

ZVS-PWM 制御単一インダクタ

2 出力スイッチング電源回路の実装と評価結果

須永 祥希*, 浅石 恒洋、王 太峰、築地 伸和
小堀 康功、高井 伸和、小林 春夫 (群馬大学)

Implementation and Evaluation of Single-Inductor Dual-Output DC-DC Converter with ZVS-PWM Control

Yoshiki Sunaga*, Koyo Asaishi, Taifeng Wang, Nobukazu Tsukiji,
Yasunori Kobori, Nobukazu Takai, Haruo Kobayashi (Gunma University)

In this paper, we propose a Single-Inductor Dual-Output (SIDO) converter with ZVS-PWM control. A single-Inductor Mulch-Output (SIMO) DC-DC converter can generate various supply voltages with one inductor which can realize small size. Zero Voltage Switching (ZVS) can reduce switching loss that leads to high efficiency. First, we describe design and experimental results of a Single-Inductor Single-Output (SISO) boost converter with ZVS-PWM control and we show that efficiency is increased by 3.7%. Then, we show measured results of the characteristic of ZVS-PWM SIDO Converter.

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、ゼロボルテージスイッチング

Keywords : Switching Converter, Soft Switching, SIDO Switching, Zero Voltage Switching

1. はじめに

今日、多くの電子機器は多種多様な直流電圧を必要とし、これらの電圧を供給するために多くのスイッチング電源が設けられている。社会の要求としてスイッチング電源の小型化、高効率化、軽量化、低コスト化は必要不可欠であり、電源に用いられるインダクタやコンデンサなどの大型素子の数が増えることは大きな問題であった。

スイッチング電源の小型化手法として、1つのインダクタにより複数の直流電源を出力する単一インダクタ多出力 (Single-Inductor Multi-Output: SIMO) 電源が検討されており、特に単一インダクタ 2 出力 (Single- Inductor Dual-Output: SIDO) 電源に関する報告(1)がされている。

一方、スイッチング電源の高効率化の手法として、ソフトスイッチング方式の一つであるゼロ電圧パルス幅変調 (Zero Voltage Switching-Pulse Width Modulation: ZVS-PWM) 制御方式によるスイッチング電源の報告(2),(3)もされている。

今回、小型化等の利点をもつ SIDO 電源に ZVS-PWM を適用させ、高効率化を試みた。本論文では SIDO 電源において、昇圧型のコンバータに焦点を当て、ZVS-PWM 制御スイッチング電源のシミュレーション検討及び実装確認し、その動作と効率等の諸特性を調査した。

2. ZVS-PWM 制御 SISO 昇圧型電源

〈2.1〉動作原理

図 1 に ZVS 制御単一インダクタ単一出力 (Single-Inductor Single-Output: SISO) 昇圧型電源を示し、モード別に図 2 を用いて動作を説明する。

モード 1(~)

$i_m = 0$ を検知して、PWM が Lo から Hi になりスイッチ SW が ON する。インダクタ電流 i_L が増加を始め、エネルギーが L に充電される。この時の i_L の傾きは i_m / L で表される。

モード 2(~)

負帰還の制御回路により、PWM が Hi から Lo になりスイッチ SW が ON から OFF になる。この時、 L と C の共振によって i_m が上昇する。

モード 3(~)

i_m は出力電圧 V_o とダイオードの順方向バイアス V_D の和まで上昇すると、ダイオード D が導通して共振状態は停止する。この時の i_L の傾きは $(i_m - i_D) / L$ となる。インダクタのエネルギー放電により、ダイオードを介して出力コンデンサ C が充電される。この間インダクタ電流は減少を続け、 i_L にて L は全エネルギーを放出し反転電流となる。このモードでは i_m は $i_L + i_D$ に保たれる。

モード 4 (~)

インダクタ電流の反転によりダイオード D が OFF して再び L と C_r は共振状態となり、 i_L は放電を始め v_{sw} は下降する。その後 i_L のタイミング、つまり $i_L = 0$ の時にスイッチ SW の両端電圧差が $0V$ となり、スイッチを ON することにより ZVS 動作を行う。 i_L で PWM が Hi となりモード 1 へと戻る。この PWM 信号の Hi 期間を制御することで、出力電圧 V_o を一定に保つ。

以上の動作より、コンデンサの共振電圧 v_{cr} およびインダクタの共振電流 i_{Lr} は次式(1)(2)で表される。インダクタ電流は負荷への方向を正とした。

$$i_L(t) = (I_{Lr} - I_o) \cdot \cos \omega t + I_o \quad (1)$$

$$v_{cr}(t) = -\{(I_{Lr} - I_o)/\omega C_r\} \cdot \sin \omega t \quad (2)$$

$v_{cr}(t)$ の最小値は $\cos \omega t = -1$ の時で、その値は $-I_{Lr} + 2I_o$ となる。スイッチの切り替え条件は $v_{sw} \leq 0$ であることから、この回路の入出力電圧の条件式(6)が導かれる。

$$-I_{Lr} + 2I_o \leq 0 \quad \therefore I_o \geq \frac{1}{2} I_{Lr} \quad (3)$$

3. ZVS-PWM 制御 SISO 昇圧型電源回路

〈3-1〉シミュレーション回路

図 3 に ZVS-PWM 制御昇圧型 SISO 電源の回路構成を示す。SISO 電源は、インダクタの先に 2 つの出力 V_{o1} 、 V_{o2} を有し、インダクタ電流 i_L の供給先を SEL スイッチで選択する。SEL スイッチは SEL 信号によって制御され、この信号は ZVS Comp と SEL Comp の 2 つのコンパレータと、D-Flip-Flop から生成される。SEL Comp は、各エラーアンプの出力 (ΔV_{o1} , ΔV_{o2}) を比較して、その出力信号が D-FF の D 端子に入力される。ZVS Comp は v_{sw} と GND を比較 ($v_{sw} = 0$ を検出) し、その出力が D-FF の Clock へと入る。これにより、誤差電圧の大きくなった出力へ、パワーステージからの電流が供給される。

〈3-2〉シミュレーション結果

SISO 昇圧型電源の動作波形を図 4 に、出力電圧リップルを図 5 に示す。また使用パラメータを表 1 に示す V_{o1} 側の PWM の動作周波数を f_{sw1} 、 V_{o2} 側の PWM の動作周波数を f_{sw2} とした。SEL 信号が Hi で V_{o1} が選択され、 $i_L = 0$ のタイミングで PWM が Hi になっていることから、ZVS 制御が正常に行われていることが確認できる。電圧リップルはともに $10mV_{rms}$ 以下である。

〈3-3〉実装回路

ZVS-PWM 制御昇圧型 SISO 電源回路の実装を行った。回路図は図 3 と同様である。動作波形を図 6 に、各出力拡大波形を図 7 に示す。また、回路に使用した素子値を表 2 に示す。図 7 から、各出力電圧リップルは V_{o1} 側が $40mV_{rms}$ 、 V_{o2} 側が $52mV_{rms}$ である。

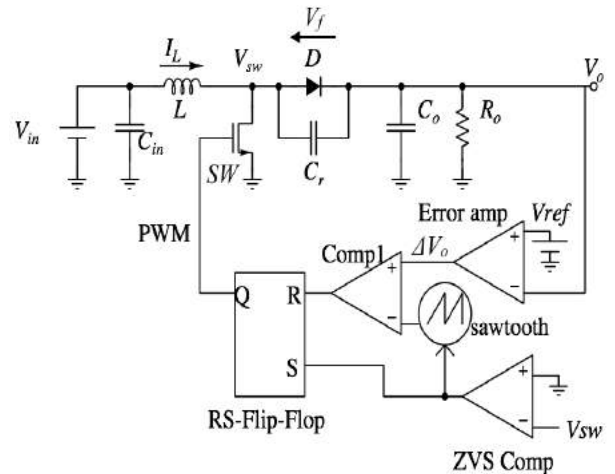


図 1 ZVS-PWM 制御昇圧型 SISO 電源の回路構成
Fig.1 SISO boost converter with ZVS-PWM control

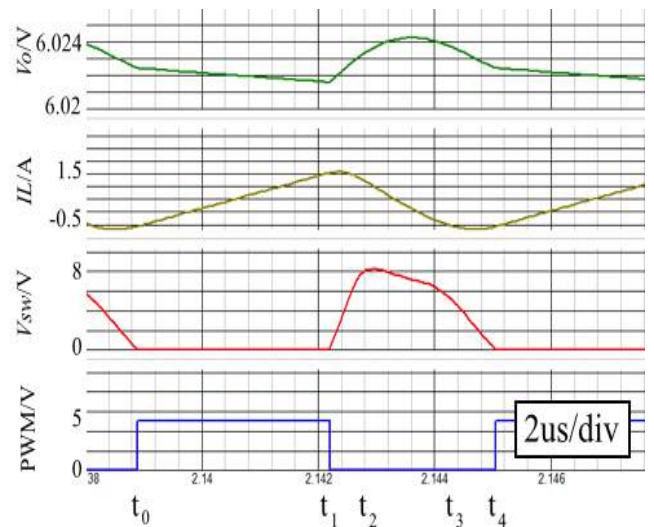


図 2 ZVS-PWM 制御昇圧型 SISO 電源のシミュレーション結果

Fig.2 Waveforms of SISO boost converter with ZVS-PWM control (simulation results)

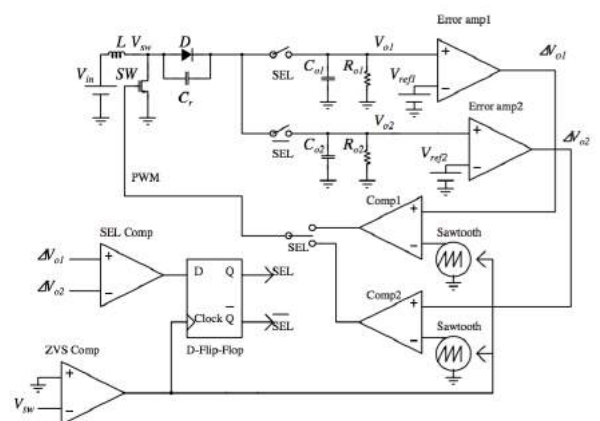


図 3 ZVS-PWM 制御昇圧型 SISO 電源の回路構成
Fig.3 SISO boost converter with ZVS-PWM control

4. ZVS-PWM 制御 SISO 電源回路の回路特性

〈4・1〉 効率測定

ZVS-PWM 制御昇圧型 SISO 電源の実装回路について、効率の測定を行った。図 8 に測定結果をまとめた。使用した回路の素子値を表 3 に示した。図 8 を見ると、通常の PWM 制御の場合効率のピークは 59.4% で ZVS 制御を適用すると効率は 63.1% となった。ZVS 制御を適用した場合、効率が 3.7% 改善された。今回の測定は SISO 電源回路で行ったが、SISO 電源回路は出力を並列に 2 つ交互に制御する方式であることから、SISO 電源回路と同等の効率改善効果を期待することができる。

〈4・2〉 負荷応答特性

ZVS-PWM 制御 SISO 電源回路について、負荷特性試験を行った。その結果を図 9 にまとめた。負荷電流を切り替えた過渡応答時に生じるオーバーシュートは ±20mV 程度である。

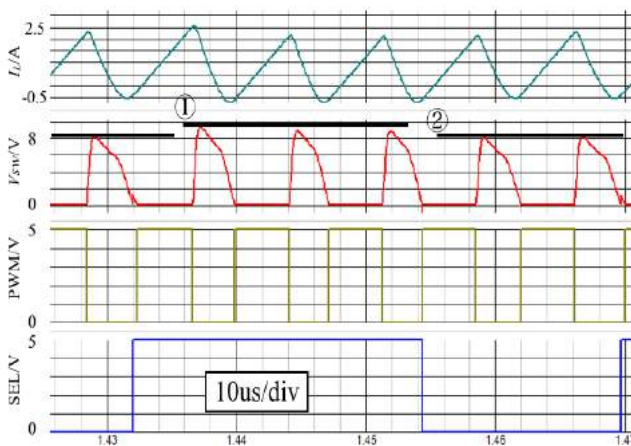


図 4 ZVS-PWM 制御昇圧型 SISO 電源のシミュレーション結果

Fig.4 Simulation results of the SISO boost converter with ZVS-PWM control

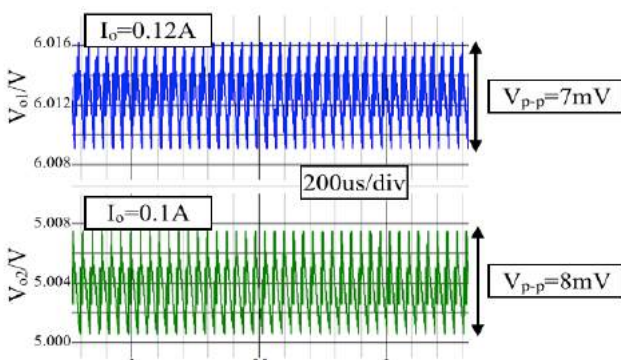


図 5 ZVS-PWM 制御昇圧型電源の各出力波形
Fig.5 Output waveforms of the SISO boost converter with ZVS-PWM control (simulation results)

表 1 ZVS-PWM 制御降圧昇圧型 SISO 電源のシミュレーション回路素子パラメータ

Table.1 Parameters of simulated SISO boost converter with ZVS-PWM control

V _{in}	2.5V
L ₁	3.9uH
V _{o1}	6V
V _{o2}	5V
C ₁ , C ₂	470uF
C ₃	470nF
I _{o1}	0.12A
I _{o2}	0.10A
f _{sw}	132.1kHz/132.1kHz

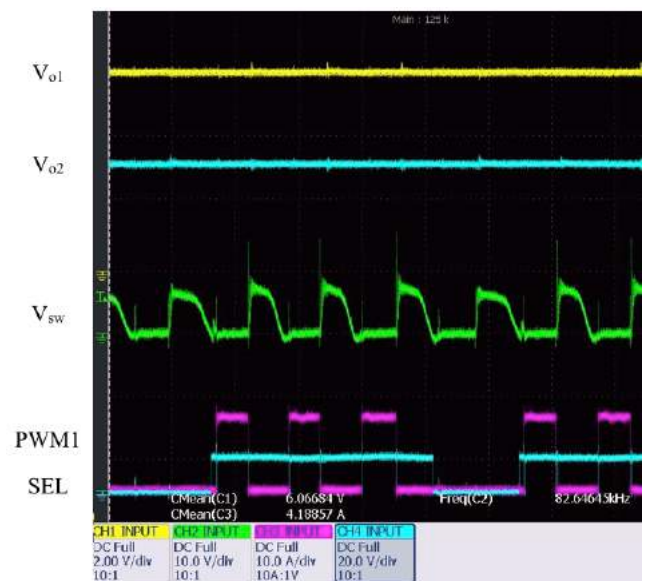


図 6 ZVS-PWM 制御昇圧型 SISO 電源の動作波形
Fig.6 Measured waveforms of the SISO boost converter with ZVS-PWM control

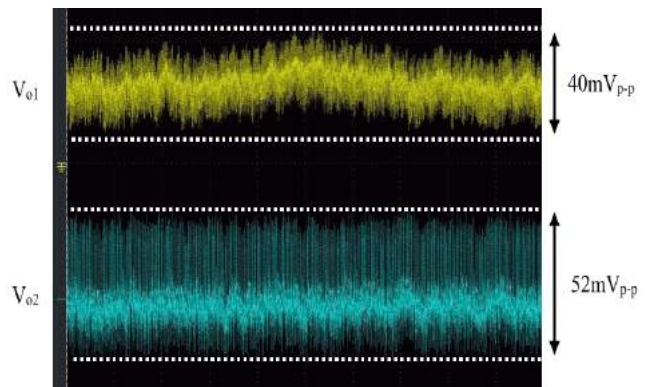


図 7 ZVS-PWM 制御昇圧型 SISO 電源の各出力波形
Fig.7 Measured output waveforms of the SISO boost converter with ZVS-PWM control

表 2 ZVS-PWM 制御昇圧型 SIDO 電源の
実装回路素子パラメータ

Table.2 Circuit parameters of the measured SIDO boost
converter with ZVS-PWM control

V_{in}	2.5V
L	3.9 μ H
V_{out}	6V
V_{sw}	5.1V
C_{out}	970 μ F
C_{in}	100nF
I_{out}	0.1A
I_{in}	0.1A
f_{sw} / f_{mod}	86.9kHz/76.9kHz

表 3 効率測定回路の素子パラメータ

Table.3 Parameters of the efficiency comparison circuits

	通常制御	ZVS 制御
V_{in}	2.5V	2.5V
L	5.6 μ H	5.6 μ H
V_{out}	6V	6V
C_{out}	970 μ F	970 μ F
C_{in}	100nF	100nF
f_{sw}	200kHz	200kHz

5. まとめ

ZVS-PWM 制御の降圧/昇圧型 SIDO 電源への適用を提案し、シミュレーションと実装回路による動作確認を行った。定常状態の出力電圧リップルはシミュレーションで $V_{in}=6V/V_{out}=0.12A$ 、 $V_{in}=5V/V_{out}=0.1A$ の時、両者とも 10mV 以下と出力電圧の 0.4%程度である。さらに実装回路では、 $V_{in}=6V/V_{out}=0.1A$ の時 40mV、 $V_{in}=5V/V_{out}=0.1A$ で 52mV であり、これは V_{out} 側では出力電圧の 0.67%、 V_{in} 側では 1.02%に相当する。これは電源回路にしては少々大きいリップルであるが、現在の実装はユニバーサル基板上で行っており、これによる GND ノイズの影響を受けているため、実際の出力リップルはこれよりも小さいものと考えられる。また、ZVS-PWM 制御を用いることで、電源回路のスイッチング損失の低減を検討した。SISO 昇圧電源の実装回路において効率の測定を行ったところ、通常の制御方式に比べ、ZVS 制御を適用することで効率は 3.7%改善した。また ZVS-PWM 制御昇圧型電源の負荷応答を調べたところ、負荷電流を切り替えた時に生じるオーバーシュートは±20mV 程度であった。

文 献

- (1) Y. Kobori, Q. Zhu, M. Li, F. Zhao, Z. Nosker, S. Shaiful, N. Mohyar, M. Onozawa, and H. Kobayashi: "Single Inductor Dual Output DC-DC Converter Design With Exclusive Control", IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems, Kaohsiung, Taiwan, (Dec. 2012).
- (2) N. Tsukiji, Y. Kobori, N. Takai, and H. Kobayashi: "Single-Inductor Dual-Output DC-DC Converter Design With ZVS-PWM Control", The 17th International Conference on Analog VLSI Circuits, Ho Chi Minh City, Vietnam, (Oct. 2014).
- (3) Z. Siyuan, and G. Rincon-Mora: "A high efficiency, soft switching DC-DC converter with adaptive current-ripple control for portable applications", Circuit and Systems II: Express Briefs, IEEE Transactions on, pp.319-323, (Apr. 2006).

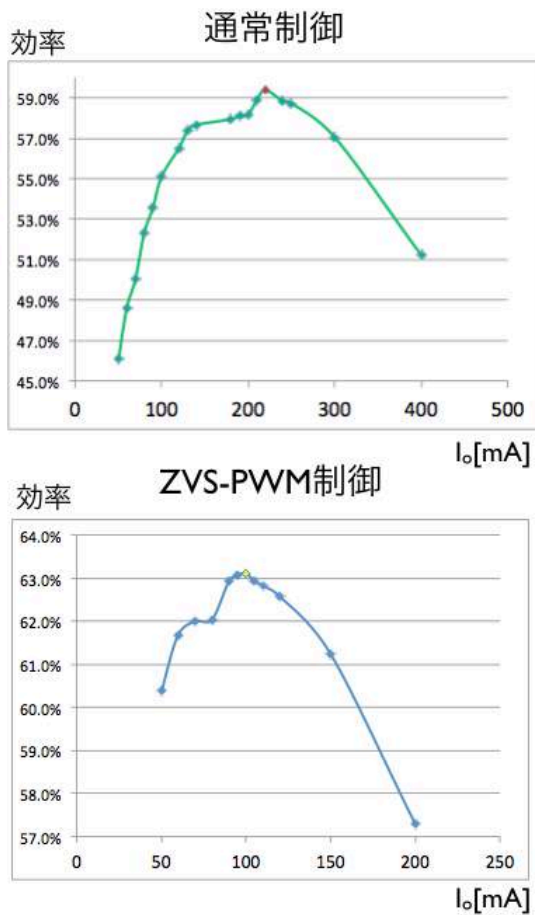


図 8 昇圧型電源の効率比較

Fig.8 Efficiency comparison for boost-converters

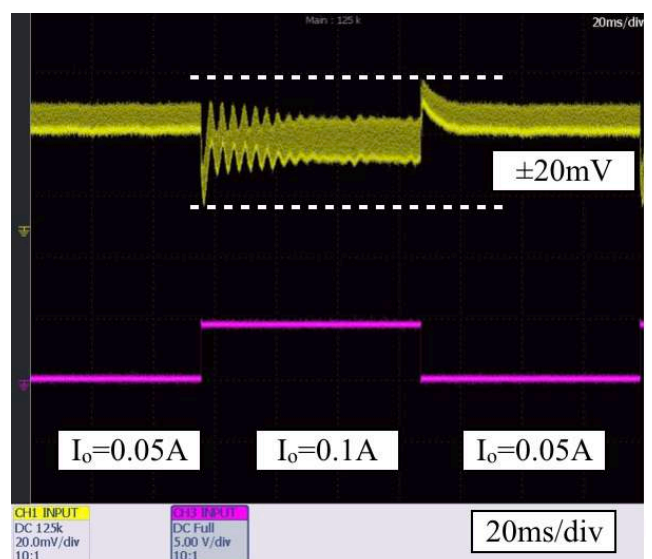


図 9 ZVS-PWM 制御昇圧型 SISO 電源の負荷特性

Fig.9 Measured load regulation characteristics of the
ZVS-PWM SISO boost converter