

Verlustarme magnetische Radial-/Axiallagerung unter Verwendung von Pulververbundwerkstoffen

DFG - HO 1483/55-1, 2009 - 2011

DFG – HO 1483/55-3, 2015 - 2017

Zusammenfassung:

Aktive Magnetlager gewinnen in Anwendungsgebieten, wie Schwungradspeichern oder Vakuumpumpen, zunehmend an Bedeutung. Sollen im ersten Fall insbesondere die Leerlaufverluste minimiert werden, herrschen im zweiten Fall auf Grund des Vakuums zusätzlich schwierige Kühlungsbedingungen vor. Es bedarf daher aktiver Magnetlager mit besonders geringer Verlustleistung, sowohl im Stator durch die Steuerströme, als auch im Rotor bedingt durch Wirbelströme und Hysterese. Neben der eventuellen Luftreibung werden die Rotorverluste vor allem durch die Ummagnetisierungsverluste in den magnetisch gelagerten Rotoren bestimmt, welche sich in einem feststehenden Magnetfeld bewegen. Im Wesentlichen bestehen zwei Möglichkeiten die Ummagnetisierungsverluste zu reduzieren: die Verringerung der für die Magnetlagerung notwendigen Flussdichte durch verbesserte Regelungsverfahren oder die Verwendung neuer weichmagnetischer Werkstoffe wie Pulververbundwerkstoffe (kurz SMC für Soft Magnetic Composite). Letztere zeichnen sich durch eine geringere elektrische Leitfähigkeit aus, die jedoch durch eine erheblich verringerte mechanische Zugfestigkeit erkauft werden muss. Ziel des Vorhabens war es folglich, neue Erkenntnisse sowohl hinsichtlich der Berechnung als auch der Minimierung der Rotorverluste in aktiven Magnetlagern zu gewinnen und experimentell zu bestätigen. Im Vordergrund stand dabei die Entwicklung einer neuen Lagertopologie, die auch in Hochgeschwindigkeitsanwendungen den Einsatz von Pulververbundwerkstoffen erlaubt. Auf Basis einer 3D-FEM-Analyse wurde zu Beginn des Projektes ein analytisches Berechnungsmodell für Rotorverluste in homopolaren Magnetlagern erstellt, da aus der Literatur bisher nur Messdaten und Berechnungsverfahren für heteropolare Lager bekannt waren. Bei Verwendung von Pulververbundwerkstoffen lässt sich mit dem Modell eine Reduzierung der Rotorverluste um bis zu 74% vorhersagen, insbesondere bei hohen Flussdichten in Kern und Luftspalt. Zur experimentellen Überprüfung des Modells wurde eine neuartige dreipolige Magnetlagerstruktur konzipiert, dessen aktiver Rotorkern ohne Bohrungen auskommt und durch die Minimierung des Rotoraußenradius eine deutliche Reduzierung der mechanischen Belastungen ermöglicht. Auf diese Weise ist es gelungen, Pulververbundwerkstoffe - mit normalerweise kritischen Zugfestigkeiten unter 100MPa – sowohl im Stator als auch im Rotor bei Drehzahlen von bis zu 30 000 min⁻¹ einzusetzen. Für die neue Lagerstruktur wurden passende Regelungsstrategien entworfen und experimentell verifiziert. Neben einer klassischen linearen Kraftregelung wurde auch eine nichtlineare Regelung entwickelt, die einen Betrieb ohne Vormagnetisierung der Lager erlaubt. Bei den abschließenden Auslaufversuchen mit der neuen Lagertopologie konnte gegenüber dem geblechten Referenzlager keine Verlustreduzierung nachgewiesen werden. Die somit großen Unterschiede zu den theoretischen Ergebnissen lassen sich insbesondere durch die unterschiedlichen Blechsorten und die auf Grund der neuen Lagertopologie abweichende Geometrie erklären. Seit dem Aufbau des Versuchsstands mit dem inzwischen nicht mehr erhältlichen Somaloy® 500 LB1 als Kernmaterial im Rotor, haben sich die Festigkeit und die magnetischen Materialeigenschaften von Pulververbundwerkstoffen signifikant verbessert. Die Projizierung der experimentellen Ergebnisse auf im Jahr 2017 verfügbare, verlustoptimierte industrielle SMC-Sorten verspricht eine Reduzierung der Ummagnetisierungsverluste von mindestens 23 – 44 %. Im Vergleich der beiden Regelungsstrategien wurde deutlich, dass die Eliminierung der magnetischen Vorspannung durch Anwendung einer exakten Ein-/Ausgangslinearisierung die Steuerströme um durchschnittlich 23% senken konnte. Somit war eine

weitere Reduzierung der Ummagnetisierungsverluste um 10% und der Kupferverluste um 41% erreichbar. Teilweise waren sogar bessere Ergebnisse hinsichtlich Regelungsgüte und Stabilitätsreserve erzielbar, was sich insbesondere durch eine geringere Anfälligkeit für Unwuchten bei hohen Drehzahlen zeigte.

Die Verwendung von Pulververbundwerkstoffen in der neuen dreipoligen Lagerstruktur erlaubt unter Ausnutzung der möglichen dreidimensionalen Flussführung kompaktere Geometrien. Die verminderte elektrische Leitfähigkeit von SMC gegenüber Elektroblechen ermöglicht eine effektive Reduzierung der Rotorverluste. Es wurde somit eine interessante Alternative zu häufig verwendeten permanentmagnetisch vorgespannten Homopolarlagern vorgestellt, die insbesondere im Bereich der Vakuumtechnik vorteilhaft ist.