

ソフトスイッチング方式における単インダクタ 2 出力電源

小堀 康功*、深谷 太詞 (小山工業高等専門学校)

須永 祥希、王 太峰、荒船 拓也、築地 伸和、高井 伸和、小林 春夫 (群馬大学)

Single Inductor Dual Output Converter with Soft Switching Control

Yasunori Kobori*, Futoshi Fukaya (National Institute of Technology, Oyama College)

Yoshiki Sunaga, Taifeng Wang, Takuya Arafune, Nobukazu Tsukiji, Nobukazu Takai, Haruo Kobayashi
(Gunma University)

This paper proposes SIDO (Single Inductor Dual Output) buck converters with soft-switching control. It uses a zero voltage switching (ZVS) to reduce switching loss of the power MOSFET and the SIDO converter supplies dual voltage outputs with a single inductor in order to reduce the number of total inductors. First, the operating principle and the simulation results are reported of a single converter. In this case, the negative voltage of the resonant capacitor reaches hundreds volt. This high voltage is clamped under twenty volt using a Zener diode. Next, there shows the simulation results of the SIDO converters using exclusive control method.

キーワード：スイッチング電源、ソフトスイッチング、SIDO 電源、クランプ回路

(Keywords: Switching Converter, Soft Switching, SIDO Converter, Clamp Circuit)

1. はじめに

今日、主要な電子機器には、多くのスイッチング電源が設けられ、小型・軽量・低コストの検討が日夜進められている。我々も多種の電源において、多くの SIDO (Single Inductor Dual Output) 電源⁽¹⁾⁽²⁾を提案してきた。一方、高効率を目指したソフトスイッチング方式において、今回シミュレーションにより SIDO 電源を実現したので報告する。幅広い出力条件に対する共振状態の維持にあたり高圧の負電圧が発生するが、ツェナーダイオードによるクランプ方式を検討する。

2. 降圧形ソフトスイッチング電源

〈2・1〉回路構成と動作原理

一般的な降圧形単出力ソフトスイッチング電源の構成を図 1 に、その動作原理波形を図 2 に示す。本方

式の回路構成は、従来のパワーステージ部であるメインスイッチ SW・環流ダイオード Di・インダクタ Lo・出力コンデンサ Co と負荷抵抗 RL に、新たに共振用のインダクタ Lr を Do と直列に接続し、共振用コンデンサ Cr を Do+Lr と並列に追加する。基本動作は一般の降圧形に準じているが、以下に図 2 の動作波形でモード別に共振動作を説明する。

ステート 1 (t0~t1)

t0 にて PWM 信号が H→L に転じ、スイッチはオフへ変化する。Cr の電荷はインダクタ電流 IL により放電し、コンデンサ電位 Vc は低下して 0V となる。この期間は、非常に短時間で終了する。

ステート 2 (t1~t2)

更に Vc は低下し続け、Di が導通し始めると共振用 Lr に電流が流れ始め Cr と共振する。共振電位 Vc は大きく負電位のピークを経由して、再び上昇し始めて

0V に達する。この間も電流 I_L は減少し続ける。

ステート 3 ($t_2 \sim t_3$)

電位 V_c が 0V 以上になっても $L_r \cdot C_r$ は共振を続け、遂には入力電圧 V_i に達する。この時点でコンパレータ 2 により $V_c > V_i$ が検出され、FF はセットされるとともに PWM 信号は High となりスイッチは ON に転じる。同時に鋸歯状波発生器をリセット/スタートさせる。なお、遅延により V_c は V_i を超えると、スイッチと並列接続のダイオードにより V_c は一定レベルを保つ。また、この期間は非常に短時間である。

ステート 4 ($t_3 \sim t_4$)

スイッチが ON となり、インダクタ電流 I_L は増加するとともに、出力電圧 V_o は上昇し始める。その誤差増幅出力 ΔV_o は徐々に低下し、鋸歯状歯信号と一致した時点で、FF をリセットする。結果、PWM 信号を Low としてスイッチをオフさせ、ステート 1 に戻る。

以上において、コンデンサの共振電圧 V_c は式(1)で表される。ZVS (Zero Voltage Switching) 動作を保証するには共振振幅が入力電圧 V_i より大きいことが必要であり、入出力条件 $V_i \cdot I_i = V_o \cdot I_o$ を用いて式(3)の 2 式が成立する。

$$V_c(t) = -I_o \cdot Z_r \cdot \sin \omega t \tag{1}$$

$$\text{ただし } \omega = 1/\sqrt{L_r \cdot C_r}, \quad Z_r = \omega \sqrt{L_r \cdot C_r} \tag{2}$$

$$V_i < |V_c| = I_o \cdot Z_r \quad \text{or} \quad V_o < I_i \cdot Z_r \tag{3}$$

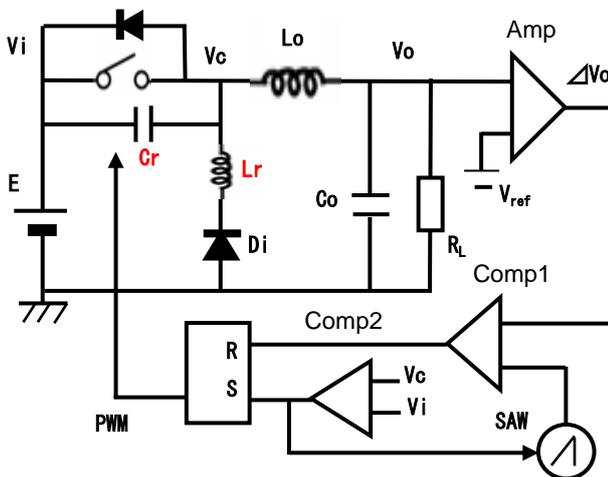


図 1. ソフトスイッチング方式降圧形電源
Fig.1 Circuit of soft switching buck converter

〈2-2〉シミュレーション結果

図 1 の構成および表 1 のパラメータによるシミュレーションの結果を、図 3～図 5 に示す。図 3 は主に共振電流波形であり、PWM 信号の OFF 期間に共振電圧 V_r は大きく負電圧に振れている。図では 1/10 に圧縮

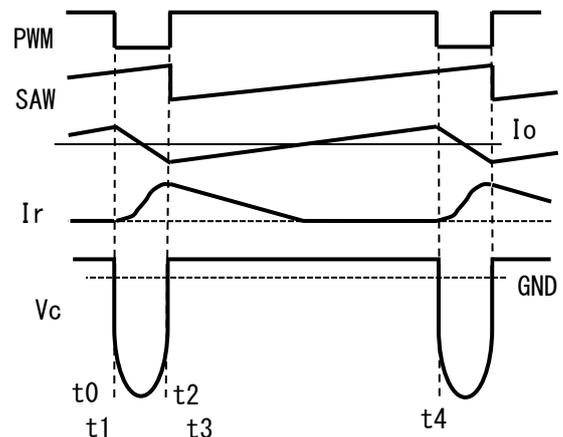


図 2. ソフトスイッチング電源の主要波形
Fig.2 Waveform of soft switching converter

して示してある。同時に共振電流 I_r は急激に増加し 500mA に達し、その後徐々に減少する。

動作周期は $T=2.3 \mu s$ (周波数は $F=430 \text{ kHz}$)、PWM オフ期間は約 $0.15 \mu s$ 、共振周期は 2 倍の $0.30 \mu s$ であり共振周波数 F_r は 3.3 MHz である。一方、共振電圧 V_c のハイレベルは V_i であり、負電圧のピーク値は $-118V$ に達する。ここで、出力電流 I_o 、共振インピーダンス Z_r と共振電圧振幅 V_r の関係を確認する。

$$Z_r = \sqrt{L_r/C_r} = \sqrt{20\mu/100p} = 447 \Omega \tag{4}$$

$$V_r = I_o \cdot Z_r = 0.25A \cdot 447 = 112 V \tag{5}$$

$$F_r = 1 / 2\pi \cdot \sqrt{L_r C_r} = 1 / 2\pi \sqrt{20\mu \cdot 100p} = 3.56 \text{ MHz} \tag{6}$$

式(5) (6)のように共振振幅および共振周波数は、実測値と理論値はよく一致している。なお、シミュレーションソフトは SIMPLIS を使用した。

ここで、図 3 に示すように共振振幅 V_r は大きく負電圧に振れ、この振幅電圧は式(1)より共振インピーダンス Z_r に依存している。一方、無負荷時の共振状態を保証するには、式(3)を満たすように Z_r を十分に大

表 1. シミュレーション回路のパラメータ
Table 1. Parameters of simulation circuit

V_i	10 V
V_o	5.0 V
L_o	200 μH
C_o	470 μF
L_r	20 μH
C_r	100 pF
I_o	0.50 / 0.25 A

きくする必要がある。図 4 に示した出力リップルは、定常時で 2mVpp 以下と十分小さく、過渡応答時のオーバーシュートは ±15mV 程度である。

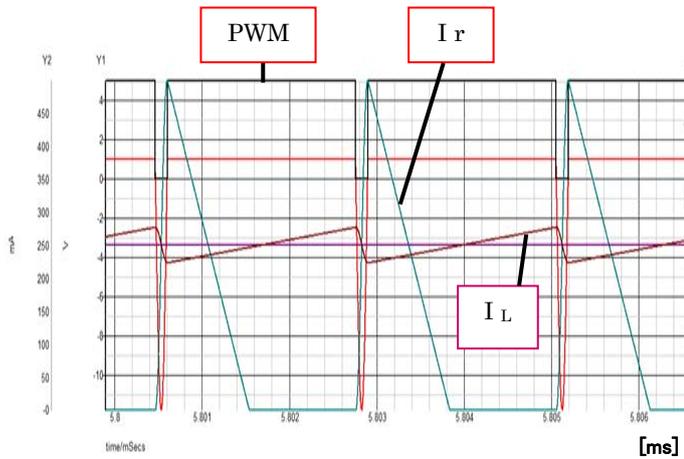


図 3. シミュレーション波形 (共振電流)

Fig. 3 Simulation result of soft switching converter

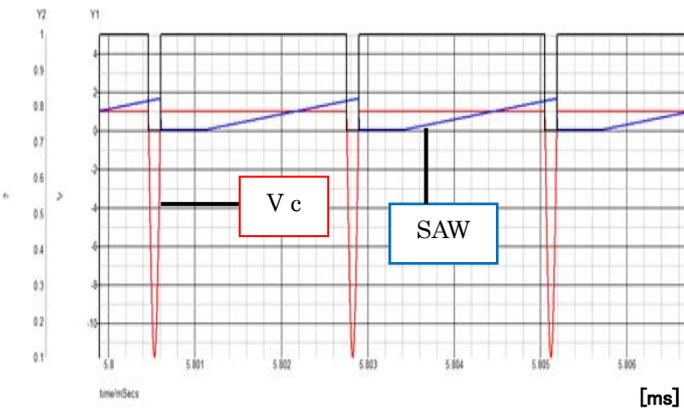


図 4. シミュレーション波形 (共振波形)

Fig. 4 Simulation result of soft switching converter

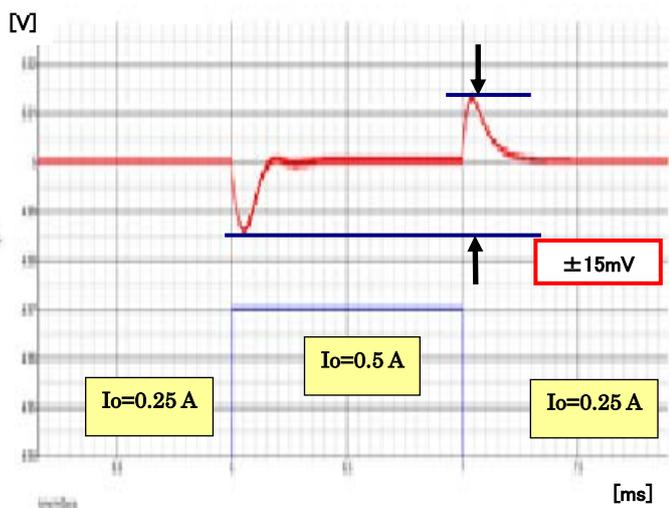


図 5. 出力電圧リップルと過渡応答特性

Fig. 5 Simulation result of load regulation

〈2・3〉共振条件の検討と高電圧対策検討

共振を起動し維持するには、式(8)の条件が必須である。また、無負荷時にも安定共振を維持するには、微小な内部負荷電流に対して Z_r を十分高くする必要がある。例えば、内部負荷電流を $MIN-I_o=1mA$ とすると、 $Z_r > \sqrt{L/I_o} = 10/\sqrt{1mA} = 10k\Omega$ となる。ここで $C_r=100pF$ とした場合、 $L_r > 10mH$ と非常に大きな値となる。しかし、この条件で定常時の共振電圧を求めると、 $I_o=1A$ 時に $V_c=10kV$ にも達して、半導体の耐圧が問題となる。図 6 に示した負荷電流 I_L の変化 (0.25, 0.50, 0.75 A) に対する共振電圧 V_c (1/10 表示) の変化は、 I_L に比例していることが分かる。

この対策には V_c 電圧を小さく抑える必要があり、ツェナーにより共振電圧をクランプする方式を検討した。ダイオードとツェナーを直列接続して、共振電圧をクランプする方式を考えた。このクランプ方式によるソフトスイッチング電源のシミュレーション結果を、クランプの無い状態と切換え比較して図 7 に示す。通常時の共振電圧 V_c (1/10 表示) は 118V であり、クランプ回路により 23V に抑えられている。

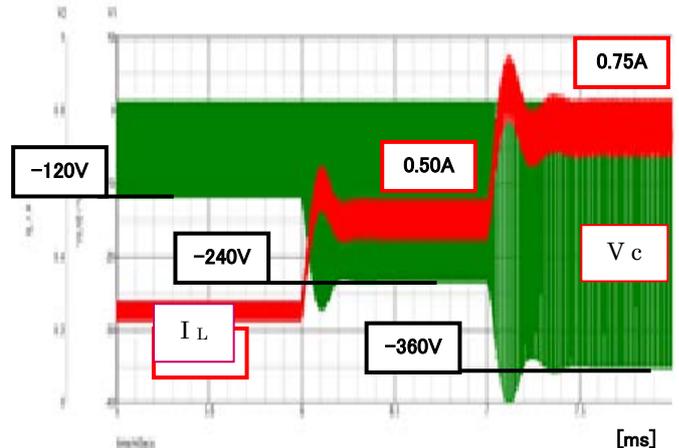


図 6 負荷電流 I_L vs 共振電圧 V_c

Fig. 6 Load current I_L vs resonant voltage V_c

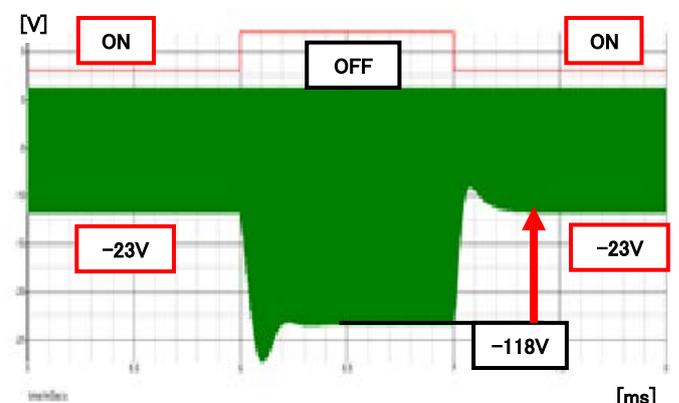


図 7 共振電圧のクランプ効果

Fig. 7 Resonant voltage w/o clamp circuit

3. 単インダクタ 2 出力 SIDO スイッチング電源

〈3・1〉 Exclusive 制御方式 SIDO 電源の概要

これまで Exclusive 方式を用いた SIDO 電源をいくつか提案していた。今回、図8のソフトスイッチング方式 SIDO 電源を、シミュレーションにより検討した。SIDO 電源では 1 個のインダクタで 2 個のサブコンバータを制御駆動する。このサブコンバータの制御切換え方式は、各誤差アンプの出力を比較して、その周期の制御対象となるサブコンバータを SEL 信号により排他的に決定する。

ソフトスイッチング電源の場合、スイッチが ON 時の V_c は一定であることより、PWM 信号の立上りで SEL 信号を決定する。この SEL 信号によりサブコンバータの SW を切換え制御するとともに、誤差電圧を選択出力する。

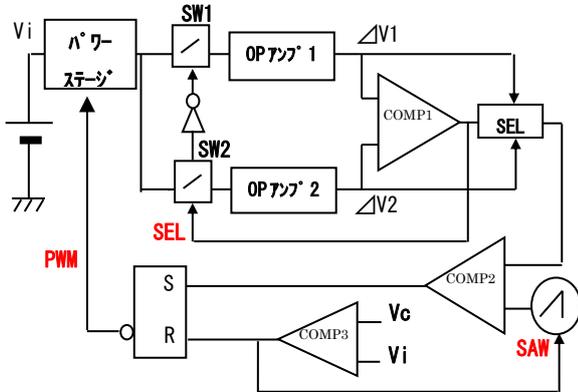


図 8 Exclusive 方式 SIDO 電源の構成
Fig. 8 SIDO converter with exclusive control

〈3・2〉 SIDO 電源のシミュレーション結果

シミュレーションにおける主要波形を図9に、各負荷変動時の過渡応答を図10に示す。なお、シミュレーション条件は、各出力電圧 $V1=6.0V$ 、 $V2=5.5V$ であり、定常負荷電流は $I1=0.5A$ 、 $I2=0.25A$ に設定した。図9において、SEL 信号に追従してインダクタの出力端電圧 V_{sw} が変化し、また制御周期、SEL 頻度および SAW 信号のピークレベルは切換わっているが、共振電圧のクランプ電圧は安定に $V_c=28V$ であることが確認できる。

また図10において、定常出力リップルは両出力とも $\Delta V_o < 10mV_{pp}$ であるが、 $I_o=0.4A$ 時のリップルはやや大きい。また、各サブコンバータの負荷電流変化 $\Delta I_o = \pm 0.2A$ に対する過渡応答は、クロス/セルフ・レギュレーション共に $\Delta V \approx \pm 10mV$ のオーバー/アンダー・シュートと十分に小さい。なお、セルフ・レギュレーションとは、それ自身の負荷変動による出力電圧変化を示す。

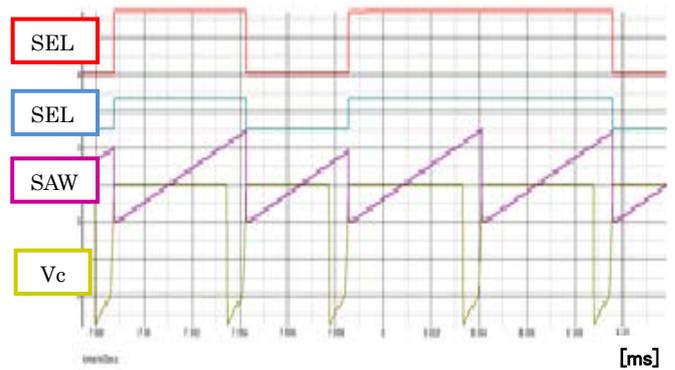


図 9 SIDO 電源のシミュレーション波形
Fig. 9 Simulated waveform of SIDO converter

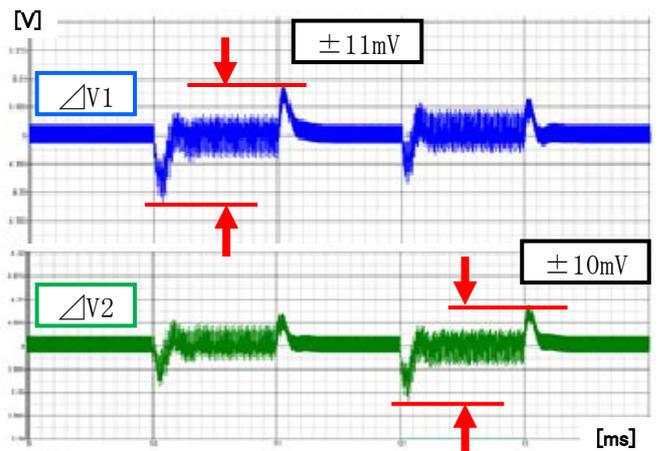


図 10 SIDO 電源の各出力電圧リップル
Fig. 10 Output voltage ripple of SIDO converter

4. まとめ

シミュレーションによりソフトスイッチング方式降圧型電源を検討し、共振電圧をツェナーにより 20V 程度にクランプする方式を開発した。更に SIDO 電源を検討し、各負荷電流が $I_o=0.4A$ のとき定常出力リップルは $\Delta V < 10mV_{pp}$ である。また、各負荷電流変化 $\Delta I_o = \pm 0.2A$ に対する過渡応答は、クロス/セルフ・レギュレーション共に約 10mV と小さい。

文 献

- (1) Y. Kobori, Q. Zhu, M. Li, F. Zhao, Z. Nosker, S. Shaiful, N. Mohyar, M. Onozawa, H. Kobayashi, et al "Single Inductor Dual Output DC-DC Converter Design with Exclusive Control", IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems, Kaohsiung, Taiwan (Dec. 2012).
- (2) Y. Kobori, N. Tsukiji, N. Takai, H. Kobayashi, "High Speed Response Single-Inductor Dual-Output DC-DC Converter with Hysteretic Control", ICPEIE, Venice, Italy (May. 2014)