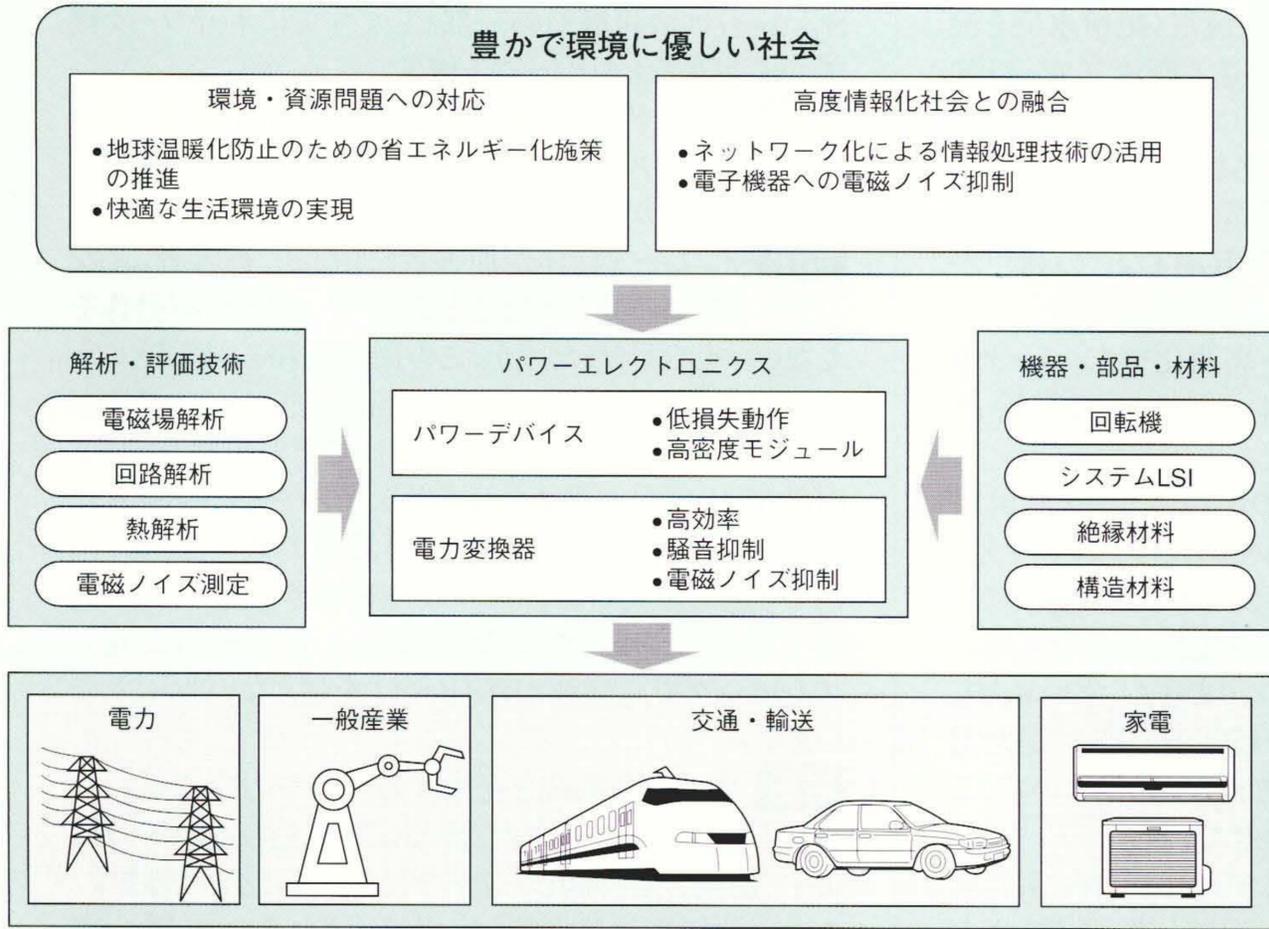


# パワーエレクトロニクスの現状と今後の展開

Present Status and Prospects for Future Developments of Power Electronics

■ 増田郁朗 *Ikurô Masuda*



## パワーエレクトロニクスの位置づけ

パワーエレクトロニクスは豊かで環境に優しい社会の実現に不可欠なものであり、多岐にわたる技術に支えられている。

パワーエレクトロニクスとは、パワーデバイス、およびこれを用いた電力変換器と制御を総称するものである。30年以上の歴史を持つが、最近、環境・資源問題をはじめとする社会的な要請を背景に、新しい局面を迎えている。社会全体として電気エネルギーへの依存度が高まる中で、パワーエレクトロニクスの応用範囲は広がり、高度情報化社会と融合した新しい利用形態も生まれている。パワーエレクトロニクスは、豊かで環境に優しい社会を実現するために、欠くことのできない技術である。

パワーエレクトロニクスでは、微小信号から大電力まで幅広い回路が混在することから、多くの部品や材料が関係する。多様な動作環境の下で限界性能を追求するためには、解析・評価技術による裏付けが必須である。単体製品にとどまらず、システムとしてのソリューションを追求するためには、ネットワークをはじめとする情報処理技術も大きな役割を果たす。

日立製作所は、その総合力を生かしたパワーエレクトロニクスの開発に取り組んでおり、社会インフラストラクチャーから個人の生活に密着するものまで、多岐にわたる応用製品を製造している。

## 1 はじめに

近年、地球規模の環境・資源問題への関心が高まり、エネルギー関連の諸施策が実行されている。これに伴い、生成や変換が容易で、流通ルートが確立している電気エネルギーへの依存度が増している。パワーエレクトロニクスは、社会インフラストラクチャーから個人の生活空間まで、社会全般にわたって電気エネルギーを制御するものであり、エネルギー関連の諸施策の中で重要な役割を担う。電気エネルギーを効率よく流通させ、各種の設備や機器を効率よく動作させるために、パワーエレクト

ロニクスの応用が急速に広がっている。

一方、パワーエレクトロニクスが社会システムや個人の生活に及ぼす影響も大きくなっている。快適で安全な生活のために、性能や信頼性に対する要求は厳しくなり、周囲の環境に与える影響についても、今まで以上の配慮が求められる。例えば、通信や電子機器に障害を与える電磁ノイズや電源高調波に対しては、数値による基準や規制が設定され、厳密な対応が求められている。

ここでは、最近の社会的な要請を背景とした、パワーエレクトロニクスの現状と今後の展開について述べる。

## 2 パワーエレクトロニクスの役割

パワーエレクトロニクス装置では、電源系統と制御対象の間に電力変換器が置かれ、マイコンを中心に構成する制御装置により、エネルギーの流れを制御する。また、最近では、制御装置は、通信や構内伝送を通してネットワークに接続される。

このパワーエレクトロニクス装置が設置される代表的な環境について、その役割と課題を図1に示す。

パワーエレクトロニクスの最も重要な役割は、環境・資源問題を背景とした省エネルギー化であり、この点については、すべての応用に共通である。デバイスや回路による低損失化、制御による高効率運転に加え、ネットワークを介したエネルギーマネジメントが重要な課題になる。

その他の役割と課題は、社会や個人の生活とのかかわりによって異なる。

電力や通信のような社会インフラストラクチャー、一般産業や交通・輸送のような公共性の高いものでは、豊かで安全な社会を保証するために、信頼性と安全性が重視される。デバイスや変換器、制御の各レベルで無停止化やフェイルセーフ化が追求され、各分野で独自の手法が開発されている。今後、装置単体にとどまらず、社会システム全体として、信頼性や安全性への取組みが必要と考える。

一般産業や交通・運輸、オフィス・家庭のように、個人の生活と深くかかわり、さまざまな装置が共存する空間では、環境との調和が重要な課題である。例えば、周囲の電子機器の誤動作や通信障害を避けるためには、電磁ノイズや電源高調波の抑制が強く求められる。パワーエレクトロニクス製品をネットワークで接続し、任意の

場所に配置しようとするれば、対環境性を考慮した高密度実装も重要な課題になる。

交通・運輸、オフィス・家庭のような個人の生活空間では、快適性が重視される。乗り心地や装置の性能を向上させるために、変換器の回路技術や制御技術によって駆動特性を向上させ、低騒音化を図るなどの試みが行われている。

上述の課題に対応するための、パワーデバイス、電力変換器、解析技術について以下に述べる。

## 3 パワーデバイスの動向

パワーデバイスは、電力変換器の性能や構造に大きな影響を及ぼすものであり、パワーエレクトロニクスの歴史の中で、さまざまな変遷を遂げてきた。現在、電力系統の一部で使われる他励式変換器を除けば、電力変換器用のパワーデバイスは自己制御型が主流となり、実質的には、(1) MOS FET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)、(2) IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)、および(3) GTO (Gate Turn-off Thyristor)の3種と考えてよい。これら相互の位置づけを図2に示す。

MOS FETは、情報機器用電源のような小容量で低電圧のものに使われている。LSI用のデバイス技術と共通点が多いことから、微細化技術を活用できるという強みがある。これによって低損失化と大電流化が進み、自動車分野などへも応用が広がっている。また、制御や通信の機能をオンチップ化したデバイスも容易に実現できる。

IGBTは、MOS FETと同様に制御が容易で高速という特徴に加え、高耐圧化に向いている。このため、家電製品から産業機器に至る広い分野で使われている。今後、

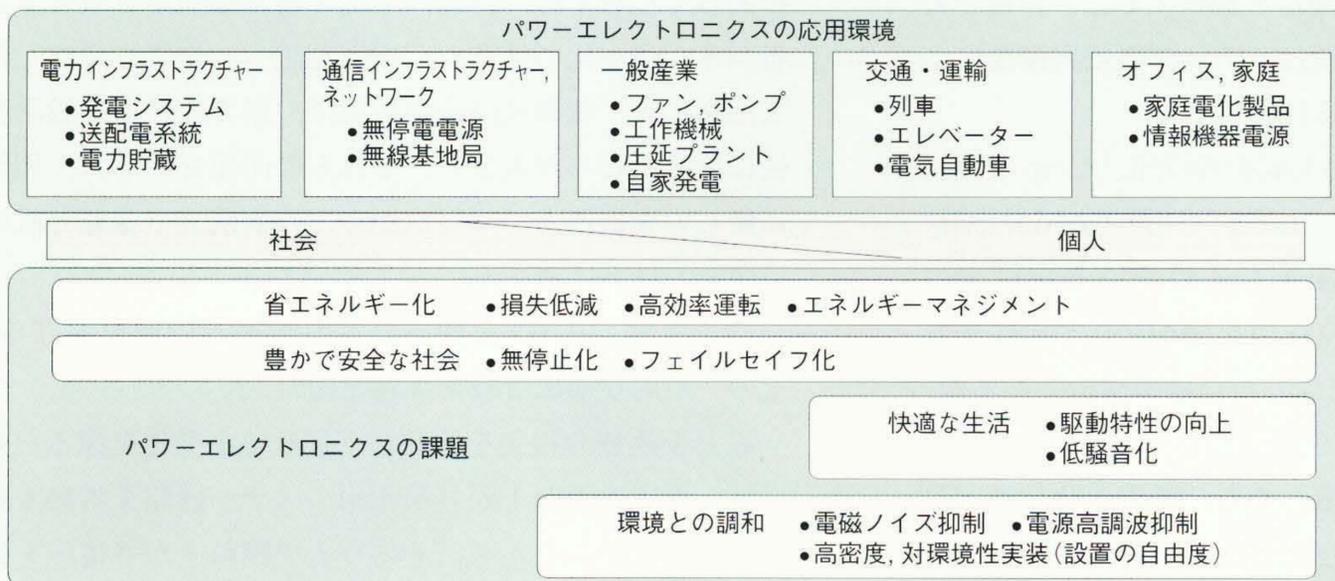


図1 パワーエレクトロニクスの応用環境と課題  
 パワーエレクトロニクスの応用環境は社会インフラストラクチャーから個人の生活空間まで広がり、新たな課題が生まれている。

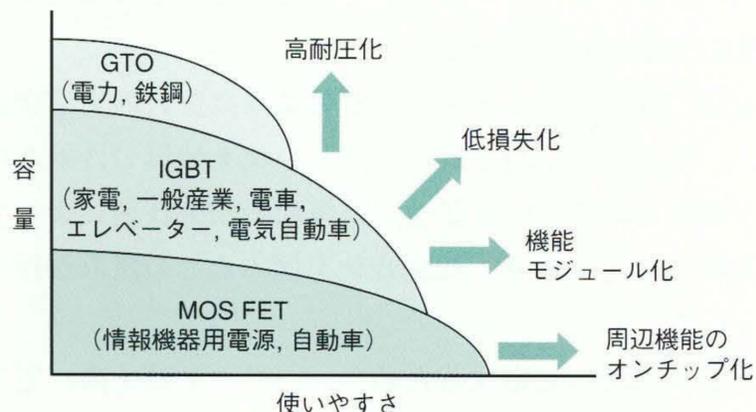


図2 代表的なパワーデバイスの位置づけ

IGBTやMOS FETの高性能化と高機能化により、その適用範囲が拡大している。

小容量の領域では、マイコンや通信機能を一体に実装した機能モジュールが登場し、さまざまな応用に合わせて適用されるようになるものと考えられる。

一方、電力システムの制御や圧延主機の駆動など、高耐圧で大容量の電力変換器では、GTOが使われている。GTOは、高耐圧化したときの導通損失が原理的に小さく、大電流を扱えるという特徴がある。その反面、ゲート制御が複雑であるうえに、過電流や過電圧からの保護のために、大きなアノードリアクトルやスナバ回路を必要とするという欠点がある。したがって、電力変換器の小型化の観点により、GTOよりもIGBTが有利であり、IGBTの高耐圧化が望まれている。

IGBTの場合、周辺回路を含めたスイッチング損失はGTOよりも小さいことから、高耐圧化の課題は導通損失の低減である。日立製作所は、IGBTの高耐圧化の技術開発を進めている。その経緯を図3に示す。IGBTの耐圧は急速に向上し、GTOをしのぐ6.5 kVの耐圧を実現している。このIGBTを使った電力変換器では、3 kVの電源システムから、変圧器を通さずに給電することができる。また、同程度の容量のGTO変換器と比較すると、体積を大幅に低減できる。今後の課題は、チップの並列接続による大電流化技術の開発である。

日立製作所は、IGBTをさらに低損失化し、応用範囲を拡大するために、新たな、“HiGT”(High-Conductivity IGBT)と呼ぶデバイスの開発を進めている。従来のIGBTと比較した“HiGT”の特徴を図4に示す。従来のIGBTにホールバリア層を追加しただけの構造であるが、電荷の蓄積が加速されるので、コレクタとエミッタ間の飽和電圧を大幅に低減できる。また、低損失化技術として知られているトレンチ型と比較して、高電圧領域でも低損失の特性を維持できるという特徴がある。

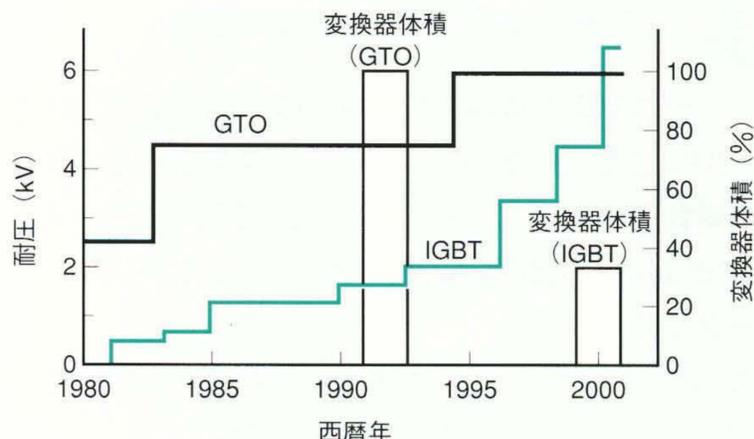
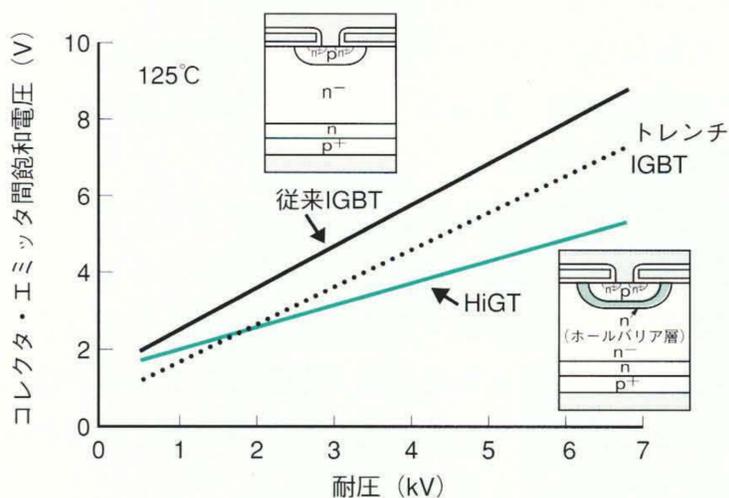


図3 IGBTとGTOの高耐圧化の変遷

IGBTでGTOと同等の耐圧を実現できるようになり、並列接続技術と相まって、変換器の体積が大幅に減少した。



注：略語説明 HiGT (High-Conductivity IGBT)

図4 新形パワーデバイス“HiGT”による損失低減

HiGTは従来型IGBTよりも導通損失が小さく、1.2 kV以上の耐圧では、トレンチIGBTよりも有利である。

#### 4 環境に優しい変換器の開発

電力変換器は、電気エネルギーの流れを直接制御する部分であり、パワーエレクトロニクス装置の性能や形状を大きく左右する。特に、環境・資源問題を背景とする省エネルギー化の推進や、周囲環境への影響を考慮した電磁ノイズ・電源高調波の対策は、電力変換器の設計技術に負うところが大きい。これらの問題を中心に、環境に優しい変換器という視点から、技術開発の課題と対応について以下に述べる。

ここでは、IGBTを使った電力変換器の例をあげる。その一般的な構成と技術課題を図5に示す。

電力変換器の損失を低減し、併せて小型化を図るためには、電圧の跳ね上がり防止用のスナバ回路を省略するのが望ましい。しかし、そのうえで跳ね上がり電圧を抑制するためには、配線の寄生インダクタンスを小さくし

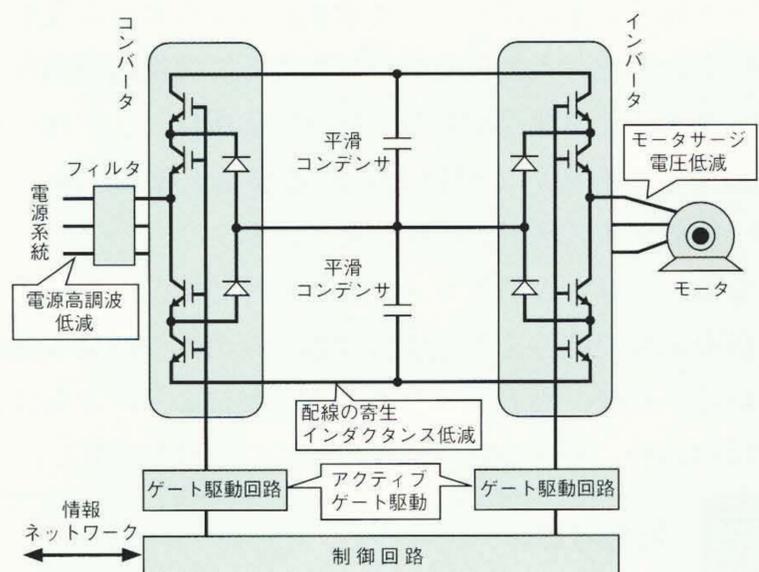


図5 電力変換器の構成例と課題

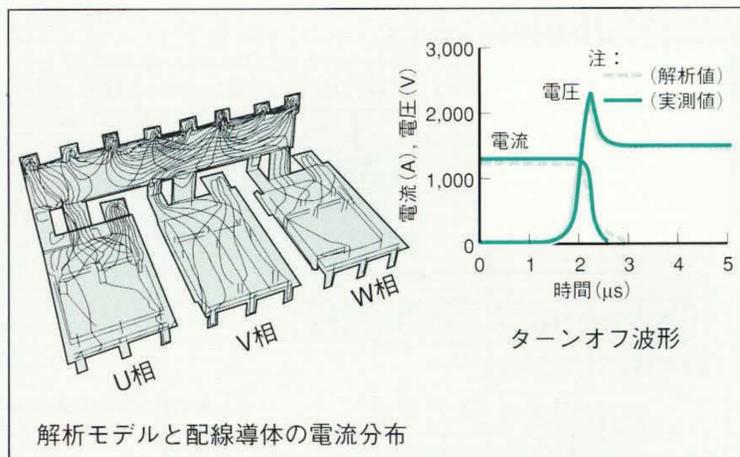
電力変換器の構成では、配線の寄生インダクタンスを低減することがポイントである。電磁場と回路の連成解析により、実装構造と回路を決定する。

なければならない。電流が流れているインダクタンスには電磁エネルギーが蓄積され、このため、IGBTのオンオフ時に共振が起こる。日立製作所は、この現象を解析し、配線インダクタンスを極小化するため、次章で述べる解析システムを有効に活用している。この例を図6(a)に示す。実装構造から得られる配線の形状や配置をパラメータとしてインダクタンスを計算し、IGBTやダイオードから成る回路と一体にして動作波形を分析することにより、配線導体の最適な形状と配置を決める。

これにより、電圧の跳ね上がりは抑制できる。しかし、電流の変化はさらに急峻(しゅん)になり、電源高調波を発生するとともに、モータなどの負荷への配線を通して、空中に電磁ノイズを発散させる。この問題は、通常、「アクティブ駆動方式」と呼ぶゲート制御で解決しており、IGBTの動作に応じて、ゲート信号の変化を実時間で制御する。なお、ここでは、電源や負荷配線に付加されるサージ吸収用のフィルタも一体にして、電磁ノイズや電源高調波を解析することにより、スイッチング損失とフィルタ定数の関係を最適化する。モータの端子間と大地間のサージ電圧を解析した例を図6(b)に示す。

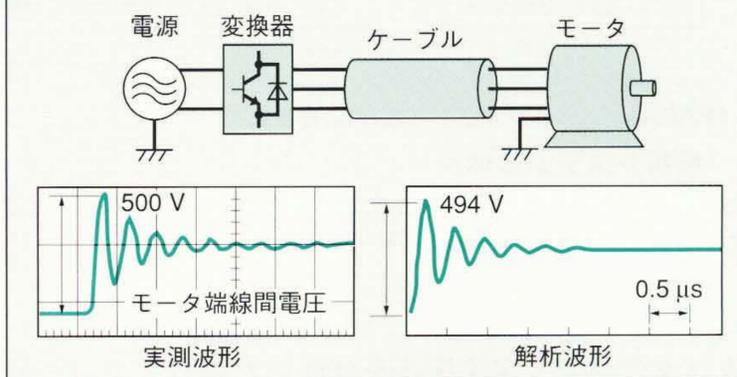
なお、上に述べた例では、いずれの場合も、解析結果は試作した装置による実測値とよく一致しており、設計段階での解析システムの有効性が実証されている。

今後の電力変換器は、機能単位でモジュール化し、ネットワークを通して接続することにより、多様なシステムに対応する方向に向かうものと考えられる。日立製作所は、



(a) IGBTの特性を加味した電磁場と回路連成解析結果

電磁ノイズ対策のために、電源、変換器、モータシステムのノイズ伝搬を解析



(b) モータサージ解析例

図6 変換器設計での解析技術の適用例

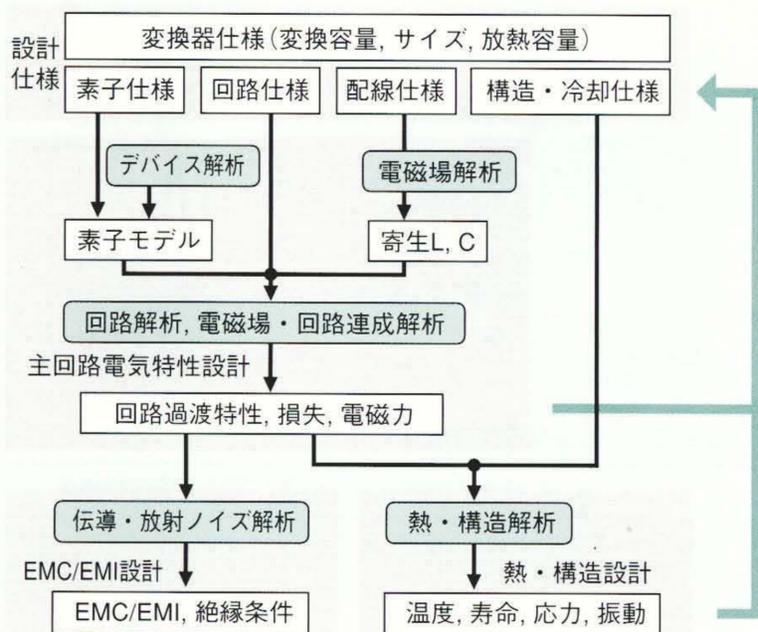
各部の特性や動作波形の解析には、変換器の構造や使用環境も反映させる。

これにこたえるため、冷却、絶縁方式にも改良を加え、いっそうの高密度化を図っている。

## 5 パワーエレクトロニクスを支える解析技術

パワーエレクトロニクスの応用は広がり、環境や動作条件が多様化している。その中で、ユーザーの要求に迅速にこたえ、要求される性能や機能を実現するためには、解析技術の役割が重要である。日立製作所は、パワーエレクトロニクス用解析システムを構築し、応用製品の開発に適用している(図7参照)。

このシステムのねらいは、設置環境まで考慮した諸特性を設計段階で正確に求め、実機評価の期間を短縮することにある。最初に、変換容量やサイズ、放熱容量など、応用から決まる基本仕様から、設計仕様として、使用するデバイスや回路方式、配線・筐(きょう)体構造・冷却などの実装方式を指定する。この後、各種の解析ソフトウェアを使って、変換器の諸特性を計算する。この各段階で、設計仕様にこれらをフィードバックする。例えば、デバイスの場合、サージ電圧や接合温度などは実装形態



注：略語説明 L(インダクタンス値), C(容量値)

#### 図7 解析システムの体系

仕様の定義から始まる一貫した体系を構築することにより、装置全体を見た最適化を目指している。

に依存するので、実装構造を反映した解析によって設計仕様に補正を加える。

主回路の過渡特性には、前章で述べたように、配線に寄生する微小なインダクタンスが大きな影響を及ぼす。これに対応するのが「電磁場・回路連成解析技術」である。部品配置や配線形状に依存する配線インダクタンスを電磁場解析によって高精度で算出し、デバイスの非線形回路モデルと連成させることにより、設計段階での計算精度を飛躍的に向上させた。

変換器の信頼性を高めるには、部品の温度予測が重要である。主な発熱源はデバイスの損失であるが、これを回路解析で正確に求めるためには、デバイスの物理現象を忠実に模擬する必要がある。このため、日立製作所は、MOS FETやIGBT、ダイオードなどについて独自の回路モデルを開発した。そのうえで、得られた損失値を熱・構造解析に反映させることにより、冷却方式の最適化や寿命予測を行っている。

電磁ノイズの対策には、EMC (Electromagnetic Compatibility: 電磁適合性) と EMI (Electromagnetic Interference: 電磁干渉) の予測が重要である。配線経路

の寄生インダクタンスと容量の共振による電磁波放射、モータ端でのインピーダンス不整合によるサージ発生と絶縁寿命劣化、大地漏えい電流による周辺機器誤動作など、さまざまな課題がある。日立製作所は、上で述べた回路モデルを用いて回路の過渡現象を正確に求め、伝導・放射ノイズ解析に反映させている。

なお、これらの解析システムと並行して、応用環境と等価な条件で特性を実測する評価システムの開発も進めている。今後、両者を連携させることにより、さらに信頼性の高い、迅速な開発を目指していく考えである。

## 6 おわりに

ここでは、環境・資源問題をはじめとする最近の社会的な要請を踏まえ、パワーエレクトロニクス現状と今後の展開について述べた。

今後、電気エネルギーへの依存度はさらに高まり、パワーエレクトロニクスの応用が広がるものと予想する。この中で、他の製品や情報システムと一体にしたシステムソリューションとして、パワーエレクトロニクスを活用することが重要と考える。

システム側の要請に基づくさまざまな応用環境に合ったパワーエレクトロニクス製品を提供できるように、パワーデバイスと電力変換器、およびこれらの解析・評価などの基幹技術をさらに強化していく考えである。

## 参考文献

- 1) M. Mori, et al.: A Novel High-Conductivity IGBT (HiGT) with Short Circuit Capability, Proceeding of ISPD(1998)
- 2) 飛世, 外: 中・大容量鉄鋼用インバータドライブシステム, 日立評論, 78, 6, 457~462(平8-6)

## 執筆者紹介



### 増田郁朗

1964年日立製作所入社, 日立研究所 所属  
現在, パワーエレクトロニクスおよびシステムLSIの研究開発に従事  
工学博士  
電気学会会員, IEEE会員  
E-mail: imasuda@hrl.hitachi.co.jp