

グリーンモビリティを支える パワーエレクトロニクスコンポーネント技術

Power Electronics Component Technologies for Green Mobility

井出 一正

Ide Kazumasa

本棒 英利

Hombo Hidetoshi

中津 欣也

Nakatsu Kinya

牧 晃司

Maki Kohji

省エネルギー化を促進するには、パワー半導体による電力変換と制御を中心とした応用システム技術であるパワーエレクトロニクス技術が必要不可欠である。そのコンポーネント技術としてインバータ、電池、モータが挙げられる。日立グループは、パワーデバイスから電力制御まで幅広い分野でパワーエレクトロニクスの先端技術を研究し、製品化している。低燃費・低排気を実現するEVシステムなどにおいても、インバータ装置のパワー密度を向上する直接水冷技術、パワー半導体の低損失化技術、リチウムイオン電池のエネルギー密度を向上する材料技術、そして、モータの小型・軽量・高効率化を促進するための最適設計技術を生かし、グリーンモビリティの一翼を担っている。

1. はじめに

地球温暖化の防止に貢献するためにCO₂排出削減が求められており、運輸、民生部門での省エネルギー化や発電部門における風力、太陽光などの新エネルギーの有効利用を促進することが重要になっている。さらに、東日本大震災では生活に欠かすことのできない電力や燃料などの供給不足といった問題が発生した。今後は新エネルギーの活用やHEV (Hybrid Electric Vehicle: ハイブリッド電気自動車)、EV (Electric Vehicle: 電気自動車) などの活用により、非常時の電力確保や燃料消費の少ないシステムの要求も高まってくると予想される。

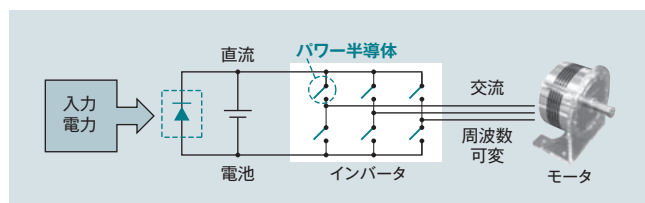


図1 | パワーエレクトロニクスによる電気駆動システムの構成

直流で電力を貯蔵する電池、直流から可変周波数の交流に変換するインバータ、周波数に比例して回転数を変化できるモータから構成される。

運輸部門では、従来の内燃機関を用いた自動車からHEV、EVへの代替によって省エネルギー、省燃費効果が期待できる。発電部門では、風車の出力変動を補償するような電力制御や、変動を吸収するような電池などの電力貯蔵装置によって、風力など新エネルギーの導入量を増やすことができる。さらに非常時には、HEV、EVに車載される電池や発電機、あるいは発電部門に導入される新エネルギーや電力貯蔵装置が、一時的な電力確保にも利用できると考えられる。

これらに必要なパワーエレクトロニクスシステムを構成すると、発電装置や電力系統から入力電力が与えられることでモータ動力などの出力が得られる。すなわち、入力を直流に変換した後、電力を貯蔵する電池、直流から可変周波数の交流に変換するインバータ、周波数に比例して回転数を変化できるモータが主要なコンポーネントとなり、パワーエレクトロニクス技術による電気駆動システムを構成することができる(図1参照)。

ここでは、パワーエレクトロニクスシステムを構成する日立グループのコンポーネント技術について述べる。

2. インバータ技術

インバータ技術について、HEVやEVの電気駆動システムを想定して説明する。インバータは車両搭載性が重視され、小型軽量化、航続距離を延ばす高効率化、運動性能を高める高出力化、厳しい車載環境下での高信頼化をテーマに開発を進めてきた。インバータ装置は直流をスイッチングによって任意周波数の交流に変換する装置であり、以下にインバータ装置とスイッチングを担うパワー半導体について述べる。

2.1 インバータ装置

モータを駆動するインバータ装置は、一般にエンジンルームの限られたスペースに搭載されることが多く、内蔵されるパワーエレクトロニクス部品の高信頼化や高集積化が課題である。搭載される主な部品として、パワー半導体を実装するパワーモジュール、バッテリーの出力変動を緩和するキャパシタ、マイクロコンピュータに代表される制御回路などが挙げられ、部品点数は数百点に及ぶ。日立グループは、スイッチングによってモータへの出力電流を制御するパワーモジュールの開発に注力し、内蔵するパワー半導体の低損失化や放熱性能を向上することにより、高電流密度化と高信頼化を進め¹⁾、5年で車載インバータ装置の体積を半減させ、高パワー密度化を実現している(図2参照)。

2.2 パワー半導体

パワー半導体は冷媒による熱交換で冷却することができるパワーモジュールに実装される。

パワー半導体では、冷却器の小型化や車両の運転効率改善のため、低損失化が重要な課題である。損失を低減するためには、スイッチング損失の低減をねらった高速化と電流を通電した際の導通損失を低減する必要がある。従来は半導体の微細化技術を用いて出力電流密度を高めてきたが、その一方で過電流を抑制することができず破壊しやすくなる課題があった。日立グループは、定格電流付近の出力電流密度を向上し、導通時の電圧を低減しながらも過電流を抑制することができるHiGT (High-conductivity Insulated Gate Bipolar Transistor: 高伝導IGBT)を開発して、この課題を解決してきた²⁾。今後はIGBTなどのSi (シリコン) デバイスに比べて破壊電界強度特性を約10倍化できるSiC (炭化ケイ素) を活用することで、さらなる導通損失低減に取り組んでいく。

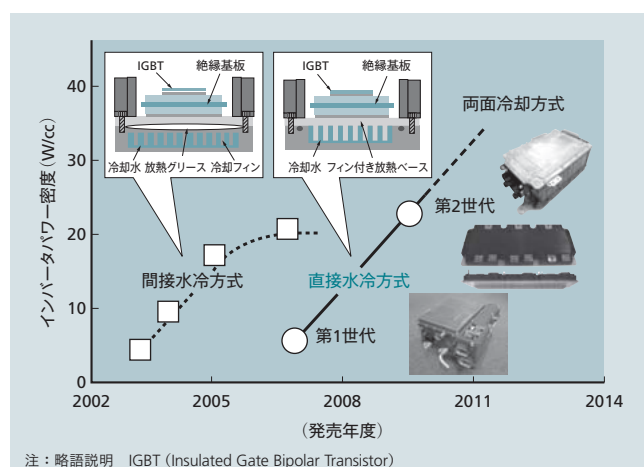


図2 | 日立グループの車載インバータ開発トレンド
年次を経ながらパワー密度を増加させてきた。そのキーとなるのがパワーモジュールの直接水冷技術である。

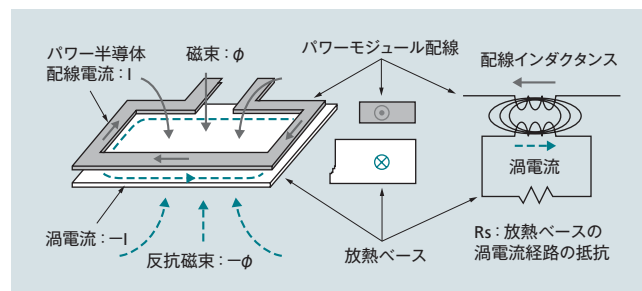


図3 | パワーモジュールの配線インダクタンス低減技術

パワー半導体周辺の配線で作られた磁束を放熱ベースに鎖交させ、渦電流を放熱ベースに流して磁束を打ち消し、配線インダクタンスを低減する。

パワー半導体を実装するパワーモジュールでは、回路を構成する複数のパワー半導体で生じる損失を効率よく冷却する技術と、高速スイッチングの際に生じるサージ電圧抑制が課題である。パワー半導体で生じる損失は、SiN (窒化ケイ素) などのセラミックスや高熱伝導性の樹脂絶縁材を用いた配線基板を介して放熱ベースに熱伝導され、放熱グリースを介してインバータケースに設けた冷却フィンで冷却していた。日立グループは、インバータケースに設けていた冷却フィンを放熱ベースと一体化することにより、放熱グリースを用いなくて冷却できる直接水冷方式を開発した¹⁾。直接水冷方式で、放熱ベースに設けた冷却フィンへ直接冷却水を流し、水路の一部をインバータケースで構成して熱抵抗を約25%低減した。一方、スイッチング時の損失を低減するため、パワーモジュールの配線に寄生するインダクタンス成分を抑制し、パワー半導体で発生するサージ電圧を低減する必要がある。日立グループでは、配線インダクタンスを低減するため、配線を流れる電流が作る磁束を放熱ベースに鎖交させ、渦電流を流して磁束を打ち消すことで配線インダクタンスを低減した³⁾(図3参照)。今後は、さらに冷却性能を改善する両面冷却型パワーモジュールを開発する。

3. リチウムイオン電池技術

日立グループは1990年代初頭から、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) が主導する幾つかの大型LIB (Lithium-ion Battery: リチウムイオン電池) 開発事業に参画し、電力貯蔵あるいはEV用途に向けたLIBの研究開発を推進してきた。この間、これらの研究成果を活用することで世界に先駆け、高出力密度のHEV用LIBおよびハイブリッド鉄道車両用LIBを製品化している。引き続き、現在進めている後継事業において、エネルギー密度1.5倍を目標とするPHEV (Plug-in HEV: プラグインハイブリッド自動車) 用LIBの開発に取り組んでいる。また、風力や太陽光など新エネルギーの有効利用を促進するため、これらに適用する種々のLIBを開発している。

3.1 リチウムイオン開発の取り組み

一般に、HEV用LIBは高出力であるがエネルギー密度が小さく、一方、EV用LIBは高エネルギー密度であるが出力密度が小さい。今後のLIBは、高出力密度と高エネルギー密度を両立し、加えて長寿命化、低コスト化および高安全化に対する要求も満たす必要がある。これらの要求に対して、LIBに適用する電池材料をいっそう高性能化する必要がある。

LIBは、正極および負極にリチウムイオンを吸蔵・放出する材料を用い、正極と負極の間でリチウムイオンをやり取りすることで充電・放電が行われる(図4参照)。日立グループは、LIBの高出力・高エネルギー密度、長寿命化をめざし、正極および負極の高容量化、反応可逆性の向上、電解液のイオン抵抗低減、セパレータなどの電池部材の耐久性向上、あるいは電極製造プロセスの最適化などに取り組んでいる。

3.2 長寿命マンガン系正極の開発

正極材料はLIBのキーとなる材料であり、その開発事例を紹介する。現在、民生用LIBでは希少資源のCo(コバルト)を主原料とする正極材料が主に用いられているが、産業用LIBの正極材料として資源が豊富で低コスト化が可能なMn(マンガン)系正極に注目している。しかしながら、従来のスピネルMn系正極は充放電に伴い結晶体積の膨張収縮が発生するため、膨張収縮の繰り返しによって結晶構造が崩壊しまうこと、電解液に不純物として含有する酸によってMnが溶出してしまふことの二つが原因で十分な寿

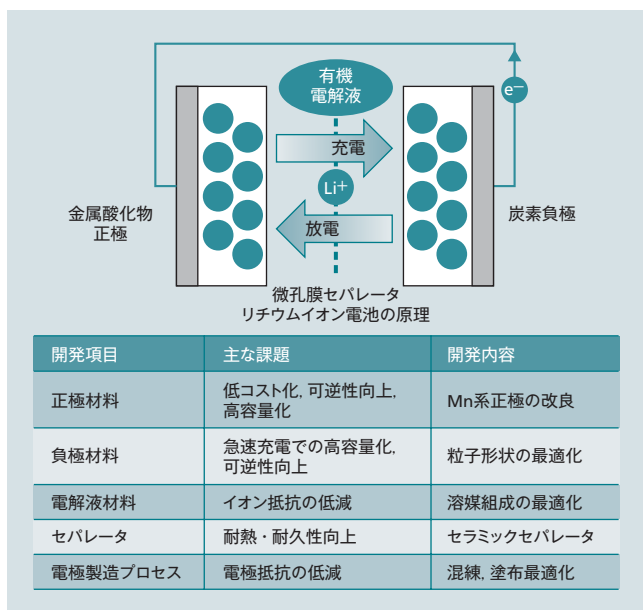


図4 | リチウムイオン電池の原理と開発内容

リチウムイオン電池は、有機電解液を含浸した樹脂膜セパレータを挟んだ正負極間でリチウムイオンを授受し、電子を取り出して電池として機能する。正・負極には、それぞれリチウムイオンを吸蔵・放出可能な材料が用いられる。

命が得られていない。

この観点から、Mnの一部を他の元素で置換して結晶構造を安定化させること、および耐酸性に優れた層状系複合酸化物を混合することを試みた。その結果、充放電反応に伴う体積変化を約50%低減し、同時に電解液へのMn溶出を約50%抑制することができた。これらの成果により、サイクルの経過に伴う容量低下を従来の $\frac{1}{2}$ に低減でき、10年以上の寿命を実現できる見通しを得ている⁴⁾。

そのほか、PHEV、建設機械、鉄道車両などの移動体と、風力発電や太陽光発電用の蓄電システムでは、要求特性が異なるため、それぞれの用途に応じた電池材料の最適化を進めている。

4. モータ技術

EV、HEVや鉄道向けモータでは小型・軽量・高効率が高重要視される。また、限られた開発期間内に極限設計を実現するには、シミュレーションを駆使した最適設計が必要になる。以下に、最適化設計技術と小型・軽量・高効率化の取り組みについて述べる。

モータを同出力で小型化すると、放熱面積の縮小からモータ内部温度が上昇し、磁石の不可逆減磁や損失の増加が問題となる。そのためモータを小型化するには温度上昇を考慮したモータ特性計算とそれを用いた形状最適化が求められる。日立グループは、磁界解析と熱解析を連成して求めた温度およびモータ特性を用いて最適化計算を実行できる技術を開発した⁵⁾。

出力3.7 kW(5馬力)の永久磁石同期モータを対象に最適化計算を試みた。このモータは、1910年の日立創業製品である5馬力誘導電動機(以下、創業モータと記す)と同一の仕様を設定した。最適化計算とあわせて、日立グループの先端モータ材料(磁石、エナメル線、有機材料など)を積極的に活用して磁石モータを設計・試作している。温度上昇を考慮して最適化したモータ構造により、創業

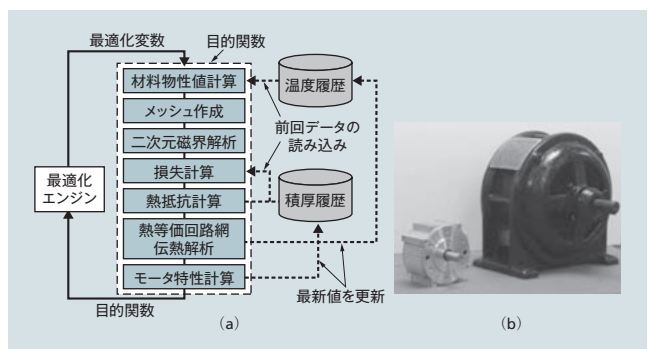


図5 | 熱-磁界連成解析による最適化計算フロー(a)、および創業モータと試作モータの外観(b)

試作モータは創業モータ(日立創業製品である5馬力誘導電動機)に比べて体積が約 $\frac{1}{3}$ である。

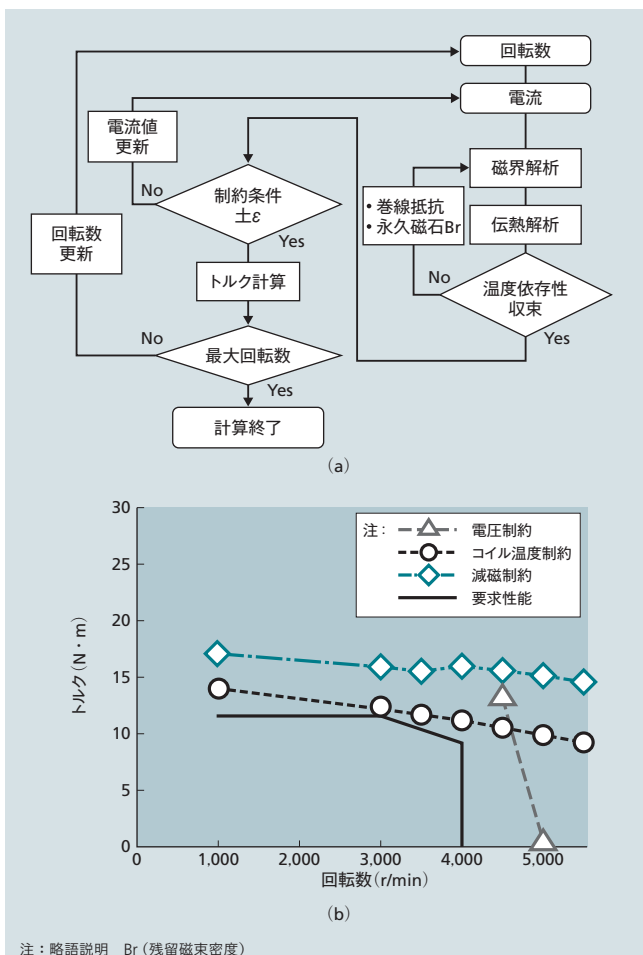


図6 | 制約条件を考慮した回転数-トルク特性の計算フロー(a) および制約条件を課した場合のトルク限界計算例 (b)
 温度、磁石減磁、電圧の3項目を制約条件にして、モータの回転数-トルク特性を計算できる。

モータ比で約1/3の小型化を実現することができ、94%の高効率を達成している (図5参照)。

最適化計算を基に、制約条件を考慮して回転数-トルク特性を計算する技術も開発した。制約条件としては、(1) コイル温度上昇許容値、(2) 永久磁石が磁力を失うことのない可逆減磁限界、(3) 電圧上限値の3項目を設定している。この計算技術により、磁石モータの回転数-トルク特性において3項目の制約条件を課した場合のトルク限界の計算ができる。これらに制約されるトルクの限界値を回転数-トルク特性として表すことができ、個々に設計したモータの設計制約に対する要求性能の余裕度を数値化して評価できる (図6参照)。

5. おわりに

ここでは、パワーエレクトロニクスシステムを構成する日立グループのコンポーネント技術について述べた。

日立グループは、今後も、インバータ、電池、モータなどコンポーネント技術を保有するとともに、全体を把握して協調することで高性能なパワーエレクトロニクスシステムを提供することにより、グリーンモビリティに貢献していく。

参考文献など

- 1) 浜田, 外: 低燃費で地球に優しく力強いHEVシステムの開発, 日立評論, 86, 5, 343~346 (2004.5)
- 2) M. Mori, et al.: A Trench-Gate High-Conductivity IGBT (HiGT) with Short-Circuit Capability, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol.54, No.8, pp.2011-2016 (2007.8)
- 3) K. Nakatsu, et al.: A Super Compact Inverter with a New Concept Power Module, PCIM JAPAN, pp87-92 (1998)
- 4) 日立ニュースリリース, <http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2010/04/0405a.html>
- 5) 岩崎, 外: 熱-磁界連成最適化による永久磁石同期モータの小形化設計と試作機による性能評価, 回転機/半導体電力変換/モータドライブ合同研究会, RM-10-066 (2010)

執筆者紹介

- 

井出 一正
 1988年日立製作所入社, 日立研究所 情報制御研究センター パワーエレクトロニクスシステム研究部 所属
 現在, パワーエレクトロニクスシステムとコンポーネント技術の研究開発に従事
 博士 (工学)
 電気学会上級会員, 日本磁気学会会員, IEEEシニア会員
- 

中津 欣也
 1994年日立製作所入社, 日立研究所 情報制御研究センター パワーエレクトロニクスシステム研究部 所属
 現在, 車載インバータ, パワーモジュールの研究開発に従事
 電気学会会員
- 

本棒 英利
 1991年日立製作所入社, 日立研究所 次世代電池研究センター 電池研究部 所属
 現在, リチウムイオン電池材料の研究開発に従事
 博士 (工学)
 電気化学学会会員, 炭素材料学会会員
- 

牧 晃司
 1997年日立製作所入社, 日立研究所 情報制御研究センター モータシステム研究部 所属
 現在, モータシステムの解析技術開発に従事
 電気学会会員