小特集

パルスパワー生成放電プラズマのバイオ技術への応用

2 . 高繰り返しパルスパワー発生技術

佐久川 貴 志

(株式会社 明電舎 総合研究所)

Generation Technologies of High Repetition Rate Pulsed Power

SAKUGAWA Takashi

Central Research Laboratory, Meidensha Corporation, Tokyo 141-8565, Japan

(Received 9 October 2002)

Abstract

Recently, high repetition rate, long lifetime, and high reliability pulsed power generators have been developed using semiconductor switches. We have studied and developed an all solid-state pulsed power generator for industrial applications such as a high repetition rate pulsed gas laser and a pulsed ozonizer. Recently, semiconductor power device technology has improved the performance of fast high-power switching devices. However, the semiconductor switch is still not sufficient to drive the pulse laser and the pulse ozonizer directly. Therefore, the semiconductor switch can be used in practical application with the assistance of a magnetic switch and a gate driving technique. This all solid-state generator consists of a semiconductor switch and a magnetic switch. The progress of high repetition rate pulsed power generators is reviewed herein, with particular emphasis on pulse power conditioning by solid-state switching techniques.

Keywords:

semiconductor switch, magnetic switch, saturable inductor, saturable transformer, magnetic pulse compression circuit

2.1 はじめに

繰り返し動作パルスパワー電源を用いる機器としてはレーダー、線形誘導加速器、レーザー等がよく知られているが、最近ではガス処理や有害物質処理、オゾン生成、水処理、殺菌等への利用研究も進んでいる。

パルスパワーを単発あるいは低繰り返しで発生させる簡単な方法は直流でコンデンサを充電して、スパークスイッチ等の放電スイッチを用いて高速放電することで得られる。しかし、繰り返し安定動作やスイッチ寿命の点で問題がある。高繰り返し動作可能な放電スイッチとしてサイラトロン等があるが高繰り返し安定動作と長寿命化が要求される用途には半導体スイッチや磁気スイッチ

author's e-mail: sakugawa@ohsaki.meidensha.co.jp

等の固体素子で構成したパルスパワー発生回路が利用されている。近年、パワーエレクトロニクスの発展に伴い、サイリスタやトランジスタ等のパワーデバイスの高速・大容量化が進んでいる。しかし、現状ではサイラトロン等の放電スイッチに比べ高耐圧と高速性の両方を満たしている半導体スイッチは見あたらない。そのため数十kVの高電圧を数百ns以下で立ち上がるパルスパワーの発生に半導体スイッチを用いるにはパルスパワー特有のスイッチ駆動技術やパルス圧縮等の回路技術が必要になる。現状のパルスパワーを用いたバイオ関連の応用では半導体スイッチや磁気スイッチを用いたパルスパワー発生装置の導入が進んでいるわけではないが、高繰り返し

化が進むにつれ多く導入されるものと思われる．この章では半導体スイッチや磁気スイッチを用いた高繰り返しパルスパワー発生回路とそのシステム構成について述べる．

2.2 半導体スイッチの適用方法

最近の大容量半導体スイッチは性能向上によりスイッチング特性の高速化・低損失化が進んでいる．しかしながらパルスパワー発生回路に直接用いるまでには至っていない．半導体スイッチといってもその種類は通常のサイリスタに加え自己消弧機能を持つ GTO (Gate Turn Off) サイリスタや SI (Static Induction) サイリスタ, IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) 等多数ある．それぞれの素子には特徴がありその素子に合った使い方をする必要がある．Fig. 1 に、各半導体スイッチの一般的なスイッチング容量と動作周波数の関係を示す[1]．スイッチング動作の高速性では MOSFET, IGBT, サイリスタの順であるが、スイッチング容量は全く逆の順になる．

MOSFET はその高速性においてはサイラトロンに匹敵するが 1 素子あたりの容量が小さいために多数個直列接続したスイッチバルブを構成する必要がある．スイッチングデバイスを直列接続する場合、各素子を同時にターンオンさせる必要がある．そのため電圧分担用の回路を設けたり、各素子を駆動するゲート回路や各素子の幾何学的な配置に工夫がなされている[2]．

IGBT は MOSFET より電流密度が高く、高耐圧である．スイッチングを制御するゲート回路も絶縁ゲートを持つため駆動電力が小さい．複数の素子をモジュール化し 1 つのパッケージにして大容量化して使いやすくなったものも多く市販され、電力変換機器やモータドライブ等の一般産業向けに広く利用されている．最近では 4,500 V 級のものが市販されるようになり、高繰り返しエキシマレーザーの電源にも利用されている．

サイリスタ系の素子はサージ電流耐量を高くできるため素子の並列数を低減できるがスイッチング速度が遅い．そのためゲート電流を高速化したり磁気アシストを用いたりすることでスイッチングを高速化する必要がある．サイリスタ系の素子は pnpn の四層構造の素子であるが GTO サイリスタは微細なカソードセグメントを持つことでゲートターンオフ機能を付加している．Fig. 2 にトランジスタモデルによる GTO サイリスタの模式図と等価回路を示す．微細なカソードセグメントはターン

Fig. 1 Operation frequency and capacity of semiconductor switches.

Fig. 2 Equivalent circuit of GTO thyristor by transistor model.

オン初期の電流集中を緩和する働きを持つ．パルスパワー電源ではターンオンの高速特性が重要になることが多くスイッチング素子の設計パラメータをターンオン重視に変えることで高速スイッチングが可能となる．さらに素子の ON/OFF を制御するゲート電流の高 di/dt 化により、短時間に素子内部における導通領域を均一に確保でき、素子のオン抵抗が低くなり、スイッチングを高速化できる[3]．GTO サイリスタは比較的大容量化が可能な素子であるが特に高速パルスが必要な場合は磁気アシストや磁気パルス圧縮回路 (Magnetic Pulse Compression circuit: MPC) と併用されることが多い．

SI サイリスタは GTO サイリスタよりさらに微細化しており、高耐圧に適した構造と優れた順方向特性を活かしてパルスパワー用途への適用検討が行われている[4]．SI サイリスタの素子構造を Fig. 3 に示す．表面ゲート構造でノーマリーオフ特性を得るため n エミッタ直下に p

Fig. 3 Segment cross-section of SI thyristor for pulsed power.

- ベース層を形成し，p ゲートでゲート電極と接続している．

2.3 磁気スイッチを用いた回路技術

磁気スイッチ (Magnetic Switch: MS) は磁性体の非飽和時と飽和時の大きなインダクタンス変化を利用したスイッチでサイラトロンや半導体スイッチのように能動的に ON/OFF 制御できる機構は備えていない．しかし，これら能動スイッチと併用することで能動スイッチをアシストしたりパルスを圧縮したりできる．

半導体スイッチに磁気スイッチの 1 つである可飽和インダクタを併用した磁気アシストでスイッチング電流と電圧に位相差をつけスイッチング損失の低減がはかれることはよく知られている．磁気アシストの有無について調べた試験回路を Fig. 4 に，このときの GTO サイリスタのスイッチング波形を Fig. 5 に示す [5]．磁気アシストの効果は大きく，アシスト無しのスイッチング損失が 926 mJ/pulse，アシスト時間 2.7 μ s の磁気アシストの場合 562 mJ/pulse である．磁気アシストについてはサイラトロン等の放電スイッチやその他の半導体スイッチに用いても同様に損失低減や長寿命化に効果がある．

磁性体の透磁率の非線形特性を用いてパルス圧縮する MPC は 1951 年に英国の Melville によって報告された．当時は放電スイッチと併用されていたが [6]，近年 MS を構成する強磁性体に低損失で非常に特性の良いものが開発され，電力用半導体スイッチの進歩と相まって半導体スイッチと MS を用いた固体化電源の実用化に向けた研究が盛んである．MPC に用いられる MS の磁心材には一般にフェライトやアモルファス合金がよく用いられてきた．MS の ON/OFF は磁心飽和時の低インダクタンスの状態と高速に電流を流し非飽和時の高インダクタンス状態で電流をほとんど流さないようにする．このため飽和時と非飽和時の磁心材の透磁率が MS のスイッチング性

Fig. 4 Switching test circuit using magnetic assist.

(a) GTO switching waveforms (Not assist)

(c) GTO switching waveforms (Long time assist)

Fig. 5 GTO thyristor switching waveforms. (a): no assist, (c): long assist.

能を左右する．また高い飽和磁束密度で非飽和状態を長く維持することも MS の小型化の点で要求される．特に鉄系のアモルファス合金は高い飽和磁束密度を持ち MS の小型化には優れているが磁心損失が大きく高繰り返し動作では発熱が問題となる．またコバルト系のアモルファス合金は低損失だが飽和磁束密度が低く MS が大型化する問題を抱える．鉄系，コバルト系両アモルファス合金の中間的な特性を持つ磁心材で鉄系の超微結晶質軟磁性合金がある [7]．MS 用の磁心材に要求される主な特性として

非飽和 / 飽和時の透磁率の比 (μ_{un}/μ_{sat}) が大きい。
 実効動作磁束密度量 (ΔB) が大きい。
 磁心損失が小さい。

が上げられる。Table 1 に超微結晶質軟磁性合金 (FT-1H) と鉄系アモルファス (2605CO), コバルト系アモルファス (2705M) の磁気特性と物理特性を示す。MS は保持力 H_c 以上のバイアス磁界をかけることにより安定した実効動作磁束密度量 ($\Delta B = B_s + B_r$) が得られる。磁心材には磁気スイッチ動作時に渦電流損失やヒステリシス損失などエネルギー転送に伴う損失が生じる。3 種類の磁心材について電圧保持時間に対する単位体積あたりの損失を Fig. 6 に示す [7, 8]。3 種類の磁心材の中で単位体積あたりの磁心損失が最も大きいのは鉄系のアモルファスで最も損失が小さいのはコバルト系のアモルファス、その中間に鉄系の超微結晶質となっている。

半導体スイッチに GTO サイリスタ, パルス圧縮に 2 段の可飽和インダクタを用いた MPC の概略を Fig. 7 に示す [9]。MS に鉄系微結晶質合金を用いている。まず C_0 コンデンサを充電器で 2.6 kV 充電し, GTO サイリスタを ON する。アシスト時間経過後に SI_0 が ON (飽和) し電流が流れ, パルストランス PT の 2 次側の C_1 を 4 μs で高電圧パルス充電する。充電完了後可飽和インダクタ SI_1 は ON (飽和) し, 低インダクタンス高速放電によるパルス圧縮動作 (4 μs 500 ns) を行う。500 ns で C_2 をパルス充電し, 同様に可飽和インダクタ SI_2 が ON しパルス圧縮動作 (500 ns 140 ns) を行い, 高電圧高速パルス (-26 kV, 140 ns) を負荷 (C_p コンデンサと放電管) へ

Fig. 6 Dependence of core loss on saturation time.

Fig. 7 KrF excimer laser exciter using two stage MPC.

印加する。パルス圧縮により電流波高値は上昇する。

Table 1 Magnetic characteristics and physical characteristics of three core materials.

Core material	Fe-based nano-crystalline alloy (FT-1H)	Fe-based amorphous alloy (2605CO)	Co-Based amorphous alloy (2705M)
Saturation induction B_s (T)	1.35	1.80	0.75
Remenant flux density B_r (T)	1.22	1.60	0.70
Coercive force H_c (A/m)	0.8	3.0	1.0
Saturation magnetostriction λ_s ($\times 10^6$)	+2.3	+3.5	< 1
Curie temperature (°C)	570	415	365
Resistivity ρ ($\mu\Omega\text{-m}$)	1.10	1.23	1.36

2.4 高繰り返しパルスパワー発生装置

半導体スイッチと MS を用いた高繰り返しパルス電源が産業分野に導入された例としては半導体リソグラフィ光源用のエキシマレーザーがある [10, 11]。固体化電源の実用化はエキシマレーザーの産業分野への本格的な導入を加速した。Fig. 7 で説明したパルスパワー発生装置のシステム構成を, Fig. 8 に示す。装置としてはコントローラ, 充電器, GTO ユニット, MPC ユニットの 4 つのユニットで構成されていてメンテナンス性に配慮している。コントローラは商用の 3 相 200 V を受電し, 各ユニットへの配電と制御および異常検出を行う。充電器は直流変換後, 高周波インバータで高精度に直流エネルギーを GTO ユニットに供給する。GTO ユニットはコンデンサに充電した後, コントローラからの光信号で GTO サイリスタを点弧して初段パルスを発生する。MPC ユ

Fig. 8 Block diagram of pulsed power generator system.

Fig. 9 MPC using saturable transformer for pulse ozonizer.

ニットではパルス圧縮を行い、 $-26\text{ kV} \cdot 140\text{ ns}$ の高密度パルスエネルギーを1 kppsの繰り返しでレーザー放電管に供給している。制御信号はデジタル化され、パルスごとに電圧を変化させることができ、繰り返し周波数やパルス数も任意に制御できる。リソグラフィ用エキシマレーザーでは繰り返し4 kppsまでのものが製品化され、さらに高繰り返し化の開発が進んでいて、固体化電源の搭載は必須となっている。

Fig. 9に、可飽和トランスSTによる1段磁気パルス圧縮回路から成るオゾン生成用固体化電源を示す[5]。これは $60\text{ kV} \cdot 100\text{ ns}$ の高速パルスを500 ppsの繰り返しで発生できる。同様の回路方式で半導体スイッチに低損失

のSIサイリスタを用いて90%以上のエネルギー転送効率を得られたTEACO₂レーザー用の固体化電源もある[4]。

2.5 おわりに

現状では、半導体スイッチとMSを用いた高繰り返しパルスパワー発生装置が多く使用される産業分野はリソグラフィ用エキシマレーザーである。しかし、近年このような高繰り返しパルスパワー発生装置がオゾン発生などレーザー以外の分野でも利用され始めている。

半導体スイッチやMSを用いたパルスパワー発生装置は複雑で高価な装置となってしまう。そのため基礎研究の段階においては比較的手軽にパルスパワーが発生できる放電スイッチを用いた回路が広く利用されている。バイオ技術応用においても半導体スイッチやMS等の固体スイッチを用いた方式が広く利用されているわけではないが研究開発が実用段階に入るとき、パルス放電技術の繰り返し安定性や制御性、長寿命化の必要性から半導体スイッチやMSを用いた高繰り返しパルスパワー発生技術は必須になると考えられる。

参考文献

- [1] 電気学会 高性能高機能パワーデバイス・パワーIC調査専門委員会編：パワーデバイス・パワーICハンドブック（コロナ社、1996）。
- [2] 岩田明彦，鈴木弘一，殖栗成夫：電気学会論文誌D，113，No.1，23（1993）。
- [3] 山田真一，谷 政幸，花倉 満，桑原浩一，鈴木俊昭：電気学会半導体電力変換研究会資料，SPC-91-31（1991）。
- [4] 佐久川貴志，家田正彦，高田 昇，山田真一，北崎 薫，羽場方紀：電気学会論文誌A，122，186（2002）。
- [5] 佐久川貴志，秋山秀典：電気学会論文誌A，121，351（2001）。
- [6] W.S. Melville, *Proc. IEE Radio Section*, 98, pt.3, 185 (1951).
- [7] 中島 晋，平尾則好，香川理人，渡部俊太郎：日立金属技報 8, 31（1990）。
- [8] アライドシグナル社：METGLAS 技術資料。
- [9] 榎波龍雄，西坂敏博，溝口 計，谷 政幸，渋谷忠士，山田真一：明電時報 262, 39（1998）。
- [10] W. Partlo, R. Sandstrom and I. Fomenkov, *Proc. SPIE*, 2440, 90（1995）。
- [11] H. Mizoguchi, O. Wakabayashi, T. Aruga, T. Sakugawa and T. Koganezawa, *Proc. SPIE*, 2726, 831（1996）。