



dSPACE HIL シミュレータによる高精度な
セル電圧エミュレーション

Electrifying

バッテリーマネジメントシステムの役割は、高電圧バッテリーに対して全動作点で理想的な条件を提供することです。このようなシステムはセーフティクリティカルであるため、その機能と車載通信を総合的にテストする必要があります。dSPACE は、これらのテストを実施するための新しいハードウェアとソフトウェアを提供します。



バッテリーマネジメントシステムの機能

ハイブリッド車および電気自動車向けバッテリーの多くは、直列に接続した複数のセルにより構成されます。広く用いられている Li-ion バッテリーの単一セルの定格電圧は 3.6 V、充電電圧は 4.2 V です。これを直列に接続することにより、600 V を超える電圧を発生します。複数セルを直列に接続する場合、その中の 1 つのセルの故障や劣化がバッテリースタック全体に影響します。このため、最新のハイブリッド車や電気自動車のバッテリーマネジメントシステム (BMS) は、個々のセルの過充電、過放電、過熱を防いで、それらの寿命を最適化することを主な機能とします。BMS は、すべてのセルを常に均等

な充電状態に維持するセルバランシングにより、これを実現します。さらに BMS は、各種パラメータから残りの走行可能距離を予測し、その情報を上位のハイブリッド ECU へ提供します。通信には一般的に車載 CAN バスを使用します。

BMS の構造

BMS は 2 つの部分 – BMS ECU 本体とセルモジュール (CM) – から成ります。これらは絶縁型 CAN を介して互いに接続されます (図 1)。各 CM はセルスタック – すべての単一バッテリーセルのサブスタック – へ接続されます。CM は個々の単セルの電圧を計測し、必要に応じて放電を開始します。このため CM は各セル

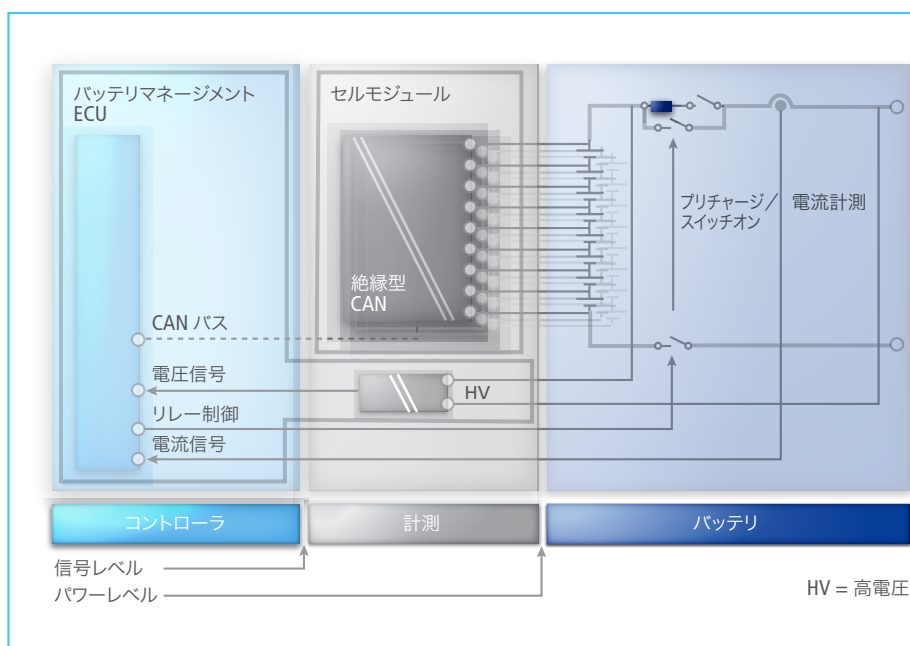


図 1 : バッテリーマネジメントシステムの HIL テストにおけるインターフェース

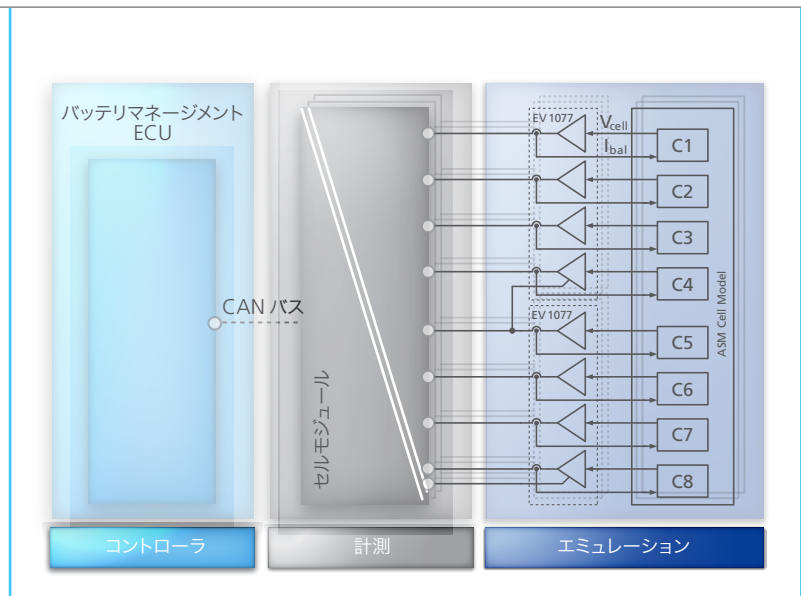


図2：実物のバッテリーセルの代わりにEV1077セルエミュレーションモジュールをセルモジュールへ接続します。ASMセルモデルがEV1077を制御します。

アナログのターミナル電圧を出力するセル電圧エミュレータで構成した制御システムが必要です。dSPACEは、自動車用シミュレーションモデル（ASM）のセルモデルと、EV1077バッテリーセルエミュレーションモジュールを提供します（図2）。

リアルタイム実行が可能なバッテリーモデル
一般的な車載電気システムのシミュレーションに使用する従来のバッテリーモデルとは異なり、バッテリーマネージメントシステ

ム向けのモデルは、接続された多数の単セルとしてバッテリーの挙動をシミュレートする必要があります。1つのセルモデルは、単一バッテリーセルの電圧と充電状態を表現します。このモデルにはLi-ion、NiMH、鉛蓄電池等、各種タイプの標準的なセル挙動を含める必要があります。セル挙動にはタイプ別の充放電挙動に加えて、負荷変化時の動的挙動、漏れ電流（ガス発生効果など）を含みます。バッテリー全体のモデルは個々のセルモデルから

に対応するスイッチ（トランジスタ）を備えています。トランジスタをONにすると、これに対応するセルが抵抗を介して負荷へ接続されます。一部のセルの電圧が他のセルよりも高い場合、ECUはそれらのセルに対応するスイッチをONにして放電させます。このような機構により、すべてのバッテリーセルを均等な充電状態に保ちます。

BMSのHILテスト

BMSの制御ストラテジをテストするだけであれば、BMS ECU本体のみのテストで済みます。この場合、セルモジュールはCANを介したレストバスシミュレーションによりシミュレートします。バッテリーマネージメントシステムの全体をテストするには、すべてのCMあるいは少なくとも1つのCMをHILシステムに組み込む必要があります。この場合、リアルタイム実行が可能なバッテリーシミュレーションモデルと、

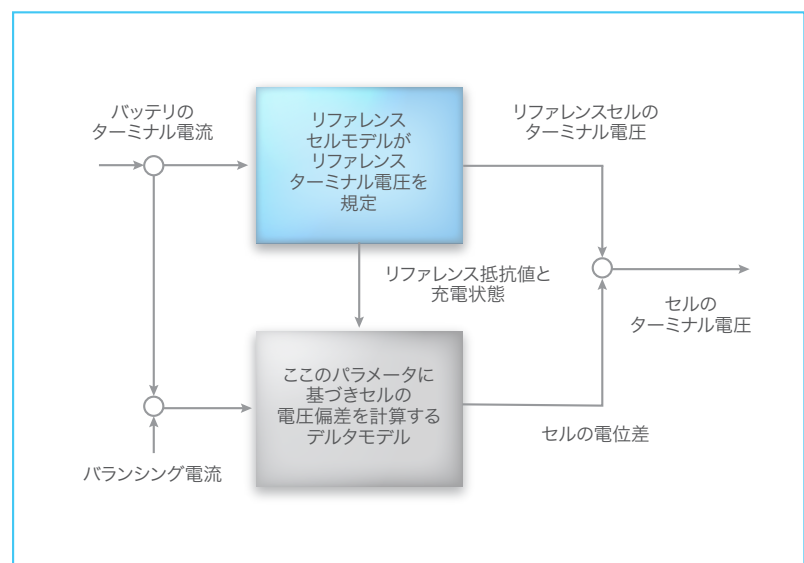


図3：セルネットワークへの入力値はリファレンスセルへの入力電流です。デルタモデルはリファレンスセルのターミナル電圧に対するn番目セルの電圧偏差を計算します。この電圧偏差とリファレンスセルのターミナル電圧から、n番目のセルのターミナル電圧を計算します。

構築します。このバッテリーモデルは、必要電圧を発生するためのセルの直列接続だけでなく、必要電流を得るためのセルの並列接続にも対応する必要があります。また、各セルのパラメータと状態（内部抵抗、初期充電状態等）を個別に調整できること、および個々のセルの電圧結果をBMSへ提供できることも必要です。さらに、BMSが出力するセルバランシング電流もモデルに含める必要があります。

ASM セルモデル

ASM セルモデルは、セル電圧モデルと充電状態モデルにより構成されます。セル電圧モデルでは内部抵抗、拡散、二重層容量等の物理的影響を個別にパラメータに設定できます。充電状態モデルでは、セルの充放電電流に加えて、NiMHセル充電中のガス発生の結果によって生じる漏れ電流等も処理します。

この単セルモデルを n 個接続することによって、直列に接続した n 個のセルのモデルを作成できます。しかし多数のセルが存在する場合、このようなモデルは取り扱いが困難であり、リアルタイム計算に対応できない場合があります。別の方法として、単一セルだけをシミュレートし、その出力変数にセル数を乗算して結果をスケールする方法があります。しかしこ

の方法では個々のセル間のパラメータおよび充電状態の差異を表現できないため、BMSのテストにはほとんど役に立ちません。

リファレンスモデルとデルタモデル

ASM で使用するアプローチでは、同一構造をもつ複数の単セルモデルを接続することによって、セルの直列配列を作成します。このモデルは、使用するバッテリータイプに応じた基本挙動を記述するリファレンスセルモデルと、リファレンスセルの電圧に対する個々のセルの電圧偏差を計算するデルタモデルにより構成されます。個々のセルに対しては、容量および初期充電状態と、内部抵抗のリファレンス値からの偏差を定義できます。

この新しいセル配列記述アプローチは、シミュレーションの計算負荷を大幅に軽減します。DS1006 上のリアルタイムシミュレーションにおいて、リファレンス/デルタモデルアプローチは、100 個の単セルモデルの直列接続と比べた場合、実行時間を 1/12 に短縮します。オフラインシミュレーションでは、さらに大きな実行時間短縮効果が得られます。さらに、ベクトル計算を使用する場合、デルタモデルの複雑さはセル数に依存しません（図 3）。セルレベルのモデル記述には、バッテリーレ

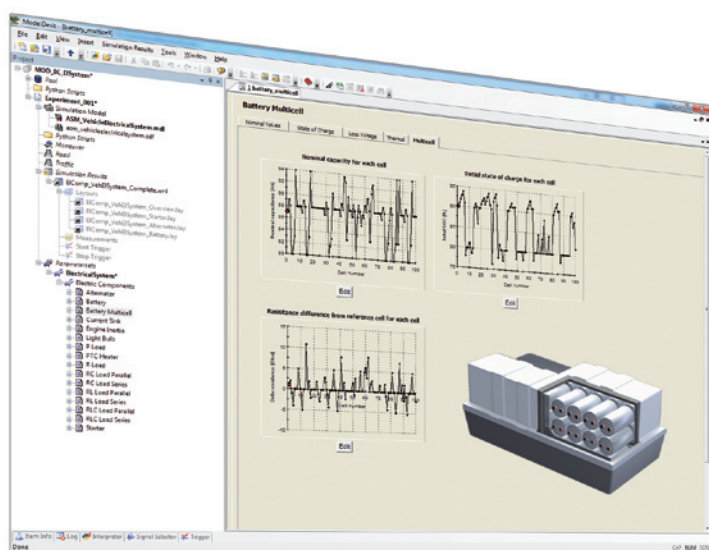
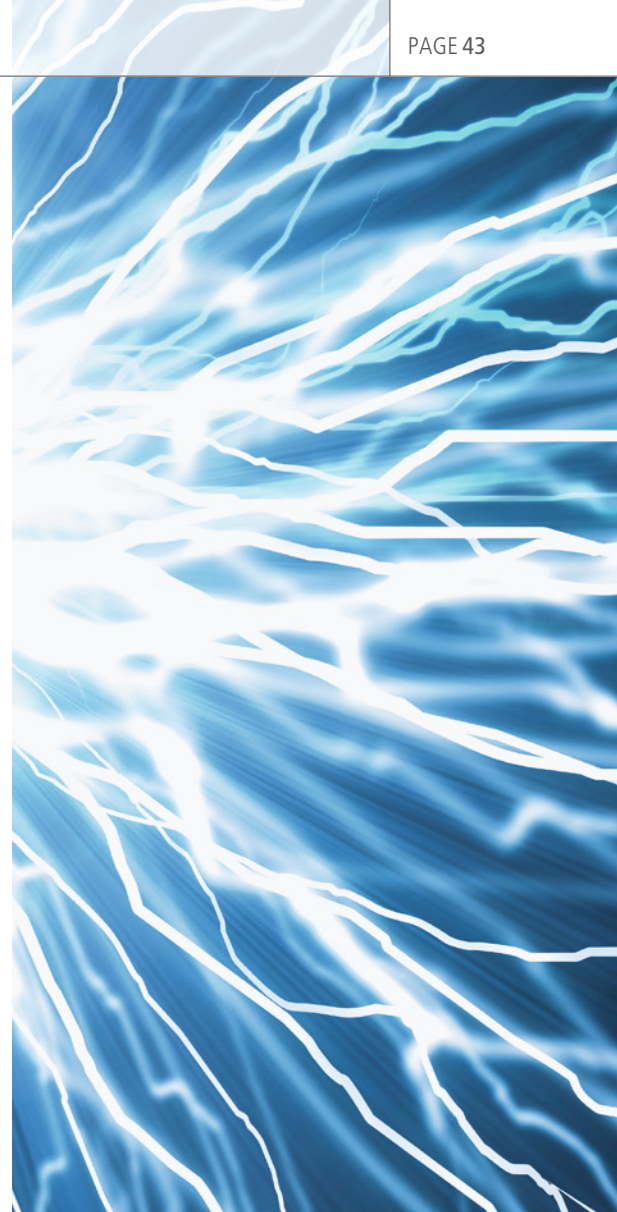


図 4 : ModelDesk のセルモデルのパラメータ設定用ユーザーインターフェース

ベルよりも多くのパラメータ設定が必要です。ModelDesk が提供する直感的なユーザーインターフェースにより、バッテリーマネジメントシステムのマルチセルシミュレーションでも容易に扱うことができます（図 4）。

セル電圧エミュレーションのハードウェア要件

エミュレーションにおいては、CM 側のセル電圧の計測は 1 本のラインを介して行うため、実際のバッテリーと同様の形態でセル電圧を直列に接続する必要があります。ラインはセルコネクタへ接続されます。したがってエミュレーションは、電気的に絶縁された電圧源で構成する必要があります。Li-ion セルは非常に平坦な放電特性を持ちます（図 5）。このため ECU は高い精度で電圧を計測します。これはすなわち、セル電圧エミュレーションでも高い電圧精度が必要であることを意味します。一般的に、電圧偏差は 2 mV 以下に抑える

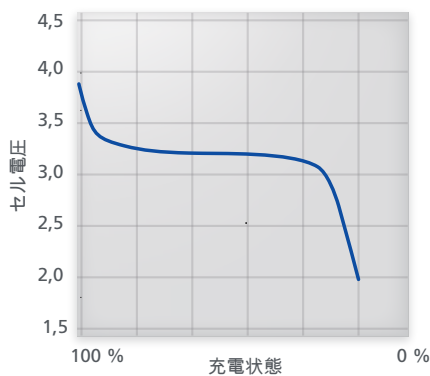


図5：Li-ion バッテリセルの充電状態は、非常に平坦な電圧 / 充電量特性から読み取ります。このため、バッテリーマネジメントシステム (BMS) をテストするには、セル電圧を高い精度でエミュレートする必要があります。

必要があります。セルバランシング機能は、エミュレート電圧源に対して数百 mA の負荷をかけます。電圧の精度は負荷がかかった状態でも維持する必要があり、エミュレーションから ECU までのラインにおける電圧降下を補償する必要があります。セルの充電状態を正確にシミュレートするために、バランシング電流の計測値を考慮に入れます。

欠陥シミュレーション

完全な HIL シミュレーションでは、バッテリー障害状態も考慮します。これには、内部抵抗や容量等のパラメータ変更による障害セルのシミュレーションと、断線および短絡のシミュレーションを含みます。CM へ接続する計測ラインの断線に加えて、セルコネクタの遮断もシミュレートできま

す。このコネクタは遮断時にセルネットワーク全体を電氣的に隔離します。

動特性要件

バッテリーの負荷が急激に変化すると、すべてのセル電圧はほとんど同時に変化します。このため、個々のセルモデルのすべてが、1 モデルクロックサイクル以内に電圧を変更できる必要があります。リファレンス値の高速な転送と出力電圧の高速な制御も不可欠です。

その他の代表的な要件としては、短絡保護および過負荷保護と、必要に応じてセル数を容易に拡張できることが求められます。さらに、セルの直列接続により危険な高電圧が発生する可能性があるため、高い絶縁強度も必要です。

EV1077* エミュレーション電子回路のテクニカルデータ

ハードウェア構成	19" 3-HE モジュールあたり 36/40 セル
出力電圧	0...6 V
分解能	120 μ V
精度(動作温度レンジ全域)	+/-1.5 mV
動作温度(周囲温度)	10...50 °C
最大電流(シンク / ソース)	1 A、並列接続に切り換え可能
絶縁性	60 V(モジュールのセル間) 1000 V(セルと環境間)
接続	dSPACE LVDS リンク(銅線または光ケーブル)
全セルに対する最大更新レート	1 kHz
欠陥シミュレーション	ECU とバッテリー間の断線

*): 変更される場合があります



エミュレーション電子回路のセットアップ
セル電圧エミュレーションの実行には、使用するバッテリーのタイプに応じた台数のコントローラブルバッファアンプモジュールを使用します(図6)。このモジュールは0~6Vの範囲で調整可能な電圧を供給します。電圧レンジが比較的に広いため、損傷セルをエミュレートできます。たとえば、0Vを出してセルの短絡をエミュレートしたり、定格よりも高い電圧を出して充電中セルの内部抵抗の増加をシミュレートしたりできます。

出力電圧は全動作温度レンジにおいて ± 1.5 mVの精度を維持します。この電圧は電氣的に絶縁されており、最大800Vまでモジュールを直列に接続できます。リファレンス値のステップは500 μ s以内に完全に修正されます。高速なデータ転

ができます。高速に電圧を変更するには高速なデータ転送が必要です。これはリアルタイムプロセッサとセルエミュレーション間の接続にdSPACE LVDSインターフェースを使用することにより達成できます。接続には銅線または、最大接続距離100mの光ケーブルを使用できます。

制御ボードは、リアルタイムプロセッサから個々のセルに対するリファレンス値を受信し、電氣的に絶縁されたデータをセル電圧エミュレーション用の個々のモジュールへ送信します(図4)。1つの制御ボードは最大128個のセルと通信できます。このボードはリファレンス値だけでなく、リレーを切り換えるための制御コマンドも受信します。これとは逆方向に、リアルタイムプロセッサは各セルを流れる電流とモジュールの温度に関する情報を受信し

高電圧バッテリーをエミュレートするための 高精度電圧源とスケーラブルなセルモデル

送により、全セルの電圧を1ms以内に変更することができます。

供給またはシンク可能な最大電流は1Aです。これは通常のバラシング電流としては十分です。特殊な要求に対しては、モジュールを最大4台まで並列に接続して最大電流を4倍に高めることができます。

エミュレーションユニットのHIL統合

高い精度および電氣的絶縁性が要求されることから、デジタルインターフェースを介する制御が適することは明らかです。これにより、アナログインターフェースを使用する場合に比べて、デジタル信号を絶縁形態で容易に送信することができ、またリファレンス値の送信でも外乱を抑えること

ます。モジュールの出力ステージが過負荷になると、このルートを通してエラーメッセージも出力します。

モジュール上のリレーはECUへの接続をセットアップし、欠陥シミュレーションを目的とする場合には、この接続を切断します。別のリレーで次のチャンネルへのラインを切断して、セルコネクタの遮断をシミュレートすることもできます。特殊なリレースイッチにより、接続および切断中に発生する非現実的な電圧ピークを防ぎます。■

まとめ

バッテリーマネジメントシステム(BMS)のHILテストでは、セルレベルで高電圧バッテリーをシミュレートする必要があります。これを可能にするために、dSPACEはスケーラブルでリアルタイム実行が可能なセルモデルと、セルのターミナル電圧を出力する高精度エミュレーションユニットを提供します。両者を組み合わせることにより、自動制御で再現性の高いテストを実行するHILシミュレータを構築できます。このシステムは、ECU単体のコンポーネントテストと、ECUネットワーク上の統合テストに対応可能です。

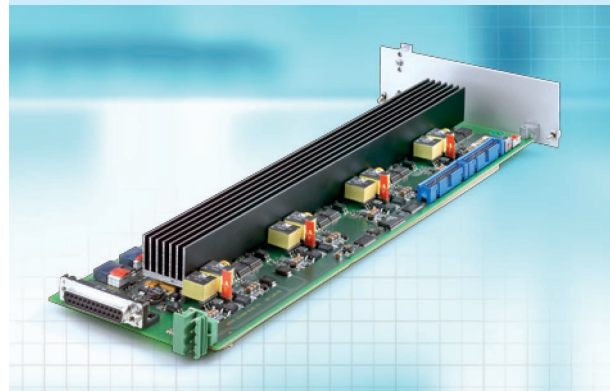


図6: 新しいEV1077バッテリーセル電圧エミュレーションモジュールは、単一バッテリーセルのターミナル電圧を高精度にエミュレートします。