

Einfach unverwüstlich

HIL- und SIL-Tests für Schwerlastmaschinen mit ASM



Bau, Untertagebau, Energieerzeugung sowie Land- und Forstwirtschaft sind dynamische und immer komplexer werdende Industriezweige. Die in diesem Umfeld eingesetzten Schwerlastmaschinen bergen weit mehr Intelligenz, als der Laie auf den ersten Blick vermutet. Das Vorgehen beim Test der elektronischen Systeme zeigt, wie die Entwicklungsprozesse bei Caterpillar aufgebaut sind. Vom Funktionsentwurf mit maßgeschneiderten High-Fidelity-Modellen bis hin zur Validierung der Reglersoftware hat Caterpillar effiziente Prozesse etabliert.

Caterpillar (kurz Cat) ist ein international operierendes Unternehmen, das unter anderem Schwerlastmaschinen und Motoren für die Anwendungsfelder Bau, Untertagebau, Forstwirtschaft und Energieerzeugung herstellt. Die Produkte verfügen überwiegend über elektronische Steuergeräte – für das Motor- und Getriebemanagement bis hin zu Steuerungen für spezifische Aggregate. Hardware-in-the-Loop (HIL)- und Software-in-the-Loop (SIL)-Tests haben sich in der Entwicklungsarbeit etabliert, da sie eine hohe Qualität und Zuverlässigkeit dieser Steuergeräte gewährleisten. Um die Motorsteuergeräte der Schwerlastmaschinen zu testen, entschied sich Caterpillar für das Dieselmotormodell und das physikalische Turboladermodell der Automotive Simulation Models (ASM) von dSPACE. Aufgrund der Offenheit der ASM ließ sich der modellierte Antriebsstrang durch Caterpillar-Modelle so modifizieren, dass er die spezifischen Anforderungen erfüllt.

High-Fidelity-Modelle für die Verbrennungsregelung

Die Entwicklung neuer Regelfunktionen beginnt mit Caterpillar-eigenen High-Fidelity-Motormodellen, die den

Verbrennungsvorgang zwar sehr detailliert, aber nicht in Echtzeit simulieren. Diese Modelle mit dem Namen „Enterprise“ wurden im Laufe vieler Entwicklungsjahre permanent erweitert und optimiert. Sie sind bestens für Komponenten- und Reglerentwürfe geeignet, bei denen es auf die exakte Auslegung und Regelung von Kraftstoff- und Luftsystemen sowie der Verbrennung ankommt. Die Modellierung erfolgt dabei nach eindimensionalen Ansätzen, wobei die Verbrennungsmodelle auch den Zylinderdruck berücksichtigen. Während der Simulation mit Enterprise liegt der Fokus der Entwicklungsarbeit z. B. auf einer optimierten Drehmomentausgabe sowie auf minimiertem Kraftstoffverbrauch. Weitere Funktionen wie Diagnose und Kommunikation zwischen den Steuergeräten bleiben in dieser Phase außen vor.

Frühe Validierung der Reglersoftware

Im nächsten Schritt werden alle Steuergerätefunktionen integriert. SIL-Tests gehören bei Caterpillar zum Standard, geht es darum, die gesamte zu entwickelnde Reglersoftware



Caterpillars Baumaschinen im Einsatz.

frühzeitig zu testen und zu validieren. In einem idealen Prozess wird für HIL- und SIL-Tests dasselbe Modell eingesetzt, da man so die Parametrierung wiederverwenden und Signale direkt vergleichen kann. Nachdem wir uns bei Caterpillar entschieden haben, die HIL-Tests mit dem ASM Diesel Engine Simulation Package durchzuführen, war ein weiteres Ziel, schon in der Reglerentwurfphase mit dem Package zu simulieren. Aus diesem Grund wurde die firmeninterne Simulationsumgebung „Dynasty“ erweitert, so dass sich nicht nur die High-Fidelity-Modelle von Caterpillar, sondern auch die Mittelwertmodelle von dSPACE ausführen ließen. Caterpillar und dSPACE arbeiteten bei der Integration der Simulationsmodelle eng zusammen. Um die Parameter von Enterprise auf die ASM zu übertragen, wurde eine Lösung implementiert, die auf einer Tabelle mit einer Eins-zu-eins-Variablenreferenzierung basiert. Zudem sind die Messdaten des realen Motors oder der Simulation notwendig, um die Parametrierung zu vervollständigen.

Gleichzeitige Simulation

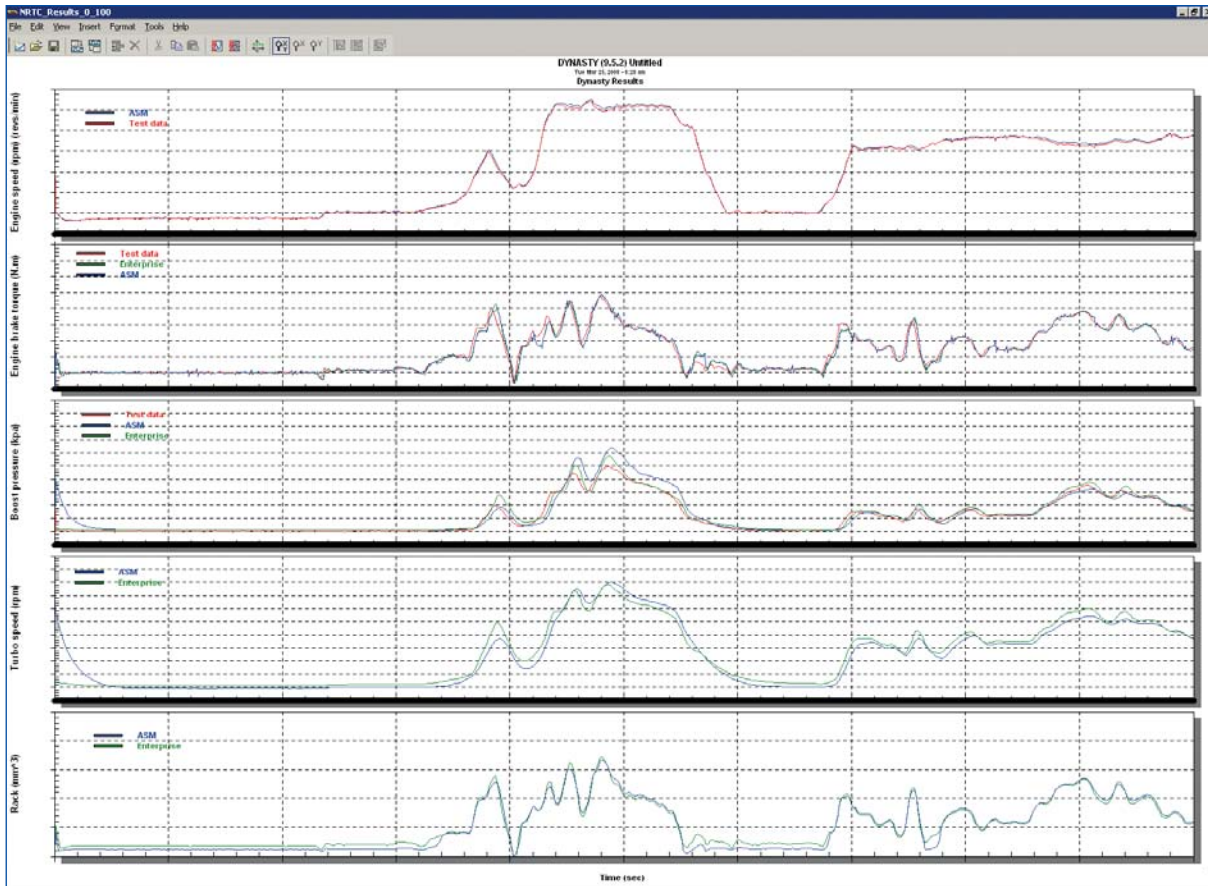
Qualität und Leistungsfähigkeit der ASM-Diesel- und -Turboladermodelle wurde im Rahmen einer Co-Simulation zusammen mit dem Enterprise-Modell in Dynasty geprüft. Während der gleichzeitigen Simulation war der Steuergerätecode mit den Ein- und Ausgängen des ASM-Dieselmotormodells verbunden. Die Parametrierung des Modells erfolgte mit ASM-Para. Die Simulationsergebnisse für einen Arbeitspunkt wurden gegen stationäre Messdaten geprüft. Simulationen dynamischer Vorgänge wurden gegen transiente Messdaten und gegen die Ergebnisse der Enterprise-Simulation geprüft, die auf Testzyklen ähnlich dem EPA Non-Road-Transient-Cycle basieren. Die Simulationsergebnisse der ASM-Modelle deckten sich in jedem Fall ausgezeichnet mit den Referenzsignalen. Darum wird das ASM Diesel Engine Simulation Package nun sowohl für die Reglervalidierung während der Offline-Simulation als auch für die Steuergerätevalidierung während der HIL-Simulation eingesetzt.

Steuergerätestest bei Caterpillar

Caterpillar hat sein Testlabor bereits mit zahlreichen dSPACE-HIL-Prüfständen von Mid-Size bis Full-Size ausgestattet. Sie dienen für die Tests von Steuergeräten von Motoren, Getrieben und anderen Komponenten der Schwerlastmaschinen. Durch den Einsatz der ASM vereinfacht sich die Parametrierung wesentlich, da Parameter schon früh im Entwicklungsprozess während des SIL-Betriebs zur Verfügung stehen. Ein weiterer Vorteil ist, dass kundenspezifische Getriebe- und Antriebsstrangmodelle aufgrund des offenen Modellentwurfs einfach mit den ASM zu kombinieren sind. Dadurch lassen sich die HIL-Prüfstände optimal konfigurieren.

Die Vorteile der ASM

Die praktische Erfahrung hat gezeigt, dass die Entwicklung durch die Verwendung desselben Modells für Echtzeit-HIL- und -SIL-Tests deutlich effizienter wird. Zudem konnten wir die ASM-Dieselmotor- und -Turboladerblöcke für eine Vielzahl an Motoren (4–20 Zylinder, VTG- oder Wastegate-



Die Ergebnisse des Vergleichs von Enterprise und ASM.

Turbo, CGI ...) einsetzen und unsere Entwicklungsprozesse in vielen verschiedenen Projekten optimieren, was sich schnell auszahlt hat. Besonders gut hat uns die Offenheit der ASM gefallen, die sich als sehr hilfreich herausstellte. Die Modelle sind leicht nachvollziehbar und lassen sich einfach modifizieren, wodurch wir eigene Modelle leicht integrieren konnten.

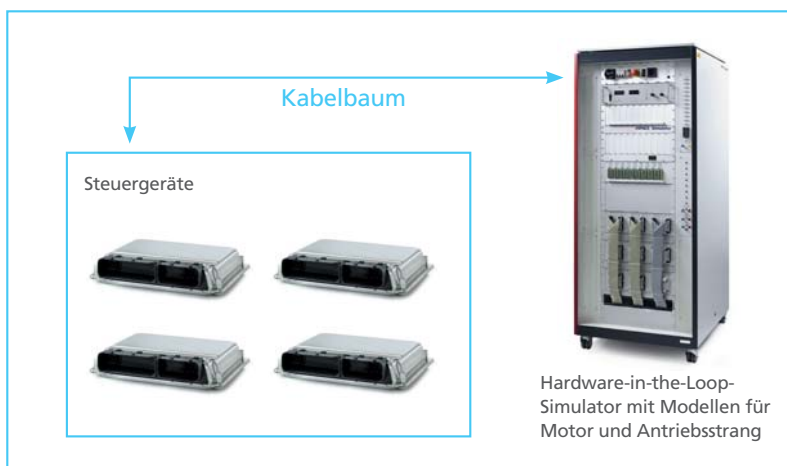
Zusammenfassung und Ausblick

Die ASM werden als Add-ons zum Enterprise-Modell von Caterpillar installiert, um die Entwicklung neuer Regelfunktionen zu unterstützen. Zum Einsatz kommen sie während Reglerentwurf und Steuergerätestest zur Validierung des Reglers. Caterpillar plant, die ASM auch für die meisten seiner Echtzeitmotormodelle auf

HIL-Systemen zu verwenden. Aufgrund der zahlreichen Vorteile, die sich durch den Einsatz der ASM ergeben, wird Caterpillar sein Testlabor durch zusätzliche dSPACE-Systeme erweitern. ■

Mark Yu, Caterpillar Inc., USA

Aufbau des HIL-Systems.



Glossar

Dynasty – Multi-Domänen-Simulationsumgebung von Caterpillar

Enterprise – High-Fidelity-Motorsimulationsmodelle von Caterpillar

CGI – Clean Gas Induction, eine Lösung von Caterpillar zur Erfüllung von Abgasvorschriften

EPA – Environment Protection Agency, staatliche Umweltschutzbehörde in den USA