



Schnellere Validierung von Invertersoftware im Gesamtfahrzeugmodell

Ein neuer Simulationsansatz ermöglicht die realitätsnahe Validierung elektrischer Antriebssysteme auf Standardhardware und erstmals alltagstaugliche, schnelle und durchgängige Tests der Invertersoftware. Die notwendige Validierungszeit kann so erheblich reduziert werden. IPG Automotive und Persystems demonstrieren, wie sich detaillierte Leistungselektronik effizient simulieren und nahtlos in virtuelle Fahrzeugumgebungen integrieren lässt.

Die Leistungscharakteristik elektrischer Antriebe wird maßgeblich durch Software bestimmt. Regelalgorithmen für Strom, Drehmoment und Drehzahl sowie Strategien für Rekuperation, Thermomanagement und Schutzfunktionen beeinflussen Effizienz, Fahrbarkeit und Zuverlässigkeit. Eine Schlüsselkomponente des elektrischen Antriebsstrangs ist

der Traktionsinverter. Er wandelt die Gleichspannung der Hochvolt(HV)-Batterie in eine dreiphasige Wechselspannung um und übernimmt damit die elektrische Ansteuerung des Traktionsmotors, **BILD 1**. Mit zunehmender Elektrifizierung gewinnt die Invertersoftware als Differenzierungsfaktor für die Gesamtleistung des Antriebsstrangs immer mehr an Bedeutung.

INVERTERSOFTWARE

Die Software ist für hochdynamische Strom- und Drehmomentregelungen, Modulationsstrategien und Schutzfunktionen sowie die Koordination mit übergeordneten Fahrzeugsystemen zuständig. Moderne Regelungsverfahren ermöglichen schnelle Anpassungen im Millisekunden- und Mikrosekunden-

VERFASST VON



Dr. Felix Pfister
ist Lead Business Development Manager bei der IPG Automotive GmbH in Karlsruhe.



Dr. Tobias Lautenschlager
ist Chief Executive Officer bei der Persystems GmbH in Regensburg.



Henning Kemper
ist Senior Specialist Editor bei der IPG Automotive GmbH in Karlsruhe.



Abhijeet Gite
ist Applikationsingenieur bei der IPG Automotive Sweden AB in Göteborg (Schweden).

bereich, die sich unmittelbar auf das Fahrgefühl, die Drehmomentdynamik und die Traktion auswirken. Im Bereich der Rekuperation erlaubt die präzise Softwaresteuerung hohe Rückspeiseleistungen nahe der physikalischen Grenzbereiche, ohne Stabilität oder Sicherheit zu beeinträchtigen. Gleichzeitig wirkt sie sich auf die Belastung von Leistungshalbleitern und Elektromaschine und damit auf die Dauerhaltbarkeit des Antriebssystems aus.

Die Leistungsfähigkeit ergibt sich aus dem Zusammenspiel von Leistungselektronik, elektrischer Maschine und den darauf abgestimmten Regelalgorithmen,

BILD 2. Halbleitertechniken wie Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistoren (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistors, MOSFETs) auf Basis von Siliziumkarbid (SiC) ermöglichen zwar höhere Schaltfrequenzen und Wirkungsgrade, erfordern jedoch auch eine anspruchsvollere Regelung und Systemintegration sowie Schutzmechanismen. Die Nutzung dieser Potenziale hängt wesentlich von der Qualität der Steuerungssoftware ab.

Daraus folgt die zentrale Herausforderung, die Invertersoftware unter variierenden dynamischen Betriebsbedingungen und auf Systemebene zu validieren. Hierfür sind hochpräzise Regelstreckenmodelle (Plant-Modelle) erforderlich, die das schaltbasierte Verhalten der Leistungselektronik und die elektromagnetischen Eigenschaften der Maschine realitätsnah abbilden.

SOFTWAREVALIDIERUNG

In der Praxis erfolgt die Validierung von Invertersoftware häufig über Hardware-in-the-Loop-Systeme. Diese bieten eine hohe Modelltreue, sind jedoch hardwareintensiv und nur begrenzt skalierbar. Gleichzeitig sind detaillierte elektrische

Simulationen auf Standardrechnern oft zu langsam, sodass selbst kurze Fahrscenarien mehrere Stunden Rechenzeit benötigen. Der vorgestellte Simulationsansatz auf Basis strukturhaltender Algorithmen (Structure-Preserving Algorithms, SEAs) adressiert diesen Engpass. Er ermöglicht die Berechnung hochdetaillierter Plant-Modelle bei deutlich reduzierter Rechenzeit und erhält gleichzeitig die strukturellen Eigenschaften des physikalischen Systems. Dadurch wird eine stabile und effiziente Simulation schaltender Leistungselektronik auf Standard-PC-Hardware möglich. Umfangreiche Validierungsschleifen lassen sich somit bereits früh im Entwicklungsprozess mit physikalisch realistischen Modellen durchführen. Die Einbettung in virtuelle Fahrzeugplattformen unterstützt zudem eine systemweite Analyse komplexer Antriebsarchitekturen und fördert die engere Kopplung zwischen Softwareentwicklung, Hardwareauslegung und Systemintegration.

ELEKTRISCHE SIMULATION

SEAs werden in Forschungsumgebungen genutzt, um hochdimensionale dynamische Systeme mit komplexen Energieflüssen langfristig stabil abzubilden. Die Übertragung dieser Konzepte auf ingenieurwissenschaftliche Anwendungen stellt hohe Anforderungen an Effizienz, Skalierbarkeit und industrielle Integration. Mit OverDrive stellt Persystems ein elektrisches Plant-Modell bereit, das auf einer Functional Mock-up Unit (FMU) basiert und strukturhaltende numerische Verfahren für die Simulation elektrischer Antriebssysteme nutzbar macht. OverDrive formuliert elektrische Netzwerke so, dass die energetische Struktur und Konsistenz der Energieflüsse auf der diskreten numerischen Ebene erhalten bleibt. Dadurch lassen sich Systeme mit schaltender Leistungselektronik, nichtlinearen Maschinenmodellen und hochdynamischen Regelkreisen stabil und effizient simulieren. Dies eröffnet neue

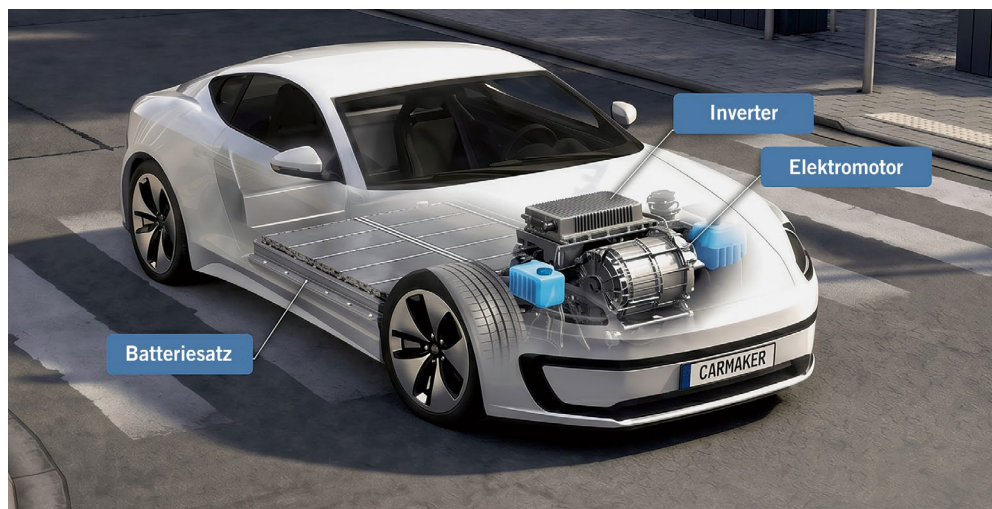


BILD 1 Schematische Darstellung eines batterieelektrischen Fahrzeugs mit Traktionsinverter, elektrischer Maschine und Hochvoltbatterie als zentrale Elemente des elektrischen Antriebsstrangs (© [M] IPG Automotive | Persystems)

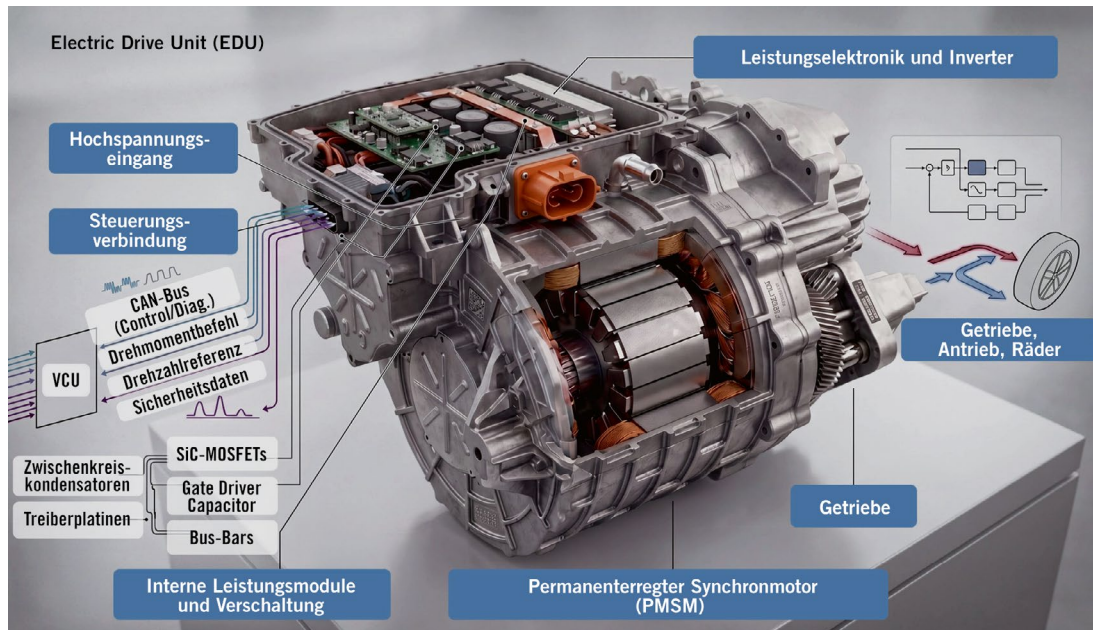


BILD 2 Integrierte elektrische Antriebseinheit mit Leistungselektronik, Traktionsinverter, permanenterregter Synchronmaschine und Getriebe
(© IPG Automotive | Persystems)

Möglichkeiten für eine skalierbare Validierung von Traktionsinvertersoftware.

Ein wesentliches Merkmal dieses Ansatzes ist die Fähigkeit, elektrische Antriebssysteme mit einer Detailtiefe abzubilden, wie sie aus spezialisierten Werkzeugen der Leistungselektronikentwicklung bekannt ist. Der SEA-basierte Solver unterstützt eine Modellierung, die funktional mit etablierten Umgebungen wie Matlab/Simulink vergleichbar ist. Schaltende Halbleiterbauelemente können mitsamt Schaltzuständen, Verlusten und parasitären Effekten explizit dargestellt werden. Hochaufgelöste Maschinenmodelle aus elektromagnetischen Simulationen lassen sich direkt einbinden und ermöglichen die Abbildung nichtlinearer Effekte wie magnetischer Sättigung, drehwinkelabhängiger Induktivitäten oder harmonischer Einflüsse. Ebenso können zusätzliche Ebenen des elektrischen Systems wie Batteriemodelle oder Leitungsimpedanzen berücksichtigt werden, wodurch eine konsistente Darstellung des Energiesystems entsteht. Regelstrukturen, etwa für das Drehmoment, lassen sich direkt mit den Plant-Modellen koppeln. Die strukturtreue numerische Formulierung gewährleistet eine effiziente Berechnung auch sehr detaillierter Modelle, ohne dabei die physikalische Konsistenz zu beeinträchtigen. Bestehende Software-

modelle (Legacy-Modelle) lassen sich weitgehend übernehmen.

SYSTEMINTEGRATION DES TRAKTIONSinVERTERS

Ein wesentlicher Teil des Innovationspotenzials zeigt sich auf der Ebene der Systemintegration. Die Invertersteuerung interagiert mit Fahrdynamikregelungen, Bremssystemen, Energiemanagementstrategien sowie übergeordneten Fahrzeugsteuerungen. Da diese Funktionen direkt auf das vom Inverter bereitge-

stellte Drehmoment zugreifen, wird der Inverter zu einem aktiven Stellglied innerhalb der fahrdynamischen Regelarchitektur. Ein relevantes Beispiel ist die softwareseitige Koordination von elektrischer Rekuperation und mechanischer Bremse. Um eine stabile Fahrzeugverzögerung und maximale Energierückgewinnung sicherzustellen, müssen beide Systeme eng aufeinander abgestimmt werden. Dies erfolgt vollständig über die Steuerungssoftware und erfordert eine schnelle und robuste Kommunikation.

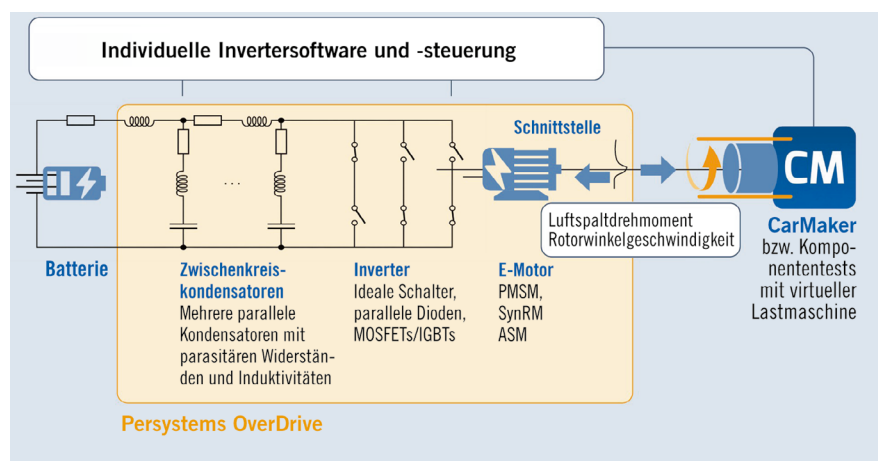


BILD 3 Systemarchitektur der Invertersoftwarevalidierung mit strukturtreuer elektrischer Simulation (OverDrive) und Einbettung in CarMaker (© IPG Automotive | Persystems)

Mit der zunehmenden Verbreitung von Mehrmotorarchitekturen in Elektrofahrzeugen gewinnt die softwarebasierte Integration weiter an Bedeutung. Mehrere elektrische Antriebe erfordern eine koordinierte Steuerung mehrerer Inverter, um das Drehmoment optimal zu verteilen. Bei radindividuellen Antrieben kann die Invertersteuerung direkt zur Umsetzung der Drehmomentverteilung (Torque Vectoring) beitragen.

Ein wesentlicher Vorteil elektrischer Antriebe liegt in der hohen Dynamik ihrer Regelungssysteme. Strom- und Drehmomentregler arbeiten im Millisekundenbereich und können bei Kopplung mit fahrdynamischen Sensorsignalen unmittelbar auf Fahrbahnbedingungen reagieren. Die Invertersoftware wird somit zu einem zentralen Element moderner Traktions- und Stabilitätsregelungen. Zudem kann eine geeignete Softwaresteuerung die Dauerhaltbarkeit des Antriebssystems erhöhen, indem sie Stromspitzen, thermische Belastungen und mechanische Lastwechsel begrenzt.

Diese Beispiele verdeutlichen, dass die Weiterentwicklung elektrischer Antriebssysteme zunehmend auf der Softwareebene der Systemvernetzung stattfindet. Entscheidend ist nicht die einzelne Komponente, sondern die Interaktion der Steuerungsfunktionen. Daher gewinnt die Fähigkeit, Invertersoftware schnell und realitätsnah zu testen und zu optimieren, für den Entwicklungsprozess moderner Elektrofahrzeuge an zentraler Bedeutung.

SOFTWAREARCHITEKTUR DER VALIDIERUNGSUMGEBUNG

Die Anforderungen an schnelle und physikalisch konsistente Simulationen elektrischer Antriebe erfordern eine klar strukturierte Softwarearchitektur, **BILD 3**. Diese Architektur kombiniert drei Komponenten. Erstens die physikalische Simulation des elektrischen Systems mit OverDrive von Persystems. Zweitens die Einbettung in das Gesamtfahrzeug mithilfe von CarMaker von IPG Automotive, mit dem sich Fahrdynamik, Fahrmanöver und die Interaktion mit weiteren Fahrzeugsystemen modellieren lassen. Und drittens die zu prüfende Invertersoftware einschließlich ihrer Regel- und Steuer-algorithmen (Unit Under Test). Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, weitere Steuergerätefunktionen zu integrieren.

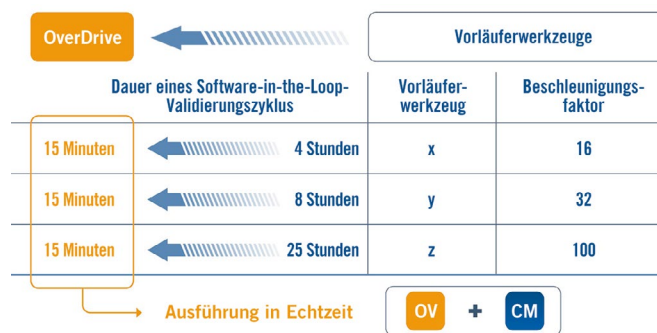


BILD 4 Beschleunigung des Software-in-the-Loop-Validierungszyklus durch strukturtreue elektrische Simulation auf Standardhardware (OV: OverDrive; CM: CarMaker; Referenz: 12. Gen. Intel Core i7 (Alder Lake)) © IPG Automotive | Persystems

Mithilfe dieser Architektur ist es möglich, reale Steuerungssoftware mit physikalisch detaillierten elektrischen Plant-Modellen innerhalb einer virtuellen Fahrzeugumgebung zu testen. Somit bildet sie die Grundlage für eine schnelle Validierung von Invertersoftware. Ein Vorteil der OverDrive-basierten elektrischen Netzwerksimulation ist die Möglichkeit, vollständige Testsequenzen in kurzer Zeit auszuführen. Ein Standard-64-Bit-Laptop kann den vollständigen Testkatalog beim abschließlichen Einsatz von OverDrive in wenigen Minuten abarbeiten.

Im Vergleich dazu benötigt eine Hardware-in-the-Loop-Validierung für denselben Testumfang deutlich mehr Zeit, während konventionelle Offline-Simulationen mit vergleichbarer Modellierungstiefe mehrere Stunden Rechenzeit erfordern, **BILD 4**. Die erzielte Ausführungszeit stellt somit einen deutlichen Fortschritt bei der Validierung elektrischer Antriebssysteme dar.

Unter Einbeziehung der Integrations-szenarien ergibt sich eine kurze Gesamtlaufzeit kompletter Testkampagnen. Somit lassen sich umfangreiche Softwarevalidierungen mit Komponenten- und Integrationsaspekten effizient durchführen. Die Methode ermöglicht vollständige und reproduzierbare Testkampagnen und unterstützt automatisierte Regressionstests sowie iterative Entwicklungsprozesse mit hoher Testfrequenz. Die in der dargestellten Studie definierten Testkataloge sind modular aufgebaut und für automatisierte Abläufe ausgelegt.

Die vorgestellte Simulationsmethodik ist nicht auf Traktionsinverter beschränkt. Elektrische Maschinen und

Leistungselektronik kommen auch in anderen Fahrzeugsystemen zum Einsatz, beispielsweise in Steer-by-Wire-Systemen mit sicherheitskritischen Aktuatoren oder in aktiven Fahrwerken mit elektromechanischen Stellantrieben. Da diese Systeme ähnliche leistungselektronische Strukturen aufweisen, lässt sich die strukturtreue Simulationsmethodik grundsätzlich auf solche Anwendungen übertragen und zur Entwicklung und Validierung der zugehörigen Steuerungsoftware einsetzen.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Leistungsfähigkeit elektrischer Antriebssysteme wird maßgeblich durch die Invertersoftware und ihre Integration in das Gesamtsystem bestimmt. Struktur-erhaltende Algorithmen in OverDrive ermöglichen physikalisch konsistente und effiziente Simulationen der schaltenden Leistungselektronik mit detaillierten Plant-Modellen. Durch die Einbettung in die Entwicklungsumgebung CarMaker sind Tests innerhalb eines virtuellen Fahrzeugsystems möglich. Unter alleiniger Nutzung von OverDrive läuft der Testkatalog auf einem Standard-64-Bit-Computer in etwa acht Minuten ab, umfangreiche Testkampagnen einschließlich Integrations-szenarien benötigen rund zwei Stunden. Damit wird eine Rapid-Software-Validation erreicht, die häufigere Softwaretests, kürzere Entwicklungszyklen und die Übertragbarkeit auf weitere Aktuatorssysteme ermöglicht.



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

Test now for 30 days free of charge:
www.mtz-worldwide.com