

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 30 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360105

研究課題名(和文) LTD方式に基づいたパルスパワー発生技術の構築

研究課題名(英文) Establish of Pulsed Power Generation Technology Based on LTD Method

研究代表者

江 偉華 (Jiang, Weihua)

長岡技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：90234682

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,600,000円

研究成果の概要(和文)：パルスパワーは、短時間の電気エネルギーとして、比較的高い瞬間電力を有する特徴を持っている。この特徴を利用したパルスパワー応用は、エネルギー、材料、環境、光源等の分野で広がっている。本研究は、様々な産業応用に求められている高繰り返しパルスパワー発生器の開発を目的とする。LTDという新しい技術路線を採用することにより、これまでの技術と大きく異なるアプローチの特徴を生かして、コンパクト性、安定性、モジュール性などの面においてこれまでにない斬新な性能を可能とした。実証実験では、30モジュールのLTD基板を作成し、これを直列接続により出力約30 kVのパルス高電圧発生器を作成した。

研究成果の概要(英文)：Pulsed power is electrical energy released in short time. It is characterized by instantaneous high power. For this reason, it has unique applications in the fields of energy, material, environment, light source, and etc. This research aimed at the development of repetitive pulsed power generators for industrial applications. By adapting a new technical approach called LTD, it is proved to be significantly different from traditional methods in compactness, stability and modularity. In the demonstration experiments, 30 LTD modules have been connected together in series to form a pulsed high-voltage generator, which is capable of generating pulsed output voltage of ~30 kV. In addition, FPGA has been used to control the output of the LTD to prove the flexibility of the output waveform.

研究分野：パルスパワー工学

キーワード：電気エネルギー パルスパワー 高電圧 パワーエレクトロニクス プラズマ 放電

1. 研究開始当初の背景

パルスパワーは、短時間の電気エネルギーとして、比較的高い瞬間電力を有する特徴を持っている。この特徴を利用したパルスパワー利用は、エネルギー、材料、環境、光源等の分野で広がっている。また、様々なパルスパワー応用は、小型、安定、高信頼性、メンテナンス容易などの性能をパルスパワー発生器に求めている。

従来のパルスパワー発生方法は、パルスの時間幅の圧縮に基づいている。一定のエネルギーの放出時間を充分短くすれば、必要なパワーに達することができる。しかし、ここでスイッチング素子の性能はすべてを決めることとなり、出力特性を制限する。

2. 研究の目的

本研究は、新しいパルスパワー発生法として、LTD 法を提案する。LTD は、linear transformer driver の略語であり、元々大型誘導加速器と誘導電圧重畳装置で採用されたコンセプトである。本研究は初めて LTD 法を小型パルスパワー発生装置に適用し、従来の方法で実現できない性能を取り出すことができる、ということの証明を研究目的とする。

3. 研究の方法

LTD の等価回路図を図 1 に示す。基本的に、1 個のコンデンサーと 1 個のスイッチで一つの基本回路を構成する。多数の基本回路を並列接続して、LTD モジュールを構成する。更に多数の LTD モジュールを直列接続して、パルスパワー発生器をつくる。

スイッチの動作電流と動作電圧に制限があるが、多数回路の並列で電流を稼ぎ、多数モジュールの直列で電圧を重畳することができる。従って、LTD 法の考え方は、従来の圧縮法と異なり、電力の合成に基づいている。

従来のパルスパワー発生器、LTD 型電源の特徴は、汎用性と柔軟性にある。パルスパワー装置はモジュール化されることによって、仕様の変更と拡張及びモジュールの再利用が容易にでき、更に各モジュールの単独制御による多彩なパルス成形が可能となる。

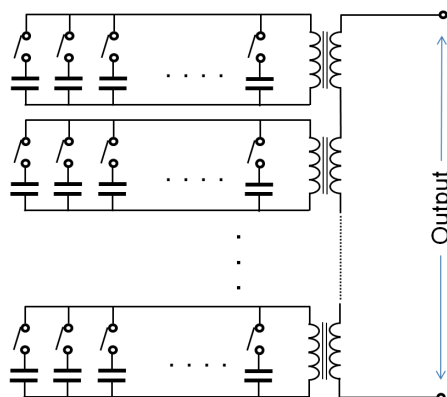


図 1 LTD の等価回路図

4. 研究成果

4.1 LTD 原理の実証

本研究は、LTD モジュールの試作と評価からスタートした。図 2 は最初に試作した LTD モジュールを示す。36 個のパワー MOSFET をスイッチとして用い、出力のパルスエネルギーに対する制御を行った。

初期の研究は MOSFET 制御と基板回路トポロジの最適化に重点を置いた。図 3 は基板上各位置で得られた制御信号を示す。これらの信号のタイミングは、大量のスイッチを同時に使用する LTD にとって、極めて重要である。

実験を重ねた結果、LTD モジュールの単体動作は設計要求を満たすようになり、多モジュール LTD による電圧重畳実験への道が開かれた。

図 4 は、LTD モジュール 30 個直列して作るパルスパワー発生装置を示す。すべてのモジュールは光信号により制御され、高い精度でスイッチング動作の時間制御が行われている。図 5 と図 6 は、すべてのスイッチが同時に ON/OFF する場合の出力電圧波形を示す。出力電圧とパルスパワーは、制御信号を使って比較的容易に制御できることがわかる。

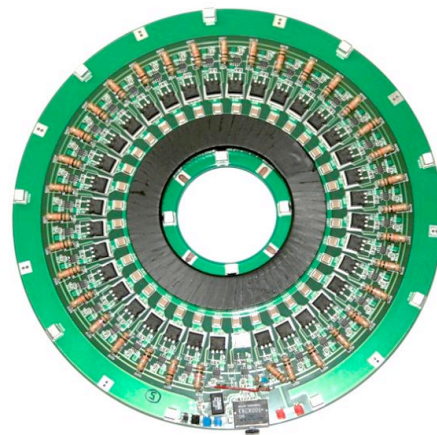


図 2 最初に試作した LTD モジュール

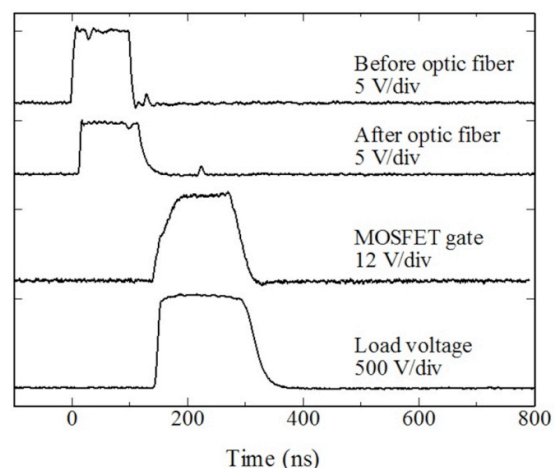


図 3 LTD モジュール内の制御信号



図4 30モジュールを採用する LTD 型パルスパワー発生器

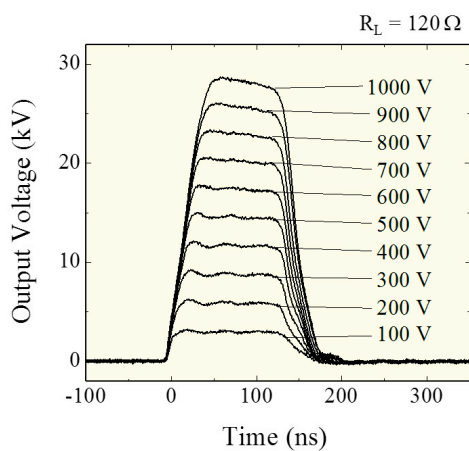


図5 各充電電圧の場合の出力電圧波形

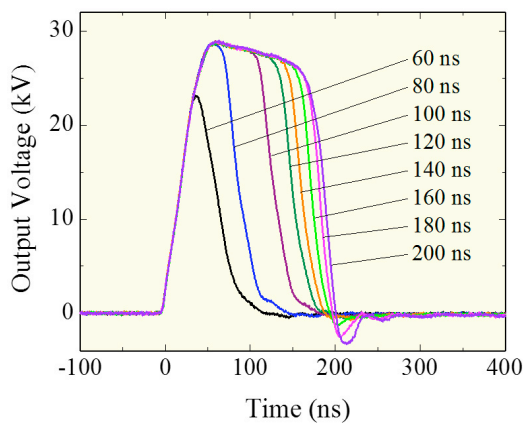


図6 出力パルス波形の制御信号時間幅に対する依存性

4.2 FPGA によるデジタル制御

多数のモジュールを効率よく制御するため、FPGA (field programable gate array) 技術を採用した。

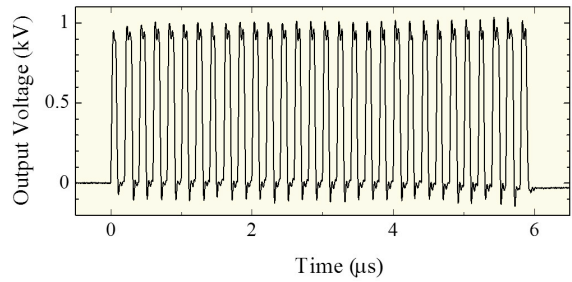


図7 FPGA を用いて得られた負荷電圧波形

FPGA 制御の重要な点は、LTD 波形の調整と変化にある。従来のパルスパワー発生装置にとって、波形の可変性は難点であった。一方、本研究では、FPGA を使って LTD を制御すれば、比較的自由に出力されるパルス波形を可変できることが証明された。図7は、実験結果の一例を示す。

4.3 気体放電への応用見込

出力波形の高度制御の応用例として、大気圧気体放電について実証実験を行った。図8に示す放電負荷に対して、図9のように LTD の各モジュールの単独制御を施した結果、負荷電流に対する微調整を実現できることが示された。このような制御は、従来のパルスパワー発生法では至難であり、LTD 型パルスパワー電源によって初めて実現されたものである。

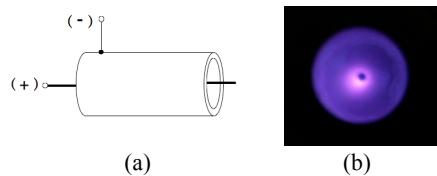


図8 大気圧放電負荷

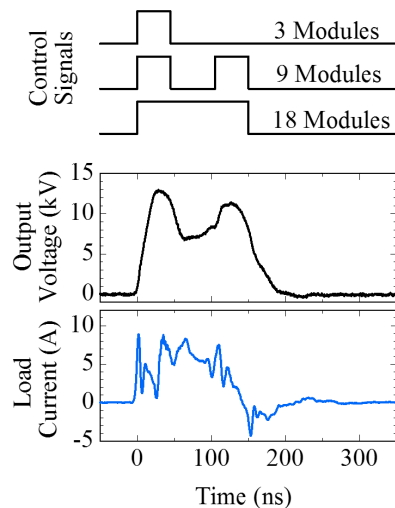


図9 LTD を用いた波形制御

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 8 件)

- ① 江 偉華: “高繰り返しパルスパワー技術とその応用: (7) 主要技術問題と発展傾向” (中国語), 高出力レーザーと粒子ビーム, Vol.27, No.1, 2015, pp.010201-1~5.
- ② W. Jiang, H. Sugiyama, and A. Tokuchi, “Pulsed Power Generation by Solid-State LTD”, IEEE Transactions on Plasma Science, Vol.42, No.11, 2014, pp.3603-3608.
- ③ 江 偉華: “高繰り返しパルスパワー技術とその応用: (6) 代表的な応用” (中国語), 高出力レーザーと粒子ビーム, Vol.26, No.3, 2014, pp.030201-1~9.
- ④ T. Sugai, A. Tokuchi, W. Jiang, and Y. Minamitani, “Investigation for Optimization of an Inductive Energy Storage Circuit for Electrical Discharge Water Treatment”, IEEE Transactions on Plasma Science, Vol.42, No.10, 2014, pp.3101-3108.
- ⑤ 江 偉華: “高繰り返しパルスパワー技術とその応用: (5) パルス合成の意義” (中国語), 高出力レーザーと粒子ビーム, Vol.25, No.8, 2013, pp.1877-1882.
- ⑥ T. Sugai, W. Liu, A. Tokuchi, W. Jiang, and Y. Minamitani: “Influence of a Circuit Parameter for Plasma Water Treatment by an Inductive Energy Storage Circuit Using Semiconductor Opening Switch”, IEEE Transactions on Plasma Science, Vol.41, No.4, 2013, pp.967-974.
- ⑦ 江 偉華: “高繰り返しパルスパワー技術とその応用: (4) 半導体スイッチの特徴と限界” (中国語), 高出力レーザーと粒子ビーム, Vol.25, No.3, 2013, pp.537-543.
- ⑧ W. Jiang and A. Tokuchi: “Repetitive Linear Transformer Driver Using Power MOSFETs”, IEEE Transactions on Plasma Science, Vol.40, No.10, 2012, pp.2625-2628.

[学会発表] (計 10 件)

- ① W. Jiang, M. R. Ghurbanali, T. Sugai, and Tokuchi, “Repetitive Pulsed Power Generator Based on Hybrid LTD”, IEEE International Pulsed Power Conference 2015, May 31 ~ June 4, 2015, Austin, TX, USA.
- ② W. Jiang, T. Sugai, M. R. Ghurbanali, and A. Tokuchi, “Compact LTD for Pulsed Power Applications”, 42nd IEEE International Conference on Plasma Science, May 24~28, 2015, Belek, Antalya, Turkey.
- ③ W. Jiang, T. Sugai, H. Sugiyama, and A. Tokuchi, “Pulsed Power Generation by Solid-State LTD and Its Applications”, 2014 IEEE International Power Modulator and

High Voltage Conference”, June 1-5, 2014, Santa Fe, NM, USA.

- ④ W. Jiang, T. Sugai, H. Sugiyama, and A. Tokuchi, “Solid-State LTD and Its Application to Gas Discharge”, 41st IEEE International Conference on Plasma Science, May 25-29, 2014, Washington, DC, USA.
- ⑤ W. Jiang, H. Sugiyama, T. Sugai, and A. Tokuchi: “Advanced Pulsed Power Generators for Industrial Applications”, 8th Asia-Pacific International Symposium on the Basics and Applications of Plasma Technology, December 20-22, 2013, Hsinchu, Taiwan.
- ⑥ T. Tanaka, A. Tokuchi, W. Jiang, T. Kawakubo, T. Adachi, and K. Takayama: “Solid-State High-Voltage Switching Unit for Accelerator Applications”, IEEE Pulsed Power and Plasma Science 2013, June 16-21, 2013, San Francisco, CA, USA.
- ⑦ W. Jiang, H. Sugiyama, and A. Tokuchi: “Smart Pulsed Power by Solid-State LTD”, IEEE Pulsed Power and Plasma Science 2013, June 16-21, 2013, San Francisco, CA, USA.
- ⑧ W. Jiang and A. Tokuchi: “Compact LTDs Using Power Semiconductor Devices”, 4th Euro-Asian Pulsed Power Conference and 19th International Conference on High-Power Particle Beams, Sep.30 – Oct.4, 2012, Karlsruhe, Germany.
- ⑨ W. Jiang, T. Sugai, N. Aoyagi, and A. Tokuchi: “Development of Repetitive Pulsed High-Voltage Generator for Industrial Applications”, 9th International Bioelectrics Symposium, September 5-8, 2012, Kumamoto, Japan.
- ⑩ W. Jiang and A. Tokuchi: “Solid-State Pulsed Power Technology for Compact Pulsed Power Development”, 2012 International Power Modulator and High Voltage Conference, June 3-7, 2012, San Diego, USA.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
出願年月日 :
国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :

権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等 なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

江 偉華 (JIANG, Weihua)
長岡技術科学大学・工学研究科・教授
研究者番号：90234682

(2) 研究分担者

菊池崇志 (KIKUCHI, Takashi)
長岡技術科学大学・工学研究科・准教授
研究者番号：30375521

(3) 研究分担者

佐々木徹 (SASAKI, Toru)
長岡技術科学大学・工学研究科・准教授
研究者番号：90514018

(4) 研究分担者

徳地 明 (TOKUCHI, Akira)
長岡技術科学大学・学内共同利用施設・客
員准教授
研究者番号：00564254