

13 kV SiC-MOSFET を用いた自己給電回路の開発

DEVELOPMENT OF THE SELF-POWER FEEDING CIRCUIT USING 13 kV SiC-MOSFET

川上弘晶^{#,A)}, 生駒直弥^{A)}, 徳地明^{A)}, 高柳智弘^{B)}, 不破康裕^{B)}

Hiroaki Kawakami^{#,A)}, Naoya Ikoma^{A)}, Akira Tokuchi^{A)}, Tomohiro Takayanagi^{B)}, Yasuhiro Fuwa^{B)}

^{A)} Pulsed Power Japan Laboratory

^{B)} Japan Atomic Energy Agency

Abstract

A compact high-voltage pulsed power supply can be realized using a 13 kV SiC-MOSFET. The conventional method of supplying gate drive power to a 13 kV SiC-MOSFET is supplied through a transformer, but partial discharge of the transformer has posed a problem. We have developed a DC-DC converter that steps down from 7 kV to 5 V for self-supplying power to a 13 kV SiC-MOSFET.

1. 背景・目的

加速器用高電圧パルス電源には、高電圧、大電流、高速といった性能が求められる。これらの性能を満たすスイッチング素子としてサイラトロンやイグナイトロンなどの放電管が古くから使用されてきたが、これらは寿命の短さやメンテナンスの必要性などの多くの欠点を有している。近年では放電管に代わり、高耐圧、高速のパワー半導体スイッチを直並列多重で構成した高電圧パルス電源が実用化されている。

半導体スイッチを用いた高電圧パルス電源において、定格電圧の高い素子を用いることで、スイッチの直列数を減らすことができ、電源の小型化が実現できる。現在市販されているパワーMOSFETとしてはシリコンカーバイド(SiC)を用いた定格電圧 1.7 kV の商品があり、さらなる高耐圧デバイスの登場が期待されている。このような状況の中、TPEC(つくばパワーエレクトロニクスコンステレーション)のプロジェクトにより、定格電圧 13 kV の SiC-MOSFET の開発が進められている。13 kV SiC-MOSFET の実物の外観を Fig. 1 に示す。TO-268 パッケージの面実装型デバイスであり非常に小さいが、評価試験では気中で 10 kV の使用が可能であることが確認されている。



Figure 1: 13 kV SiC-MOSFET developed by TPEC.

[#] kawakami@myppj.com

13 kV SiC-MOSFET のドレイン電流に対するオン抵抗の変化のグラフを Fig. 2 に示す。ドレイン電流が増えるにしたがってオン抵抗が増加しており、大電流領域では損失が極めて大きくなるため、本デバイスは数 10 A 以下の動作電流で使用すべきである。

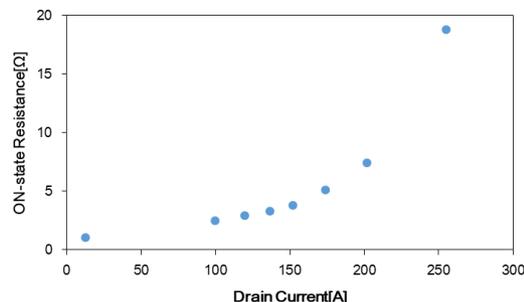


Figure 2: An ON-state resistance vs a drain current of 13 kV SiC-MOSFET.

以上のように、13 kV SiC-MOSFET は大電流用途には適さないものの、1 素子で 10 kV のパルス発生が可能なデバイスであり、使用すれば電源の大幅な小型化と高信頼化を実現できる[1]。

2. 自己給電回路の開発

ところで、半導体スイッチを用いた高電圧パルス電源において、高電圧に浮いた各段のスイッチにゲート駆動電力を供給する必要がある。ゲート駆動電力の供給には主に以下の 2 種類の方法が用いられる。

① トランス給電方式 (Fig. 3)

絶縁トランスを用いて地上から給電を行う。出力電圧が高くなるにつれて、一次巻線と二次巻線とコア間の絶縁確保のために各段の絶縁トランスが大型になるほか、部分放電が発生しやすくなる。

② 自己給電方式 (Fig. 4)

各段の印加電圧を降圧して制御電圧を生成する。スイッチ 1 段の印加電圧(数 kV)からゲート電圧レベル(数 V)に降圧できる DCDC コンバータ(自己給電回路)が必要となる。

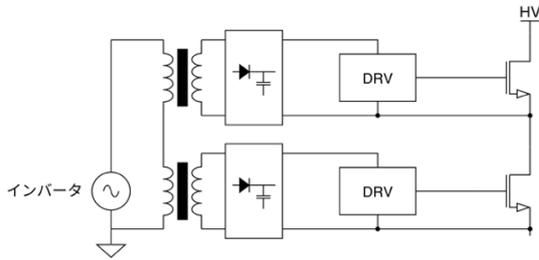


Figure 3: Power feeding by transformer.

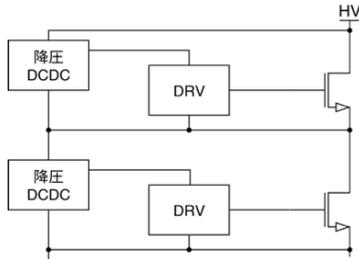


Figure 4: Self-power feeding.

出力電圧が 50 kV を超えるような高電圧の電源では、必要な半導体スイッチの直列数が多くなり、13 kV SiC-MOSFET が効果的に使用できる。同時に、トランス給電方式におけるトランスの絶縁設計が難しくなるため、自己給電方式の採用が見込まれる。このように、13 kV SiC-MOSFET を使用して高電圧パルス電源を設計する際、自己給電方式を選択したいことが多い。しかし、13 kV SiC-MOSFET に自己給電を行うには、スイッチ 1 段の印加電圧が高いことから今までにない降圧比の大きな DCDC コンバータが必要になる。そこで本研究では、13 kV SiC-MOSFET を用いて 7 kV から 5 V まで降圧する回路を開発した。

3. 考案した回路とその動作

今回考案した自己給電回路の回路仕様を Tabel 1 に、回路構成を Fig. 5 に示す。電源の出力電圧を可変とする場合、出力電圧に応じてスイッチ 1 段の印加電圧を変えることになる。そのため、入力電圧 2 kV~7 kV の範囲で動作可能な仕様とした。

Table 1: Circuit Specification

Input Voltage	2 kV~7 kV
Output Voltage	5 V
Output Power	5 W

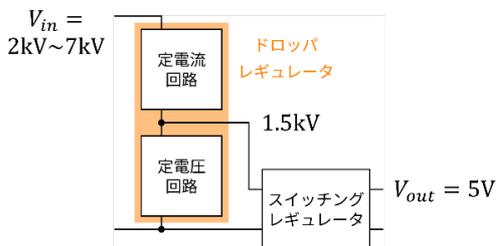


Figure 5: 7 kV/5 V Self-power feeding circuit.

13 kV SiC-MOSFET を用いたドロップレギュレータとスイッチングレギュレータによる 2 段階降圧により、最大 7 kV の印加電圧から 5 V、5 W の制御電力を生成する。

当社における過去の自己給電回路の開発例[2]では、スイッチングレギュレータのみにより 3 kV から 5 V、5 W の制御電力を生成している。今回、スイッチングレギュレータ単体で 7 kV から 5 V まで降圧しようとするとスイッチングトランスの耐圧確保が困難となったため、ドロップレギュレータと併用して降圧する構成とした。

4. 試験結果

本回路に出力電力 5 W 相当の模擬負荷抵抗を接続して、出力試験を実施した。Figure 6 に回路の入出力特性を示す。Figure 6 の通り、入力電圧 2 kV~7 kV に対して、負荷への出力電圧 5 V の生成を確認できた。

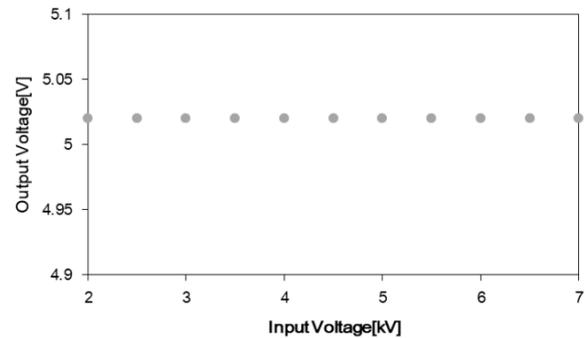


Figure 6: Output voltage vs input voltage.

次に、Fig. 7 にドロップレギュレータ部の定電圧特性を示す。入力電圧 2 kV~7 kV に対して、定電圧回路の出力電圧の変化は 30 V と小さかった。すなわち、スイッチングレギュレータ部が必要とする電流量は、自己給電回路の入力電圧によらずほぼ一定である。

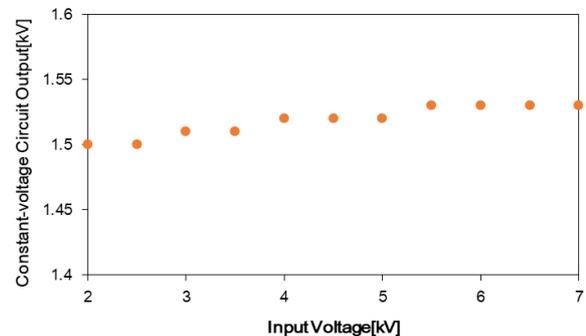


Figure 7: Constant-voltage circuit output vs input voltage.

次に、Fig. 8 にドロップレギュレータ部の定電流特性を示す。これは、自己給電回路の入力電圧に対する入力電流の特性に相当する。入力電圧 2 kV~7 kV に対して、入力電流の変化は 1.2 mA となった。Figure 7 の定電圧特性により、入力電圧の増加にともなって増加した入力電流は負荷への電力としては供給されず、定電圧回路内部での損失となる。また、入力電流が増加すると定電流回路での損失も増加する。このことから、入力電

圧の増加に対しても理想的には入力電流が変化しないことが望まれる。今後、より平坦な定電流特性を持つ定電流回路の開発に取り組む。

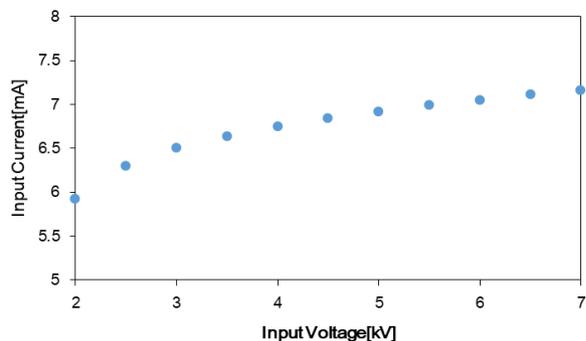


Figure 8: Input current vs input voltage.

5. 結論・展望

13 kV SiC-MOSFET を用いて、7 kV から 5 V まで降圧する回路を開発した。ドロップレギュレータとスイッチングレギュレータにより 2 段階で降圧する回路構成とした。模擬負荷抵抗に対し、入力電圧 2 kV~7 kV において、出力電圧 5 V、出力電力 5 W での動作を確認した。本

成果により、13 kV SiC-MOSFET を用いた高電圧パルス電源におけるゲート駆動電力の供給を自己給電方式で行うことが可能となり、13 kV SiC-MOSFET の利点である電源の大幅な小型化と高信頼化を最大限に実現できるようになった。

今後の課題は、作成した自己給電回路を高電圧パルス電源に組み込み安定動作を実証すること、および回路効率の向上である。

謝辞

本研究の一部は、TPEC(つくばパワーエレクトロニクスコンステレーション)の事業として行われた。

参考文献

- [1] A. Tokuchi *et al.*, “13kV高電圧SiCデバイスの加速器応用に関する研究”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 7-10, 2018, Nagaoka, Japan, pp. 1010-1014.
- [2] N. Ikoma *et al.*, “半導体クローバスイッチのための自己給電回路の開発”, Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, October 18 - 21, 2022, Online (Kyushu University), pp. 663-665.