

小型可搬型超高電圧パルス電源の開発状況

STATUS OF DEVELOPMENT OF A COMPACT AND TRANSPORTABLE ULTRA HIGH VOLTAGE PULSED POWER SUPPLY

亀崎広明^{#,A)}, 廣瀬幸子^{A)}, 中田恭輔^{A)}, 徳地明^{A)}, 須貝太一^{B)}, 江偉華^{B)}

Hiroaki Kamezaki^{#,A)}, Yukiko Hirose^{A)}, Kyosuke Nakata^{A)}, Akira Tokuchi^{A)}, Taichi Sugai^{B)}, Weihua Jiang^{B)}

^{A)} Pulsed Power Japan Laboratory Ltd.

^{B)} Nagaoka University of Technology

Abstract

Nagaoka University of Technology has developed a pulse generator named ETIGO-IV, which outputs ultra-high voltage pulses with a peak voltage of 400 kV, a peak current of 13 kA, a pulse width of 150ns, and a repetition rate of 1 Hz. The device's large dimensions (3.9 m in length, 1.1 m in width, and 2.7 m in height) pose challenges for industrial applications where portability is essential. To address this issue, we are developing a more compact and transportable ultra-high voltage pulse power supply system. Our target specifications include a peak voltage of 200 kV, a peak current of 20 kA, a pulse width of 100 ns, a total length of 1.5 m, a diameter of 0.3 m, and a repetition rate of 10 Hz. This paper presents an overview of the system's design and the current status of its development.

1. はじめに

長岡技術科学大学において、ETIGO-IV と呼ばれるパルス発生装置がある。この装置は、ピーク電圧 400 kV、ピーク電流 13 kA、パルス幅 150 ns、繰り返し周波数 1 Hz の超高電圧パルスを出力することが可能である [1, 2]。その性能をもつ一方、サイズと重量がポータビリティを求められる産業応用において課題となっている。

この問題に対処するため、我々は小型化と可搬化を図りつつ、電源性能の維持を目指した。本プロジェクトの目標は、ピーク電圧 200 kV、ピーク電流 20 kA、パルス幅 100 ns、全長 1.5 m、直径 0.3 m、繰り返し周波数 10 Hz を達成する小型可搬型超高電圧パルス電源の開発である。

サイズの比較を Fig. 1 に、設計目標を Table 1 に記す。

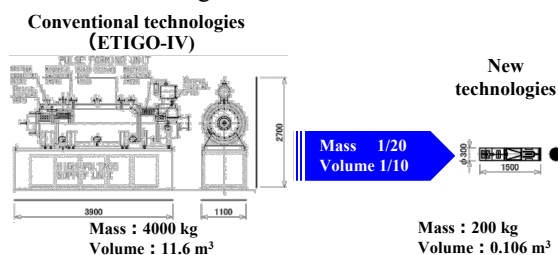


Figure 1: Isometric view comparison of pulse power supply sizes between conventional and new technologies [1, 2].

2. システムの設計と開発

新しいシステムでは、コアレス・テストトランス、折り返し型パルス形成線路(PFL: Pulse Forming Line)、バッテリー駆動小型インバータ充電器などの技術を採用している。これにより、従来の装置のサイズと重量を大幅に削減しつつ、必要な性能を確保する。

装置の外観図を Fig. 2 に断面図を Fig. 3 に示す。さらにパルス電源のブロック図 (Fig. 4) を載せる。Figure 4 に

示すように、本システムの回路は主にインバータ充電器、コアレス・テストトランス、および折り返し型 PFL から構成されている。初めにリチウムイオンキャパシタから給電したエネルギーをインバータとトランスを使って中間蓄積コンデンサに 50 kV まで充電する。50 kV に達するとギャップスイッチが放電し、コアレス・テストトランスで昇圧比 8 倍の 400 kV が特性インピーダンス 10 Ω の折り返し型 PFL を充電する。負荷へつながるギャップスイッチが導通することで 200 kV、100 ns のパルスが印可される(負荷が 10 Ω のとき)。超高電圧短パルスを印可するためには、電源出力のインダクタンスも十分小さくしなければならない。また、誘電体かつ絶縁体の純水と、真空で隔てられた出力端のインターフェイスには、沿面放電の対策が必要である。そこで、真空側の沿面をテーパ角 45° としたラジアル絶縁構造 (Fig. 3) を採用した。

次に各部の詳細を説明する。

Table 1: Development Objectives

Parameter	Specification
Output Voltage	200 kV
Output Current	20 kA
Pulse Width	100 ns
Output Energy	400 J
Repetition Rate	10 Hz
Average Output Power	4 kW
Peak Output Power	4 GW
Mass	200 kg
Volume	0.106 m ³
Drive System	Battery-powered

2.1 バッテリー駆動インバータ充電器

従来の AC 電源受電方式からバッテリー駆動方式に変更し、可搬性を向上させるために、体積あたりのエネルギー密度が高く、短時間に大電流を出力できるリチウムイオンキャパシタをバッテリーに採用した。このインバータ充電器は、45 V のバッテリーで受電し 50 kV への昇

[#] kamezaki@myppj.com

圧を実現する。

試験外観写真 (Fig. 5) と試験回路図 (Fig. 6) を示す。バッテリー電圧 45 V からコンデンサ充電電圧 50 kV への昇圧試験を確認した。試験波形を Fig. 7 に載せる。小型可搬型超高電圧パルス電源出力の繰り返しは 10 Hz であり、1 回の充電時間は 100 ms 以下で行う必要がある。評価試験では充電時間 70 ms で 50 kV に充電することができており目標通りの性能が確認された。



Figure 2: External view of the prototype compact and transportable ultra-high voltage pulse power supply.

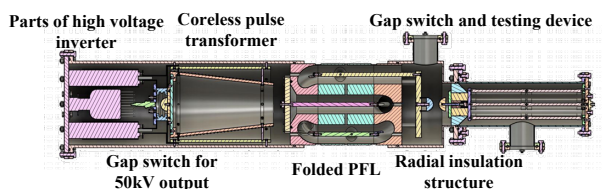


Figure 3: Cross-sectional view of the prototype compact and transportable ultra-high voltage pulse power supply.

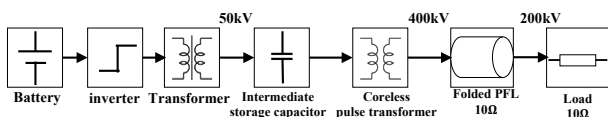


Figure 4: Block diagram of the pulse power supply.

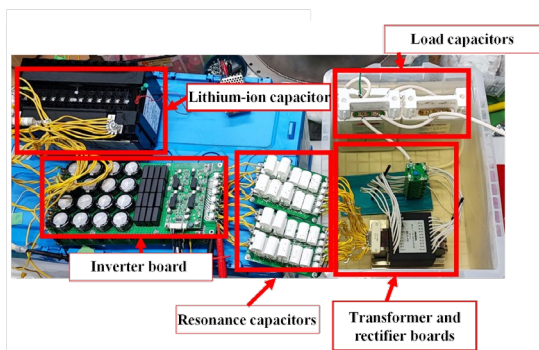


Figure 5: Photograph of the basic module evaluation test for the inverter charger.

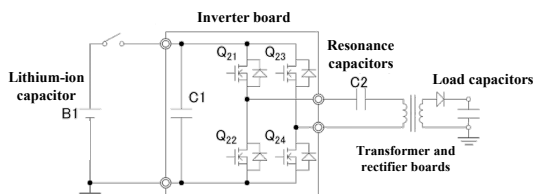


Figure 6: Test circuit diagram of the inverter charger.

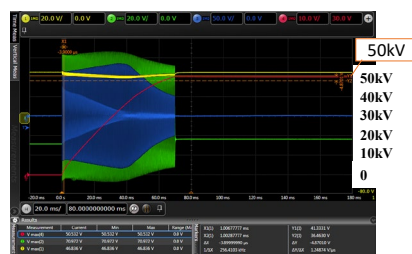


Figure 7: Charging waveform at 50 kV. Charging time is 70ms with a lithium-ion capacitor at 45 V. (Yellow: Inverter gate waveform, Blue: Inverter current, Red: Load capacitor voltage waveform, 20 ms/div).

2.2 コアレス・テスラトランス

従来のコア型パルストランスは重く、大型化の傾向がある。そこで、体積が 1/4 倍程度のコアレス・テスラトランスを開発した。従来型との比較を Fig. 8 に示す。昇圧比は 8 倍を目指した。さらに、結合係数を約 0.6 にすることでエネルギー効率を最適化する。

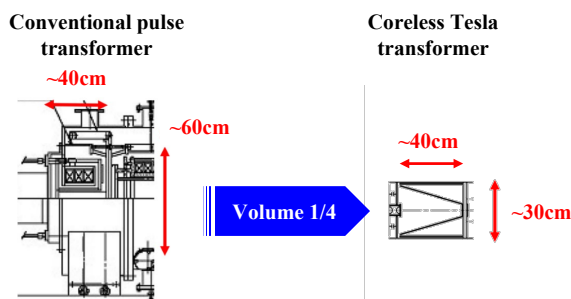


Figure 8: Size comparison between conventional pulse transformer and coreless Tesla transformer.

一次側と二次側を組み付けたコアレス・パルストランスの外観を Fig. 9 に載せる。評価試験は長岡技術科学大学にて行った。その試験回路図は Fig. 10 に示す通りである。また、シミュレーションモデル (Fig. 11) で試験結果の妥当性を確認した。

試作機の試験結果 (Fig. 12, Fig. 13) では、目標とする 8 倍の昇圧比が達成された。

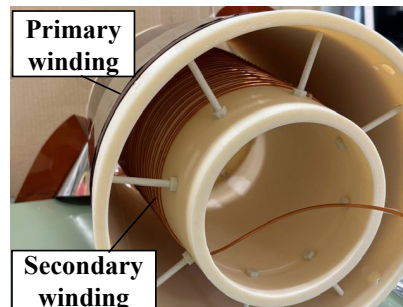


Figure 9: External view of the coreless pulse transformer.

2.3 折り返し型 PFL

我々が新しく発明した折り返し型 PFL は、軸方向の長さを短縮し、装置の小型化を実現する。誘電体が純水するとき、100 ns のパルス幅を得ようとすると従来技術では軸

方向長さが 1.7 m 必要であるが、この発明により約 0.4 m、つまり従来技術の 1/4 倍以下の軸方向長さに短縮した。この技術は特許申請済みであり PFL ひいてはパルス電源自体の小型化に寄与している。

折り返し型 PFL の基本構造を説明する。金属円柱の中をモグラの穴状にくりぬき、その穴を金属円筒中で複数回折り返すことで軸方向長さを短くするとともに空間利用率を上げ小型化を実現する。構造が分かるように Fig. 14 に折り返し型 PFL の透視図と、Fig. 15 に内導体の外観を載せる。さらに、PFL の外導体は表面のみをめっき加工し、軽量化を図った (Fig. 16)。

長岡技術科学大学にて試験を行い、Fig. 17 に示した試験回路で低電圧動作を確認した。結果を Fig. 18 に載せる。試験により約 126 ns のパルス幅を達成し、設計値に近い性能を確認した。

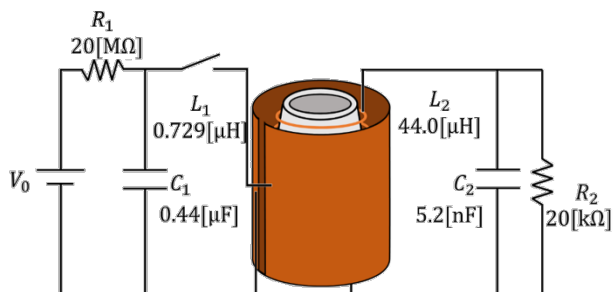


Figure 10: Test circuit diagram of the coreless Tesla transformer. After charging C1, turn on the primary circuit switch.

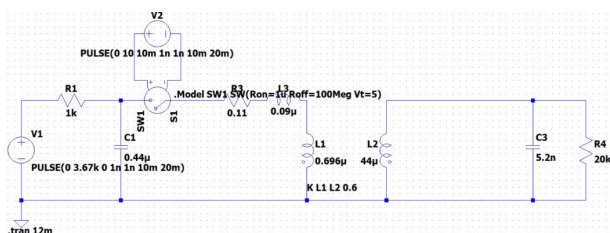


Figure 11: Simulation model of the coreless Tesla transformer.

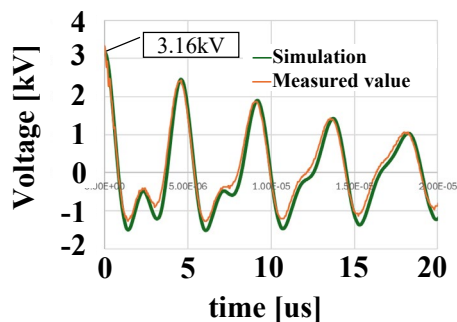


Figure 12: Test results of the coreless transformer (Primary winding voltage).

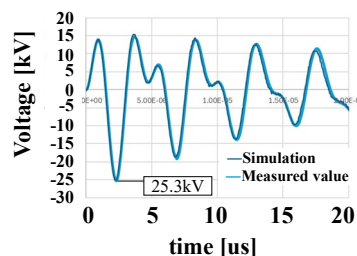


Figure 13: Test results of the coreless transformer (Secondary winding voltage).

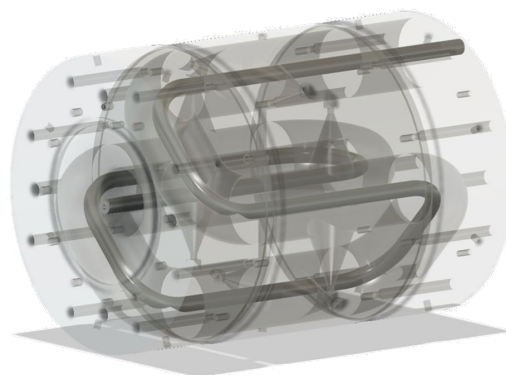


Figure 14: Transparent view of the folded PFL.

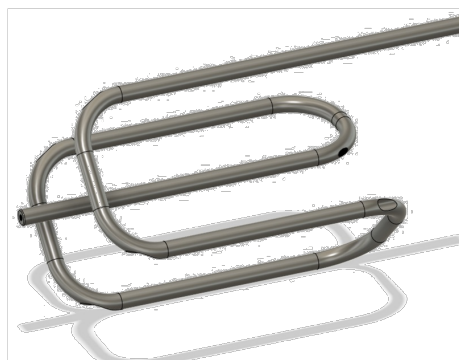


Figure 15: Internal conductor appearance of the folded PFL.

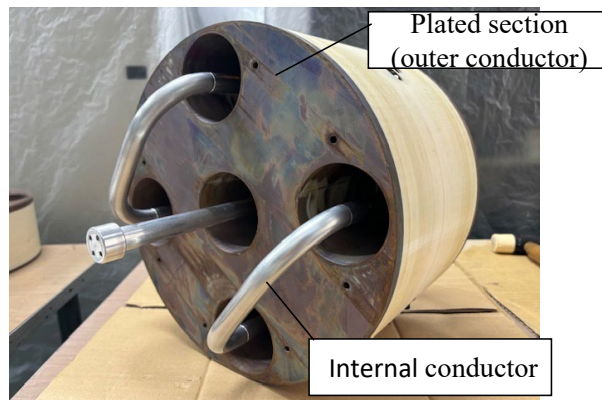


Figure 16: Photograph of the folded PFL. The outer conductor of the PFL consists of three parts. Assembled with only the internal conductor and some parts to show the fold.

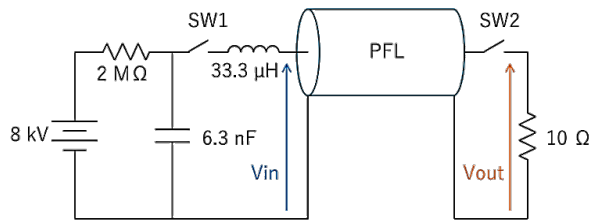


Figure 17: Test circuit diagram of the folded PFL. Initially, SW1 and SW2 are OFF, and SW2 is a gap switch. First, charge the capacitor, then turn on SW1. While charging the PFL, the output voltage is applied to the load when the discharge voltage of SW2 is reached.

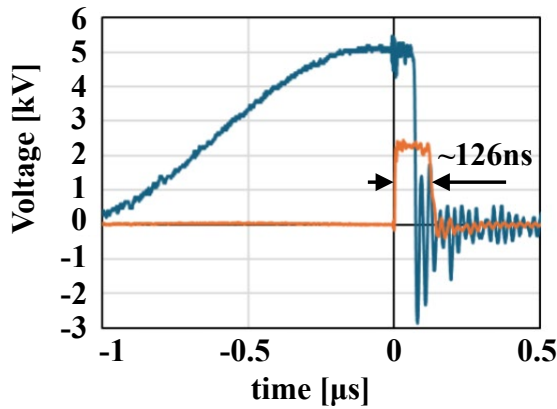


Figure 18: Test waveform. The blue line represents the input voltage to the PFL, and the orange line represents the output voltage from the PFL.

3. プロジェクトの進捗状況

本プロジェクトは中小企業庁成長型中小企業等研究開発支援事業 (Go-Tech 事業) にて実施したものである。2022 年度に開始され、2023 年度には試作機を製作した。現在、2024 年度は本番機の開発を進めている。これまでの進捗は計画通りであり、今後の目標に向けた準備も順調である。

4. まとめと今後の展望

評価の結果、新しい小型可搬型パルス電源システムの各機構の動作を確認できた。しかし、実機での信頼性を確保するため、試作機から本番機への開発が進行中である。

この小型かつ可搬性のある超高電圧パルス電源の開発は大きな進展を遂げており、このシステムの革新的な設計は、さまざまな産業応用において有効な解決策となるであろう。

参考文献

- [1] Nagaoka University of Technology Extreme Energy Density Research Center, https://etigo.nagaokaut.ac.jp/machine/etigo_4.html
- [2] Yai, J. and Jiang, W., “パルス電磁エネルギー工学”, The Institute of Electrical Engineers of Japan, March 15, 2002.