

# 高機能高電圧インパルス発生装置の開発と応用

## Development of a functional high voltage impulse generator and its applications

前山 光明, 楯澤 和也, 久保田 淳

Mitsuaki Maeyama, Kazuya Gumizawa, Atsushi Kubota

埼玉大学 理工学研究科数理電子情報部門

Devision of Electrical and Electronics Systems, Saitama University

### Abstract

Enlargement of capacity and functionality of the pulse power generator are hoped due to its use expansion to the industrial fields. We have developed the high repetitive static impulse generator using technologies of a successive trigger operation and resonant/parallel charging method and Thyristor and IGBT switches. In this paper, we propose reliable and high functional trigger circuit system with a provision for miss-operation of trigger circuit due to the surge voltage, wide range operation voltage and high speed operation. And using five, seven, ten, and seventeen stage IG, we demonstrated its feasibility. In addition, we demonstrated the waste liquid treatment applying repetitive liquid discharges using this IG.

**Key Words:** impulse generator, solid state switch, high repetitive operation, waste liquid treatment

### 1. 目的

蓄積されたエネルギーを数 10 ns から数  $\mu$ s という短時間に放出することで高温、高密度な極限状態を発生させるように設計されたパルスパワー電源が、従来のレーザーや核融合などの研究分野や電力系統機器の分野を始めとして、さまざまな分野で利用されるようになってきている[1]。これらの利用分野の拡大に伴って、応用に関する研究を含め、パルスパワー電源の大容量化、高効率化、高繰り返し動作、長寿命、小型化の研究が進められている[2]。

寿命、信頼性の向上のため従来のギャップスイッチに代表される放電型スイッチに替えて半導体スイッチを利用した電源が様々開発されて

いる(3)。ただし、スイッチ単体で比較すると、最大電圧値、電流値ともに放電型スイッチに比べると1桁以上小さい。このため、高電圧化のためには、スイッチの直列化とパルストランス

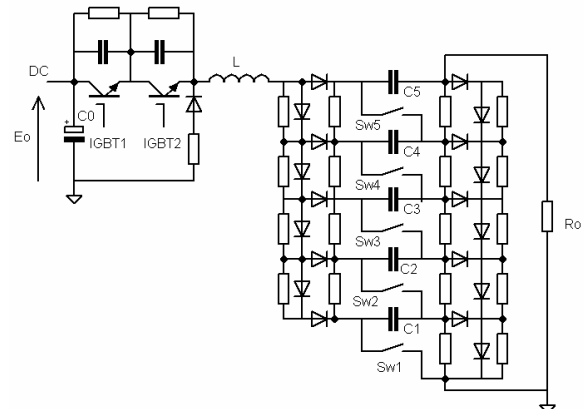


Fig. 1 半導体化 IG 回路(n=5)

\* 〒338-8570 さいたま市桜区下大久保255  
電話：048-858-3471 FAX：048-858-3471  
Email：maeyama@ees.saitama-u.ac.jp

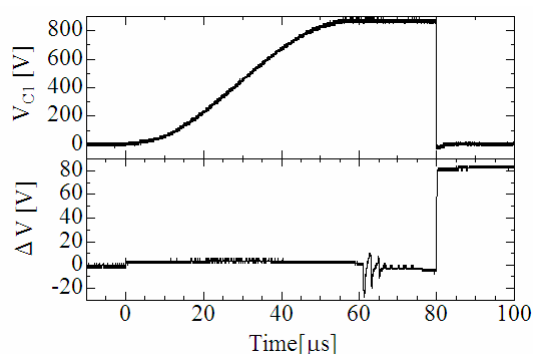


Fig. 2  $E_0=500V$  時の  $V_{C1}$  と  $\Delta V$  の電圧波形

を組み合わせる方法が良く利用されている。一方、岡村ら[3]により提案された半導体化IGは、多段式インパルス電圧発生器の特長を有し、(1)低い充電電圧、(2)トリガ動作の簡略化、(3)高効率という利点がある[4][5]。

われわれは、廃ガス処理用などに応用可能な電源の高機能化を目指して、スイッチ部に半導体スイッチング素子であるサイリスタやIGBTを用いたマルクス回路形のインパルスジェネレータ(IG)の開発を行ってきた。この電源は、長寿命でスイッチの性能の劣化がなく、また、繰り返し動作を行うために、充電経路にダイオードを組み合わせる高速充電方式を用いた大容量で高繰り返し動作が可能であるという特徴を持つ[6]。

従来のトリガ方式では、共振充電終了時のサージ電圧による誤作動、多段化による電圧増幅率の減少という問題があった。本論文では、高速に動作する新しいトリガ方式の実験による実証、コンデンサの段数の増加による回路の大容量化、様々な周波数、繰り返し回数での半導体化IGの繰り返し動作を確認し、従属動作型IGの高機能性を示した。また、作成した電源を利用して水中放電を行い、水処理への適用について実験的に検討した。

## 2. 半導体化IG実験回路

### 〈2・1〉 半導体化IGの動作原理

図1に5段( $n=5$ )の場合の半導体化IGの回路図を示す。各スイッチ( $Sw1 \sim Sw5$ )には、サイリスタ、あるいは、IGBTが接続される。なお、回路図には記載されていないが、このスイッチには、それぞれゲート回路が接続されている。

IGの段数を $n$ 段としたとき、各段のコンデンサ( $C1 \sim Cn$ )は、電圧 $E_0$ に充電されたコンデンサ $C_0$ ( $\gg C_1$ )からスイッチ(IGBT1, 2)およびインダクタンス $L$ を通して並列に共振充電される。特に、IGBT1, 2のON時間により、コンデンサ $C1 \sim Cn$ の充電電圧を制御することが可能である。充電終了後に外部回路により $Sw1$ を動作させると、コンデンサ $C1$ が放電し、 $RT2 \sim RTn$ に $\Delta V = VC1/(n-1)$ の電圧変化が発生する<sup>(6)</sup><sup>(7)</sup>。この $\Delta V$ を利用し、2段目以降のゲート回路は動作し、コンデンサ $C1 \sim Cn$ が全て直列に接続され、負荷に $V_{RL} = -nVC1$ の負の高電圧が出力される。この出力電圧のピーク値は、理想的には $V_{RL|p} = -2nE_0$ となる。

### 〈2・2〉 改良型ゲート回路

図2が1段目のコンデンサの電圧 $V_{C1}$ 、および $RT2 \sim RTn$ に発生する電圧 $\Delta V$ の波形である。 $\Delta V$ の波形には、充電時に並列に接続されているダイオードの順方向電圧( $\sim 3V$ )が発生し、充電終了後に $0V$ となるが、充電電流の遮断に伴いサージ電圧が発生する場合がある。このサージ電圧は、回路の誤動作を引き起こすが、その極性、発生する場所が不規則である。回路解析から、ダイオードの寄生容量のばらつきによりこのサージ電圧が発生するため、これを取り除くことは現実的でない。これに対処するため、ダイオードの順方向電圧と積分回路を組み合わせることで、サージ電圧を避けるよう禁止信号を作成する方法を利用した[7]。

また、ゲート回路およびスイッチの動作の遅れは、IGの出力電圧の低下を引き起こすため、高速なゲートICの利用とゲート電圧の高電圧

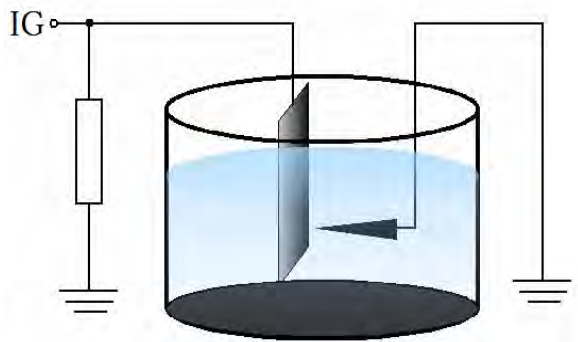


Fig.3 水処理実験装置

化をはかった。この結果、 $\Delta V$ の変化から、ゲート電圧が発生するまでの時間遅れは150ns以下となるよう改良した。

### 〈2・3〉水処理実験装置

水処理には、その評価方法として良く利用される水中放電によるインジゴカルミン水溶液の脱色を試みた。インジゴカルミンは、二つのN-HとC=Oが一つのC=Cを介して交差することで609nmの波長の光を吸収し青色に見える。水中放電により発生するOHラジカルやオゾンなどとの反応により、NとHの結合が切れることで無色になる。また、放電装置としては図3に示すように針対平板電極を用いた。

## 3. 実験結果および検討

### 〈3・1〉半導体化IGの大容量化・高速化

n=10のIGを用いて、動作特性を調べた。図4は、 $E_0=700V$ として、スイッチにIGBTとサイリスタを用いた場合の出力電圧波形の比較である。この図より、スイッチングが高速なIGBTを用いることでサイリスタの場合に比べ立ち上がり時間が $1.2\mu s \rightarrow 300ns$ と約1/4に高速化した。さらに、出力電圧のピーク値も9.8kV(増幅率14)から11.8kV(増幅率16.9)と改善した。ここで、増幅率は(出力電圧のピーク値)/ $E_0$ であり、最高値は2nであり、この実験では20である。

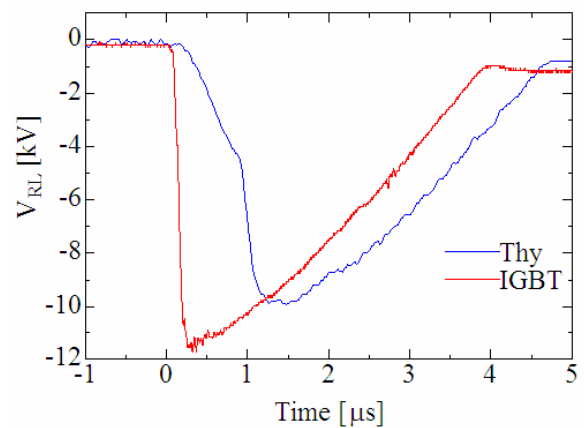


Fig.4 スwitchの違いによる出力電圧波形の比較

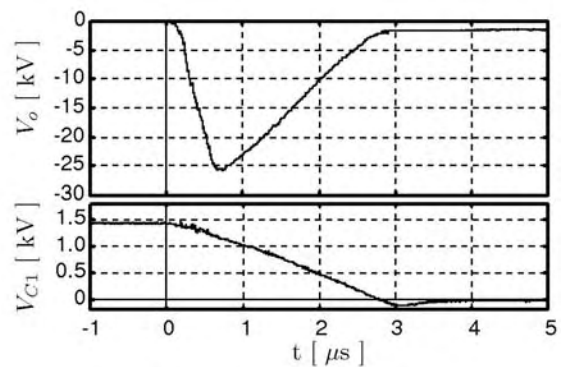


Fig.5 25段IGの出力電圧波形  
(上図： $V_{RL}$ ，下図  $V_{C1}$ )

出力電圧の更なる高電圧化のためn=25のIGを作成し動作を確認した。図5にその結果を示す。出力電圧の立ち上がり時間が図4に比べ長くなっているのは、段数が増えたことによる回路のインピーダンスの増加と、使用したIGBT素子(最大定格2kV、図4の場合は1.5kV)が異なることが原因していると考えている。

Table. 1 段数によるIGの充電効率の変化

段数 n	5	7	10	17
充電効率[%]	90	89	86	79

### 〈3・2〉IGの段数による充電効率特性

n=5~17の半導体化IGを用い、充電電源電圧 $E_0 = 1kV$ の場合の充電効率を測定した。測定

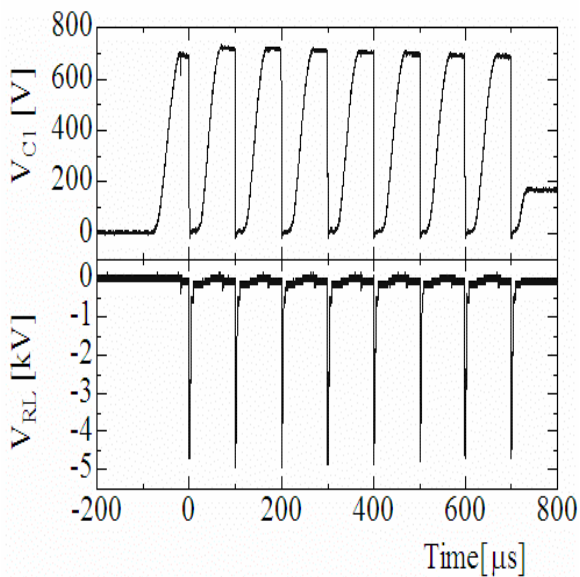


Fig.6 繰り返し動作試験 ( f=10 kHz )

結果を表 1 に示す。ここで、充電効率は、電源用コンデンサ  $C_0$  で減少した静電エネルギーと IG のコンデンサに充電された静電エネルギーの比として定義した。本 IG の充電効率は、理想的な値として 100% に近づけることが可能である。本 IG の効率低下の主な原因は、充電経路にあるダイオードの順方向電圧(約 3V)による損失であり、より順方向電圧の小さい素子を用いることでさらなる効率向上が可能となる。

### 〈3・3〉繰り返し特性

IGBT は電流遮断能力を持つため、サイリスタを用いた場合に比べ、より短い時間で、次の充電を開始することができる。図 6 は  $n=7$  の IG を用い、 $E_0=400V$ 、繰り返し周期  $100\mu s$  (周波数  $f=10kHz$ )、繰り返し回数 8 回の場合の実験結果である。最大繰り返し周波数は、電源の特性と、負荷の状態にもよるが、抵抗放電という単純な負荷において目標とする  $10kHz$  の繰り返し動作が誤動作なく可能であることを確認した。

図 7 は、さらに、各繰り返し時の充電時間を変化させ、出力電圧を 1 パルス毎に変化させた場合の実験結果である。IG の出力後のコンデ

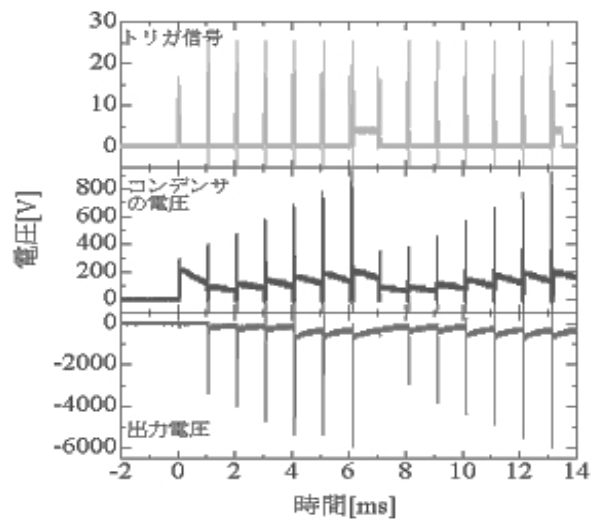


Fig.7 充電時間制御による出力電圧波形

ンサに残される電圧については、更なる調整が必要であるが、負荷の状態に応じて 1 パルス毎に出力電圧が制御できることを実証した。

### 〈3・4〉水処理への適用

図 8 は、図 3 の水処理用実験装置に処理液を入れ、IG から高電圧パルスを印加させ、電極間で放電した時の様子である。また図 9 は、そのときの電極間の電圧波形である。なお、電極間距離は、約 1mm である。

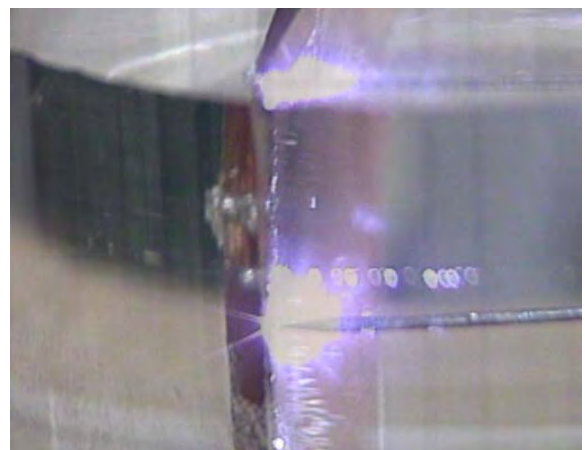
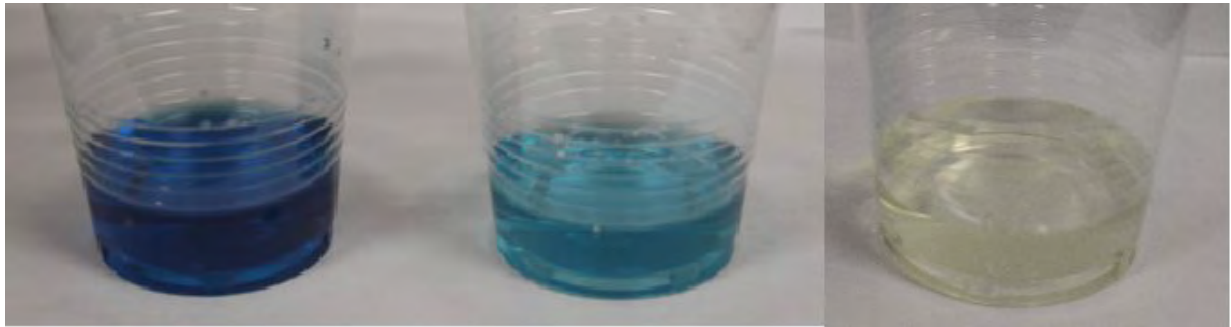


Fig.7 水中放電の様子



(a) 処理前

(b) 200 秒経過後

(c) 500 秒経過後

Fig.9 水処理によるインジゴカルミン溶液の変化

放電は、電圧が印加された後、約  $0.5 \mu s$  遅れて開始し、放電時の電極間電圧はほぼ  $0V$  となっており、激しい発光を伴うアーク放電となっていることが考えられる。図 10 は、青色のインジゴカルミン水溶液に、繰り返し周波数  $200Hz$  で放電させ、200 秒、および 500 秒経過した時の水溶液である。単純に肉眼による確認のみであるが、処理時間が経るにつれて水溶液の青色が薄くなり、500 秒経過した時にはほぼ、無色まで処理できている[8]。これは、放電による紫外線の影響も考えられるが、水中放電により化学的に活性なオゾンや、 $OH$  ラジカルが生成されたものと考えられる。

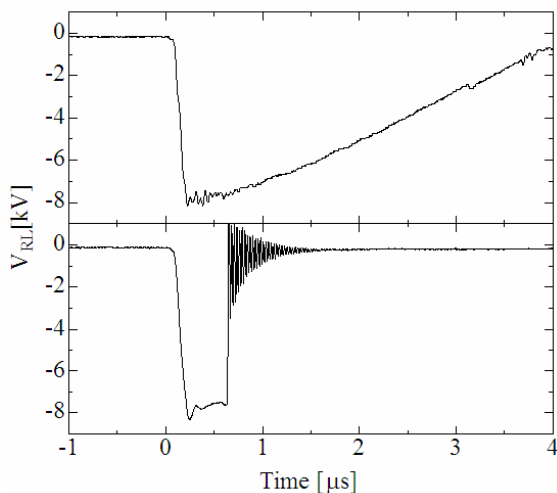


Fig.8 水中放電時の印加電圧波形

(a) 抵抗負荷の場合, (b) 水中放電の場合)

#### 4. まとめ

短時間に高電圧、大電流、大電力を発生させるパルスパワー電源として高繰り返し、高効率で放電型スイッチを用いない高機能半導体化IGを開発した。また、この電源をインジゴカルミン水溶液の処理に適用しその有効性を示した。また、この研究は、平成21年度シーズ発掘試験（発掘型）の助成を受けて実施した。

#### 参考文献

- [1] 柳父悟:「パルスパワー技術とその応用」, pp.9-11 (1992)
- [2] 石井彰三:「半導体パルスパワー電源の現状と今後」, プラズマ・核融合学会誌, Vol. 81, No.5 pp.349 (2005)
- [3] 岡村一弘・前山光明:「半導体スイッチング素子を用いたマルクス回路の開発」, 電気学会論文誌, Vol.118-A, No.6 pp.1318-1319(1998)
- [4] K. Okamura, S. Kuroda and M. Maeyama : “Improvement of a High Repetitive Rate Static Impulse Voltage Generator”, 12th IEEE International Pulse Power Conference, Vol.2, p.807 (1999)
- [5] M. Maeyama and M. Yoshida : “Development of The High Repetitive Impulse Voltage Generator Using Semiconductor Switches”, 13th IEEE International Pulse Power Conference, Vol.2, p.1264 (2001)
- [6] 前山光明:「サイリスタを用いた高繰り返しマルクスジェネレータ」, プラズマ・核融合学会誌, Vol. 81, No.5 pp.363-366 (2005)
- [7] 楯澤 和也, 前山 光明:「半導体化インパルスジェネレータの大容量化と高機能化に関する研究」 電気学会論文誌 Vol.130, No.4, pp.337-342(2010)
- [8] 楯澤 和也, 久保田 淳前山 光明:「半導体化インパルスジェネレータの改良と応用」 平成22年度電気学会全国大会, 1-164