

電力変換で省エネルギー・創エネルギー パワーエレクトロニクスを支える周辺技術

大阪大学大学院 舟木剛教授から上記テーマで寄稿いただきました。

パワーエレクトロニクスとは

東北の震災以降、電力不足に対応するための省エネルギーや、原子力発電の代替電源としての太陽光発電などの再生可能エネルギーの導入が進められている。これらに使われている基盤技術が、電力変換をもとにしたパワーエレクトロニクスである。電力変換とは、入力電力の電圧・電流、交流であれば周波数を、異なる電圧・電流および周波数に変換して出力することを指す。図1にパワーエレクトロニクスで実現される電力変換の種類と名称を示す。直流同士、交流同士だけでなく、直流と交流間

		出力	
		直流(DC)	交流(AC)
入力	直流	コンバータ	インバータ(逆変換)
	交流	整流器(順変換)	サイクロコンバータ(マトリクスコンバータ)

図1 電力変換の種類

の変換も可能である。ただし電力を変換するだけであり、出力電力が入力電力より大きくなることは無い。むしろ回路動作に伴う損失が生じるため、出力電力は入力より小さくなる。図2にパワーエレクトロニクスを構成する技術体系を表したニューウェルの三角形を示す[1]。すなわち、インバータ等の電力変換回路を構成する電子工学、モータや電力系統などの電源・負荷を構成する電気工学、そして電力変換器の高度な制御の実現に必要な制御工学で構成される。金属材料、無機・有機化学材料なども、それぞれ電子工学や電気工学の範疇となる。ではなぜ、省エネルギーや創エネルギーにパワーエレクトロニクスが不可欠となっているのか。

まず太陽光発電を例にとり、パワーエレクトロニクスと創エネルギーの関係について考える。太陽電池の基本構造はPN接合ダイオードであり、その出力は直流である。接続する太陽電池セルの直並列数により、集合体である



図2 ニューウェルの三角形[1]

る太陽電池パネルの定格出力電圧や電流を変えることはできる。しかしながら太陽電池に入射する日射は、太陽高度や気象条件に依存し、時々刻々と変化する。このため、太陽電池の出力電圧・電流を、最大の出力が得られる動作点にしなければ、太陽光の有効な利用ができない。最適動作点の検出および、その点への追従は電力変換器の制御により実現している。一方で負荷の要求する電圧・電流は、太陽電池の最適動作点の電圧・電流の値と一致するとは限らない。太陽電池と負荷の間でDC-DC変換をすることで、それぞれを異なる動作点で運転す

ることが可能となる。また太陽電池で発電した電力を電力系統側に売電しようとしても、太陽電池の出力は直流であり、一方商用電源は交流であるため、そのまま接続することはできない。すなわちパワーエレクトロニクスによるDC-AC変換をすることなしには、太陽電池で発電した電力を売電することはできない。

次にエアコンを例にとり、パワーエレクトロニクスと省エネルギーの関係について考える。電気式のエアコンでは、ヒートポンプに用いる圧縮機の動力としてモータを利用している。駆動の容易さから一般的にかご型の誘導モータの利用が多い。誘導モータを商用電源で駆動した場合、回転速度はすべりにより多少変化するものの、ほぼ一定の速度で回転する。圧縮機で得られる出力は回転数により変わるが、誘導モータを商用電源で直接駆動すると、定格出力で運転することには問題は無いが、中間出力で運転することができない。すなわち誘導モータを入または切の設定で運転することしかできず、精度高く室温を制御することは難しい。誘導モータを駆動する印加電圧の周波数をインバータの制御により可変とすることで、圧縮機の出力を調整して必要な熱出力で運転し、無駄のない空調が可能となった。またモータを効率の良い動作点で運転することも可能である。ハイブリッド自動車でも用いられている誘導モータより効率がよく、高い出力密度が得られる永久磁石モータは、すべりのない同期機である。同期機では、回転子の位置に応じた固定子コイルを励磁しなければならないため、回転位置センサもしくは状態推定に基づくインバータによる制御が不可欠である。

以上のように、パワーエレクトロニクスは目的に応じて制御した電力変換を行うことにより、電源や負荷の能力を引き出すことで省エネルギーや創エネルギーを実現する技術である。

スイッチング動作の利点と課題

パワーエレクトロニクスに使われるインバータやコンバータなどの電力変換回路は、半導体デバイスのスイッチング動作により電力変換を実現している。従来オーディオ等の増幅回路では、半導体デバイスはベースやゲートによる駆動に対して利得をもった可変抵抗の領域で動作させていた。半導体デバイスを可変抵抗として動作させると、必然的に損失が生じる。ただし電磁雑音はほとんど生じない。一方半導体デバイスをオン・オフの2状態でスイッチング動作させる場合、理想的には損失を生じない。ただし現実的には、瞬時にオン・オフ間の状態遷移がおこらず、またオン状態での電圧降下や、オフ状態での漏れ電流により損失が生じる。図3にSi IGBTのスイッチング動作時における電圧・電流の応答の例を示す。スイッチング動作の状態遷移期間中において、半導体デバイスに印加される電圧・電流により生じるスイッチング損失を低減するため、より短い時間でのオン・オフ間の状態遷移が求められており、高速な半導体デバイスの開発がすすめられている。一方で高電圧・大電流化による

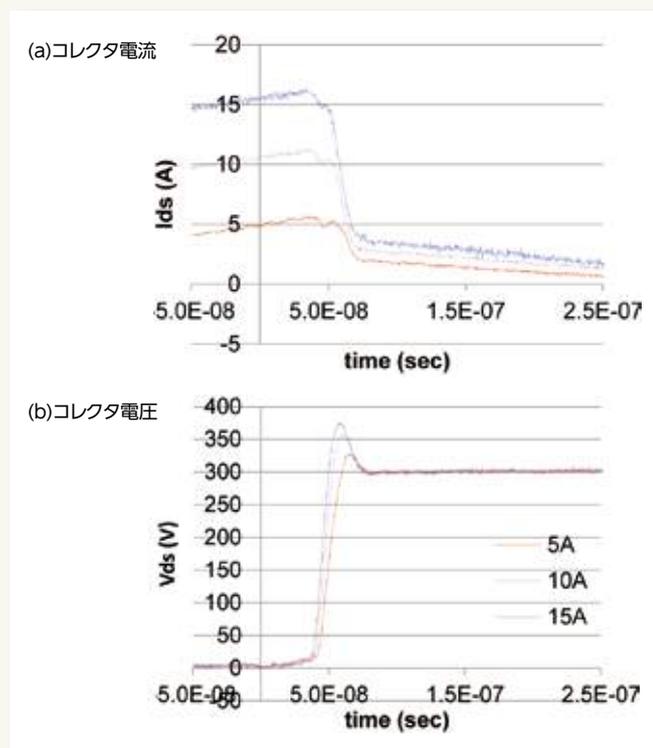


図3 Si IGBTのスイッチング動作時の電圧・電流応答

回路の大容量化は、高速なスイッチング動作における電圧・電流の時間変化率の増加をまねく。大きな電圧・電流の時間変化率は、回路に存在する寄生インダクタンスやキャパシタンスによりサージ電圧・電流を生じ、電磁雑音の源となる。電力変換回路中で発生した電磁雑音が、電源配線等を伝わり電力変換回路の外部に漏洩したり、回路配線や筐体から放射されることで他の機器に対して電磁障害を生じる原因となる。パワーエレクトロニクスでは、情報通信機器に比べて回路の電圧・電流の大きさが大きいと、生じる電磁雑音のレベルも大きくなることから、その対策・設計が課題となっている。

パッケージング・回路実装

パワーエレクトロニクスにおいて、電力変換回路における半導体デバイスのスイッチング動作が高速化・高周波数化するとともに、半導体デバイスのパッケージングや、回路の実装に対する要求も高くなってきている。

半導体デバイス的高速スイッチング動作を可能とするためには、回路における寄生インダクタンスやキャパシタンスの低減が必要である。このため半導体デバイスのディスクリートパッケージのような単体の部品を、回路基板上で組み合わせたシステム構成では限界となってきており、複数の半導体デバイスやリアクトル・トランス・コンデンサなどの受動素子や機能部材を一つにまとめるモジュール化がすすめられている。図4にSiCパワーモジュールの製品例を示す。種類の異なる部材を集積化するには、接合材料や、接合のためのメッキなどの表面処理、低熱抵抗の絶縁基板、高電流密度配線、絶縁封止などの様々な技術が必要とする。また高周波数で変化する電圧・電流が重畳され

る電源配線は、電磁雑音源ともなることから、通信で用いられるような高周波回路の配線と似た技術も必要となってきている。幅広平導体板で薄い絶縁体を挟んだ形状のラミネートスバー構造は、高周波回路で使われているマイクロストリップ線路と同等の構造になっているのがその例である。

スイッチング動作を高周波数化することで用いるリアクトル・トランス・コンデンサを小さくしてシステムの電力密度を大きくし、小型軽量化することが可能となる一方で、損失による発熱密度も大きくなる。このため放熱などの発熱に対する対策・設計が重要になってくる。半導体デバイスの動作温度の上限は、半導体材料で決まっているが、高集積化した電力変換回路を上限付近の温度で動作させるためには、受動素子などの周辺部材



図4 SiCパワーモジュール(ROHM製,1200V,300A)

も同等の耐熱性を持つことが必要とされる。システムの起動停止による温度上昇と低下の変化幅が大きく、繰り返し回数が増えると、各構成部材の熱膨張係数の差によって生じる熱ストレスによる接合の疲労も顕著となる。従って、熱サイクルやパワーサイクルといった熱環境変化に対する信頼性への要求も厳しくなっている。このようにますます過酷になりつつある要求を満たすことのできる実装材料および実装プロセスが要求されている。

おわりに

本稿では、パワーエレクトロニクスとはどのような技術であるか述べた。パワーエレクトロニクスに用いられる電力変換回路の基本回路構成は、枯れた技術になりつつあり革新的な回路構成が出てくるのは難しい状況にある。一方で、小型軽量化・低損失化への要求や期待は大きい。これらの要求や期待に対して、周辺部材や回路実装技術の果たす役割は大きい。本稿で述べた事項が、読者の商売ネタになれば幸いである。

参考文献

- [1] William E. Newell "Power Electronics-Emerging from Limbo", IEEE PESC 1973.



舟木 剛氏

2000年大阪大学博士(工学)取得、2001年大阪大学大学院工学研究科講師、2002年京都大学大学院工学研究科助教授、2008年大阪大学大学院工学研究科・電気電子情報工学専攻教授、現在に至る。

お問い合わせ先

京都府中小企業技術センター 企画連携課 TEL: 075-315-8635 FAX: 075-315-9497 E-mail: kikaku@mtc.pref.kyoto.lg.jp