

ワイドバンドギャップ半導体スイッチによる低損失電圧変換回路の開発

－電圧変換回路の低発熱化，小型化への展開－

田村陽一* 森田正樹* 吉村慶之*

本研究では，電圧変換回路の低損失化を目的として，現在広く使用されている半導体スイッチ(Si(ケイ素)-MOSFET(酸化絶縁膜半導体電界効果トランジスタ))をSiC(炭化ケイ素)-MOSFETやGaN(窒化ガリウム)-MOSFETなどのワイドバンドギャップ半導体スイッチに置き換えて，半導体スイッチの電力損失がどのように変化するかを検証用回路と実用回路で確認した。検証用回路として，電圧変換の基本形であるハーフブリッジ回路を設計・製作し評価した。また実用回路として，三相交流インバータ回路を設計・製作し評価した。検証用回路では，半導体スイッチを単純に置き換えただけでも電力損失比で約50%の低減が確認でき，スイッチング周波数を上げることで更に電力損失比を低減できることが明らかになった。実用回路では，交流生成に様々なスイッチングパルス幅を使用することで，検証用回路と比べ電力損失の低減効果が高くなることが明らかになった。

キーワード：ワイドバンドギャップ半導体，GaN，SiC，FET

Development of Low-Loss Voltage Conversion Circuits Using Wide-Bandgap Semiconductor Switches - Achieving Low Heat Generation and Miniaturization of Voltage Conversion Circuits -

Youichi TAMURA, Masaki MORITA and Yoshiyuki YOSHIMURA

In this study we replaced the currently widely used semiconductor switch (Si-MOSFET) with a wide bandgap semiconductor switch (SiC-MOSFET, GaN-MOSFET) to reduce power loss in a voltage conversion circuit by using verification and practical circuits. For the verification circuit, a half-bridge circuit, which is a basic form of voltage conversion, was designed, fabricated, and evaluated. For the practical circuit, a three-phase inverter circuit was designed, fabricated, and evaluated. Using the verification circuit, it was confirmed that the power loss ratio was reduced by about 50% by replacing the semiconductor switches, and it was found that the power loss ratio could be further reduced by increasing the switching frequency. The practical circuit uses various switching pulse widths for AC generation and was found to be more effective in reducing power loss than the verification circuit.

Keywords : wide bandgap semiconductor switch, GaN, SiC, FET

1. 緒言

ほとんどの電子機器には電源が内蔵されており，ここでは電圧変換回路が動作している。この電圧変換回路の基本的な構成を図1に示す。多くの場合，半導体スイッチで毎秒数万回のスイッチングを繰り返し降圧している。このスイッチングによる電圧変換の電力損失は理想的にはゼロであるが，実際にはスイッチングごとに電力損失とそれに伴う熱を発生させ，省エネを阻む要因となっている。

また，スイッチング後の電圧変動を十分に小さくす

るため，電圧変換回路はインダクタやコンデンサで構成された高域除去フィルタ回路を備えている。スイッチング周波数とフィルタカットオフ周波数を高くする

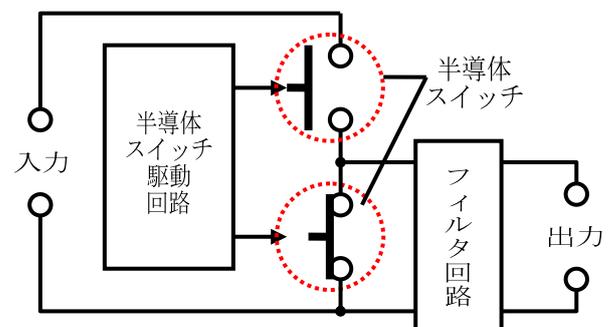


図1 電圧変換回路の構成

*電子情報部

ことで、重い銅巻線と磁性体コアからなるインダクタを含むフィルタ回路を小型軽量化できる。しかし、単位時間あたりのスイッチング回数を増やすことはスイッチングによる電力損失を増やすこととなり、場合によっては半導体スイッチの破損につながるなど、デメリットもある。

本研究では、近年入手が容易になったワイドバンドギャップ(以下WBG)半導体スイッチと従来型半導体スイッチを比較評価し、WBG半導体スイッチの有用性を確認することを目的とした。

2. 電圧変換回路の電力損失評価

検証用電圧変換回路と実用電圧変換回路を製作し、電力損失を評価した。

2.1 検証用電圧変換回路

2.1.1 回路構成

検証用電圧変換回路として、ハーフブリッジ回路を用いた。回路本体には半導体スイッチ駆動回路、半導体スイッチ、フィルタ回路を配置し、半導体スイッチをON/OFFする制御信号は外部の信号発生器から取り込む構成とした(図2)。

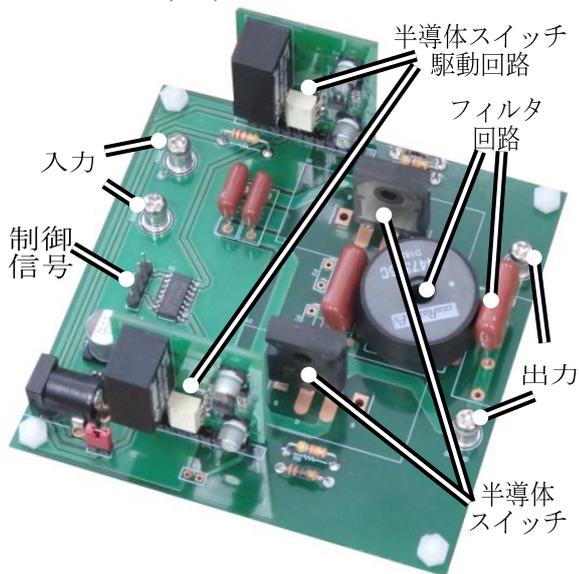


図2 検証用電圧変換回路

入力電圧は直流50V、出力電圧は直流25V、出力負荷は50Ωおよび25Ωとし、スイッチング周波数は25kHz、50kHz、100kHz、250kHz、500kHzとし、デューティ比は50%に固定した。フィルタ定数は、出力リップル電圧が1V程度に収まるようにインダクタおよびコンデンサの定数を設定した。このように製作した検証用電圧変換回路基板に従来型半導体スイッチとして、STマ

イクロエレクトロニクス社製 Si-MOSFET STW57N65M5, WBG半導体スイッチとしてUnitedSiC社製 SiC-MOSFET UF3C065040K3S, Transphorm社製 GaN-MOSFET TP65H050WSの3種を2個ずつ使用した。

2.1.2 電力損失評価

入力電圧用安定化電源(菊水電子工業株, PWR400H)と出力負荷用電子負荷(菊水電子工業株, PLZ1004WH)で電力を測定し、出力電力から入力電力を減じた値を半導体スイッチの電力損失とした。

図3より従来型半導体スイッチで使われる数十kHz程度のスイッチング周波数で、WBG半導体スイッチによる電力損失は従来型の半分程度であり、半導体スイッチを挿し替えるだけでも電力損失を低減できることがわかる。それよりも高い周波数では、従来型半導体スイッチの電力損失は大幅に増加するが、WBG半導体スイッチの電力損失は緩やかに増加し、数百kHzではSiC-MOSFET, GaN-MOSFETの双方で従来型の1/3以下の電力損失となった。

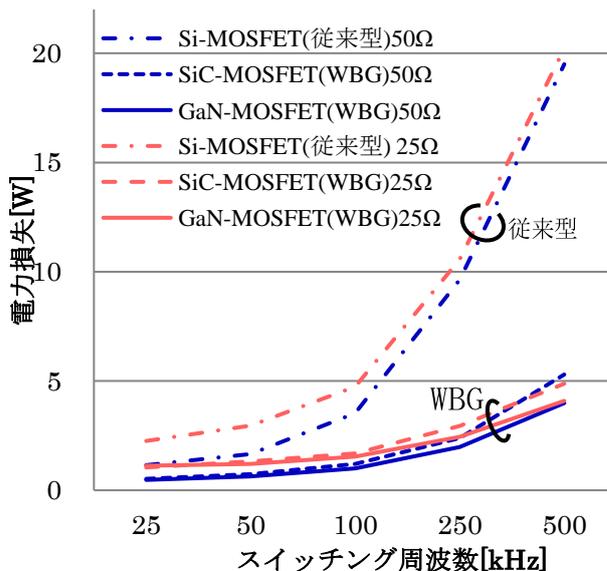


図3 半導体スイッチにおける電力損失

これは、従来型半導体スイッチの動作速度がWBG半導体スイッチに対して遅いことが原因と考えられる。図4にスイッチング周波数を500kHzとしたときのハイ

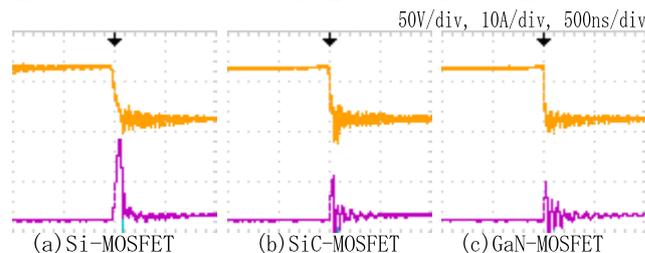


図4 ハイサイド側半導体スイッチの電圧・電流波形

サイド側半導体スイッチの電圧と電流の波形を示す。図4(a)の従来型半導体スイッチの波形では電圧の立ち下がり緩やかで、電圧が下がりきっていない状態で電流が発生し、電圧と電流を乗じた電力損失が発生していることがわかる。図4(b)(c)のWBG半導体スイッチの波形では(a)より電圧が素早く立ち下がり、電流も小さいことがわかる。したがって、電力損失も(a)と比べて小さくなる。以上のように、WBG半導体スイッチによって、従来の数十kHzから数百kHzを含めた幅広い周波数で低損失なスイッチングを確認できた。

また、従来型半導体スイッチの500kHzにおける電力損失の約20Wは、大型のヒートシンクや強制空冷装置を使用して放熱を促さなければ熱破壊につながる発熱量である。しかし、WBG半導体スイッチの500kHzにおける電力損失の約5Wは、多くの場合、小型ヒートシンクで熱破壊を防ぐことができる発熱量である。

さらに、スイッチング周波数を高く設定すると、高域除去フィルタ回路のカットオフ周波数も高く設定でき、WBG半導体スイッチを使用することでインダクタやコンデンサを小さくすることが可能となり、電圧変換回路の小型化に結びつくと考えられる。

2. 2 実用電圧変換回路

2. 3. 1 回路構成

実用電圧変換回路として、ハーフブリッジ回路を3回路使用することで三相交流を生成する三相交流インバータ回路(図5)を用いた。半導体スイッチをPWM(パルス幅変調)でスイッチングすることで、マイコンボ

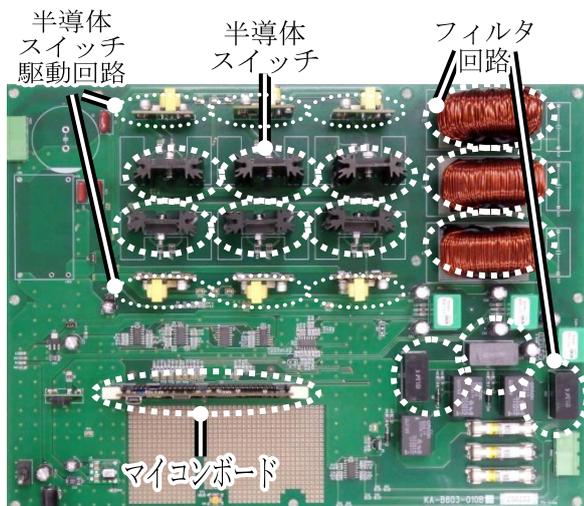


図5 実用電圧変換回路

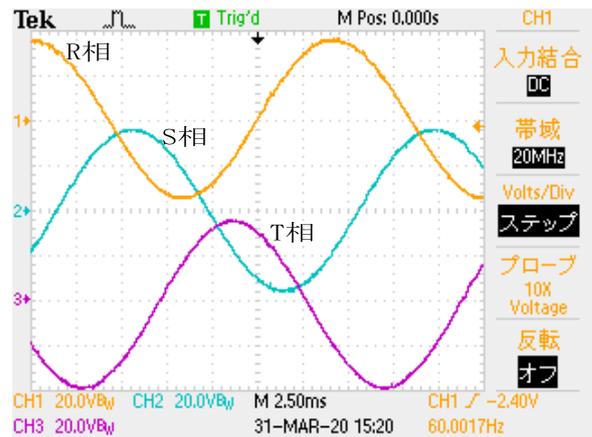


図6 三相交流波形

ードから各相120°位相をずらした正弦波を出力する。入力電圧は直流50V、出力電圧は実効値25V、出力負荷は1kΩを3本使用したデルタ負荷とした。スイッチング周波数は19.2kHzとし、PWMで正弦波を出力するために、デューティ比を可変とした。この三相交流インバータ回路に2.1節で使用した従来型半導体スイッチSi-MOSFET、WBG半導体スイッチGaN-MOSFETを6個ずつ挿し替えて、比較評価した。なお、WBG半導体スイッチに関しては、SiC-MOSFETは2.1節でGaN-MOSFETより損失が大きかったことから、本節ではGaN-MOSFETのみ評価した。図6にGaN-MOSFETによる出力波形を示す。三相交流のR相、S相、T相が出力され、三相交流インバータ回路が正常に動作していることが確認できた。

2. 3. 2 電力損失評価

入力電力は入力電圧用安定化電源(PWR400H)で測定し、出力電力はデルタ負荷の印加電圧をオシロスコープ(Tektronix Inc., TPS2024)で測定し、一周期分のサンプル値から電力実効値を求めた。電力損失は出力電力から入力電力を減じて求めた。

従来型半導体スイッチの電力損失1.35Wに対し、WBG半導体スイッチの電力損失は0.05Wとなり、従来型半導体スイッチの電力損失で規格化した場合の

表1 入力電力、出力電力、電力損失

	入力電力	出力電力	電力損失
従来型半導体スイッチ Si-MOSFET	3.30W	1.95W	1.35W
WBG半導体スイッチ GaN-MOSFET	2.00W	1.95W	0.05W

WBG半導体スイッチの電力損失比は4%となった(表1)。

2.1節の検証用電圧変換回路より電力損失比が低い要因として、スイッチングのデューティ比が可変であることがあげられる。デューティ比が低い場合、PWMパルスのONが瞬時に終了する。この状態は高い周波数でのスイッチングと類似しており、従来型半導体スイッチでは大きな電力損失となるが、WBG半導体スイッチでは小さな電力損失となる。この差が電力損失比に現れ、WBG半導体スイッチが優位になったものと考えられる。

3. 結 言

検証用電圧変換回路と実用電圧変換回路を製作し、従来型半導体スイッチとWBG半導体スイッチの電力損失の特性を評価した。

WBG半導体スイッチを従来型半導体スイッチから差し替えるだけで、電圧変換回路の電力損失が従来比で50%以下に低減可能であった。また、実用的な回路として評価した三相交流インバータ回路では、電力損

失が従来比で4%に低減可能であった。さらに、WBG半導体スイッチでは、スイッチング周波数とそれに伴うフィルタカットオフ周波数を高く設定できることから、インダクタを含むフィルタ回路の小型軽量化が期待できる。これらの特徴は電源部の低発熱化、小型化、重量削減を可能とし、次世代の電子機器や電力装置に使用されるものと考えられる。

謝 辞

本研究を遂行するに当たり、実用電圧変換回路の設計・製作に関し適切なお助言を頂いた小松パワートロン㈱に感謝します。

参考文献

- 1) STW57N65M5 data sheet, STMicroelectronics社, 2013/12, Rev.2.
- 2) UF3C065040K3S data sheet, UnitedSiC社, 2018/12 Rev.A.
- 3) TP65H050WS data sheet, Transphorm社, 2018/6 Rev.2.