解説

新パワー半導体と周辺部品

舟木 剛

大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻, 〒565-0871 吹田市山田丘 2-1.

Novel Power Semiconductor Device and Peripheral Components

Tsuyoshi FUNAKI

Div. Electrical, Electronic and Information Eng., Graduate School of Eng., Osaka University, 2-1 Yamada-oka, Suita 565-0871, Japan.

Received January 10, 2016; Revised March 23, 2016; Accepted March 24, 2016

ABSTRACT

Power electronics have been attracting attention as an energy saving technology. The rated voltage and the operating frequency of the power conversion circuit have been increasing to attain higher efficiency, higher power density, and superior functionality. To this end, the conventional Si power semiconductor device have been developing, but the improvement approaches the theoretical limitation. Then, novel power semiconductor devices, which are essentially different from conventional Si power devices, have been researching and developing enthusiastically. They are uncharted territory for the conventional power electronics. Therefore, there are many difficult problems to solve. Power electronics is not an independent academic discipline, but it consist of number of engineering aspects; e.g. electronics engineering, electrical engineering, and control engineering. The recent progress of power electronics is led by the development of power device, but it cannot be realized without cooperation of peripheral components and fabrication technologies. This paper explains the precious technology, which is indispensable to fully utilize the performance of newly developed novel wide band gap power semiconductor device from the view point of peripheral component.

KEY WORDS

Power electronics, power semiconductor device, high voltage, high switching frequency, fast switching, passive component

1 はじめに

東北大震災に伴う原子力発電所の稼働停止を契機とした電力エネルギー不足を背景に、パワーエレクトロニクスが省エネルギーを実現する技術として注目されるようになった。パワーエレクトロニクス自体は電力エネルギーを生み出すものではなく、入力された電力の電圧・電流を異なる電圧・電流の電力に変換する技術である。しかし、ただ単に電力を変換するだけでは、変換時に損失を生じるだけで省エネルギー効果を得ることはできない。損失少なく出力を取り出せる電源の動作点と、損失少なく運転できる負荷の動作点が必ずしも一致しないことから、電力変換により電源と負荷の両者それぞれに適した電圧・電流で動作させることで損失を低減し、システム全体としての動作効率を高めることがパワーエレクトロニクスの目的となる。またパワーエレクトロニクスは、

単に電圧・電流の値だけでなく、直流と交流といった電気の性質を変換することで様々な電源と負荷を接続することを可能にする技術でもある。様々なアプリケーションに対してパワーエレクトロニクスを適用することで得られる省エネルギー効果は大きい。現在では更に高効率化することが望まれている。このため、電力変換の制御による動作点の最適化だけでなく、電力変換における変換損失までも低減する必要がある。また鉄道車両や自動車などの移動体で用いるパワーエレクトロニクスでは、電力変換装置の小型軽量化もシステム全体の消費エネルギー低減につながる。電力変換における損失を低減するために回路の高電圧・小電流化による導通損失の低減や、高速スイッチング動作によるスイッチング損失の低減、また高周波数スイッチング動作によるリアクトルやコンデンサ等の周辺部品の小型化を目指し、パワー半導体の性能向上に向けて研究開発がすすめられている¹⁾。ただし従来のSi半導体を用いたIGBTやMOSFETでは、高電圧化し

* Corresponding author, E-mail: funaki@eei.eng.osaka-u.ac.jp

実際の導通損失低減や、スイッチング動作の高速化が半導体材料の物理的限界に到達しつつある。このためSiに比べてバンドギャップの大きいSiCやGaNを半導体材料に用いたパワーデバイスの開発が進められている²⁾。しかしながらパワー半導体を取り換えただけで電力変換回路およびシステム全体の性能は改善されない。本稿では、パワーエレクトロニクスのさらなる進化に向け、新パワー半導体を適用した電力変換回路における周辺部品のあり方について解説する。

2 新パワー半導体の特長

データシートに記載されている単体の性能が良い部品でも、その部品に見合った使い方をしなければ性能を引き出すことはできない。ここでは、従来のSiパワー半導体に比べて優れた性能を持っていると言われているSiCやGaNといった新パワー半導体について、Siパワー半導体に比べてどのような点が優れているのかについて述べ、それを電力変換回路においてどのように引き出していけばよいかについて説明する。

パワー半導体の耐圧 V_{bd} は、(1)式に示すように半導体材料の破壊電界強度 E_c とドーパされた不純物濃度 N_d で決まる。またパワーデバイスの耐圧層の抵抗 R_d は、耐圧 V_{bd} の2乗に比例し、破壊電界強度 E_c の3乗に反比例する³⁾。

$$R_d = \frac{W_d}{\mu e N_d A} = \frac{4V_{bd}^2}{\mu \epsilon_s E_c^3 A} \quad (1)$$

ただし、 W_d : 空乏層幅、 μ : キャリア移動度、 e : 単位電荷、 A : 面積、 ϵ_s : 誘電率である。

Si半導体の破壊電界強度は3 kV/cm程度であり、耐圧が数

百V以上になると抵抗が顕著に増加し、導通損失が大きくなる。このため高耐圧のSiパワー半導体では、バイポーラ構造を適用し、少数キャリア注入による電導度変調効果により導通損失を低減している。導通・遮断の定常状態では十分な性能が得られるものの、スイッチングの過渡応答の特性が犠牲となる。Fig. 1はダイオードのターンオフにおける電流の応答である。Si PiNダイオードでは、ターンオフ時に逆回復電流と呼ばれる逆方向に大きな電流が流れる。これは注入された少数キャリアの処理に伴う現象であり、スイッチング損失の原因となる。特にFig. 1 (a)に示すように順方向電流を大きくしたり、Fig. 1 (b)に示すように di/dt を大きくした高速スイッチング動作や、高温動作においてそのピーク値は顕著に大きくなる。またFig. 2 (a)は、Si IGBTのターンオフ動作におけるコレクタ電流の応答である。Fig. 2 (b)に示すようにIGBTの等価回路は、NチャネルMOSFETでベースを駆動するPNPトランジスタとして表される。NチャネルMOSFETは、PNPトランジスタのベースに電荷を注入することはできるが、ベースから電荷を引き抜くことはできない。このためターンオフ時にはMOSFET部の電流は高速に減少するが、PNPトランジスタのベース部に残留したキャリアが消滅するまでPNPトランジスタ部は導通を継続する。これがテール電流となって現れるとともに、スイッチング損失の原因となる。以上のように、高電圧のSiパワー半導体は、スイッチング動作特性のために、高速・高周波数の動作には問題があった。

さてバンドギャップの大きいSiCやGaN等の半導体は、Si半導体に比べて破壊電界強度が1桁以上大きい特長がある。

Fig. 1 Current response in turn off operation of Si PiN diode.

Fig. 2 Si IGBT.

Fig. 3 Current response in turn off operation of SiC SBD diode.

このため、従来Si半導体では導通損失低減のためにバイポーラ構造を適用していた高耐压のデバイスに対して、ユニポーラ構造が適用可能である。ユニポーラ構造のパワー半導体は、ドーパされた不純物による多数キャリアのみで導通動作する。このためバイポーラ構造とは異なり、スイッチング動作において少数キャリアの処理を必要としない。ただし、遮断状態における空乏層形成のための多数キャリアの充放電に要する動作は必要であり、これを零とすることはできない。Fig. 3に示すダイオードのターンオフ動作では、逆方向に流れる電流がSi PiNダイオードに比べて大幅に小さくなっていることが分かる。スイッチング速度 di/dt 依存性や、順方向電流 I_F 依存性も小さい。またFig. 4に示すSiC MOSFETのターンオフ動作におけるドレイン電流の応答には、IGBTに見られるようなテール電流が生じていない。スイッチング動作が速いことから、スイッチング損失も小さく抑えることが可能である。このように、新パワー半導体は高電圧の高速スイッチング動作が可能であることに特長がある。すなわち、新パワー半導体を適用することで、高電圧・大容量の電力変換回路の低損失化とともに動作の高周波数化が可能である。

3 周辺部品に求められる要件

前章では、新パワー半導体の特長は、高電圧の高速スイッチング動作であることを述べた。ただしパワー半導体のみでは電力変換動作を実現できず、リアクトルやコンデンサ等の受動素子である周辺部品を組み合わせる必要がある。本章では、新パワー半導体の性能を活かした電力変換回路において周辺部品である受動素子に求められる要件について述べる。

3.1 リアクトル

DC-DCコンバータやDC-ACインバータにおいて、パワー半導体のスイッチング動作で電流を導通・遮断するが、電力変換のために一時的にエネルギーをためておく要素としてリアクトルが使われる。透磁率が高く、飽和磁束密度の高い磁性材料をリアクトルの鉄心に用いることで、リアクトル全体を小型化することが可能である。またスイッチング周波数を高周波数化することも、リアクトルに必要なインダクタンスの値を小さくすることができ、小型化につながる。Fig. 5に各磁性材料のリアクトル鉄心として使用可能な周波数領域と

Fig. 4 Current response in turn off operation of SiC MOSFET.

Fig. 5 Saturation flux density to frequency for magnetic materials.

飽和磁束密度の関係を示す⁴⁾。同図は飽和磁束密度の高い材料は、高周波数では鉄損が大きくなるために適用できず、逆に高周波数で使用可能な材料は飽和磁束密度が低いことを示している。このため、リアクトルの鉄心を小型化することを目的として回路動作の高周波数化を図っても、飽和磁束密度の低い材料を使用せざるを得ず、磁路断面積が大きくなり、結果としてリアクトルは小さくならない。このため、高周波数スイッチング動作による電力変換器の小型軽量化を実現するためには、飽和磁束密度が高く、高周波数での鉄損が小さい磁性材料の開発が必要である。またDC-DCコンバータに用いるリアクトルでは直流バイアス電流が印加された高磁界下での使用も必要となる。この場合磁化特性が、交流印加の場合とは異なるため、高磁界下でも鉄損の増加が少ない磁性材料が求められる。粉体材料としてリアクトルの鉄心を

考えた場合、焼結して鉄心形状を形成するのが一般的である。圧力をかけて焼き固めることにより、粉体である鉄心材料の充填率は高くなるものの、鉄心の抵抗率が低下する。このため、高周波数利用での渦電流損が大きくなる。したがって、焼結しても抵抗率の下がらない粉体材料の開発が望まれる。

また高周波数での利用では、リアクトル鉄心の鉄損だけでなく、リアクトル巻線の銅損も問題となる。銅損の原因には複数あり、高周波数では表皮効果による交流抵抗の増加がその一つである。式(2)に示すように、表皮効果により交流電流が流れることのできる導体表面からの深さ d は周波数 f の平方根に反比例する⁵⁾。

$$d = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_m}} \quad (2)$$

ただし、 ρ : 導体の抵抗率、 μ_m : 透磁率である。

銅線では、表皮深さは60 Hzにおいて8.5 mmであったものの、100 kHzでは0.2 mmとなる。絶縁された細線を撚ったリッツ線を使用することで表皮効果を低減することができるが、導線間の間隙により占積率が小さくなる。銅損の他の原因として巻線の近接効果がある。特にリアクトルの各巻線にながれる電流は、方向が同一となるため、近接した巻線に流れる電流により誘導された渦電流により、巻線内の流れる電流の偏りが生じて導通損失が増加する。また巻線間の寄生静電容量は、リアクトルの自己共振を生じる原因となる。特に小型化のために占積率を大きくして密巻線とすると、寄生容量が増加し、また自己共振周波数も低下するため高周波数での使用を難しくする。以上のように、リアクトルをはじめとする磁気部品は、高周波数スイッチング動作による性能向上に対して磁性材料および巻線の両面からの課題の解決を図る必要がある。

3.2 コンデンサ

電力変換回路においてコンデンサは、直流電圧リプルを除去する平滑、高調波を低減するためのフィルタ、サージを吸収するためのスナバとして使用されている。単相のDC-ACインバータでは、交流の周波数の2倍の周波数で瞬時電力が変動するため、大きな静電容量の平滑コンデンサが必要となる。大容量の平滑コンデンサには、コスト面で有利な電解コンデンサが利用されることが多い。三相インバータでは、各相の瞬時電力の合計が一定となるため、理想的には平滑コンデンサは必要としないが、制御の遅れによる電圧変動を避けるために比較的大きな静電容量の平滑コンデンサが使用されている。電解コンデンサは、等価直列抵抗による損失が大きく、電解液の蒸散による容量劣化および寿命の問題がある。このため特に信頼性の要求される電鉄や自動車を中心に、フィルムコンデンサなどの他の種類のコンデンサの採用が増えている。Fig. 6にハイブリッド自動車のインバータ(PCU)の内部構造を示す。PCUに占めるIGBTモジュールは比較的小さく、平滑用のフィルムコンデンサが大きな部分を占めていることが分かる。すなわちコンデンサの小型化が、システム全体の小型化に大きく影響する。フィルムコンデンサの小型軽量化として、誘電体材料の薄膜化が進められ

Fig. 6 PCU of HEV (Toyota Prius ZVW30).

Fig. 7 SiC DC-DC converter.

ているが、薄膜化によって誘電体に印加される電界強度が大きくなることから、品質と機能性の確保が課題となっている。

また最近では、新パワー半導体を用いた小型・低損失・高温動作によるモータドライブの機電一体化が進められており、コンデンサにも耐熱性能が要求されるようになってきた。このため過酷条件下でも使用可能なセラミックコンデンサの適用も検討され始めている。セラミックコンデンサは、小型大容量、高許容リプル電流、高温動作可能といった特長があるが、一般的なBaTiO₃材料を用いたコンデンサは直流バイアス電圧印加時に静電容量が低下するとともに誘電損失も増加するといった課題がある。またセラミックコンデンサの端子接合に用いられるハンダ材の温度サイクルに対する信頼性も課題とされている。SiCパワー半導体を用いたDC-DCコンバータの平滑コンデンサにセラミックコンデンサを適用し、200 kHzの動作周波数で143 kW/lを実現した報告がある⁶⁾。ただしFig. 7に示すように小型のセラミックコンデンサを数百個実装した構成となっており、信頼性には不安が残るものとなっている。

電力変換回路の平滑やサージ吸収用のセラミックコンデンサに適用する粉体材料として、印加電界による誘電率の変化が少なくなるような性質が求められる。同時に損失低減のためにも複素誘電率の虚数部も小さくしなければならないとともに、より導電率の高い銅などの電極材料が適用できることが望まれる。また高電圧化した場合に誘電体層を厚くしないためにも、破壊電界強度の向上も求められる。

4 ま と め

本稿では、新パワー半導体を適用したパワーエレクトロニクスの方向性について述べた。新パワー半導体を目指している高電圧・高周波数スイッチング動作を適用したパワーエレクトロニクスアプリケーションに対して、パワー半導体のみを交換しても、周辺部品に従来のものを使用している電力変換回路の性能向上を実現することは難しい。すなわち新パワー半導体を活かすも殺すも、周辺部品に依存するところが大きい。材料開発を含め、周辺部品の性能向上が期待される。

文 献

- 1) IGBT toshokikaku hennsyuuinkai: Sekaiwo ugokasu power handoutai, ohmsha, (2008).
- 2) H. Matsumami et al.: Handoutai SiC gijyutsu to ouyou, Nikkankougyoushinnbun, (2011).
- 3) S. M. Sze: "Physics of semiconductor devices" 2nd Edition, Wiley inter science, (1981).
- 4) Research committee of system integration of power electronics: Power electronics niokeru system integration gijyutsu, **1299** (2014).
- 5) N. Kumagai: Denjikigaku kisoron, ohmsha, (1987).
- 6) O. Kreutzer, et al.: "Full SiC DCDC-Converter with a Power Density of more than 100 kW/dm³," Materials Science Forum, **821-823** (2015) 884-888.