

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560316

研究課題名(和文) 磁気結合された高電圧スイッチングセルによる高繰り返しパルスパワーの発生

研究課題名(英文) Generation of High Repetition Pulsed Power with Switching Cells Powered by Electromagnetic Coupling

研究代表者

柳平 丈志 (Yanagidaira, Takeshi)

茨城大学・工学部・准教授

研究者番号：10323213

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：半導体の使用による高電圧パルス電源回路を開発した。マルクス回路を半導体向きに再構成し、「セル」と呼ぶ基本回路を直列接続することで発生電圧を高めることが可能である。セル内部には、エネルギーを蓄積するためのコンデンサを内蔵している。セルは磁場の中に配置され、その磁場によって非接触で電力の供給を受け動作する。この方式では、扱う直流電圧は最終的な出力電圧よりも低い値で済み、油中での絶縁を容易にすることが出来る。5セルで25kV、200kWを発生した。繰り返し周波数1kHzまでの動作を確認した。この回路方式が浄水処理試験に使用可能であることを確認した。

研究成果の概要(英文)：A solid-state, high-voltage pulse generator is developed. The generator is based on a cascade of identical pulse cells, and placed in a magnetic field for inductive energy transfer. Each cell consists of a capacitor for energy storage and MOS-FETs for switching, and is constructed on a printed circuit board. Upon switching, each cell outputs voltage of the capacitor. With this configuration, the capacitor is charged at lower voltage compared to the final output voltage, and the D.C. electric field in the insulating oil can be reduced. Both charging of the capacitors and triggering of MOS-FETs are made by the inductive coupling with an external coil. By cascading 5 cells, pulses with amplitude of 25 kV, and power of 200 kW were produced.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：パルスパワー パルス電源 浄水処理

1. 研究開始当初の背景

気中または水中に含まれる環境汚染物質の分解処理において、効率的に化学活性種を発生するためのパルス放電プラズマの利用が近年活発に研究されている。オゾン、塩素に代わる酸化剤として、高い酸化力と低環境負荷の両面から高度浄水処理の分野に用いられるようになったが、一部の難分解物質に対しては対応が困難である。これらに対応できるパルスパワーの利用によるOH(ヒドロキシル)ラジカル処理が注目されている。

このラジカル処理では数十キロボルトの高電圧パルス電源装置が必要である。高電圧パルス電源の主要構成要素であるスイッチングデバイスの選択において、パワー半導体は従来のギャップスイッチ等と比べて高い繰り返し周波数で使用でき、難分解物質の処理において高いスループットを可能にするものと期待される。特に、MOS-FETの立ち上がり時間は数ナノ秒程度であり、他のパワー半導体に比べ急峻なパルスを発生できると共に、スイッチング損失を低減できると考えられる。しかし単体の耐圧は数百ボルト程度、パワーは十キロワット程度までであるため、多数の素子を精度良く同期運転する新しい回路技術の開発が望まれる。

高電圧発生のための原理として、マルクス回路が良く知られている。しかし、半導体素子の適用を検討してみると、単なる置き換えでは半導体素子の利点を十分に発揮することが難しいことがわかる。一例を挙げると、マルクス回路では充電抵抗を介して直流高電圧によりキャパシタを充電しているが、半導体化により小型化・高密度実装による低インダクタンス化を実現するためには冷却用絶縁油の使用が不可欠であり、絶縁油の直流印加に対する絶縁特性を考慮すると直流高電圧の使用には困難を伴う。想定される技術的課題の一つは、各所で絶縁の信頼性を保ちつつ多数の素子にゲート駆動電流を供給することである。その際、ゲート端子は容量性であり、ナノ秒オーダーの同期運転のためにはゲート電荷を短時間で供給する必要がある。このように、パルス電源への半導体素子の適用においては、多数の小電力容量の素子を直並列に接続して利用するために合理的な、新しい手法を確立する必要がある。

2. 研究の目的

本研究ではパルスパワー浄水処理に向けた高電圧パルス電源装置の実現のため、多数のMOS-FETを直並列に接続し同期運転する、新しい回路手法を開発することを目的としている。

3. 研究の方法

高電圧パルス電源装置の回路方式に関して、特に主回路の構成・電源供給方式・同期

運転のためのトリガ方式に重点を置き理論的および実験的に検討する。試作回路での動作を確認し、次いで大電流・高電圧化の検討を行う。試作機で高繰り返しおよび大電流での定常運転が可能になった後で、水中の難分解物質の処理に関する実験を行い、本電源方式の有用性について評価する。

4. 研究成果

(1) 主回路の構成

本研究によるパルス電源の負荷となる浄水処理リアクタでは、水の誘電率が他の多くの誘電体に比べて非常に大きいため電極間は容量性負荷となる。このため、回路の電気的性能を決めるスイッチング素子には、電流の立ち上がり時間がアーク移行時間に比べて十分短いことおよび、電極系を充電するための電流供給能力が十分であることが要求される。そこで半導体素子を多数直並列に用いることになるが、その回路方式については、回路全体を、基本回路(以下、セルと呼ぶ)の直列接続により構成する方式を検討した。

一般に絶縁油の絶縁破壊電圧は印加時間の延長とともに低下がみられる。このため、最終的なパルス電圧振幅と等しい電圧の直流をスイッチングしてパルスを得るのではなく、セル自身が数キロボルトまでのパルスを発生する方式が有利である。研究開始時点においては、定格電圧600-900VのMOS-FETが他の耐圧レンジの製品に比べてオン抵抗と耐圧のバランスが良好であった。このため、これらを直並列に接続して数キロボルト程度の電圧に対応する回路を1枚のプリント基板(セル)に実装し(図1)、さらに油中で複数のセルを直列に接続することが適切と判断した。実験では1枚のセル中に28個(4並列×7直列)のMOS-FETを収容した。並列接続部の電流分担のためには伝送線路トランスを用いた。

(2) セルに対する電源供給方式

装置を小型化するためには絶縁が容易で信頼性を確保しやすい方式が望まれる。この観点からセルの入出力端子に直流高電圧が加わらない構造を検討した。さらにエネルギー蓄積用のコンデンサの充電方法については高繰り返し動作での効率を考慮し、従来の抵抗を介して充電する方法と高周波磁界により非接触充電する方法とを比較検討した。

その結果、従来のマルクス回路のように何らかの充電抵抗を介してコンデンサに直流高電圧を供給するのではなく、数十キロヘルツの高周波磁界の利用により、セルに内蔵されたコンデンサに非接触給電する方法に利点が多いと結論付けた(図2)。このための給電装置を製作し、セル群に対して平均電力560Wの電力を供給した。この際の効率は約50%であった。

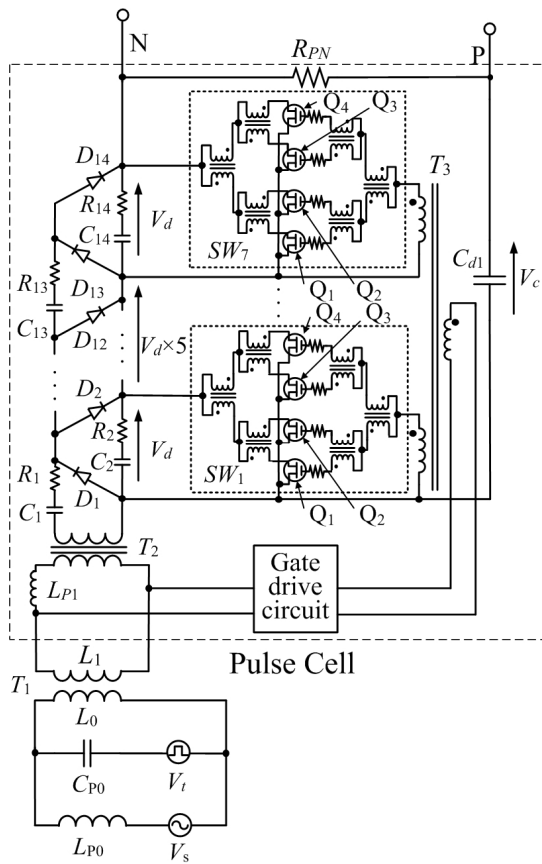


図1：セルの内部構成

C_{d1} : エネルギー蓄積用コンデンサ、 D_1 - D_{14} : コッククロフト-ウォルトン回路、 Q_1 - Q_4 : MOS-FET (SW_1 - SW_7 の内部) T_1 : 非接触給電・トリガパルス伝達のための磁気結合

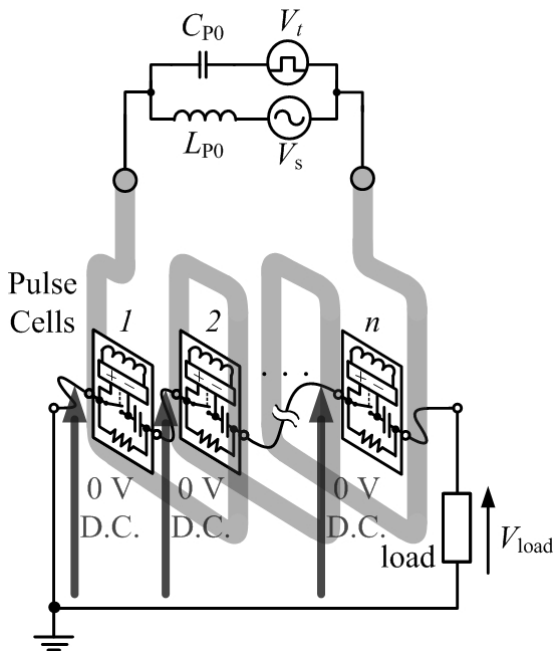


図2：セルの接続法

直列接続されたセルに対し、高周波およびパルスの重畳した磁界により電源およびトリガ信号を供給する。待機時の直流電位が 0 V になるため、絶縁が容易となっている。

(3) 多数のセルを同期運転するためのトリガ方式

MOS-FET のゲート駆動方法については、当初ドレインの直近に設けたコンデンサのエネルギーを正帰還機構によりゲートに伝達し、同時に隣接セルへトリガを伝搬させる方式を試みたが、セル枚数の増加と共にトリガ伝搬時間が増大する結果となった。このため、トリガ方式に関して、遅延時間特性やトリガ受信回路の待機電力および駆動能力を再検討した。その結果、電力供給用ループを介して外部のトリガ源と個々のセルを磁気結合させ、トリガに従い一斉に各セル内に設けたトリガ受信回路がセル内の MOS-FET を導通させる方式とした。

(4) セルの動作試験

ここまでの検討に基づき、高周波磁界によってエネルギーが供給され、セル1枚当たりの最高出力振幅 6 kV、最大電流 48 A、立ち上がり時間 50 ns、最大パルス幅 300 ns を出力するセルを製作した(図3)。図4に、5枚のセルを直列に接続した場合の出力波形を示す。図5に、セル数が1枚から5枚、負荷抵抗が0 (短絡) から 20 k に対する出力特性を示す。等価回路により予測した出力特性と実験結果とが一致している。

繰り返し周波数 1 kHz までの動作を行なった。上限の周波数はセル内のコンデンサにエネルギーを供給する高周波電源の能力(執筆時点で 560 W)で制限された。繰り返し動作時のセル内部のトランジスタの温度上昇はほぼ均等であった。また、これらの電圧分担状況が均等であり、正常であることを確認した(図6)。またトランジスタの電圧・電流の軌跡が、トランジスタの安全動作領域内で動作していることを確認した(図7)。

セルと外部磁場発生コイル(電源およびトリガ用)との間は絶縁油で完全に絶縁されているが、浮遊容量が存在する。高電圧パルス発生時には、この浮遊容量への充電電流が生じ、最も低電位側に配置されたセルに最も大きい電流が流れることが分かった。

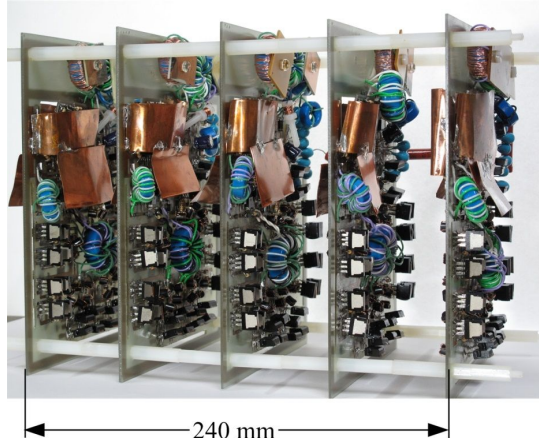


図3：製作したセル

油タンク中で周囲にコイルが配置された状態で使用する。

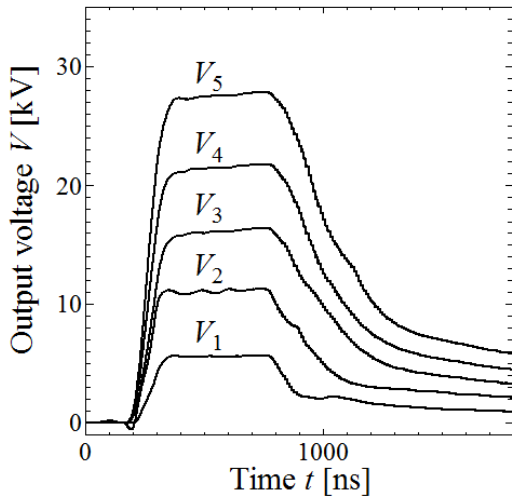


図4：セルの直列接続による高電圧パルス波形の例：各段が5 - 6 kVの電圧を発生している。

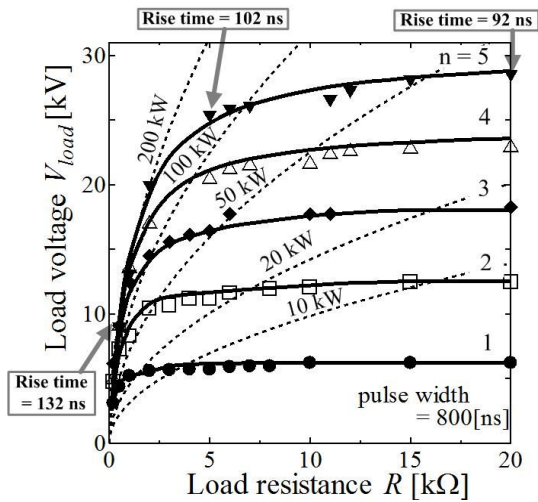


図5：負荷特性の実測値（プロット点）と理論値（実線）、出力レベル（点線）

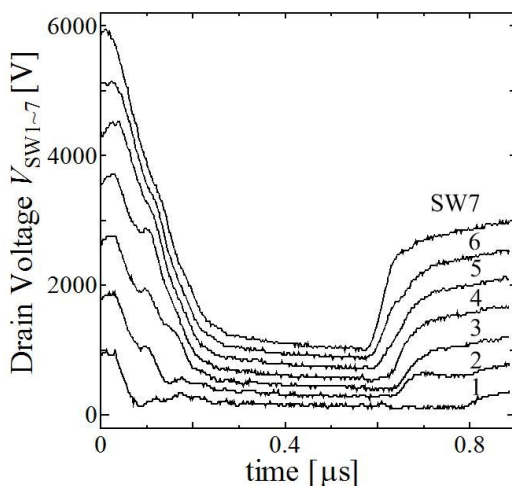


図6：1枚のセルの内部での、MOS-FET 直列接続部における電圧分担状況

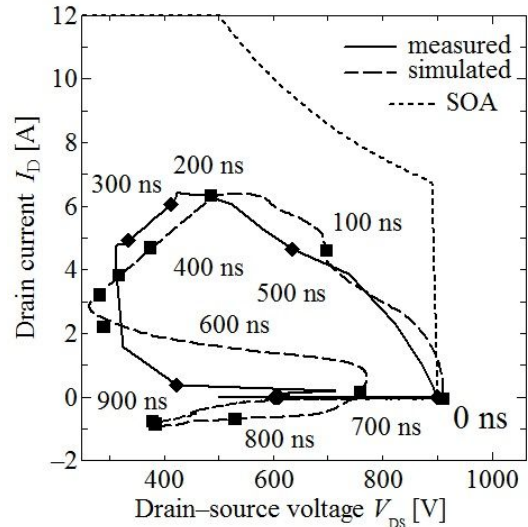


図7：トランジスタの電圧・電流の軌跡
トランジスタの安全動作領域内（SOA）で動作していることを確認した。

(5) 浄水処理実験への適用

浄水処理リアクタとして、誘電体フィルム表面にワイヤ電極をまたはメッシュ電極を密着させた形式のものを用いた（図8、図9）。被処理水には指標物質としてメチレンブルー色素を混入させた。図10に、電極間の電圧と電流の波形の例を示す。セル数は2枚とし、動作繰り返し周波数は400 Hzとした。この場合の脱色エネルギー効率はおよそ8 kJ/mgとなっている（電力量評価はリアクタ電極における値）。他の報告例に比べ遜色のない値が得られているが、今後は、次の検討を引き続き行いたい。

- ・実用的な処理能力とする際に多数のセルを直列運転だけでなく並列運転する方法についても検討したい。すでに予備実験を開始しているが、脱色エネルギー効率は9-12 kJ/mgとなっている。

- ・リアクタ内部に物質の濃度勾配があるため、被処理水の流路の取り方により処理能力が変化すると予想されるので、実験的に検討したい。

- ・リアクタに投入すべき最適な駆動パワー密度等について知見を得たい。

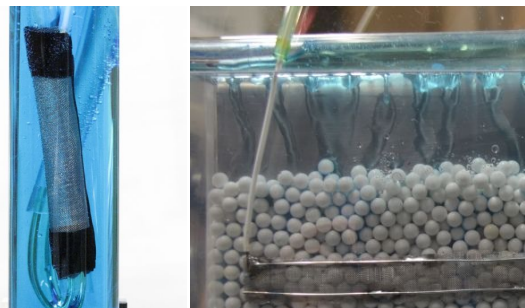


図8：リアクタ（左：ワイヤ電極使用・右：メッシュ電極使用）

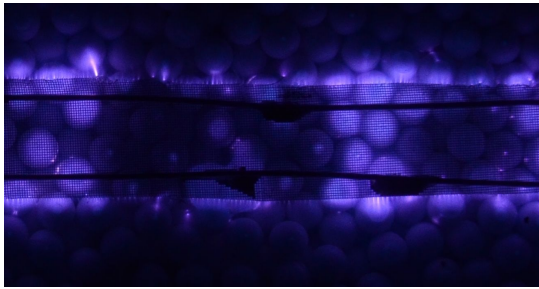
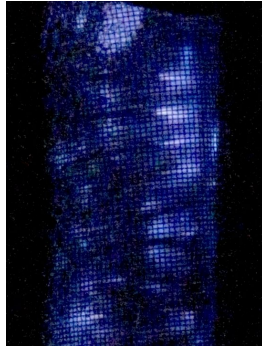


図9：放電時の様子（上：ワイヤ電極使用・下：メッシュ電極使用）

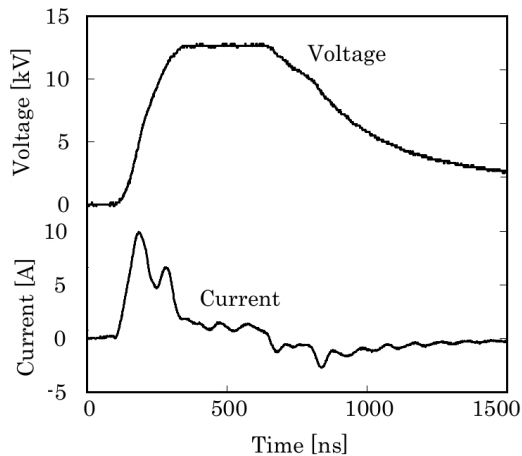


図10：リアクタ駆動時の電圧・電流波形
メッシュ電極を使用し、セル数は2枚とした。

5．主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計 3 件)

T. Yanagidaira, T. Kikuchi and K. Higashiyama, "Modular Pulse Generator With Capability of Capacitive Energy Recovery", IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 41, No. 10, 2701 - 2705, 2013, 査読有

高木 元, 折原正人, 山田 務, 柳平丈志,

『MOSトランジスタのパルス駆動における電流分担の改善に関する研究』, 電気学会論文誌A, Vol. 132, No. 4, 305-311, 2012, 査読有

H. Takagi, M. Orihara, T. Yamada and T. Yanagidaira, "Improvements in pulsed current sharing in driving parallel MOSFETs", Electronics and Communications in Japan, Vol. 96, No. 3, 1-8, 2013, の英訳, 査読無

〔学会発表〕(計 2 件)

Takeshi YANAGIDAIRA, An Insulated Pulse Generator with Pulse Cells Powered by Electromagnetic Induction, The 4th Euro-Asian Pulsed Power Conference and the 19th International Conference on High-Power Particle Beams 2012, 2012.10.01 Karlsruhe, Germany

Takeshi YANAGIDAIRA, A Modular Pulse Generator with Capability of Capacitive Energy Recovery, The 4th Euro-Asian Pulsed Power Conference and the 19th International Conference on High-Power Particle Beams 2012, 2012.10.01 Karlsruhe, Germany

〔その他〕
ホームページ等

6．研究組織

(1)研究代表者

柳平 丈志 (YANAGIDAIRA TAKESHI)

茨城大学・工学部・准教授

研究者番号：10323213

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし