UDC 621.3.018.756:621.372.54:621.382.3

論文

60-B108

誘導性エネルギー蓄積パルスパワーシステムの高速遮断素子制御によるパルス整形と形成

正員 田口 雄一 (日本工学院)

正員 桜井 誠 (日本工学院)

正員 上野 勲 (東京大)

1. ま え が き

パルスパワー技術は核融合、加速器増殖炉などの長期エネルギー源の開発などに関連して、特に近年急速にその開発が求められている⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。

蓄積されたエネルギーを瞬時に放出することによって、極めて大きな電気出力(パルスパワー)を発生させようとするとき、通常はコンデンサによるエネルギー蓄積方式が使用されてきている。しかし、この方式は100 μ sまでの放出時間に対しては効率的であるが、エネルギー密度が0.1 kJ/dm³と小さい欠点を有する。従って、蓄積エネルギーを10 MJ以上に増して、1 ms~10 sの放出時間に対しては、装置自体の小形軽量化、更には経済性の観点から誘導性エネルギー蓄積方式が回転機、蓄電池などを含む他のいずれの方式よりも優れているといわれている⁽⁵⁾。一方、誘導性方式のエネルギー密度はコンデンサ方式のエネルギー密度に比べて約2けた大きい、立上がり時間の遅いことが欠点でもある。

本論文は、既に報告してきたスローバンクを用いた簡単な回路構成から成る誘導性エネルギー蓄積方式パルスパワーシステムにおいて⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾、高速立上がり電流パルス形成制御回路を基本にして、線爆方式高速遮断素子の線径と他の回路素子との組合せによって、種

々の波形のパルスパワー電流にパルス整形並びにパルス形成制御が可能であることを実験的に調査し、その適応性を示したものである。なお本論文の内容は高速繰返しプラズマフォーカス方式強力中性子源の開発を目的とする^{(9),(10)}、その基礎過程の解明⁽¹¹⁾に必要な電源として開発されたものである。従って、内容の構成は目的とする物性的内容を充たしうる駆動電流波形のパルス整形とパルス形成制御について記述される。

2. パルスパワーシステムと実験装置

〈2・1〉 システムの目的とその機能 パルスパワーシステムは通常ゆるやかに供給されるエネルギーを蓄えて、その後目的に応じた負荷または変換器に対し、極めて急速にそのエネルギーを放出することを目的とする。そして、更に目的に応じてパルスの整形、繰返し率、寿命、信頼性などが要求される。

一般のパルスパワーシステムの基本的な考え方は図1に示されるように、固有な機能を有するいくつかのブロック(サブシステム)から構成される。

パルス形成サブシステムは通常コンデンサやインダクタ、それに複数のスイッチ、あるいは非線形回路素子で構成され、その機能はパルスに対して要求される立上がり時間、パルスの長さなどを形成することである。更に蓄積されたエネルギーを効率よく負荷または変換素子へ伝送するためには特別なインピーダンス整合も必要となる。これは通常のトランスのように簡単な場合もあるが、一般的には極めて複雑なものになる。スイッチとしてはスパークギャップやイグナイトロンあるいはサイラトロンなどが用いられる。

〈2・2〉 実験装置の構成 図2に誘導性エネルギー

Pulse Shaping and Forming Controlled by a Fast Breaking Element for a Pulsed Power System with Inductive Energy Store. By Yuwichi Taguchi, Member, Makoto Sakurai, Member (Nippon Electronics Engineering College) & Isao Ueno, Member (University of Tokyo)

田口雄一: 正員, 日本電子工学院工学部電子工学科

桜井 誠: 正員, 日本電子工学院工学部メカトロニクス科

上野 勲: 正員, 東京大学工学部電気工学科

図 1 一般的なパルスパワーシステム

Fig. 1. General pulsed power system.

図 2 誘導性エネルギー蓄積方式による電源装置の配置図

Fig. 2. The constructed power source with inductive energy storage.

一蓄積方式パルスパワー電源装置の配置図を示す。この電源装置は接続がえて 3 種類の回路を構成でき、その 3 種類の回路の結線は図 4, 図 9, そして図 13 に示される。

(1) 仕様 低速コンデンサバンクは $534 \mu\text{F}$, 15 kV , 60 kJ , L_1 と L_2 はほぼ $1 \mu\text{H}$ 間隔で最大 $20 \mu\text{H}$ の可変空心リアクトル, 負荷は数 mmHg ~ 数 10 mmHg の H_2 , D_2 ガスで満たされた Mather 形, Filippov 形電極をもつプラズマフォーカス装置である。しかし, プラズマのピンチ時での, プラズマフォーカス放電管のインダクタンスは $\sim 30 \text{ nH}$ 程度であり, 電源インピーダンスに比べて非常に小さいので, 本論文における負荷は電極間を短絡した銅線の模擬負荷を使用している。始動用スイッチ (GS_1) と転送用スイッチ (GS_2 , GS_3) は, 本電源のために新たに開発した永久磁石駆動方式ロータリーアーク放電スイッチである⁽¹²⁾。高速遮断素子は銅線溶断を電流遮断に応用した高圧密閉形高速遮断素子 (以下, HPBE と略)⁽¹³⁾ で, 本論文の実験で採用した HPBE は断面が円形の銅線材で, その長さは 60 cm でラ線状にして使用した。

(2) HPBE 本論文の実験で採用した HPBE の寸法と構造を図 3 に示す。HPBE は防爆管とカートリッジからなり, カートリッジは防爆管の中に容易に設置することができる。これは塩化ビニルなどプラ

①防爆管(ポリエチレン), ②液体タンパ(水), ③銅線, ④中心支持物, ⑤接端子, ⑥カートリッジ(ポリエチレン), ⑦緩衝空間

図 3 HPBE の構造

Fig. 3. The construction of a HPBE.

スチック製の筒と, その筒の両端に取りつけられた接触端子からなり, この端子間に研究目的に応じて線径と長さに関して設計された銅線を, ラ線状にして半田付けし, その周りは銅線溶断時の最大圧力を弱めるための空気層をもつ水で満たされている。また, カートリッジを挿入した防爆管は銅線溶断時の過渡的圧力 ($\sim$ 数百気圧) に耐えうるよう半径方向, 軸方向に厳重に防護される。この防爆管もカートリッジも, ともに両端子間に印加された高電圧に対して, 当然十分な電氣的絶縁性が確保されている。

HPBE 用銅線の径と長さの設計に対しては, それぞれ文献(14)の図 2 と図 3 から容易に計算される。但し, 文献(14)では HPBE に流れる電流波形が一定電流の方形波であるのに対し, 本論文では正弦波であるので, 横軸の銅線の溶断までの時間は $\sqrt{2}$ 倍して, 正弦波用に補正することによって, 文献(14)の図 2 と図 3 が活用される。従って, 詳しい設計例は文献(14)を参照されたい。

(3) 計測系と応答時間 本論文に示した電流波形は以下に示すログスキー電流測定回路に 7623 A 形ソニーテクトロニクス製メモリスコープを接続して観測したものである。

ログスキーコイルは電流の時間微分を検出する方式になっているので, ログスキーコイルのインダクタン

スできる実効インピーダンスは測定系の特性インピーダンスより十分小さい。従って、電流波形の測定のために、積分回路を使用した。

この回路の時定数は容量 C と抵抗 R の積で与えられるので、 $R=2\text{ k}\Omega$ 、 $C=0.09\text{ }\mu\text{F}$ で構成した積分器の時定数は $\tau=180\text{ }\mu\text{s}$ である。

一方、立上がり応答時間はロゴスキーコイルの浮遊容量に支配されるため⁽¹⁹⁾、実際に計算することは困難であり、信頼性も低い。そこで、パルス電流による実測を行ない、応答時間は 100 ns 以下であることを確認した。

3. 高速立上がり電流パルス形成制御

プラズマフォーカス放電のふるまいは、絶縁破壊から始まり、加速爆縮過程を通して、プラズマが加熱されると共に、プラズマの微視的巨視的不安定性による粒子加速とその熱化過程も相乗的に作用し、中性子発生に至ると考えられる⁽¹⁵⁾。従って、最適なフォーカスを形成するためには、印加駆動電流の波高値がフォーカス電極の先端で最大になるよう整合をとることが望ましい。しかしながら、誘導性エネルギー蓄積方式の電源は、電流の立上がりが非常に遅いので、フォーカス駆動電源として活用する場合は高速立上がり電流波形としてパルス形成制御を必要とする。

図 4 高速立上がり電流パルス整形

Fig. 4. Pulse shaping for generation of fast-rising shaped current.

〈3・1〉動作原理 図4(a)は誘導性エネルギー蓄積方式の高速立上がり電流パルス形成制御回路である。この回路は負荷と直列にインダクタンスを接続し、あらかじめ蓄積された低速コンデンサの静電エネルギーをインダクタンスを通して放電し、このエネルギーを高速遮断素子 (HS) を用いて負荷へ転送するものである。

いま、コンデンサ C に貯えられたエネルギーを GS_1 を用いて $t=t_0$ で放出すると、 GS_1 と HS が導通状態にある限り、同図(b)に示すような振動電流 i が流れる。ここでは回路のエネルギー効率を上げるため回路抵抗は極力小さくする。この電流の第1半波の任意の時刻 $t=t_1$ に HS が溶断するように銅線の径を設定しておく、と、電流 i_1 は HS によって遮断され、同時に GS_2 の極間に高圧が発生し、 GS_2 が自爆点弧し、電流 i_2 として負荷へ転送される。従って、負荷に流れる電流は同図(c)のような高速立上がり電流パルスにパルス整形される。

〈3・2〉実験結果 図5は高速立上がり電流パルス形成制御回路で、同図(a)の各回路網に流れる電流波形をロゴスキーコイルで観測したものである。時間軸は1目盛 $20\text{ }\mu\text{s}$ で、縦軸は電流シャントなどによって校正された電流値を示す。同図(b)は全電流 i 、同図(c)は HS を流れる電流 i_1 、同図(d)は負荷に流れる高速立上がりパルス整形電流 i_2 の実験結果を示す。例えば、 C は $534\text{ }\mu\text{F}$ 、充電電圧 15 kV 、 L は $3.6\text{ }\mu\text{H}$ 、 HS は $HPBE$ で、線径 $1.2\text{ mm}\phi$ を3本並列使用すると、電流 i_2 の立上がり時間 $4\text{ }\mu\text{s}$ 、波高値 210 kA を示した。電流 i_2 の波形は立上がり部分に寄生振動やひずみが無く、再現性の非常に良い結果を示している。

図6は図5(a)の回路で C の充電電圧を 5 kV 一定に設定し、 $HPBE$ の線径をパラメータとして、線径に依存する転送電流 i_2 のパルス整形波形とその波高値を同一時間軸上に示したものである。転送電流 i_2 の転流開始時間は $HPBE$ の銅線の溶断時間できまるので、 $HPBE$ の銅線に流れる電流密度に反比例する。従って、線径が太いほど $HPBE$ に電流 i_1 の流れている時間が長く、転流開始時間が遅くなる。それゆえに、初期の充電電圧一定のもとでは負荷へ転送されるエネルギーが少なくなり、電流 i_2 の波高値は当然低下する特性を示す(図6)。図7は線径 $1.2\text{ mm}\phi$ の $HPBE$ の本数をパラメータとして、 $HPBE$ を並列に、1, 2, 3本と接続し、各々の本数に対応して $5, 10, 15\text{ kV}$ に充電したコンデンサバンクのエネルギーを $t=t_0$ で放電し、 $HPBE$ を溶断し、負荷に転送した電流パ

図 5 各回路網の電流波形

Fig. 5. Wave form of current through each network.

図 6 線径依存性によるパルス形成電流特性

Fig. 6. Characteristics of pulse forming current depending on a diameter of exploding copper wire.

ルス形成特性を示したものである。図7からも転送開始時間は HPBE を流れる電流密度に反比例して早くなることが示されている。また、遮断素子の並列使用に対してもなんら遮断特性に問題がないことが図7に示されている。

4. 正弦波に高速立上がり電流を重畳したパルス形成制御

プラズマフォーカス装置の駆動電流として、コンデンサ放電による正弦波減衰振動波形を用いると、充てんガスのガス圧に依存して衝撃波が発生する。即ち、駆動電源に正弦波(図8④)を用いると、プラズマの初期密度を増さずに初期温度を上げてしまい、

図 7 HPBE の並列接続依存性によるパルス形成特性

Fig. 7. Pulse forming characteristics by using parallel HPBEs.

エネルギー効率などの点から望ましくない。そこで、プラズマの初期温度を上げずに、初期密度を増した後、圧縮によってプラズマの温度を上げる断熱圧縮用駆動電源には、同図①に示す指数関数的な電流パルス整形が望まれる⁽¹⁶⁾。

〈4・1〉動作原理 図9は高速立上がり電流パルス形成制御回路を基本にして、プラズマを断熱圧縮す

図 8 駆動電流波形に依存する D-D 反応のエネルギー効率

Fig. 8. Energy efficiency for the D-D reaction depending on the wave form of exciting current.

図 9 正弦波に高速立上がり電流を重畳した波形のパルス整形

Fig. 9. Pulse shaping for generation of fast-rising shaped current superposed on sine wave.

るのに適していると思われる、正弦波に高速立上がり電流を重畳したパルス形成制御回路である。

空心リアクトル L_1, L_2 および HS を同図(a)のよ

うに結線すると、単純な LC 放電による電流波形は図 8④のような正弦波になるが、このパルス形成制御回路を採用すれば、図 8 の①に示す指数関数的に立上がる電流波形に近い同図②、③に示す電流波形制御が可能となる。いま、C に貯えられたエネルギーを $t=t_0$ で放出すると、GS₁, HS が導通状態にある限り、電流は L_1 と L_2 とに分流される。任意の時刻 $t=t_1$ に HS が遮断し、遮断すると GS₂ の電極間に高電圧が発生し、GS₂ が点弧され導通し、 L_1 に蓄積された誘導性エネルギーは電流の形態で負荷に転送され、電流 i_2 に重畳される。従って、負荷に流れる電流波形は、同図(d)に示すような正弦波に高速立上がり電流を重畳した波形にパルス整形される。

〈4・2〉 実験結果 図 10 は各回路網に流れる電流波形を観測した結果である。同図の時間軸は 1 目盛り 20 μ s で、縦軸は電流値を示す。実験結果は、図 9 の動作原理で論じた如く、電流 i_1 が HS によって遮断されると同時に、電流 i_2 が高速で立上がる結果を示している。

例えば、C は 534 μ F、充電電圧 10 kV、 L_1 と L_2 はそれぞれ 3.6 μ H と 4.6 μ H、HS は線径 0.8 mm ϕ を用いると電流波高値 210 kA の正弦波に高速立上がり電流を重畳した波形にパルス整形される。

図 11 は C の充電電圧を 10 kV、 L_1 と L_2 をそれぞれ 3.6 μ H と 4.6 μ H に設定して、HPBE の線径をパラメータとして、0.8 mm ϕ から 1.6 mm ϕ まで可変した線径依存性によるパルス形成制御波形とその波高値の特性を示したものである。

図 12 は HPBE の線径を 1.2 mm ϕ 一定、充電電圧 10 kV、 L_2 は 4.6 μ H とした実験条件で、 L_1/L_2 の値をパラメータとして、負荷に流れる L_1/L_2 依存性の電流パルス形成制御波形を示したものである。

最適なプラズマ・フォーカスを形成するためには、フォーカス電極の形状や寸法に依存して、駆動電流の波形や波高値を制御して、整合を取る必要がある。本電流波形制御法で、HPBE の線径や L_1/L_2 の値などの回路定数を選択的に組み合わせ適用することにより、容易にパルス整形並びにパルス形成制御が可能になることを実験結果として示した。

5. 方形波電流パルス形成制御

最終的実用化を目標にした高繰返しプラズマフォーカス方式高フルエンス中性子源用駆動電流のパルス幅はフォーカス電極の液体 Li による熱除去などを考慮した場合、約 30 μ s 程度となる⁽¹⁷⁾。従って、本目標に対して、パルス幅依存性によるその基礎過程の解

図 10 各回路網の電流波形

Fig. 10. Wave form of current through each network.

図 11 電流波形の線径依存性

Fig. 11. Characteristics of controlled current depending on a diameter of exploding copper wire.

図 12 インダクタンス L_1 と L_2 の比に依存する電流波形Fig. 12. Characteristics of controlled current depending on the ratio of inductance L_1 to L_2 .

明に、誘導性エネルギー蓄積方式のパルス形成制御された方形波電流パルスの発生を必要とする。

〈5・1〉動作原理 図13は高速立上がり電流パルス形成制御回路を基本にした誘導性エネルギー蓄積方式方形波電流パルス形成制御回路である。この回路は図4(a)の回路にHS並びにGSを直並列に挿入接続して、図13(a)の如く結線することによって方形波に整形し、HSの線径なども可変することによってパル

ス幅の可変制御を可能にする。(a)図のCに貯えられたエネルギーを、GS₁を用いて時間 $t=t_0$ で放電すると、GS₁、HS₁が導通状態にある限り振動電流 i_1 が回路に流れる。いまこの電流 i_1 がその第一半波の任意な時刻に到達したとき、HS₁が溶断するように設計されていると、電流 i_1 はこのHS₁によって遮断され、同時にGS₂が点弧して電流 i_1 は(a)図の i_2 電流として負荷に転送される。

次にHS₂は電流 i_2 が要求されるパルス幅である任

図 13 方形波電流パルス整形

Fig. 13. Pulse shaping for generation of square shaped current.

意な時刻に到達したとき、溶断するように設計されていると、電流 i_2 はこの HS_2 によって遮断され、同時に GS_3 が点弧し、電流 i_3 として転送される。従って、負荷に流れる電流 i_2 の波形は (d) 図の i_2 に示される如く、 $t=t_1$ で高速で立上がり、 $t=t_3$ で高速で立下がる方形波としてパルス整形される。

〈5・2〉 実験結果 図 14 は各回路網に流れる電流波形を観測した結果である。同図の時間軸は 1 目盛 $20 \mu s$ で、縦軸は電流値を示す。実験結果は図 13 の動作原理で論じた如く方形波電流パルス整形を示している。

実験条件として、 C が $534 \mu F$ 、充電電圧 $11 kV$ 、 L_1 と L_2 がそれぞれ $7.21 \mu H$ と $0.3 \mu H$ 、 HS_1 と HS_2 がそれぞれ $1.6 mm \phi$ を用いると、パルス幅 $34 \mu s$ 、立上がり (t_2-t_1) 時間 $4 \mu s$ 、立下がり (t_4-t_3) 時間 $4 \mu s$ 、電流波高値 $270 kA$ の方形波パルス整形電流を示した。

図 15 は同一の実験条件のもとで HS_1 、 HS_2 、充電電圧などのパラメータを可変した場合における方形波の発生を示したものである。

本方式の特徴はスローバンクを用いた比較的簡単な誘導性回路に HPBE を活用して、負荷にパルス形成制御された方形波電流を非常に廉価に供給できる点にある。即ち、図 13 における C 、 L 、並びに HS の線径や長さなどの回路定数を選択的に適用することによりパルス幅や、パルス電流値を広範囲に可変できる。

図 14 各回路網の電流波形

Fig. 14. Wave form of current through each network.

図 15 線径と充電電圧に依存する方形波整形電流特性

Fig. 15. Characteristics of square shaped current depending on a diameter of exploding copper wire and charging voltage.

6. む す び

以上述べてきた誘導性エネルギー蓄積方式パルスパワーシステムの高速遮断素子制御によるパルス整形と形成方式の特徴は HPBE のカートリッジを毎回交換しなければならない煩わしさはあるが、構造が単純で価格も安く、使用法が簡単で長寿命であるのに加えて、ファーストバンクの10分の1の価格であるスローバンクを使って、急しゅんな変化を伴う種々な波形を提供できるので、特に物性研究に対して最適である。

この論文中に使用された HPBE に対しては、更に改良が加えられ、その緩衝空間とタンパを粒状のけい砂で置きかえたものを、“けい砂密閉形高速遮断素子(以後、SSBE と略)”⁽¹⁸⁾と名づけた。この SSBE は遮断時間を HPBE の約 1/2 に短縮化し、エネルギー転送効率を 10% 以上効率化し、銅線の水中での腐食に対する経年劣化をなくし、高速高性能化されている。そこで、SSBE とロータリーアークギャップスイッチ⁽¹⁰⁾との組合せによる本方式の電源は、実業界における種々の試験用電源として、非常に安価に供給できると思われるので、おおいに活用されるものと考えられる。また、HPBE や SSBE の毎回都度の交換に関しては、交換頻度に依存することであるが、全自動化が容

易に可能であるので、今後新たな幅広い応用が期待される。従って、本論文が関連各方面の諸氏に参考になれば、誠に幸に存ずる次第である。

(昭和 59 年 8 月 23 日受付, 同 60 年 2 月 7 日再受付)

文 献

- (1) 宮原・竹田・山中:「小特集:核融合実験装置の電源」電学誌, 100, 793 (昭 55-9)
- (2) 昭和 56 年電気四学会連合パルスパワー講演特集 (昭 56-10)
- (3) 上野:「パルスパワー技術の開発とその将来—第 1 部核融合—」エネルギー・資源, 5, 1, 16 (昭 59-1)
- (4) 上野:「パルスパワー技術の開発とその将来—第 2 部加速器増殖炉—」エネルギー・資源, 5, 2, 103 (昭 59-3)
- (5) J. P. Krebs, et al.: "Superconducting devices for energy storage and switching" *Proc. 4th Int. Cryogenic Eng. Conference* 172 (1972)
- (6) 上野・田口・中沢・竹田:「誘導性エネルギー蓄積方式による高速立上りパルスパワー電源の開発」電学誌 B, 102, 2, 116 (昭 57-2)
- (7) 上野・田口・中沢・岡田:「誘導性エネルギー蓄積方式による波形制御されたパルスパワー電源の開発」電学誌 B, 102, 2, 117 (昭 57-2)
- (8) 田口・千葉・桜井・上野:「誘導性エネルギー蓄積方式による方形波発生用パルスパワー電源の開発」電学誌 B, 103, 3, 223 (昭 58-3)
- (9) 上野・田口:「高線り返しプラズマ・フォーカス中性子源」東大工核融合炉ブランケット設計基礎実験装置研究成果報告書, 143 (昭 56-6)
- (10) 上野・小畑・中沢・田口・岡田・谷本・竹田:「プラズマフォーカス "Popcorn-1" 装置の実験と展望」核融合研究別冊 46, 7, 163 (昭 56-9)
- (11) I. Ueno, et al.: "Neutron Yield in a Repetitive Dense Plasma Focus" *Jpn. J. Appl. Phys.* 21, 12, P.L. 746 (1982)
- (12) 井上・田口・上野:「永久磁石駆動方式ロータリーアーク放電スイッチの開発」電学誌 B, 102, 4, 259 (昭 57-4)
- (13) 上野・J. Salge, U. Braunsberger:「誘導性蓄積エネルギー転送用高圧密閉形高速しゃ断素子の特性と応用」電学誌 B, 99, 11, 721 (昭 54-11)
- (14) J. Salge, et al.: "Circuit Breaker for Ohmic Heating Systems" *Proc. 6th Sym. on Eng. Problem of Fusion Research, IEEE* 643, (1975)
- (15) J. P. Rager & V. M. Korzharin: "Unconventional Approaches Fusion" ed. by D. Brunellei & G. Reatta, p. 193 Plenum Press, N. Y.-London.
- (16) D. Potter: "The formation of high-density Z-pinch" *Nuclear Fusion* 186, 813 (1978)
- (17) 上野・J. Salge, H. Conrads:「プラズマ・フォーカス方式 10^{20} n/cm² fluence 強力中性子源」核融合研究別冊, 43, 7, 13 (昭 55-6)
- (18) 田口・桜井・上野:「けい砂密閉形高速しゃ断素子の開発」電学誌 B, 104, 3, 196 (昭 59-3)
- (19) 林・中野:「ロゴスキーコイルと磁気探針」電学誌, 81, 874, 1084 (昭 36-7)