ELSYS Note

Innovative Antriebe für die Mobilität

Die Elektrifizierung der Mobilität im urbanen Raum beinhaltet ein breites Feld an Anwendungen mit unterschiedlichen Anforderungen. In diesem Artikel werden elektrifizierte Roller und Motorräder mit niedriger Batteriespannung (72 V) betrachtet. Neben der Performance ist hier die Drehmomentdichte des elektrischen Antriebs ein entscheidender Wettbewerbsvorteil, die durch innovative Geometrien gesteigert werden kann.

Motivation

Die Mobilität im urbanen Raum erfordert effiziente, günstige und kompakte Antriebe, die an ein Lastprofil angepasst sind. Neben elektromagnetischen Aspekten sind thermische und mechanische Betrachtungen entscheidend. Da deutsche Hersteller derzeit wenige Lösungen anbieten, fokussiert das Institut ELSYS auf die Forschung zu batterieelektrischen Kleinkrafträdern wie E-Rollern und E-Motorrädern, um wettbewerbsfähige Entwicklungen voranzutreiben.

Ausstattung

Am ELSYS sind verschiedene Prüfstände für elektrische Maschinen vorhanden. Ein neu aufgebauter Prüfstand eignet sich ebenfalls für diese Antriebe. Dieser ist in Abb. 1 dargestellt und besitzt eine 15 kW-Gleichspannungsversorgung mit $U = 0\,\mathrm{V}$ bis $80\,\mathrm{V}$ und $I = 0\,\mathrm{A}$ bis $510\,\mathrm{A}$. Für die Ansteuerung des Prüflings kann eine eigene Leistungselektronik eingesetzt werden oder auf das vorhanden *UltraZohm* mit verfügbaren Umrichtern zurückgegriffen werden. Das *UltraZohm* ist eine leistungsstarke und modulare Regelungsplattform, die einen hohen Freiheitsgrad in der Ansteuerung des Motors ermöglicht. Zudem ist ein kompatibler Umrichter mit bis zu $I_{\mathrm{LL}} = 450\,\mathrm{A}$ einsatzbereit. Als Rotorlagegeber können Resolver- und Inkrementalgeber verwendet werden. Für die Vermessung eines Antriebs ist bei hochpoligen Maschinen die Verwendung von hochauflösenden Absolutwertgebern sinnvoll (EnDat).

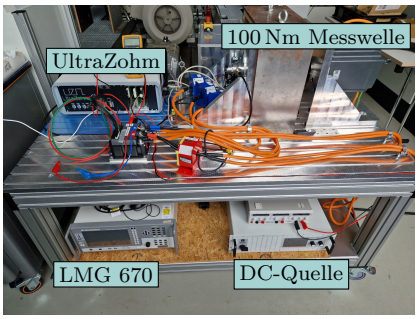

Abb. 1: Prüfstand bis 80 V

IPM-Rotor Design

Aufgrund von einer einfacheren Fertigung und einer Anwendung mit Feldschwächbereich werden üblicherweise vergrabene Magnete bei PMSMs eingesetzt. Bei hochpoligen Antrieben oder bei kleinen und kompakten Antrieben ist der relative Anteil der magnetischen Streuung über die dünnen Eisenstege im Rotorblechpaket signifikant. Um den Einfluss der Sättigung zu untersuchen, wird im Folgenden ein Beispiel-Motor mit 10 kW, $Q = 27$, $p = 3$ und $q = 1,5$ herangezogen, wie in Abb. 2 dargestellt. Dabei wird auf Ergebnisse eines abgeschlossenen ELSYS-Projekts mit segmentierter Bauweise ohne Eisenstege zurückgegriffen [1].

Als Anwendung wird ein Lastprofil als Drehoment-Drehzahlkurve wie in Abb. 3 verwendet. Hierfür wird für den Antrieb mit Eisenstegen mit den Parametern nach Tab. 1 der benötigte Strombedarf bei einer Spannungsgrenze von $U = 80$ V aus den Flusskennfeldern ermittelt. Abb. 5 zeigt den Strombedarf (blaue Kurve) für die geforderte M-n-Kennlinie.

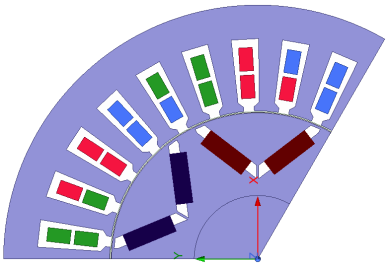

Abb. 2: Rotor mit Eisenstege

Tabelle 1: Vergleich MEC und FEM für Rotormodell

Parameter		Abb. 2	Abb. 4	Abb. 4 (**kurz**)
Außendurchmesser	D_a	120 mm	120 mm	120 mm
Wirksame Eisenlänge	l_{Fe}	144 mm	144 mm	**138.5** mm
Strangwindungszahl	N	27	27	27
Elektroblech		NO20	NO20	NO20
Permanentmagnete	80 °C	N44SH	N44SH	N44SH
Magnetmasse	m_{pm}	648 g	648 g	648 g
Stegbreite	b	0,5 mm	-	-

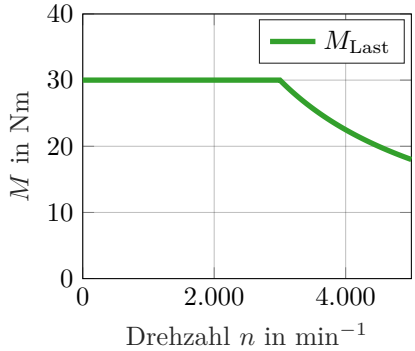

Abb. 3: Mn-Kennlinie

Segmentierter Rotor

Durch die Segmentierung des Rotors (Abb. 4) wird die magnetische Streuung verringert und die Drehmomentdichte erhöht. Abb. 5 zeigt, dass der Strombedarf mit Segmentierung (grüne Kurve) bis etwa 4.200 min^{-1} geringer ist. Da der maximale Anfahrstrom oft durch Umrichter und thermische Randbedingungen begrenzt ist, definiert er den notwendigen Bauraum der Maschine. Um diesen zu reduzieren und die Drehmomentdichte zu erhöhen, werden die Flusskennfelder ohne Stege mit der axialen Länge skaliert. Der Strombedarf der kürzeren Maschine (rot gestrichelte Kurve) entspricht im Anfahrstrom dem des IPM-Rotors (Abb. 2), wodurch die Umrichtergrenzen eingehalten werden. So kann die axiale Länge des Antriebs um 3,8 % verkürzt werden.

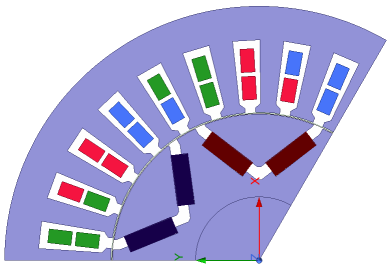

Abb. 4: Segmentierter Rotor

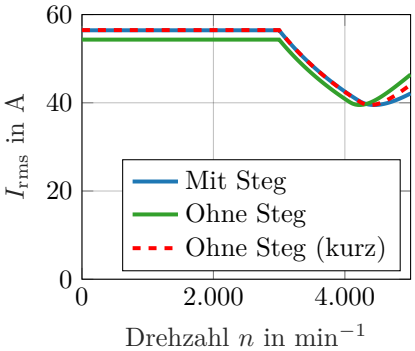

Abb. 5: Strombedarf für Lastprofil

Neben der Bauraumreduktion sind weitere Ansätze zur Optimierung des Antriebs denkbar. So könnte das Rotorjoch aus einem anderen Elektroblech oder direkt aus der Welle als Vollmaterial gefertigt werden, da in diesem Bereich kaum Eisenverluste entstehen. Wenn die Geometrie des Rotorjochs direkt in der Welle eingearbeitet wird, können weitere Komponenten zur Welle-Nabe-Verbindung entfallen und die axiale Länge weiter verkürzt werden. Eine Schwierigkeit und weiterer Forschungsbedarf liegt in der Fertigungstechnik, weshalb weitere Kooperationsprojekte mit Unternehmen angestrebt werden.

Weitere Ansätze

Am Institut ELSYS werden beispielsweise folgende weitere Ansätze zur Entwicklung von innovativen Antrieben verfolgt:

- Wicklungsausführungen (Gramme-Wicklung, kombinierte Y-Δ-Verschaltung, Hairpin)
- Transversalfluss- und Axialflussmaschinen
- Synchronreluktanzmaschinen als Antriebe ohne Seltene Erden
- Recyclingfähigkeit bei elektrischen Antrieben
- Berücksichtigung von umrichterbedingten Verlusten in Lastzyklen
- Fertigungseinfluss und Eigenschaften von weich- und hartmagnetischen Materialien

Literatur

[1] T. Wilfling, M. Schmidt, A. Dietz und A. Möckel. „Segmented exterior-rotor PMSM for increased torque density“. *2023 13th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*. 2023, S. 1–8. DOI: 10.1109/EDPC60603.2023.10372162.