

3. 3kV SiCによるILC用チョッパ型MARX電源の高耐圧化

CHOPPER TYPE MARX POWER SUPPLY FOR ILC IMPROVED BY 3.3KV HIGH VOLTAGE SIC DEVICES

澤村陽^{A)}, 徳地明^{A)}, 明本光生^{B)}, 中島啓光^{B)}, 川村真人^{B)}, 佐々木尋章^{C)}, 江偉華^{C)}, 福田憲司^{D)}
Yo Sawamura^{A)}, Akira Tokuchi^{A)}, Mitsuo Akemoto^{B)}, Hiromitsu Nakajima^{B)}, Masato Kawamura^{B)}, Hirofumi Sasaki^{C)}, Weihua Jiang^{C)}, Kenji Fukuda^{D)}

^{A)} Pulsed Power Japan Laboratory Ltd.

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^{C)} Nagaoka University of Technology

^{D)} National Institute of advanced industrial science and technology Advanced power Electronics Research Center (AIST, ADPERC)

Abstract

The ILC (International Linear Collider) planned klystron power supply is called a MARX modulator and generates a pulse voltage of 120 kV 140 A 1.65 ms and supplies it to the cathode of the multi-beam Klystron. Small size, low cost, high reliability are strongly desired for the power supply to be mounted.

The prototype power supply consists of SiC MOS-FET and SiC diode with 2.4 kV withstand voltage with 2 series withstand voltage 1.2 kV elements. In order to further increase the breakdown voltage of the device and to further increase the reliability, we report on the implementation experiment of high withstand voltage with 3.3 kV withstand voltage SiC device. A part of this work has been implemented under a joint research project of Tsukuba Power Electronics Constellations (TPEC).

1. はじめに

ILC (国際リニアコライダー; International Linear Collider) 計画は、超高エネルギーの電子・陽電子の衝突実験をおこなうため、現在、国際協力によって設計開発が推進されている将来的な加速器計画 (Fig. 1)。

日本では、北上山地に建設誘致の候補が上がっている。



Figure 1: International Linear Collider Plan.

使用されるクライストロン電源は MARX 変調器と呼ばれ 120kV 140A 1.65ms のパルス電圧を生成し、マルチビームクライストロンのカソードに供給する。



Figure 2: SiC MOS FET MARX Power supply for ILC Klystron modulator.

株式会社パルスパワー技術研究所は KEK と共同でクライストロン電源を開発中である。



Figure 3: Pulse modulator power supply for ILC.

Figure 2 の ILC 用 SiC MOS FET MARX 方式クライストロンモジュレータ用電源に 20 ユニット搭載される Fig. 3 の ILC 用パルスモジュレータ電源は実装する主コンデンサを極力小型化し(40 分の 1)、基板サイズは 10 分の 1 相当の特長を有している。

本稿は、ILC 加速器に設置されるクライストロン用モジュレータ電源の開発に関するものである。搭載される電源は、小型化、低コスト化、高信頼性が強く望まれ、また電源が出力するパルスはフラットトップが 1.65ms の非常に長いパルス幅と電圧変動率 1%以内という高精度の出力が要求される。

2. 開発の目的と内容

本研究では、MARX 電源の構成とチョッパー回路を組み合わせた小型で安価なパルス電源を 80 ユニット構成する提案で PWM 制御によるドループの補償と位相制御によるリップルの低減を行っている。

試作電源は、Fig. 4 にブロック図を示す。SiC MOS-FET(1.2kV 2S3P), SiC ダイオード (1.2kV 2S), IGBT(2.5kV 1S), Si ファーストリカバリダイオード (1.5kV 2S)の構成となっている。

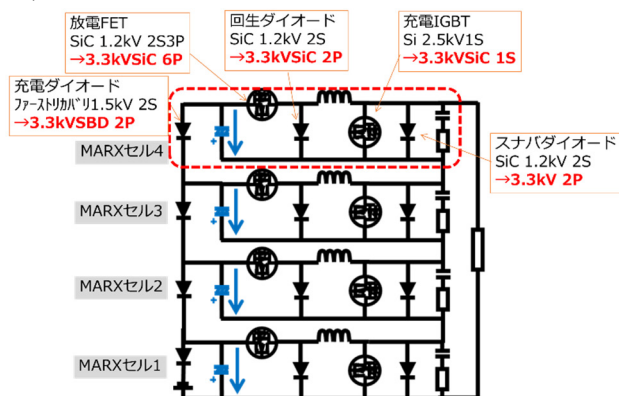


Figure 4: Block diagram of prototype power supply.

ここでさらにデバイスの高耐圧化をはかり、より信頼性を増すために、今回、3.3kV 耐圧 SiC デバイスで高耐圧化の実装実験を行ったので報告する。

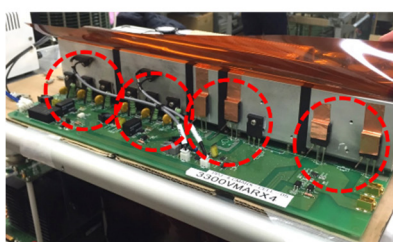
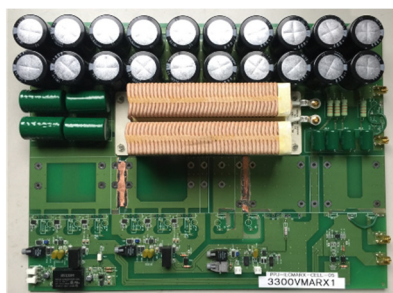


Figure 5: Printed circuit board of a MARX cell.

Figure 5 は試験に使用した MARX セルト基板で、従来 1.2kV 耐圧素子用 2 シリーズから 2 パラレルへ変更し 3.3kV 素子を実装した。

パターン変更は ILC 用パルスモジュレータ電源 1 ユニット分、MARX セル 1~MARX セル 4 の 4 枚実施した。

今回、MARX セルに実装の SiC3.3kV IEMOS FET/SBD と従来の 1.2kV 耐圧素子のスペック比較を下表 (Table 1, Table 2) に示す。

Table 1: SiC 3.3kV IEMOS FET Spec Comparison

| | SiC3.3kV IEMOS (AIST, ADPERC) | SCH2080KE (ROHM) |
|--------------------------|----------------------------------|---------------------|
| V_{DSS} | 3.3kV | 1.2kV |
| $R_{DS(ON)}$ (Typ.) | 80m Ω | 80m Ω |
| I_D | 17A | 40A |
| V_{GS} | 0/+20V | -5V/+20V |
| V_{th} | 4.0V (Typ.) | 1.6-4.0V |
| V_{SD} ($V_{GS}=0V$) | -3.1V | -1.3V |
| Package | TO-247(G_D_S) | TO-247(G_D_S) |

Table 2: SiC 3.3kV SBD Spec Comparison

| | SiC3.3kV SBD (AIST, ADPERC) | SCS220KG (ROHM) |
|---------|--------------------------------|--------------------|
| V_R | 3.3kV | 1.2kV |
| I_F | 21A | 20A |
| V_F | 1.0uA (Typ.) | 20uA (Typ.) |
| Package | TO-247(x_C_A) | TO-220(C_A) |

1.2kV 耐圧の SiC 素子は 2 シリーズ構成(2.4kV 耐圧)で使用しており 3.3kV 耐圧の SiC 素子に置き換え、性能変化、温度上昇などの検証を行った。

3. 性能試験結果

3.1 ILC 用パルスモジュレータ電源ユニット 5Hz 運転試験

- 充電電圧: -2 kV
- 負荷抵抗: 44 Ω
- キャリア周波数: 50 kHz
- ユニットフィルタ: なし
- PWM duty: 80% ~ 97%
- 繰返し運転: 5Hz

の条件で ILC 用パルスモジュレータ電源ユニットの動作試験を行った (Figs. 6, 7)。

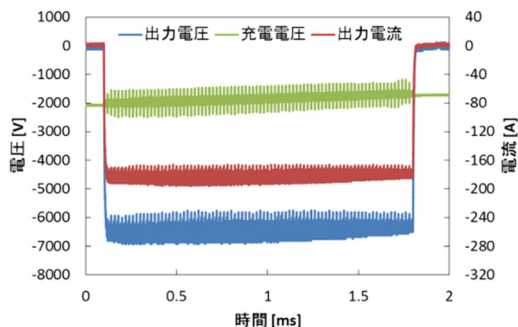


Figure 6: 5Hz operation test of pulse modulator power supply unit for ILC. (1 Output waveform).

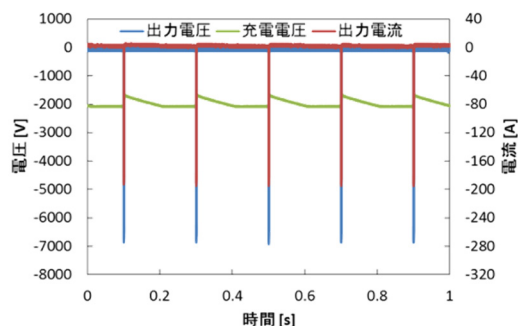


Figure 7: 5Hz operation test of pulse modulator power supply unit for ILC.

3.3kV SiC 素子を使用した MARX ユニットの評価試験で従来通り、充電電圧-2kV、出力電圧-6.2kV 出力電流 145A の 5Hz 運転が確認できた。

3.2 ILC 用パルスモジュレータ電源ユニット 3.3kV 素子 ソフトスタート(立上り時 PWM duty 可変)試験

- 充電電圧: -1.3kV
- 負荷抵抗: 44 Ω
- キャリア周波数: 50 kHz
- ユニットフィルタ: あり
- PWM duty: 85%一定

の条件で ILC 用パルスモジュレータ電源ユニットの動作試験を行った。

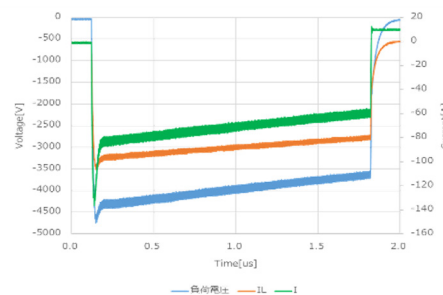


Figure 8: 3.3 kV rated SiC element with PWM duty fixed at 85% Test waveform with power supply unit filter.

PWM duty 85%固定では立ち上り時にオーバーシュートが発生する。その回避策として立ち上り時に PWM duty を細かく可変するソフトスタート試験を行った (Fig. 8)。

- 充電電圧: -1.8kV
- 負荷抵抗: 44 Ω
- キャリア周波数: 50 kHz
- ユニットフィルタ: あり
- PWM duty: 40% → 60% → 70% → 75% → 79% → 81% ~ 97%

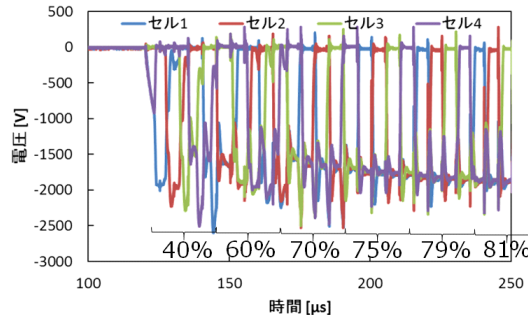


Figure 9: 3.3 kV rated SiC element with PWM duty variable Test waveform with power supply unit filter.

Figure 9 に PWM duty を 40%から可変させた場合の波形を示す。PWM duty が低い場合、ピーク電圧が 2.6kV と高くなっている。今回は 3.3kV 素子のため、定格は超えていないが 1.2kV 素子 2 シリーズだと定格を超え故障の可能性がある。

3.3 MARX セル 5 Hz 連続運転試験と素子温度測定結果

- 充電電圧: -2 kV
- 負荷抵抗: 11 Ω
- キャリア周波数: 50 kHz
- PWM duty: 80 % ~ 97 %
- 繰り返し周波数: 5 Hz
- 連続運転時間: 20 min

の条件で MARX セルの動作試験を行った。

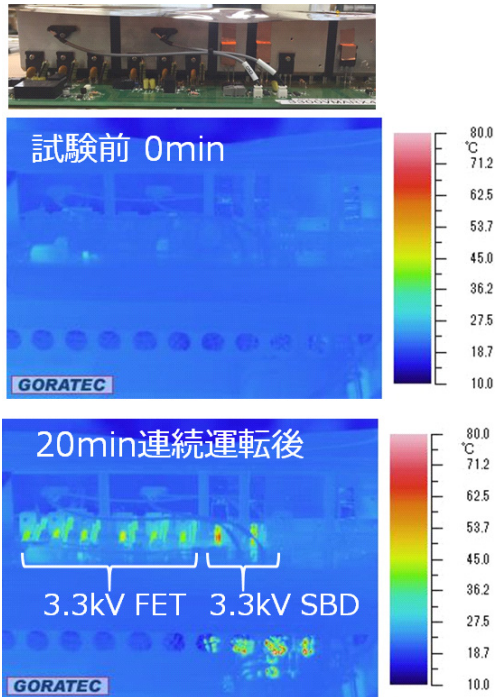


Figure 10: Thermograph result of MARX cell 5 Hz continuous operation test.

MARX セルを繰り返し周波数 5 Hz で 20 分間の連続運転試験を行った。サーモグラフでの結果を Fig. 10 に示す。下の 20 分後のサーモグラフで、3.3kV SiC 素子と 3.3kV SBD 素子の温度が周囲に比べて上昇しているがそれほど大きな温度変化は見られない。

Figure 11 の 20 分間の連続運転で SiC 素子の温度上昇は最初の 5 分以内に上昇し十分に温度が落ち着いている状態であることがわかる。

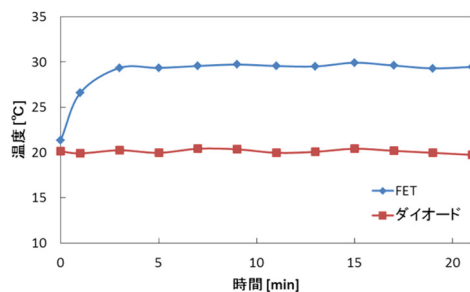


Figure 11: MARX cell 5 Hz operation test and element temperature measurement result.

4. 結論と今後の展望

4.1 結論

ILC 用チョッパ型 MARX 電源の 3.3kV SiC 素子に置き換え、充電電圧-2kV 時、出力電圧-6.2kV 出力電流 145A のユニット動作試験が確認できた。

3.3kV SiC 素子での 5Hz 連続運転では、半導体素子の大きな温度上昇は見られなかった。

4.2 今後の展望

ユニット PWM duty 可変試験では、PWM duty が低い場合、ピーク電圧が高く、MOS-FET、ダイオードの定格電圧(1.2kVx2S=2.4kV) に余裕がなく、3.3kV 以上の素子への交換によりデバイスの高耐圧化をはかり、ILC 用チョッパ型 MARX 電源の、より信頼性を向上させることを検討していく。

謝辞

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

また、共同研究の高エネルギー加速器研究機構をはじめ、長岡技術科学大学の方々に感謝の意を表する。