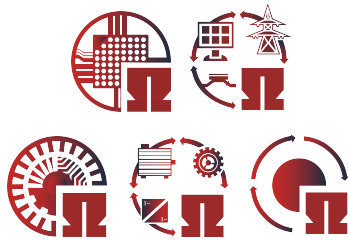


ELSYS Note

Synchronaußenläufermotor



Diese Studie untersucht leichte, effiziente Motoren für Drohnenantriebe durch Analyse von Rotorstrukturen mit Flussbarrieren und Permanentmagneten. Die Ergebnisse werden mit herkömmlichen Oberflächenmagnetmotoren verglichen. Ziel ist die Entwicklung eines Drohnenantriebs mit höherem Reluktanzdrehmoment. Trotz geringerer Drehmomentdichte zeigt sich, dass dieser Ansatz eine sinnvolle Option ist, um Permanentmagnetmaterial einzusparen.

Einleitung

In der elektrifizierten Luftfahrt, speziell bei Drohnenantrieben, sind leichte, effiziente Motoren entscheidend. Die gängigen Außenläufer-Synchronmaschinen mit Oberflächenmagneten nutzen die Reluktanzkraft nicht effektiv. Die Abschlussarbeit untersuchte alternative Rotorstrukturen wie ein- und mehrlagige Flussbarrieren mit Permanentmagneten. Ziel war die Entwicklung eines leichten und effizienten Motors für Drohnenantriebe durch eine Kombination aus analytische Berechnungen und FE-Simulationen. Der Vergleich mit einer konventionellen PMSM mit Oberflächenmagneten ermöglichte eine umfassende Bewertung der Ergebnisse.

Drohnenantriebe

Für die avisierte Anwendung eines Drohnenantriebs ergibt sich die in Abb. 1 dargestellte Drehmoment-Drehzahlkurve als Anforderung. Der relevante Punkt für die Auslegung befindet sich bei $T_{\max} = 29 \text{ Nm}$ und $n = 2200 \text{ min}^{-1}$. Dieser Punkt ist für den Überlast-

fall relevant und muss mit der verfügbaren Leistungselektronik ($U_N = 30 \text{ V}$, $I_N = 177 \text{ A}$) erreichbar sein. Der Nennpunkt der elektrischen Maschine liegt bei $n = 1750 \text{ min}^{-1}$.

Neben der Auslegung der zwei elektrischen Antriebe mit Reluktanzdrehmoment werden die Ergebnisse mit einem konventionellen Antrieb mit Oberflächenmagneten verglichen. Dessen Abmessungen sind in Tab. 1 dargestellt. Die Auslegung eines Außenläufermotors mit Reluktanzdrehmoment soll das notwendige Magnetvolumen reduzieren und dabei die gleichen Anforderungen erfüllen.

Tabelle 1 Geometrieparameter Antrieb mit Oberflächenmagneten

Außendurchmesser D_a	155 mm
Axiale Länge l_a	29 mm
Luftspaltweite δ	0,6 mm
Polpaarzahl p	21
Lochzahl q	2/7
Magnetvolumen V_{pm}	21 mm ³

Aufgrund der hohen geforderten Leistung im Überlastfall und der Begrenzung durch die Leistungselektronik ist in diesem Betrieb-

spunkt ein Leistungsfaktor von mindestens $\cos(\varphi) = 0,82$ bei einem angenommenen Wirkungsgrad von $\eta = 0,9$ notwendig.

Wicklung und Magneten

Im Vergleich besitzen übliche Wicklungskonfigurationen für beispielsweise Synchronreluktanzmaschinen bei gleicher Nutzahl deutlich niedrigere Polpaarzahlen. Dadurch werden die Jochhöhe des Rotors deutlich größer und die Drehmomentdichte reduziert. Einen guten Kompromiss stellt eine Bruchlochwicklung mit $Q = 24$ und $p = 5$ dar, die für die Antriebe mit Reluktanzdrehmoment gewählt wird.

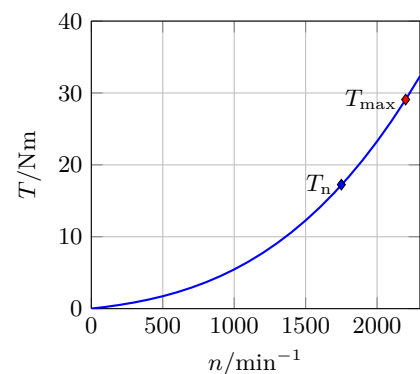


Abb. 1 $T(n)$ -Kurve für Anforderung

Rotorgeometrien

Es werden zwei verschiedene Rotorgeometrien miteinander verglichen, wobei die einlagige Variante einer IPMSM (Interior Permanent Magnet Synchronous Machine) und die zweilagige Variante einer PMA-SynRM (Permanent Magnet assisted Synchronous Reluctance Machine) gleicht. Die beiden Varianten sind in Abb. 2 und 3 dargestellt. Der Luftspaltdurchmesser ist bei beiden Ausführungen identisch. Für die Beurteilung der Drehmomentdichte werden jedoch die äußeren Abmessungen der aktiven Bauteile verwendet. Dadurch wird der Nachteil des dickeren Rotors der zweilagigen Variante berücksichtigt.

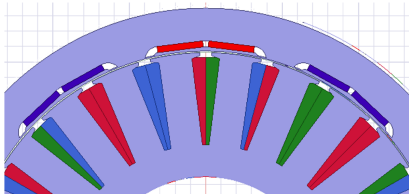


Abb. 2 Rotorgeometrie mit einer Flussbarriere

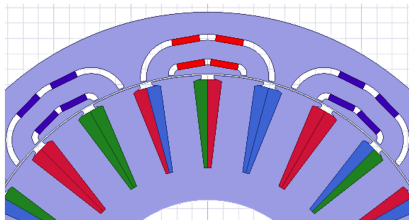


Abb. 3 Rotorgeometrie mit zwei Flussbarrieren

Vergleich

Beim Vergleich wird deutlich, dass die zweilagige Variante aufgrund der ausgeprägteren Rotorstruktur einen breiteren Rotor benötigt, wodurch der Außendurchmesser erhöht wird und die Drehmomentdichte im Vergleich zur einlagigen Variante sinkt.

Ebenfalls wird ersichtlich, dass bei einer einzelnen Flussbarriere die

gleiche Magnetmasse zu einer höheren Flussverkettung und folglich auch zu einem größeren Drehmoment führt. Das liegt vor allem an der Oberflächenaufteilung der Magnete. Bei der zweilagigen Variante sind zwei Magneten in Reihe geschaltet, wodurch sich jedoch der Fluss im Vergleich zu einem Magneten nicht erhöht. Dies kann auch mit einer vereinfachten Magnetkreisrechnung, siehe Abb. 4, nachvollzogen werden, bei der die Magnete durch ideale Flussquellen ersetzt werden. Hierbei wird der magnetische Spannungsabfall im Eisen oder ein magnetischer Streufluss vernachlässigt.

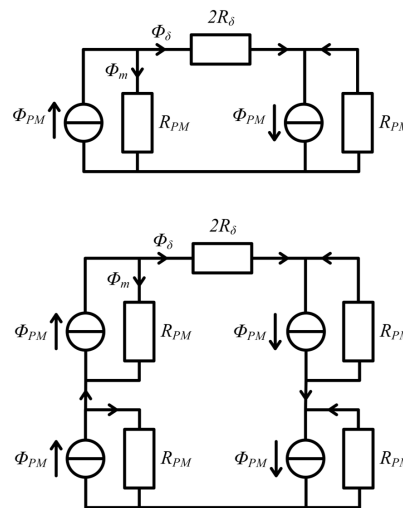


Abb. 4 Ersatznetzwerk des Magnetkreises

Die zweilagige Variante benötigt im Vergleich 20% mehr Permanentmagnetmasse, um das geforderte Drehmoment im Maximalpunkt zu erreichen. Durch die höhere Flussverkettung steigt der Leistungsfaktor, was in Abb. 5 für verschiedene Betriebspunkte dargestellt wurde.

Tabelle 2 Parameter der Antriebe mit ein oder zwei Flussbarrieren

Flussbarrieren	1	2
D_a /mm	185	197
l_a /mm	25	25
δ /mm	0,5	0,5
q	4/5	4/5
V_{pm} /mm ³	15	18

Neben der Permanentmagnetmasse ist, wie in Tab. 2 zu erkennen, der Außendurchmesser bei zwei Flussbarrieren um 6,5% erhöht. Der Luftspaltdurchmesser wurde für beide Maschinen auf $D_\delta = 157$ mm festgelegt.

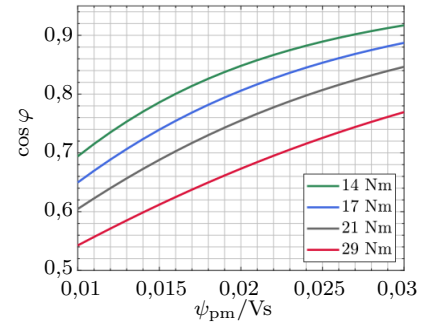


Abb. 5 Leistungsfaktor in Abhängigkeit der Flussverkettung

Das Reluktanzdrehmoment ist jedoch bei einer einzelnen Barriere geringer. Dieses liegt als Anteil am Gesamtdrehmoment je nach Betriebspunkt zwischen 17% und 34% und bei der zweilagigen Variante zwischen 40% und 59%.

Aufgrund der hier aufgeführten Ergebnisse wird für den Vergleich mit der PMSM mit Oberflächenmagneten die Rotorgeometrie mit einer einzelnen Flussbarriere gewählt.

Zusammenfassung

Beim Vergleich vom ausgelegten Motor mit einlagiger Flussbarriere und konventionellem Motor wurde erkennbar, dass die PMSM mit Oberflächenmagneten eine höhere Drehmomentdichte, ein geringeres Gewicht, eine höhere Effizienz und eine geringere Drehmomentwelligkeit besitzt. Anhand der Ergebnisse wird deutlich, dass für einen permanentenerregten Synchronaußenläufermotor mit einem erhöhten Reluktanzdrehmoment für dieses Anwendungsbeispiel diese Nachteile in Kauf genommen werden müssen, um Permanentmagnetmaterial einzusparen.