



研究技術ノート

FPGA を用いたパルスパワーの電圧制御

秋山雅裕, 坂本達朗²⁾, 高橋克幸³⁾, 上野崇寿⁴⁾,
佐久川貴志²⁾, 秋山秀典²⁾

一関工業高等専門学校, ²⁾熊本大学, ³⁾シシド静電気(株), ⁴⁾大分工業高等専門学校

(原稿受付: 2010年12月1日 / 原稿受理: 2011年8月31日)

様々な分野でパルスパワーを用いた研究は行われており, パルスパワー発生装置には高度な制御が求められるようになってきた. その1つとして, パルスパワーの出力電圧の制御があげられる. 本研究では, 磁気パルス圧縮 (Magnetic Pulse Compression: MPC) 回路方式パルスパワー発生装置にプログラミングによる制御が可能な FPGA (Field Programmable Gate Array) を組み込み, パルスパワーの出力電圧制御を行った. 重要なパラメータである出力電圧を制御することで, 水質浄化, オゾン生成, 細胞の分化制御など, 幅広いパルスパワー応用研究につながり, さらには産業創生が期待される.

Keywords:

Pulsed Power, FPGA, MPC, Electric discharge in water

1. はじめに

パルスパワーを用いた研究は多く, 次世代半導体リソグラフィ用極端紫外光輻射のための高エネルギー密度プラズマ生成[1], 極短パルスを用いた窒素酸化物の処理[2], シイタケ栽培等食品へのパルスパワー利用[3, 4], 液中放電における加圧の化学反応や放電への影響[5], 医療応用などのバイオエレクトロクス[6]などの研究が盛んに行われている.

パルスパワー発生装置の研究に目を向けると, 半導体開放スイッチを用いたパルス高電圧発生装置開発[7], BJT (Bipolar Junction Transistor) の降伏現象を用いたミニチュアマルクス発生装置開発[8], IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors) と MPC (Magnetic Pulse Compression) 回路方式を用いたパルスパワー発生装置の開発と出力波形へのピーキングコンデンサや負荷の影響調査[9], パルス幅と極性可変のブルームラインパルス発生装置開発[10]などが行われている.

様々な分野でパルスパワーを用いた研究が盛んになるに伴い, パルスパワー発生装置の高度な制御が求められるようになってきた. FPGA (Field Programmable Gate Array) をパルスパワー発生装置に導入することにより, コンパクト化及び仕様変更時の柔軟性向上[11], FPGA を用いた MPC 回路方式パルスパワー発生装置のシステム制御とパルスの出力タイミング制御[12]等の高度な制御が研究されている. 小型化や出力タイミングの制御だけではなく, さらなる高機能化が求められており, その中でも重要な制御としてショット毎の出力電圧可変があげられる.

本研究では, FPGA を用いてパルスパワーの出力電圧を

ショット毎に制御できる MPC 回路方式パルスパワー発生装置を開発した. また, 高繰り返し動作中の出力電圧を 1 ショット毎に変更したパルスパワーを水中放電に適用し, 高速度カメラを用いて放電の様子を観測した. 本研究成果は, パルスパワーを用いた大気圧放電プラズマ, 液中放電プラズマ, 超臨界流体中放電プラズマの生成やパルス電界のバイオへの作用等の研究に対して, これまで出来なかった新しい研究領域を提供する. 例えば, 水中放電プラズマでは, 一定の印加電圧においてパルスパワーの繰り返し周波数が低い場合はストリーマ状放電プラズマが生成されるが, 周波数が高くなってくると, 電極先端に気体領域が形成され気体内の放電プラズマとなる[13]. 電圧をショット毎に変えることにより, この二つの放電プラズマ形態の制御が可能となる.

2. FPGA を用いた電圧可変型 MPC 回路方式パルスパワー発生装置の開発

MPC 回路方式パルスパワー発生装置の電圧制御をするためには, ロジック IC を用いた既存のコントローラでは回路が複雑になり, かつ柔軟性がないため, FPGA を用いて作成した. 本研究で使用している FPGA の開発環境は下記である.

FPGA ボード: ヒューマンデータ社 XC3S200-4VQG100C

FPGA: Xilinx 社 Spartan-3 XCM-301-200

開発言語: Verilog HDL

開発ツール: Xilinx 社 ISE Design Suite 12.1

ダウンロードケーブル: Xilinx 社 HW-USB-G

Voltage Control of Pulsed Power using FPGA

AKIYAMA Masahiro, SAKAMOTO Tatsuro, TAKAHASHI Katsuyuki, UENO Takahisa, SAKUGAWA Takashi and AKIYAMA Hidenori

corresponding author's e-mail: akiyama@ichinoseki.ac.jp

FPGAの導入により小型化も実現し、ロジックICを用いた既存のMPCコントローラの容積の約4分の1となった。図1にFPGA組み込み型のMPCコントローラを示す。

2.1 ハードウェア構成

パルスパワー発生装置は、図2に示すように、MPC回路方式パルスパワー発生装置、直流高電圧充電器(TDK LAMBDA社 152A-1.5KV-POS)、MPCコントローラで構成されている。MPCコントローラの電圧制御部には、FPGA及びDAコンバータ(ANALOG DEVICES社 AD7224)を用いている。FPGAからの制御電圧用デジタル信号をDAコンバータからなる電圧制御回路で制御電圧用アナログ信号に変換して、充電器に信号を送っている。充電器制御では充電器のオンとオフを制御している。

MPC回路方式パルスパワー発生装置の回路図を図3に示す。パルスパワーの出力電圧の制御は、初段のコンデンサを充電する充電電圧を制御電圧によって変えることで実現させている。充電器には0~10Vの制御電圧で0~1.5kVの充電電圧を制御するポートがあり、0~10VはDAコンバータで作成している。パラメータ表示用に液晶ディスプレイ(Sunlike Display Tech社 SC2004CSLB)を使い、マイクロコントローラ(ATMEL社 ATmega328P)が搭載されたArduinoNano3.0で制御を行っている。

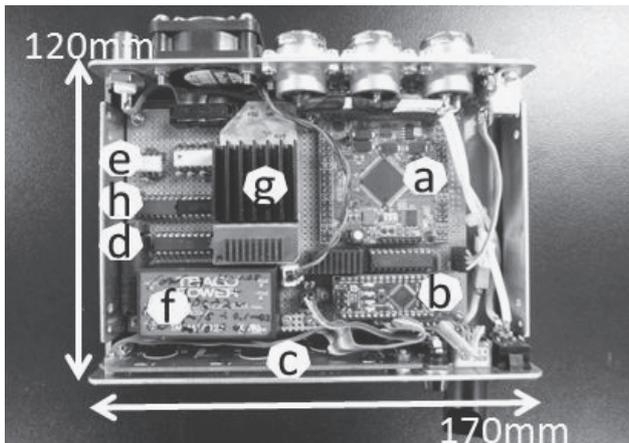


図1 FPGA組み込み型MPCコントローラ(a:FPGA,b:液晶ディスプレイ用マイクロコントローラ,c:液晶ディスプレイ,d:DAコンバータ,e:フォトカプラ,f:24V DC電源,g:DC-DCコンバータ用ヒートシンク,h:FPGA出力のレベルシフタ)。

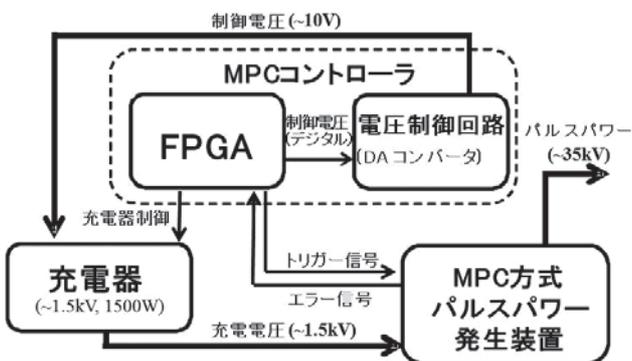


図2 パルスパワー発生装置の構成。

2.2 電圧制御システム

FPGAは、繰り返し周波数、充電時間、トリガ信号、パルスパワー発生回数のカウントなどの既存制御に加え、DAコンバータの出力電圧の制御を行う。図4にパルスパワー発生までの信号列を示す。

任意に設定した繰り返し周波数(図4では500Hz設定時)において、波形の立ち上がりから初段のコンデンサを1.5msの間充電する。充電電圧はDAコンバータからの制御電圧で決まる。その後、トリガ信号をオンすることでパルスパワーが出力される。これらの制御システムにより、パルスパワーの出力電圧を制御している。パルスパワー発生装置内素子の温度が60℃以上の場合、接点式の温度センサー(NECトーキン社 OHD3-60M)がオンとなり、温度異常信号がFPGAに送られ、充電器がオフとなる。いくつかの充電電圧パターンをFPGAに書き込み、プッシュスイッチによって、パターンを選んでいる。

3. 電圧制御を用いた水中放電プラズマの生成

本研究で開発した電圧制御を用いて水中放電プラズマを生成した。高繰り返し動作中の出力電圧を1ショット毎に制御した。

3.1 実験環境

図5にリアクタの概略図を示す。開発した電圧可変型MPC回路方式パルスパワー発生装置を水中に置かれたステンレスの棒電極(直径0.5mm)に印加し、水中でストリーマ状の放電を生成した。棒電極は先端を除いてプラス

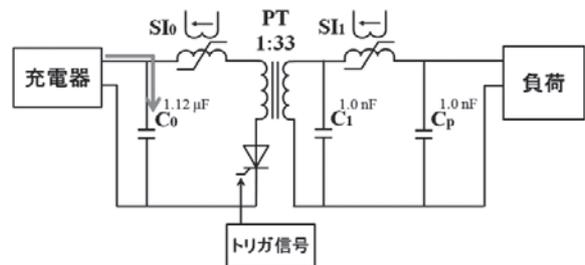


図3 MPC回路方式パルスパワー発生装置。

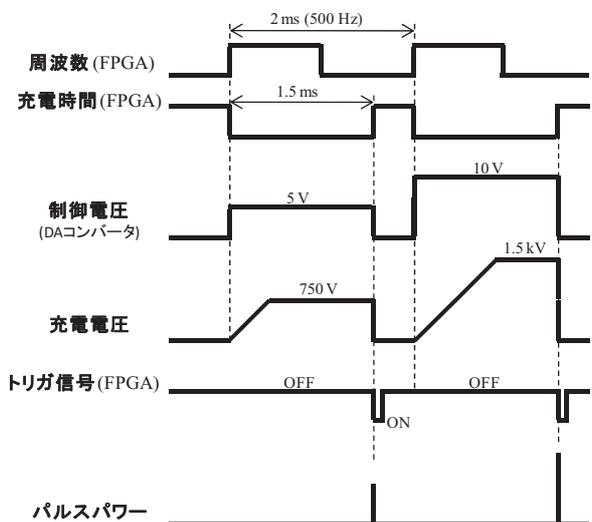


図4 パルスパワー発生までの信号列。

チックで絶縁されている。アース電極として、ステンレスの板が容器の底に置かれている。容器は $100 \times 100 \times 100$ mm とし、水道水（導電率 $180 \mu\text{S}/\text{cm}$ ）を 60 mm まで入れ、棒電極とアース電極間の距離を 40 mm とした。放電の観測には高速度カメラ（キーエンス VW-6000）を使用し、フレームレート 500 フレーム/秒および露光時間 2 ms で撮影した。

3.2 電圧制御を用いた水中放電プラズマ

パルスパワー発生装置の初段コンデンサを 1.35 kV と 750 V の電圧で交互に充電し、パルスパワーの出力電圧を 1 ショット毎に変更した。繰り返し周波数は 250 pps (pulses per second) とした。図 6 に電圧制御時の充電電圧波形を示し、図 7 (a) に充電電圧 1.35 kV の出力電圧・電流波形、図 7 (b) に充電電圧 750 V の出力電圧・電流波形を示す。充電電圧 1.35 kV 時のピーク電圧は 34 kV、 750 V 時のピーク電圧は 22 kV が出力された。

図 8 に電圧制御を用いた放電の様子を示す。 500 フレーム/秒で撮影された動画を 1 フレーム毎に切り取った写真であり、充電電圧 1.35 kV 時の放電、放電なし、充電電圧 750 V 時の放電、放電なしの順に繰り返していることが分かる。これらの結果から、パルスパワーの柔軟な電圧制御が成功したといえる。また、MPC コントローラは、パルスパワー発生装置や負荷からの EMI (Electromagnetic interference) ノイズに敏感であるため、トリガ信号と FPGA 間を電氣的に絶縁すること、コントローラをシールドボッ

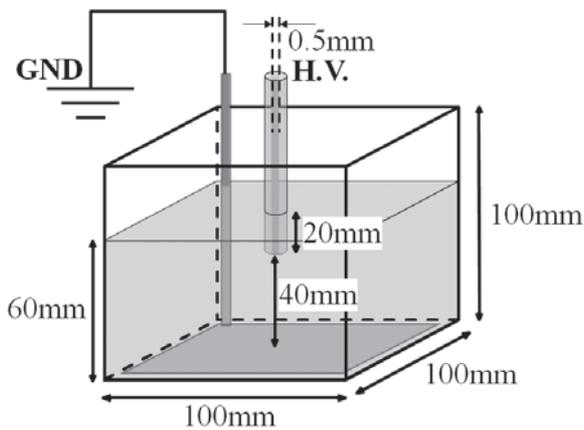


図 5 リアクタの概略図。

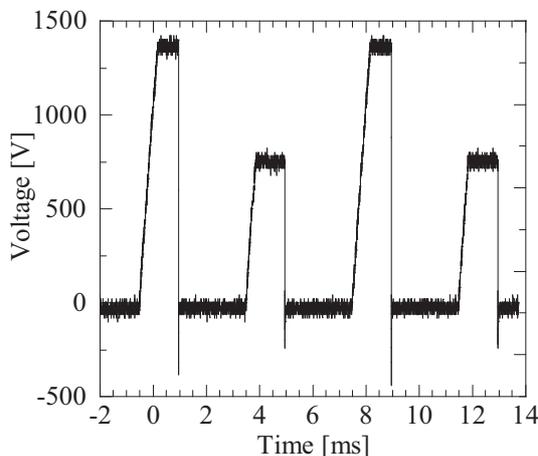
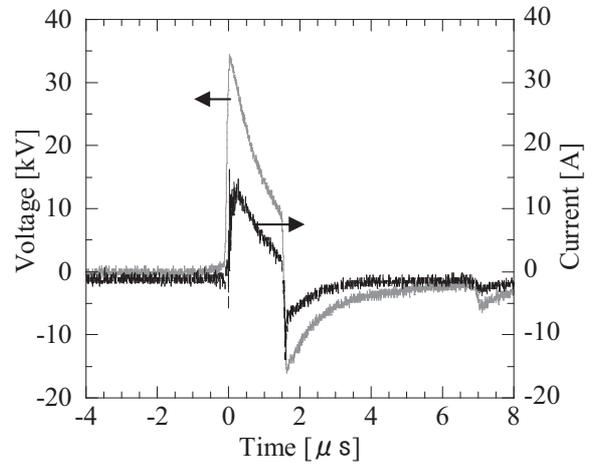
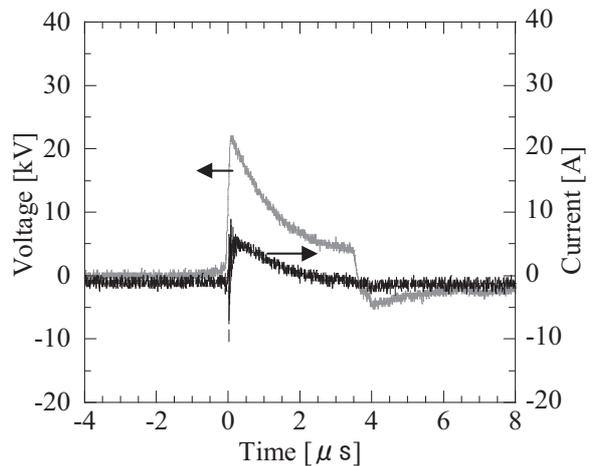


図 6 電圧制御時の充電電圧波形。

クスに入れること、素子や配線のレイアウトに気を付けること、及びノイズの継続時間を考慮して FPGA のソフトウェアを工夫する等の対策を行っている。



(a)



(b)

図 7 出力電圧・電流波形(a)充電電圧 1.35 kV, (b)充電電圧 750 V.

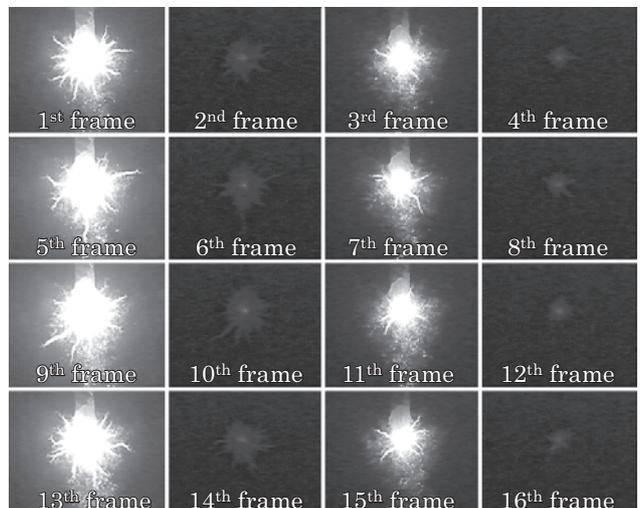


図 8 電圧制御時の水中放電の様子。

4. まとめ

パルスパワーの出力電圧を柔軟に制御できる MPC 回路方式パルスパワー発生装置を開発した。制御部には FPGA を用い、複雑な制御がプログラミングによって実現した。部品数も減らすことができ、既存の MPC コントローラの容積の約 4 分の 1 まで小型化できた。本研究で開発した装置を用いて、水中放電で 1 ショット毎に印加電圧を変化した。電圧電流波形と高速度カメラの動画から、高繰り返し動作中でパルスパワーの柔軟な電圧制御が成功したといえる。

パルスパワーの重要なパラメータである出力電圧を制御することで、幅広い応用研究につながると考えられる。また、これらの研究は、パルスパワーの産業応用にも寄与すると期待される。

謝辞

この研究の一部は、グローバル COE プログラム「衝撃エネルギー工学グローバル先導拠点」、および科学研究費補助金（基盤研究(A)）によってサポートされた。

参考文献

[1] 勝木 淳, 秋山秀典: 応用物理 7, 375 (2008).

- [2] T. Matsumoto, D. Wang, T. Namihira and H. Akiyama, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **38**, 2639 (2010).
- [3] 塚本俊介, 前田貴昭, 池田元吉, 秋山秀典: プラズマ・核融合学会誌 **79**, 39 (2003).
- [4] 高木浩一: 電気学会論文誌 A **130**, 963 (2010).
- [5] K.Y. Shin, R. Burlica, W.C. Finney and B.R. Locke, *IEEE Trans. Industry Appl.* **45**, 630 (2010).
- [6] K. Schoenbach, S. Katsuki, R. Stark, E.S. Buescher and S.J. Beebe, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **30**, 293 (2002).
- [7] 江 偉華: 電気学会論文誌 A **130**, 538 (2010).
- [8] 上野崇寿, 佐久川貴志, 秋山雅裕, 浪平隆男, 勝木 淳, 秋山秀典: 静電気学会誌 **32**, 216 (2008).
- [9] D. Wang, J. Qiu and K. Liu, *IEEE Tans. Plasma Sci.* **38**, 2633 (2010).
- [10] A. Andrea, K. Juergen, Z. Luigi and K. Schoenbach, *Rev. Sci. Instrum.* **79**, 044301 (2008).
- [11] 秋山雅裕, 猪口 誠, 佐久川貴志, 秋山秀典, 上野崇寿, 末松謙一, 甲田 忠: プラズマ・核融合学会誌 **85**, 631 (2009).
- [12] M. Akiyama, T. Sakugawa, S.H.R. Hosseini, E. Shiraishi, T. Kiyon and H. Akiyama, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **38**, 2588 (2010).
- [13] 上野崇寿, 廣野佳那子, 秋山雅裕, 秋山秀典, 佐久川貴志: 電気学会論文誌 A **130**, 567 (2010).