

Funktionsprinzip und Entwurf geschalteter Reluktanzmotoren

Jürgen Wolff

Für viele Anwendungsgebiete drehzahlvariabler Antriebe gilt der geschaltete Reluktanzmotor als kostengünstige und leistungsstarke Alternative. Mit moderner Computertechnik läßt sich der vielsprechende Motor, der im wesentlichen aus Reluktanzmaschine und Umrichterstrom besteht, schnell entwerfen und entsprechend optimieren.

MM Das Prinzip des geschalteten Reluktanzmotors, der in vielen Veröffentlichungen der englischsprachigen Literatur unter dem Namen „Switched-Reluctance-Motor“ propagiert wird, ist denkbar einfach: Ein drehbar gelagerter Eisenstab oder auch die Eisenzähne eines Maschinenlängers richten sich in einem Magnetfeld aus, das elektrischer Strom in einem Ständerpol erzeugt. Schaltet man das Magnetfeld gezielt weiter, so beginnen sich Eisenstab oder Motorläufer zu drehen. Hat der Läufer (Rotor) mehrere Zähne, so ist seine Form mit der eines langgestreckten Zahnrads vergleichbar. „Reluktanz“ steht für den magnetischen Widerstand, den ein solcher Rotor dem elektromagnetischen Feld entgegensetzt. Erzeugt und weitergeschaltet wird das Magnetfeld von den Polwicklungen im feststehenden Teil der Maschine und einer dem Motor vorgeschalteten Leistungselektronik, mit Strom- oder Frequenzumrichter also. Damit lassen sich Drehzahl und Drehmoment des Switched-Reluctance-Motors gezielt beeinflussen. Geschaltete Reluktanzmotoren sind von Kleinstmotoren bis hin zu Großantrieben realisierbar.

Dipl.-Ing. Jürgen Wolff ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Elektrotechnischen Institut der Universität Karlsruhe. Das Projekt „Switched-Reluctance-Drive“ wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert und von Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Spöth betreut.



Der Läufer eines geschalteten Reluktanzmotors, der für viele Antriebslösungen künftig eine echte Alternative sein kann, hat weder Kupferwicklungen noch Permanentmagnete.

Der Switched-Reluctance-Motor nach Bild 1 und die entsprechende Leistungselektronik hierfür wurden am Elektrotechnischen Institut der Universität Karlsruhe entwickelt und erprobt. Die Fertigung des Motors übernahm das Elbitzwerk, Heidenau. Im Bild angeordnet sind die magnetischen Feldlinien. Die Wicklungen der aktiven Statorpole wurden rot dargestellt. Jeweils vier mit einem Winkel von 90° zueinander versetzten Statorwicklungen sind elektrisch miteinander verbunden und bilden einen Maschinenstrang. Somit hat diese Maschine vier Stränge oder Phasen.

Für viele Anwendungen immer der richtige Motor

Im Motorbetrieb dreht der Maschinenläufer im Uhrzeigersinn in das Magnetfeld hinein; im Generatorbetrieb muß der Rotor mit einer Drehung gegen den Uhrzeigersinn aus dem Feld hinausbewegt werden. Die Richtung der Feldlinien und damit

auch die Stromflussrichtung ist für die Funktion des Elektromotors ohne Bedeutung. Der Stromrichter ist deshalb nur für eine Stromrichtung auszulagern. Switched-Reluctance-Motoren lassen sich für unterschiedliche Anwendungen optimieren: Entscheidung muß man sich für eine oder beide Drehrichtungen, für kleine oder sehr hohe Drehzahlen, die

Kühlart, die Schutzart und die Betriebsart. Die Bemessungsdrehzahl des Versuchsmotors wurde auf 1500 min⁻¹ festgelegt. Gehöhlt wird über die Oberflächen mit angebaute Lüfter und Luft. Die Maschine ist für Dauerbetrieb und für beide Drehrichtungen in Schutzart IP 54 ausgeführt. Unterschiedliche Arten drehzahlveränderbarer Elektromotoren, wie beispielsweise Asynchronmotoren und Gleichstrommotoren, sind mit diesen technischen Hauptparametern weit verbreitet. Ein schneller und unkomplizierter Vergleich des geschalteten Reluktanzantriebs mit anderen Antriebsvarianten ist daher möglich. Das für die Antriebsaufgabe geforderte Drehmoment bestimmen die Baugröße und die aktive Eisenlänge des Motors. Der Entwickler kann sich für deren Festlegung an den Abmessungen von Asynchronmaschinen mit Kurzschlußläufer orientieren.

Größere Leistungsausbeute als beim Asynchronmotor

Im Vergleich zum Asynchronmotor ist die Leistungsausbeute des geschalteten Reluktanzmotors in Abhängigkeit von der gewählten Pol-Zahn-Geometrie, dem jeweiligen Elektroblech und der Art der Umrichtererschaltung besser oder vergleichbar. Unter Leistungsausbeute ist die Leistungsausbeute gemeint. Sie ist die in Dauerbetrieb maximal abgegebene mechanische Leistung pro Volumen- oder Gewichtseinheit zu verstehen. Die Achswerte des Versuchsmotors wurde auf 132 mm die Länge des Blechpakets der 235 mm festgelegt. Somit ergibt sich für diese Switched-Reluctance-Maschine eine Bemessungsleistung von rund 20 kW bei 1500 min⁻¹.

Für den weiteren Entwurf des Reluktanzmotors entscheidend ist die Anzahl der Stränge, der Rotorzähne und der Statorpole. Untersucht und gefertigt wurden bereits dreisträngige Motoren mit sechs Statorpolen und vier Rotorzähnen (6/4-Motoren) sowie mit zwölf Statorpolen und acht Läuferzähnen (12/8-Motoren). Die

Entscheidung fiel zugunsten eines neuartigen Switched-Reluctance-Motors mit 16 Statorpolen und zwölf Rotorzähnen aus. Es ist eine viersträngige Maschine. Im Vergleich zum 3-Phasen-Reluktanzmotor kann man bei einer viersträngigen Maschine mit derselben oder auch einer geringeren Anzahl an Leistungshalbleiter-Bauelementen auskommen. Die vier im rechten Winkel versetzten Strangpole teilen die Kräfte gleichmäßiger am Umfang des Motors auf. Das bewirkt eine merkliche Geräuschminderung. Gehören, wie zum Beispiel beim viersträngigen 8/6-Reluktanzmotor, zwei gegenüberliegende Pole zu einem Strang, greifen die gesamten Kräfte nur an zwei Punkten an. Beim viersträngigen 16/12-Reluktanzmotor verteilen sich die Kräfte auf vier Pole. Ihr Betrag ist ungefähr nur halb so groß wie beim 8/6-Motor. Deshalb ist die Geräuscherzeugung des 8/6-Motors größer als die des 16/12-Motors. Bei der Pol- und Zahnzahl von 16/12 wird ein weitgehend gleichförmiges Drehmoment erzielt. Für große Drehmomente ist die Ausnutzung hochpoliger Maschinen besser [1]. Die Gründe liegen unter anderem in der günstigeren Flußverteilung und den schmalen Wickelwells. Erstgenannte bedingt ein höheres Moment, letztgenannte sorgen für einen geringeren thermischen Übergangswiderstand von der Wicklung zum Eisen. Bei einer hohen Pol-Zahn-Anzahl nehmen allerdings die Magnetisierungsfrequenz und damit die Eisenverluste zu. Für sehr große Drehzahlen ab etwa 6000 min⁻¹ wird sich der Entwickler für einen Stator mit wenig

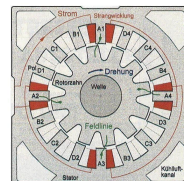


Bild 1: Geschalteter Reluktanzmotor mit 16 Statorpolen und zwölf Rotorzähnen im Querschnitt.

Polen und einen Läufer mit wenig Zähnen entscheiden. Damit werden die durch die wechselnde Magnetisierung entstehenden Eisenverluste gering gehalten.

Besondere Motorstärken sind die hohen Drehzahlen

Ist nur eine Drehrichtung nötig, so genügt eine Reluktanzmaschine mit nur zwei Rotorzähnen und vier Statorpolen. Dieser Motor hat, weil die gegenüberliegenden Pole elektrisch miteinander verbunden sind, nur zwei Stränge. Die Rotorgeometrie ähnelt einem Stab. Mit dieser Motorausführung ergibt sich für die vorgeschaltete Leistungselektronik ein minimaler Aufwand an Halbleiterbauelementen, Meß- und Steuerungstechnik. Die geschaltete Reluktanzmaschine ist besonders für hohe Drehzahlen

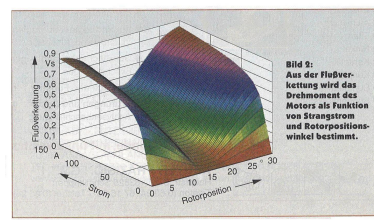


Bild 2: Aus der Flußverteilung wird das Drehmoment des Motors als Funktion von Strangstrom und Rotorpositionswinkel bestimmt.

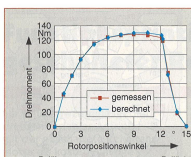


Bild 3: Drehmoment als Funktion des Rotorpositionswinkels bei einem konstanten Strangstrom von 60 A.

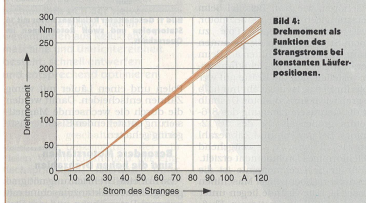


Bild 4: Drehmoment als Funktion des Strangstroms bei konstanten Läuferpositionen.



len geeignet. Der Maschinenläufer besteht aus einem Blechpaket und der Welle. Er enthält keine Wicklung und keine Magnete. Deshalb zeigt der Rotor gegenüber den auftretenden

Flechkräften ein robustes Verhalten. Für kleine Drehzahlen bis etwa 6000 min⁻¹ ist der Entwurf einer hochpoligen Maschine empfehlenswert. Diese Motoren zeichnen sich in der Regel durch eine höhere Ausnutzung und eine geringere Geräuschemission aus.

Nach Festlegung der Außenabmessungen, der Pol- und Zahnanzahl und des Wellendurchmessers ist der Blechschnitt des Switched-Reluctance-Motors mit Hilfe einer Finite-Elemente-Methode zu optimieren hinsichtlich Durchmesser der Statorbohrung, Längen und Breiten des Stator- und Rotorjochs. Für diese Berechnungen genügen heute bereits ein einfacher PC und handelsübliche Software. Optimierungskriterien sind eine hohe Ausnutzung und ein gleichmäßiger Rundlauf des Motors. Als Ergebnis der Berechnung lassen sich die genannten Maße festlegen und die Flußverteilung als Funktion von Strangstrom und Rotorposition ermitteln. Die Kenntnis der Flußverteilung (Bild 2) ist für die Modellbildung des Switched-Reluctance-Motors unerlässlich.

Als Werkstoff für den magnetischen Kreis im Stator und Rotor eignet sich am besten nichtkorrosionsorientiertes Elektroblech. Für höchste Drehzahlen verwendet man verlustarme Eisen-Nickel-Verbindungen mit geringer Blechdicke. Nachdem ein geeigneter Blechschnitt gefunden wurde, sind die Daten der

Polwicklung festzulegen. Spannung und Strom des Strangs sind die Drehzahl und den Querschnitt des Drahts. Die Strangwicklungen des Versuchsmotors wurden für den gewählten Bemessungspunkt und für den Direktanschluß des Umrichters am 400-V/50-Hz-Drehstromnetz ausgelegt.

Optimieren des Motors mit Finite-Elemente-Methoden

Anhand der Flußverteilung bestimmt man das Drehmoment des Motors als Funktion von Strangstrom und Rotorpositionswinkel. Bild 3 verdeutlicht beispielhaft für den Strang A (Bild 1) die Übereinstimmung der Finite-Elemente-Berechnung und der Meßergebnisse. Die Messungen wurden mit festgebremster Maschine durchgeführt. Parameter war der Strangstrom der Rotorpositionswinkel wurde variiert.

An der Stelle der Polüberlappung befindet sich ein Rotorzahn genau unterhalb des Statorpols, an der 15°-Position liegt eine Zahnflanke senkrecht unter dem Statorpol. Während einer Umdrehung des Läufers kehrt die dargestellte Drehmomentkurve für alle Maschinenstränge mehrmals wieder. Über einen weiten Rotorwinkelbereich von etwa 6,5° bis 12,25° kann bis zu einem Moment von 200 Nm einem festen Strangstrom ein näherungsweise konstantes Drehmoment zugeordnet werden. Bild 4 zeigt, daß das Drehmoment in diesem Winkelbereich ab 20 A annähernd eine lineare Funktion des Strangstroms ist. Darunter ist eine quadratische Abhängigkeit erkennbar. Das langsame Ansteigen des Moments im unteren Bereich läßt sich durch den notwendigen Magnetisierungsstrom erklären. Diese für einen Switched-Reluctance-Motor einfachen Funktionen sind der Optimierung mit der Finite-Elemente-Berechnung zu verdanken. Über die Flußverteilung können nun mit Hilfe des mathematischen Modells alle anderen Systemparameter numerisch berechnet werden [2].

Literatur
 [1] Lovatt, H. C., und J. M. Stephenson: Influence of number of poles per phase in switched reluctance motors. Proc. IEE, 139 (1992) 4, S. 307-314.
 [2] Sielert, H.: Drehmomentbestimmung einer Reluktanzmaschine mit bedingt ausgeprägten Polen und geringer Drehzahlwinkel. Diplomarbeit, Universität Karlsruhe 1992.