

# マルクス回路の充電動作時におけるトランスを用いたゲート駆動電力供給法の実機検証

大内 洋佑\*, 日下 佳祐, 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

Verification of a gate drive power supply method using a transformer connected in charging path of Marx circuit.

Yosuke Ouchi, Keisuke Kusaka, Jun-ichi Itoh (Nagaoka University of Technology)

## 1. はじめに

近年、排ガス(NOx)処理用、殺菌処理用、医療用のパルスパワー電源としてマルクス回路が研究されている<sup>(1)</sup>。マルクス回路は高  $dv/dt$  の電圧を出力するためにコンデンサとパワー素子をカスケード構造で構成する。そのためパワー素子のゲート回路に高い絶縁電圧の DC-DC コンバータが必要であり高コスト化する問題があった。そこで著者らはマルクス回路のプラズマ発生に影響がない充電動作経路にトランスを用いてゲート駆動電力を供給する自己給電法<sup>(2)</sup>を採用した回路構成を提案し、その解析を行ってきた。本論文では、実験機を試作し、提案したゲート駆動電力供給法の動作検証を行ったので報告する。

## 2. マルクス回路動作と提案回路, シミュレーション

図 1 に 2 段のマルクス回路と自己給電用のトランスを挿入する箇所を示す。マルクス回路には充電動作と放電動作がある。放電動作は  $S_2, S_4$  をターンオンし、青色の経路でマルクスコンデンサ( $C_1$ )を直列に接続することで負荷に高い  $dv/dt$  を有する電圧を印加する。そのため、放電経路は低インダクタンスであることが求められる。充電動作は  $S_1, S_3, S_5, S_6$  をターンオンし、赤色の経路でマルクスコンデンサを並列に接続することで放電動作によって出力したエネルギー分が充電される。しかし、充電経路にはマルクスコンデンサとパワー素子のオン抵抗、配線抵抗しかないためラッシュ電流が流れる。そこで、図 1 のように充電経路に給電回路を挿入することでマルクス回路の放電動作に影響せず、ゲート駆動電力を得ることができ、かつ充電時に発生するラッシュ電流の抑制も可能である。

図 2 に充電動作時における自己給電回路の等価回路を示す。本論文では図 2 の回路で解析とシミュレーションを行った。等価回路は自己給電用トランスの T 型等価回路と整流回路、平滑コンデンサ、負荷抵抗からなる給電回路、マルクスコンデンサからなる。なお、解析を行う際は、簡単化のために給電回路の平滑コンデンサを電圧源として解析を行った。また、1 回の放電動作でマルクスコンデンサ  $C_1$  が入力電圧に対して 30V 降下するものと仮定した。

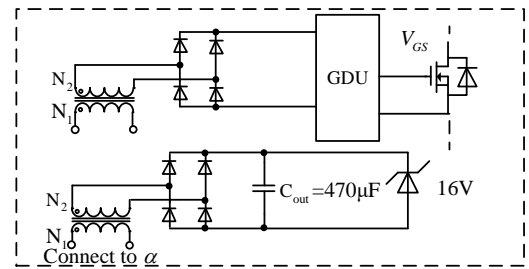


図 1 2 段の半導体マルクス回路と自己給電回路  
Fig.1. Two-stage Marx circuit and Power supply circuit.

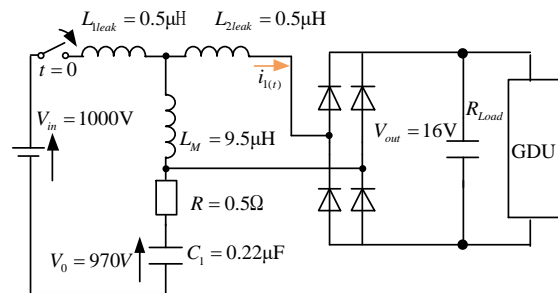


図 2 自己給電回路を含めた充電動作時の等価回路  
Fig.2. Equivalent circuit for charging operation including power supply circuit using transformer.

## 3. 供給電力の計算

トランス二次側に流れる電流  $i(t)$  は図 2 の等価回路より (1) 式で表される。 $i(t)$  はマルクスコンデンサの初期電圧  $V_0$ 、入力電圧  $V_{in}$ 、配線抵抗、オン抵抗を合わせた抵抗  $R$ 、(2) 式

で表される一次側と二次側の漏れインダクタンスの和  $\beta$  で表される。よって負荷側に送られる電力は  $i_{1(t)}$  と負荷電圧  $V_{out}$ 、スイッチング周波数  $f_{sw}$  の積で表され(3)式になる。

$$i_{1(t)} = \frac{V_{in} - V_0}{\sqrt{\frac{\beta}{C_1} - \left(\frac{R}{2}\right)^2}} e^{-\frac{R}{2\beta}t} \sin \sqrt{\frac{1}{\beta C_1} - \left(\frac{R}{2\beta}\right)^2} t - kV_{out}t \quad (1)$$

$$\beta = L_{leak} + L_{2leak} \quad (2)$$

$$P_{out} = f_{sw} V_{out} \int i_{1(t)} dt \quad (3)$$

図3に巻き数比を  $N=1$  としたときの一次側インダクタンスの値と負荷側に供給される電力の関係を示す。ゲート駆動回路の電圧が低いほど得られる出力電力は大きくなる。これは、出力電圧が低いほうがダイオードの導通期間が長くなるためである。また、図3からわかるようにインダクタンスを大きくすると供給される電力が大きくなる。これはインダクタンスが大きくなったことで、(1)式の共振電流振幅が抑制されること以上に共振周波数が低下することで電流の積分値が大きくなるためである。ただし、インダクタンスを大きくし、減衰が緩やかになるとマルクスコンデンサに電圧が貯まりきらず次の放電を迎えてしまうため、挿入するインダクタンス値には上限がある。

#### 4. ゲート駆動実験

図4に  $S_1$  を提案した自己給電法を用いてゲート駆動したときの動作波形を示す。一次側インダクタンス、二次側インダクタンスは  $11\mu\text{H}$ 、入力電圧を  $100\text{V}$ 、マルクスコンデンサ電圧は一回の放電動作で  $30\text{V}$  電圧降下させ実験を行った。実験の結果、提案手法のみによって電力を供給した  $S_1$  のゲート電圧は  $16\text{V}$  を出力しており、所望のゲート駆動用直流電源を得られることを確認した。次に、始動方法について実験を行った。本方式では、1段目のみ従来のDC-DCコンバータを有するゲート回路を使用することで、2段目以降の自己給電回路を始動することができる。

図5に入力電圧  $V_{in}$  を  $0\text{V}$  の初期状態から  $100\text{V}$  に電圧を上げた時の動作波形を示す。(a)の区間ではマルクス回路に電圧印加後、最下部のスイッチ  $S_6$  のスイッチングにより、提案回路を介して  $S_1$  の駆動回路への給電が始まる。(b)の区間は所望の電圧を供給している区間で以降は安定した動作を確認した。(b)の区間までは約  $70\text{ms}$  であり補助電源として十分な機能した。

#### 5. まとめ

本研究ではマルクス回路の充電経路にトランスを挿入してゲート駆動電力を得る回路の提案を行った。その結果、安定したゲート電圧を GDU に電力供給ができることを確認した。今後はラッシュ電流の抑制法、効率改善法について検討する。

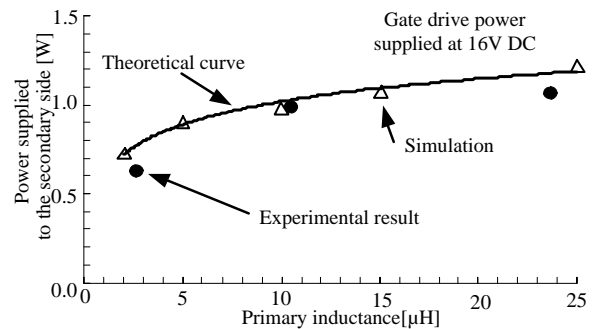
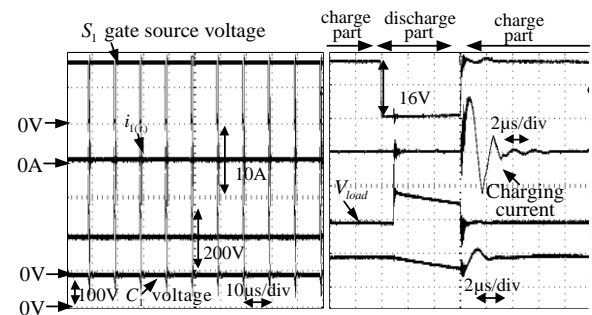


図3 一次側インダクタンスと二次側に供給される電力の関係  
Fig.3. Relationship between primary side inductance and power supplied to secondary side.



(a) 全体の動作波形 (b) 拡大波形

図4 提案回路によるゲート駆動電力供給時の波形  
Fig.4. Experimental results for gate drive power supply in the proposed method.

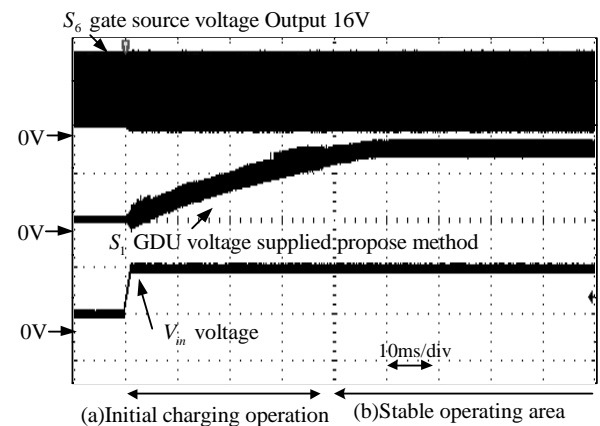


図5 初期状態からの動作波形  
Fig.5. Operation waveform from initial state.

文 献

(1)L. M. Redondo et al., "Solid-State Generation of High-Frequency Burst of Bipolar Pulses for Medical Applications", IEEE Trans. ON PLASMA SCIENCE, VOL. 47, NO. 8, AUGUST 2019  
(2)木之前, 宮脇, 伊東:「1ターンコイルを用いたゲート駆動回路用自己給電回路の理論検討」電気学会産業応用部門大会, 1-77 (2010)  
(3)Y.Ouchi, K.Kusaka, J.Itoh: "Auxiliary Power Supply for Marx Circuit with Transformers inserted into Charging Part of Marx Capacitors".S2PC2019,No.JP19,(2019)