

車載マルクス回路用低耐圧ゲート駆動回路の開発

大内 洋佑*, 日下 佳祐, 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

Development of low rated voltage gate drive circuit for in-vehicle Marx circuit
Yosuke Ouchi, Keisuke Kusaka, Jun-ichi Itoh (Nagaoka University of Technology)

1. まえがき

ディーゼル車の排ガスに含まれる NOx ガス削減のためにオゾンイザの車載化が要求されている。オゾンイザには高 dv/dt 出力の小型な高圧パルス電源が必要である。しかし、従来のゲート駆動回路(GDU)では、高 dv/dt に耐える絶縁型 DC/DC コンバータが課題になっている⁽¹⁾。そこで著者らは、光通信を用いた低耐圧な制御回路部を持つゲート信号伝達法と、低耐圧な自己給電トランスを用いた GDU への電力供給 (自己給電) 法をそれぞれ提案した⁽²⁻³⁾。しかし、これまでの実機検証は 2 段の低圧の範囲内であった。

本論文では、実仕様を想定した高圧(4kV)と高 dv/dt の環境下で、提案するゲート信号伝達法と、自己給電法を組み合わせた 7 段マルクス回路の実機検証を行い、有効性を確認したので報告する。

2. 提案ゲート駆動回路

<2・1>光通信を用いたゲート信号伝達手法

図 1 に n 段のマルクス回路と提案する GDU の構成を示す。ゲート信号は、低圧側制御回路の LED から光信号として出力され、GDU 側のフォトダイオードで受光する。GDU 側ではフォトダイオードからのゲート信号をオペアンプで増幅し、ゲートドライバによりパワーデバイスを駆動する。同様の光信号により通信するフォトカプラと異なり、任意の絶縁距離を低コストに確保することができる。加えて、1 つの LED から多数の GDU に対して同時にゲート信号を送信することができる。

<2・2>GDU への電力供給法

本項では車載用マルクス回路の GDU への電力供給法として、自己給電法とブートストラップ法を組み合わせた電力供給法について説明する。

図 1 に提案する GDU への電力供給法を示す。提案する自己給電トランス($Tr_1 \sim Tr_n$)を用いた電力供給法はマルクス回路の充電経路に自己給電トランスの 1 次側を挿入し、充電期間に流れる電流を用いて充電デバイス(Charging device : S_{2n})に対して、電力を供給する方法である。トランスを挿入することによって、充電期間に発生するラッシュ電流を抑制することができる。また、自己給電法で供給された電力をブートストラップ回路により、放電デバイス(Discharging device : S_{2n-1})に電力供給する。提案する構成を n 段全てに行うことによって、1 段目以外の GDU において絶縁型

DC/DC コンバータが不要となる。

図 2 に実験回路を示す。左側がマルクス回路であり、右側が光通信を行う制御回路である。実験機ではマルクス回路と信号部との距離を IEC が定める 10 kV 出力を想定した絶縁距離 50 mm とした(汚染度 2, 絶縁材料 グループ I)⁽²⁾。

3. 実機検証

<3・1>光通信を用いた信号伝達実験

表 1 に実験条件を示す。本論文では 7 段のマルクス回路に対して提案法の有効性を検証する。まず、初めに光通信を用いたゲート信号伝達法の検証として、制御回路と同期したゲート信号がパワーデバイスに入力されているかを確認

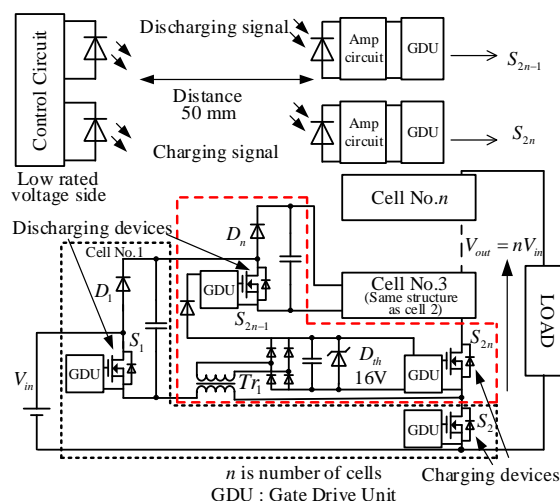


図 1 マルクス回路と提案する GDU 構成
Fig. 1. Proposed gate drive circuit and Marx circuit.

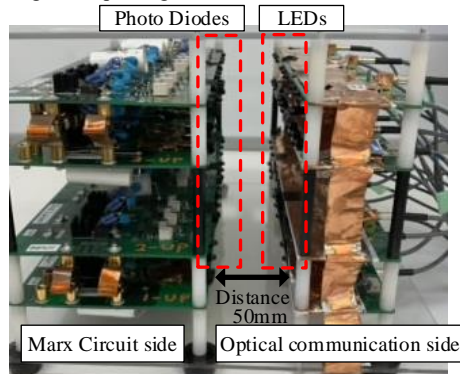


図 2 実験回路
Fig. 2. Experimental circuit.

表 1 実験条件

Table 1. Experimental conditions.

Variable	parameter	Value
V_{in}	Input voltage	600 V
stage	Number of stages	11
$S_1 \sim S_{22}$	Switching devices	C3M0065100J
C_1	Marx capacitor capacity	0.22 μ F
load	Capacitive load	500 pF
V_{out}	Gate drive voltage	16 V
L_1, L_2	Inductance of transformer	10.5 μ H
k	Coupling coefficient	0.95
LED	SFH4542	950 nm
Phot Diode	SFH2505	950 nm

する。実験に用いる LED とフォトダイオードは、外乱光の影響を受けにくくするため、スペクトルが急峻なデバイスを選定し、LED は OSRAM Opto Semiconductors 社製 SFH4542(波長 950 nm)、フォトダイオードは OSRAM Opto Semiconductors 社製 SFH2505 とした。

図 3 に制御回路からの信号とマルクス回路のパワーデバイスのゲートソース間電圧を示す。図 3(a)の実験結果から、提案する信号伝達手法により、光通信を用いることで、制御回路から任意のゲート信号出力を確認した。また、図 3(b)の実験結果より、提案する光通信は、制御回路と GDU から出力されるゲート信号には 500 ns の遅延で通信できることを確認した。

<3・2>提案する GDU を用いたマルクス回路

本項では提案する GDU の実機検証を行う。表 1 の実験条件にあるように自己給電トランスは各段で同一の設計とし、各段のモジュール化が可能である。また、入力電圧は 600 V、負荷をギャップキャパシタ 500 pF とする。マルクス回路の動作より、理論出力電圧は(1)式となる。

$$V_{out_theory} = nV_{in} - V_{SD} \sum_{k=1}^{n-1} k \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 V_{out_theory} は理論出力電圧、 n はマルクス回路の段数、 V_{in} は入力電圧、 V_{SD} は充電期間に通過するダイオードによる電圧降下、 k はダイオードを通過する回数である。よって、理論的な出力電圧は 4.1 kV となる。ただし、負荷が容量性である場合、電荷量保存則によって放電時の電圧が低下する。マルクス回路の放電期間の電荷量保存則は(2)式となる。

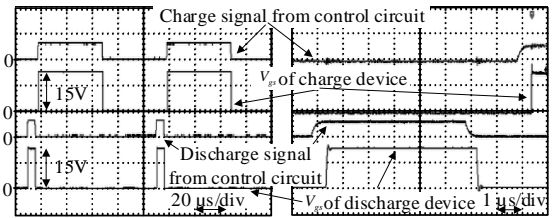
$$\frac{1}{n} C_n V_{out_theory} + C_{out} \{V_{in} - (n-1)V_{SD}\} = \left(\frac{1}{n} C_n + C_{out}\right) V_{out} \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 V_{out} はマルクス回路の出力電圧である。よって、マルクス回路の出力は(3)式となる。

$$V_{out} = \frac{C_n V_{out_theory} + n C_{out} \{V_{in} - (n-1)V_{SD}\}}{(C_n + n C_{out})} \dots\dots\dots(3)$$

実験条件において、マルクス回路の出力電圧は約 4 kV となる。

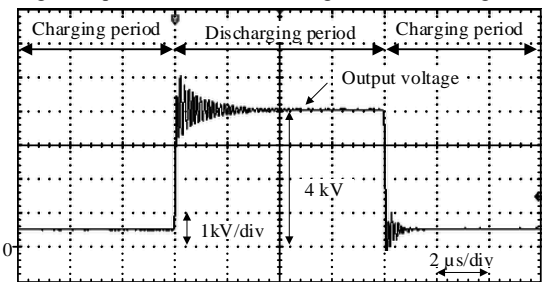
図 4 に提案駆動法を適応した 7 段マルクス回路の出力波形を示す。図 4(a)に出力電圧波形を示す。実機実験より、高 dv/dt の約 4 kV のパルス出力を確認した。なお、図 4(a)では充電期間に負荷へ 600 V 程度の電圧が出力されている。これは充電期間にダイオードを介して負荷と入力電源が並列に接続されるためである。図 4(b)に提案法により電力供給した 2 段目の GDU から出力されたゲート信号と充電電流を示す。実験結果より、GDU 電圧が 15 V であり、低耐圧な自己給電トランスを用いて GDU の絶縁を確保し、所望のゲート駆動電力が得られることを確認した。また、充電期間に発生していたラッシュ電流を 8 A まで抑制できることを確認した。



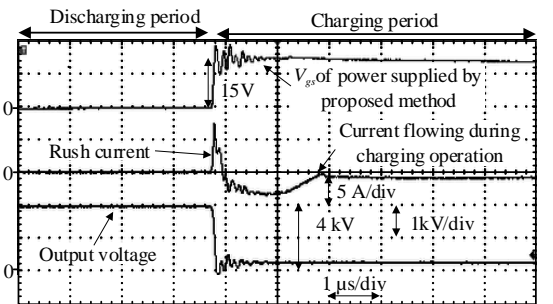
(a)全体波形 (b)拡大波形

図 3 光通信を用いたゲート信号と制御信号波形

Fig. 3. Experimental waveforms of gate and control signals.



(a)出力電圧波形



(b)2 段目の GDU 電圧と充電電流

図 4 提案駆動法を適応した 7 段マルクス回路の出力波形

Fig. 4. Output waveform of 7-stage Marx circuit using the proposed drive method.

文 献

(1) J. Perez, et al, IEEE Trans, vol. 46, no. 6, pp.2114 - 2119 (2018)
 (2)大内洋佑 他, 新潟支所研究発表会, No. NGT-20-021 (2020)
 (3)大内洋佑 他, 半導体電力変換研究会, No. SPC-20-083 (2020)