空心トランスを用いた高繰り返しパルス電力装置の開発

学生員 高尾和人 (長岡技科大) 正員 升方勝己 (富山大) 正員 八井 浄 (長岡技科大)

Development of the high repetition rate pulse power system using an air core transformer
Kazuto Takao, student member (Nagaoka Univ. of Technol.), Katsumi Masugata, Member (Toyama Univ.),
and Kiyoshi Yatsui, Member (Nagaoka Univ. of Technol.)

キーワード: パルス電力装置, 空心トランス, 重共振, 磁気スイッチ, アモルファスコア

1. はじめに

パルス電力装置の高電圧パルス発生部には従来マルクス発生器が多用されてきた。しかし、マルクス発生器は多数のスパークギャップスイッチを用いるため、高繰り返し動作を行うことができない。そこで我々は、高繰り返し動作を目的とした空心トランスと磁気スイッチ (Magnetic Switch: 以下 MS と略) を用いたパルス電力装置の開発を進めている⁽¹⁾。このシステムでは、空心トランスと MS を重共振モードで連動させることによって、MS のリセットを不要としている⁽²⁾。その結果、従来の方式では一個のパルス整形線路で発生できる最小パルス間隔が 30 μ s であった⁽³⁾のに対して、数 μ s のパルス間隔 (数 100 kHz に相当) でのパルス発生が期待される。本研究では、ダブルパルスでの上記システムの動作実証実験を行い、3.3 μ s のパルス間隔での動作を確認した。

2. 実験装置および原理

図 1 は、実験装置および等価回路を示す。回路は 1 次側コンデンサバンク、空心トランス、2 次側回路から構成される。1 次側コンデンサバンクは、エネルギー蓄積コンデンサ (C_{01} , C_{02} , $C_{01} = C_{02} = 150$ nF), スパークギャップスイッチ (S_1 , S_2) 及び調整用インダクタ (L_{02} , L_{1u} , $L_{02} = 0.33$ μ H, $L_{1u} = 0.37$ μ H) から構成される。なお、 L_{02} は C_{02} から C_2 へのエネルギー転送が最大になるように実験から得た値である。2 次側回路は、2 次側コンデンサ (C_2 , 1.6 nF), MS, 及び負荷抵抗 (R , 100 Ω) から構成される。

空心トランスは厚さ 0.25 mm, 幅 150 mm の銅板と絶縁のための厚さ 0.25 mm, 幅 200 mm のポリエステルシートを重ねたものを直径 330 mm のアクリル円筒に巻いた同軸円筒構造のオートトランス型としている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。1 次側巻線は 1 ターン, 2 次側巻線は 15 ターンである。本回路の実効的なトランス結合係数 k_{eff} は次式で与えられる。

$$k_{eff} = \frac{M}{\sqrt{(L_{1u} + L_{T1}) \cdot L_{T2}}} \quad (1)$$

ここで、空心トランスを重共振条件で動作するためには

k_{eff} を 0.6 に設定する必要があるが、その調整には L_{1u} を使用している。

重共振条件が満たされるとき、トランスの昇圧比 α は

$$\alpha = \sqrt{\frac{L_{T2}}{L_{1u} + L_{T1}}} \quad (2)$$

で与えられ、本設計条件では $\alpha = 9.6$ となる。表 1 に空心トランスの設計値を示す。

本回路の動作手順は、① C_{01} , C_{02} を充電し、MS を $-B_r$ 方向にリセットする、② S_1 を閉じる、③ 遅延時間 T_d 後に S_2 を閉じる、である。本実験では T_d は数 μ s であり、この場合 S_2 が ON となった時、 S_1 は ON 状態を保っている。従って、 C_{02} で生成されたパルスは S_2 , L_1 ($= L_{1u} + L_{T1}$), C_{01} , S_1 , L_{02} を経由して、トランス 1 次側に供給される。即ち、 C_{01} , C_{02} の放電によって 2 つの独立したパルスが発生される。

図 1 ダブルパルス発生器, (a) 概略図, (b) 等価回路
Fig.1. Double pulse generator, (a) schematic,
(b) equivalent circuit.

1 次側回路で発生したパルスは、空心トランスで昇圧され、2 次側コンデンサを充電する。充電が完了すると MS が ON し、負荷に電圧が印加される。この時、MS は重共振モードで動作するので、動作ごとのリセットは不要である⁽²⁾。

MS を重共振モードで動作させるためには以下の条件を満たさねばならない。

$$\Delta B S N > \int_0^{t_{reverse}} V_{C2} dt \quad (3)$$

ここで、 ΔB , S , N はそれぞれコアの磁束密度変化量、断面積、巻線の巻数、 $t_{reverse}$ は MS に印加する電圧が反転するまでの時間である。

表 2 に MS の各パラメータを示す。なお、MS の飽和インダクタンス L_{sat} は実測値である。実験は、MS 及び負荷抵抗に印加される電圧を高電圧プローブで測定した。

表 1 空心トランスの設計値
Table 1. Design parameter of the air core transformer.

巻線幅	150 mm
1次側巻数	1 turn
2次側巻数	15 turns
1次側インダクタンス (L_{T1})	0.49 μ H
2次側インダクタンス (L_{T2})	80 μ H
相互インダクタンス (M)	5 μ H
結合係数 (k)	0.8
調整インダクタンス (L_{tu})	0.37 μ H

表 2 磁気スイッチのパラメータ
Table 2. Parameter of the magnetic switch.

磁性体材料	鉄基アモルファス
コア半径	50 mm (内) 130 mm (外)
コア幅	105 mm
断面積 (S)	$8.4 \times 10^{-3} \text{ m}^2$
体積 (V)	$4.8 \times 10^{-3} \text{ m}^3$
巻線数	2
磁束密度 (ΔB)	2.4 T
飽和インダクタンス (L_{sat})	300 nH

3. 実験結果と検討

図 2 は、 C_{01} 及び C_{02} の充電電圧をそれぞれ、11 kV, 16 kV, T_d を 3 μ s とした時の MS に印加される電圧 (V_{MS}) および負荷抵抗の電圧 (V_R) を示す。図より、 V_{MS} の最大点で MS が ON していることがわかる。また、この時の V_{MS} の立ち下がりには 1 次パルスでは急峻であるのに対し、2 次パルスでは緩やかである。この原因は、2 次パルスでの V_R のピーク値、即ち、MS への最大印加電流 ($\propto$ 磁界) が小さいので十分磁気飽和に至らず、MS の ON インダクタンスの値が大きいためと考えられる。

V_R には、パルス間隔 3.3 μ s のダブルパルスが得られてる。1 次および 2 次パルスのピーク電圧/パルス幅はそれぞれ、

図 2 V_{MS} 及び V_R の波形。
Fig.2. Waveforms of V_{MS} and V_R .

34 kV/100 ns, 30 kV/100 ns である。 $T_d = 3 \mu$ s であるにもかかわらずパルス間隔が 3.3 μ s となっているのは、トリガーからパルス発生までの遅延時間が 1 次パルスでは 1.5 μ s であるのに対し、2 次パルスでは 1.8 μ s であるためである。 V_R は 1 次パルス、2 次パルスとも +10 kV 程度のプリパルス (V_{Rpre}) を有している。このプリパルスは MS の OFF 時の漏れ電流によるものであり、この時の漏れ電流 ($I_r \approx V_{Rpre}/R$) は 100 A 程度と評価される。アモルファスコアの平均半径 ($r_a = 90$ mm), $N = 2$ より、このときの保持力 ($H_c \approx N I_r / 2\pi r_a$) は約 350 A/m と評価される。この値は、本実験で使用したアモルファスコアの特長値⁽⁶⁾にほぼ一致する。尚、本実験の回路条件では主パルスに対してプリパルスが 1/3 程度の値となっており、プリパルスの低減が必要である。プリパルスを減少させるには MS の ON 状態時の磁界 (H_{ON}) と H_c の間に $H_{ON} \gg H_c$ の関係を成立させる必要があり、MS の動作条件の最適化を行う必要がある。

(平成 10 年 7 月 27 日受付)

参考文献

- (1) K. Masugata, Rev. Sci. Instrum. **69**, 591 (1998).
- (2) H. C. Kirbie, G. Y. Otani, and G. M. Hughes, Proc. 6th IEEE Pulsed Power Conf., 1987, 171 (1987).
- (3) K. Masugata, H. Maekawa and K. Yatsui, The Trans. of IEE of Japan **118B**, 261 (1998).
- (4) D. Finelstain, P. Goldberg, and J. Shuchatowitz, Rev. Sci. Instrum. **37**, 159 (1966).
- (5) R.J.Rohwein, IEEE Trans. Nucl. Sci. **NS-26**, 4211 (1979).
- (6) 升方, 斉藤, 八井, 電学論 **116A**, 1029 (1995).

高尾和人 (学生員) 1974 年 8 月 9 日生。1995 年 3 月石川工業高等専門学校電気工学科卒業, 1997 年 3 月長岡技術科学大学工学部電子機器工学課程卒業, 同 4 月長岡技術科学大学大学院工学研究科修士課程入学、現在に至る。主として高電圧パルスパワー電源の開発に従事。

升方勝己 (正員) 電気学会論文誌 **117A**, No.4 参照
八井 浄 (正員) 電気学会論文誌 **117A**, No.4 参照