

特集に寄せて

微分方程式から偏微分方程式の世界へ

Change from Differential Equation to the World of Partial
Differential Equation

小笠原 悟司 OGASAWARA, Satoshi

北海道大学 大学院情報科学研究院 教授



パワーエレクトロニクスの歴史は、放電現象を用いた水銀整流器の時代から、半導体化された SCR (Silicon Controlled Rectifier) またはサイリスタ、自己消弧能力を有するパワートランジスタ、パワー MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)、GTO サイリスタ (Gate Turn-Off Thyristor)、現在広く使用されている IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) へと、パワーデバイスの主役が代わるにつれて大きく発展してきた。さらに近年は、SiC (炭化けい素) や GaN (窒化ガリウム) などのワイドバンドギャップ半導体を用いたパワー半導体デバイスの普及が進もうとしており、ますます大きな発展を遂げようとしている。パワーエレクトロニクス技術は、パワーデバイスのスイッチング動作に基づき、電力の形態 (電圧、電流、周波数など) を変換・制御する電力変換器を基本としており、これが一般産業、電力、鉄道などの分野に応用されているだけでなく、現在では自動車、家電、住宅など社会の隅々にまでその応用範囲が広がっており、今や社会の基盤技術と言っても過言ではない。

パワーエレクトロニクス機器において、パワーデバイスをスイッチとして利用するという原理は、創成期から現在まで全く変わっていない。しかし、パワーデバイスの発展の歴史とともに、オン状態の電圧降下の低減による導通損失の低減と、スイッチング速度の高速化によるスイッチング損失の低減が、絶え間なく進められてきた。特にスイッチング時間は μs オーダから ns オーダへと大幅に高速化され、利用可能なスイッチング周波数は電源周波数から MHz オーダへと高周波化されようとしている。スイッチング周波数の高周波化により、インダクタ、トランス、キャパシタなどの受動部品の小型化が実現できることから、パワーエレクトロニクス機器はますます小型化、軽量化、高効率化の方向に向かっている。損失密度の観点からは、パワーエレクトロニクス機器の高効率化と冷却技術は、小型化と同時に達成すべき重要な課題である。冷却技術を考える上では、熱抵抗回路だけでなく“熱伝導の方程式”を用いた温度分布の検討も必要であるし、流体力学の素養も必要である。

一方、これまでほとんど無視されていた配線インダクタンスや浮遊容量は、スイッチング速度の高速化によりデバイスのスイッチング特性やスイッチング損失に対して大きな影響を及ぼすようになってきている。これらのパラメータは、主回路の実装技術に大きく依存しており、機器の小型化すなわち部品の近接化は浮遊容量を増加させる要因にもなっている。したがって、パワーエレクトロニクス機器の設計においては、電気回路的な素養だけでなく、電界、磁界、電磁誘導などの電磁気学的な素養も必要になってきている。また、スイッチング周波数の高周波化は電磁妨害の高周波化、広帯域化の原因にもなっており、100 MHz オーダの周波数帯域にまで影響を与える可能性がある。例えば、300 MHz の電磁波の波長は 1 m で、その大きさから考えるとパワーエレクトロニクス機器や配線はアンテナと考えなければならず、電磁界の素養も必要になっている。さらに、機器の振動・騒音を考えるためには力学場や音場に対する素養が必要である。

パワーエレクトロニクス技術の発展により、従来用いていた電気回路、磁気回路、力学回路、熱回路などの集中定数的なモデルのみでは現象を表すことができなくなっており、電磁場 (静電場、静磁場、電磁誘導を含む)、力学場、熱と温度の場のような分布定数的あるいは空間的なモデルを用いて現象を表さなければならなくなっている。これら全てを習得することは、一見大変なことに感じるかもしれない。しかし、前者の集中定数モデルはいずれも微分方程式で表され、後者の分布定数モデルはいずれも偏微分方程式で表されていることに注意が必要である。すなわち、異なる物理系の現象であっても同じ形の微分方程式あるいは偏微分方程式で表される現象であれば、物理量を入れ替えるだけで同様の特性を有していることになり、他分野の理解がより容易にできるはずであるからである。これからの技術者は、単なる電気回路屋からマルチフィジックスへ、微分方程式から偏微分方程式の世界へ踏み出して、パワーエレクトロニクス技術をさらに発展させていきたいと願っている。さらに、IT や AI 技術とも融合してエネルギーマネジメントに貢献する社会の基盤技術として、パワーエレクトロニクス技術が活躍し続けることを願っている。



＊本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。