

feature article

ハイブリッド電気自動車用パワートレインの電動化技術開発

Development of Electric Components for Hybrid Electric Vehicle

吉原 重之 Shigeyuki Yoshihara

濱野 宏 Hiroshi Hamano

山田 博之 Hiroyuki Yamada

中嶋 賢市郎 Kenichiro Nakajima

日立グループは、電気自動車 (EV) やハイブリッド電気自動車 (HEV) に向けたモータ、インバータ、バッテリー (日立ビークルエナジー株式会社製) をすべて供給できるサプライヤーとして、数多くの環境対応製品を提供してきた。近年では、各製品の小型、高出力化に加え、HEV車両の総合燃費シミュレーション技術も開発している。今後とも、EVやHEV用の最適な部品の提供およびシステムソリューションの提案により、低炭素社会の実現に貢献していく。

1. はじめに

近年、低炭素社会の実現に向けたさまざまな取り組みが行われているが、自動車においては、EV (Electric Vehicle: 電気自動車) に先駆けて、大幅な燃費改善を実現するHEV (Hybrid Electric Vehicle: ハイブリッド電気自動車) が、今後の自動車の核になると考えられている。HEVは、エンジンと電動モータそれぞれの効率のよい領域を制御によって組み合わせ、低燃費かつ力強い走りを実現する。

日立グループは、伝統あるモータの開発技術力と、パワーモジュールを中心とした三相交流モータ制御技術に加え、車両システムソリューションを提供し、小型・軽量、高効率、低価格のHEVシステムを開発した。

ここでは、HEV用電気駆動システムを構成するモータ、インバータの小型高出力化に対するトレンド、およびシステムシミュレーション技術について述べる。

2. HEVシステム開発技術

ハイブリッド車両はモータ、インバータ、バッテリーを主体にエンジンやトランスミッションと協調して燃費向上を実現している。

日立グループは、このようなHEVのシステム開発技術として、これら要素のモデル化と作動状況のシミュレーション解析により、燃費向上に寄与する制御技術やコンポーネントの特性検討を行っている。

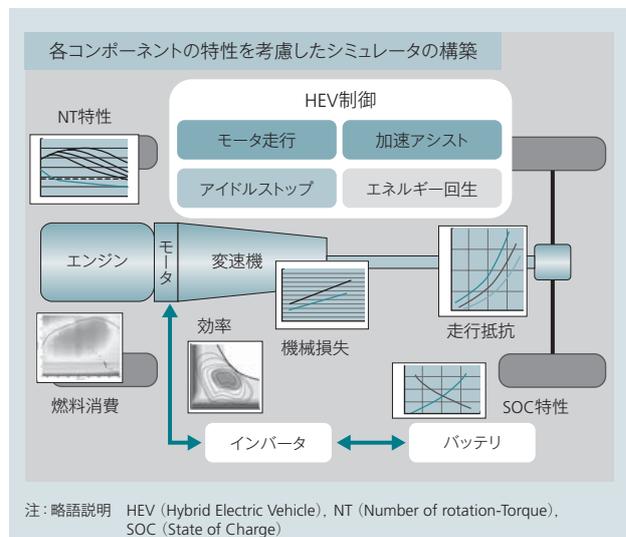
2.1 燃費解析

燃費向上技術では、エンジン、変速機、モータ・インバー

タ効率、バッテリー性能、走行抵抗などの特性を入力して、走行状態に応じたコンポーネント動作状況や燃費を把握できるシミュレータを構築している (図1参照)。

また、これらを構成するコンポーネントの特性を変化させた場合や、エネルギーマネジメントの制御ロジックを改善した場合などの燃費効果の解析を行っている。

このような取り組みにより、日米欧でそれぞれ設定されている走行モード〔10-15, JC08, UDDS (Urban Dynamometer Driving Schedule), NEDC (New European Driving Cycle)〕に対するエンジン、モータの動作範囲や頻度を解析することが可能である。



注: 略語説明 HEV (Hybrid Electric Vehicle), NT (Number of rotation-Torque), SOC (State of Charge)

図1 燃費解析シミュレーション
HEVシステムの性能を決める各コンポーネントの特性を反映したシミュレーションモデルを構築し、特性検討や、感度・動作解析によって燃費向上に寄与するシステム構成を把握する。

解析結果の例を図2に示す。

各モード走行での燃費の変化や、コンポーネントの特性相違による燃費への影響を解析することで、例えば重量、効率、制御方式などそれぞれの要素、条件に対する燃費感を把握することが可能であり、コンポーネント組み合わせ時のシステム性能の向上を図ることができる。

2.2 コンポーネント動作解析

前述したシミュレータは車両全体を想定して燃費解析を行うものであるが、これとは別にモータ、インバータ、バッテリーだけの詳細モデルを組み込んだシミュレータを用い、コンポーネントの詳細動作解析なども行っている。

その一例として温度解析の概要を図3に示す。

このように、モータ、インバータ、バッテリー間の詳細な挙動解析を行うことで、課題の把握および対策技術の検討、信頼性の向上に貢献している。

今後、HEVの普及促進、ひいては地球環境への社会貢献をめざして、システム開発技術に基づくHEV製品の性能向上に尽力していく。

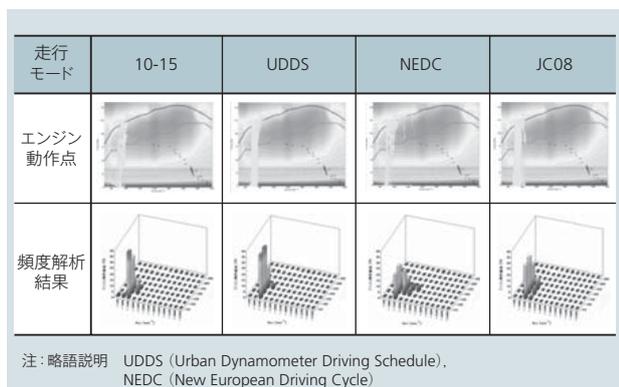


図2 シミュレーション解析結果

日米欧の各走行モードにおけるHEVのエンジンやモータの動作点と頻度を解析し、システム全体がより高効率に動作するための改善を行う。

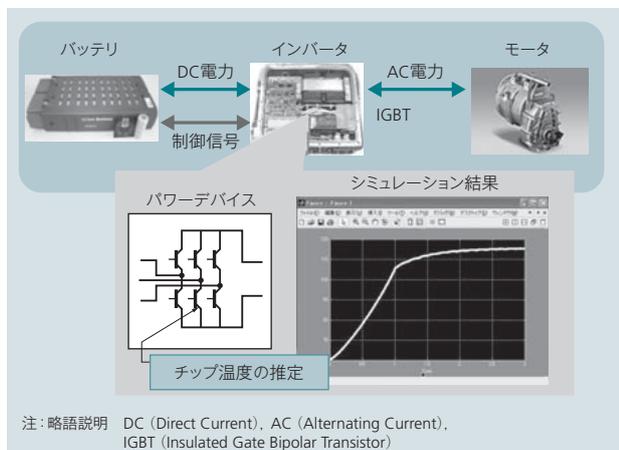


図3 コンポーネント動作解析

バッテリー、インバータ、モータの各コンポーネントをモデル化したシミュレーションにより、実験確認が困難な現象や試験条件設定が複雑な動作についても詳細な解析を行うことができる。

3. モータ開発技術

地球環境問題に対応するため、自動車の燃費・排出ガス規制が強化される中、車両駆動の電動化が注目されている。日立グループは、これまで、車両駆動用モータとして、小型・軽量、高出力、高効率を達成するためIPM (Interior Permanent Magnet：永久磁石埋め込み式) 同期電動機を採用し、出力／質量比の大きいモータの開発に取り組んできた。これは、日立グループの持つ最適磁気回路シミュレーション技術を駆使したコア形状やマグネット配置の最適化、および長年蓄積された絶縁技術がその高性能化を可能としたものである。しかしながら、この高出力密度化に伴い、モータのエネルギー密度の高まりによる騒音や振動への影響が懸念される。

一方、モータとガソリンエンジンを組み合わせたHEVでは、モータだけで走行するEV走行範囲が拡大方向にあり、さらにはPureEVの一般販売や家庭用電源で充電可能なプラグインHEVの実用化が間近とされている。今後、車両走行に占めるモータ駆動比率の増加に伴い、モータの騒音・振動は大きな課題となってくる。ここではモータの低振動・低騒音化技術として、その発生要因の一つとなるトルクリプル(トルク脈動)の低減化技術について述べる。

3.1 一般的なトルクリプルの低減方法

車両駆動用モータでは、他メーカーでもIPMモータが広く採用されており、近年のモータ制御技術の向上により、滑らかな走りが実現されている。ところが、モータ自体が出力するトルクには、その構造上からトルクリプルが発生するため、低速運転時の脈動や高速運転時の騒音・振動の要因の一つとなっている。IPMモータにおいてトルクリプルを小さくするには、一般的に、図4に示すようにマグネットを分割して軸方向にロータコア部分をオフセットスキュー(Skew)する方法が知られている。

しかし、オフセットスキューすることでマグネット数が増えて加工費が上昇し、さらにロータが組み立てにくくな

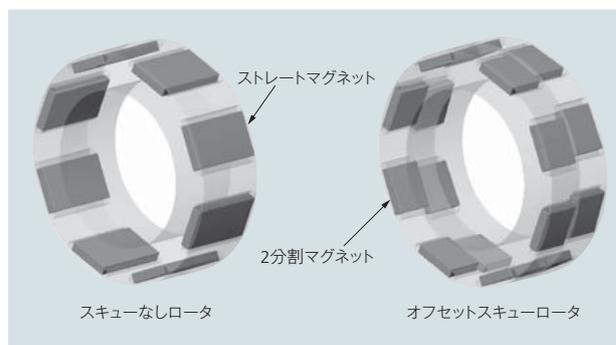


図4 オフセットスキューロータの説明図

マグネットを軸方向に分割し、その分割面で周方向にマグネットをずらすことでトルクリプルを低減する手法である。

るなどコスト高の要因となる。また、出力やトルクも減少する方向になる。そこでスキューを行うことなくトルクリプルを低減できるリプルリダクションロータを考案した。

3.2 リプルリダクションロータの原理・構造

トルクリプルはステータ巻線による磁束と磁石による磁束との相互作用、およびステータスロット形状やロータ極形状の影響により、磁束の粗密が分布することで出力トルクに脈動が発生する現象である。このトルクリプルに、これとは逆位相となるトルク波形を掛け合わせることができればトルクリプルをキャンセルすることが可能となる。この逆位相のトルク波形を発生させる手段として、ロータの形状に手を加えて構造的に磁束の流れを変化させ、ステータに鎖交する磁束の流れを変えるという手法をとった。具体的には、**図5**に示すとおり、ロータ表面直下のマグネット両脇部付近のロータ外周表面に、ロータ磁極の1極置きに溝を設けることで、溝あり極が発生するトルクリプル波形を、溝なし極が発生するトルクリプル波形に対して位相を反転させられるようにした。

3.3 リプルリダクションロータの磁界解析結果

このリプルリダクションロータの効果を確認するため、磁界解析を行った。

その結果を**図6**、および**図7**に示す。

この結果、溝なし極が発生するトルク波形と、溝あり極が発生するトルク波形とが合成され相互に打ち消し合うことで、リプルを低減できることが確認できた。

この技術の適用によってコストを上げることなく、スキューなしロータに比べてトルクリプルを60%程度低減可能であることがわかる。また、ロータ外周表面の溝形状や位置を最適化することにより、基本的なトルク特性にほとんど影響を与えず、電流位相の全領域にわたってトルクリプルを低減できる。現在、この技術を採用したモータによるHEV、EVの開発が進行中であり、コストを抑えなが

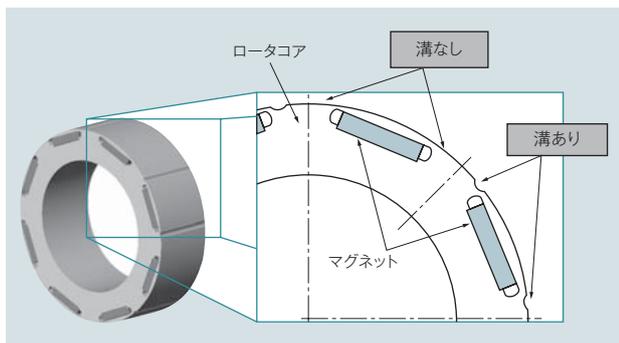


図5 リプルリダクションロータの構造
ロータ表面直下のマグネット両脇部付近のロータ外周表面に、ロータ磁極の1極置きに溝を設ける。

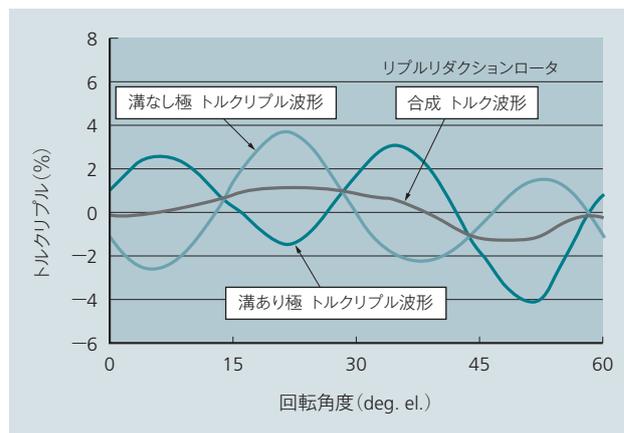


図6 リプルリダクションロータトルクリプル解析結果
溝なし極と溝あり極のトルクリプル波形を掛け合わせて相互に打ち消しあうことで、トルクリプルの低減が可能となる。

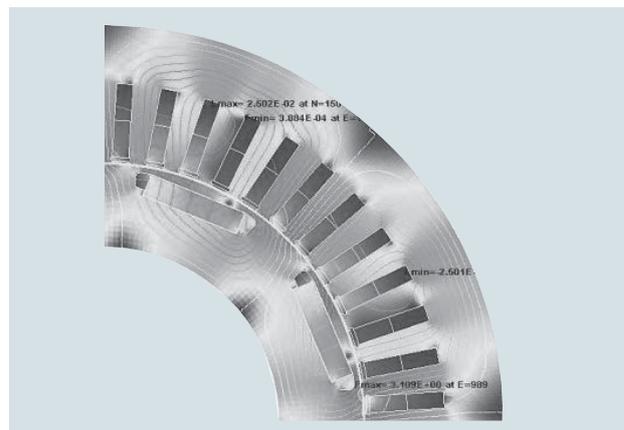


図7 リプルリダクションロータ解析コンタ図
ロータ磁極外周表面に1極置きに設けた溝の影響により、ステータに鎖交する磁束の流れが変わる。

ら低振動・低騒音を実現したモータの拡販を今後、さらに推進していく。

4. インバータ開発技術

HEV用インバータには、車両の限られたスペースに対応した小型化、走行性能確保に対応した高出力(大容量)化、および低コスト化が要求されている。

日立グループは、スイッチング半導体素子にIGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) を使用したPWM (Pulse Width Modulation) 方式インバータを採用し、各種車両アプリケーションに対応した水冷および空冷のインバータを開発している。

日立グループにおけるインバータの技術開発推移を**図8**に示す。

現在の開発段階として、2007年モデルの開発はすでに終了しており、次期モデルが開発の最終フェーズに入っている。2007年モデルの容積当たりの出力容量は、10年前のモデルに対して約8.3倍の小型高出力化を達成している。

2007年モデルインバータの外観を**図9**に、内部構造を**図10**にそれぞれ示す。

このインバータの特徴として、日立グループが独自に開発した600 V直接水冷IGBTの採用と、主回路シミュレーション技術による低インダクタンス構造の採用が挙げられる。

まず、直接水冷IGBTは、スイッチング半導体素子を搭載しているベースプレートの下面に形成した冷却フィンを、ダイレクトに冷却水路に浸すことにより素子サイズを縮小して、小型・高出力・低コスト化を実現している。

また、**図11**に示す独自のシミュレーション技術を用いて、インバータ主回路の低インダクタンス構造を実現し

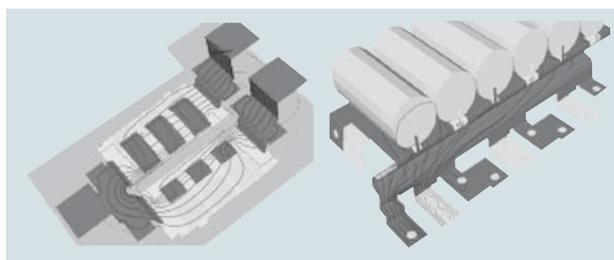


図11 インバータ主回路シミュレーション技術（インダクタンス解析）
日立独自のシミュレーションツールを用いて低インダクタンス構造を検討し、小型かつ低コストのインバータを開発している。

た。これによりスイッチング時のサージ電圧低減が可能となり、小型かつ低コストの低耐圧部品を使用したインバータを開発することに成功した。

日立グループは、これらの開発技術をベースとして、今後も市場のニーズに適したインバータの開発を進めていく予定である。

5. おわりに

ここでは、HEV用電気駆動システムを構成するモータ、インバータの小型高出力化に対するトレンド、およびシステムシミュレーション技術について述べた。

HEVの市場規模は急速に拡大している。日立グループは、顧客のニーズに応える製品開発を継続的に推進してベストソリューションを提供し、低炭素社会の実現に貢献する取り組みを強化していく。

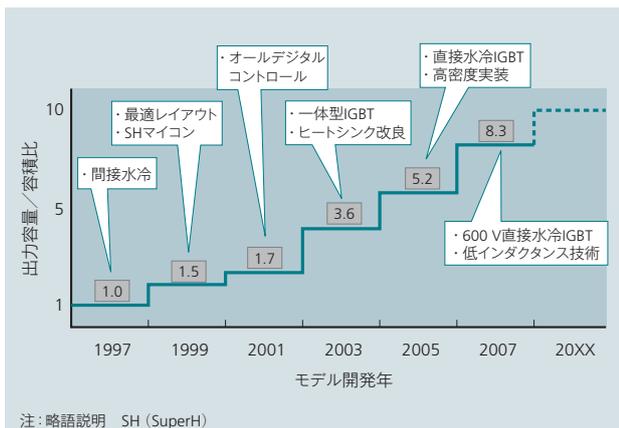


図8 インバータの技術開発推移
2007年モデルの容積当たりの出力容量は、1997年モデルに対して約8.3倍の小型高出力化を達成している。



図9 2007年モデルインバータの外観
外形サイズは367×373×162 (mm) であり、直接水冷IGBT、低インダクタンス構造などの技術を採用して量産化した。

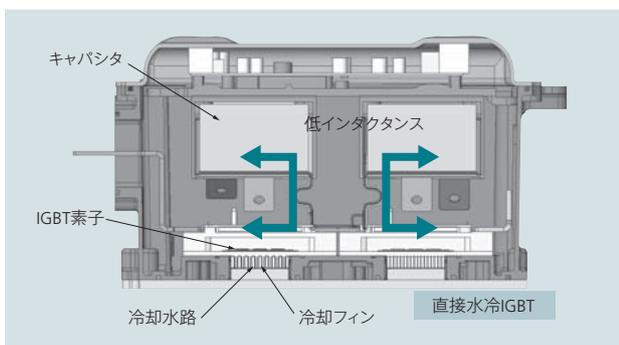


図10 2007年モデルインバータの内部構造
直接水冷IGBTに対して、キャパシタから伸びるバスバーをダイレクトに接続することにより、低インダクタンス構造を実現した。

執筆者紹介

吉原 重之
1980年株式会社日立カーエンジニアリング入社、日立オートモティブシステムズ株式会社 パワートレイン&電子事業部 パワートレイン設計本部 制御システム設計部 所属
現在、HEVシステム設計に従事
自動車技術会会員

濱野 宏
1987年日立製作所入社、電動応用統括推進本部 モータ事業本部 第一開発部 所属
現在、EV/HEVモータの開発、設計に従事
自動車技術会会員

山田 博之
1988年株式会社日立カーエンジニアリング入社、日立オートモティブシステムズ株式会社 パワートレイン&電子事業部 パワートレイン設計本部 制御システム設計部 所属
現在、HEVシステム設計に従事
自動車技術会会員

中嶋 賢市郎
2003年日立製作所入社、日立オートモティブシステムズ株式会社 パワートレイン&電子事業部 電子設計本部 インバータ設計部 所属
現在、HEV向けインバータの開発、設計に従事