

Ein Beitrag zur thermischen Ausnutzung permanenterregter Synchronmotoren in automobilen Traktionsanwendungen

Essentielle Anforderungen moderner Antriebssysteme für (teil-)elektrisch angetriebene Fahrzeuge sind eine hohe Leistungs- und Drehmomentdichte bezogen auf Volumen und Gewicht. Hierbei determinieren insbesondere die zulässigen Grenztemperaturen wichtiger Motorkomponenten das transient sowie dauerhaft erzielbare elektromechanische Leistungspotential. Für die in automobilen Anwendungen häufig eingesetzten permanenterregten Synchronmotoren (PMSM) ist die Temperaturverteilung innerhalb der Wicklung und der Permanentmagnete von besonderem Interesse. Werden hier spezifizierte Temperaturen überschritten, kann es zu einem Isolationsbruch bzw. zu einer irreversiblen Entmagnetisierung kommen. Beides führt i.d.R. zu einem Austausch des Motors, da eine Reparatur ökonomisch nicht darstellbar ist.

Um den thermischen Bauteilschutz zur Laufzeit zu gewährleisten, werden Motoren in der industriellen Praxis häufig überdimensioniert, was zusätzlichen Gewichts- und Bauraumbedarf und höhere Produktionskosten bedingt. Alternativ kann ein aktives Thermomanagement eingesetzt werden, welches die zulässige Motorleistung in Abhängigkeit des thermischen Zustands regelt. Dies erlaubt sowohl die thermischen Kapazitäten des Motors, z.B. bei Überholvorgängen, gezielt auszunutzen als auch die Leistungsaufnahme im thermisch stationären Betrieb zu maximieren, d.h. den Grad der Motorüberdimensionierung in der Konstruktionsphase zu minimieren. Substantielle Voraussetzung hierfür ist die Kenntnis wichtiger Motortemperaturen zur Laufzeit – eine messtechnische Erfassung dieser ist allerdings aus Kosten- und Ausfallsicherheitsgründen, insbesondere innerhalb des Rotors, nicht möglich. Hauptaugenmerk dieser Arbeit liegt daher auf der modellbasierten Temperaturschätzung.

Hierfür wurden zwei unabhängige Methoden für einen exemplarischen PMSM erarbeitet und am Prüfstand validiert. Der erste Ansatz stellt eine direkte thermische Modellierung mittels konzentrierter Parameter (*lumped parameter thermal network* - LPTN) dar. Hierfür wurde ein mehrstufiges Verfahren entwickelt, welches beginnend mit einer analytischen Modellierung basierend auf Konstruktions- und Materialdaten eine zusätzliche experimentelle Identifikation wichtiger Modellparameter vorsieht (sog. Grey-Box Ansatz). Das zugrundeliegende LPTN stellt hierbei ein lineares, parametervariantes Modell hinsichtlich der thermischen Zustände dar, welches zudem ein nichtlineares Verlustleistungsmodell im Eingangspfad aufweist. Zur Identifikation dieses Gesamtmodells wurde ein sog. globales Identifikationsverfahren auf Basis einer Partikelschwarmoptimierung erarbeitet, welches gegenüber dem Stand der Technik eine robuste Identifikation mit besonderem Fokus des kritischen Überlastbetriebs ermöglicht. Der zweite Ansatz zielt auf die indirekte Temperaturbeobachtung durch Schätzung temperaturabhängiger Parameter innerhalb des elektrischen Motormodells ab. Hier steht insbesondere die Remanenzflussdichte der Permanentmagnete im Fokus. Da die Temperatursensitivität der Magnete vergleichsweise gering ausfällt, ist eine exakte Modellierung des elektrischen Motors als auch des speisenden Umrichters erforderlich, da andernfalls signifikante Beobachtungsfehler resultieren. Da die direkte und indirekte Temperaturermittlung vollständig unabhängig voneinander sind, wurde ferner die Fusionierung beider Ansätze mittels Kalman-Filter zur Erhöhung der Schätzperformanz untersucht. Hierbei wurde die optimale Auslegung des Filters mit Bezug auf die praxisnahe Anwendung gegenüber den ideal-typischen Annahmen in der Filtertheorie diskutiert.

Abschließend wurden obige Modelle innerhalb einer konventionellen sowie prädiktiven Temperaturregelung genutzt. Hierbei wurden die Vorteile einer modellprädiktiven Regelung (*model predictive control* - MPC) hinsichtlich der Erhöhung der maximalen elektromechanischen Leistungswandlung gegenüber einer konventionellen Regelung ohne Prädiktion herausgestellt. Als Fallbeispiel wurde hierfür ein vereinfachtes Fahrzeug-, Fahrer- sowie Streckenmodell im Sinne einer Rennsimulation erarbeitet. Durch die Kenntnis zukünftiger Lastanforderungen kann der MPC-Ansatz die gewandelte Energiemenge erhöhen und daher ein gegebenes Streckenprofil unter Einhaltung definierter Grenztemperaturen schneller durchfahren als der konventionelle Ansatz. Die Bedeutung des Prädiktionshorizonts bzw. möglicher Prädiktionsfehler im Lastprofil wurden ebenfalls herausgestellt.