

Zustandsabhängige Überwachung von Motoren und Generatoren

Vermeidung von langen Ausfallzeiten

Sulzer Dowding & Mills nutzt eine Reihe von Überwachungsmethoden zur Beurteilung des Zustands von Motoren und Generatoren, um Kunden vor langen Ausfallzeiten und Produktionseinbußen zu schützen.

Eine der häufigsten Ausfallursachen bei rotierenden elektrischen Maschinen sind Lagerschäden. Doch die Ausfallart mit den größten Auswirkungen im Hinblick auf Stillstandzeiten und Produktionseinbußen ist das Versagen der Isolation an den Statorwicklungen. Dies gilt insbesondere für Hochspannungsmaschinen. Da ein vorzeitiger Ausfall der Statorisolation zu kostspieligen Zwangstillständen führen kann, ist die Verhinderung solcher Ausfälle ein wichtiges Ziel. Daher werden große Anstrengungen unternommen, um zuverlässige Verfahren zur Beurteilung der Isolationsqualität zu entwickeln.

Sulzer Dowding & Mills nutzt verschiedene Zustandsüberwachungsmethoden, Teilentladungsanalysen, Phasen-



3 Foto des anhand der Vibrationsdaten in Bild 1 und 2 identifizierten beschädigten Rotors.

stromanalysen, die Bestimmung des Isolationswiderstands und des Polarisationsindex (PI), Tan-Delta-Analysen und vor allem eine genaue Sichtprüfung, um den Zustand der Wicklungsisolation und des Lagersystems von elektrischen Maschinen zu beurteilen. Mithilfe von Vibrationsanalysen wird der Zustand der Lager und rotierenden Teile der Maschine bestimmt, während Wärmebildkameras eingesetzt werden, um Veränderungen in der Wärmeentwicklung aufgrund von Lagerproblemen, mangelhaften elektrischen Verbindungen, asymmetrischer Phasenbelastung usw. zu identifizieren.

Zu den Parametern, die routinemäßig entweder periodisch oder online überwacht werden, gehören Vibration, Temperatur, Teilentladung und zum Teil die Wellenspannung. Diese Daten werden zusammen mit Betriebsdaten wie Last,

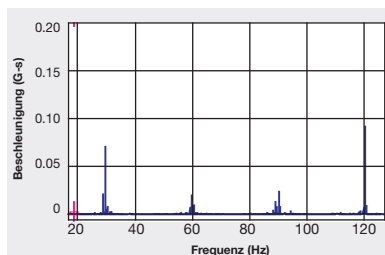
Betriebsstunden, Umgebungs- und Umweltbedingungen, Systemstörungen usw. zur Beurteilung des Zustands der gesamten Maschine verwendet.

Analyse mechanischer Vibrationen

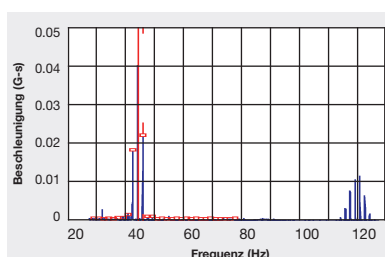
Die Analyse der gemessenen mechanischen Vibrationen ist eine hervorragende Methode zur Bestimmung des aktuellen Zustands einer Maschine. Selbst wenn die Vibrationen nicht sehr groß sind, liefern sie einen Hinweis auf den Zustand der Maschine, da sie die dynamischen Kräfte widerspiegeln, die im Betrieb auf die rotierenden Teile wirken. Damit ist die Analyse gut zur frühzeitigen Erkennung von Unregelmäßigkeiten und Störungen geeignet.

Starke Vibrationen können nicht nur zur Überhitzung und schließlich zum Ausfall der Lager führen, sondern auch Schäden an der Wicklungsisolation im

1 Hochauflösendes Niederfrequenzspektrum mit vier Oberschwingungen der Drehzahl.



2 Vergrößerte Ansicht der 1-X-Rotationsdaten.



Rotor und Stator verursachen. All diese Zustände erfordern umfangreiche Reparaturen, für die die Maschine außer Betrieb gesetzt werden muss. Moderne Vibrationsüberwachungssysteme bieten Datenbanken zur Überprüfung der Vibrationsdaten, die dabei helfen, mechanische Probleme und zukünftige Wartungsanforderungen von rotierenden Maschinen vorherzusagen. So können die Inspektion erweitert und die für die Wartung erforderliche Ausfallzeit minimiert werden.

Vibrations- bzw. Wegsensoren werden an oder möglichst in der Nähe der Lager auf der Antriebs- und Belüftungsseite der Maschine installiert. Die Vibrationsmessungen werden radial an zwei 90° voneinander entfernt liegenden Punkten auf jeder Seite und axial am Antriebsende aufgezeichnet. Die Sensorsignale können als Schwingungsverlauf ausgegeben oder durch schnelle Fouriertransformationen verarbeitet und als Frequenzspektrum zur detaillierten Analyse dargestellt werden. Durch Analyse der Trendaufzeichnung können Zustandsveränderungen identifiziert und Ausfälle vorhergesagt werden.

Fallbeispiel Gillette

Ein vierpoliger Synchronmotor, der zum Antrieb eines 1,2m breiten Förderbands in einer Aufbereitungsanlage im Kohle Tagebau eingesetzt wird, wurde einer Vibrationsanalyse unterzogen. Die Bilder 1 und 2 zeigen den Zusammenhang zwischen den Vibrationsdaten und dem tatsächlichen Schaden am Rotor des 750-kW-Synchronmotors. Die Amplitude der Oberschwingungen und die Anzahl der Seitenbänder bei der Rotorschlupffrequenz liefern einen Hinweis auf die Schwere des Problems.

Die Differenzfrequenz der Seitenbänder weist einen Abstand von 0,670 Hz auf. Daraus ergibt sich der Rotorschlupf des vierpoligen Motors bei der im Diagramm dargestellten Drehzahl. Die Höhe der Seitenbänder in Verbindung mit einem Anstieg der Schlupffrequenz liefert einen Hinweis auf die Schwere der Beschädigung an der Käfigläuferwicklung.

Bild 3 bestätigt den bei der Vibrationsanalyse identifizierten Fehlerzustand als

eine Beschädigung der Käfigläuferwicklung mit mehreren defekten Rotorstäben. Die Vibrationsanalyse hat sich auch bei der Erkennung von Lagerschäden in Verbindung mit umrichter gespeisten Antrieben als erfolgreich erwiesen. Frequenzrichter können bekanntermaßen zur Riffelbildung in Wälzlagern durch Funkenerosion (*Electrical Discharge Machining*, EDM) beitragen, wenn die Rotorwelle nicht richtig geerdet ist. Diese Art von Schaden wurde von Sulzer Dowding & Mills bei mehreren Kundenanlagen festgestellt.

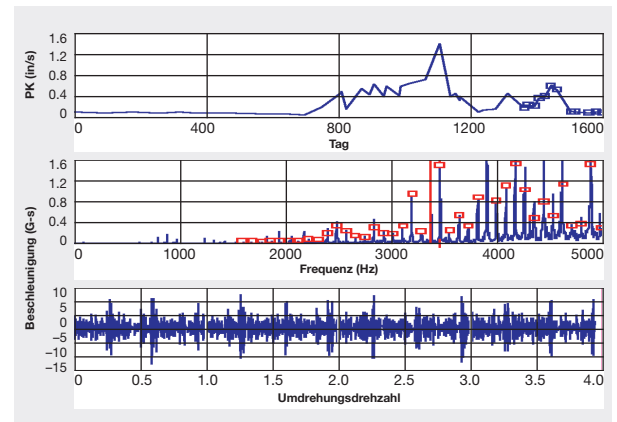
Das folgende Beispiel behandelt einen vierpoligen Synchronmotor mit 262kW und 4160V, der zum Antrieb eines Förderbands in einer Aufbereitungsanlage im Kohle Tagebau eingesetzt wird.

Das Trendbild wies auf Schäden hin, und die Intensität mehrerer hochfrequenter Spitzen veranlasste Sulzer dazu, dem Kunden entsprechende Korrekturmaßnahmen zu empfehlen 4.

Die Lager 5 wurden ersetzt und der Motor mit einer speziellen kommerziellen Dichtung zur Ableitung der am Rotor entstehenden Wirbelströme versehen. Dadurch sollte ein erneutes Auftreten dieser Ausfallart verhindert werden.

TE-Analyse und weitere Prüfungen

Wird bei Online-Prüfungen eine Teilentladungsaktivität (TE-Aktivität) erkannt, möchten die Betreiber der Maschine normalerweise durch Sichtprüfung und/oder weitere Offline-Tests sicherstellen, ob wirklich ein Problem vorliegt, bevor sie die Maschine außer Betrieb setzen. Zu den traditionellen Offline-Tests gehören die Messung des Gleichstromisolationswiderstands, die Bestimmung des Polarisationsindex, die Überprüfung des Verlustfaktors (Tan-Delta-Messung), Offline-Teilentladungsprüfungen sowie eine genaue Sichtprüfung. Alle diese Prüfungen sind wohlbekannt und werden seit vielen Jahren eingesetzt. Der Nachteil von Offline-Isolationsprüfungen ist, dass die Maschine für diese Zeit ausfällt, was in manchen Fällen mehrere Tage dauern kann. Hinzu kommt, dass die Wicklungsisolierung bei Offline-Prüfungen nicht den Belastungen des normalen Betriebs ausgesetzt ist und daher nicht den realen Zustand des Iso-

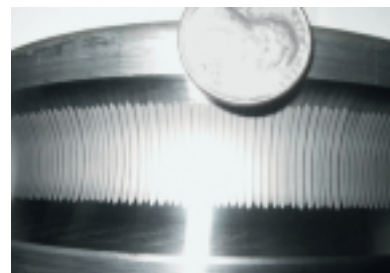


4 Trendbild, Frequenzspektrum und Schwingungsverlauf bei einem Förderband-Antriebsmotor.

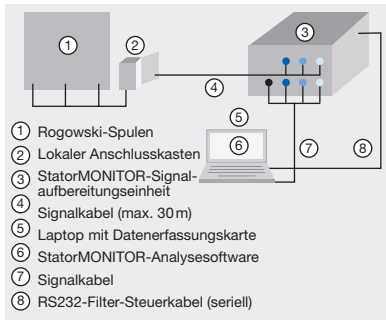
lationssystems im laufenden Betrieb widerspiegelt. Online-Prüfungen liefern genauere und zuverlässigere Diagnose-daten hinsichtlich des Isolationszustands im laufenden Betrieb. Systeme zur Online-Überwachung der Teilentladung sind in der Lage, TE-Aktivitäten zu erkennen, wobei ein deutlicher Anstieg dieser Aktivität auf eine mögliche Degradation der Isolation hindeutet, was bei großen Maschinen mit mehr als 5000 V in Laufe der Zeit zum Ausfall der Isolation führen kann.

Messprinzip

Bei einer Teilentladungsaktivität in rotierenden Maschinen kommt es unter hoher elektrischer Beanspruchung zum physikalischen Zusammenbruch eines Gases (normalerweise Luft) in einem Hohlraum, einer Spalte oder in der Nähe einer festen Isolierung innerhalb eines Isolationssystems. Diese Entladung kann zu einer chemischen und thermischen Degradation der Materialien in der Nähe der Entladung führen. Bei fortwährender TE-Aktivität bilden sich aus den Epoxidharzbindemitteln und anderen Stoffen hochleitfähige Materialien. Die in den Isolierstoffen enthaltenen Kohlenstoff-



5 Foto des anhand der Vibrationsdaten in Bild 4 erkannten Lagerschadens.

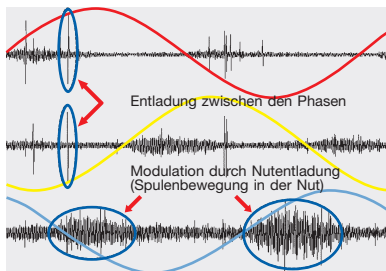


6 Typische Anordnung für eine Teilentladungsprüfung mit dem StatorMONITOR®-System.

atome werden zu freien Molekülen, die sich verbinden und Kohlenstoffbahnen bilden. Setzt sich die TE-Aktivität weiter fort, führt dies zu permanenten Schäden an der Isolation und schließlich zum vollständigen Zusammenbruch bzw. Versagen des Isolationssystems.

Beim Zusammenbruch des Gases entsteht ein elektrischer Funke, der ein hochfrequentes Signal erzeugt, das mithilfe verschiedener Methoden, z.B. durch einen direkt gekoppelten Kondensator oder indirekt über eine Rogowski-Spule, einen Hochfrequenzempfänger, einen Widerstandstemperatursensor usw., überwacht werden kann. Das Online-TE-Messsystem StatorMONITOR® wurde von Sulzer Dowding & Mills zur Überwachung, Diagnose und Evaluierung des Zustands der Isolationen von Statorwicklungen in Hochspannungsmotoren und -generatoren entwickelt. Aufgabe des Systems ist es, Isolationsprobleme in einem frühen Stadium zu erkennen, wenn entsprechende Abhilfemaßnahmen im Hinblick auf die Verhinderung von ungeplanten Ausfallzeiten und die damit verbundenen finanziellen Auswirkungen den größten Nutzen bringen würden.

7 Bei einem der Motoren zeigten sich Anzeichen für eine Entladung zwischen den Phasen (rote und gelbe Phasen) und eine Nutentladung – am deutlichsten zu erkennen in der blauen Phase.



Das von Sulzer Dowding & Mills entwickelte StatorMONITOR-System verwendet Rogowski-Spulen als TE-Detektoren. Die Daten werden online von drei Phasen gleichzeitig erfasst, was eine Unterscheidung zwischen TE-Aktivitäten in der Hauptisolation (für jede Phase), zwischen den Phasen und in den Wicklungsköpfen ermöglicht. Das System quantisiert und zeichnet die grundlegenden Entladungsparameter jedes einzelnen TE-Impulses wie die Stärke, die Polarität und die Phasenlage des Impulses in Relation zur Netzfrequenz auf.

Daraufhin werden Mustererkennungsalgorithmen angewandt, um die Art und Schwere möglicher Probleme zu identifizieren. Regelmäßige, bekannte Interferenzen, wie sie z.B. durch Stromrichter oder Erregersysteme für Generatoren hervorgerufen werden und die die Genauigkeit der Analyse beeinträchtigen könnten, können ebenfalls erkannt und beseitigt werden. Die Trending-Funktionen des Systems ermöglichen die Identifizierung von sich entwickelnden potenziellen Problemen oder Degradationsprozessen innerhalb der Isolation. Die Hauptaufgabe des Systems ist die Erkennung von Entladungsaktivitäten, die für das Isolationssystem und benachbarte Komponenten schädlich sein können.

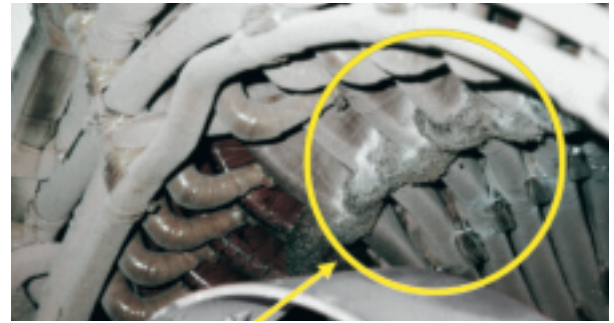
Fallbeispiel Teileinladung in rotierenden Hochspannungsmaschinen

Drei identische zweipolige Maschinen mit den unten genannten Spezifikationen wurden mithilfe des StatorMONITOR-Systems einer Teilentladungsprüfung unterzogen.

- Motorleistung: 4 MW
- Spannung: 11 kV
- Ausführung: Synchronmotor
- Einsatzort: Offshore-Ölplattform

Eine typische Prüfanordnung ist in Bild 6 dargestellt.

Zwei der drei vor Ort geprüften Maschinen wiesen eine normale, geringe Entladungsaktivität auf. An einem Motor einer Maschine wurde jedoch ein Wert von 90 000 Picocoulomb (pC) gemessen, was auf eine Entladung zwischen den Phasen (rote und gelbe Phasen in 7) schließen ließ. Ferner war eine deutliche Modulation im Entladungsmuster erkennbar (blaue Phase in 7), die auf eine



8 Durch Entladungsaktivität entstandene weiße Ablagerungen an den Wickelköpfen.

Nutentladung hindeutet, wie sie normalerweise durch Bewegung der Spulen in den Nuten hervorgerufen wird. Eine Bewegung der Spulen ist für gewöhnlich auf lose Verschlusskeile zurückzuführen.

Dem Kunden wurde empfohlen, den Motor außer Betrieb zu setzen und zu überholen. Der Ersatzmotor sollte drei Monate später während einer planmäßigen Stilllegung installiert werden. Dies verzögerte sich um einige Monate, und kurz vor der Stilllegung kam es bei diesem Motor zu einem Wicklungsausfall. Bei näherer Untersuchung der Wicklung nach dem Ausbau zeigte sich, dass sich die Wicklungsbefestigung gelöst hatte, was wiederum zum Reiben eines Phasenkabels und zu einer Entladung führte, bis es zum Ausfall zwischen dieser und einer anderen Phase im Wickelkopf kam.

8 zeigt die weißen Pulverablagerungen im Wickelkopf als Folge der Entladungsaktivität. Weitere Untersuchungen ergaben, dass sich etwa 10 % der Nutenkeile gelöst hatten, was möglicherweise ebenfalls auf das Befestigungsproblem zurückzuführen ist.

Schlussfolgerungen

Die Online-Überwachung mit Vibrationsanalyse und Teilentladungsmessung ermöglicht die Erkennung von Ausfallmechanismen innerhalb der Maschine, bevor es zum Ausfall kommt. So können rechtzeitig entsprechende Abhilfemaßnahmen getroffen werden, um die Betriebsfähigkeit der Maschine wiederherzustellen, was wiederum dabei hilft, ihre Lebensdauer zu verlängern und katastrophale Ausfälle und unplanmäßige Stillstände zu verhindern.

John Allen
 Sulzer Dowding & Mills Ltd.
 Camp Hill, Bordesley
 Birmingham, B12 0JJ
 Großbritannien
 Telefon +44 121 766 6161
 john.allen@sulzer.com