

Finite-Elemente-Programm vereinfacht Entwicklung elektrischer Maschinen

Die Möglichkeit, elektrische Maschinen schon vor der eigentlichen Fertigung detailliert untersuchen zu können, spart in der Regel viel Zeit und Geld. Die dafür zur Verfügung stehenden FEM-Programme allerdings erfordern zumeist ein hohes Maß an Spezialwissen und eine langwierige Einarbeitung. Wer dies nicht parat hat oder den Aufwand scheut, kann mit einem nunmehr entwickelten Berechnungstool dennoch sein Ziel erreichen.

Elektrische Maschinen sind, um Gewicht, Material und Fertigungskosten zu optimieren, während der Entwicklung sehr häufig zu überarbeiten. Gewicht lässt sich insbesondere bei Verringerung der Stärke des Statorjochs und der Zähne reduzieren. Dies jedoch kann Schwingungen und damit Geräusche hervorrufen. Viel wichtiger aber sind die Gefahren der Sättigung, die zu Unsymmetrien und Oberwellen führen können, oder die Reduktion der Luftspaltinduktion infolge größer werdender Eisenamperewindungen. Gewicht lässt sich auch verringern, wenn man Leitermaterial einspart, indem man es stärker auslastet. Weniger Gewicht bedeutet weniger Materialkosten. Verbunden damit sind allerdings höhere Eisen- und Stromwärmeverluste.

Um die Fertigungskosten zu minimieren, sind die Verfahren zum Einbringen der Wicklung in die Nuten zu ändern. Enge Nutenschlitze erzwingen das aufwendige Einlöten von Leitern, weite Nutenschlitze (offene Nuten) ermöglichen das Einbringen von vorgefertigten

ganzen Formspulen in die Nuten. Enge Nutenschlitze haben kleine Nutungsüberwellen und bewirken damit fast immer kleine Stator- und Rotoroberströme. Demgegenüber erzeugen offene Nuten große Nutungsüberwellen und regen damit große Stator- und Rotoroberströme an. Die Oberströme ziehen zusätzliche Verlustleistungen nach sich, mit denen auch große Drehmomentsättel und synchrone Momente verbunden sind. Letztendlich erzeugen Stator- und Rotoroberwellen Geräusche. Intensiviert werden die Reaktionen der elektrischen Maschine hinsichtlich Materialreduktion und Öffnung der Nuten noch von Umrichtern, die weitere Oberwellen erzeugen können.

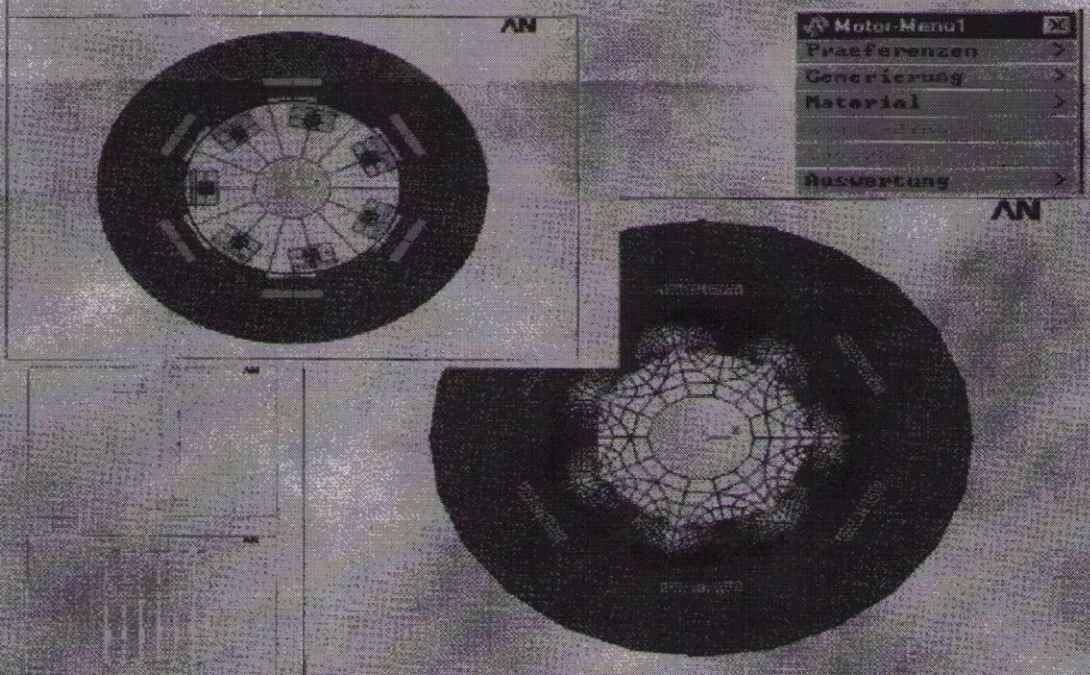
Faustformeln berücksichtigen nicht alle Parameter

Um die Nachteile aufgrund der Kostenersparnis zu vermeiden, sind umfangreiche Simulationen nötig, um die Optimierungsschritte rechtzeitig vor Produktionsbeginn zu analysieren. Viele Unternehmen greifen hierzu nach wie vor zu Faustformeln. Diese sind jedoch selten in der Lage, Stator- und Rotoroberströme sowie Einflüsse der Eisensätti-

BERND HEINRICH ASCHENDORF

Die Vorgehensweise bei der Entwicklung und Analyse dieser Asynchronmaschine mit Käfigrotor ist klar vorgegeben.

Prof. Dr. Bernd Heinrich Aschendorf lehrt an der Hochschule Dortmund, Fachbereich Elektrische Energietechnik, in 44047 Dortmund, Tel. (02 31) 4 94 88-68, Fax (02 31) 4 94 88-73, www.hochschule-dortmund.de/~elektro/tae



gung, insbesondere jedoch Schwingungserscheinungen zu ermitteln. Analytische Berechnungsverfahren führen vielfach nur Institute und Hochschulen durch, weil die Anwendung der Programme kompliziert und die Erstellung von Eingabedaten schwierig ist. Finite-Elemente-Programme sind zum einen teuer und sehr aufwendig zu bedienen, insbesondere wenn sie nur selten zur Optimierung und Entwicklung elektrischer Maschinen herangezogen werden. Viele Entwicklungs- und Optimierungsaufgaben werden deshalb fremd vergeben. Weil dies jedoch ebenfalls sehr teuer ist, lässt man vom jeweiligen Dienstleister nur selten alles optimieren.

Berechnungserfordernisse für Asynchronmaschinen

Den Entwickler von Asynchronmaschinen interessieren unterschiedlichste Berechnungen. Da ist zum einen der Leerlaufstrom, der bei stark genutzten Maschinen oder bei Maschinen mit im Dreieck oder parallel geschalteten Spulengruppen Oberströme aufweist oder dessen Grundstrom von Oberströmen verändert wird. Zum anderen ist es der Stillstand im Zusammenhang mit Kurzschlussstrom und Anlaufmoment. Der Kurzschlussstrom von Statorspulen und Rotorstäben und das Anlaufmoment sind größenmäßig von der Stator-/Rotorstellung abhängig, was auf Oberwellen und Sättigung zurückzuführen ist. Demzufolge kann man mit einer stellungsabhängigen Stillstandsrechnung Oberwellen abschätzen. Daneben sind der Nennbetrieb, die Abhängigkeit des Ständerspulen- und Rotorstroms und des Drehmoments von der Drehzahl sowie die Verlustrechnung von Interesse. Des Weiteren benötigt der Entwickler für seine Berechnungen Angaben über Auslastung des Leitermaterials und Erwärmung der Maschine sowie viele weitere Parameter. Finite-Elemente-Systeme für das Spezialgebiet Elektromagnetismus gibt es als Multipurpose-Programme und als eigenständige Programme ausschließlich für elektromagnetische Zusammenhänge. Mit einfachen Finite-Elemente-Systemen lassen sich nur statische Berechnungen mit Stromdichtevorgabe oder Permanentmagneten vornehmen. Bessere Programme liefern aufgrund von Kopplungsbedingungen die direkte Stromvorgabe und die jeweiligen Spannungsgleichungen. Äußerst selten sind die automatische Verschaltung der Spulen und eine direkte maschinenspezifische Analyse möglich. Andere Programme haben Schwierigkeiten bei induzierter Spannung und der Spannungs- und Stromvorgabe mit Phasenverschiebung.

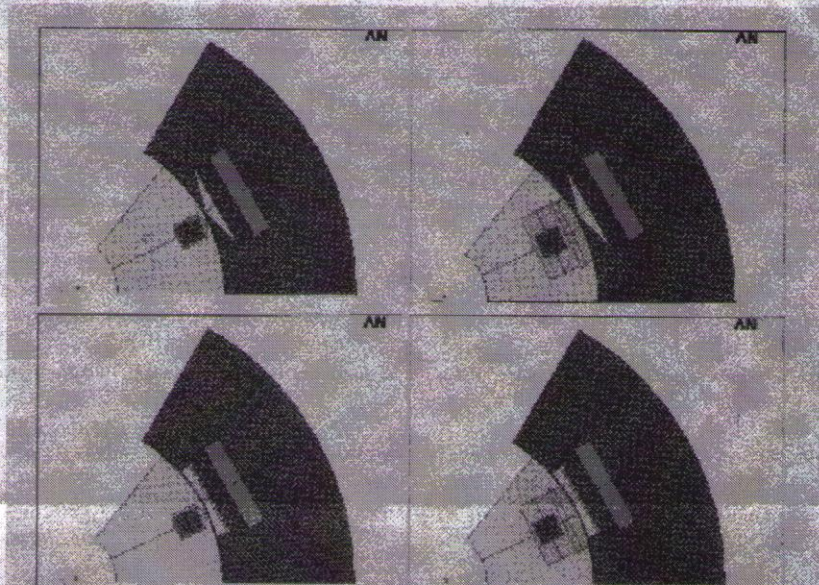


Bild 1: Analyse des Betriebsverhaltens einer Asynchronmaschine anhand von vier Nutvariationen bei Stator und Rotor.

gen. Eine transiente Berechnung für Hochlauf oder Drehzahlvorgabe erlauben nur wenige Programme. Ein Programm, das alle Features beinhaltet, eine deutschsprachige und zudem einfache Benutzerführung bietet sowie kein Spezialwissen bei der Anwendung von Finite-Elemente-Systemen voraussetzt, gab es bislang nicht.

Daher wurde auf der Basis von Ansys und einer früheren Version von EM-Design jetzt ein völlig neues Berechnungstool für elektrische Maschinen entwickelt. Vor der Erstellung der EM-Design V2.0 wurden eine Reihe Entwicklungsziele definiert:

- Dank einfacher Menüs und Benutzerführung sollte nur ein geringes FEM-Wissen erforderlich sein.
- Maschinen sind aufgrund vorgegebener Nut-, Zahn- und Polformen automatisch zu generieren.
- Nicht abgedeckte Nutformen können kurzfristig erstellt oder über userdefinierbare Makros eingebunden werden.
- Die Verschaltung der Spulen muss automatisch erfolgen.
- Verfügbar sein sollten verschiedene maschinenorientierte Berechnungsmöglichkeiten und Analysemöglichkeiten.
- Berechenbar sollten sein lineare und nicht lineare Materialeigenschaften.
- Die Lösung muss auf unterschiedlichste Maschinentypen übertragbar sein.
- Realisierbar sein sollten statische, harmonische und transiente Berechnungen sowie eine klarer Releaseplan.

Trotz der benutzerfreundlichen Bedienung ersetzt das neue Berechnungstool

nicht den Experten, der elektrische Maschinen entwickelt, da nach wie vor die Ergebnisse verifiziert, validiert und auf Plausibilität untersucht werden müssen.

Benutzergeführte Menüs erleichtern Vorgehensweise

Die Anwendung des Berechnungstools ist einfach und vollständig benutzergeführt. Prozessschritte zur Analyse einer elektrischen Maschine sind der Reihe nach abzuarbeiten. Nach Aufruf von Ansys mit dem integrierten Berechnungstool kann der Entwickler neben den bekannten Menüpunkten das Motor-Menü wählen, das entweder CAD-konstruktions- oder maschinenexpertenorientiert arbeitet. Im Folgenden wird anhand dieses Menüs die Vorgehensweise zur Generierung einer elektrischen Maschine beschrieben. Nach Aufruf des Motor-Menüs erscheint das Maschinen-generierungs- und -berechnungsmenü mit den Dateien Präferenzen, Generierung, Material, Randbedingungen, Lösung und Auswertung. Die Menüpunkte sind von oben nach unten der Reihe nach abzuarbeiten. Unter Präferenzen werden zunächst einige allgemeine Daten zur Netzgenerierung und zu den beweglichen Systemen der Maschine definiert. Anschließend werden die geometrischen und elektrischen Eigenschaften des äußeren und inneren Systems festgelegt. Zu den geometrischen Größen des äußeren Systems zählen Außen-, Innenradius und Eisenlänge des äußeren Blechpakets, zu den elektrischen Größen Strang-, Polpaar- und Nutenzahl und die

Grundfrequenz (soweit ein Wechselstromsystem zugrunde gelegt wird). Ähnlich vollzieht sich die Eingabe der Daten für das innere System, erweitert um die für den Luftspalt (Bilder 1 und 2). Im nächsten Schritt erfolgt die automatische Generierung der elektrischen Maschine durch Auswahl der Nut-, Zahn- oder Polform aus einer großen Anzahl vordefinierter, parametrisierter Modelle unter Angabe der Spulenform (Einzelleiter oder Stab). Passend zur ausgewählten Nut-, Zahn- oder Polform sind die Geometrieparameter einzugeben, eventuell auch die Einsicht- oder Zweischichtwicklung. Anschließend wird zunächst das äußere System und danach das innere System erstellt. Die Verschaltung der Spulen und Stäbe erfolgt direkt im Anschluss an die Generierung.

Elektrische Maschine wird in fünf Minuten modelliert

Zur automatischen Verschaltung stehen für die Asynchronmaschine die Drehstromschaltung für gewöhnliche Drehstrommaschinen als Serien-/Parallel-, Stern- oder Dreieckschaltung unter Berücksichtigung der Schrittverkürzung sowie Käfig- oder Schleifringsschaltung zur Verfügung. Ein- oder Zweiphasenschaltungen lassen sich kurzfristig erzeugen. Nun ist die geometrische Generierung anhand von Flächen, aber gleichzeitig auch finiten Elementen abgeschlossen. Dies dauert auf einem Standard-PC für eine Maschine mit 48 Statornuten bei vorhandenen Eingabedaten höchstens drei Minuten. Im Anschluss an die geometrische Generierung sind die

linearen oder nicht linearen Eigenschaften des Eisens, des Leitermaterials und gegebenenfalls der Permanentmagneten einzugeben. Lineare Materialeigenschaften werden mit den Parametern relative Permeabilität und spezifische Leitfähigkeit, nicht lineare anhand von Magnetisierungskennlinien durch Wertepaare definiert. Die Magnetisierungskennlinien sind auch aus Dateien einzulesen. Es folgt die Definition der Randbedingungen wie die Berücksichtigung von Streuung unter Beachtung des Außenraums, der Welle oder des Nichtaustretens des magnetischen Flusses aus dem Blechpaket. Nach einer weiteren Minute sind auch diese beiden Menüs abgearbeitet, so dass eine elektrische Maschine in etwa fünf Minuten vollständig modelliert zur Berechnung und Analyse bereitsteht.

Speziell für die Berechnung von Asynchronmaschinen gibt es statische (quasistationäre), harmonische und transiente Berechnungsmöglichkeiten. Im Rahmen der statischen Berechnung lassen sich Ströme direkt vorgeben. Die Ströme können analog der Stator-/Rotorstellung veränderlich sein. Im Rahmen der harmonischen Berechnung sind der Stillstand der Maschine, auch stellungsabhängig, und der angenäherte Leerlauf der Maschine ohne Rückwirkung der Rotoroberströme (da Rotorstromlos gerechnet) zu analysieren. Transiente Berechnungen ermöglichen die Ermittlung des quasistationären Hochlaufs einer Asynchronmaschine oder den Hochlauf bei Drehzahlvorgabe. Transiente Analysen benötigen im Allgemeinen lange Re-

chenzeiten. Das Berechnungstool beinhaltet jedoch eine Technologie, mit der der erforderliche Einschwingvorgang für das elektromagnetische System wesentlich verkürzt werden kann. Vor einer Berechnung sind zunächst die automatisch zur Verfügung gestellten Auswertungen per Mausklick auszuwählen. Dies sind die Feldlinienbilder zur allgemeinen Kontrolle des magnetischen Flusses, die farbige Isobarendarstellung des Vektorpotentials, Betrag und Vektor der magnetischen Flussdichte und Feldstärke, die Stromdichte und Stromverteilung und die am drehenden System angreifenden Kraftvektoren. Darüber hinaus kann man Tabellen erzeugen, in denen Spannungen, Ströme, Drehmoment, aufgenommene Leistung und abgegebene Leistung in Abhängigkeit von Zeit, Winkel und Drehzahl abzulesen sind. Aus aufeinander folgenden Plottedarstellungen in Abhängigkeit des Winkels lassen sich Animationen bilden, die die Funktionalität einer elektrischen Maschine wiedergeben. Darüber hinaus gibt es weitere Auswertemöglichkeiten des Luftspaltfelds und der Fourierkoeffizientenberechnung der radialen und tangentialen Komponente des Luftspaltfelds und des Drehmoments.

Unter www.aschendorf consulting.de sind zwölf Beispielanordnungen elektrischer Maschinen zu finden, darunter Asynchron-, Synchron-, Reluktanz-, Gleichstrom- und bürstenlose Gleichstrommaschinen. Darüber hinaus stehen unter www.fh3.fh-dortmund.de/personen/aschendorf/finite.htm weitere Prototypen generierter und berechneter elektrischer Maschinen.

Berechnungen am Beispiel einer Asynchronmaschine

Im Folgenden soll eine Asynchronmaschine mit Käfigläufer und verschiedenen Nutungsvarianten (Experimentalmotor) einmal näher betrachtet werden. Die Berechnung der Asynchronmaschine mit Käfigläufer ermöglicht statische, harmonische und transiente Rechengänge. Im vorliegenden Beispiel wurden für die beiden Betriebspunkte Leerlauf und Stillstand das Feldbild und der Verlauf des Luftspaltfelds für Leerlauf und Stillstand mit harmonischer Berechnung und die transiente stellungsabhängige Berechnung der Änderung des Effektivwerts der Ständerströme und des Drehmoments zur Abschätzung des Einflusses der Oberwellen ermittelt.

Bei der transienten Berechnung ist ein Einschwingvorgang notwendig, bis ein konvergierter Betriebspunkt in Abhängigkeit von der Zeit weitergehend analysiert werden kann. Das Programmpaket



Bild 2: Für eine möglichst exakte Berechnung muss das Finite-Elemente-Netz im Luftspaltbereich sehr fein und im Eisen gröber sein.

EM-Design/Ansys wurde für einen Vergleich von Messung und Rechnung für eine Asynchronmaschine mit Käfigläufer mit je zwei Stator- und Rotorformen (jeweils halb-geschlossene und offene Nut), also vier verschiedenen Varianten verwendet. Neben dem Einfluss der Nutung auf das Betriebsverhalten wurde das Maschinenverhalten bei Serien- und Parallelschaltung untersucht.

Für die Beurteilung des Betriebsverhaltens der Asynchronmaschine stehen Feldbilder, weitere Plottedarstellungen und Stromverläufe von Stator und Rotor in Abhängigkeit der Zeit (im Lauf) und von der Rotorstellung (im Stillstand) zur Verfügung. Anhand der Feldbilder der vier Varianten im Leerlauf zeigt sich, dass weit geöffnete Nuten den magnetischen Fluss in den Zähnen von Stator und Rotor zusammendrängen und damit höhere Flussdichten erzeugen. Somit ist bei weit geöffneten und zu erwartenden höheren Strömen Sättigung und damit ein anderes Betriebsverhalten als bei halbgeschlossenen Nuten zu rechnen. Verständlicherweise ändert sich auch das Feldbild der vier Varianten im Stillstand: Insbesondere bei der Variante mit beidseitig weit geöffneten Nuten wird ein Großteil des magnetischen Flusses nicht mehr in den Bereich des Luftspalts abgedrängt, sondern verbleibt im Rotorblech. Damit ändert die Nutung auch das Betriebsverhalten im Stillstand.

Die Entstehung des Drehfelds ist am besten zu analysieren, indem im Betriebszustand Leerlauf Plots von Feldlinien oder der magnetischen Flussdichte für aufeinander folgende Zeitpunkte dargestellt werden und wie in einem Comic zu einem Film (AVI-File) zusammengefasst werden. Beim Abspielen des Films ist das korrekte Entstehen von Drehfeldern überprüfbar. Im Stillstand sind über derartige Filme Abhängigkeiten der Stromdichte von der Rotorstellung darstellbar, um die Überlastung von Stabmaterial zu analysieren. Darüber hinaus ist die Entstehung des Drehmoments durch tangentielle Kräfte und von Schwingungen durch radiale Kräfte zu überprüfen. Den Konstrukteur interessieren bei einer gut konstruierten Maschine jedoch elektrische Größen, wie Ströme und Leistungen. Das Berechnungstool stellt die Abhängigkeit der Ströme in Abhängigkeit von der Zeit (Augenblickswerte im Lauf) zur Beurteilung des Oberwellengehalts und in Abhängigkeit von der Rotorstellung (Beträge im Stillstand) in Tabellen zur Verfügung.

Bemerkenswert ist, dass der Motor stark auf die Verschaltung des Stators anspricht, weil die Stator- und Rotorströme andere Oberwellen aufweisen. Noch

deutlicher wird die Änderung des Betriebsverhaltens im Vergleich der verschiedenen Nutvarianten. Die Verläufe von Stator- und Rotorströmen zeigen stark unterschiedliche Verläufe. Das Berechnungstool stellt sich als geeignetes Mittel heraus, um sowohl die Einflüsse von Statorverschaltung und unterschiedlicher Nutung weitgehend exakt wiederzugeben. Die vorhandenen Unterschiede sind auf Unsymmetrien im Käfig zurückzuführen, die mit dem Berechnungstool (bei vorhandenen Daten und mit erheblichem Aufwand) ebenso berechnet werden könnten.

Es bleibt festzustellen, dass die Statorverschaltung und die Nutung wesentlichen Einfluss auf die Oberströme ausüben. Weil eine Änderung des Oberwellengehalts von Stator- und Rotorstrom das Drehmoment aufgrund der mit den Strömen einhergehenden Drehmomentsätteln stark modifiziert, kann sich der Konstrukteur nicht mehr auf die Ergebnisse von Faustformelverfahren verlassen. Das Berechnungstool ist in der Lage, den Konstrukteur bei der Auslegung einer elektrischen Maschine sowohl bei linearen als auch nicht linearen Materialien wirksam zu unterstützen.

Auch Gleichstrommaschinen lassen sich berechnen

Mit der beschriebenen Version von EM-Design 2.0 auf der Basis von Ansys lassen sich viele Typen elektrischer Maschinen berechnen. Der Konstrukteur merkt vom Finite-Elemente-System nur wenig und kann sich voll auf die Analyse der elektrischen Maschine konzentrieren. Die Berechnungs- und Analysemöglichkeiten sind vielfältig.

Neben der Berechnung von Asynchronmaschinen kann die momentan hochaktuelle Entwicklung bürstenloser Gleichstrommaschinen hilfreich unterstützt werden. Auch hierzu sind Berechnungsverfahren vorbereitet. Geplant sind für weitere Versionen unter anderem eine Schwingungsberechnung des Blechpakets von Ständer und Läufer, eine Akustikberechnung sowie die Temperaturverteilung und Wärmeabstrahlung, die aufgrund des Multipurpose-Ansatzes von Ansys problemlos möglich sind. Obwohl das Berechnungstool in der aktuellen Version keine 3D-Modelle bietet, sind dennoch viele Maschinen berechenbar. Derzeit wird im Rahmen von Forschungsarbeiten die dreidimensionale Berechnung untersucht. Zudem wird EM-Design in den Folgeversionen um parallele analytische Berechnungsmethoden und die Ankopplung von Simulationswerkzeugen, wie zum Beispiel Matlab, ergänzt. **MM**



**Ihr bester
Vertriebsprofi
ist in
mehr als 30
europäischen
Ländern
erfolgreich.**

europages.de

**Das europäische
B-to-B-Verzeichnis**

Mehr Infos unter:
Tel: 08033 / 309220
E-mail: kontakt@europages.com

**EURO
PAGES**