhergesagten Seitenbänder im Strom durch Exzentrizität konnten für die untersuchte Maschine nicht festgestellt werden. Zur Identifikation dieser beiden Fehler wird die Oberflächenverschiebung als Bewertungsgröße vorgeschlagen.



**Abbildung 1:** Vergleich der simulierten Stromspektren der betrachteten Fehlerfälle.

Die Untersuchung der Exzentrizität ist am Beispiel von Maschine 2 durchgeführt. Zusätzlich zu den elektromagnetischen Simulationen werden hier die elektromagnetischen Kräfte als Anregung für strukturdynamische Simulationen verwendet. Eine numerische Modalanalyse wird unter Berücksichtigung der dreidimensionalen Maschinenstruktur und der Einspannung durchgeführt. Eine genaue Beschreibung der Simulation ist in [3] gegeben. Hier wird nur ein Auszug der Ergebnisse vorgestellt. Bei Exzentrizität werden zusätzliche Kraftdichtewellen erzeugt, die sich in der räumlichen Ordnung um  $\pm 1$  von den normalen Kraftdichtewellen unterscheiden. Diese Kraftmoden sollen als Bewertungskriterium dienen. Die Hauptanregung der untersuchten Maschine hat die Frequenzordnung 22 und die Umfangsmode 2. Daher wird hier nur diese Kraftdichtewelle im Weiteren untersucht. Abbildung 3 zeigt die simulierte und gemessene Oberflächenverschiebung der Frequenzordnung 22 mit den räumlichen Umfangsmode 0 bis 8. Die Hauptanregung der Maschine hat die räumliche Mode 2. Diese wird nicht von der Exzentrizität beeinflusst. Hingegen zeigen sowohl die Simulation als auch die Messungen eine deutliche Verstärkung der zusätzlichen Moden 1 und 3 durch statische Exzentrizität.



**Abbildung 2:** Gemessene und simulierte Oberflächenverschiebung für die Referenzmaschine (links) und bei statischer Exzentrizität (rechts).

## Zusammenfassung und Ausblick

Simulationen von Stromsignaturen für die Fehlerfälle Magnetisierung, Wicklungszahl, statische und dynamische Exzentrizität sind vorgestellt worden. Die simulierten Stromspektren zeigen im Fall des Magnetisierungsfehlers eine deutliche Anregung in allen ungeradzahlig Harmonischen. Im Fall des Wicklungsfehlers werden die Harmonischen mit den Ordnungszahlen 3 und 9 deutlich verstärkt. Eine Exzentrizität hat im untersuchten Fall einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Stromsignatur. Daher wird eine weitere Untersuchung der Oberflächenverschiebung als Bewertungskriterium vorgeschlagen. Es konnte sowohl in der Simulation als auch durch Messungen gezeigt werden, dass eine zusätzliche Verformungsmoden, die um eine Ordnungszahl positiv oder negativ verschoben ist, im Fall der statischen Exzentrizität erzeugt wird.

Die vorgestellten Modelle können zur Offline-Parametrierung von Diagnosesystemen eingesetzt werden, und eine Grundlage für modellbasierte Systeme darstellen. Weitere Arbeiten am IEM beschäftigen sich mit der Simulation von betriebsbedingten Fehlerfällen.

## Literatur

- [1] Ebrahimi, B., Faiz, J., Static-, Dynamic-, and Mixed-Eccentricity Fault Diagnoses in Permanent-Magnet Synchronous Motors, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 56, no. 11, 2009, S. 4727 - 4739
- [2] Toliyat, H. A., Al-Nuaim, N. A., Magnet Simulation and Detection of Dynamic Air-Gap Eccentricity in Salient-Pole Synchronous Machines. Proceedings of the IEEE Industry Applications Conference (1997), S. 255-262
- [3] Franck, D., van der Giet, M., Hameyer, K., Simulation of acoustic radiation of an AC servo drive, COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, Vol. 29 Iss: 4, 2010, S.1060 – 1069