



# China on the Fast Track

中国鉄道機器メーカーによる dSPACE HIL を使用したトラクションコントロール  
ユニット (TCU) の迅速な開発





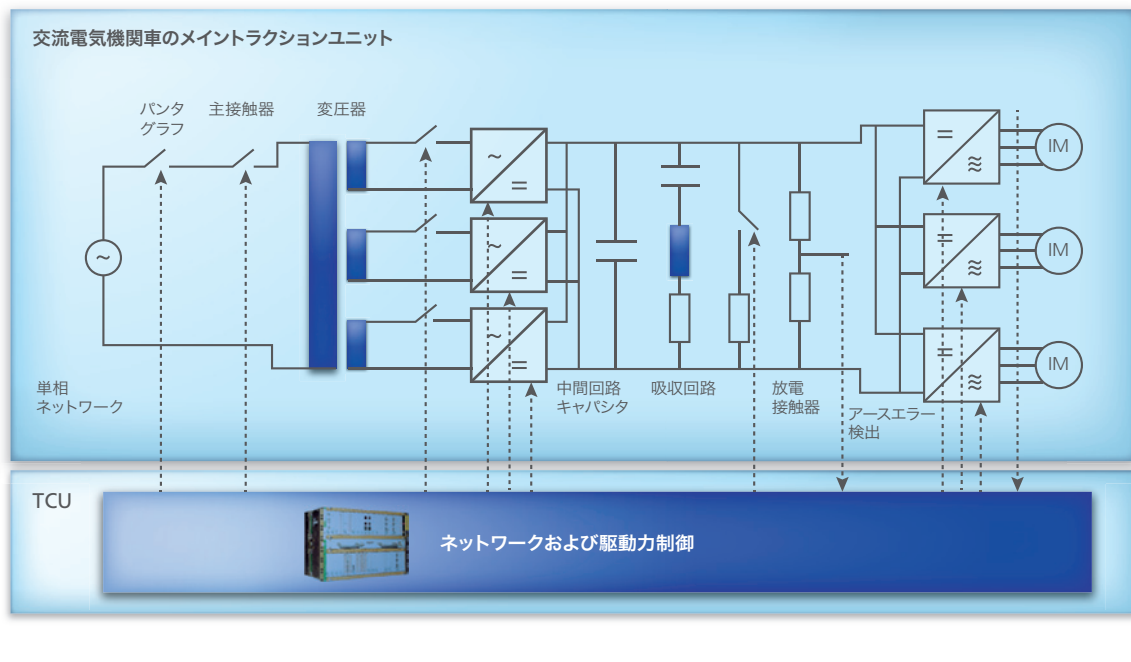


図1：交流電気機関車のTCUおよびメイントラクションユニット

### 背景

中国は、その世界最大の人口と世界第2位の経済力を背景に、旧式で低効率な主要輸送インフラストラクチャである鉄道を根本的に変革しつつあります。わずか5年足らずの間に、旧式な鉄道から最新式の包括的なシステム（地下鉄から欧州のTGVやICEのような高速列車まで）へと一新させることに成功しています。また、このトレンドは、地方の鉄道機器メーカーにとっても、巨大なビジネスチャンスをもたらしています。中国北車集団（CNR）のグループ企業である大連電気駆動研究開発センターは、巨額の国庫補助金を活用して、交流電気機関車用のトラクションコントロールユニット（TCU）の開発に着手しました。このプロジェクトでの非常にクリ

ティカルな要素は開発サイクルにあります。すべてをゼロから始めることになるため、さまざまな診断機能を含め、ほぼすべての機能を徹底的に評価および試験する必要があります。フルスケールのパワーテストベンチをセットアップする時間はありません。このような事情を考慮して、大連電気駆動研究開発センターでは、開発するTCUのソフトウェアおよびハードウェアの試験に、自動車産業で広く使用されている、HIL（Hardware-in-the-Loop）アプローチを採用することにしました。

### TCUの説明

TCUとはTraction Control Unit（トラクションコントロールユニット：駆動力制御装置）を短縮した略語であり、交流電

気機関車のメイントラクションユニットの最適制御を受け持つシステムです。メイントラクションユニット（主駆動装置）は、パンタグラフを通じて架線から固定周波数の交流電力を引き込み、可変周波数の交流電力に変換して、台車内の駆動モーターを制御します（図1）。TCUは、一般的に給電用の部分と駆動モーター用の部分で構成されます。給電側は給電部の力率の制御とDCリンクの電圧の安定化を行い、駆動モーター側は、必要なトルクと速度を達成するためにインバータおよび駆動モーターの制御を行います。

### HILアプローチが採用された理由

自動車産業の場合と同じように、HILシミュレータは、電気機関車走行制御用ソフ

「dSPACE DS5203 FPGA Board を使用して、独自に開発したシミュレーションモデルを 100 ns で実行することができ、リアルタイムシミュレーションデータとパワーテストベンチ上で得られた実験結果とを完全に一致させることができました」

Congqian Xu 氏、中国北車 (CNR) HIL チームスタッフエンジニア



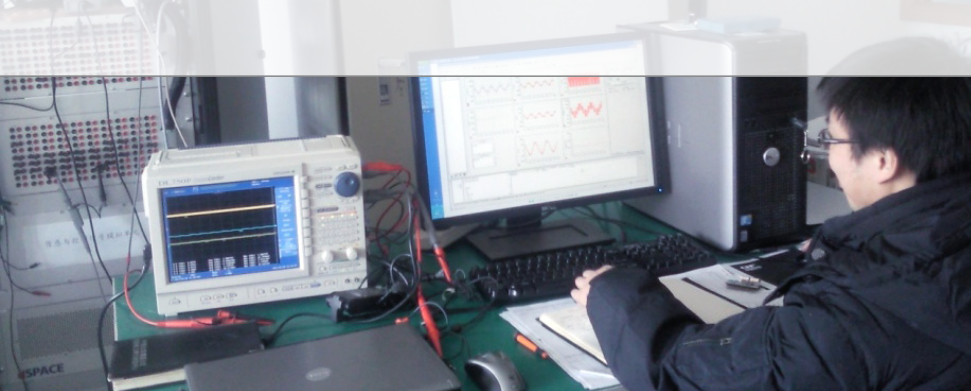


図 2 : この HIL システムは、試験対象 TCU、シグナルコンディショニングユニット、dSPACE モジュール型ハードウェア (DS1005、DS5203、DS5001、DS5101、DS2302) で構成されています。

トウェアの開発および検証においても、非常に効率の良い、不可欠なツールであることが実証されています。Bombardier 社、Alstom 社、ABB 社などの主要国際鉄道機器メーカーは、HIL システムを使用して、複雑な TCU ソフトウェアの開発および試験を行っています。

国際的な競合企業と自動車産業の経験を詳細に研究した結果、CNR の大連電気駆動研究開発センターは、開発の早期の段階でソフトウェアおよびハードウェアの欠陥を検出するために、全開発プロセスで HIL シミュレータを採用しました (図 2)。内燃機関の化学的プロセスとは異な

り、電気駆動装置の電磁的プロセスは、一連の正確な解析方程式を使用して正確にシミュレーションを行うことができます。したがって、TCU 開発の早期の段階から HIL シミュレータを使用して、さまざまな動作条件でのモータートルクに対する、さまざまな変調方式の効果を評価するなど、制御装置のさまざまな機能の検証を行うことができます。IGBT (Insulated-gate bipolar transistor) などのパワーデバイスがモデル内に実装されるため、不正なゲート信号による高電圧装置の損傷を心配する必要がなくなります。

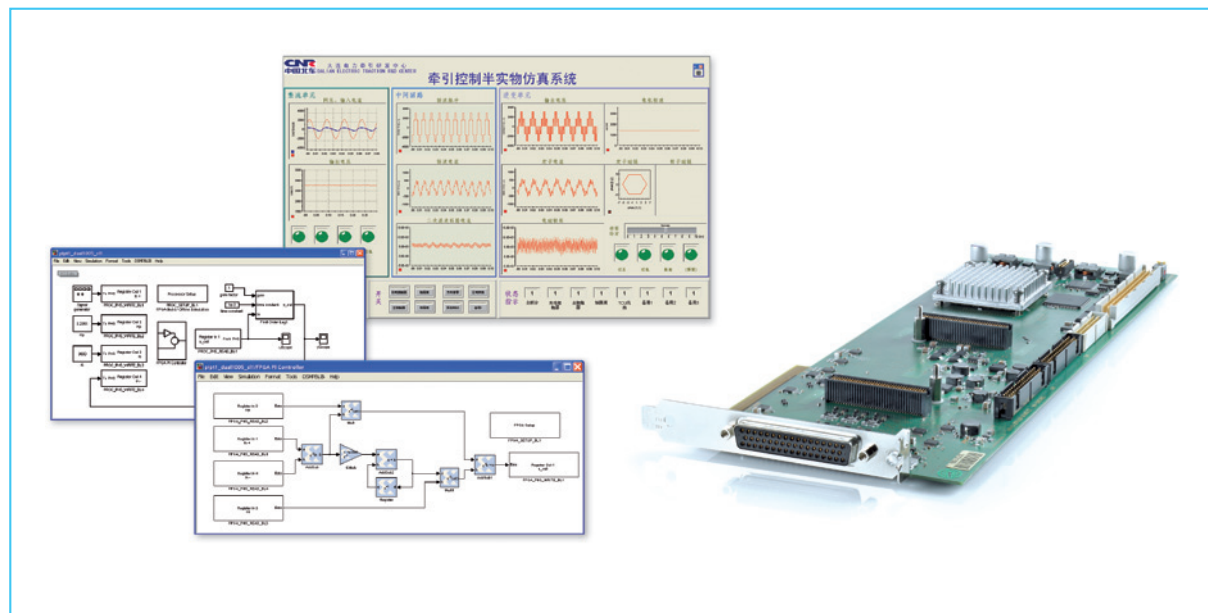
#### 難問の解決

電気機関車用トラクションユニットのようなパワーエレクトロニクスシステムおよび駆動システムのシミュレーションで最も難しい問題は、高周波の電力スイッチゲート信号のサンプリングにあります。たとえば、インバータと駆動モーターのシミュレーションをリアルタイムコンピュータ上で実行する場合、ゲート信号のサンプリング誤差がモーター磁束の計算に累積され、シミュレーション結果に大きな影響を与えます。この誤差は、各ゲート信号の遷移時に発生し、サンプリング時間とゲート信号のスイッチング時間の比が大きくなるにつれ

## 「自動車産業のさまざまな領域で、その価値が広く証明されている dSPACE HIL シミュレータを使用することにしました」

Xiangdong Che 氏、中国北車 (CNR) 電気駆動開発部長

図 3 : このプラントモデルは、RTI FPGA Blockset および Xilinx® System Generator のブロックを使用して、Simulink® でグラフィカルに実装されています。



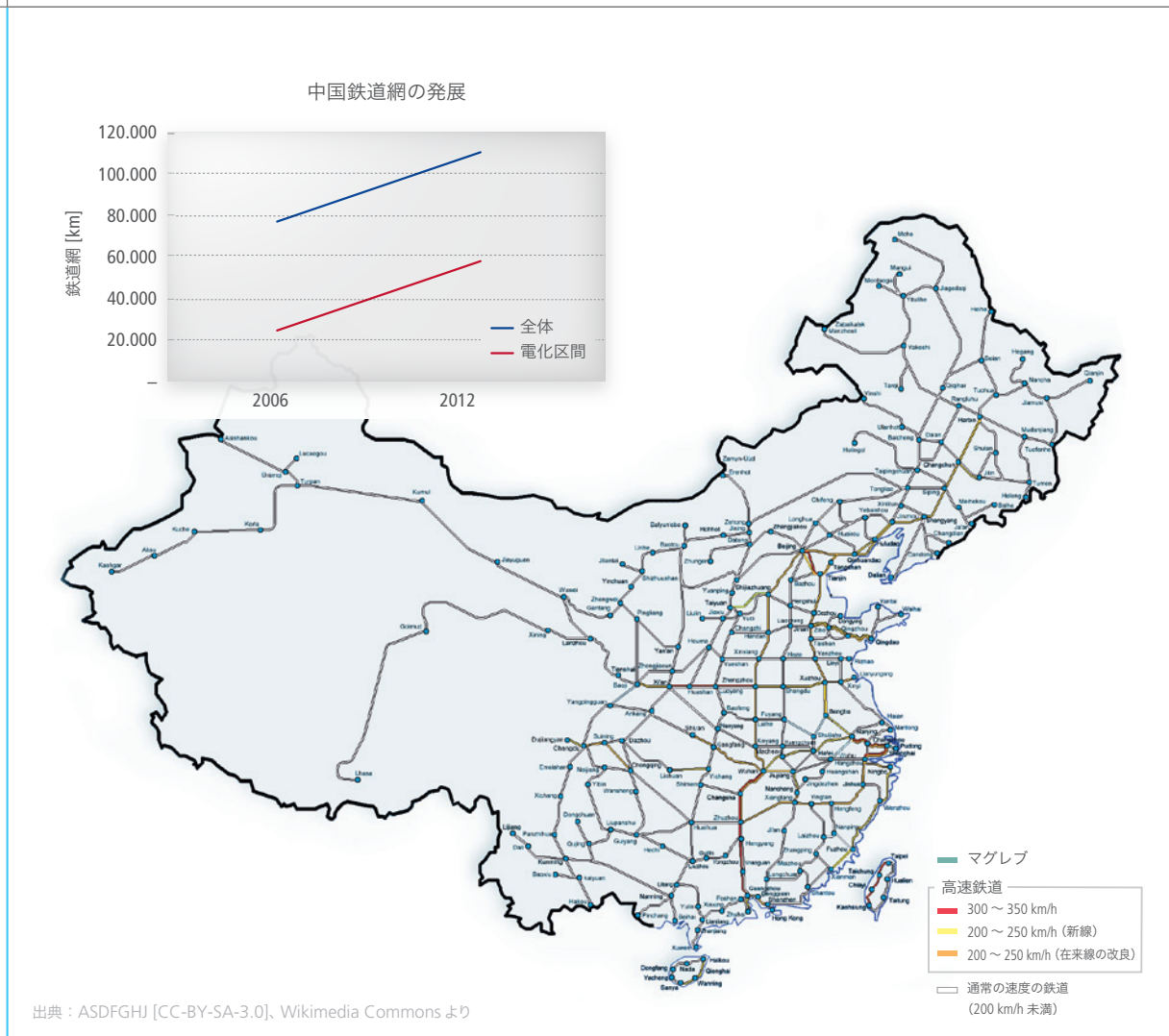


図4：この6年間で中国鉄道網の電化区間が倍増しました。

「電気機関車の場合、統合試験だけではなく開発初期の段階で活用できるため、dSPACE シミュレータの利点がさらに大きくなります」

Xiangdong Che 氏、中国北車 (CNR) 電気駆動開発部長

て誤差も大きくなります。経験則によれば、HIL 試験の申し分のないシミュレーション結果は、この比が 1/100 のときに達成されます。つまり、高度にダイナミックなモーター制御で一般的に使用される 10 kHz のゲート信号のサンプリングを行うには、リアルタイムシミュレータのタイムステップが  $1 \mu s$  でなければなりません。このタイムステップ要件は、HIL ベンダーにとって非常に大きな問題となります。

なぜなら、このように小さなタイムステップでシミュレーションモデルを実行できる CPU は存在しないからです。現在の技術では、並列コンピューティングでも、この問題を解決することはできません。そのため、近年、この問題を解決するために FPGA ベースのソリューションが開発され、非常に良い結果を達成しています。ただし、一般的な商用ソリューションでは、HIL ベンダーによる計算ハードウェアの再構築が必要となり、顧客によっては、ハー

ドウェア合成テクノロジーは言うまでもなく、ハードウェア記述言語 VHDL や Verilog のコーディングが問題になることがあります。新たにリリースされた dSPACE DS5203 FPGA Board を使用することにより、これらの問題をエレガントに解決することができます。CNR では、dSPACE RTI FPGA Programming Blockset と Xilinx System Generator を使用することにより、Simulink によるシミュレーションモデルを短時間で構築し、ピットスト



リーム内でコンパイルと合成を行い、ボードにダウンロードしています。これらの作業はすべてが自動的に行われます。FPGAの再構成をグラフィカルな環境で行うことができ、VHDLやVerilogによるコーディングの知識は不要です。大連電気駆動研究開発センターでは、この機能を使用して、オリジナルのモデルを移植し、FPGAモデルとして、比較的簡単にDS5203ボード上で実行することができました(図3)。DS5203上の強力なFPGAデバイスXilinx Virtex 5により、非常に大きく複雑なモデルをFPGAデバイスに実装することが可能になります。CNRの大連電気駆動研究開発センターでは、さらにいくらかの最適化を行って、3個の4QCコンバータ、1個のDCリンク、3個のインバータと3個の駆動モーターで構成される、完全なメイントラクションユニットを単一のDS5203ボード上に実装することができました。FPGAの並列計算機能を使用して、メイントラクションユニットのシミュレーションを100 nsのタイムステップで実行することができ、非常に正確なリアルタイムシミュレーション結果が生成されます。■

Dr. Xizheng Guo  
Congqian Xu  
Xiangdong Che  
中国北車股份有限公司 (CNR)

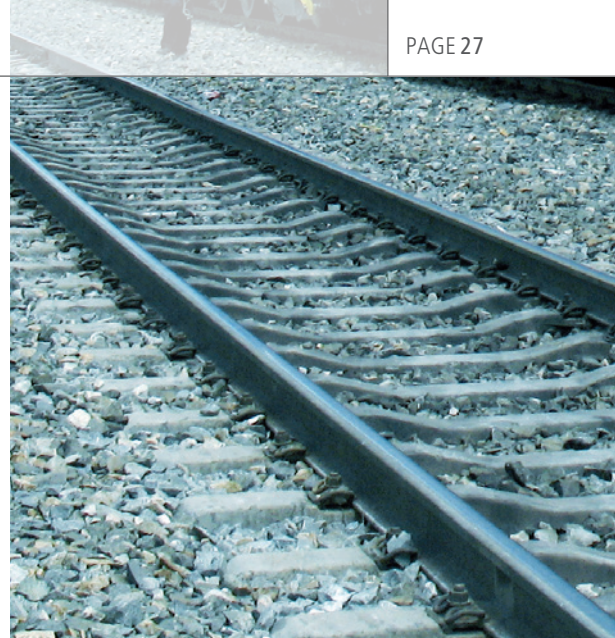
#### Congqian Xu 氏

同氏は、中国の大連市にある中国北車 (CNR) 集団の電気駆動研究開発センターのHIL試験チームのスタッフエンジニアです。



#### Dr. Xizheng Guo

同博士は、電気駆動装置の研究者であり、中国の大連市にある中国北車 (CNR) でHILシステム開発責任者を務めています。



## 結果および将来計画

開発の非常に早い段階からdSPACEシミュレータを使用することができ、パワーテストベンチを使用してアルゴリズムの検証を行う必要性が減少するため、TCUの開発サイクルが大幅に短縮されました。さまざまな条件下でのTCUのソフトウェアおよびハードウェアの試験を、パワーデバイスおよび電動機を損傷する危険を伴わずに、簡単に実施することができるようになりました。

電気駆動研究開発センターでは、TCUの開発の成功を基に、大型鉄道車両のTCUの試験用として、DS5203ボードの追加購入を計画しています。また、複数のフルサイズHILを導入してフルスケールの仮想列車を実装し、高速CHR列車用のネットワークで結ばれた電子制御装置の試験を行うことも検討されています。