Bewertung verschiedener Messgrößen bei auftretenden Fehlern in umrichtergespeisten Elektromaschinen

Thomas Herold, David Franck, Kay Hameyer
Institut für Elektrische Maschinen, RWTH Aachen, Email: thomas.herold@iem.rwth-aachen.de

Einleitung

Die Zustandsdiagnose ist ein wichtiges Hilfsmittel, um Abweichungen in einem Prozess erkennen und darauf reagieren zu können, ohne dass große Schäden und Ausfälle auftreten. Dafür ist es wichtig, den Schaden in einer frühen Phase genau zu identifizieren. In vielen Anwendungen zählt zu den zentralen Komponenten die umrichtergespeiste elektrische Maschine. Daher ist ihre Überwachung ein relevanter Aspekt in der Diagnose.

Dieser Aufsatz beschäftigt sich mit der Detektion von Lagerschäden und Exzentrizitäten der elektrischen Maschine durch Auswertung von spezifischen Signaturen im Maschinenstrom und in der Oberflächenschnelle des Maschinengehäuses. Während die Lagerüberwachung mit dem Einsatz von Beschleunigungssensoren zum Stand der Technik gehört, ist eine Erkennung durch die Stromsignale noch nicht weit verbreitet. Besonders die Taktung der Umrichter erschwert eine Erkennung aufgrund der breitbandigen Störung durch die eingebrachten Stromrippel.
Die Rotorexzentrizität ist durch ihre Strukturanregung erkennbar, aber auch die Detektion aus dem Maschinenstrom ist ein in der Literatur häufiger betrachtetes Thema [1].
In dieser Arbeit wird ein Vergleich der Sensorsignale der zwei genannten Maschinenfehler vorgestellt. Bei der Erkennung aufgrund der Stromsignatur wird bei der Exzentrizität neben der reinen Strangstromauswertung eine Möglichkeit der Detektion basierend auf den in das Zweiachssystem transformierten Strangströmen vorgestellt. Weiterhin wird der Einfluss getakteter oder ungetakteter Speisung für den Fall des hier verwendeten Messaufbaus dargestellt.

Prüfling und Messablauf

Als Prüflingsmaschine wird eine permanentmagneterregte Synchronmaschine eingesetzt. Die Tabelle 1 gibt einige wichtige Kenndaten der Maschine an. Für die Messungen wird diese Maschine jeweils in einem von Nulldrehzahl ausgehenden Hochlauf beschleunigt und sowohl die Strangströme als auch die Oberflächenschnelle zeitsynchron aufgenommen. Diese werden zur Auswertung spektral zerlegt.

Tabelle 1: Daten des Prüflings (Bemessungsgrößen)

Wichtige Motorparameter	Werte
Typ	Syn., Oberflächen PM
Leistung (P)	1,3 kW
Drehzahl (n)	4000 min^{-1}
Drehmoment (M)	3,1 Nm
Nutzahl (N)	6
Polzahl (2p)	4
Lochzahl	0,5

Einfluss von Taktung der Speisespannung auf die Messergebnisse

Zunächst wird der Einfluss der Taktung eines Umrichters auf die Analyse untersucht. Dazu wird die fehlerfreie Maschine unbelastet auf halbe Nenndrehzahl beschleunigt und die Spektren in Strom und Oberflächenschnelle verglichen: Wie zu erwarten, ist im Spektrogramm der Einfluss der PWM als eine Aufspreizung von Ordungslinien um die PWM-Frequenz zu erkennen (Umrichterfächer). Zusätzlich treten Harmonische durch die PWM-Ansteuerung auf. Im untersuchten Fall hat die PWM, gegeben durch den großen Abstand zwischen Taktfrequenz und Nutzsignal, keine signifikante Auswirkung auf die Diagnose. Liegt die Taktfrequenz nahe der Grundfrequenz und ist das Verhältnis Zwischenkreisspannung zu Maschineninduktivität sehr groß (große Stromrippel), ist mit erheblichen Störungen im Spektrum zu rechnen. Da dies für die untersuchte Konfiguration nicht zutrifft, wird im Folgenden nur die ungetaktete Leistungsverstärkerspeisung betrachtet.

Untersuchung des Lagerschadens

Für die Analyse des Lagerschadens wird in den Triebstrang ein beschädigtes, mit 300 N radial belastetes, Zylinderrollenlager eingebracht. Als Beschädigung ist der Außenring mit einem axialer Schlitz von einem Millimeter Breite versehen. Nach [2] und [3] ist für das untersuchte Lager durch Überrollen der Wälzelemente eine signifikante Frequenz in der Oberflächenschnelle von $f_0 = 4,25 \cdot f_{mech}$ (f_{mech} = Wellendrehzahl) und deren Vielfachen zu erwarten. Durch Übertragung dieser Schwingungen in die Maschine wird in [2] zusätzlich für den Strom eine Störfrequenz von

$$f_s = |f_{el} \pm k \cdot f_0| \quad \text{mit} \quad k = 1, 2, 3... \tag{1}$$

angegeben. Hierbei bezieht sich f_{el} auf die Stromfrequenzen. In Abb. 1 wird das Spektrum der in Radialer Richtung am Gehäuse über dem geschädigten Lager gemessenen Oberflächenschnelle für einen Hochlauf auf Nenndrehzahl dargestellt. Die hervorgehobenen Spektrallinien sind die Frequenz der Ordnung 4,23 , bezogen auf die mechanische Drehzahl, und deren ersten drei ganzzahligen Vielfachen. Die Abweichung zum theoretische Wert von 4,25 ist mit einem leichten Lagerschlupf zu erklären, der in der theoretischen Formel nicht berücksichtigt wird. Während das Spektrum der Oberflächenschnelle deutlich den Lagerschaden widerspiegelt, ergibt sich im Stromspektrum keine eindeutige spezifische Änderung und wird daher hier nicht extra dargestellt.

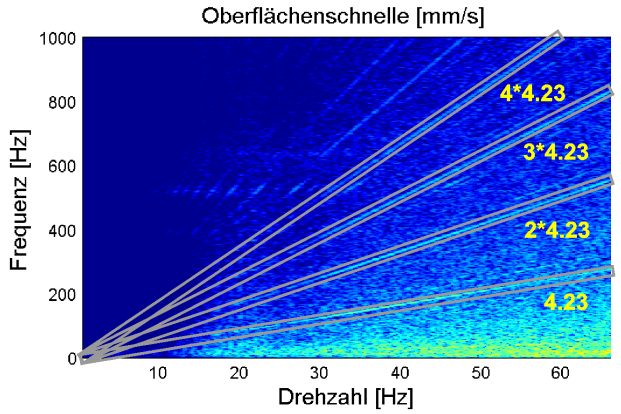

Abbildung 1: Spektrum der Oberflächenschnelle bei Lagerschaden.

Rotorexzentrizität

Dieser Abschnitt zeigt die Auswirkungen einer statischen Rotorexzentrizität von 50 %. Die bei einem Hochlauf bis Nenndrehzahl gemessene Oberflächenschnelle (mittig zwischen den Lagerschilden) zeigt eine 30-fach stärkere Ausprägung der erwarteten Frequenz von $2 \cdot 2p \cdot f_{mech}$ im Gegensatz zum zentrischen Fall und ist damit eindeutig erkennbar.
Im Strom werden nach [1] für eine statische Rotorexzentrizität Frequenzen der Ordnung

$$f_s = [1 \pm \frac{k}{p}] \cdot f_{el} \quad \text{mit} \quad k = 1, 2, 3... \tag{2}$$

erwartet. In Abb. 2 ist das Stromspektrum für den Hochlauf bei zentrischem Rotor dargestellt. Neben der eindeutig identifizierbaren Grundwelle sind auch ein doppeltfrequenter Anteil und die siebte Harmonische deutlich sichtbar.
Durch die Exzentrizität ergeben sich die nach (2) zu erwartenden Harmonischen von denen besonders eine starke Dritte herausticht. Weiterhin ist eine eher schwache Neunte erkennbar (Abb. 3). Zur Auswertung empfiehlt sich eine Indexbildung wie in [1] vorgeschlagen.

Transformierten Strangströme

Neben den zusätzlichen Harmonischen, hervorgerufen durch die Rotorezxentrizität, ergeben sich durch eine Veränderung der Feldstreuung ebenfalls Abweichungen in den Amplituden der einzelnen Strangströme. Diese können separat ausgewertet oder durch Heranziehen Transformation in das 2-Achs-Koordinatensystem kombiniert analysiert werden. Da eine feldorientierte Regelung (Standard bei drehzahlgeregelten Antrieben) ohnehin die transformierten Ströme benötigt, ist es sinnvoll, direkt diese zu betrachten, da Abweichungen in den Einzelamplituden hierin eine zusätzliche Frequenz mit doppelter Stromgrundfrequenz hervorrufen aber auch die eigentlichen Strangstromharmonischen, gefaltet mit der Transformationsfrequenz (entspr. Stromgrundfrequenz), enthalten sind. Die Spektrallinie mit $f = 2 * f_{el}$ wird bei der Exzentrizität im Vergleich zum zentrischen Fall 50-fach stärker ausgeprägt.

Fazit

Während Schwingungen, ausgelöst durch Lagerschaden oder Rotorexzentrizität, durch die Messung der Oberflächenschnelle sehr gut und zuverlässig detektierbar sind, ist die Analyse Strangströme schwieriger. Zwar lässt sich die Exzentrizität gut erkennen, allerdings zeigt im Falle des Lagerschadens die hier durchgeführte Messung keine erkennbare Signatur durch einfache Betrachtung des Spektrums. Eine Untersuchung hinsichtlich technisch aufwändigeren Auswertungsmethoden erscheint notwendig.
Neben der Strangstromauswertung der Einzelstränge wird eine Betrachtung der in das 2-Achs-Koordinatensystem transformierten Ströme gezeigt, die zusätzliche Amplitudenabweichungen der drei Stränge mit berücksichtigt.

Literatur

[1] Ebrahimi, B.M.; Faiz, J.; Araabi, B.N.: Pattern identification for eccentricity fault diagnosis in permanent magnet synchronous motors using stator current monitoring, Electric Power Applications, IET , vol.4, no.6, pp.418-430, July 2010

[2] Schoen, R.R.; Habetler, T.G.; Kamran, F.; Bartfield, R.G.: Motor bearing damage detection using stator current monitoring, Industry Applications, IEEE Transactions on , vol.31, no.6, pp.1274-1279, Nov/Dec 1995

[3] Wirth, R.: Maschinendiagnose an Industriegetrieben - praktische Signaldetektion, Antriebstechnik, 1998

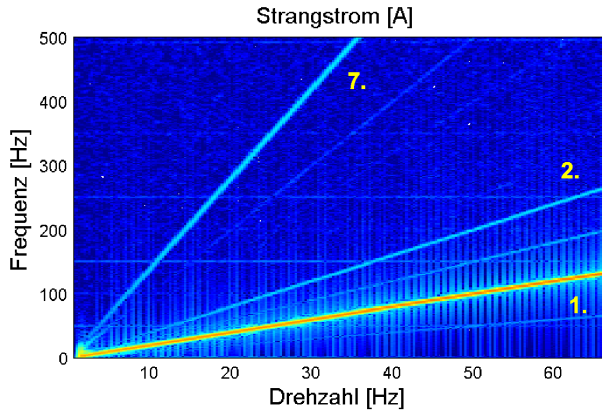

Abbildung 2: Spektrum eines Strangstroms bei zentrischem Rotor.

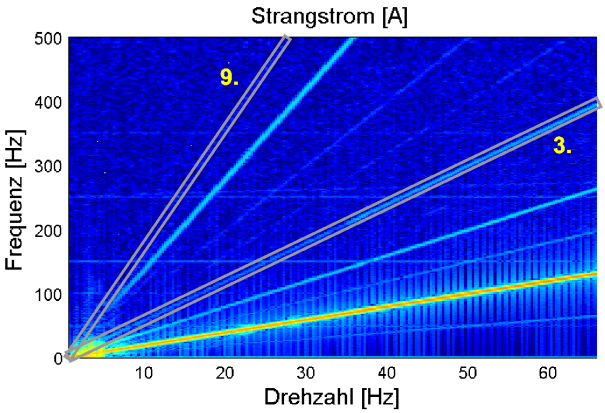

Abbildung 3: Spektrum eines Strangstroms bei exzentrischem Rotor.