

# DC-DC コンバータにおける全波整流出力波形生成のためのデッドビート電圧制御の実験検討

中崎 智志\*, 永井 栄寿, 伊藤 正悟, 小原 秀嶺, 河村 篤男 (横浜国立大学)

Experimental Study on Dead-Beat Voltage Control to Generate Full-Rectified Output Waveform in DC-DC Converter  
Satoshi Nakazaki, Sakahisa Nagai, Shogo Ito, Hidemine Obara, Atsuo Kawamura (Yokohama National University)

## 1. はじめに

我々は、様々な用途で利用されている数 kW 程度の比較的小電力の電力変換器に着目し、高効率化を実現するため図 1 の回路を提案する<sup>(1)</sup>。本提案回路は、マルチレベル方式を適用した高効率 DC-DC コンバータで全波整流波形を生成し、その波形を折り返し回路により正弦波に変換することで DC-AC 変換を実現する<sup>(2)</sup>。

本稿では、本提案回路方式を用いた高効率インバータの実現に向けた基礎検討として、図 2 に示す一般的な DC-DC コンバータにおいて、全波整流波形を出力するための電圧制御手法について検討した。実験により、デッドビート制御を用いた高速な電圧波形生成を実証したので報告する。

## 2. 出力波形生成

図 2 の出力電圧を半波整流波形に制御する際に最も難しいのは電圧がゼロになって急に増加する部分である。PID 制御ではこの波形が実現できない。デッドビート制御を用いて出力の応答性を向上させる。

## 3. 制御理論

<3・1> デッドビート制御<sup>(3)(4)</sup> 図 2 に示す一般的な DC-DC 降圧コンバータにおける 1 入力システムの状態方程式を状態変数  $\mathbf{x}$ 、入力  $u$  とし (1) 式で定義したとき、その解  $\mathbf{x}(t)$  は (2) 式で求まる。

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}u \quad (1)$$

$$\mathbf{x}(t) = e^{\mathbf{A}t} \mathbf{x}_0 + \int_0^t e^{\mathbf{A}(t-\tau)} \mathbf{b}u(\tau) d\tau \quad (2)$$

ここで、2 次までの近似を用いると (2) 式は (3) 式に変形できる。

$$\mathbf{x}(T) = e^{\mathbf{A}T} \mathbf{x}_0 + e^{\mathbf{A}T/2} \mathbf{b}E\Delta T \quad (3)$$

$\mathbf{x}((k+1)T)$  を  $\mathbf{x}(kT)$  で表し離散時間化することで状態方程式は (4) 式となる。ただし  $\mathbf{F}$ 、 $\mathbf{g}$  はそれぞれ (5) 式で求められる。

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{F}\mathbf{x}(k) + \mathbf{g}\Delta T(k) \quad (4)$$

$$\mathbf{F} = e^{\mathbf{A}T}, \mathbf{g} = e^{\mathbf{A}T/2} \mathbf{b}E \quad (5)$$

状態変数を出力電圧およびインダクタ電流を用い、 $\mathbf{x} = [v \ i]^T$  と定義する。 $\mathbf{x}(k+1)$  を指令値電圧  $v_{ref}(k+1)$  とすることで電圧

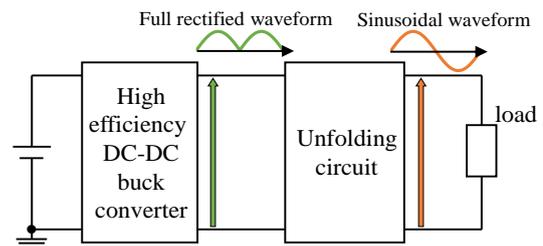


図 1 提案するインバータシステム

Fig.1. Proposed DC-AC conversion system

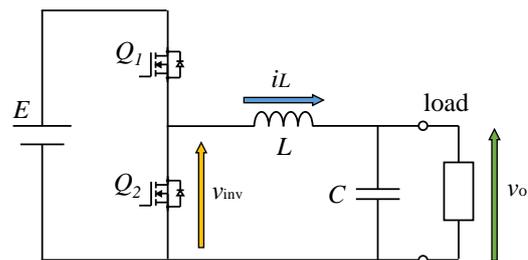


図 2 DC-DC 降圧コンバータ

Fig.2. DC-DC buck converter

制御デッドビートのパルス幅  $\Delta T$  は (6) 式となる。ただし、 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{b}$  は (7) 式で計算される。

$$\Delta T(k) = \frac{1}{g_1} \{v_{ref}(k+1) - F_{11}v(k) - F_{12}i(k)\} \quad (6)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{CR} & \frac{1}{C} \\ -\frac{1}{L} & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{b} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} \quad (7)$$

(6) 式により計算されたパルス幅  $\Delta T$  をスイッチ  $Q_1$  に入力し、出力電圧を指令値電圧に制御できる。

<3・2> 状態オブザーバ 実験に用いる DSP は  $t=k$  にてサンプリングした値で計算した  $\Delta T(k)$  を出力することができないため、本研究では状態オブザーバにより 1 サンプル先の状態変数値  $\mathbf{x}(k+1)$  を推定し、その値から 1 サンプル先のパルス幅  $\Delta T(k+1)$  を計算する。状態オブザーバは (8) 式により計算される。

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{b}u + \mathbf{K}(\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x}) \quad (8)$$

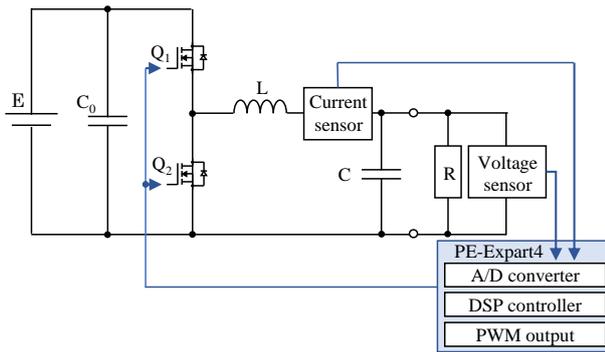


図 3 実験システム

Fig. 3. Experimental system

表 1 実験でのパラメータ

Table 1. Parameters of experiment

Parameters	Variable	Value
Input voltage	$E$	100 V
Inductor	$L$	585 $\mu$ H
Capacitor	$C$	80 $\mu$ F
	$C_0$	2700 $\mu$ F
Load(resistor)	$R$	10 $\Omega$
Carrier frequency		20 kHz
Amplitude of vref	$V$	50 V
Frequency of vref	$f$	50 Hz

ただし、 $\hat{\cdot}$ のついた記号は推定値を表し、 $\mathbf{K}$  はオブザーバゲインを表す。

$$\hat{\mathbf{x}}(k+1) = \mathbf{F}\hat{\mathbf{x}}(k) + \mathbf{g}\Delta T(k) + \mathbf{K}\{\hat{\mathbf{x}}(k) - \mathbf{x}(k)\} \quad (9)$$

(6) 式および (9) 式を用いれば  $\Delta T(k+1)$  を (10) 式で決定することができる。

$$\Delta T(k+1) = \frac{1}{g_1} \{v_{\text{ref}}(k+2) - F_{11}\hat{v}(k+1) - F_{12}\hat{i}(k+1)\} \quad (10)$$

#### 4. 実験

図 3 に制御系を含めた実験システムを示す。デジタルコントローラーとして Myway プラス社の PE-Expert4 を用いた。実験で用いたパラメータを表 1 に示す。

実験結果を図 4, 図 5 に示す。指令値とした 50 V, 50 Hz の全波整流波形に出力電圧が良く追従していることが確認できる。ただし、ゼロ電圧付近の立ち上がりに際して必要以上の電圧上昇がみられる。その部分の波形整形手法として、立ち上がり最初の 1 パルス目のみに工夫 (DB 出力のパルス幅を修正項倍した) を施したものが図 6 である。図 5 に見られるオーバーシュートが抑制され、追従性が改善していることが確認できる。

#### 5. まとめ

高効率のインバータシステムのための DC-DC コンバータ

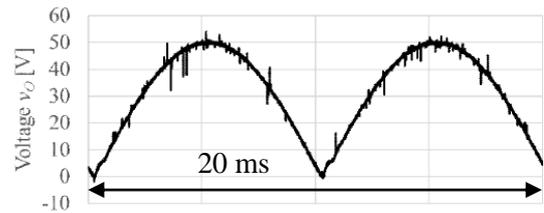


図 6 実験での出力電圧波形

Fig. 6. Experimental waveform of output voltage

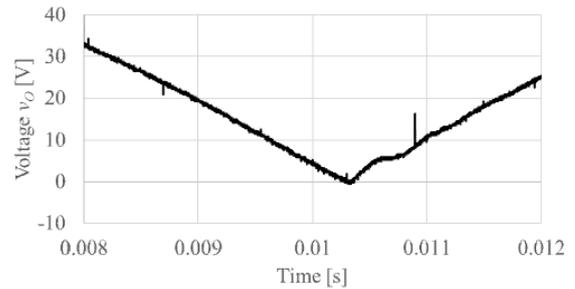


図 4 ゼロ電圧近傍の出力電圧波形

Fig. 4. Output voltage near 0 V

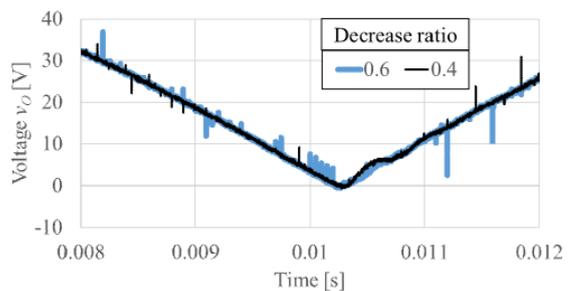


図 5 立ち上がりのパルスに修正を加えた出力電圧

Fig. 5. Output voltage with corrected first pulse

による抵抗負荷への全波整流電圧波形の生成を行った。高速制御手法の一つであるデッドビート制御を採用し、実験では制御の追従性が良い全波整流波形の生成が達成された。

#### 文 献

- (1) Y. Tsuruta and A. Kawamura, "Principle verification prototype chopper using SiC MOSFET Module developed for partial boost circuit system", in *Proc. of IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Sept. 2015.
- (2) 河村篤男・小原秀嶺・弦田幸憲:「多段直流チョップ回路、及び電力変換装置」, 日本国特許, 特願 2017-126044
- (3) A. Kawamura, T. Hanegishi, R. G. Hof, "Deadbeat controlled PWM inverter with parameter estimation using only voltage sensor", *IEEE Trans. Power Electronics*, Vol. 3, No. 2, pp. 118-125, Apr. 1988
- (4) 河村篤男: 現代パワーエレクトロニクス, 数理工学社, 2005