

Bild 1

Prinzip-Aufbau des
Magnetkreises

Gekoppeltes elektromagnetisch-thermisches Modell eines Energiewandlers

Beschrieben wird eine Finite-Elemente-Simulation, mit der es möglich ist, die thermisch relevanten Auslegungsgrößen (magnetische Induktion und Stromdichte) eines elektromagnetischen Aktors, die für die Energiewandlung maßgebend sind, zu analysieren und zu bestimmen.

Im vorliegenden Beispiel eines mit niedriger Frequenz oszillierenden elektromagnetischen Aktors sind es vor allem die Kupferverluste in den Wicklungen, die sein thermisches Verhalten bestimmen (die Eisenverluste werden vernachlässigt). Damit gewinnt man Grundlagenkenntnisse für die Designoptimierung und die Bestimmung der brauchbaren magnetischen Flussdichte im Eisen, also dem aus den Magnetisierungskennlinien resultierenden Verhältnis zwi-

schen magnetischer Induktion und dem Magnetisierungsstrom bzw. der maximal zulässigen Amplituden der Stromdichte (Kupferverluste) in den Windungen.

Einführung

Ein elektromagnetischer Energiewandler bewirkt eine Umwandlung von elektrischer bzw. magnetischer Energie in mechanische Kräfte. Das Ziel ist ein optimales De-

sign und Konstruktion von elektromagnetischen Aktoren, Maschinen und Antriebsgeräten, (d.h. eine Optimierung von Geometrie, Wirkungsgrad, Materialaufwand, Entwicklung bzw. Einhaltung von Richtlinien für die Ansteuerung). Dabei sind folgende Punkte zu beachten:

– Die Erregungspulen und andere Komponenten sollten auf dem technischen Level betrieben werden, der für die jeweilige Isolationsklasse zugelassen ist.

– Zu geringe Ausnutzung – das bedeutet in unserem Fall eine zu geringe Stromdichte – hat eine Überdimensionierung des Energiewandlers zu Folge, also eine zu große Trägheit und meistens auch schlechte Dynamik. Die Folge können sein: mechanische Beschädigung, thermische Verformung oder generell eine Einschränkung der Lebensdauer.

Für ein optimales Design von Geräten, die in nicht stationären Be-

Autor und Kontakt

Magnus Olsson, Ph.D.
COMSOL AB
Stockholm/Schweden
(mit freundlicher
Unterstützung der
Robert Bosch GmbH)

Kontakt

FEMLAB GmbH
Berliner Strasse 4
37073 Göttingen
Tel.: 05 51/9 97 21-0
E-Mail: info@femlab.de
www.femlab.com

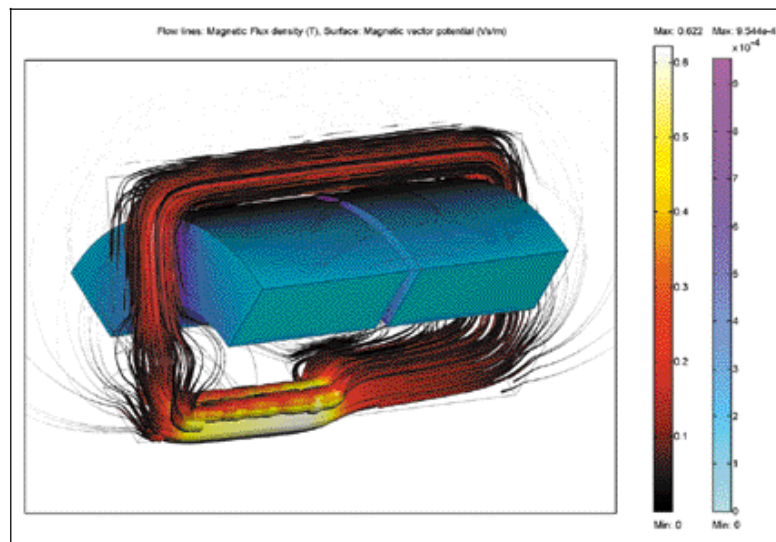


Bild 2

Darstellung des magnetischen Vektorpotentials \vec{A} und der magnetischen Kraftflussdichte \vec{B} im einem Viertel des Magnetkreises

triebszuständen arbeiten, ergibt sich die Notwendigkeit der gekoppelten thermisch-magnetischen Betrachtung. In diesem Fall lässt sich der thermische Zustand nicht aus Nenngrößen bestimmen. Die für die Auslegung relevanten Größen sollten aus einer transienten Systemsimulation ermittelt werden.

Berechnungsbeispiel – Energiewandler, Aufbau

Bild 1 stellt einen vereinfachten Schnitt durch ein Viertel des Magnetkreises eines elektromagnetisch erregten Linearaktors dar. Der Stator besteht aus zwei konzentrisch angeordneten Spulen und ebenso konzentrisch ausgeführten ferromagnetischen (laminierten-Wirbelströme im Magnetkreis wird nicht berücksichtigt) Elementen des Stators und Ankers.

Der gesamte magnetische Kreis des Stators ist axialsymmetrisch und besteht aus vier Elementen. Der Strom I beider Spulen (eingespeist aus einer Stromquelle) ist gleich und fließt in tangentialer Richtung.

Das nicht lineare Materialverhalten wird in Form einer hysteresefreien Magnetisierungskennlinie des Magnetbleches berücksichtigt.

Bei den gegebenen Voraussetzungen ist der magnetische Fluss nur vom Strom I der Spulen und der Auslenkung des Ankers gegenüber dem Stator abhängig.

Die Versorgung der Statorspulen soll vereinfacht aus einer Stromquelle mit einem bekannten vorgegebenen Strom erfolgen. Die Stromquelle kann gegebenenfalls abhängig von der Position des Ankers gegenüber dem Stator angesteuert werden. Die Stromversorgung für den oszillatorischen Betrieb kann lageabhängig – d.h. abhängig von der Auslenkung des Ankers gegenüber dem Stator – erfolgen.

Der Anker ist gegenüber dem Ständer und Gehäuse mittels einem (hier nicht angezeigten) Federsystem befestigt, und über eine Axialführung gelagert. Die Linear-Nutz-

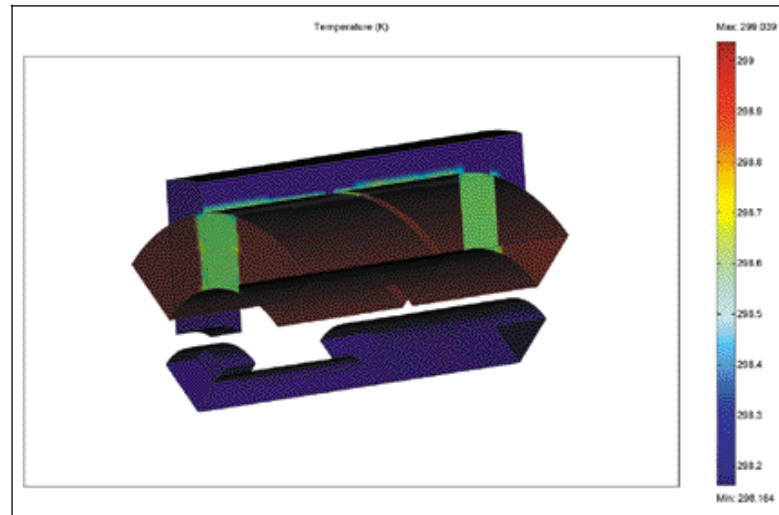


Bild 3
Verteilung des Temperaturfeldes im Bereich der Spulen und des Stator-Rotor-Systems. Im Bereich des Kontaktes zwischen der Isolierschicht und des Stators findet ein konvektiver Wärmeaustausch statt. Der Wärmetransport durch Strahlung wurde hier nicht berücksichtigt

kraft lenkt den Anker axial aus, um die Nutzarbeit auszuführen.

Lösung der magnetischen Gleichungen

Wie bereits erwähnt, ist die Stromdichte J_e der Erregerspulen ausschließlich eine tangentielle Komponente. Mit den anfangs gestellten Voraussetzungen bezüglich des Magnetkreises reduziert sich die Aufgabenstellung zu einem magnetostatischen Problem. Die partielle Differentialgleichung für die magnetische Kraftflussdichte \vec{B} wurde über das Vektorpotential \vec{A} definiert. Die zu lösende Gleichung lautet dann

$$\left(\nabla^2 - \mu^{-2} \epsilon \right) \cdot \vec{A} + \nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{J}_e \quad (1)$$

Siehe dazu auch Bild 2.

Kopplung mit einem thermischen Modell

Die durch elektromagnetische Wechselfelder bzw. durch mechanische Bewegungen induzierten Wirbelströme sind eine Quelle für thermische Effekte, da beim Stromfluß durch widerstandsbehaftetes Material Joule'sche Wärme erzeugt wird. Die Spulen sind gegenüber dem Stator mit einer Isolationsschicht versehen.

Bei Vernachlässigung der Eisenverluste wird angenommen, dass die Wärmequelle allein aus den Verlusten in den Kupferwindungen der

Spule entsteht. Die elementaren Verluste in der Volumeneinheit der Wicklung lassen sich als Joule'sche Wärme durch die Formel

$$\delta P = J^2 \cdot \rho \quad (2)$$

abschätzen. Dabei bezeichnet J die Stromdichte und ρ den spezifischen Widerstand des Kupfers.

Die zu lösende Gleichung (3) ist die Wärmeleitungsgleichung

$$-\nabla \cdot (k \nabla T) = Q + h_{\text{trans}} (T_{\text{ext}} - T) \quad (3)$$

Dabei bezeichnet k die thermische Leitfähigkeit des Kupfers, Q ist die Bezeichnung für den thermischen Quellterm und h_{trans} für den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten zwischen der aktuellen Temperatur T und der externen Temperatur T_{ext} . Als Quellterm wurde $Q = \delta P$ gesetzt, so dass über diesen Ausdruck das elektromagnetische Feld mit dem Wärmefeld gekoppelt wird. Die Randbedingungen wurden so gewählt, dass an einigen Oberflächen zwischen den Spulen und dem Anker ein konvektiver Wärmetransport angenommen wird.

Das Ergebnis zeigt, dass in stationärer Näherung die Temperaturerhöhung im Bereich der Spulen ca. 1°C beträgt. Eine genauere Analyse dieses Modells ermöglicht unter anderen Auswahl und Design der Isolationsschicht zwischen dem Stator und Spule (Bild 3).

Vollständige Kopplung: Ausblick

Im weiteren Verlauf dieser Untersuchung ist geplant, eine vollständige Kopplung zwischen den Gleichungen für das Magnetfeld, das Wärmefeld und der durch das magnetische Feld bewirkten mechanischen Kraft F_{em} durchzuführen. Dabei soll ein Modell erzeugt werden, mit dessen Hilfe die günstigsten Verhältnisse zwischen der Kraft und dem Wärmeverlust, also der Ausdruck $F_{\text{em}} / \delta P_{\text{Cu}}$ bestimmt werden und die quasistationären Näherung auf die volle dynamische Formulierung zu erweitern. Die Energieumwandlung soll also letzten Endes am vollständigen dynamischen Modell beschrieben werden.

Prinzipiell ist es möglich, die Funktion des Aktors im durch numerische Simulationen im quasistationären Zustand darzustellen. Die charakteristischen Größen dieser Beschreibung wie elektromagnetische Kräfte als Funktion der Ankerauslenkung und des Spulenstromes lassen sich als Basis für die Erstellung der Dimensionierungskenngrößen beschreiben. Damit kann eine Grundlage für verschiedene Vergleiche und eine Basis für seine Dimensionierung geschaffen werden.

Die numerischen Simulationen wurden mit der neuesten Version 3 der Finite-Elemente-Software FEM-LAB durchgeführt.