

Entwicklung eines Hybridantriebssystems für kommunale Spezialfahrzeuge in Off-Road-Anwendungen

Prof. Dr.-Ing. habil. Uwe Nuß
Fakultät Elektrotechnik
und Informationstechnik (E+I)

Badstraße 24
77652 Offenburg
Tel. 0781 205-309
E-Mail: uwe.nuss@fh-offenburg.de

1960: Geboren am 13.06. in Pforzheim
1980–1985: Studium der Elektrotechnik an der Universität Karlsruhe (TH)
1985–1994: Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Elektrotechnischen Institut der Universität Karlsruhe, 1989 Promotion, 1994 Habilitation
1994–2003: Industrietätigkeit bei der Struckmeier GmbH (ab 2001: Wittur GmbH), ab 1995 stellvertretender Entwicklungsleiter
Seit 2003: Professor für elektrische Antriebstechnik, Leistungselektronik, Regelungstechnik sowie Grundlagenfächer an der Hochschule Offenburg
Seit 2006: Mitglied des Instituts für Angewandte Forschung (IAF) der Hochschule Offenburg



Forschungsgebiete: Hochdynamische Regelung elektrischer Antriebe

1.4 Entwicklung eines Hybridantriebssystems für kommunale Spezialfahrzeuge in Off-Road-Anwendungen

Prof. Dr.-Ing. habil. Uwe Nuß

Abstract

In this paper the actual stage of development of the cooperation project "development of a hybrid-electric power train for municipal special-purpose vehicles in off-road applications" is described. In detail, the common operation modes of the synchronous drive as well as the energy management requirements and the demands on the battery protection circuit are discussed. A short preview onto the following project steps closes the article.

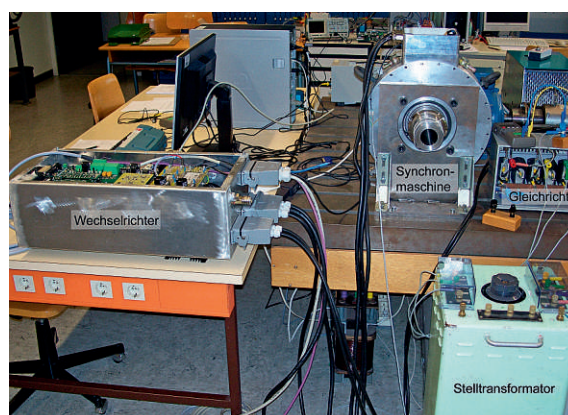
Einleitung

In [1] wurde bereits berichtet, dass im Labor für elektrische Antriebe und Leistungselektronik in Kooperation mit den Firmen Heinzmann GmbH & Co. KG und LADOG-Fahrzeugbau und Vertriebs GmbH ein Wechselrichter zur Speisung eines Synchronmotors für einen Hybridantrieb eines kommunalen Spezialfahrzeugs entwickelt wird. Während in [1] wegen der damals erst kurzen Projektlaufzeit nur die ersten Projektschritte beschrieben werden konnten, wird in diesem Beitrag der derzeit erreichte Entwicklungsstand dargestellt.

Erreichter Entwicklungsstand

Inzwischen liegen die zum elektrischen Teil des Antriebspakets gehörende permanentmagneteregte Synchronmaschine und der sie speisende Wechselrichter als eigenentwickelte Prototypen vor. Ab-

Abb. 1.4-1: Laboraufbau des Synchronantriebs für das hybridmotorbetriebene kommunale Spezialfahrzeug



bildung 1.4-1 zeigt beide Antriebskomponenten, wie sie zu Prüfzwecken im Labor für elektrische Antriebe und Leistungselektronik aufgebaut sind.

In Kürze werden sie zusammen mit der als Energiespeicher dienenden 390V-Lithium-Ionen-Batterie in das Testfahrzeug eingebaut. Auf einem Belastungsprüfstand des Kooperationspartners Heinzmann GmbH & Co. KG konnten außerdem schon die projektierten Nenndaten des Antriebs verifiziert werden. Besonders erwähnenswert ist aus Sicht der Hochschule Offenburg der maximale Dauerausgangsstrom des wassergekühlten Wechselrichters in Höhe von 220 A bei einer Schalt- und Regelfrequenz von 8 kHz.

Betriebsweisen des Synchronantriebs

Im Fahrbetrieb wird der Synchronantrieb im Regelfall drehmomentgesteuert betrieben.

Der Wechselrichter erhält hierbei vom übergeordneten Hybridsteuergerät einen Drehmomentsollwert, der wechsel-

richterintern in eine dazu proportionale Stromsollwertamplitude für die Synchronmaschine umgerechnet und mit Hilfe eines pulsbreitenmodulations- und raumzeigerbasierten Stromzustandsreglers [2] und sechs in Drehstrombrückenschaltung angeordneten IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistors) in den Motor eingepreßt wird. Währenddessen wird die Drehzahl des gesamten Hybridantriebs maßgeblich vom Dieselmotor und seiner Ansteuerung bestimmt.

Je nach Belastungssituation kann der Synchronantrieb das Drehmoment des Dieselmotors unterstützen, z. B. bei einer kurzzeitigen Belastungserhöhung oder überschüssiges Drehmoment des Dieselmotors zur Aufladung der Lithium-Ionen-Batterie verwenden, beispielsweise im Leerlauf oder beim Abbremsen des Fahrzeugs. Auf diese Weise gelingt es, den Dieselmotor möglichst lang in einem optimalen Betriebszustand zu halten und dadurch seinen Wirkungsgrad zu verbessern bzw. die Abgasemissionen herabzusetzen.

Schließlich muss der Synchronantrieb noch den drehzahlregelmäßigen Betrieb beherrschen, um als Starter für den Dieselmotor wirken zu können.

Energiemanagement und Batterieschutz

Wird dem Synchronantrieb ein motorisch wirkendes Drehmoment bei nicht vernachlässigbarer Drehzahl vorgegeben, dann führt das wegen der Leistungsabgabe des Motors zu einer Abnahme des Energieinhalts der Lithium-Ionen-Batterie. Bei einem generatorisch wirkenden Drehmoment erhöht sich dagegen der Energieinhalt der Batterie. Da weder ein bestimmter Maximalwert der Batterieausgangsspannung überschritten werden darf – im vorliegenden Fall 425 V – noch eine bestimmte Mindestspannung zu unterschreiten ist, muss bei der Drehmomentsollwertvorgabe der Ladezustand der Lithium-Ionen-Batterie miteinbezogen werden. Um alle Bedingungen, die zu beachten sind, berücksichtigen zu können und einander entgegengesetzte Forderungen geeignet zu priorisieren, ist ein intelligentes Energiemanagement erforderlich. So hat beispielsweise bei einem mittleren Batterieladezustand die Entlastung des Dieselmotors bei einer Belastungserhöhung mit begrenzter Dauer eine höhere Priorität als die Vermeidung der Abnahme des Batterieenergieinhalts. Bei niedrigem Ladezustand der Batterie ist die Prioritätsverteilung dagegen genau umgekehrt.

Bereits die Ermittlung des Ladezustands der Lithium-Ionen-Batterie ist eine nicht zu unterschätzende Aufgabe, zumal er nicht allein an der Batteriespannung zu erkennen ist. Vielmehr muss die Stromaufnahme bzw. -abgabe der Batterie fortwährend integriert werden, woraus dann unter Einschluss weiterer Informationen auf den Ladezustand geschlossen werden kann. Zwar liefert die Batterie über eine CAN-Buskommunikation die gewünschten Daten direkt an das Hybridsteuergerät. Zur Redundanzserhöhung ist es aber auch wünschenswert, dass das Hybridsteuergerät Informationen über den Batteriestrom und die Batteriespannung über eine weitere Quelle erhält. Da der Wechselrichter aufgrund seiner Sensoren und seiner hohen Messgliedabtastraten am ehesten in der Lage ist, diese redundanten Informationen zu liefern, erfolgt dort durch eine Leistungsbilanzauswertung die Berechnung des im Wechselrichter selbst nicht

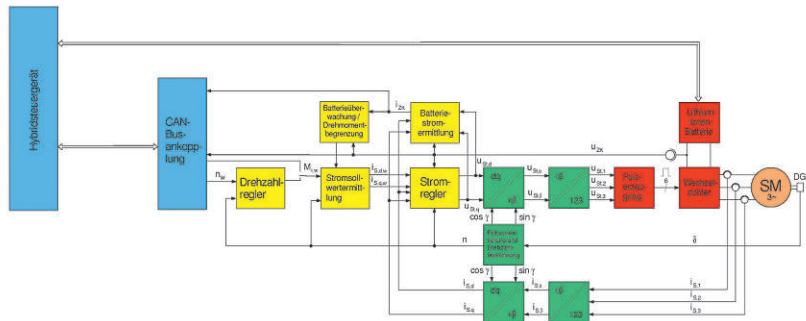


Abb. 1.4-2: Übersicht über die Steuerungs-, Regelungs- und Überwachungsstruktur des Synchronantriebs für Hybridantriebszwecke

gemessenen Batteriestroms. Über den CAN-Bus wird diese Information dann gemeinsam mit der gemessenen Batteriespannung an das Hybridsteuergerät weitergeleitet.

Um die relativ teure Lithium-Ionen-Batterie möglichst sicher vor Über- oder Tiefentladung sowie vor zu schnellem Auf- und Entladen zu schützen, wurden im Wechselrichter redundante, vom Hybridsteuergerät unabhängige Überwachungs- und Reaktionsmöglichkeiten geschaffen. So wird beispielsweise ständig die Höhe des ermittelten Batteriestroms und der Batteriespannung überwacht und bei Überschreiten erster festgelegter Schwellwerte das Drehmoment selbsttätig im Betrag reduziert, wodurch der Leistungsaustausch mit der Batterie abnimmt. Bei Überschreiten eines höheren Schwellwertes wird der Antrieb dann gesperrt.

Zur Veranschaulichung des Zusammenwirkens der beschriebenen Komponenten zeigt die Abbildung 1.4-2 ein entsprechendes Übersichtschaltbild, das darüber hinaus noch um die wesentlichen Funktionsblöcke für die Synchronmaschinenregelung ergänzt ist.

Die Spannung der Lithium-Ionen-Batterie ist darin mit u_{zk} und der Batteriestrom mit i_{zk} bezeichnet. $M_{i,w}$ ist der vom Hybridsteuergerät vorgegebene Drehmomentsollwert, n_w der Drehzahlsollwert, n der Drehzahlwert, Δ der mechanische Rotorwinkel sowie $i_{s,1}$, $i_{s,2}$ und $i_{s,3}$ die Statorphasenströme der Synchronmaschine. Der Stromregler, der in einem rotorfesten Koordinatensystem arbeitet, erhält seine Istwerte $i_{s,d}$ und $i_{s,q}$ durch Transformation der Phasenströme in dieses rotierende Koordinatensystem. Es handelt sich dabei um zwei hintereinander geschaltete Transformationen, wobei

die zweite Transformation eine Raumzeigertransformation um den elektrischen Rotorwinkel γ ist. Die vom Stromregler ermittelten Stellgrößen, die Stuerspannungsraumzeigerkomponenten $u_{st,d}$ und $u_{st,q}$ werden dann wieder in die Phasengrößen $u_{st,1}$, $u_{st,2}$ und $u_{st,3}$ zurücktransformiert und unter Einbeziehung von Maßnahmen zur Stellbereichserweiterung sowie von Begrenzungs- und Kompensationsmaßnahmen einem Pulsweitenmodulator zugeführt, der schließlich die Ansteuersignale für die Leistungstransistoren des Wechselrichters erzeugt.

Abgesehen von einigen noch ausstehenden Optimierungsarbeiten, ist die Entwicklung der in Abbildung 1.4-2 dargestellten Struktur abgeschlossen und zum Teil, wie bereits erwähnt, an einem stationären Belastungsprüfstand schon verifiziert. Im darauf folgenden Schritt müssen nun Erfahrungen beim Testbetrieb der demnächst in das Versuchsfahrzeug einzubauenden Komponenten gesammelt und ggf. erkannte Schwachstellen beseitigt werden.

Das beschriebene Projekt wurde von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) gefördert. Der Autor dankt der AiF für die gewährte finanzielle Unterstützung.

Referenzen/References

[1] Nuß U.: Drehgeberlose Synchronmotorregelung für Off-Road-Hybridfahrzeuge. Beiträge aus Forschung & Technik 2008, Hochschule Offenburg, Offenburg

[2] Nuß U.: Hochdynamische Regelung elektrischer Antriebe. Erscheint demnächst im VDE-Verlag, Berlin/Offenbach, 2010