

# 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

学生員 木之前 雄士 学生員 宮脇 慧 正員 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

## Verification of Self Supply using One-Turn Coil for Gate Drive Circuit

Takeshi Kinomae, Student Member, Satoshi Miyawaki, Student Member, Jun-ichi Itoh, Member

This paper proposes a self power supply circuit using a one-turn coil transformer for gate drive circuit. The one-turn coil transformer consists one turn primary winding which is connected in series to a main circuit to obtain the power for driving gate drive circuit. In order to discuss the design method of the one-turn coil transformer, this paper describes an equivalent circuit and theoretical formulas. In addition, an experimental operation of the gate drive circuit using the proposed method is demonstrated.

キーワード：自己給電, ゲート駆動回路, 1 ターンコイル

Keywords : Self Supply, Gate Drive Circuit, One Turn Coil

### 1. はじめに

インバータをはじめとする電力変換器で使用されている IGBT 等のパルブデバイスを駆動するには, ゲート駆動回路が必要である<sup>(1)(2)</sup>。特に, 基準電位の異なる多数のデバイスを駆動する必要のある電力変換器では, フローティングされたゲート駆動回路用の電源が複数必要となる<sup>(3)</sup>。フローティング電源を得る方法は絶縁トランスを用いる方式の他, チャージポンプ方式, ブートストラップ方式, シリーズレギュレータを用いた自己給電方式等がある<sup>(3)(4)(5)</sup>。しかし, これらの給電方式は充電回路用ダイオードやスイッチに主回路電源と等しい電圧が印加されるため, 素子耐圧が主回路に依存する。また, マルチレベル回路やマトリックスコンバータでは部品点数が増加し回路が複雑になる<sup>(3)</sup>。

一方, 自己給電方式はゲート駆動回路用に専用の直流電源を用意する必要がなく, ゲート駆動回路を 1 段ごとに独立できる。その結果, 個々のスイッチング素子の基準電圧の高低が入れ変わる動作を伴うマルチレベルのカスケード方式やマトリックスコンバータなどにも適用できる<sup>(3)</sup>。しかし, シリーズレギュレータによる自己給電方式は, 損失の増加や駆動する素子の両端電圧がドライブ回路の電圧より低い場合に使用できないという問題がある<sup>(3)</sup>。

本論文では, ゲート駆動回路用電源を簡単な構成で実現することを目的とし, 一次側 1 ターンコイルを用いた自己給電方式を提案する。本方式の特徴は, コイルにより主回路と給電回路が絶縁されているため, 給電回路構成部品の耐圧は主回路の電源電圧に依存しないこと, コイルと整流回路のみという非常に簡単な構成で給電回路を実現できるため, 部品点数の削減および低コスト化の可能性があると, 特別な制御が必要ないことが挙げられる。しかし, 本

方式により供給可能な電力はコイルの一次側電流の変化量とコイルのパラメータに依存するため, 所望の電力を得るために必要な設計条件を明らかにする必要がある。

ここでは, 提案回路の等価回路モデルを用いて, 提案回路に出力される電力の理論式を導出する。更に, 導出した理論式をもとに, 提案回路の設計条件を明らかにする。最後に, 動作確認を行い, 理論検討が妥当であることを検証したので報告する。

### 2. 等価回路モデルによる解析

本章では, 実験的に製作した一次側 1 ターンコイルを等価回路で示し, その動作を実験とシミュレーションで比較し, 妥当性を検証する。

#### 〈2・1〉 等価回路パラメータの算定法

図 1 に自己給電回路を降圧チョップパに適用した例を示す。IGBT のコレクタ側にコアを貫通させ, コアに二次巻線を巻いて整流回路に接続する。この結果, 非常に簡単な構成で電力が取得できる。

図 2 にシミュレーション及び理論検討に使用する給電回路の二次側換算時等価回路モデルを示す。一次側に流れる電流波形を模擬した電流源をコイルの一次側に接続する。以下, 実験用に試作した 1 ターンコイルのパラメータ算定について述べる。一次側を短絡して LCR メータで計測することで, 二次側からみた二次側漏れインダクタンス  $L_{l2}$  と一次側漏れインダクタンス  $L_{ll}$ , 相互インダクタンス  $L_{m2}$  の合成インダクタンス  $L_{SC2}$  を得られる。また, 一次側開放時のインダクタンスを測定することで, 二次側自己インダクタンス  $L_2$  を得られる。これらより, コイルの結合率  $k$  は(1)式にて求められる。

$$k = \sqrt{1 - L_{SC2}/L_2} \dots\dots\dots(1)$$

また、二次側有効インダクタンス  $L_{m2}$ 、二次側換算一次側漏れインダクタンス  $L_{l1}'$ 、二次側漏れインダクタンス  $L_{l2}$  は (2), (3)式で求められる。ただし、コイルの一次側巻数を  $N_1$ 、二次側巻数を  $N_2$  とする。

$$L_{m2} = kL_2 = \sqrt{k^2 \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^2} L_1 L_2 \dots\dots\dots(2)$$

$$L_{l2} = L_{l1}' = \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^2 L_1 (1 - k) = L_2 (1 - k) \dots\dots\dots(3)$$

**(2・2) 等価回路波形と実験波形の比較**

図 3 に実験で得られたコイルの一次側電流  $I_1$  と二次側に発生する電圧  $e_2$ 、電流  $i_2$  の波形を示す。ただし、実験条件は、降圧チョッパ回路のスイッチング周波数  $f_{sw}=10$ [kHz]、 $Duty=35$ [%]、チョッパの出力電流  $I_{out1}=10$ [A]、結合率  $k=0.92$ 、コイルの二次側巻数  $N_2=20$ [turn]、二次側有効インダクタンス  $L_{m2}=440$ [ $\mu$ H]、とした。図 4 に同実験条件にて図 2 の等価回路を用いたシミュレーション結果を示す。実験では、二次側電圧  $e_2$  の立ち下がり付近で振動が生じている他は、シミュレーション結果と実験結果がほぼ一致している。なお、この振動は整流器の入力側のダイオードのジャンクションによる寄生容量  $C_p$  とコイル二次側の自己インダクタンス  $L_2$ 、および漏れインダクタンス  $L_{l2}$  との共振により生じ、鉄損抵抗により減衰する。一次側に電流が流れて二次側起電力がゼロになる点では磁束は飽和しているため、等価的にコイルの一次側は短絡状態とみなせる。このとき、二次側から見たインダクタンスは漏れインダクタンス  $L_{SC2}$  であり、このときの共振周波数  $f_{pon}$  は(4)式となる。

$$f_{pon} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{SC2}C_p}} \dots\dots\dots(4)$$

一方、一次側に電流が流れず二次側起電力がゼロになる点では、等価的にコイルの一次側は開放状態とみなせる。このとき、二次側からみたインダクタンスは二次側自己インダクタンス  $L_2$  であるため共振周波数  $f_{poff}$  は(5)式となる。

$$f_{poff} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2C_p}} \dots\dots\dots(5)$$

以上の関係式を元に、コイルの二次側にコンデンサを並列に接続することで、二次側に誘起される電圧の共振周波数を模擬できる。図 4 をみると明らかなように、 $C_p$  を接続することにより、磁束が飽和時とリセット時の振動を再現することができ、等価回路モデルの妥当性を確認した。

**3. コイルを介して二次側へ伝わる電力**

本章では 2 章にて設定した等価回路モデルのパラメータを用いて提案方式の理論検討を行い、取得電力と各種パラメータとの関係性を示す。

主回路側 1 回のスイッチングで発生する電磁エネルギーがコイルの二次側有効インダクタンス  $L_{m2}$  にすべて伝わると仮定するならば、一次側電流の最大値  $I_1$  によるエネルギー

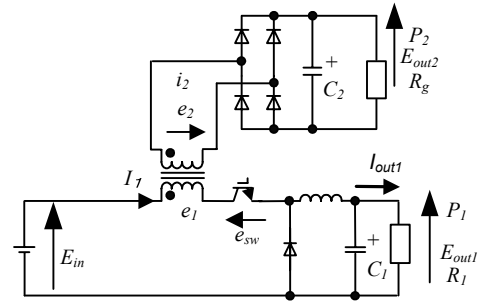


図 1 提案法による取得電力測定回路  
Fig. 1. Experimental circuit for the proposed self supplying using one-turn transformer

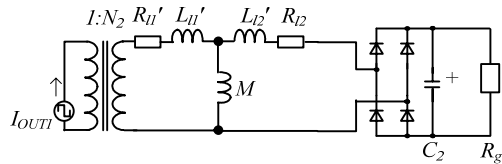


図 2 等価回路モデル  
Fig. 2. Approximate equivalent circuit

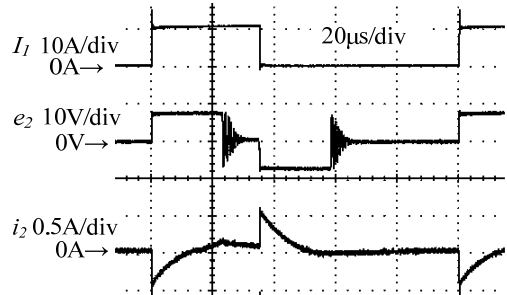


図 3 提案法動作確認波形  
Fig. 3. Operation waveforms of the proposed circuit. ( $f_{sw}=10$  kHz,  $N_2=20$  turn,  $Duty=35$  %,  $I_{out1}=10$  A).

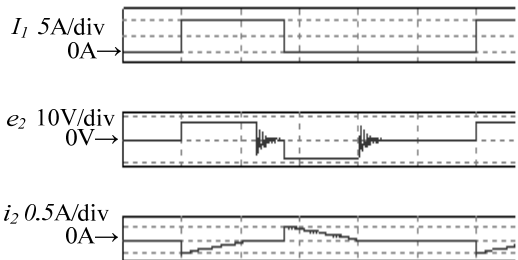


図 4 等価回路モデルシミュレーション結果  
Fig. 4. Operation waveforms of equivalent circuit

と二次側電流の最大値  $I_2$  によるエネルギー  $W_L$  の関係は(6)式で表される。

$$W_L = \frac{1}{2} L_{m1} I_1^2 = \frac{1}{2} L_{m2} I_2^2 \dots\dots\dots(6)$$

また、コイルの電力は、インダクタンスに流れる電流を直線近似すると、主回路スイッチングの 1 周期中に発生するエネルギーとスイッチング周波数  $f_{sw}$  から求められる。したがって、コイルの一次側に電流  $I_1$  が流れる時に二次側に発生する電力  $P_2$  は、有効インダクタンスに伝わるエネルギー  $P_{m2}$  と漏れインダクタンスに蓄えられるエネルギー  $P_{l2}$  の差分から求められ、(8)式となる。

$$P_2 = P_{m2} - P_{l2} = (L_{m2} - L_{l2}) I_2^2 f_{sw} \dots\dots\dots(7)$$

(7)式に(2)式と(3)式を代入し、二次側自己インダクタンス  $L_2$  でまとめると(8)式となる。

$$P_2 = (2k-1)L_2 I_2^2 f_{sw} \dots\dots\dots (8)$$

また、一次側電流  $I_1$  と二次側電流  $I_2$  との関係は巻数比で表すことができ、(9)式にて表される。

$$I_2 = \frac{N_1}{N_2} I_1 \dots\dots\dots (9)$$

ここで、1 ターンコイルに用いるコアをトロイダルコアとすると、二次側自己インダクタンス  $L_2$  とコイルの二次側巻数  $N_2$ 、コアのパラメータの関係式は(10)式となる。

$$L_2 = N_2^2 \mu_0 \mu_e \frac{A_e}{l_e} \dots\dots\dots (10)$$

ただし、 $\mu_0$  は真空の透磁率、 $\mu_e$  はトロイダルコアの実効透磁率、 $A_e$  は実効断面積[m<sup>2</sup>]、 $l_e$  は実効磁路長[m]である。

以上より、二次側に伝わる電力  $P_2$  は、(8)式に(9)式と(10)式を代入して、(11)式を得る。

$$P_2 = (2k-1)N_1^2 I_1^2 f_{sw} \mu_0 \mu_e \frac{A_e}{l_e} \dots\dots\dots (11)$$

よって、コイルの取得電力は一次電流  $I_1$  とスイッチング周波数  $f_{sw}$  および、コアの大きさや材質に依存し、二次側巻数  $N_2$  には依存しない。

図 5 に実験により取得したコイルの二次側巻数を増加した時の取得電力の変化及び結合率の変化の関係を示す。図 5 より、二次側の取得電力は二次側巻数を増やしても結合率の上昇分以上の影響がほとんどみられず、(11)式の妥当性が確認できた。

また、同様に一次側の自己インダクタンス  $L_1$  は(12)式で表され、(12)式を(11)式に代入することで、コイルの取得電力と一次側自己インダクタンス  $L_1$  の関係は(13)式となる。

$$L_1 = N_1^2 \mu_0 \mu_e \frac{A_e}{l_e} \dots\dots\dots (12)$$

$$P_2 = (2k-1)L_1 I_1^2 f_{sw} \dots\dots\dots (13)$$

#### 4. 1 ターンコイルの設計

本章では、3 章で導出した理論式から提案方式に用いる 1 ターンコイルの設計方法を示し、その妥当性を検討する。

##### 〈4・1〉基本方針と設計仕様

図 6 に 1 ターンコイルの設計手順をフローチャートで示す。設計仕様を入力として与え、図に示す手順で設計を行う。設計仕様は、主回路に流れる電流の最大値  $I_{1max}$  と最小値  $I_{1min}$ 、スイッチング周波数  $f_{sw}$ 、ゲート駆動回路の動作に必要な最小電力  $P_{min}$ 、整流器ダイオードの最大許容電流  $I_{D,max}$  からなる。なお、コイルの一次側巻数は  $N_1=1$ 、結合率は  $k>0.9$  として設計を行う。設計手順は、3 章に示したコイルを介して伝わる電力から必要な自己インダクタンスの最小値  $L_{1min}$  を求める。また、整流器ダイオードの最大許容電流から二次側巻数  $N_2$  の下限値を求める。最終的に、両方の条件を満たすコアを選定して 1 ターンコイルを構成する。

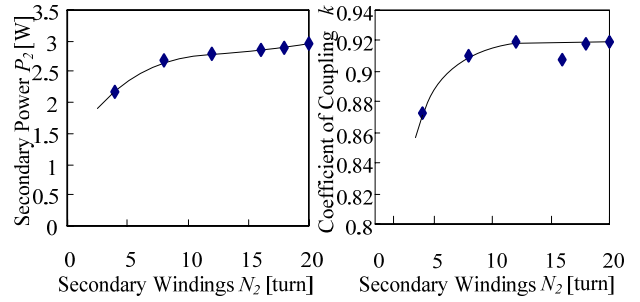


図 5 コイル 2 次側巻数と結合率及び取得電力の関係  
Fig. 5. Characteristics of the number of turns in the secondary side ( $f_{sw}=10$  kHz,  $N_2$ =changing, Duty=35%,  $I_{out}=24$  A).

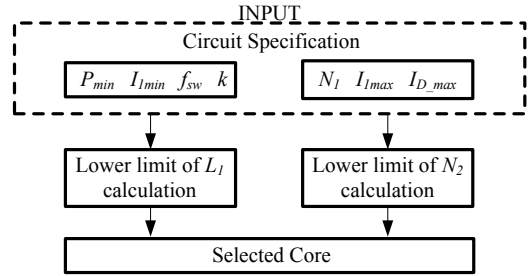


図 6 設計フローチャート  
Fig. 6. Design flow chart.

Table 1. Circuit specification.

表 1 設計仕様

$I_{1min}$	$I_{1max}$	$f_{sw}$	$P_{min}$	$I_{D,max}$	$k$
7.2A	24A	10kHz	0.3W	2A	0.9

#### 〈4・2〉設計法

まず、一次側自己インダクタンスの下限値を設定する。(13)式から、 $I_{1min}$ 、 $P_{min}$ 、 $f_{sw}$  を用いると一次側自己インダクタンスの最小値は(14)式で求められる。

$$L_1 \geq \frac{P_{min}}{(2k-1)I_{1min}^2 f_{sw}} \dots\dots\dots (14)$$

次に、二次側巻数の下限値を設定する。(9)式から、 $I_{1max}$ 、 $I_{D,max}$  を用いると、二次側に最低必要な巻数値  $N_2$  は(15)式で求められる。

$$N_2 \geq \frac{N_1 I_{1max}}{I_{D,max}} \dots\dots\dots (15)$$

最後に、(14)、(15)式の条件を満たすようにコイルを設計する。ただし、一次側の巻数は 1 ターン固定であるため、自己インダクタンスの値はコアの選定でのみ決まる。(14)式で計算された自己インダクタンスを得るためのコアの選定条件は(12)式より(16)式で決まる。

$$\mu_e \frac{A_e}{l_e} \geq \frac{L_1}{\mu_0} \dots\dots\dots (16)$$

(16)式と二次側巻数の条件より、コアの大きさと材料を決定する。

#### 〈4・3〉コイル設計例

まず、主回路及び給電回路の仕様を決める。仕様を表 1 に示す。これらの仕様をもとに、一次側自己インダクタンスの下限値  $L_1$  は(17)式で、二次側巻数の下限値  $N_2$  は(18)式で計算できる。

$$L_{1\min} \geq \frac{P_{\min}}{(2k-1)I_1^2 f_{sw}} = 0.73[\mu H] \dots\dots\dots(17)$$

$$N_2 \geq \frac{N_1 I_{1\max}}{I_{D\_max}} = 12 \dots\dots\dots(18)$$

計算結果より、仕様を満たすためには一次側自己インダクタンス  $L_1$  を  $0.73[\mu H]$  以上、かつ二次側巻数  $N_2$  を 12 回以上にする必要があります。以上の条件を満たすようにトロイダルコアを選定した結果、実効断面積  $A_e=150[\text{mm}^2]$ 、実効磁路長  $l_e=56.5[\text{mm}]$ 、実効透磁率  $\mu_e=229$  のトロイダルコアを選定し、選定したトロイダルコアに二次側巻線  $N_2=12[\text{turn}]$  を巻き、一次側自己インダクタンス  $L_1=0.79[\mu H]$  の 1 ターンコイルを作成した。

#### 〈4・3〉 実験値と設計値の比較検討

図 7 に今回作成した 1 ターンコイルによる二次側電力の実験結果と理論計算結果を示す。ただし、実験回路は図 1 の回路を使用している。結果より、理論計算と実験結果が全領域でほぼ一致することを確認し、設計法と理論計算の妥当性を確認した。

### 5. 提案法の動作確認

本章では、作成した給電コイルにより得た電力を利用したゲート駆動回路の動作を図 8 の実験回路にて確認する。ただし、給電回路の始動には補助電源  $e_{sub2}$  を接続した。

図 9 に図 1 の降圧チョップ側の条件が電流  $I_{out1}=7.8[\text{A}]$ 、スイッチング周波数  $f_{sw}=16[\text{kHz}]$ 、 $Duty=35[\%]$  の条件で動作する場合のゲート電圧波形  $V_{ge}$  と降圧チョップのスイッチ両端電圧  $e_{sw}$  および電流波形  $I_1$  とゲート駆動回路へ供給される電流  $i_{sub1}$  及び  $i_{sub2}$  を示す。図 9(a) は給電コイルを接続前に補助電源からゲート駆動回路へ流れる電流の波形を示し、図 9(b) は給電コイルを主回路に接続した後の補助電源からゲート駆動回路へ流れる電流波形を示す。また、図 9(c) は提案法によりゲート駆動回路へ供給される電流の波形を示す。これらの実験結果より、ゲート駆動回路に必要な電流が提案回路から供給できること、提案回路を適用したゲート駆動回路の正常な動作を確認した。

### 6. まとめ

本論文では、ゲート駆動回路用電源を簡単な構成で実現することを目的とし、1 ターンコイルを用いた自己給電方式を提案した。提案回路の等価回路モデルを用いて、提案回路に出力される電力の理論式を導出し、所望の電力を得るために必要な設計条件を明らかにした。そして、理論計算と実験結果の比較より、理論式および設計方法の妥当性を確認した。さらに、作成した給電回路により、ゲート駆動回路の動作が可能であることを確認した。

## 文 献

(1) V. John , Bum-Seok Suh, and Thomas :”A. High-Performance Active Gate Drive for High-Power IGBT’s “, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY

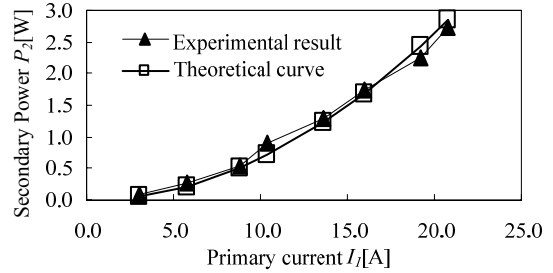


図 7 取得電力主回路電流変化特性

Fig. 7. Secondary side output power according to the main circuit current. ( $f_{sw}=10 \text{ kHz}$ ,  $N_2=12$ ,  $Duty=35\%$ ,  $I_{out1}=\text{changing}$ ).

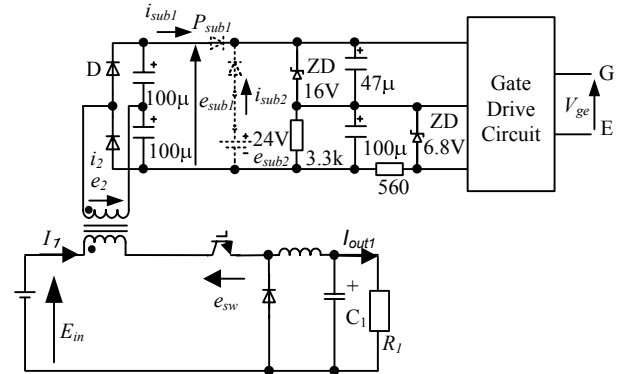


図 8 提案方式動作確認回路

Fig. 8. Experiment circuit of self power supply.

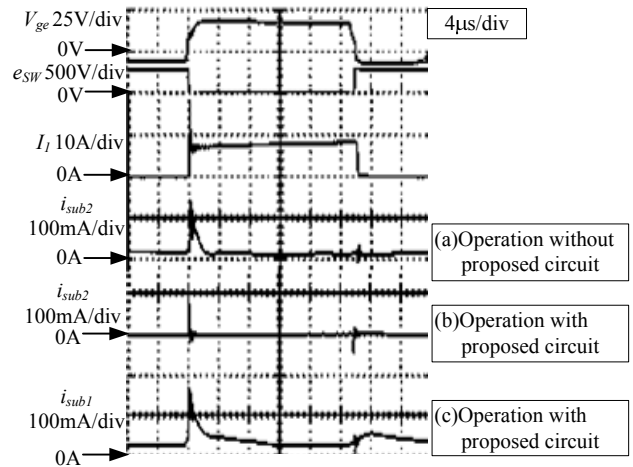


図 9 給電動作確認波形

Fig. 9. Operation waveforms of the inverter with the GDU using the proposed circuit at step down chopper

APPLICATIONS, VOL. 35, NO. 5, pp1108-pp1117 (1999)

(2) K. Yao and F.C. Lee:” A Novel Resonant Gate Drive for High Frequency Buck-Converters,IEEE,Trans,PowerElectronics, Vol.17,No.2,pp.180-186(2002)

(3) 今泉 萌・佐藤 之彦:「ゲート駆動用フローティング電源方式の適用法とその評価」,半導体電力変換研究会, SPC-08-19, pp.49-54(2008)

M. Imaizumi and Y. Sato :”Application and evaluation of floating methods for gate drive power supplies”, SPC-08-19, pp.49-54(2008)

(4) “HV Floating MOS-Gate Driver ICs”,Application Note AN-978, International,Rectifier,http://www.irf.com/technical-info/appnotes/an-978.pdf, (2007)

(5) S. park, T.M. Jahns,”A Self-Boost Charge Pump Topology for a Gate DriveHigh-Side-Power-Supply”,IEEE-Trans.on-PowerElectronics,Vol,No. 3,pp.300-307,(March 2005)