

特集：新型車（デミオ EV）

25

デミオ EV の制御開発 Development of Demio EV Control System

福庭 一志 ^{*1} Hitoshi Fukuba	浦本 征吾 ^{*2} Seigo Uramoto	吉末 知弘 ^{*3} Tomohiro Yoshizue	岡本 篤 ^{*4} Atsushi Okamoto
畠山 未来 ^{*5} Miki Hatakeyama	三戸 秀樹 ^{*6} Hideki Mito	大佐古 昌和 ^{*7} Masakazu Ohsako	末富 隆雅 ^{*8} Takamasa Suetomi

要約

電気自動車は、従来のガソリン車にはないモータ（駆動）制御系/バッテリー（エネルギー）制御系を持っている。モータは高速で正確なトルク制御性を有しているが、その制御は“バイワイヤ”システムであるため高い信頼性が求められる。また、エネルギーを蓄えるバッテリーは、温度や入出力電流がその性能や寿命に大きな影響を与えるため、性能を十分引き出すためにはバッテリー状態に応じた緻密な制御が求められている。

デミオ EV の開発では、これらモータやバッテリーのシミュレーションモデルを独自に開発し、それを活用した MBD(Model Based Development) によって、高い信頼性と緻密さを保ちながら効率的に制御系を開発することができた。開発したモータ制御は、アクセル操作に応じたりニアでなめらかな駆動トルク応答を実現しており、エンジン車両との違和感がなく、電気自動車らしい“Zoom-Zoom”な走りを具現化している。

Summary

Different from engine vehicles, electric vehicles have has a battery (energy) control system and motor control system. The motor has high-speed response and high-accuracy driving-force controllability, but it needs highly-reliable controller due to its “by-wire” control system. Regarding the high voltage battery, temperatures and input/output currents greatly affect the battery's performance and life. Therefore, to enhance their performances, precise control of the system is required.

For the DEMIO EV, simulation models of the motor and battery were originally developed, and MBD (Model Based Development) utilizing them enabled the efficient development of a highly reliable control system. The developed motor control system allows smooth and linear response to the accelerator operations by the driver, realizing "Zoom-Zoom" feel similar to that of engine vehicles, with EV-typical driving performance.

1. はじめに

車両に搭載したバッテリーに電気を蓄え、その電気エネルギーでモータを駆動して走行する電気自動車は、燃料を燃やして駆動力を発生させる車両とは異なったシステムを搭載しており、その制御も異なる部分が多くある。中でも、タイヤ駆動力を制御するモータ制御とバッテリーを管理する高

電圧制御は車両の性能や信頼性に直接影響を与える重要な制御である。デミオ EV では安全で効率的に電気エネルギーを使用するために、個別ユニットごとに制御器を設けそれぞれの状態をモニタし制御すると同時に、個別のコントローラの制御を統合し車両全体をコントロールする車両統合コントローラ（VCM：Vehicle Control Module）を設置し、それを中心として個別ユニットの制御器が協調する制御系

*1～6,8 電気駆動システム開発室
Electric Drive System Development Office

*7 技術研究所
Technical Research Center

を構成した (Fig.1)。

VCM はドライバのシフトレバーやアクセル操作に応じてモータのトルクを制御して車両を駆動 / 減速させるが、同時にバッテリーの充電量や温度、モータインバータ温度、車室内の温度などの状態も把握し、これらのシステムを適切な状態に保つようにバッテリー冷却システムを含めた車両全体を制御する。充電時にはバッテリーを保護しつつ最短の充電時間となるよう充電器と合わせてバッテリー冷却システムを制御する。また、携帯電話通信網を通じて充電や空調を操作したり、車両状態をモバイルで把握することを可能にする遠隔操作システムを実現した。

このように、電気自動車ではドライバの操作を電気信号として検出して車両をコントロールする“パイワイヤ”システムとなっており、バッテリー / モータ等で高電圧を使用していることと相まって、制御には高い信頼性が求められる。そこで、デミオ EV では MBD と HILS (Hardware In the Loop Simulation) を活用することで、信頼性の高い制御系を効率的に開発した。

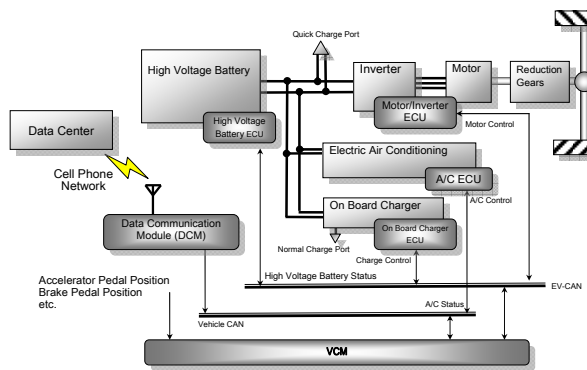


Fig.1 Control System Configuration

2. デミオ EV の制御系

2.1 制御系概要

デミオ EV の制御システムは、前述のように車両全体をコントロールする VCM を中心として個別ユニットごとに設けられた制御器が協調して制御している。VCM は個別の制御器から送られるユニットの状態と VCM に入力されるアクセルやシフトレバーなどによるドライバ操作を総合的に判断し、車両走行 / 充電 / 外部 AC 給電などの状態に制御状態を移しながら制御を行う (Fig.2)。

走行や充電のために制御システムが起動すると、VCM の起動制御に含まれる車両状態判定部でユーザの操作や車両状態を判断し、その結果に基づいて Fig.2 に示すように走行 / 充電 / 遠隔操作 / 外部給電のいずれかに制御状態が移行、その機能を提供する。そこでの処理が終了した後は、車両を安全にシステム停止させるために残電荷の放電など終了処理を行い、車両システムを停止させる。ある状態から他の状態へ制御を移行する場合は、終了処理を経て再び車両状態判定した後に次の状態へ移行することで、状態移

行の安全性を確保している。これら全ての状態を通して高電圧バッテリー ECU によって高電圧バッテリーの状態がモニタされており、その状態と車両要求とに応じたバッテリー電流が VCM によって制御される。

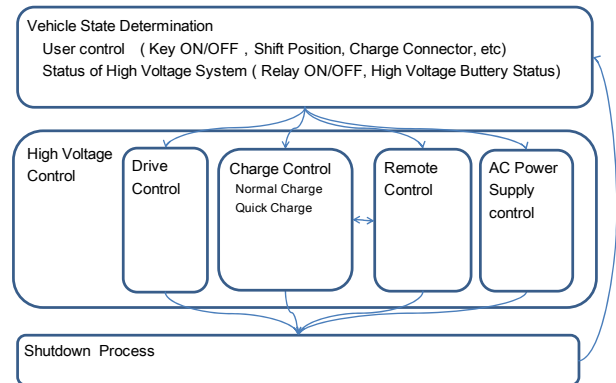


Fig.2 Vehicle Control State Flow

2.2 高電圧制御

電気自動車においてエネルギー供給元となるバッテリーは、その寿命を保ちながら性能を最大限に引き出すために、状態にあわせて適切な範囲で電力を出し入れする必要がある。デミオ EV では高電圧バッテリー ECU が温度と充電状態を元に入力可能電力 / 出力可能電力を決定し、その範囲内で VCM が車両で使用する電力を制御している。また、バッテリー高温・低温時は車両エアコンシステムが出力する空気の一部をバッテリー内に取り込みバッテリー温度を調節する機能を備えている。このために、バッテリー内にはクーリングファンを設置しており、エアコンはユーザによる操作に加えて VCM からの操作も可能で、エアコン ECU と VCM が協調してエアコンとパック内ファンを制御し冷気 / 暖気をバッテリーに送り込んでバッテリー温度を調節する。

また、VCM はバッテリー故障時に備えて SOC (State of Charge) ・バッテリー電流・入出力可能電力などの演算を行っており、バッテリー ECU からの情報が得られなくなった場合には、VCM によるバッテリー状態推定に切り替えて、安全を確保しつつ走行が可能である。

2.3 駆動制御

モータによる駆動は、内燃機関による駆動と比較して制御性が格段に高く、正確な駆動力を高速な応答で発生することができる。デミオ EV では、EV として“Zoom-Zoom”な走り感を実現するために、ドライバのアクセル操作に対するリニアでスムーズなトルク応答を目標に制御系を開発した。開発したトルク制御系の概要を Fig.3 に示す。駆動トルク制御では、アクセルやブレーキの操作によるドライバ指示と車体速度によってあらかじめ設定されたマップから目標駆動トルクが設定される。次に、アクセルペダル操作量の変化や車両の走行状態に応じてトルク変化率を制限した後にフィルタ処理され、モータトルク指示としてインバータに入力される。この時に、制御システム内の通信な

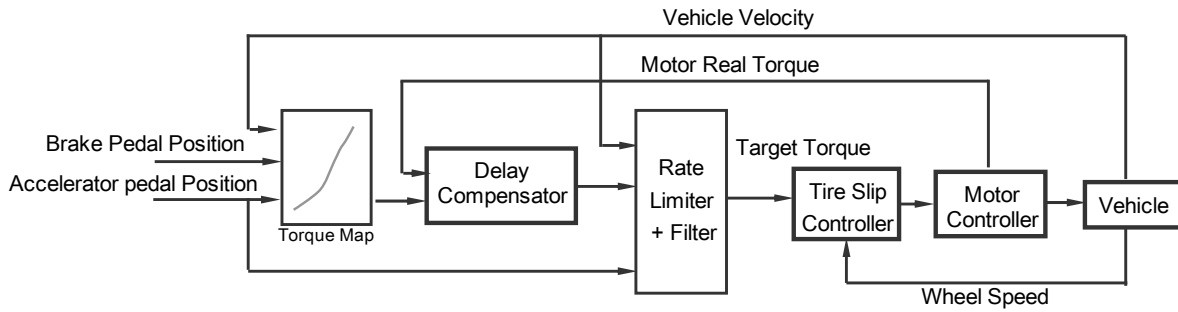


Fig.3 Drive Torque Control

どに起因するモータトルク指示に対する実際のモータトルク出力の遅れを補正することで、アクセル操作と車両加速感のつながりを向上させている。これらの制御パラメータを、シミュレーションと実車実験によって最適にチューニングすることで、アクセル操作に対するリニアでスムーズな駆動トルク応答を実現し、EV における“Zoom-Zoom”な走り感を具現化した。

また、このモータのトルク制御系にはタイヤスリップを抑制する制御も織り込んでいる。これはタイヤの空転を検出してモータトルクを抑制する制御で、駆動時のみではなく減速中の回生トルクでタイヤの空転が発生した場合でも最適なトルク制御を行い、安全な走行を可能としている。

2.4 充電制御

電気自動車のバッテリー充電は、内燃機関の燃料補給に相当し、充電の簡便性が車両の利便性に大きく影響している。デミオ EV の充電システムは、車載充電器を用いた 200V 電源による充電と CHAdeMO 規格（国内の車両・充電器メーカーが参画する協議会で決められた、電気自動車（EV）およびプラグインハイブリッドカー（PHEV）の充電に利用する急速充電方式の共通規格）に対応した急速充電器を用いた充電に対応し、いずれの場合も定電流充電を基本として、VCM が充電電流およびバッテリー冷却システムを制御して充電を行う。

急速充電器による充電では、VCM は充電器の電流と同時に必要に応じて車両のエアコンを制御してバッテリーを冷却しながら充電することで、バッテリーの保護と充電時間の短縮を両立している。この制御は、1 次元シミュレーションツールである AMESim を用いて充電と冷却によるバッテリーパック全体の温度変化をモデル化し、これを用いて充電電流とバッテリー冷却を最適化した。

2.5 遠隔操作制御

デミオ EV ではスマートフォン・PC から遠隔で車両の状態のモニタ、充電開始 / 停止、空調開始 / 停止を行う機能を実現した。この機能では、スマートフォンや PC の Web ブラウザで現在の車両状態をモニタできる他、時間を指定して充電や空調を開始することができる。例えば午後 10 時に「9 時間後に空調開始」と予約指定することで、翌朝快適な

室内温度となった状態で車両に乗り込むことができる。

システムはユーザインタフェースとなる Web ブラウザと、車外サーバ、車載通信ユニット（DCM, Data Communication Module）と VCM で構成される（Fig 4）。ユーザの操作はインターネット網や携帯電話通信網を介して車外サーバに一時保存され、指定された時間に携帯電話通信網・DCM を経由して VCM に送られて実行される。実行の結果は逆経路でユーザに連絡される。

本機能では意図しない充電・空調起動を防止するため、ボンネットが開いている・シフトが P レンジ以外であるなど、危険が予測される場合にはユーザの要求は実行されない。また電池に残った電力が少ない場合は空調の運転を禁止あるいは中断し、思わぬ電力不足を防止している。

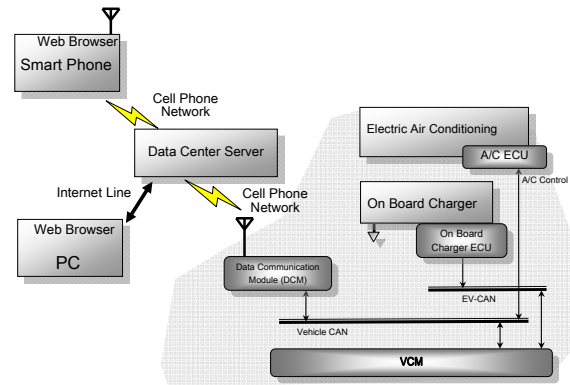


Fig.4 Remote Control System

3. 制御系の開発

3.1 MBD を活用した制御システム開発

これまで述べてきたような、ガソリン車にはないモータ駆動系制御や高電圧制御を搭載した VCM の制御ソフトウェアを、高い信頼性を保ちながら効率良く開発するために、制御対象と制御器をモデル化して制御開発を進める MBD を活用した。特に、車両全体を制御する VCM では、その制御プログラムを更に機能別にサブプログラムに分割した上で、その相互関係を「模式化」「見える化」してつながりを明確に定義して、大規模な制御プログラムをサブプロ

グラム別に分割並行開発した。

3.2 制御プログラムの実装

VCMの制御プログラム開発には、制御系CADであるMATLAB/Simulinkを採用した。このとき、VCMの入出力回路にアクセスするために、VCMのハードウェアに適合する専用インターフェース制御ブロックを独自開発し、プログラム開発環境に組み込んだ。これによりMATLAB/Simulinkのオートコード機能を最大限活用できるようになり、ソフトウェア設計～実装～検証という開発サイクルを短縮し効率的な開発が可能になった。

機能別に並行して開発されるプログラムは、ソフトウェアのバージョン管理ツールを使用してそれぞれの変更履歴を細かく管理した。またソフトウェア管理上のルールを明確に定め開発者間でこれを遵守する体制を築くことで、組み合わせ違いなどによる機能不全などの混乱を未然に防止した。

3.3 HILSによる検証

開発した制御ソフトウェアは、それぞれのユニットごとにHILSで動作を検証し、更に、これらのHILSを相互に接続してデミオEVの高電圧系全体をシミュレーション可能なHILSを構成して、システム故障に対するVCMの動作(フェイルセーフ)を確認した。

HILSは制御対象の動作を再現したシミュレーションモデルによって実車両で制御ユニットに入力される電気信号を模擬し、その電気信号を制御ユニットに力設入力して制御ユニットやそのプログラムの開発・検証を行う技術である。従って、HILSを構成するためには、制御対象のシミュレーションモデルが必要であり、デミオEVの制御開発でも、従来の内燃機関車両にはないインバータ/モータ駆動系およびバッテリーに対して、独自にそのシミュレーションモデルを作成した(Fig.5)。

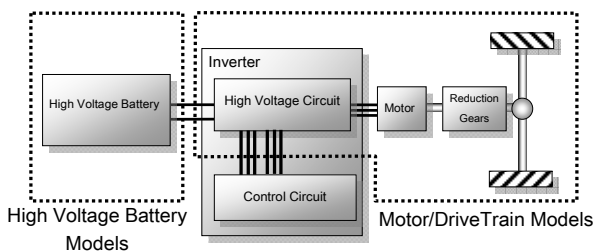


Fig.5 Motor and Battery Model

(1) モータ・駆動系 HILS

モータは電気エネルギーを機械エネルギーへ変換するデバイスであることから、モデルは大きく分けると電気系モデルと機械系モデルから構成されている。電気系モータモデルは、式(1)式(2)に示すdq軸基本モデルをベースにしてモデル化を行い、また、機械系モデルは式(3)に示す回転運動の運動方程式をベースにMATLAB/Simulinkを用いてモデル化を行った。

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + \frac{d}{dt}L_d & -\omega_e L_q \\ \omega_e L_d & R + \frac{d}{dt}L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_e \psi_a \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$T_e = P_n \{ \psi_a i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \} \quad (2)$$

v_d/v_q : d/q軸電圧, i_d/i_q : d/q軸電流, R: 巻線抵抗,

L_d/L_q : d/q軸インダクタンス, ψ_a : 鎖交磁束,

ω_e : 電気角速度, P_n : 極対数

$$J \dot{\omega} = T_e - T_m \quad (3)$$

J: イナーシャ, T_e : モータトルク, T_m : 負荷トルク
: 機械角速度

デミオEVは巻線切り替え機構を備えたモータを搭載しており、回転数に応じて使用する巻線状態が動的に切り替わる。上記電気系モータモデルの(1)式(2)式のパラメータはモータの形状やコイルの巻方で決まるため、巻線を低速側から高速側に切り替えることでこれらのパラメータが変化するが⁽¹⁾、モータの機械系は切り替えによって変化しないため機械系モデル(3)のパラメータは変化しない。モータの2つの巻線状態に対してそれぞれ電磁界解析を行って電気系モデルのパラメータを抽出してマップ化し、回転数に応じてこれを切り替えることで巻線切り替えを備えたモータをモデル化した。

(2) バッテリー HILS

バッテリーに対しても、電力要求に対する電流応答を電解液中と電極中で異なるイオン拡散速度を反映した2段RC回路をベースにモデル化した(Fig.6)。このモデルをシミュレータに搭載し、バック内で96直列に接続されたそれぞれの電圧を出力してバッテリーコントローラに入力したHILSを構成し、高電圧制御系の動作検証を進めた。

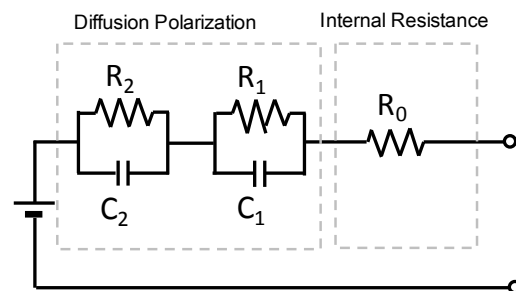


Fig.6 Principle of Battery Models

(3) 車両 HILS

上記モータ/バッテリーのHILSに加え、車両や急速充電器などを模擬する車両HILSを接続し、計3台のHILS構成でEVシステム全体の制御系開発を行う環境を整備した(Fig.7)。3台のシミュレータは光ファイバで接続され、各モデル間の演算パラメータを高速で授受することで、1台の車両として振る舞う。

EVは複雑にシステムが絡み合っており実車での確認が困難であるが、複数のHILSを接続し、各コントローラを

実車両と同様に CAN で接続して制御開発を行うことで、
各コントローラ間の微妙な通信タイミング
EV システムの起動・遮断シーケンスなど
システム間の制御連携や干渉

フェイルセーフ挙動の他システムへの影響有無
などが机上で確認できるようになると同時に、実世界では
再現の難しい様々なフェイルなどを網羅的に考慮したテスト
シナリオに基づいて検証することで、高品質な制御を効
率的に開発することが可能となった。

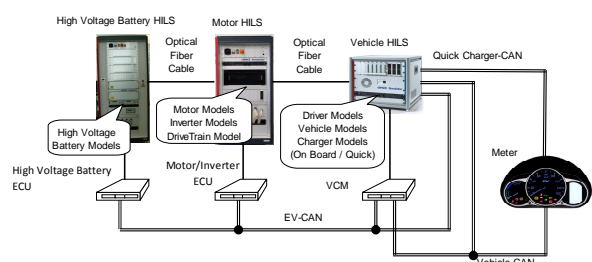


Fig.7 Entire vehicle HILS

4. デミオ EV のフェイルセーフ

4.1 フェイルセーフの概要

電気自動車の制御はパイワイヤシステムとなるため、フェイルセーフには特に配慮する必要がある。デミオ EV における制御系のフェイルセーフは、内燃機関車両制御系のフェイルセーフをベースとして、充電を含む高電圧系とモータ駆動系に拡張したものになっている。

デミオ EV では電気の供給や走行の指示は高電圧 / 駆動制御系の CAN を経由して送られる制御システムとなっており、フェイルセーフでは CAN 信号に対する故障診断に特に注力した。この CAN 信号に対する故障診断は、(1)相互監視：ユニットごとの制御器が相互に出力を監視し故障を検出する、(2)故障診断結果共有：故障を検出した場合、その故障を他のユニット制御器と共有しシステム全体に影響を与えない、(3)通信異常：CAN 通信自体の状態を監視し故障を検出した場合システムを安全な状態へ移行させる、などの機能を備え、車両全体の状態を監視・故障の検出を行っている、

故障を検出した場合、VCM は故障の重篤度に応じて車両を以下のフェイルレベルに移行させると同時にユーザにその状態を提示して対応を促すことで、安全を確保すると同時に利便性の低下を最小限にとどめている。

- レベル4：警告灯点灯
- レベル3：制限走行（トルク抑制）
- レベル2：走行禁止（高電圧供給継続）
- レベル1：高電圧供給を遮断

4.2 フェイルセーフの検証

デミオ EV の制御系は、VCM を中心に構成されており、フェイルセーフにおいても VCM を中心とした検証を進め、全ての VCM 入出力と CAN で接続されたユニットを対象

として、フェイル時の動作を検証した、

更に、連続して発生した複数の故障に対しても、数万通りの故障組み合わせをリストアップし、(1)故障検出の独立性：最初の故障が発生しても問題なく次の故障が検出できること、(2)故障検出の影響性：最初の故障の結果が影響して他の故障を誤判定しないこと、の観点から確認が必要な約 4,000 通りの組み合わせを抽出して、HILS・実車を用いて独立性と影響性を検証した。

5. まとめ

デミオ EV の制御システムについて解説した。制御系は車両全体を制御する VCM を中心として構成されており、アクセル操作に対するリニアでなめらかな駆動トルク応答により、エンジン車両との違和感がなく、かつ、電気自動車らしい走りでの“Zoom-Zoom”を具現化した。

この制御プログラムは MBD を活用して開発を進め、万一のシステム故障に対しても、車両を安全に制御できるように、車両全体を HILS によって再現した動作確認も行ってフェイルセーフを検証した。

参考文献

- (1) 前村明彦：埋込み磁石形同期電動機の電子巻線切替えによる速度範囲の拡大方法，平成 22 年電気学会産業応用部門大会，p.II-93-96 (2010)

著者



福庭 一志



浦本 征吾



吉末 知弘



岡本 篤



畠山 未来



三戸 秀樹



大佐古 昌和



末富 隆雅