

Synchrone Reluktanzantriebe (SynRM) – Smarte Antriebssysteme für höchste Effizienz

Dipl.-Ing. Stefan Ulbrich, Dipl.-Ing. Jens Proske, Dipl.-Ing.(FH) Patrick Baumann, Dr.-Ing. Christian Klotz; VEM Sachsenwerk GmbH

Kurzfassung

Im Industriesektor gibt es viele Anwendungen bei denen elektrische Maschinen rund um die Uhr in rauen Umgebungen betrieben werden. Bei VEM wurden hierfür neue Antriebe entwickelt, die hohe Wirkungsgrade auf IE5 Niveau mit Robustheit, Wartungsarmut und niedrigen Anschaffungskosten kombinieren. In diesem Vortrag werden der Entwurfsprozess sowie die auf diese Weise erzielten Ergebnisse, gemessen anhand mehrerer Prototypen, präsentiert. Darüber hinaus wird der Einfluss der Fähigkeiten des Umrichters auf das Betriebsverhalten der Maschine betrachtet.

Abstract

In industrial applications electrical machines are often operated around the clock in rough environments. VEM developed new drives for these applications, combining robustness, low maintenance effort and low cost with highest efficiency levels (IE5). In this presentation the development process as well as the results, measured at multiple prototypes, are shown. Additionally the significance of a smart inverter is pointed out.

1 Einleitung

Standardmäßig werden in den meisten Anwendungen im industriellen Umfeld Asynchronmaschinen am Netz betrieben. In vielen Fällen, z.B. bei Pumpen und Lüftern, kann durch eine bedarfsgerechte Steuerung der Maschinen bereits viel elektrische Energie eingespart werden. Dazu muss die elektrische Maschine um ein leistungselektronisches Stellglied erweitert werden, mit dem sie dann das Gesamtantriebssystem darstellt. Nutzt man als Maschinentopologie dabei weiterhin Asynchronmaschinen, dann sind diese zwar robust und vergleichsweise günstig, weisen aber nur niedrige elektr. Wirkungsgrade, insbesondere bei Teillast, auf. Synchronmaschinen mit permanentmagnetischer Erregung hingegen sind deutlich energieeffizienter und kompakter, aber teurer und in den Einsatzbereichen eingeschränkt.

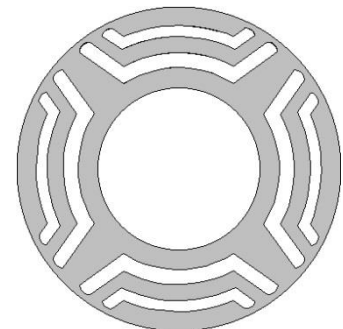


Abb. 1: Rotorschnitt SynRM

Synchronreluktanzmaschinen (SynRM) bieten hierfür einen möglichen Kompromiss und guten Mittelweg. Während der Stator und dessen Wicklung normalen Drehfeldmaschinen entsprechen, weist der Rotor weder stromführende Leiter noch Permanentmagnete auf (Abb. 1). Die Drehmomentbildung erfolgt allein auf Grund des Reluktanzmoments, welches hauptsächlich durch die Rotorgeometrie bestimmt wird.

Da ein Betrieb ohne Umrichter nicht möglich ist, kommt diesen eine besondere Bedeutung zu. Bei gleicher Maschine entscheidet die im Umrichter vorhandene Steuerungssoftware, welche Betriebspunkte, Betriebsmodi sowie elektrische Wirkungsgrade möglich sind.

2 Entwurfsverfahren

1. Zielstellung

Im Gegensatz zu Traktionsmotoren im Automobilsektor weisen Normmotoren im industriellen Umfeld normalerweise eine hohe Anzahl Betriebsstunden pro Jahr in einem klar definierten Anwendungsbereich auf. Der Wirkungsgrad, die Anschaffungskosten sowie die Lebensdauer gewinnen dadurch gegenüber Kompaktheit und einem weiten Betriebsbereich an Bedeutung. Die Lebensdauer einer SynRM liegt aufgrund der weitgehend identischen Produktionstechnologie in der Größenordnung einer Standardasynchronmaschine und spielt in der Auslegung daher keine hervorgehobene Rolle. Die anderen beiden wesentlichen Faktoren, Anschaffungskosten und Wirkungsgrad, bedingen sich gegenseitig. Hierfür ist jedoch letztlich ausreichend wenn die Maschine die vorgegebenen Leistungsdaten mit dem kleinstmöglichen Umrichter sowie unter Beibehaltung der Baugröße einer IE3 Asynchronmaschine erreichen kann. Das übergeordnete Auslegungsziel ist demnach das Erreichen des maximal möglichen Wirkungsgrads am Bemessungspunkt unter Einhaltung aller Randbedingungen, für die jeweils betrachtete normierte Achshöhe.

2. Randbedingungen

Aus verschiedenen Gründen werden SynRM 4-polig ausgeführt [1]. Damit ergibt sich, dass nur ein Rotordesign je Achshöhe gefunden werden muss. Um die Kosten im Rahmen zu halten, muss die Maschine zudem sensorlos sein und mit den Standardumrichtern der jeweiligen Baugröße funktionieren. Dies bedeutet, dass eine Klemmenspannung

Tabelle 1: Beispielrandbedingungen

Referenzachshöhe	112 mm
Polzahl	4
Bemessungsleistung	4 kW
Bemessungsdrehzahl	1500 rpm
Max. Eingangsstrom	9,5 A
Max. Blechpaketlänge	200 mm

von 380 V sowie der maximale Ausgangsstrom des Umrichters eingehalten werden müssen. Der zur Verfügung stehende Bauraum ist durch die bestehenden Asynchronmaschinen vorgegeben, von denen der Stator und das Gehäuse genutzt werden sollen. Eine beispielhafte Zusammenstellung von Randbedingungen zeigt Tabelle 1. Ergänzt werden diese noch durch mehrere fertigungsbedingte Minimal- bzw. Maximalwerte.

3. Vorgehensweise

Da möglichst viele Teile der vorhandenen Asynchronmaschinen wiederverwendet werden sollen, ist nur die Rotorgeometrie zu optimieren. Dies erfolgt in mehreren Schritten und notwendigerweise über mehrere physikalische Domänen [2], die in Abb. 2 schematisch dargestellt sind. Zunächst werden anhand von Daten vorhandener Asynchronmaschinen die Kühlbedingungen analysiert. Da Gehäuse, Lüfter sowie Statorblechschnitt und Fertigungsverfahren konstant bleiben, lässt sich daraus eine verlässliche Aussage zur zu erwartenden Kühlung der Maschine ableiten. Zur Durchführung der Optimierung wird ein Differential Evolution Algorithmus der Variante DE/rand/1/bin (nach [3]) eingesetzt. Dieser erzeugt neue Lösungen, genannt Individuen, innerhalb einer Generation durch eine differenzenbasierte Änderung vorhandener Varianten. Jedes neue Individuum folgt dann dem in Abb. 2 dargestellten, voll automatisierten, Berechnungsschema. In die nachfolgende Generation werden nur die „besten“ Individuen übernommen. Auf diesem Wege konvergiert die Lösungsmenge in Richtung der bestmöglichen Kombination der veränderlichen Parameter.

Als Erstes muss eine Lösung auf mechanische Stabilität bei der geforderten Drehzahl geprüft werden. Dazu wird ein Pol des Rotors mittels eines strukturmechanischen 2D-Finite Elemente Modells untersucht. Aufgrund des großen Einflusses der für die mechanische Festigkeit erforderlichen Stege auf die elektromagnetischen Eigenschaften hat dieser Schritt hohe Bedeutung.

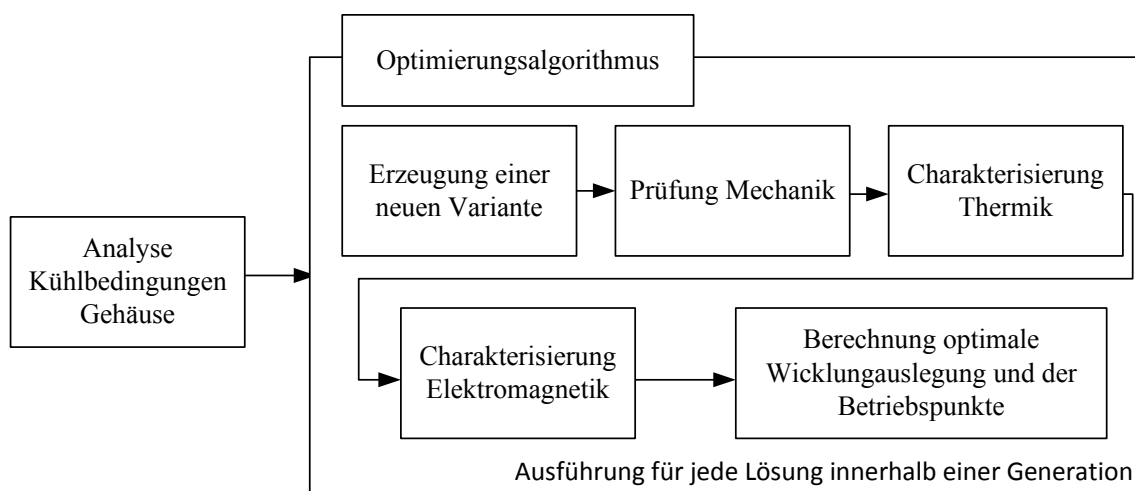


Abb. 2: Schematische Darstellung des Verfahrens zur Berechnung eines Reluktanzrotors

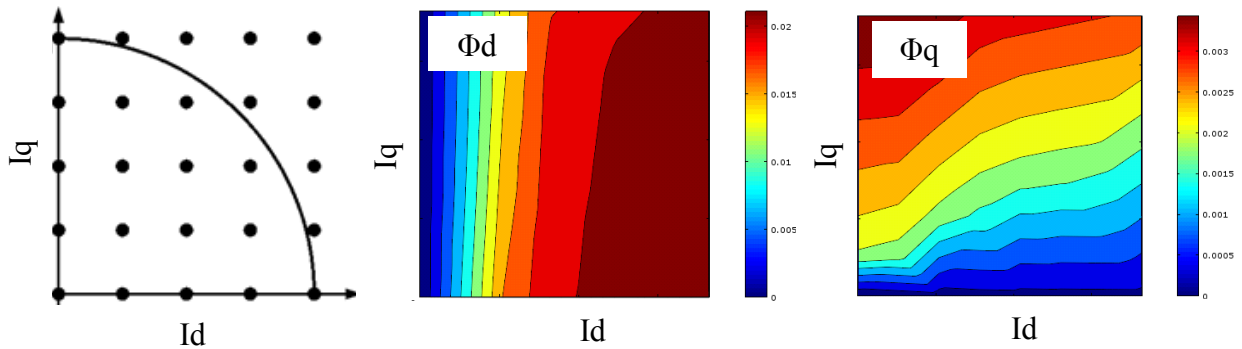


Abb. 3: Links: Rasterung des Bereiches der erlaubten Ströme für die elektromagnetische Simulation
Mitte und Rechts: Abhängigkeit des Flusses in d- bzw. q-Richtung vom eingprägten Strom

Im zweiten Schritt erfolgt mittels eines 2D-Finite Elemente Modells eine Berechnung der in der Nut maximal zulässigen Stromdichte um eine vorgegebene Grenztemperatur nicht zu überschreiten. Anschließend wird die Lösung elektromagnetisch charakterisiert. Dazu wird eine Vielzahl an Rechnungen durchgeführt (dargestellt als Punkte in Abb. 3 links), bei denen in jede Nut entsprechend der Verteilung der Spulenseiten der einzelnen Phasen ein Summenstrom eingprägt wird. Die Windungszahl einer Spule ist demnach zu diesem Zeitpunkt unbedeutend und nur die geometrischen Verhältnisse der Maschine bestimmen den magnetischen Widerstand und damit den durch die Bestromung hervorgerufenen magnetischen Fluss. Betrachtet man das in Abb. 3 mittig und rechts dargestellte Ergebnis, dann wird bspw. deutlich, dass der magnetische Fluss in d-Richtung nahezu unbeeinflusst vom q-Anteil des Stromes ist. Für den magnetischen Fluss in q-Richtung gilt dies nur eingeschränkt, der d-Anteil des Stromes beeinflusst das Ergebnis hier deutlicher [4].

Im letzten Schritt wird die Windungszahl der Spulen so angepasst, dass der Maximalstrom des Umrichters eingehalten werden kann. Davon ausgehend kann dann die Berechnung der Betriebspunkte der Maschine und der jeweils zu erwartenden Verluste erfolgen.

3 Messergebnisse

Bislang wurden bei VEM zwei Prototypen der Achshöhen 80 und 112 ausgelegt und gebaut. Diese erreichten die im Umrichterbetrieb nach [5] definierten IE5 Wirkungsgrade unter Einhaltung der durch die verwendeten Umrichter vorgegebenen Maximalströme. Zusätzlich wurden die Ergebnisse der mechanischen Rechnungen durch Schleudertests geprüft, nach denen jeweils die auftretenden Verformungen des Rotors erfasst wurden. Die in Tabelle 2 gezeigte Maximaldrehzahl entspricht dabei nicht der Drehzahl bei der der Rotor irreversibel beschädigt wurde, sondern der höchstmöglichen Betriebsdrehzahl für die der Rotor dauerhaft ist.

Tabelle 2: Messergebnisse von Prototypen bei 1500 U/min und 400 V Netzspannung am Umrichter

Typ	Leistung	Strom	cos ϕ	Wirkungsgrad	Max. Drehzahl
AH 80	750W	1,8A	0,72	86,7%	6000 U/min
AH 112	4000W	9,5A	0,75	91,8%	4500 U/min

4 Smartes Antriebssystem

Die Maschinen werden sensorlos ausgeführt. Gleichzeitig ist die Bestimmung der Rotorlage und die dazu passende Einprägung eines Spannungssignals jedoch die wichtigste Grundvoraussetzung für das stabile Einstellen eines Arbeitspunktes [6-7]. Der Umrichter muss demnach über die Fähigkeit verfügen die aktuelle Position des Rotors festzustellen und darauf entsprechend zu reagieren. Es gibt hierfür eine Reihe verschiedener Ansätze. Meist werden im mittleren und hohen Drehzahlbereich Beobachter zur Auswertung der induzierten Spannung eingesetzt. Bei niedrigen Drehzahlen muss jedoch ein zusätzliches und hochfrequentes Signal eingesetzt werden, da das zu messende Spannungssignal zu niedrig ist.

Letztlich entscheidet die Genauigkeit der und die Fähigkeit zur Rotorlagebestimmung unter verschiedenen Bedingungen über mehrere Eigenschaften des Antriebssystems:

- Erreichbarkeit des bestmöglichen Wirkungsgrades
- Breite des möglichen Betriebsbereiches unter Beachtung der Spannungsgrenze
- Fähigkeit zum Halten einer Last im Stillstand
- Fähigkeit zum stabilen Betrieb bei plötzlichen Lastwechseln
- Fähigkeit zum hochdynamischen Drehzahlwechsel

Bei unveränderter Maschine entscheidet demnach die Qualität der im Umrichter vorhandenen Steuerungssoftware darüber, welches Betriebsverhalten das Antriebssystem zeigt und welche Lastpunkte angefahren werden können.

5 Zusammenfassung

Synchronreluktanzmaschinen können im Anwendungsbereich von Drehstrom-Normmotoren am Umrichter einen guten Kompromiss zwischen Asynchronmaschine und permanenterregter Synchronmaschine bieten. Dies gilt insbesondere für die erreichbaren Wirkungsgrade auf dem Niveau von IE5, ohne dass dafür ein größerer Umrichter oder mehr Aktivmasse im Vergleich zu einer Standardasynchronmaschine notwendig wäre. Um diesen Kompromiss jedoch zu erreichen und eine Auslegung festzulegen, ist der Einsatz eines komplexen Entwurfsverfahrens notwendig. Dabei müssen thermische, strukturmechanische und elektromagnetische Grö-

ßen berechnet und gegeneinander abgewogen werden. Da hierbei bereits kleine Änderungen in der Geometrie zu nennenswerten Auswirkungen führen, muss eine Vielzahl von Varianten analysiert werden. Die Problemstellung ist demnach für den Einsatz von Optimierungsalgorithmen prädestiniert. Darüber hinaus sind die Eigenschaften des an die Maschine angeschlossenen Umrichters entscheidend. Nur wenn dieser über ausgereifte Regelalgorithmen und eine hochgenaue sensorlose Lagebestimmung verfügt, kann die Maschine ihre Vorteile auch ausspielen.

6 Literatur

- [1] Vagati, A., Franceschini, G., Marongiu, I., Troglia, G. P. (1992). Design Criteria of High Performance Synchronous Reluctance Motors. *Conference Record of the 1992 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 66–73.
- [2] Palmieri, M., Perta, M., Cupertino, F., Pellegrino, G. (2014). High-speed scalability of synchronous reluctance machines considering different lamination materials. *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, 614–620.
- [3] Qing, A. (2009). Differential evolution: fundamentals and applications in electrical engineering.
- [4] IEC-TS 60034-30-2
- [5] Neusüs, S., Binder, A. (2018). Operation Strategy and Efficiency Map Calculation of a Synchronous Reluctance Motor. *Elektrotechnik Und Informationstechnik 135*, 3(March), 318–324.
- [6] Weigel, T. (2016). Control of synchronous reluctance motors without encoder for industrial applications. *2016 6th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, 8–13.
- [7] Bianchi, N., Bolognani, S., Tinazzi, F., Zigliotto, M. (2017). The influence of rotor design on active flux-based sensorless synchronous reluctance motor drives. *2017 IEEE International Symposium on Sensorless Control for Electrical Drives (SLED)*, 7–12.