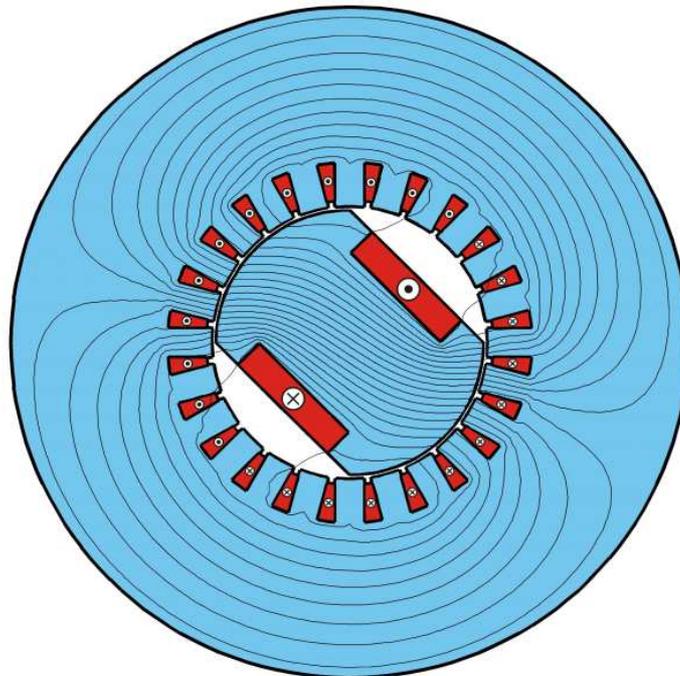


SYNTHESE VON ANWENDUNGSOPTIMIERTEN LUFTSPALTFLUSSDICHTEVERTEILUNGEN FÜR WECHSELRICHTERGESPEISTE SYNCHRONMASCHINEN

R. Palka, H. May

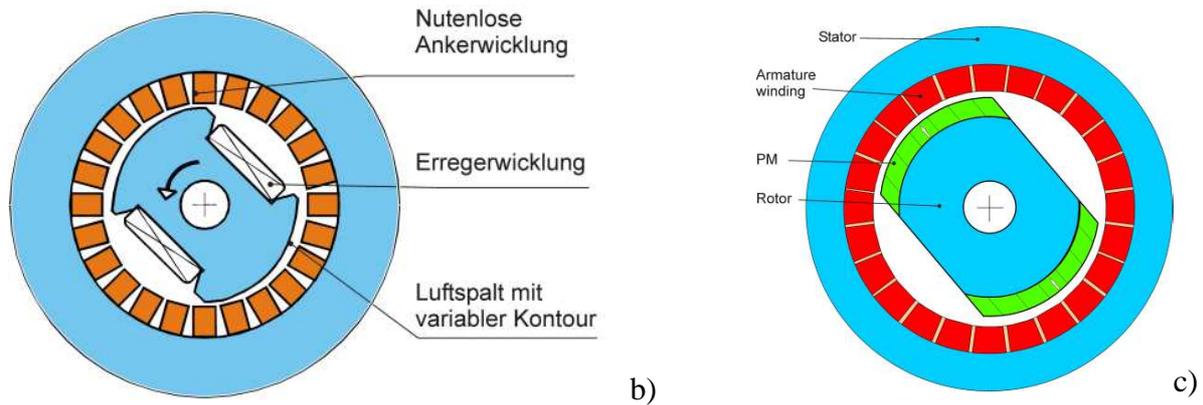
1 EINFÜHRUNG

Wechselrichter gespeiste Synchronmaschinen (SM) werden heutzutage vorwiegend als hochdynamische oder drehmomentstarke Antriebe z. B. für Werkzeugmaschinen oder Fahrzeuge verwendet (**Bild 1**). Die Eigenschaften dieser Maschinen werden vor allem durch ihren Magnetkreis und die Leistungsfähigkeit des Wechselrichters bestimmt. Die wichtigsten Ziele der Speisung der Maschine sind u. a. die Reduktion von Momentenschwankungen, maximaler Wirkungsgrad und maximale Kraft- bzw. Leistungsdichte. Für viele Anwendungen im Bereich von Fahrzeugantrieben mit fest angekoppeltem Getriebe ist die in weiten Grenzen variable Drehzahl der Maschine eines der wichtigsten Kriterien. Die Klasse von sehr schnell drehenden Maschinen sollte zur Erleichterung der Wechselrichterspeisung eine kleine Statorstreuung aufweisen, was besonders durch Verwendung von Supraleitern im Erregerkreis (Supraleitende Permanentmagnete oder supraleitende Wicklungen) erreicht werden kann [1]. Die Möglichkeiten und Vorteile von Synchronmaschinen mit bestimmten Luftspaltinduktionsverteilungen sind in [2] beschrieben und dienen als Zielvorgabe dieser Arbeit.



a)

Bild 1: Aufbau von Synchronmaschinen im Querschnitt
a) Feldverteilung einer elektrisch erregten Schenkelpol-SM



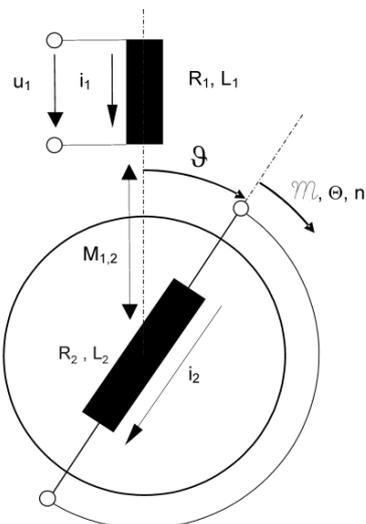
Forts. **Bild 1:** b) Elektrisch erregte Schenkelpol-SM mit veränderlichem Luftspalt (Nutenlose Ankerwicklung)
 c) Permanentmagneterregte SM (Ortsabhängige Magnetisierung, nutenlose Ankerwicklung)

2 PROBLEMSTELLUNG

Der Wechselrichter muss alle Anforderungen der Regeleinheit bei der Speisung der Maschine erfüllen. Hierbei hat die Regelstrategie eine ganze Reihe von Nebenbedingungen zu berücksichtigen, von denen neben dem Energie-Umwandlungswirkungsgrad die wichtigste der minimale Wechselrichteraufwand ist. Auf der anderen Seite können auch die Energiewandler so entworfen werden, dass von ihnen das Erreichen dieses Zieles unterstützt wird.

2.1 Optimierung der Maschinenspeisung

Aus der Sicht der Maschinenauslegung gibt es verschiedene Möglichkeiten zur Reduktion der benötigten Wechselrichterscheinleistung.



Basierend auf der Analyse der Spannungsgleichung werden diese Potenziale hergeleitet. Entsprechend **Bild 2** lautet sie – aufgelöst nach der Stromanstiegsgeschwindigkeit – für einen Strang einer Maschine mit fester Erregung und konstantem magnetischen Luftspalt:

Bild 2: Ersatzschaltbild einer einsträngigen Synchronmaschine mit fester Erregung

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{1}{L_1} \left(\underbrace{u_1}_1 - \underbrace{R_1 \cdot i_1}_2 - \underbrace{i_2 \frac{\partial M_{1,2}}{\partial \vartheta}}_3 \cdot \frac{d\vartheta}{dt} \right) \quad (2.1)$$

Der Ankerstrom i_1 soll nun so geregelt werden können, dass die Maschinenanforderungen mit möglichst geringem Wechselrichteraufwand (Strom, Spannung, Frequenz) erfüllt werden können. Die Möglichkeiten hierzu sollen in dieser Arbeit durch die entsprechende Anpassung der Polgeometrie (Schenkelpol-SM) und/oder Magnetisierungsverteilung (PM-Maschinen) untersucht werden [3]. Durch diese Maßnahmen werden alle wichtigen Maschinenparameter (Induktivitäten, Flussdichteverteilung, Sättigungszustand usw.) bestimmt.

Bild 3 stellt die angestrebten induzierten Spannungen (Term 3 von Gl. (2.1)) für drei verschiedene Synchronmaschinentypen dar, welche bezüglich ihres Leistungsvermögens in [2] untersucht wurden. Besonders interessant in diesem Bild ist die mit a) gekennzeichnete Kurve, welche in Bewegungsrichtung zunächst einen langsamen Anstieg und ein zusätzliches Maximum kurz vor dem Ende der Polteilung aufweist. Dieser Verlauf unterstützt aufgrund der verbesserten Kommutierungsbedingungen bei sehr hohen Geschwindigkeiten die Maschinenspeisung. Entsprechend Gl. (2.1) behindert neben dem ohmschen Spannungsabfall (Term 2, Gl. (2.1)) nur die induzierte Spannung (Term 3) die Stromänderung. Das bedeutet, dass dieser Term während des Aufkommutierens klein sein sollte, da er prinzipiell die treibende Klemmenspannung (Term 1) reduziert, während am Ende der Polteilung ein großer Wert der induzierten Spannung zusammen mit der zumeist in diesem Bereich invertierten Klemmenspannung das Abkommutieren unterstützt. Der tatsächliche Einfluss dieser Spannungsgrößen auf den zeitlichen Stromgradienten wird aber erst durch die Skalierung mit dem Kehrwert der Selbstinduktivität L_1 wiedergegeben. Aus Gl. (2.1) folgt automatisch, dass diese Selbstinduktivität bezogen auf die Gegeninduktivität möglichst 1 sein sollte, d. h. die Streuung sollte möglichst klein sein.

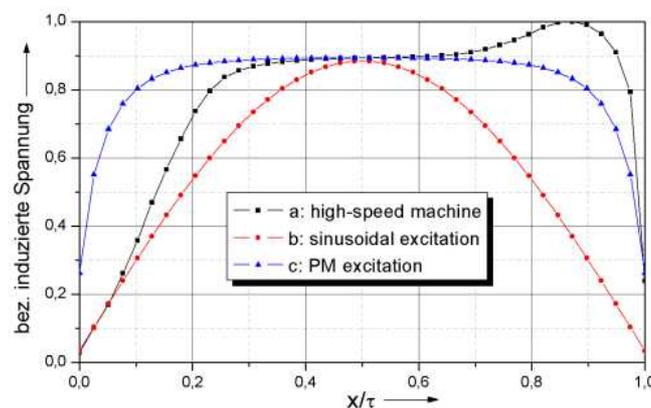


Bild 3: Induzierte Spannung für drei verschiedene Maschinentypen

- a) Schenkelpol-SM mit in Bewegungsrichtung kleiner werdendem Luftspalt bzw. permanentmagneterregte SM mit ortsabhängiger Magnetisierung
- b) Schenkelpol-SM mit synthetisierter Luftspaltgeometrie bzw. permanentmagneterregte SM mit ortsabhängiger Magnetisierung nach Halbach-Holsinger
- c) Schenkelpol-SM bzw. permanentmagneterregte SM mit großer Polbedeckung

2.2 Optimierung der Geometrie

Die Aufgabe besteht nun darin, die Kontur des Magnetpols so zu bestimmen, dass der gewünschte Verlauf der induzierten Spannung durch eine entsprechende Flussdichteverteilung im Luftspalt erreicht wird. Eine derartige Aufgabe gehört zu der Klasse der sog. „schlecht formulierten Probleme“ (ill-posed problems). Das heißt, dass ihre Lösung entweder nicht eindeutig oder auch unstetig sein kann. Das hat zur Folge, dass die klassischen numerischen Lösungsmethoden (Finite Element Methode - FEM) zur Lösung von solchen Feldproblemen nicht angewendet werden können [4, 5].

Zur Lösung des Problems muss das ursprüngliche Gleichungssystem der FEM um entsprechende Gleichungen, die die zusätzlichen Bedingungen für das Luftspaltfeld beschreiben, erweitert werden. Das resultierende Gleichungssystem, dessen Unbekannte Vektorpotentiale und Koordinaten der Maschinenpolkontur sind, ist überbestimmt, nichtlinear und schlecht konditioniert:

$$\mathbf{V} = \mathbf{f}(\mathbf{Z}) \quad (2.2)$$

Die Lösung von Gl. (2.2) wird iterativ bestimmt:

$$\mathbf{Z}^{k+1} = \mathbf{Z}^k + \alpha_{\min} \mathbf{D}^k, \quad (2.3)$$

wobei \mathbf{D}^k ein Richtungsvektor und α_{\min} die Schrittweite bedeuten. Der Richtungsvektor \mathbf{D}^k kann in jedem Iterationsschritt als Lösung des folgenden Gleichungssystems ermittelt werden:

$$\mathbf{J} \mathbf{D} = \mathbf{E}, \quad (2.4)$$

mit $\mathbf{E} = \mathbf{V} - \mathbf{f}(\mathbf{Z})$ und \mathbf{J} – Jacobi-Matrix. Da die Matrix \mathbf{J} eine rechteckige $m \times n$ -Matrix ist ($m > n$), existiert die Lösung der Gl. (2.4) im Sinne der kleinsten Quadrate:

$$\mathbf{D}_0 = \min |\mathbf{E} - \mathbf{J}\mathbf{D}| \quad (2.5)$$

Diese Lösung kann wie folgt geschrieben werden:

$$\mathbf{D}_0 = \mathbf{R} \mathbf{E} \quad (2.6)$$

Die Matrix \mathbf{R} wird als die sog. Moore-Penrose-Pseudeinversematrix bezeichnet.

Die Lösung von Gl. (2.6) mit der minimalen Länge (the minimal least squares solution) kann mit Hilfe von Lanczos-Transformationen und der Singulärwertzerlegung (singular value decomposition) gerechnet werden [4, 5, 6]. Auf diese Weise kann die Lösung des Problems iterativ ermittelt werden. Es muss hier erwähnt werden, dass dieser numerische Algorithmus sehr sensibel ist und dadurch auch instabil zu unsinnigen Lösungen führen kann.

Bild 4 stellt den halben Magnetpol einer Synchronmaschine dar. Die Aufgabe besteht beispielsweise darin, die Form dieses Magnetpols so zu bestimmen, dass die magnetische Flussdichte im Luftspalt einen bestimmten Verlauf aufweist. Diese Aufgabe kann mit Hilfe des hier dargestellten Verfahrens gelöst werden.

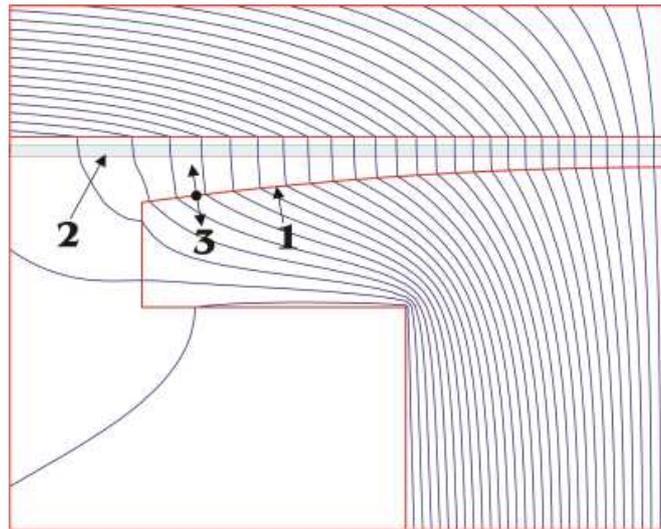


Bild 4: Magnetpol einer Synchronmaschine:

- 1: Anfangskontur
- 2: Das Gebiet der Feldsynthese
- 3: Beispielhaft ein beweglicher Punkt auf der Polschuhkontur, dessen Position aufgrund der Synthese verschoben werden kann

2.2.1 Erzeugung einer sinusförmigen induzierten Spannung (**Bild 3 b**)

Die Aufgabe besteht darin, die Polkontur so zu bestimmen, dass die im Luftspalt erzeugte Flussdichteverteilung einen kosinusförmigen Verlauf aufweist. Ein Ergebnis der hierfür geeigneten Feldsynthese wird in den **Bildern 5 a)** und **5 b)** gezeigt. **Bild 5 a)** zeigt das ursprüngliche willkürlich aber sinnvoll angenommene FEM-Gitternetz des Maschinenpols und **Bild 5 b)** stellt das resultierende Gitternetz zusammen mit der geänderten Polkontur dar.

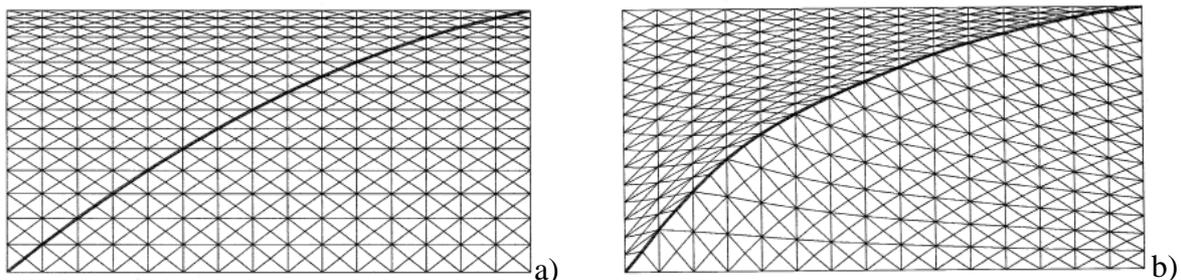


Bild 5: a) Ausschnitt eines willkürlich aber sinnvoll angenommenen Anfangsgitternetzes mit Ausgangspolkontur (dicke schwarze Linie)
b) Das sich aus der Synthese ergebende modifizierte Gitternetz

Die Feldverteilung im Luftspalt der Maschine mit entsprechend **Bild 5 b)** geänderter Polkontur, welche zu einer sinusförmigen induzierten Spannung führt, zeigt **Bild 6**.

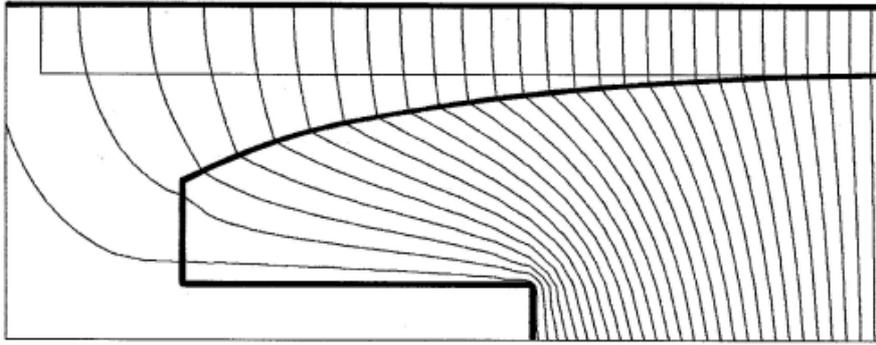


Bild 6: In seiner Kontur optimierter Magnetpol einer Schenkelpol-Synchronmaschine zur Erzielung einer sinusförmigen Leerlaufspannung. Das Gebiet der Feldsynthese ist ebenfalls dargestellt

2.2.2 Erzeugung einer für hohe Drehzahlen geeigneten induzierten Spannung (**Bild 3 a**)

Die gleiche Methode kann zur Bestimmung der für hochtourige Maschinen geeigneten Polkontur mit gemäß **Bild 1 b**) bzw. **Bild 7** abfallendem Luftspalt angewendet werden.

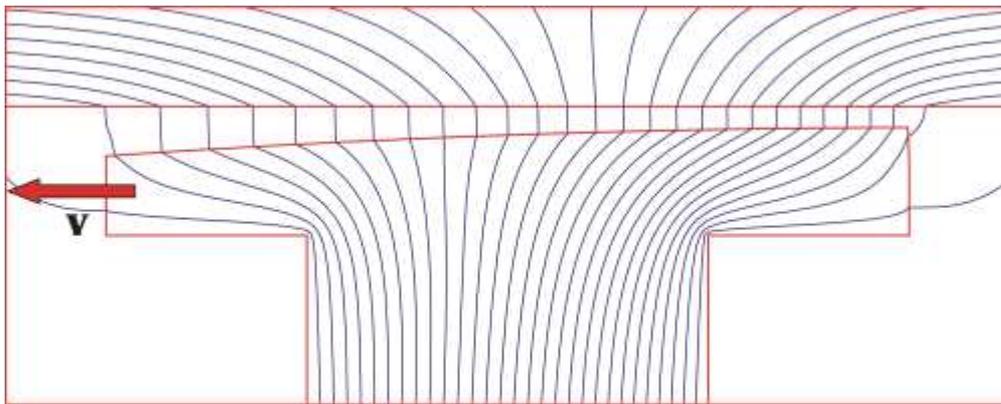


Bild 7: Für schnell drehende elektrisch erregte Synchronmaschinen geeignete Kontur des Magnetpols

Die hier dargestellte Maschine mit dem veränderlichen Luftspalt – in Drehrichtung verkleinernd – weist den in **Bild 3 a**) dargestellten Verlauf der induzierten Spannung auf.

2.3 Optimierung der Magnetisierung

Ein ähnlicher Algorithmus kann für die Berechnung der optimalen Magnetpolmagnetisierung der permanenten erregten SM verwendet werden. In diesem Falle kann die Optimierungsaufgabe auf die Lösung eines überbestimmten, linearen und schlecht konditionierten Gleichungssystems reduziert werden, dessen Unbekannte die Vektorpotentiale und die Magnetisierung der Magnete sind. Die beispielhafte Konfiguration ist in **Bild 8** dargestellt.

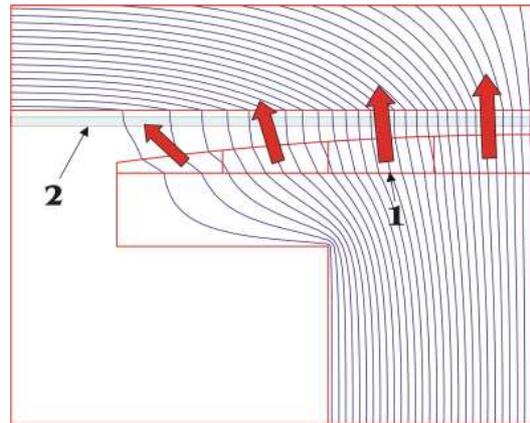


Bild 8: Magnetpol einer permanentmagneterregten Synchronmaschine mit ortsabhängiger Magnetisierung (Größe und Richtung)

- 1: Gebiet mit unbekanntem Magnetisierungen
- 2: Gebiet der Feldsynthese, in dem der Feldverlauf als Zielfunktion erreicht werden soll

Die Synthese der Magnetisierungsverteilung (Wert und Richtung) kann wieder einen sinusförmigen (**Bild 3 b**) bzw. drehzahloptimierten (**Bild 3 a**) Verlauf der induzierten Spannung als Zielfunktion haben.

3 ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Beitrag wurden die Möglichkeiten der Gestaltung der Maschinengeometrie bzw. der Magnetisierung untersucht, die zur Verbesserung des natürlichen Betriebsverhaltens von wechselrichter gespeisten Synchronmaschinen führen. Die hier vorgestellten Maßnahmen erlauben eine wesentliche Reduktion des Scheinleistungsaufwands der verwendeten Wechselrichter besonders aus Sicht der Dynamik hochtouriger Maschinen.

4 LITERATUR

- [1] May H., Palka R., Canders W.-R., "Performance enhancements of electrical machines by the use of new HTSC-material", *The Electrotechnical Review* 10, 2003, pp. 677-680
- [2] May H., Palka R., "Neue Maschinenentwürfe für anwendungsoptimierte wechselrichter-gespeiste Antriebssysteme", *IMAB-Jahresbericht* 2004.
- [3] May H., Canders W.-R., Palka R., Holub M., "Optimized firing (swing-up effect) of inverter fed switched reluctance machines for high speed and high power applications", *ISEF 2001*, pp. 479-484, Sep. 20-22, Cracow, Poland
- [4] Palka R., "Synthesis of magnetic fields by optimization of the shape of areas and source distributions", *Archiv für Elektrotechnik* 75, pp. 1-7 (1991)
- [5] *NAG Fortran Library Introductory Guide*, Mark 18, Numerical Algorithms Group, Oxford 1997
- [6] Lawson C.L., Hanson R.J., "Solving least squares problems", Prentice-Hall 1974