



Parametrierung eines hochgenauen E-Motor-Emulators

In einem vollautomatisierten Verfahren können E-Motoren auf dem Prüfstand so vermessen werden, dass mit den Ergebnissen ein E-Motor-Emulator parametrierbar wird. Bei der Anwendung desselben Verfahrens auf dem Emulator konnte AVL zeigen, dass das System eine sehr hohe Emulationsqualität besitzt. Seine Qualität wurde mithilfe von Flussverkettungskennfeldern analysiert.

INVERTER

In den aktuellen Konzepten für Elektrofahrzeuge spielen Inverter eine zentrale Rolle. Sie kombinieren eine Vielzahl von Komfort- und Sicherheitsfunktionen und beeinflussen nennenswert den Systemwirkungsgrad und somit die Reichweite des Fahrzeugs. Damit wird die Bedeutung von spezialisierten Testsystemen



AUTOREN



Ali Sinnmaz, M. Sc.

ist Application Engineer E-Drive Test Systems bei der AVL List GmbH in Graz, Österreich.



Klement Kralj, M. Sc.

ist Application Manager Inverter Test Systems bei der AVL List GmbH in Graz, Österreich.



Dr.-Ing. Patrick Winzer,

Head of Model Design bei der AVL SET GmbH in Wangen im Allgäu.



Mario Propst

ist Senior System Line Manager E-Drive bei der AVL List GmbH in Graz, Österreich.

für Inverter immer größer. Der E-Motor-Emulator (EME) als Kernbestandteil eines solchen Inverter-Testsystems bietet mit seinem Power-Hardware-in-the-Loop-Ansatz (PHIL) alle Möglichkeiten, schnell, effizient und genau auf Signal- und Leistungsebene testen zu können, ohne dabei aufwendige Testhardware wie E-Motor-Prüfstände zu benötigen.

Ein EME-basiertes Inverter-Testsystem kann eine breite Palette an Tests abdecken. In frühen Entwicklungsstadien können Reglermodelle und Hardware des Antriebsinverters validiert und optimiert werden. Erste Prototypen durchlaufen komplexe Prüfzenarien unter realen Umweltbedingungen mithilfe von Automatisierungssystemen. Funktionale und Sicherheitstests sind durchführbar, indem mit speziellen Prüfstandskomponenten externe Fehler aufgeschaltet werden, etwa Kurzschlüsse sowie Brüche auf den Motorphasen oder den Signalverbindungen. Schließlich können Inverter-Testsysteme am Bandende in End-of-Line-Testzenarien oder bei der Fehleranalyse bei Rückläufern aus dem Feld verwendet werden.

Die Relevanz dieser Tests hängt direkt von der Genauigkeit der Parametrierung der E-Motor-Modelle im EME ab. Es ist möglich, die benötigten Parameter entweder anhand der Motor-Typenschildaten, anhand von Berechnungen wie Finite-Elemente-Simulationen (FE) oder anhand von Messdaten realer E-Motoren zu erhalten.

Die Typenschilddaten des E-Motors liefern normalerweise nur begrenzte Informationen für die Parametrierung und führen zu einer ungenauen Emulation, die lediglich für grundlegende Funktionstests verwendet werden kann. FE-

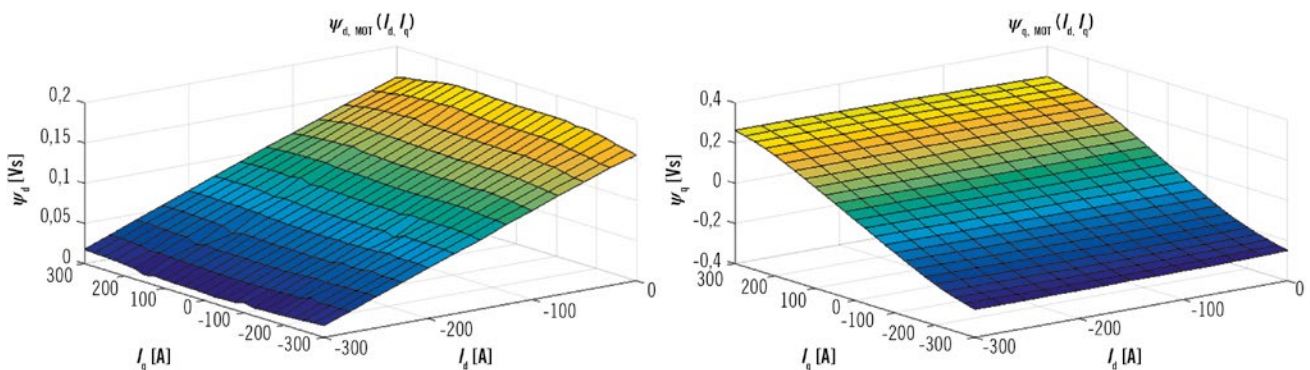


BILD 1 Die Flussverkettungsergebnisse in der d- und q-Achse am E-Motor-Prüfstand (© AVL)

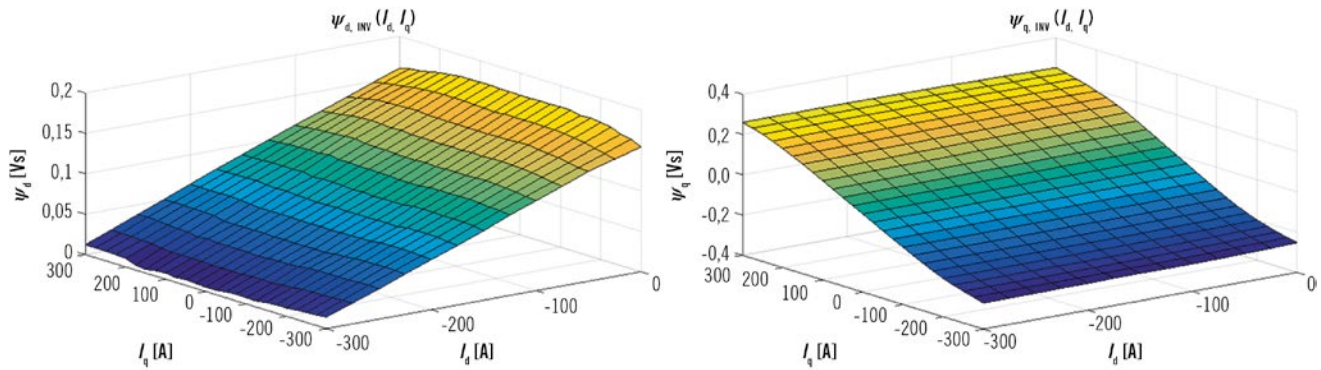


BILD 2 Die Flussverkettungsergebnisse in der d- und q-Achse am Inverter-Prüfstand (© AVL)

Simulationen hingegen stellen erheblich genauere Daten zur Verfügung, die etwa magnetische Sättigung und Kreuzverkopplungen der d- und q-Achse beinhalten. Damit können bereits deutlich tiefergehende Tests wie die Optimierung von Stromreglern durchgeführt werden. Auch Sensitivitätsanalysen unter Berücksichtigung von Produktionstoleranzen beim E-Motor können damit gefahren werden.

Die Prüfstandsmessung eines E-Motors berücksichtigt dagegen alle real auftretenden Effekte und parametrisiert exakt diesen einen real vorliegenden Motor. Die Emulationsqualität des EME wird durch die Verwendung der gemessenen Daten eines realen E-Motors daher maximiert.

Am Beispiel einer dreiphasigen Permanentmagnet-Synchronmaschine (PMSM) wird nachfolgend eine vollautomatisierte Parametrierungsroutine beschrieben, mit der E-Motoren am rotierenden E-Motor-Prüfstand vermessen werden können, um mit dem Ergebnis einen EME zu parametrieren. Anschließend wird die Emulationsqualität des EMEs validiert, indem genau die gleiche Routine diesmal am EME selbst durchgeführt wird und die Ergebnisse mit denen des E-Motor-Prüfstands verglichen werden.

PARAMETRIERUNGSROUTINE AM E-MOTOR-PRÜFSTAND

Der EME benötigt folgende Parameter:

- Polpaarzahl p
- Statorwiderstand R_s
- Kennfelder der Statorflussverkettung (ψ_d, ψ_q) in Abhängigkeit der Ströme (i_d, i_q).

Die Anzahl der Polpaare wird entweder anhand des Motor-Typenschildes oder durch die Analyse der elektrischen Frequenz der induzierten Spannung

im Leerlauf der Maschine unter Berücksichtigung der Drehzahl bestimmt.

Der Statorwiderstand wird über die Klemmen des E-Motors mit einer Vierpunktmessung bestimmt. Da der Kupferwiderstand wesentlich von der Temperatur beeinflusst ist, wird diese Messung zuerst bei Raum- und dann bei definierter Statortemperatur (zum Beispiel 70 °C) durch Konditionieren

des E-Motors durchgeführt. Die Zunahme des Kupferwiderstands wird als linear angenommen.

Die Temperatur des E-Motors verändert auch die von den Permanentmagneten erzeugte Flussverkettung ψ_{PM} . Aufgrund der räumlichen Trennung und des Luftspalts entspricht ihre Temperatur nicht der Statortemperatur, die direkt gemessen werden kann. Um auf die Permanent-

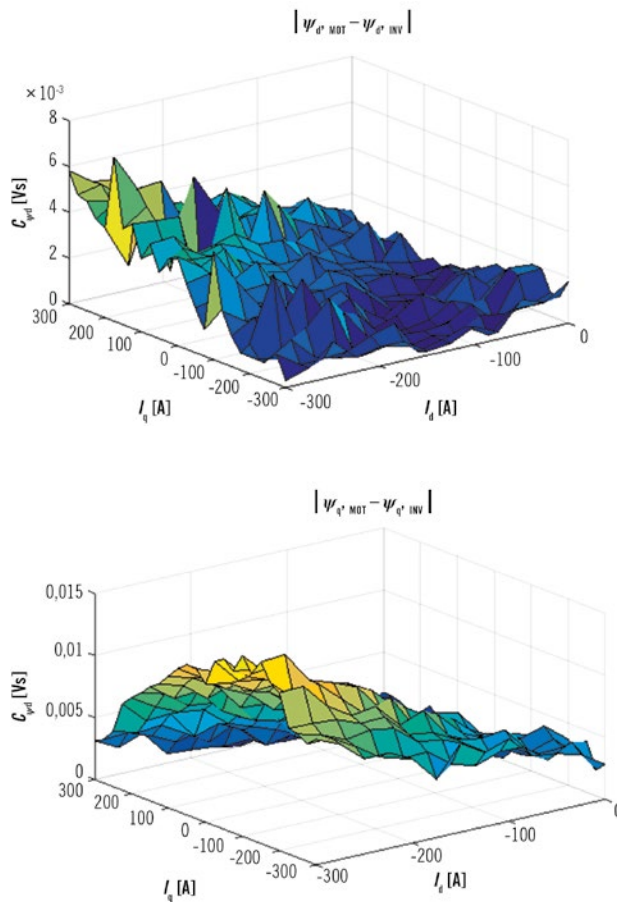


BILD 3 Die absoluten Unterschiede der Flussverkettungen in d- und q-Achse von E-Motor und Inverter Prüfständen (© AVL)

Typ	Permanentmagnet-Synchronmotor
Anzahl der Polpaare	4
Maximale Leistung	260 kW
Nenndrehzahl	3000/min
Maximale Drehzahl	9000/min
Nennstrom (Effektivwert)	300 A
Maximales Drehmoment	760 Nm

TABELLE 1 Spezifikationen des zu prüfenden E-Motors (© AVL)

Maximale Leistung	260 kVA
DC-Spannungsbereich	200 bis 800 V
Nennstrom (Effektivwert)	300 A
Maximaler Strom (Effektivwert)	490 A
Nennschaltfrequenz	7,3 kHz

TABELLE 2 Spezifikationen des Inverters (© AVL)

magnettemperatur zu schließen, kann man wie folgt vorgehen: Im thermischen Gleichgewicht zwischen Rotor und Stator wird ein Leerlaufstest durchgeführt, bei dem die Amplitude der induzierten Spannung gemessen wird. Dies wird für mindestens zwei Temperaturniveaus durchgeführt. Die Amplitude der induzierten Spannung verhält sich dabei proportional zur Permanentmagnetflussverkettung. Dieser Zusammenhang lässt von der Amplitude der induzierten Spannung im Leerlauf durch Interpolation auf die Permanentmagnettemperatur schließen.

Sobald die Temperaturprofile des Statorwiderstands und der Permanentmagnetflussverkettung vorliegen, kann die Parametrierungsroutine zur Bestimmung der Statorflussverkettungskennfelder in Abhängigkeit des Statorstroms durchgeführt werden.

Prüfstands Aufbau, eingesetzte Messtechnik und Testmethodik sind ent-

scheidend, um qualitativ hochwertige Kennfelder zu erhalten. Die Parametrierungsroutine ist vollautomatisch, um die stationäre Messqualität und Temperaturkontrolle sicherzustellen. Der Inverter wird im Stromregelungsmodus betrieben. Definierte Stromsollwerte in der d- und q-Achse (i_d, i_q) sind vorgegeben. Diese Sollwerte befinden sich innerhalb der Belastungsgrenze von Statorwicklung und Inverter, die in einem kartesischen Raster innerhalb des Maximalstromkreises (MA-Kreis) liegen. Der Stützstellenabstand ist in diesem Beispiel auf 25 A festgelegt, woraus 325 Messpunkte resultieren.

Die Lastmaschine wird auf eine konstante Drehzahl im Nominalbereich des zu vermessenden E-Motors geregelt. Die Rotorposition wird im beschriebenen Versuchsaufbau mit einem Resolver gemessen. Das verwendete Leistungsmessgerät verwendet die Rotorlageinfor-

KST

TESTING POWERTRAINS TO MOVE THE FUTURE

As an innovative and certified test facility with long-standing tradition we offer our global customer pool from the automotive, heavy duty and non road mobil machinery sectors highly dynamic test benches with modern measuring technology for combustion engines (up to 4MW), hybrid drive trains and electric engines. We invite you to try out and test our services and opportunities. Convince yourself of our competence! We will actively support you and address your specific needs!

KST's capacity and range of technical testing services:

- 200+ highly qualified employees
- 85+ test benches
- 3-shift system 24 hrs / 365 days
- Internal combustion engines incl. CNG, LPG
- Test benches for H2 ICE and fuel cell applications
- Electric motors and hybrids (BEV / PHEV / HV)
- Power range 500 kW
- Voltage source 1.000V / 2.000A / 500kW
- Environmental endurance testing (L-02 / L-03)
- Realtime motor emulation (EME)
- Electrical tests (LV-123 / LV-124 / LV-148)
- Heavy duty engines (up to 4MW)
- Transmissions, drive trains
- Component testing
- External gearboxes for flight engines
- Real driving emissions (RDE)

mation, um die gemessenen Phasenströme und -spannungen in das d/q-System zu transformieren.

Da die zu messenden Flussverkettungskennfelder aufgrund der beschriebenen Eigenschaften des Permanentmagneten stark von der Temperatur abhängig sind, muss der E-Motor während der Parametrierungsroutine konstant in einem engen Temperaturbereich betrieben werden. Dies wird durch regelmäßige Messungen der Stator- und Rotortemperaturen und mithilfe von Konditionierungsintervallen sichergestellt. Die Statortemperaturen werden über in den E-Motor integrierte Widerstandsthermometer erfasst, während die Rotortemperatur mit dem beschriebenen Verfahren abgeschätzt wird. Liegen die Temperaturen zu hoch, wird ein Abkühlungsintervall eingeschoben, liegen sie zu niedrig, wird die Maschine durch zwischenzeitiges Betreiben unter Volllast wieder aufgewärmt.

Die Flussverkettungskennfelder werden basierend auf den gemessenen Strom- und Spannungsmesswerten in d- und q-Achse online berechnet und in einer Datei gespeichert. Dabei wird sichergestellt, dass der Lastpunkt im Messzeitraum stabil anliegt. Die Resultate der Vermessung sind in den Kennfeldern abgebildet, **BILD 1**.

VERIFIZIERUNG AM E-MOTOR-EMULATOR

Im zweiten Teil wird der EME mit den am Prüfstand ermittelten Parametern p , R_s und ψ_d , ψ_q (i_d , i_q) initialisiert. Der Resolveremulator des EMEs wird entsprechend dem verwendeten Resolver auf dem Prüfstand parametrieren.

Zur Vermeidung von Abweichungen durch unterschiedliche Aufbauten ist die Verkabelung zwischen Inverter und EME in etwa so lang wie die zwischen Inverter und E-Motor am E-Motor-Prüfstand. Darüber hinaus werden die gleichen Messgeräte und Leistungsanalysatoren verwendet.

Die Testsequenz kann direkt vom E-Motor-Prüfstand übernommen werden, da die für den Betrieb des EME benötigten Schnittstellen die gleichen sind wie am rotierenden E-Motor-Prüfstand. Dasselbe gilt für die Sollwerte bezüglich Drehzahl und den d- und q-Strömen.

Am Inverter-Prüfstand gibt es keine reale Lastmaschine, die die Drehzahl

einregelt. Das passiert über eine Sollwertvorgabe vom Automatisierungssystem. Der EME setzt diesen Befehl unverzüglich um und emuliert eine konstante Drehzahl. Die Temperaturverhältnisse der E-Maschine werden ebenfalls über Software nachgebildet. Einregelvorgänge und Konditionierungsintervalle entfallen somit am Inverter-Prüfstand. Das verkürzt die Testzeiten spürbar. Die Ergebnisse, **BILD 2**, haben dasselbe Format wie die vom rotierenden Prüfstand.

VERGLEICH ZWISCHEN E-MOTOR UND INVERTER-PRÜFSTAND

Zum Nachweis der hohen Emulationsqualität werden die Ergebnisse des rotierenden Prüfstands und des EMEs verglichen. **BILD 3** zeigt die absoluten Unterschiede der d- und q-Flussverkettungen ($|\psi_{d, \text{MOT}} - \psi_{d, \text{INV}}|$ und $|\psi_{q, \text{MOT}} - \psi_{q, \text{INV}}|$). Die Abweichungen in jeder Achse werden anschließend bestimmt, indem die Nennflussverkettung des E-Motors als Referenz herangezogen und wie in Gl. 1 und Gl. 2 berechnet wird.

$$\text{Gl. 1} \quad e_d = \frac{|\psi_{d, \text{MOT}} - \psi_{d, \text{INV}}|}{\psi_s^{\text{nom}}}$$

$$\text{Gl. 2} \quad e_q = \frac{|\psi_{q, \text{MOT}} - \psi_{q, \text{INV}}|}{\psi_s^{\text{nom}}}$$

$\psi_{d, \text{MOT}}$: Flussverkettungskennfeld der d-Achse am E-Motor-Prüfstand
 $\psi_{q, \text{MOT}}$: Flussverkettungskennfeld der q-Achse am E-Motor-Prüfstand
 $\psi_{d, \text{INV}}$: Flussverkettungskennfeld der d-Achse am E-Motor-Emulator
 $\psi_{q, \text{INV}}$: Flussverkettungskennfeld der q-Achse am E-Motor-Emulator
 ψ_s^{nom} : Nennflussverkettung des E-Motors

Die resultierende Abweichung in der d-Achse (e_d) beträgt 0,69 %, in der q-Achse (e_q) 2,1 %. Das beweist eine qualitativ hochwertige Emulation durch den EME. Es wird angenommen, dass die größere Abweichung in der q-Achse mit der höheren Messempfindlichkeit der Flussverkettung in der q-Achse zusammenhängt, während die Flussverkettung auf der d-Achse hauptsächlich aus dem Permanentmagnetfluss besteht. Bei diesen Ergebnissen ist noch zu berücksichtigen, dass bei den Messungen (Motoridentifikation zur Bestimmung der Flusstabellen und die nachfolgende Validierungsmessung am EME) zwar das glei-

che Messequipment verwendet wurde, aber dennoch eine Messunsicherheit zugrunde liegt, die hier nicht berücksichtigt wurde.

AUSBLICK

In diesem Beitrag wurde ein vollautomatisiertes Verfahren präsentiert, mit dem E-Motoren auf dem Prüfstand so vermessen werden können, dass mit den Ergebnissen ein E-Motor-Emulator parametrieren werden kann. Die Anwendung desselben Verfahrens auf den E-Motor-Emulator selbst hat gezeigt, dass der E-Motor-Emulator eine sehr hohe Emulationsqualität besitzt.

Die Qualität des E-Motor-Emulators wurde mithilfe von Flussverkettungskennfeldern analysiert. Als weitere Analyse kann beispielsweise auch der Vergleich der spektralen Zusammensetzung der Stromsignale von E-Motor-Emulator und rotierendem Prüfstand herangezogen werden.

In künftigen Arbeiten ist geplant, den E-Motor-Emulator mit Flussverkettungskennfeldern zu parametrieren, die die Rotortemperatur als dritte Dimension besitzen. Damit kann nicht nur statisch, sondern auch während des Betriebs auf sich ändernde Temperaturen reagiert werden kann. Weitere Schritte sehen vor, die rotorlageabhängigen Oberwelleneffekte des E-Motors zu parametrieren und ebenfalls mithilfe eines dafür ausgelegten Modells im E-Motor-Emulator zu betreiben und zu validieren.

DANKE

Die Autoren bedanken sich herzlich bei Horst Hammerer, Managing Director bei der AVL SET GmbH, für die Mitwirkung bei der Erstellung dieses Beitrags.



DIESER BEITRAG IST IM E-MAGAZIN
VERFÜGBAR UNTER:

www.emag.springerprofessional.de/atz



6dTemp und Elektro, Straße und Prüfstand – wir machen das!

Egal was kommt – mit unserem neuen 4WD Antriebsstrang-Prüfstand für PKW und leichte NFZ sind wir allen Anforderungen gewachsen. Vom Verbrenner, Mild- oder Voll-Hybrid bis zum Elektroantrieb optimieren wir Ihre Motor- und Antriebssteuerung. Dabei nutzen wir die Ergebnisse aus kalibrierten RDE-Messfahrten und sorgen so für exakt konfigurierbare Testläufe mit realen Daten. Für schnellere und effizientere Testläufe und auf Wunsch fertig erarbeitete Optimierungen Ihrer Steuerungen.

So kommt Ihr Antriebskonzept schneller in Serie.