

大強度電子ビーム発生用小型パルス電源の開発 DEVELOPMENT OF COMPACT PULSED POWER SOURCE FOR HIGH POWER ELECTRON BEAM GENERATION

須貝太一^{*,A)}, 井上翔太^{A)}, 寺島尚紀^{A)}, 小野寺勇介^{A)}, 加葉田駿^{A)}, 徳地明^{B)}, 江偉華^{A)}
Taichi Sugai^{*,A)}, Shota Inoue^{A)}, Naoki Terajima^{A)}, Yusuke Onodera^{A)}, Shun Kahata^{A)}, Akira Tokuchi^{B)},
Weihua Jiang^{A)}

^{A)} Nagaoka University of Technology

^{B)} Pulsed Power Japan Laboratory Ltd.

Abstract

High power pulsed electron beam generator "ETIGO-IV", with a maximum output voltage of 400 kV, and a current of 12 kA and a pulse width of 120 ns, is located at the Extreme Energy-Density Research Institute at Nagaoka University of Technology. It has been used for research on high-power microwave and high-power X-rays. Currently we are developing a new source that is 1/20 the weight and 1/10 the size of "ETIGO-IV" but has similar output. The new source will consist of a battery charger, a Tesla transformer, a gap switch and a folded PFL. In this study, the prototype version of the Tesla transformer which is one of the most important parts is tested and simulated. As a result, a boost ratio of 5.9 and an energy transfer efficiency of 63% were achieved by the Tesla transformer.

1. はじめに

長岡技術科学大学極限エネルギー密度工学研究センターの“ETIGO-IV”は定格出力電圧 400 kV、電流 12 kA、パルス幅 120 ns の大強度パルス電子ビーム発生装置であり、主に大電力マイクロ波、大強度 X 線発生の研究で使用され、電子ビームによる殺菌や水処理への応用も期待されている。一方で、本発生装置はサイラトロン、パルストランス、磁気スイッチ、PFL から成る、幅 1.1 m、長さ 3.9 m、高さ 2.7 m の据置型の構造であるため、持ち運びが難しく応用上の制約となっている。

そこで現在我々は、同等の出力で重さを ETIGO-IV の 1/20、サイズを 1/10 にした小型の可搬型電子ビーム用パルス電源を開発しており、構造としては Fig. 1 で示すようにバッテリー駆動の充電器、テスラトランス、ギャップスイッチ、折り返し式 PFN から成る予定である。本発表では小型化するうえで特に重要となるコアレステスラトランスの開発状況について報告する。

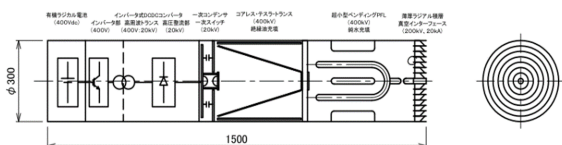


Figure 1: Schematic drawing of a proposed pulsed power source.

2. コアレステスラトランスの評価方法

本電源で搭載する予定のコアレステスラトランスは Fig. 2 に示すように、二次側のコイルが一次側のコイル内に設置される構造であり、一次側の磁束が二次側をすることで昇圧される。二次側のコイル径は軸方向に向かうにつれて減少させることで、トランス結合係数を 0.6

程度とする。この場合、一次側と二次側の回路を共振させることで、理想的には一次側から二次側へエネルギーが 100% 転送される。本開発では実機のテスラトランスを製作するうえで、まずミニチュアモデルを製作し、実験およびシミュレーションにより評価を行った。

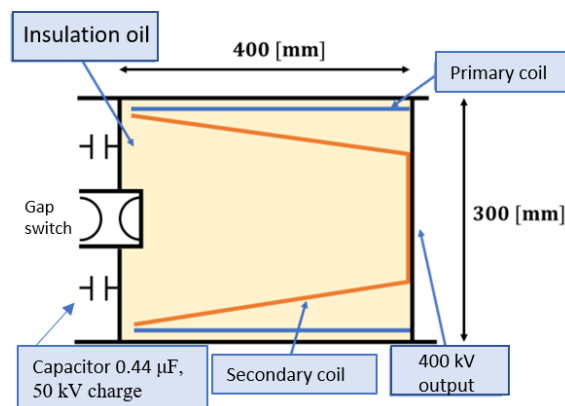


Figure 2: Schematic drawing of a coreless Tesla transformer.

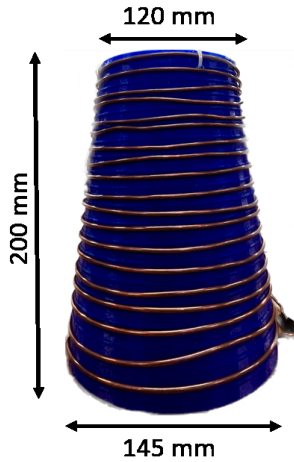
2.1 ミニチュアモデルによる実験的評価

製作したテスラトランスのミニチュアモデルを Fig. 3 に示す。トランスの一次側コイルとして、螺旋型、層型の 2 種類の構造を製作し、それぞれについて評価した。螺旋型は銅板を螺旋状に 2 回巻いており、層型はカプトンテープで絶縁した銅板を同じ箇所に 2 回巻いている。ただし、いずれも高さ 200 mm、直径 162 mm であり、自己インダクタンスの計測値は螺旋型 390 nH、層型 373 nH である。トランスの 2 次側コイルは Fig. 3b のように高さ 200 mm、上部直径 120 mm、下部直径 145 mm の絶縁体にエナメル導線を 20 回巻いている構造である。これらの一次側と二次側のコイルを組み合わせてテスラトランスを構成し、Fig. 4 の試験回路で評価した。試験

* t.sugai@vos.nagaokaut.ac.jp



(a) Primary coil (Left: Spiral type, Right: Layer type)



(b) Secondary coil

Figure 3: Tesla transformer which was designed as miniature model.

では、まず一次側コンデンサ C_1 (0.44 μ F) を 300 V に充電し、次に銅板からなるスイッチを手動でオンしたときの C_1 と二次側コンデンサ C_2 (5 nF) の電圧変化を測定した。

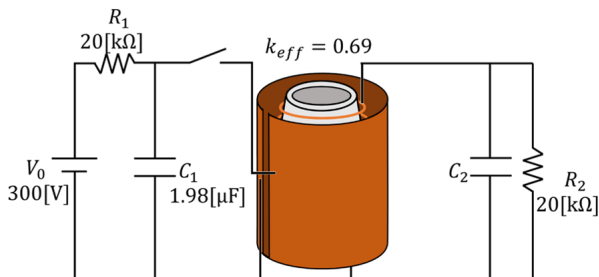


Figure 4: Test circuit of the Tesla transformer.

2.2 ミニチュアモデルのシミュレーションによる評価

製作したテスラトランスのミニチュアモデルを評価するために、それを含む回路動作のシミュレーションを行った。シミュレーションしたテスラコイルの構造モデルは Fig. 5 であり、製作した Fig. 3 のテスラコイル構造

と同様である。まず、ピオ・サバルの法則より一次側コイルに均一に電流が流れると仮定して、一次側コイル内部の磁束を計算した。次にその磁束のうち二次側のコイルを通る磁束を算出することでテスラトランスの結合係数を求めた。この計算により、Fig. 5 の構造の場合の結合係数は 0.69 であることがわかった。さらにコイルの構造から自己インダクタンスを算出し、自己インダクタンスと結合係数から相互インダクタンスを算出することで、Fig. 4 の実験回路の等価回路モデルを Fig. 6 と以下の式 (1) - (4) の通り構築し、 C_1 の初期電圧が 300 V の場合の C_1 と C_2 の電圧変化をシミュレーションした。

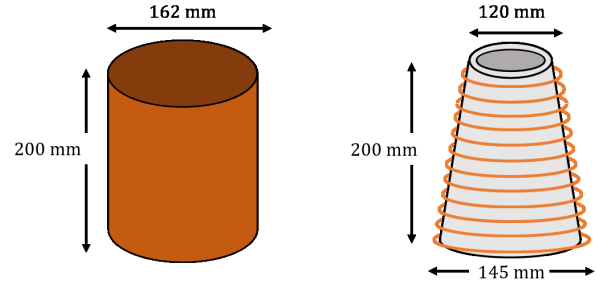


Figure 5: Structure model of the Tesla transformer for simulation. (Left: Primary coil, Right: Secondary coil)

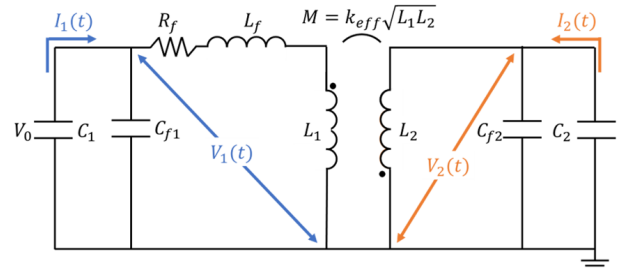


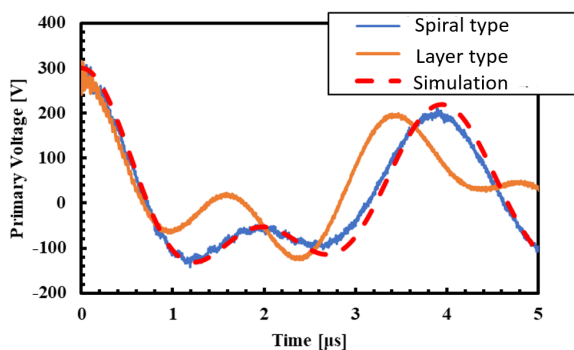
Figure 6: Circuit model of the Tesla transformer for simulation.

$$\begin{aligned} V_1(t) &= V_0 + \frac{1}{C_1} \int i_1(t) dt \\ &= -(L_1 + L_f) \frac{di_1(t)}{dt} - M \frac{di_2(t)}{dt} - Ri_1 \end{aligned} \quad (1)$$

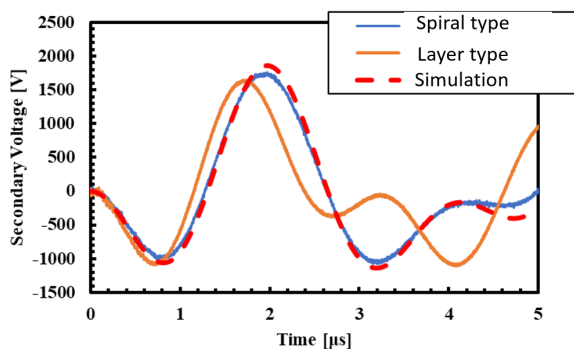
$$\begin{aligned} i_1(t) &= -\frac{1}{L_1 + L_f} \\ &\times \int (V_1(t) + M \frac{di_2(t)}{dt} + Rf i_1(t)) dt \end{aligned} \quad (2)$$

$$V_2(t) = -\frac{1}{C_2} \int i_2(t) dt = M \frac{di_1(t)}{dt} + L_2 \frac{di_2(t)}{dt} \quad (3)$$

$$i_2(t) = \frac{1}{L_2} \int (V_2(t) - M \frac{di_1(t)}{dt}) dt \quad (4)$$



(a) Voltage waveform of capacitor C_1 in primary side



(b) Voltage waveform of capacitor C_2 in secondary side

Figure 7: Voltage waveform of primary and secondary circuits of the Tesla transformer.

ここで、各パラメータは Fig. 6 に示すとおりであり、 R_f と L_f はそれぞれ回路寄生抵抗と寄生インダクタンスを

表す。

3. コアレステストランスの評価結果

Fig. 7 に Fig. 4 の評価回路における C_1 と C_2 の電圧の計測結果とシミュレーション波形を示す。 C_2 の電圧波形は最初に負極側に下がってから、正極側に上がり最大値となっていることがわかっている。これは典型的なテストランスの出力波形を表しており、結合係数が低い場合最初の半周期の波では最大値にならないが、一次側と二次側回路が共振することで、次の半周期で二次側の出力は最大となる。実験波形とシミュレーション波形は概ね一致しているが、特に一次コイルが層型の場合にシミュレーションとのずれが生じた。これはシミュレーションでは一次側の電流分布が一樣と仮定しているが、実際はその分布が異なっているためであると考えている。二次側の最大電圧と入力電圧から昇圧比は 5.9、エネルギー転送効率は 63% である。損失の主な原因は、シミュレーションによる解析から寄生抵抗による熱損失であることがわかっている。

4. まとめ

大強度パルス電子ビーム発生装置の小型化を実現するために、コアレステストランスの特性解析を実施した。解析のために一次側 2 巻き、二次側 20 巻き、結合係数 0.69 のミニチュアモデルを製作し、その試験を行ったところ、昇圧比 5.9、伝送効率 63% の出力を確認した。また、その回路のシミュレーションも行い、試験結果を概ね再現した。今後はこの解析結果をもとに実機サイズのテストランスを製作し、テストランス昇圧による PFL 線路への 400 kV 充電、折返し PFL による 200 kV パルス出力を実現する。