

昇圧形ソフトスイッチング電源の EMI 低減とリップル補正技術

関根 有希* 小堀 康功 片山 翔吾 桑名 杏奈 小林 春夫 (群馬大学)

EMI reduction and ripple compensation method for soft-switching boost converter

Yuki Sekine*, Yasunori Kobori, Shogo Katayama, Anna Kuwana, Haruo Kobayashi (Gunma University)

キーワード：ソフトスイッチング, EMI 低減, リップル補正, 昇圧形, 全波形

(Soft-switching, EMI reduction, Ripple compensation, Boost converter, Full waveform)

1. はじめに

高速動作するスイッチング電源では、動作が非常に高周波となるため、スイッチングによる電力損失が無視できなくなる。これまでスイッチングロスが少ない降圧形ソフトスイッチング電源を検討し、ゼロ電圧スイッチング(ZVS)による電力損失の低減を報告した。本論文では、昇圧形電圧共振ソフトスイッチング電源に対して EMI の低減を検討し、それにより生じる出力電圧リップルの補正技術を報告する。

位相変調回路を用いたスペクトラム拡散による EMI の低減や、SAW パルスの傾きに着目した、スイッチのオンオフの時間比(デューティ比)の補正による変調リップルの低減をシミュレーションにより検証した。シミュレーションは SIMPLIS で行った。

2. 昇圧形ソフトスイッチング電源と原理

(2-1) 昇圧形ソフトスイッチング電源

基本的な昇圧形スイッチング電源の構成を図 1 に示す。この回路は、入力電圧は DC-DC コンバータにより、任意の出力電圧に変換される。その後、出力電圧は、基準電圧と比較されその誤差電圧が増幅される。その誤差電圧をもとに PWM パルスは、スイッチのオンオフの時間比(デューティ比)を変化させ、誤差電圧を抑えるように出力電圧は調整される。

一方、昇圧形ソフトスイッチング電源では、図 2 のように、インダクタ L_r とキャパシタ C_r からなる共振回路を結合する。スイッチに並列に接続された共振用のキャパシタ C_r により、スイッチにかかる電圧 V_{sw} の波形の一部は正弦波形になる。これにより、図 3 の通り、スイッチのターンオフ時においてゼロ電圧スイッチングが行われる。また、共振電圧 V_{sw} をゼロ電圧と比較し、 $V_{sw} \approx 0V$ の時点でスイッチを ON させて ZVS 動作を実現する。図 3 の波形では、遅延により不十分な状態であるが今後に改善する。

さらに、本回路では、スイッチのボディダイオードの動

作を防止するために、スイッチに直列にダイオードを接続した。これにより、 V_{sw} は全波形となっている。

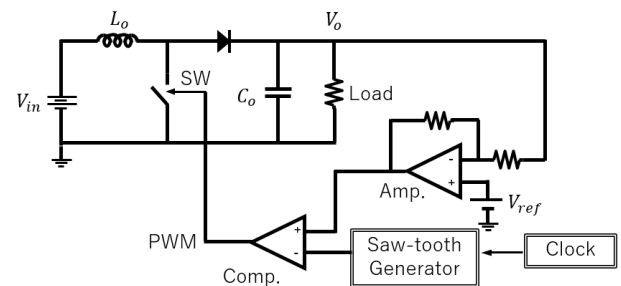


図 1 基本昇圧形スイッチング電源

Fig. 1. switching boost converter

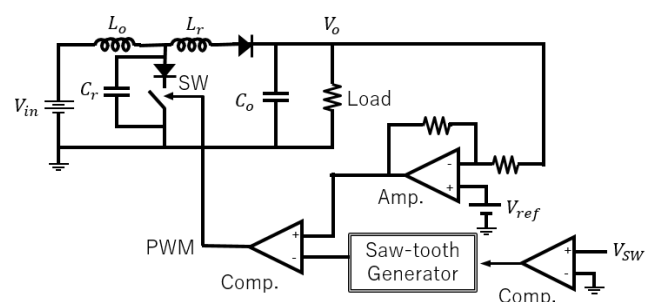


図 2 昇圧形ソフトスイッチング電源

Fig. 2. Soft-switching boost converter

なお、図 2 の回路において、主な回路構成素子の値を次のように設定した。 $V_{in}=3.0V$, $V_{ref}=5.0V$, アンプ $G=100k/1k=100$, $L_o=50\mu H+2m\Omega$, $C_o=470\mu F+2m\Omega$, $L_r=10\mu H+2m\Omega$, $C_r=2nF+0m\Omega$, 負荷抵抗 20Ω 。

また、スイッチのオフ期間に V_{sw} にノイズが発生し、 $V_{sw} = 0V$ 検出用コンパレータが誤動作したため、図 4 のように、ノイズ除去用にローパスフィルタを SAW 発生回路に追加した。素子値は、 $C=1nF$, $R=200\Omega$, $V_{cc}=12V$,

$I_{SAW}=5.0\text{mA}$, $C_{SAW}=2\text{nF}$ とした。

結果は、図5の通り、出力電流が $I_o=0.25\text{A}$ のとき、動作周波数 $F_{op}=402\text{kHz}$, 出力電圧 $V_o=5.013\text{V}+3.4\text{mVpp}$, 電圧変換率 $M=5.013/3=1.67$ であった。

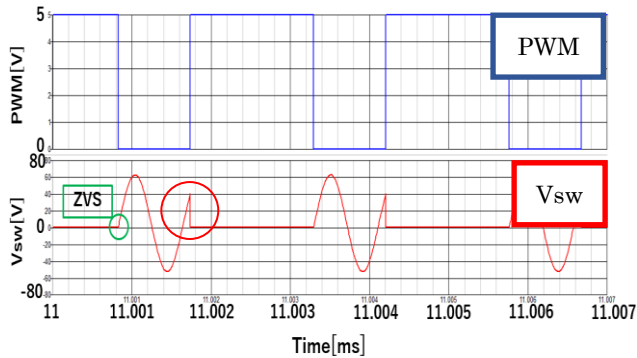


図3 ゼロ電圧スイッチング
Fig. 3. Zero-voltage switching

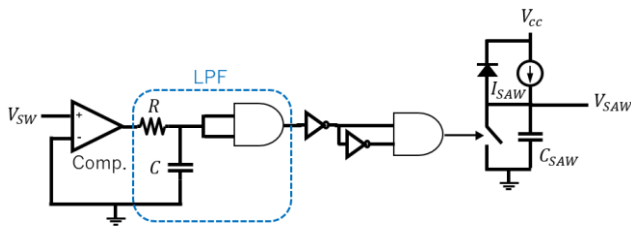


図4 SAW発生回路
Fig. 4. Saw-tooth generator

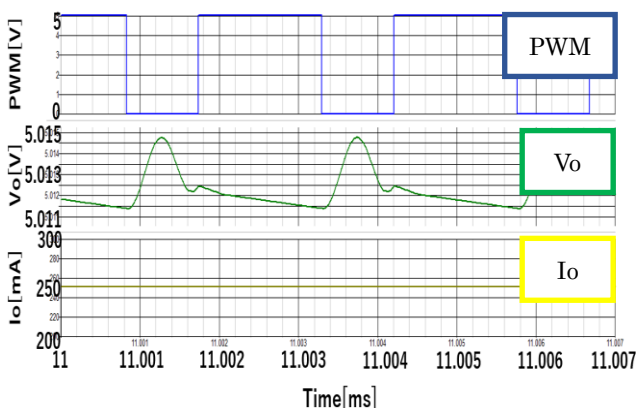


図5 昇圧形ソフトスイッチング電源の動作波形
Fig. 5. Operation waveform of Soft-switching boost converter

3. 昇圧形電源の ESI 低減とリップル補正

(3-1) 基本変調方式

EMI ノイズにおける電磁波ノイズの低周波成分は、スイッチング制御信号の高調波ノイズに起因する。

通常、EMI 低減は SAW パルスのクロック周波数を変調することにより実現するが、本回路はクロックレス回路であるので、代わりに図6の位相変調回路を PWM 信号部分に追加することで、PWM パルスの Neg エッジを位相変調する。Lr と Cr は、スイッチのターンオフと同時に電圧共振を開始するので、この位相変調により、SAW パルスを制御する Vsw は周波数変調され、PWM パルスのスペクトラム拡散が起こる。その結果、PWM における高調波のスペクトラムレベルは低下し、EMI は低減する。

なお、図内の素子の値は、 $C_1=2\text{nF}$, $C_2=200\text{pF}$, $I=1.0\text{mA}$, $V_b=2.0\text{V}$, $V_{cc}=12\text{V}$ であり、変調信号は周波数 1.0kHz , $V_m=\pm 1.5\text{V}$ の三角波を用いた。

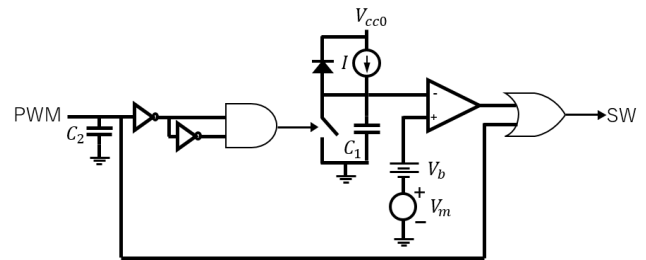
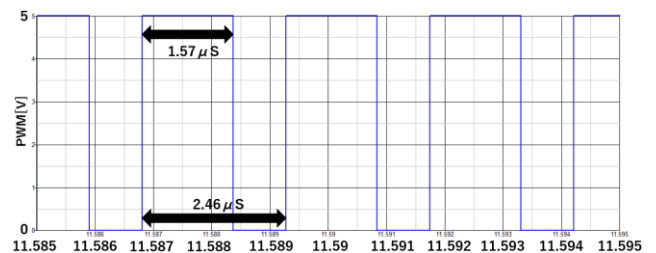
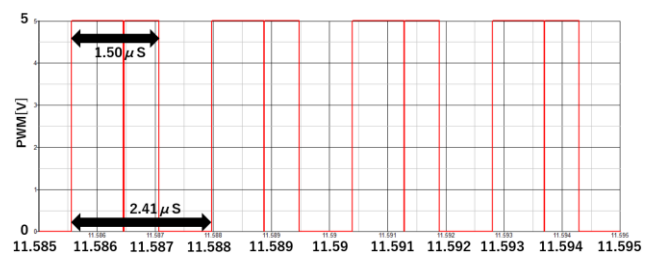


図6 PWM信号の位相変調回路
Fig. 6. PWM phase modulation circuit

図7に位相変調前後での PWM の波形、図8に PWM のスペクトラム拡散を示す。



(A) 位相変調前の PWM の波形



(B) 位相変調後の PWM の波形

図7 位相変調前後の PWM の変化

Fig. 7. PWM before and after phase modulation

図 8 より、位相変調の結果、PWM パルスのスペクトラムレベルは 2.9V から 0.9V へと、およそ 10.2 dB 減少したことが分かる。

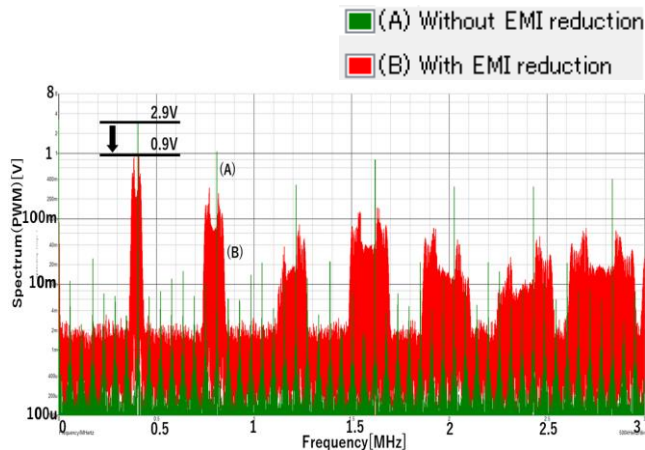


図 8 PWM のスペクトラム拡散

Fig. 8. PWM spectrum and frequency before and after EMI reduction

〈3-2〉 リプル補正

EMI を低減するために PWM 波の Neg エッジを位相変調すると図 9 のように、変調に用いた三角波に対応したリップルが出力電圧に現れる。

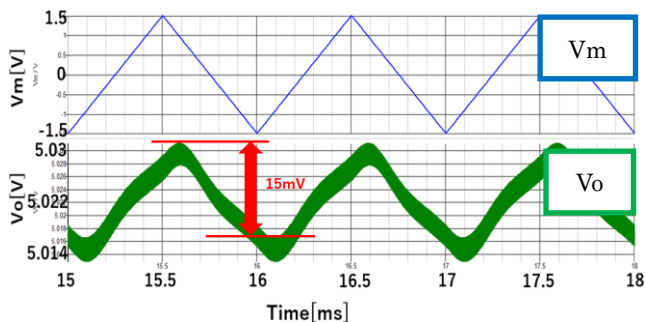


図 9 昇圧全波形式電源の変調リップル

Fig. 9. Modulation ripple of soft-switching boost converter

これは、位相変調により、PWM 波のデューティ比が変化してしまっていることが原因である。なお、各 ON デューティ比の値は図 4 より、位相変調前は $D=1.57/2.46 \cdot 100=63.8\%$ 、位相変調後は $D=1.50/2.41 \cdot 100=62.2\%$ である。

そこで V_m に応じて SAW の傾斜部を逆変調させ、デューティ比を改善するために、図 4 で示した SAW 発生回路に、図 10 のように、三角波の変調信号 V_m に比例して電流が増加する電流源 $GI=680 \mu S$ を追加した。

その結果、図 11 の通り SAW の傾きは、補正前は $6.03/2.41=2.50V/\mu s$ であったのに対し、補正後は

$7.01/2.49=2.82V/\mu s$ と変化した。これにより、PWM パルスは図 12 のようになり、ON デューティ比は $1.57/2.49 \cdot 100=63.1\%$ と位相変調をかける前に近い値まで改善した。

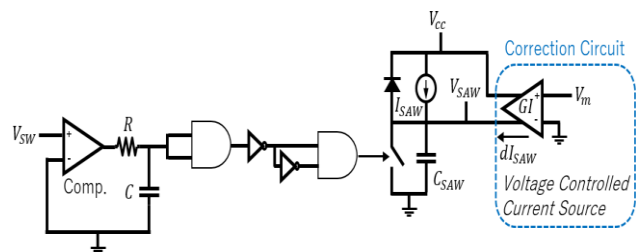
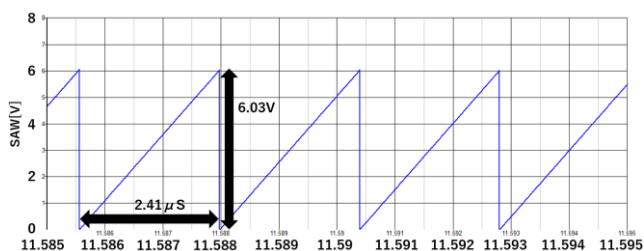
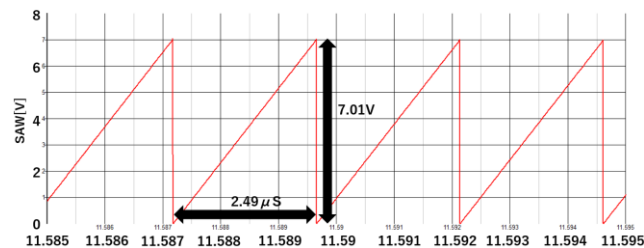


図 10 変調リップル補正回路

Fig. 10. Modulation ripple compensation circuit



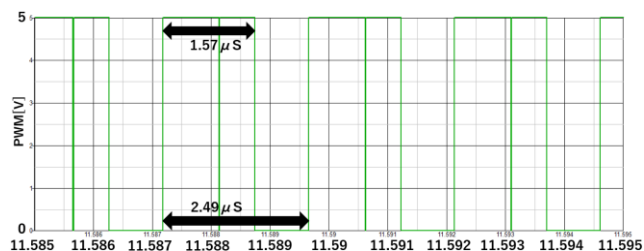
(A) 補正前の SAW の波形



(B) 補正後の SAW の波形

図 11 補正前後の SAW の変化

Fig. 11. SAW before and after ripple compensation



(C) 図 12 補正後の PWM の波形

Fig. 12. PWM after ripple compensation

補正前後での出力電圧のリプルの変化を図 13 に示す。補正前は、変調リプルは 15 mV であったが、補正後は 3mV に改善している。

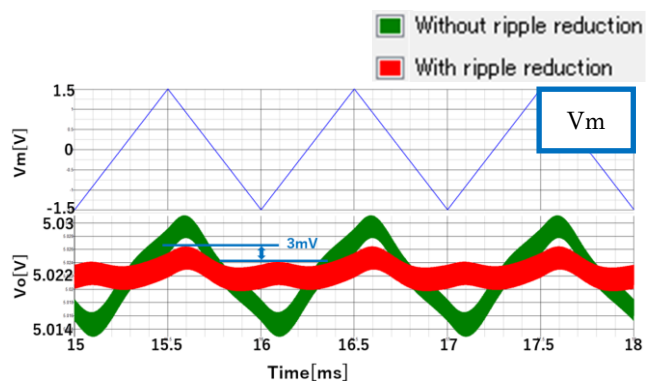


図 13 補正前後の変調リプル

Fig. 13. Modulation ripple before and after ripple compensation

4. まとめ

本論文では、昇圧形ソフトスイッチング電源の EMI 低減とリプル補正を行った。

EMI の低減については、PWM 信号のターンオフのタイミングを位相変調することで、スペクトラム拡散を実行した。また同時に、変調に伴い出力電圧のリプルが増大する理由として、PWM パルスのデューティ比の変化に着目し、電圧制御型電流源の追加により、SAW パルスの傾きを変えることでリプルが改善することを、シミュレーションを通して確認した。

5. 今後の課題

本回路は、過渡応答特性が不十分であり、起動時間も約 7ms と長い。今後は、位相遅れ補償を追加し、電流増加時の応答特性の改善を行う。

また、SAW 発生回路に追加したノイズ除去用のローパスフィルタによる遅延の影響で、スイッチのターンオン時にゼロ電圧スイッチングが実行できていない。今後は V_{sw} の 0V 検出タイミングの変更などを行い、ターンオン時においてもゼロ電圧スイッチングを行う手法を検討していく。

文 献

- (1) 原田耕介：「スイッチングコンバータの基礎」，コロナ社，東京(1992)
- (2) 山崎 弘郎・仁田 周一・斉藤 成一・古谷 隆志・上野 美幸：「デジタル回路の EMC」，オーム社，東京(2002)
- (3) 平地 克也：「ソフトスイッチング技術の最新動向」，電学誌，Vol.125, No.12 pp.754-757 (2005)
- (4) K. Taniguchi： “Soft-switching Power Factor Corrected Buck Converter” ，Memoirs of the Osaka Institute of

Technology, Series A, Vol.50, No.1 pp.15-35 (2005) (in Japanese).

谷口 勝則：「ソフトスイッチング降圧形高力率コンバータ」，Memoirs of the Osaka Institute of Technology, Series A, Vol.50, No.1 pp.15-35 (2005)