

CO₂排出量削減に貢献する パワーエレクトロニクス製品の取り組み

Power Electronics Equipment Contributing to CO₂ Reduction

嶋田 恵三 Keizo Shimada
三島 彰 Akira Mishima

天沼 武宏 Takehiro Amanuma
松本 洋平 Yohei Matsumoto

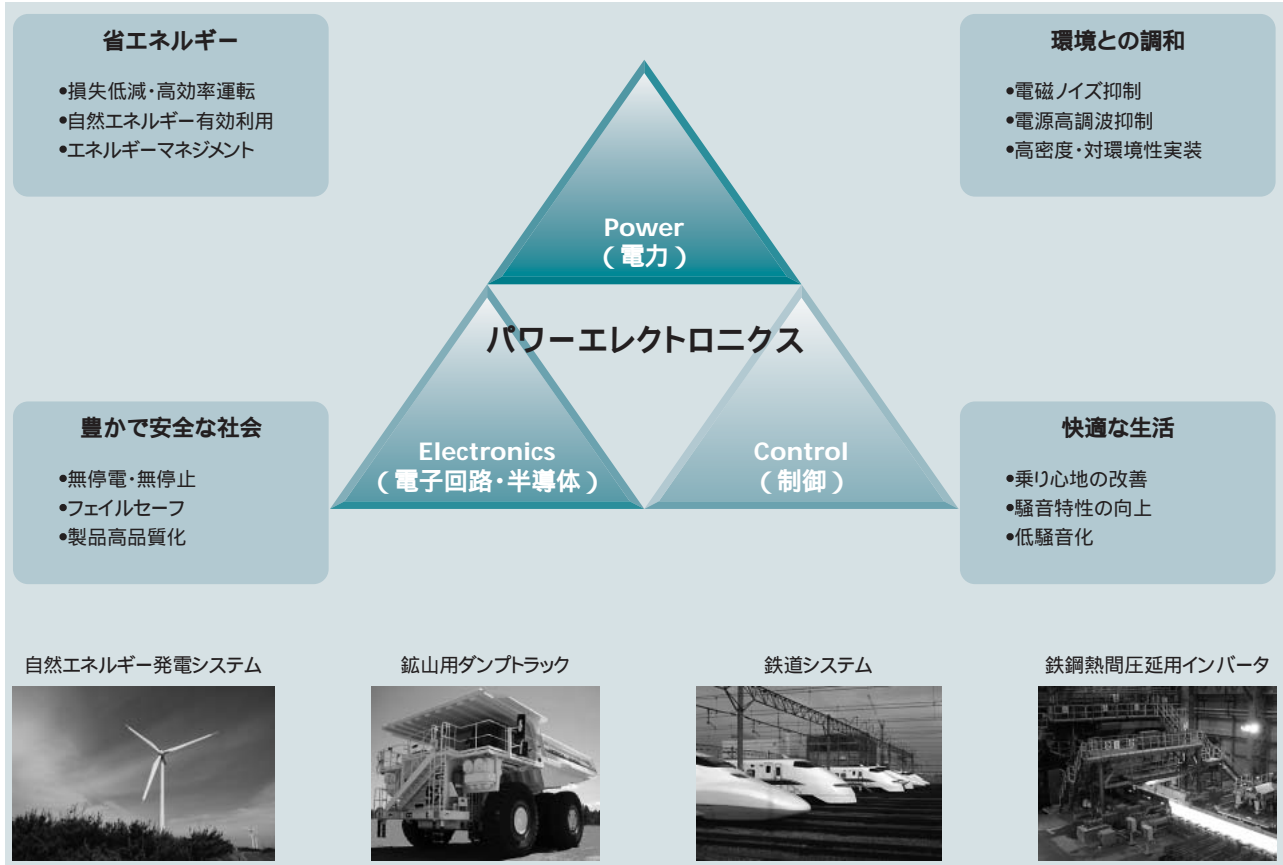


図1 快適で低炭素な社会を支えるパワーエレクトロニクス
自然エネルギーの有効利用、快適な鉄道網、生産を拡大している鉱山、高効率の生産ライン、人に配慮した生活空間、高度情報社会など、多くの社会基盤でパワーエレクトロニクスは活躍している。省エネルギー技術革新を進め、また、自然エネルギーの有効利用を拡大し、地球環境問題の解決の一翼を担っていく。

地球温暖化防止に貢献している パワーエレクトロニクス製品

パワーエレクトロニクスは、パワーデバイスを用いた電力の変換と制御を総称するもので、あらゆる分野に応用されている。身近なものでは高機能となった洗濯機、エアコンなどの家電製品、快適な乗り心地の電車、エレベーターなどに使用されている。また、電力、産業分野では、鉄鋼圧延、薬品の攪拌（かくはん）などの高精度生産設備、自然エネルギーを利用した風力発電・太陽光発電

設備と、さまざまところで用いられている。近年、地球温暖化問題が世界共通の課題となり、エネルギー効率の向上が求められている。こうした中で、パワーエレクトロニクスの技術は効率よく機器を動作させるため、地球温暖化防止のキーテクノロジーの一つと言える。

日立グループは、CO₂排出量削減に貢献するという視点から、こうしたパワーエレクトロニクス製品の拡充と技術の発展に取り組んでいる(図1参照)。

パワーエレクトロニクス製品の例とその効果

パワーエレクトロニクスは誕生から約50年の間、高効率化、小型化、機能向上がなされ、応用範囲を拡大してきた。ここでは、無停電電源装置(UPS)^(a)、ファン・ポンプ用インバータ、風力発電について紹介する。

(a) 無停電電源装置(UPS)

UPSはUninterruptible Power Systemsの略。主にデータセンターをはじめとする電算センターに使用され、サーバ設備、情報通信機器やコンピュータなどの負荷機器を停電から守り、安定した電源を供給するための装置。

(b) CoolCenter50

省電力化への取り組みの一環として、日立グループが進めているデータセンター省電力化プロジェクト。2007年からの5年間で、データセンターの消費電力を最大50%削減することを目標としている。この目標達成に向け、IT機器や空調機器などの装置・設備自体の省電力技術、IT機器の負荷に適応した空調制御などの消費電力の全体最適化技術、これらの機器を効率的に運用するための省電力化サービスなどを有機的に統合するための技術開発を推進している。

無停電電源装置(UPS)

UPSは、停電から情報機器を守るため、銀行などのオンラインシステムに合わせて広く導入されている。1970年代に比べて重さは22%に軽量化され、効率も86%から95%に向上している(図2参照)²⁾。これは低損失で高速スイッチングが可能なパワーデバイス、低損失電磁鋼板を用いた変圧器やリアクトル、デジタル制御技術などによって実現している。例えば、1980年代に製作された機器を最新機器に更新すると、効率が91%から95%に向上する。容量を500 kVAとすると、空調機器を含めたCO₂排出量を109 t/年削減する効果がある(計算条件 出力率:0.9遅れ, 24時間365日連続稼働, 空調機成績係数COP:2, CO₂原単位:0.4 kg/kWh)。また、扱う情報の増大とともにデータセンターの消費電力も増大している。日立グループではデータセンター省電力化の取り組みとしてCoolCenter50^(b)を推進しており、UPSの効率向上は大きな成果を上げている。

ファン・ポンプ用インバータ

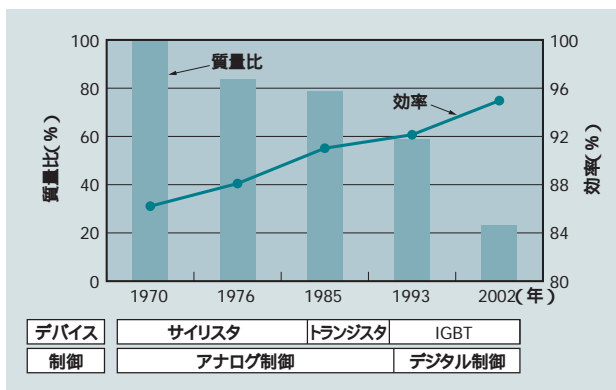
ファン、プロワ、ポンプなどの風水力機器は、設備条件に合わせて流量調整が必要である。流量制御には、ダンパに代表される機械式絞り制御と、インバータによる回転数制御の二つの方法がある。絞り制御は、初期投資は安価であるが、省エネルギー効果は小さい。一方、回転数制御では、理論的には流量の3乗に比例して消費電力が低減されるので、インバータを用いると省エネルギー効果がきわめて大きい(図3参照)³⁾。

600 kWのファンを平均風量75%で運転すると、吸込みダンパによる絞り制御に比べて、150 kWの消費電力を低減でき、480 t/年のCO₂削減(計算条件 年間稼働:8,000時間, CO₂原単位:0.4 kg/kWh)効果がある。

風力発電

自然エネルギーとしての風力発電の導入は、図4に示すように2000年以降目覚ましいものがあり、発電設備の総設置容量は年率25%を超える勢いで増加している。特に2007年は新規に約20 GWが導入されたが、これは原子力発電所約20基分の設備が設置された計算となる。2007年末時点での世界の総設備容量は94 GWとなり、CO₂の排出を約1億2,200万t抑制できる³⁾。

現在の風力タービン単機容量は、1~2.5 MW程度が主流であり、発電方式として、かご巻線形誘導発電機の回転子電流を周波数変換器で制御し、可変速運転を行う二



注:略語説明 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)

図2 無停電電源装置(UPS)の効率と質量指数の推移

300~500 kVAクラスの質量指数,効率はデバイス,制御の進歩で継続的に改善されている。

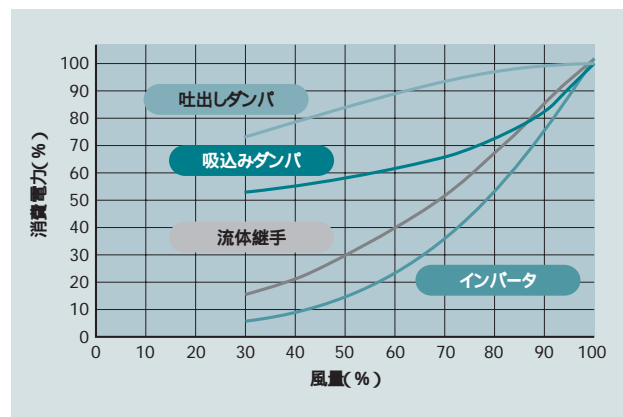


図3 各種制御方式の消費電力比(ファンでの事例)

風量制御の中でも、インバータによる回転数制御が最も省エネルギー効果が大きい。

次励磁方式が主流となっている。ここでもパワーエレクトロニクスとその制御技術がキーテクノロジーとなっている。

一方、風力発電の導入量が増大すると、電力系統との連系問題が顕在化してくる。一つは、風力の短時間周期での電力脈動による電圧変動であり、もう一つは、系統事故時の瞬時電圧低下での風力発電一斉停止である。この一斉停止は系統電圧変動を助長し、最悪の場合は大規模停電の引き金になる恐れがある。

日立グループは、これらの電力系統に自然エネルギー発電設備を大量連系する際の問題を解決すべく、無効電力制御による系統電圧安定化技術、瞬時電圧低下時の運転継続性向上技術を開発して、風力発電システムに適用している。今後、風力発電の導入が進むにつれ、電力系統へ安定して連系できる、この制御技術の必要性が高まってくるものと思われる。

以上のように、パワーエレクトロニクスに期待されている重要な項目の一つに、環境・資源問題を背景とした省エネルギー化があり、すべての適用分野に共通していると言える。これに加えて、電力、通信、交通のような公共性が高い分野では、安全性と信頼性が重要視される。また、オフィス、家庭のように、個人の生活にかかわる分野では、快適性ととも、周囲との調和が求められている。

これらの要件に応えるパワーエレクトロニクスの設計について以下に述べる。

パワーエレクトロニクスを支える技術

パワーエレクトロニクス設計体系

パワーエレクトロニクス製品は、3.3 Vのマイコンからの微弱な信号で4.5 kVのIGBT^(c)のオン/オフを制御し、出力は6.6 kVの高電圧になるなど、エネルギーレベルの異なるものが共存している。したがって、システム設計、主回路設計、制御回路設計、プログラム作成といった電気、制御系の設計に加え、安全、EMC^(d)、構造・熱、ネットワークなど多くの課題がある。これらの課題は相互

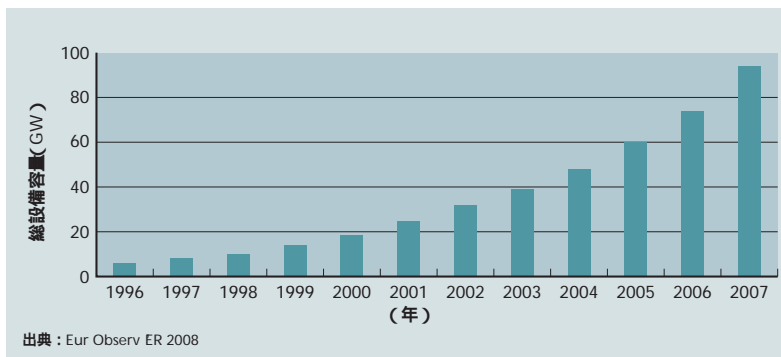


図4 世界の風力発電総設備容量の推移
年率25%を超える勢いで増加している。

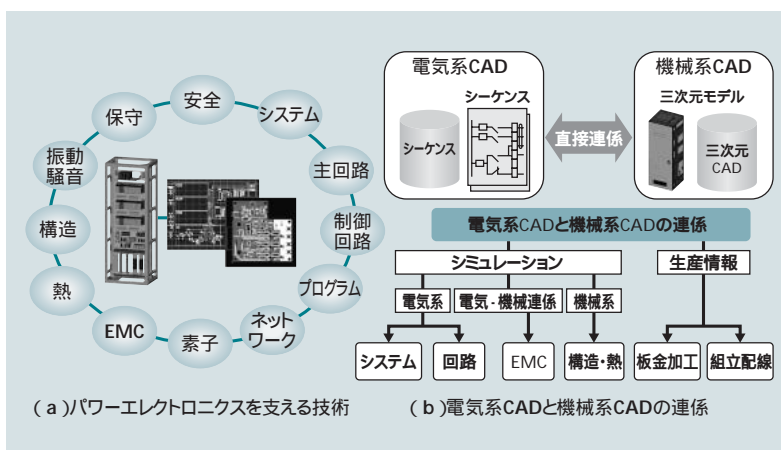
に密接に関連しており、パワーデバイスのオン/オフ時間を短くすると高効率を得られるが、高周波の雑音や漏れ電流が多くなる。これを低減するためには、主回路設計、制御回路設計、構造設計にフィードバックし、全体としてバランスのとれた設計が必要となる。この設計は電気系CAD(Computer-aided Design)と機械系CADとを直接係し、各種のシミュレーションを行うことで実現されている。同時に、生産情報をダイレクトに作成し、設計効率を向上している(図5参照)。また、大規模システムになるほど、設計段階でシステム動作を確認・検証しておく必要がある。実機の制御装置を用い、リアルタイムにシミュレートする技術の確立によって、事前に信頼性が確保できるようになった。このようにパワーエレクトロニクス製品は総合力が問われるが、ここでは設計の中核となるシミュレーションを紹介する。

(c) IGBT

Insulated Gate Bipolar Transistorの略。制御端子に正/負の電流を流し、素子をオン/オフする電圧駆動形素子で、現在の主流になっているパワーデバイス。電圧は6.5 kV、電流は2,400 Aまで製品化され、家電から風力発電まで広く使われている。

(d) EMC

Electro Magnetic Compatibilityの略。電磁両立性。電気機器が設置された環境において、許容できないような電磁妨害をいかなるものに対しても与えず、かつ、その電磁環境において満足に機能するための能力。



注:略語説明 EMC(Electro Magnetic Compatibility), CAD(Computer-aided Design)

図5 パワーエレクトロニクスの設計体系

パワーエレクトロニクスはシステム、プログラム、EMCのほか、さまざまな技術から成り立っている。また、電気系CADと機械系CADを直接係し、システム、EMCなどのシミュレーションを行い、生産情報と直結させて設計効率を向上している。

EMCシミュレーション

IGBTの高速スイッチングは、電磁ノイズ、高周波雑音の発生源となり、他の電気・電子機器に障害を引き起こす要因となる。したがって、パワーエレクトロニクス製品は性能のみならず、環境への調和を図ることが今まで以上に求められている。特に、1996年に欧州でEMC指令^(e)が施行されて以降は、欧州圏向けの製品に対しては上記指令の規定を満足することが輸出のための必須要件となっており、海外市場を含めた製品展開を考えた場合、EMCは重要性が増している。

従来、EMCは開発の最終段階で評価試験を行い、経験による試行錯誤で対策していたため、開発工程の遅延やコストアップの要因となっていた。日立グループは、シミュレーションによって、これらの問題の解決をめざしている。

雑音端子電圧のシミュレーションを図6に示す⁴⁾。IGBTから発生するコモンノイズ電流が流れることで、雑音端子電圧が発生する。電気系CADと機械系CADとを連係し、さらに、分布インピーダンスを考慮した三次元配線モデルや静電容量を含めたIGBTの詳細モデルを作成している。磁界解析と回路解析を結合して、コモンノイズ電流の発生や分流を精度よく演算し、システム全体を解析している。この結果、ケーブル共振やIGBT共

振現象、フィルタでの低減効果の解析精度が向上した。なお、実測はスペクトルアナライザで周波数帯ごとに平均化しているが、解析ではこの平均化を行っていない。そのため、絶対値は異なるが、ピーク値の位置や値の相対値はよく再現できている。周波雑音発生メカニズムと解析が可能となったことで、EMC設計指針を得ることができ、信頼性の向上と製品開発の短縮が期待できる。現在は小容量製品で適用されているが、今後、大容量製品に適用範囲を拡大していく。

構造・熱シミュレーション

パワーデバイスの小型化・高機能化に伴い、パワーエレクトロニクス製品はますます高密度化されている。このような中、熱・応力など複数の事象に対して最適な構造をいち早く導き出すことが求められている。例えば、発熱品を冷却するために単に通風孔を増やすという熱対策を施すと、製品の強度低下、耐ノイズ性低下などを引き起こすといったように、複雑に絡み合う事象と相反する事象を十分に考慮し、信頼性の高い製品を具現化することが必要不可欠である。

日立グループは、三次元CADにて具現化した設計データを、ダイレクトに熱流体解析、および強度解析モデルへ変換し、開発リードタイム短縮や信頼性の向上、さらには小型・軽量化を図ってきた。

強度解析による筐(きょう)体の軽量化を図7に示す。従来はL鋼(厚さ6.0 mm)の部材を全周溶接結合し、内部実装質量1.0 tに耐える筐体構造であった。軽量化筐体は強度解析(共振点解析や静的応力解析など)を行い、鋼板3.2 mmの薄板部材をリベット締結し、最小限の溶接箇所と最適な補強構造を求め、筐体質量の25%軽量化を図った。なお、UPSについては「兵庫県南部地震」レベルの直下形地震(980 Gal)でも稼働継続することを実証試験にて検証している。

熱流体解析による障害発生時の保護検証を図8に示す。筐体内に実装された高発熱モジュール計42台のうち、ある特定箇所

(e) EMC指令

欧州統合に伴い、強制規格分野の基準認証制度の統一をめざす指令の一つで、EU市場で出荷・販売する電気機器にEMC(電磁両立性)を求める指令。適合した製品には1996年1月から「CEマーク」の表示が義務づけられている。

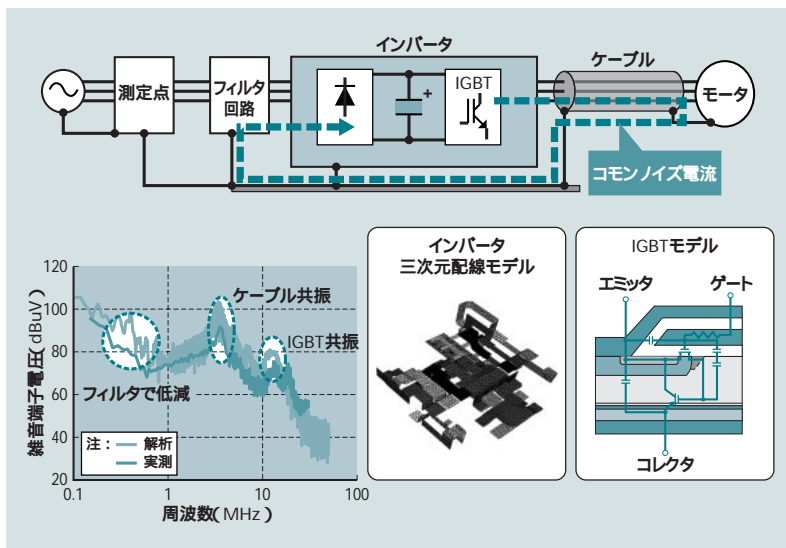


図6 雑音端子電圧のシミュレーション
電気系CADと機械系CADを連係し、三次元配線モデルやIGBTモデルを入力して高精度で解析可能となった。

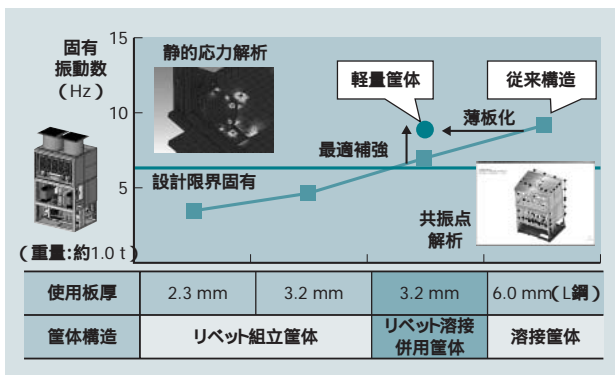


図7 軽量管体の強度解析
薄板化と最適補強を行い、管(きょう)体を25%軽量化した。

が異常電流などの熱的障害を引き起こした
場合を想定して熱流体解析を行い、盤内の
風の流れと温度経過予測を求め、保護限
界温度以下で適切に保護されることをシミュ
レーションで確認している。

リアルタイムシミュレータ

鉄鋼圧延プラントでは、顧客設備の多様
化・高精度化によって、プラントごとに対応
した最適なドライブシステムが要求されている。
鉄鋼用ドライブシステムは、最終製品の品質
(板形状、板厚など)歩留りに大きな影響を
与えるため、ドライブシステムの設計には、そ
の動作を正確に模擬できるシミュレーション
技術の構築が不可欠である。

従来のシミュレータ構成を図9(a)に示す。
従来設計においては、ドライブシステムの制

御回路と主回路・交流電動機・機械をすべ
て含めたシミュレーションを実施していたが、
制御回路は精密なモデル化が困難なため、
実際の制御回路との間に誤差があり、期待
するシミュレーション結果が得られないことが
あった。そこで、制御回路には実回路を用
いて、主回路・交流電動機・機械系のシミュ
レータと組み合わせたリアルタイムシミュレ
ータを開発した(図9(b)参照)。

このリアルタイムシミュレータの構築によっ
て、次の項目が実施できるようになり、プラ
ントに最適なドライブシステムの開発・製品化
が可能になった。

- (1) 実時間でのシミュレーション確認
 - (2) 限界を超えた設定条件での運転確認
 - (3) 実機では観測困難な信号の確認など
- リアルタイムシミュレータによる交流電動機

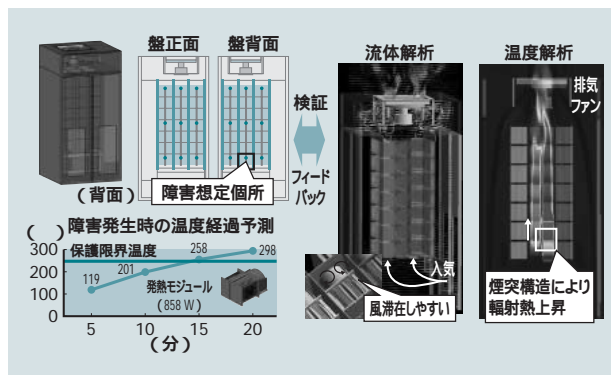
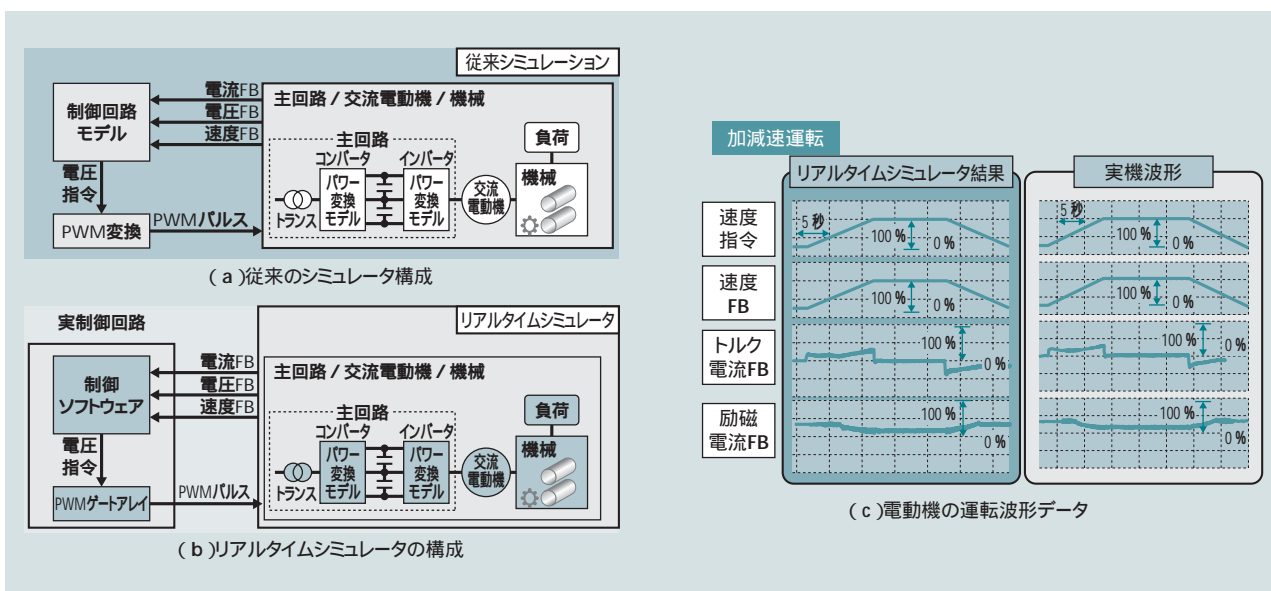


図8 障害発生時の熱流体解析による保護検証
温度経過予測を行い、保護限界温度以下で適切に保護されることを検証している。



注:略語説明 PWM(Pulse Width Modulation), FB(Feedback)

図9 リアルタイムシミュレータ
開発した制御アルゴリズムおよびソフトウェアが、そのまま製品の制御回路に適用でき、開発時間の短縮・製品の信頼性が格段に向上した。

の運転データと実機の運転波形データを図9(c)に示す。リアルタイムシミュレータにより、リアルタイムで実機運転データ波形が模擬できていることがわかる。

したがって、開発した制御アルゴリズムおよびソフトウェアが、そのまま製品の制御回路に適用でき、開発時間の短縮・製品の信頼性が格段に向上した。リアルタイムシミュレーションは、風力用変換器、鉱山用ダンプトラックドライブなどに適用を拡大し、システムにおいて重要な位置を占めるようになった。

パワーデバイスの現状と開発動向

主回路スイッチング素子として使用されるパワーデバイスは、パワーエレクトロニクスのキーデバイスである。デバイスの革新がパワーエレクトロニクスの進歩に大きく貢献している。現在の主流は、IGBTであり、MOS (Metal-oxide Semiconductor) ゲート構造による低駆動電力、容易な制御、高速スイッチングおよびバイポーラ構造による大容量化が特徴である。

低損失化に関しては、セルと呼ぶIGBTの基本構造の微細化による動作電流の高密度化のほか、コレクタ層からの電荷の注入でライフタイムを制御する新構造などによって、導通損失の増加を極力抑制した高速スイッチングを実現した。また、導通損失の低減に対しては素子内部の伝導度変調効率を上げた新構造を考案し、低損失化を実現している。これらによって、電鉄用高耐圧IGBTの例では、初期のIGBTに対し、導通損失30%低減、スイッチングオフ損失25%低

(f) エネルギーバンドギャップ

電子に占有された価電子帯から伝導帯までの間のエネルギーの差。エネルギーバンドギャップの大きい物質は、半導体素子に利用されている。

表1 パワーデバイス用基板材料比較

Siに代わる材料としてSiC, GaNの研究が進められている。

	Si	SiC	GaN
バンドギャップ (eV)	1.1	3.3	3.4
破壊電界強度 (MV/cm)	0.3	2.5	3.3
必要デバイス厚さ (対Si比)	1	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{10}$

注:略語説明 Si(Silicon), SiC(Silicon-carbide), GaN(Gallium-nitride)

減を同時に達成し、インバータ装置の高効率化に寄与している。

しかし、Si(シリコン)を基材としたデバイスの性能は限界に近づき、今後大幅な性能改善が難しくなりつつある。

Siに変わるパワーデバイス用基材としては、最近SiC(炭化シリコン)、GaN(窒化ガリウム)といった材料が研究されている。これらの材料は、表1に示すように、Siに比べエネルギーバンドギャップ^(f)が大きく、破壊電界強度が高いことが特徴である。これによって、現在のパワーデバイスの最大動作温度が150~175 であるのに対し、200 以上の高温での動作が可能である。また、高耐圧デバイスのために必要な電流導通距離を短く設計でき、導通損失を大幅に低減できる。特に、近年の小型化、高密度実装、高温動作という要求に対応するデバイスとして研究が進められている。

日立グループは、これらの材料を用いたIGBTに代わるスイッチングデバイスのみならず、装置の効率向上に寄与する高速ダイオードの研究開発を進めている。

小型化という点では、Siチップの性能改善(高電流密度化)と同時に、冷却能力の向上が必要である。日立グループは、モジュールの平板にフィン構造を追加し、直接モジュールを水冷できる構造の製品化を行い、一例としてモジュール取付け面積を従来の $\frac{3}{4}$ 程度に低減する構造を実現した。

信頼性に関しては、パッケージ技術が重要となる。特に、実装面での優位性により、従来の圧接構造からモジュール構造が主流となっている(図10参照)。デバイスの寿命はパッケージの寿命によって決まると言っても過言ではない。モジュール構造はケースに樹脂を採用し、平板上にチップを搭載して冷却フィンへの取付けを容易としている。

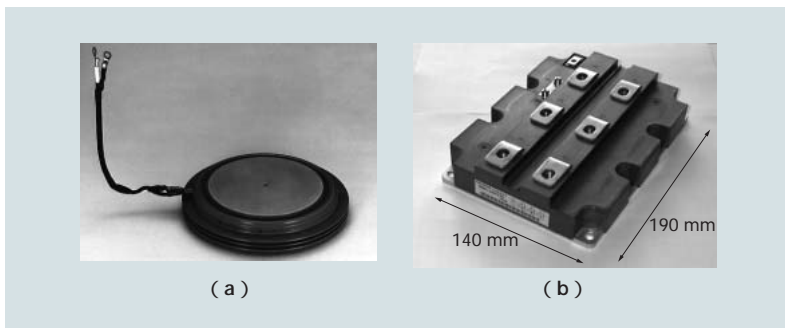


図10 パッケージ比較

圧接型パッケージ(a)と、3,300 V 1,200 A IGBTモジュールの外観(b)を示す。圧接構造からモジュール構造となり、実装が容易となっている。

チップとパッケージ端子の結線は、アルミワイヤボンディング、はんだ付けで行われるのが一般的である。このため、装置の動作、休止時および出力変動時の温度変化により、結線部の材料疲労が課題となってくる。日立グループは、結線部に与えるひずみの抑制、高疲労耐量を有する結線技術として、AISiC^(g)、SiN^(h)といった新材料の採用、および出力端子のモジュール内部接続に溶接構造を開発し、より信頼性の高いモジュール構造を提案している。

CO₂排出量削減に貢献する適用拡大をめざして

日立グループは、材料、部品、装置の開発およびシステムの取りまとめなど、省エネルギーの知見を生かした顧客満足度の高い製品・サービスを提供してきた。

パワーエレクトロニクスを応用した民生・産業用製品では、機能・性能、安全・安定、および信頼性の向上はもとより、さらなるエネルギー効率向上(省エネルギー・CO₂排出量削減)をめざしている。例えば、機械式駆動の鉱山用ダンプトラック、船舶などは、電気駆動(パワーエレクトロニクス化)を適用し、エ

ネルギー消費を削減していく。

一方、風力・太陽光を中心とした自然エネルギーの活用は、全世界的に普及が拡大していくと予想される。エネルギー確保、および地球温暖化対策(CO₂排出量削減)のため、風力・太陽光発電用変換器の適用拡大を推進していく。

今後、省エネルギー対策、地球温暖化対策、およびエネルギー確保をめざして、グローバル展開が進んでいる鉄道分野に続き、電気駆動化、自然エネルギーの活用を核として、パワーエレクトロニクス事業のグローバル化を強力に推進していく。

「環境ビジョン2025」を推進

日立グループは、2025年度までに、世界全体で日立グループ製品によって年間1億tのCO₂排出抑制に貢献することをめざす「環境ビジョン2025」を策定した⁵⁾。このビジョンの下、パワーエレクトロニクス製品の省エネルギー化と適用の拡大が重要な位置を占めることを自覚し、経済発展と環境保護を両立させた持続可能な社会の実現に向けて、製品やサービスを提供して貢献していく。

(g) AISiC

Aluminum-silicon Carbide。SiC(炭化シリコン)にAl(アルミニウム)を含浸させた複合材料。Al₂O₃(酸化アルミニウム)セラミックと同等の低熱膨張率、Alの90%という高熱伝導率を同時に実現できる複合材として、大容量パワーモジュールのベース基板などに使用される。

(h) SiN

Silicon-nitride。窒化シリコン。Al₂O₃セラミックに比べ、約2倍の抗折強度と4倍の熱伝導率を有する絶縁材料。熱膨張率もSiに近く、大容量パワーモジュールの絶縁基板などに使用される。

参考文献など

- 1) 川畑, 外: 高信頼性・省エネルギー大容量UPSの構築, 2008年電気設備学会全国大会, p.131~134(2008.9)
- 2) 松本, 外: ドライブソリューションによるプラント設備の省エネルギー技術, 日立評論, 90, 5, 418~421(2008.5)
- 3) 風力エネルギー・バロメータ 2008年(EU), NEDO海外レポート, No.1021(2008.4)
- 4) 楠野: 汎用インバータのEMCフィルタ解析設計, 平成20年電気学会全国大会, 4-033(2008.3)
- 5) 特集 日立グループの地球環境戦略, 日立評論, 90, 5(2008.5)

執筆者紹介



嶋田 恵三
1984年日立製作所入社, 情報・通信グループ 情報制御システム事業部 制御システム統括本部 UPS・インバータエンジニアリング部 所属
現在, 国内外のUPS・産業インバータの事業企画・業務に従事



天沼 武宏
1992年日立製作所入社, 情報・通信グループ 情報制御システム事業部 生産エンジニアリング部 所属
現在, 制御盤・電子機器装置の実装技術, 熱・構造シミュレーション業務に従事



三島 彰
1983年日立製作所入社, 日立研究所 情報制御研究センター モータソリューションセンター 電気先端工学ユニット 所属
現在, パワーエレクトロニクス機器の実装技術, 回路シミュレーション業務に従事
工学博士
電気学会会員



松本 洋平
2004年日立製作所入社, 情報・通信グループ 情報制御システム事業部 電機制御システム本部 ドライブシステムセンター 所属
現在, 鉄鋼用ドライブ装置の開発, 設計に従事