

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



アウトライン

1. 研究背景と研究目的
2. 昇圧形ソフトスイッチング電源と原理
3. 昇圧形電源のEMI低減
4. 昇圧形電源のリプル補正
5. まとめと今後の課題

アウトライン

1. 研究背景と研究目的
2. 昇圧形ソフトスイッチング電源と原理
3. 昇圧形電源のEMI低減
4. 昇圧形電源のリプル補正
5. まとめと今後の課題

1. 研究背景と目的

スイッチング電源の高速応答が進む

⇒スイッチング動作の高周波数化

⇒スイッチングロス・EMIノイズの増大

スイッチにおける電力損失・ノイズの改善が必要

目的達成の手段

スイッチにおける電力損失・ノイズの改善方法

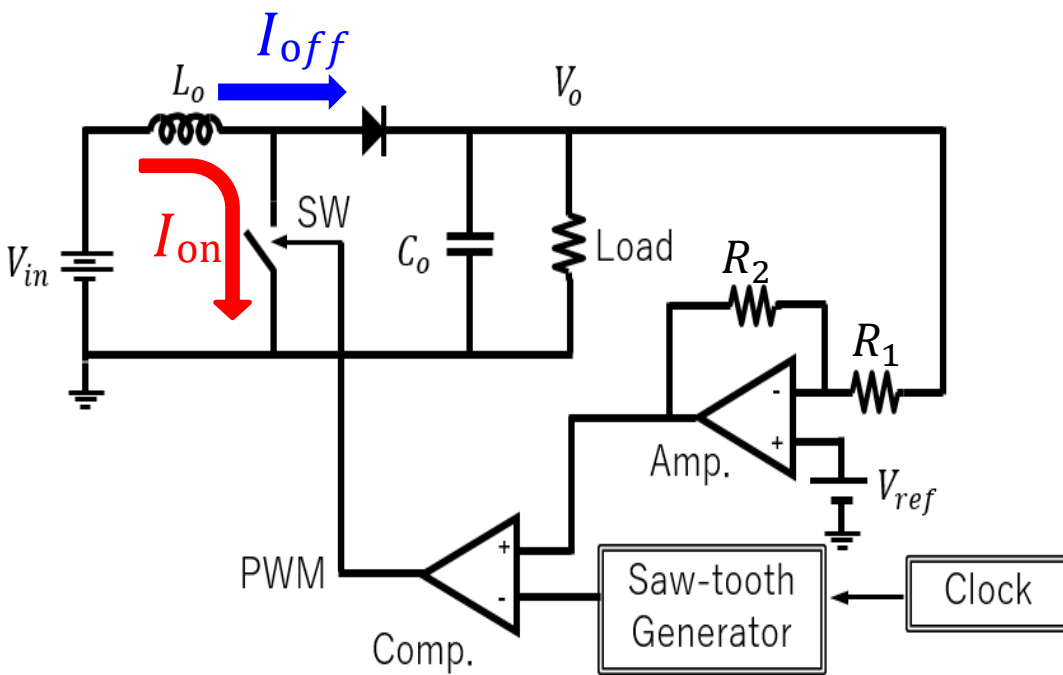
- スイッチングロスの改善
⇒ソフトスイッチング電源
- EMIノイズの低減
⇒スイッチング信号の周波数変調

アウトライン

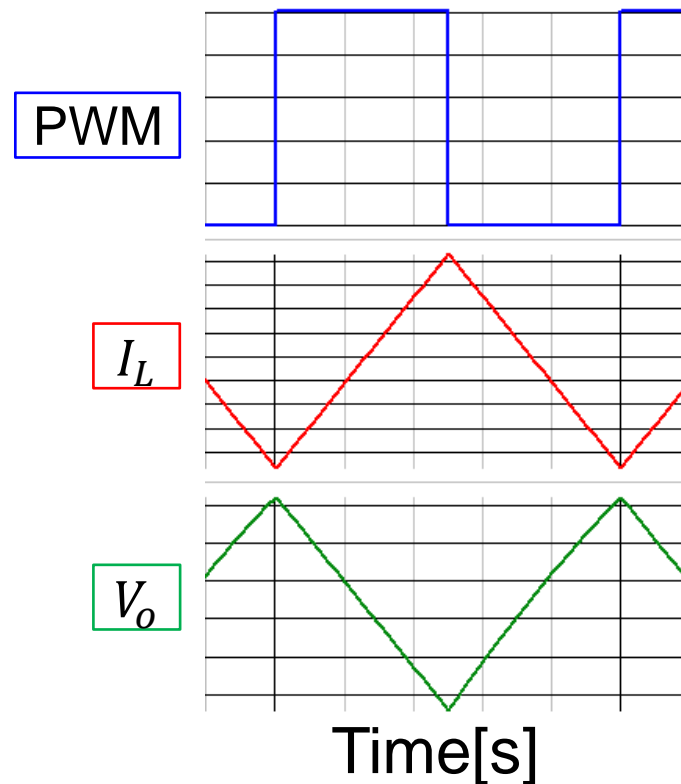
1. 研究背景と研究目的
2. 昇圧形ソフトスイッチング電源と原理
3. 昇圧形電源のEMI低減
4. 昇圧形電源のリプル補正
5. まとめと今後の課題

2.1 昇圧形スイッチング電源

- ① スイッチオン時: L にエネルギーを充電 $\Rightarrow V_o$ は減少
- ② スイッチオフ時: L のエネルギーを放電 $\Rightarrow V_o$ は増加



昇圧形スイッチング電源

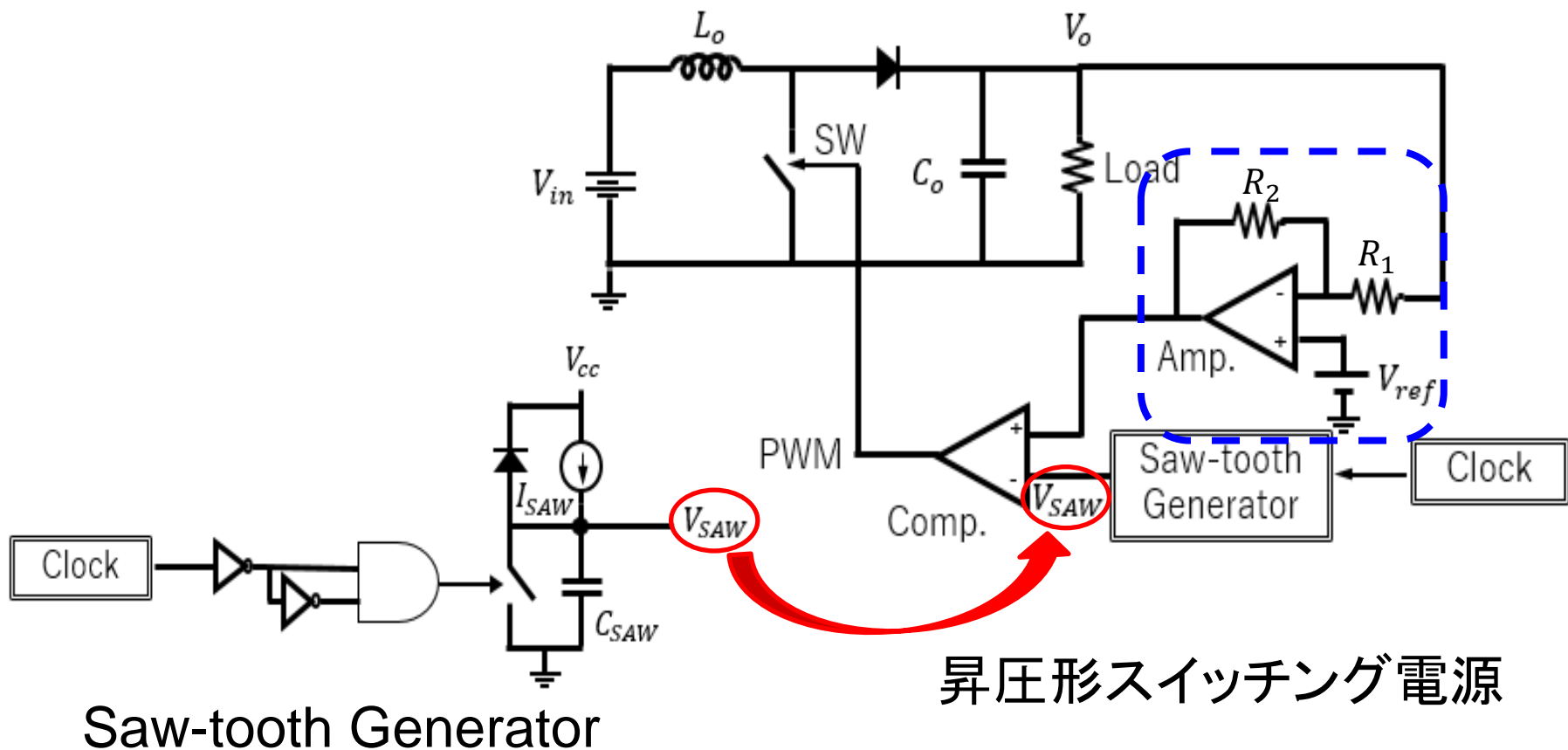


動作波形

昇圧形スイッチング電源

SAW発生回路: クロックに同期して発生

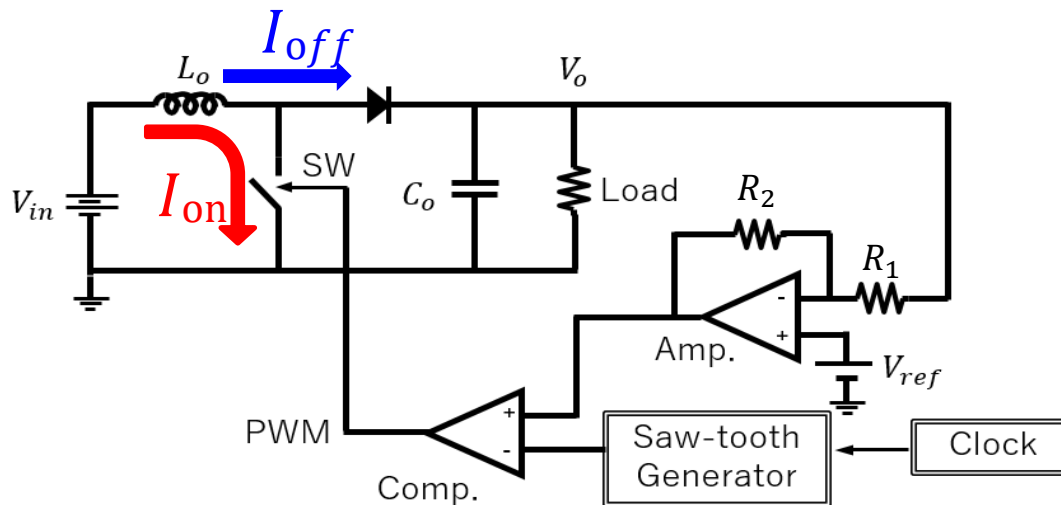
V_{ref} と V_o の誤差を増幅しPWMパルス幅設定



デューティ比と電圧変換率の関係

オンデューティ比(時比率): $D = \frac{T_{ON}}{T_{ON} + T_{OFF}}$

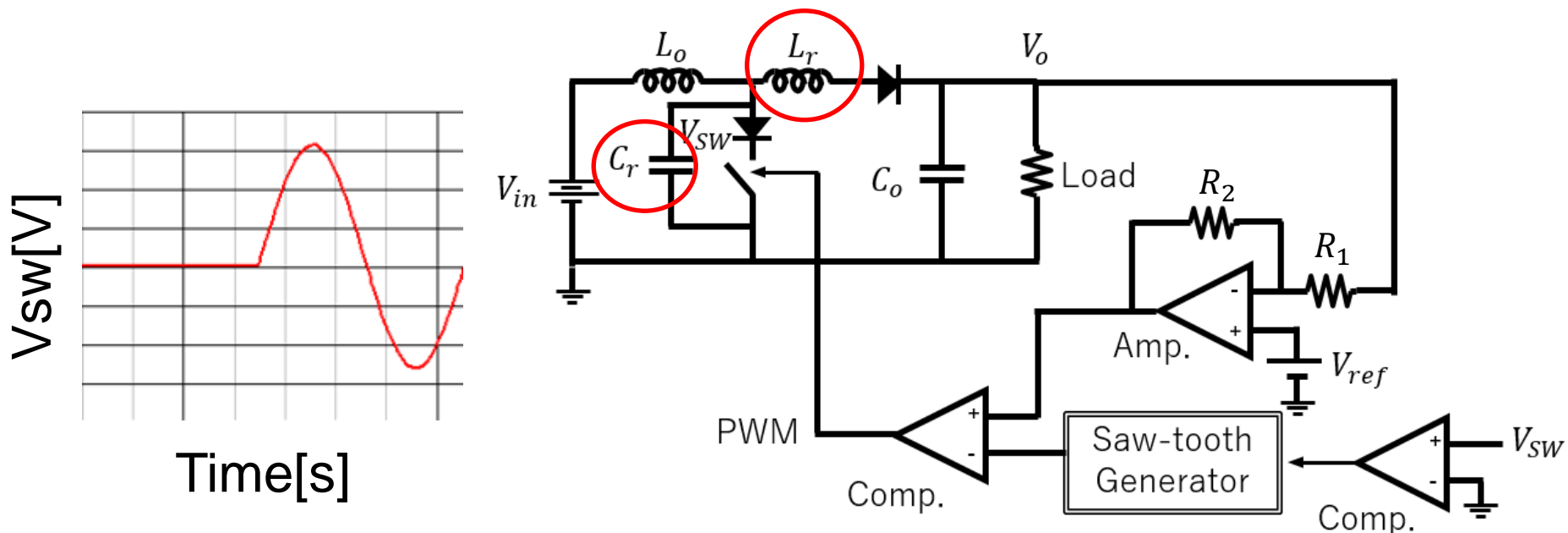
電圧変換率: $M = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{T_{ON} + T_{OFF}}{T_{OFF}} = \frac{1}{1 - D}$



昇圧形スイッチング電源

2.2 昇圧形ソフトスイッチング電源

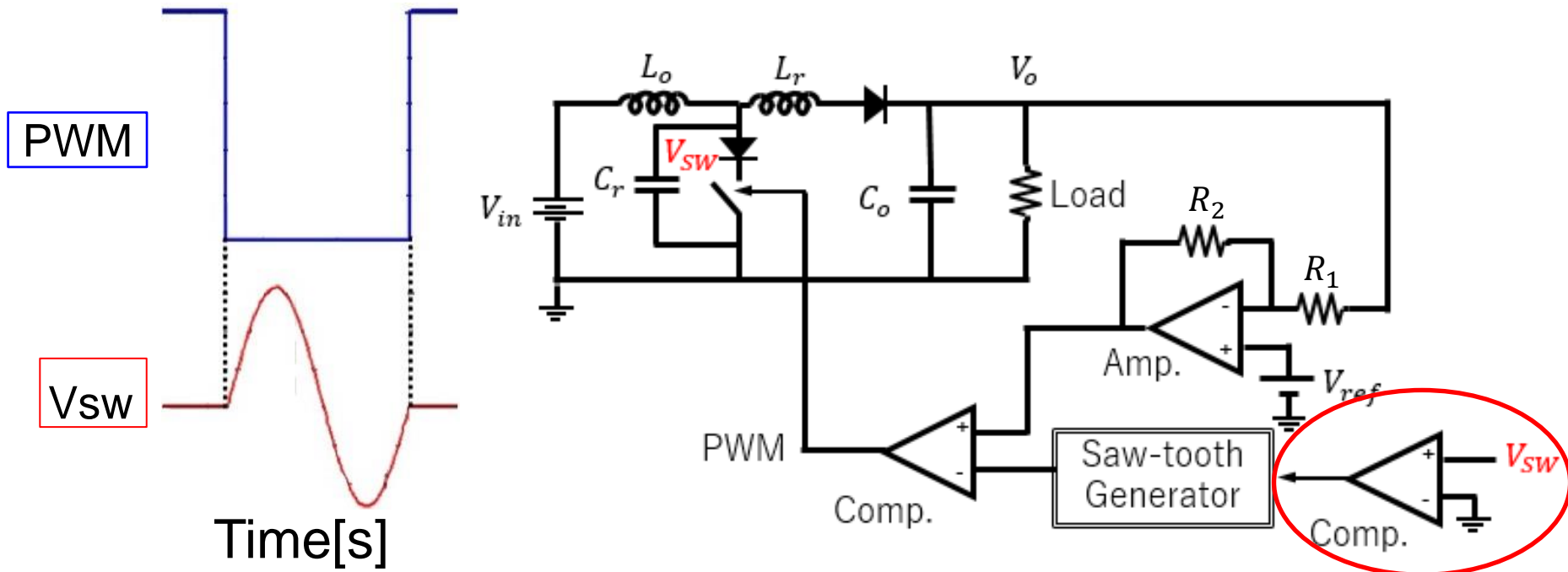
- インダクタ L_r とキャパシタ C_r からなる共振回路を結合
- 共振用のキャパシタ C_r により、 V_{sw} の波形は正弦波になる



昇圧形ソフトスイッチング電源

昇圧形ソフトスイッチング電源

共振電圧 V_{sw} をゼロ電圧と比較し、 $V_{sw} \doteq 0V$ の時点でスイッチをオンさせてZVS動作を実現する



共振動作とPWMの関係

昇圧形ソフトスイッチング電源

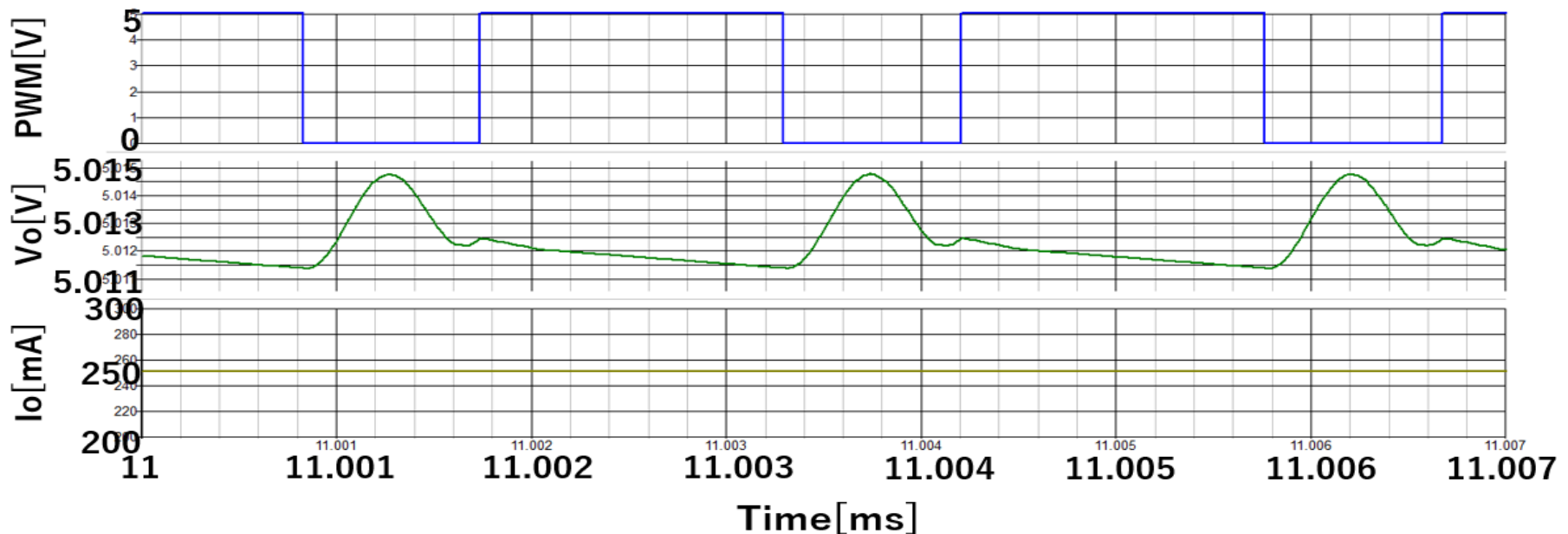
2.3 シミュレーション結果

出力電流 $I_o = 0.25\text{A}$ のとき
動作周波数 $F_{op} = 402\text{kHz}$

入力電圧 $V_{in} = 3.0\text{V}$
基準電圧 $V_{ref} = 5.0\text{V}$

出力電圧 $V_o = 5.013\text{V} + 3.4\text{mV}_{pp}$

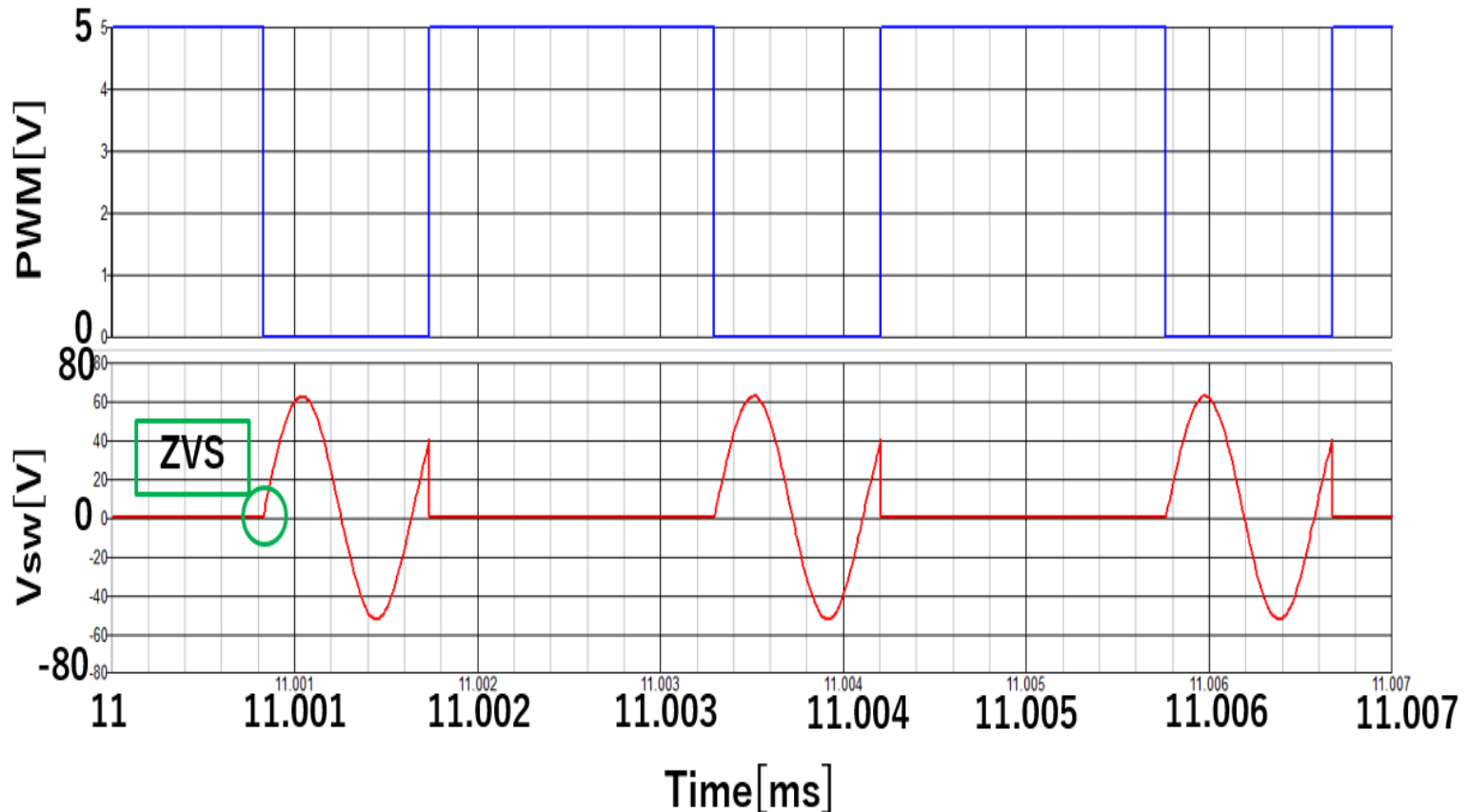
電圧変換率 $M = 5.013/3 = 1.67$



昇圧形ソフトスイッチング電源の動作波形

シミュレーション結果

ターンオフ時にゼロ電圧スイッチング(ZVS)



ゼロ電圧スイッチング

アウトライン

1. 研究背景と研究目的
2. 昇圧形ソフトスイッチング電源と原理
- 3. 昇圧形電源のEMI低減**
4. 昇圧形電源のリプル補正
5. まとめと今後の課題

3. EMIとは

EMI(ElectroMagnetic Interference)

放射妨害(電磁波ノイズ)

+伝導妨害(電源電圧/電流ノイズ)

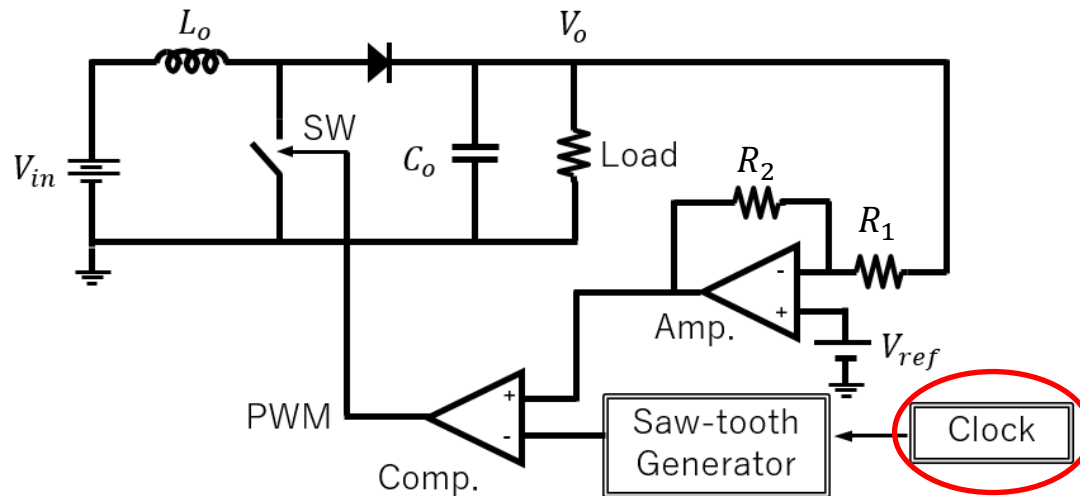
特に電磁波ノイズの低周波成分は

スイッチング制御信号の高調波ノイズに起因する

→PWMを周波数変調することでEMIを低減する

PWMの周波数変調

PWMを周波数変調するには
本来はクロックを周波数変調する



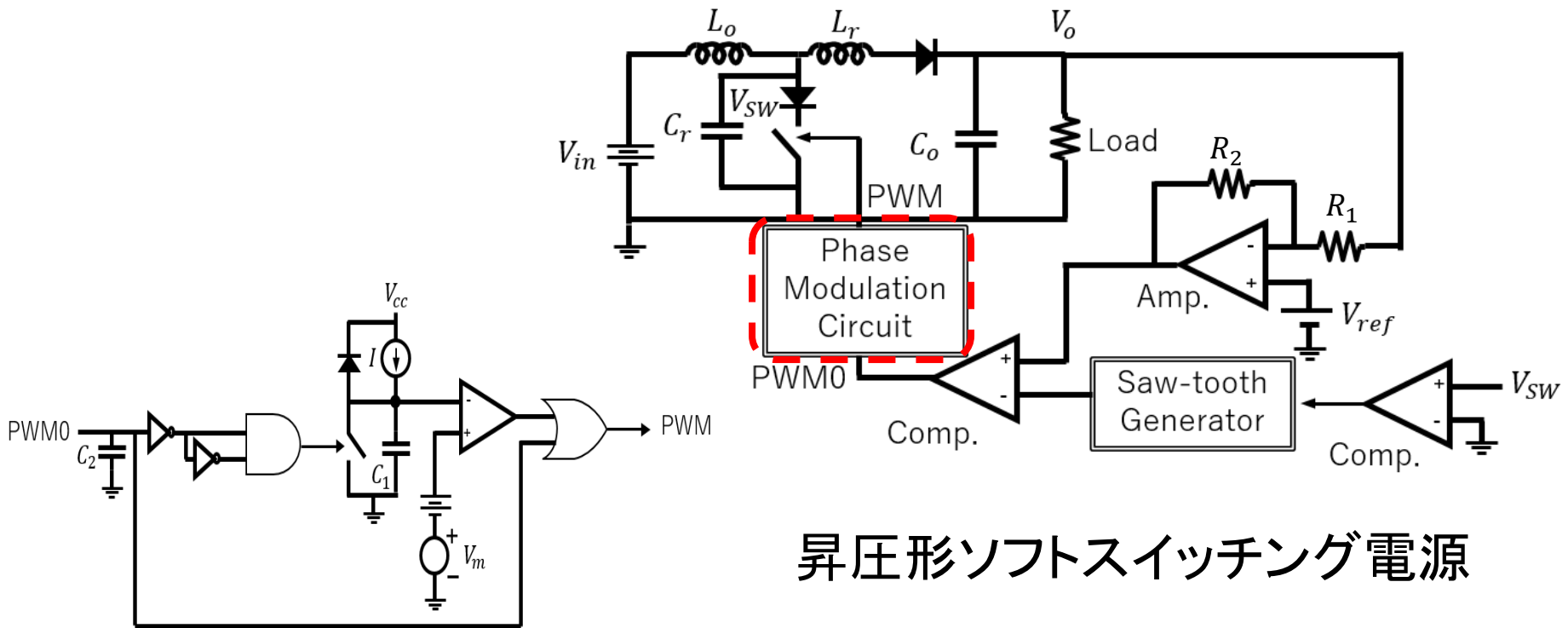
昇圧形スイッチング電源

しかし、本回路はクロックレス回路である

位相変調回路

PWMに位相(周期)変調回路を追加

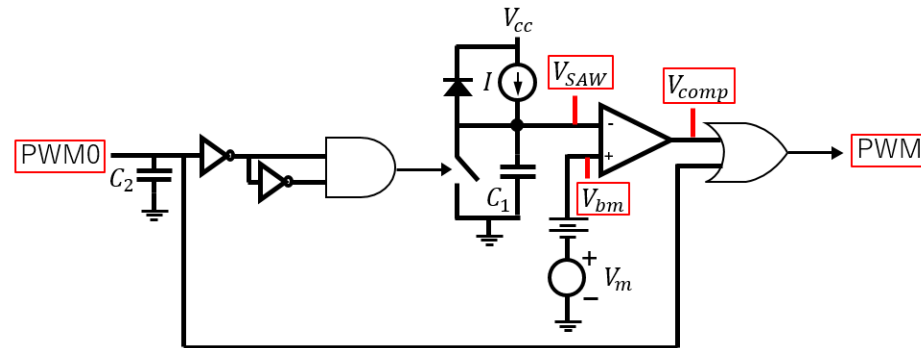
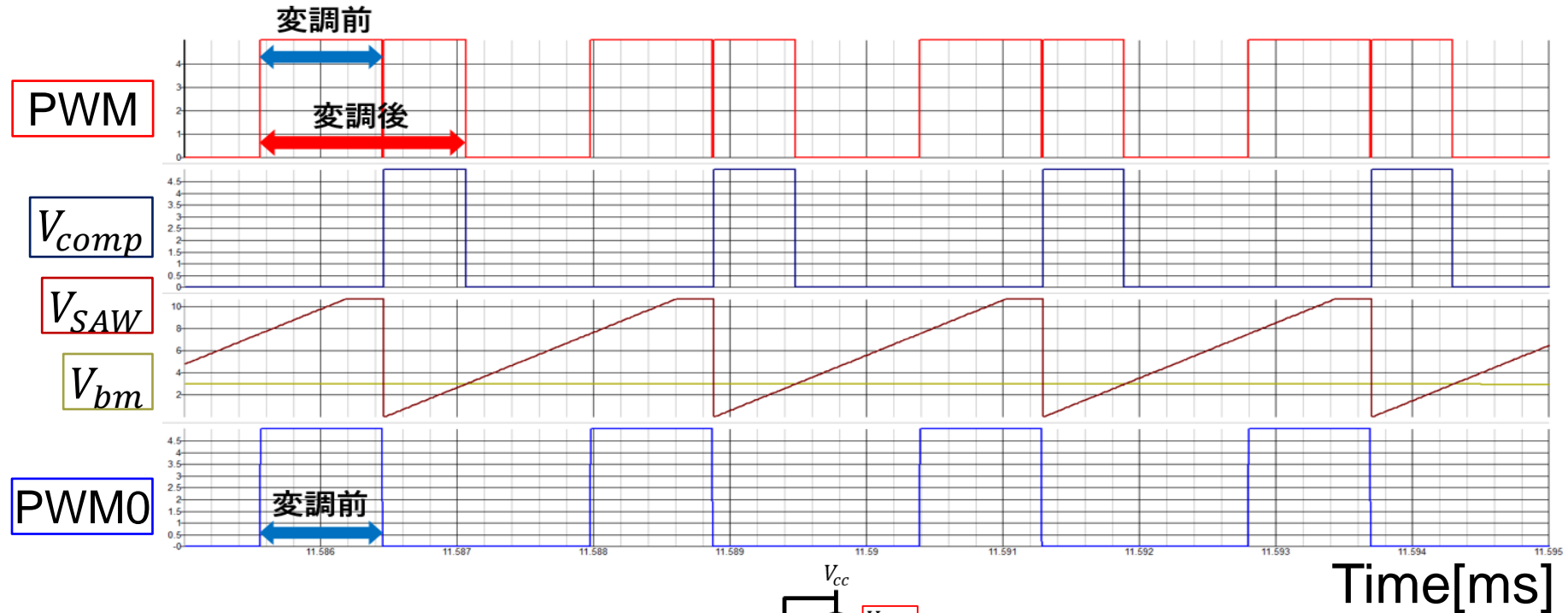
→PWMパルスの立ち下がリエッジを位相変調する



PWM phase modulation circuit

位相変調回路の動作原理

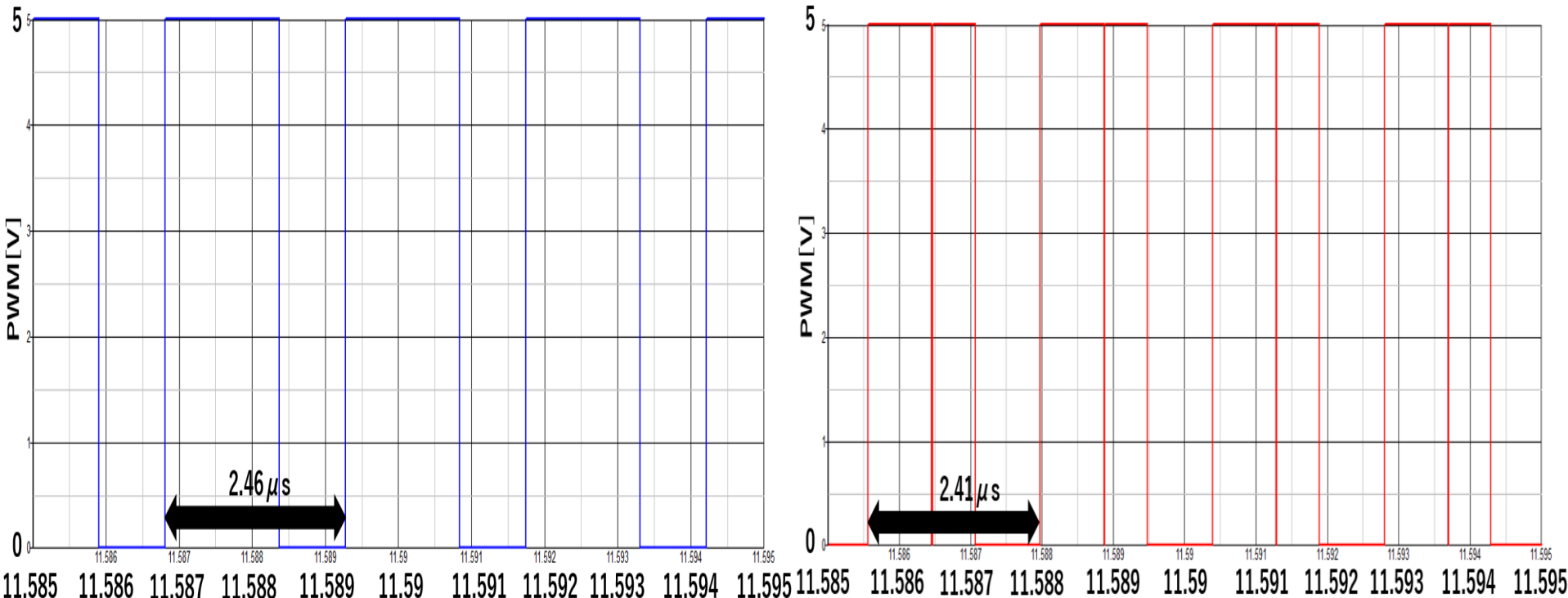
立ち下がリエッジが位相変調され、**オン時間が変化**



PWM信号の位相変調回路

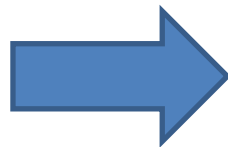
位相変調回路の動作原理

位相変調と同時に、PWMは**周波数変調**もされる



位相変調前

$2.46 \mu\text{s}$



位相変調後

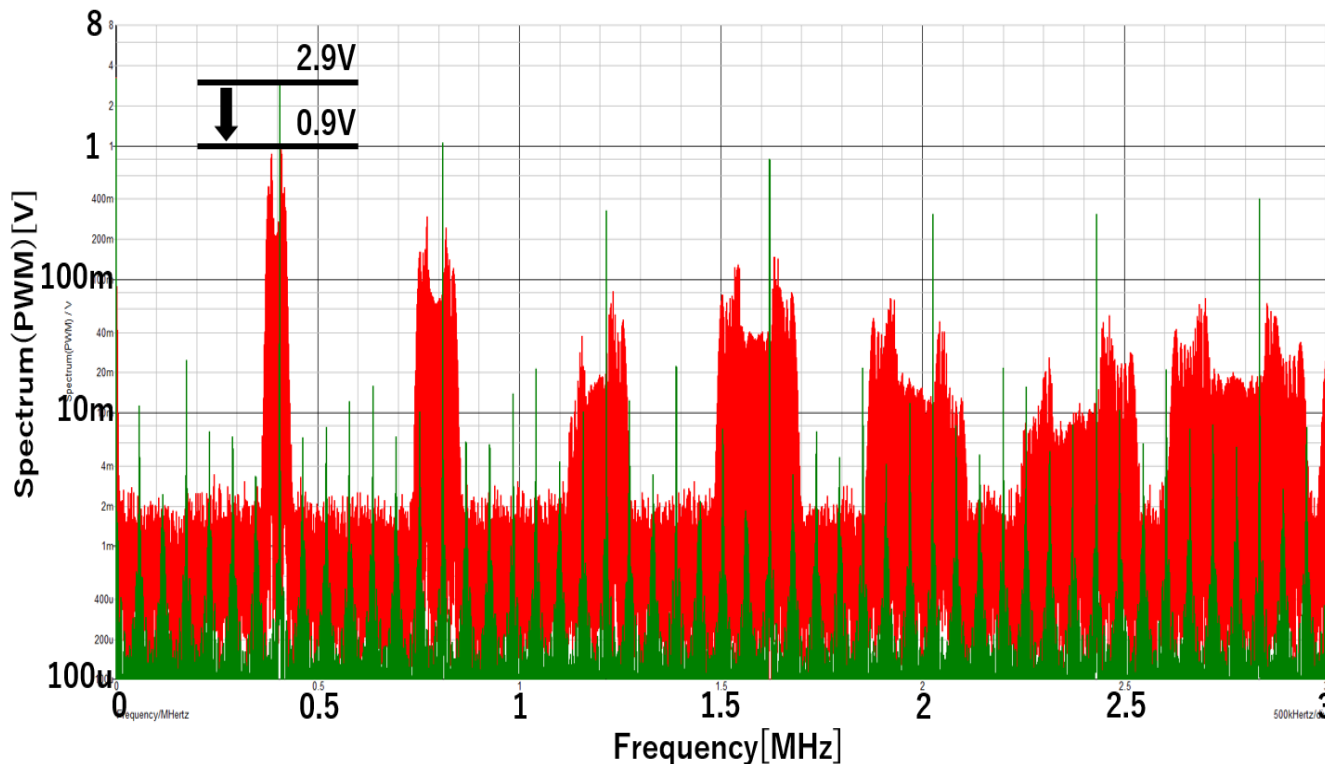
$2.41 \mu\text{s}$

SWノイズのスペクトラム拡散

PWMパルスのスペクトラムレベル

2.9V→0.9V

10.2dB減少した



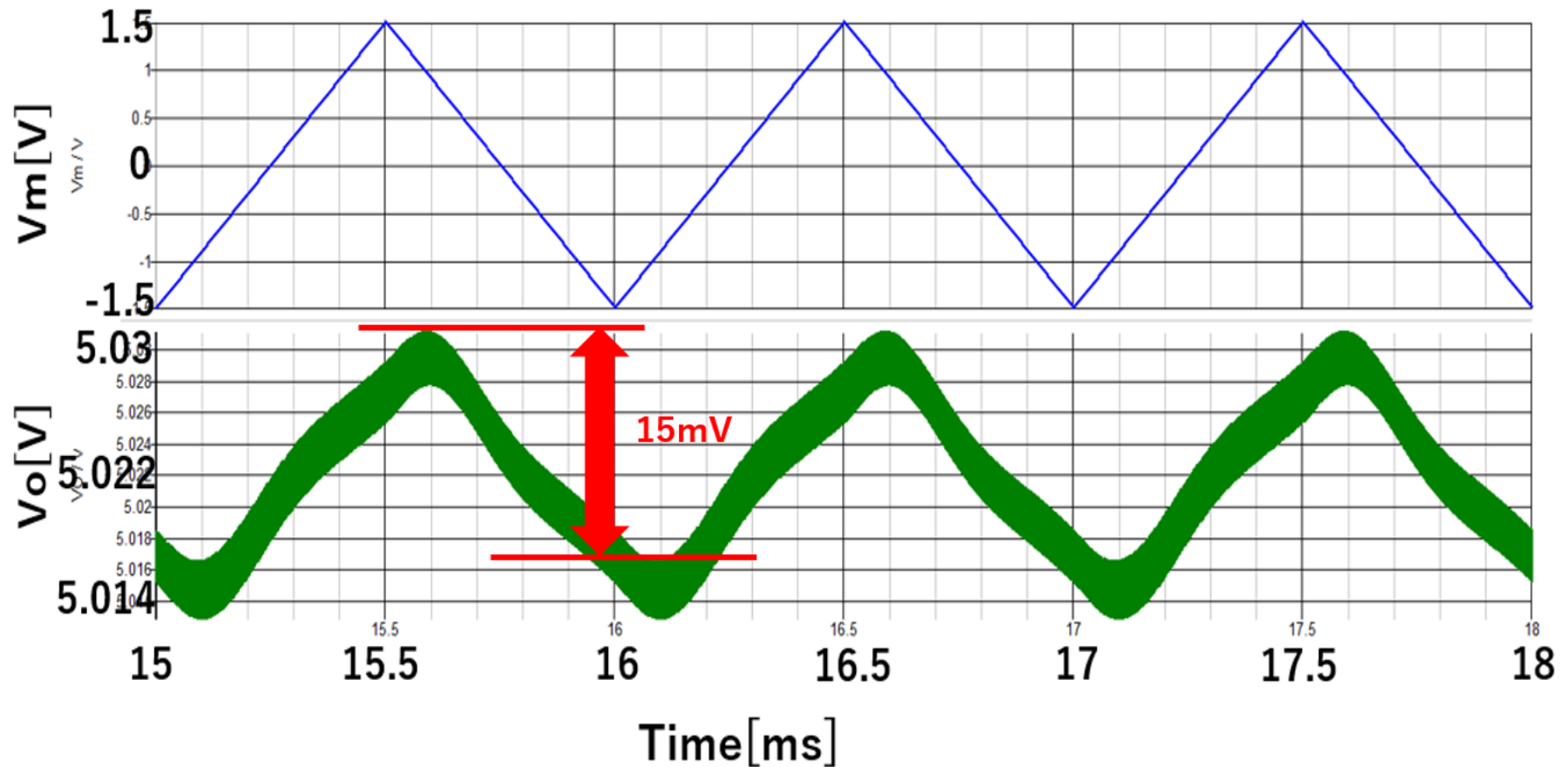
PWMのスペクトラム拡散

アウトライン

1. 研究背景と研究目的
2. 昇圧形ソフトスイッチング電源と原理
3. 昇圧形電源のEMI低減
4. 昇圧形電源のリプル補正
5. まとめと今後の課題

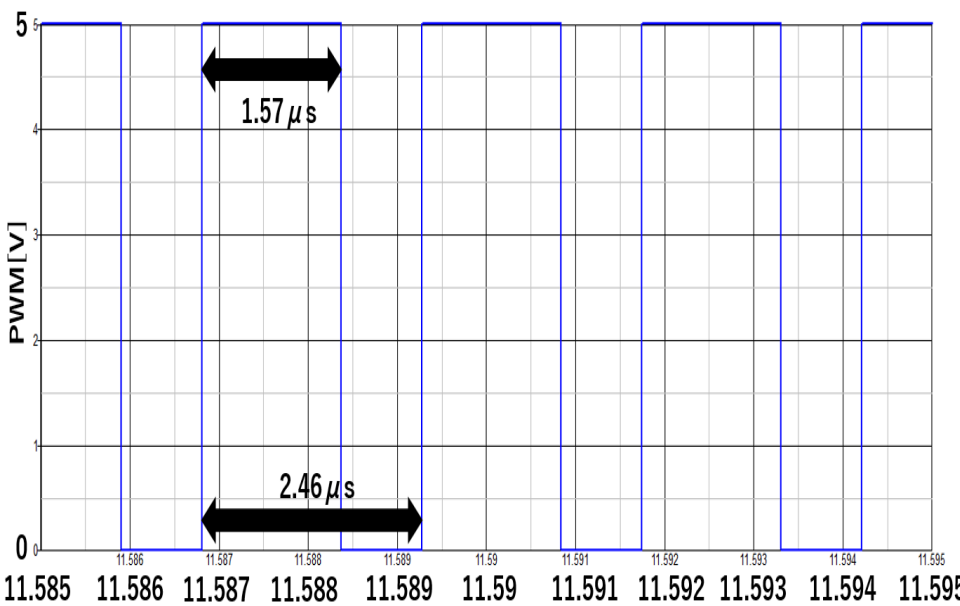
4. 出力電圧変調リップル

出力電圧 V_o に変調リップルが発生



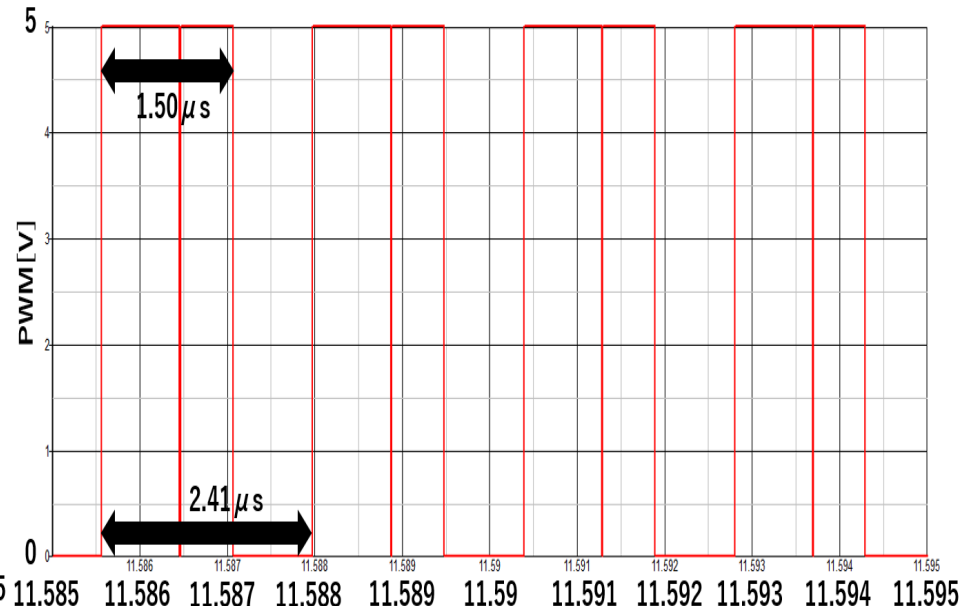
昇圧形電源の変調リップル

変調リップルの原因



位相変調前

$$D = 1.57 / 2.46 \cdot 100 \\ = 63.8\%$$

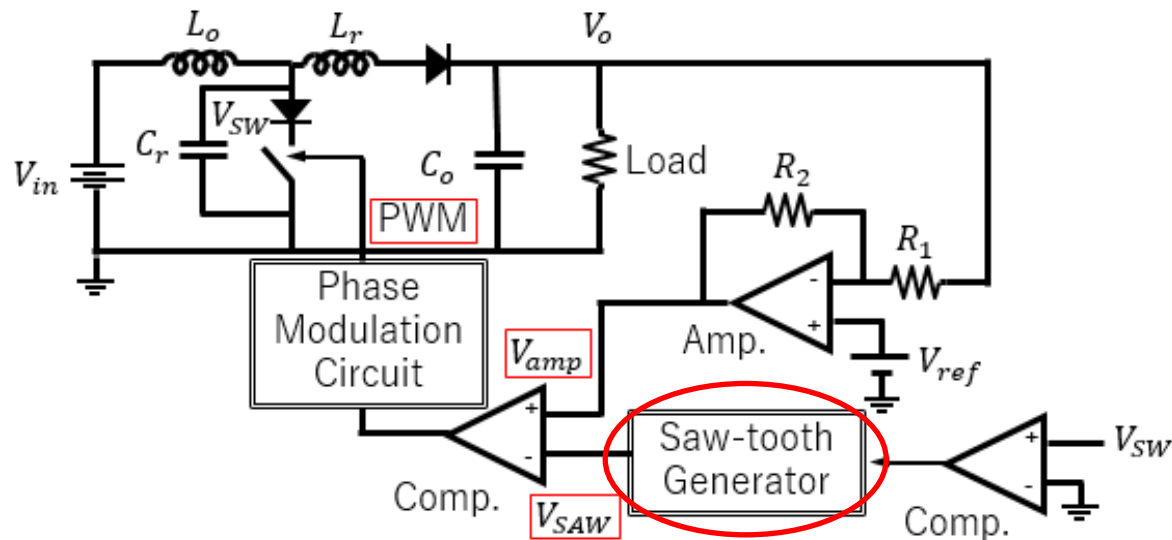
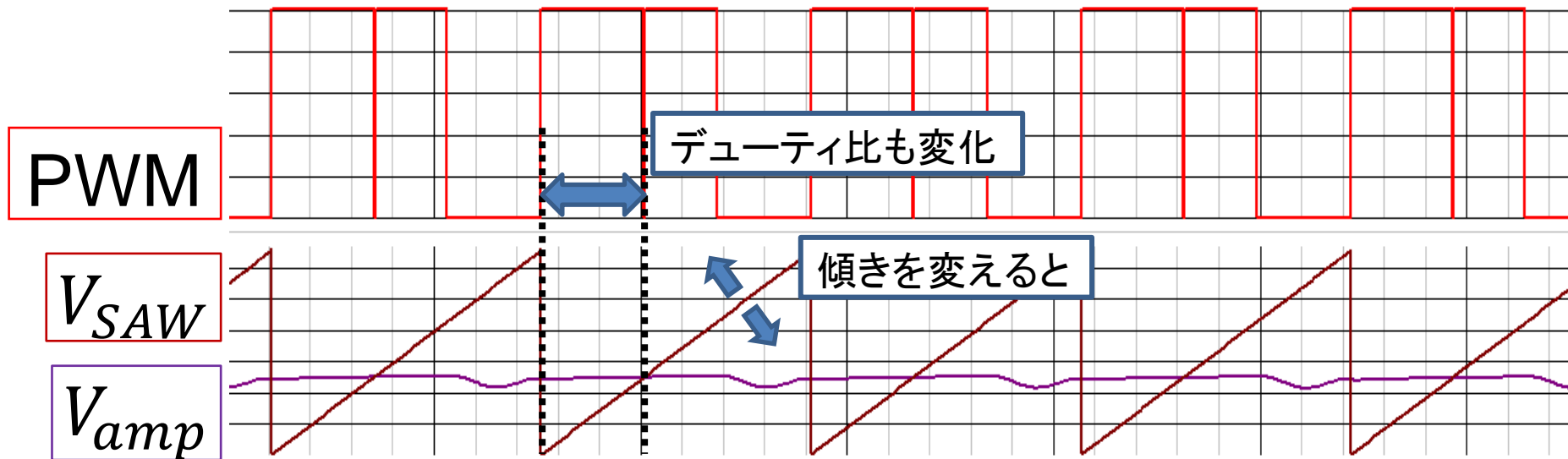


位相変調後

$$D = 1.50 / 2.41 \cdot 100 \\ = 62.2\%$$

デューティ比が変化している

デューティ比の補正



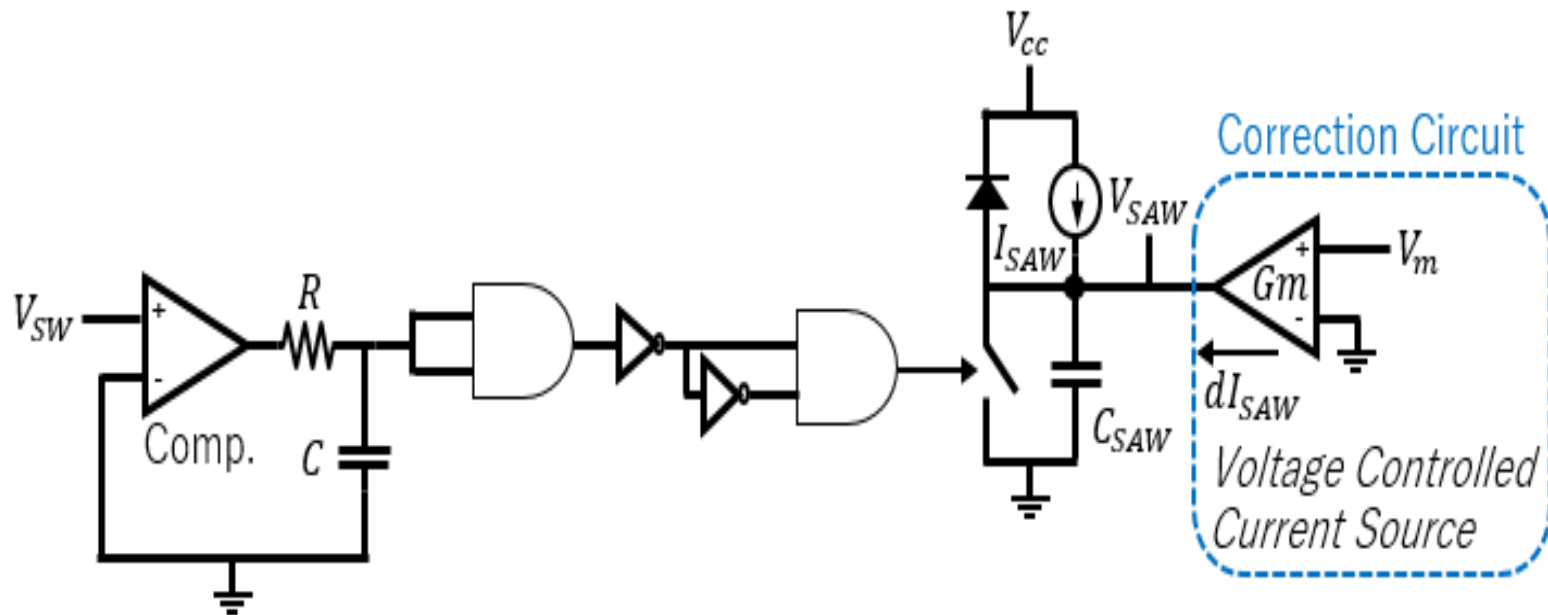
昇圧形ソフトスイッチング電源

リップル補正回路

SAW発生回路に変調リップル補正回路を追加

$$G_m = 680[\mu S]$$

$$dI_{SAW} = 680(V_m - 0)[\mu A]$$

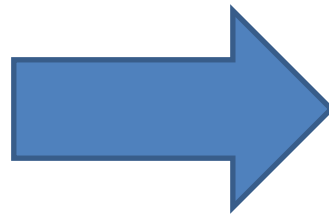


変調リップル補正回路

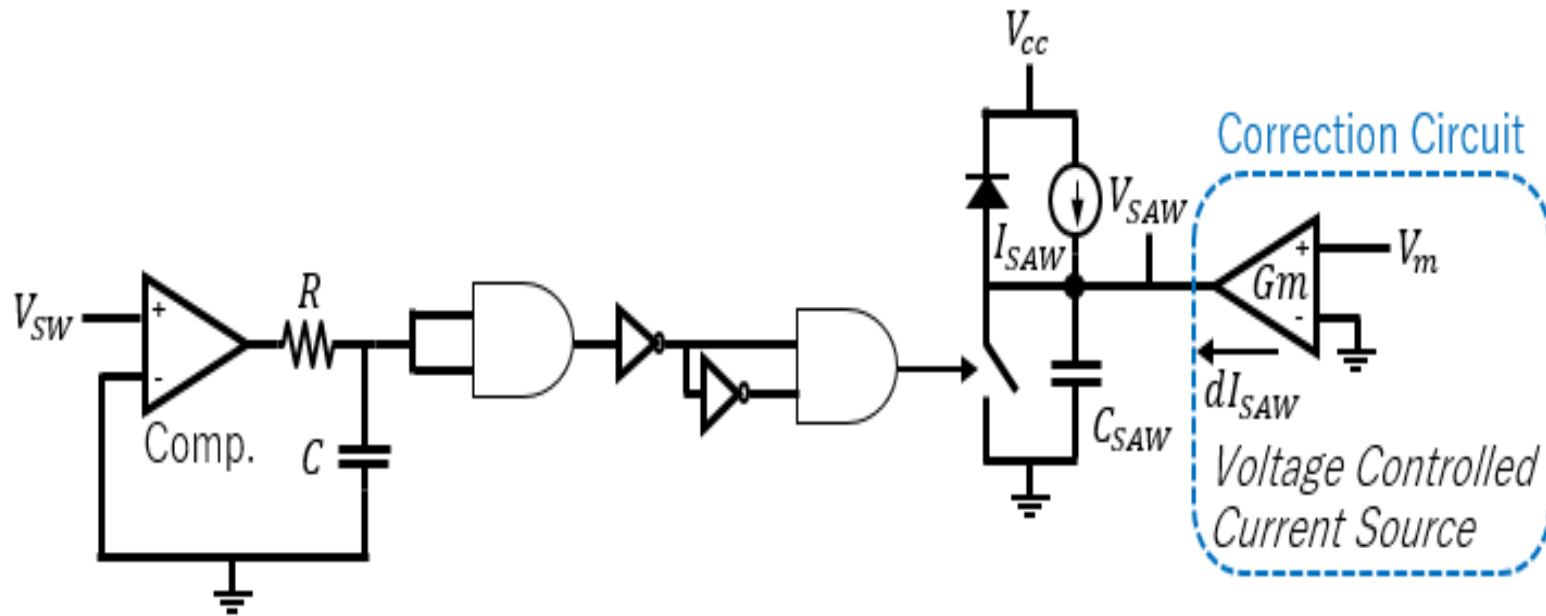
リップル補正回路

SAWの傾き

$$\frac{I_{SAW}}{C_{SAW}}$$

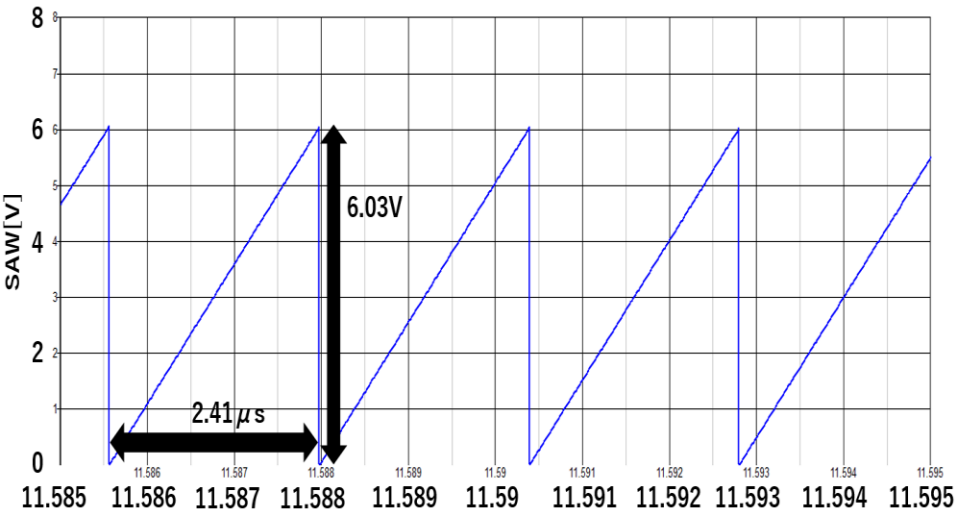


$$\frac{I_{SAW} + dI_{SAW}}{C_{SAW}}$$

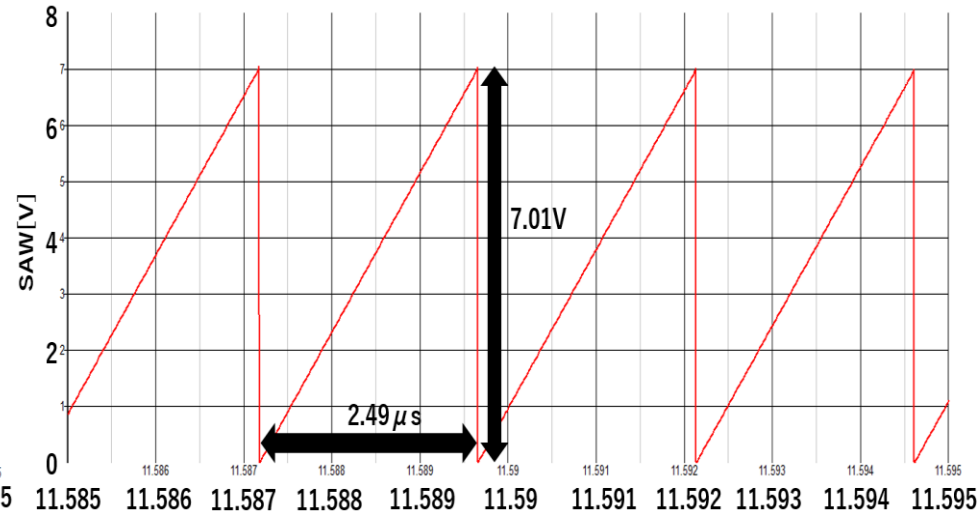


変調リップル補正回路

SAWの傾きの変化



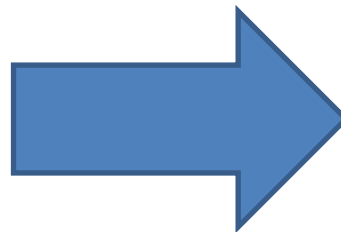
補正前のSAWの波形



補正後のSAWの波形

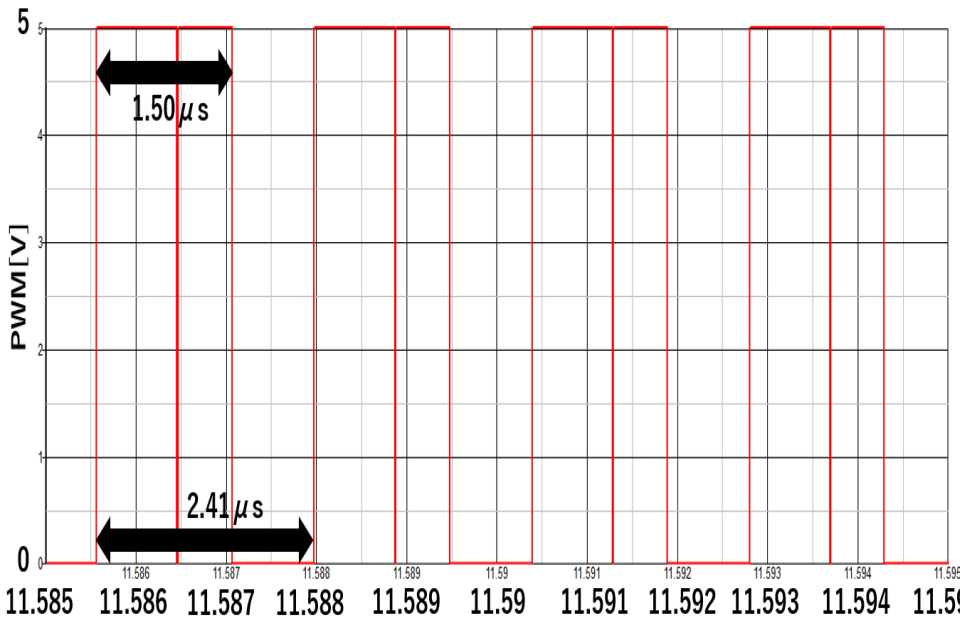
SAWの傾き

$$6.03\ \text{V}/2.41\ \mu\text{s} \\ = 2.50\ \text{V}/\mu\text{s}$$

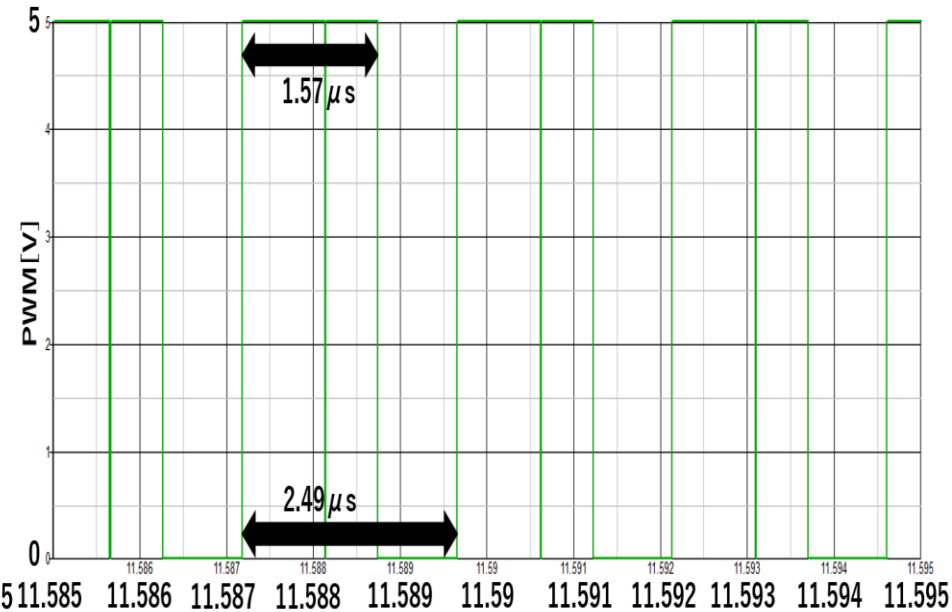


$$7.01\ \text{V}/2.49\ \mu\text{s} \\ = 2.82\ \text{V}/\mu\text{s}$$

デューティ比の補正

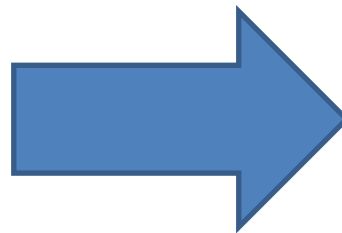


補正前



補正後

$$D = 1.50 / 2.41 \cdot 100 \\ = 62.2\%$$



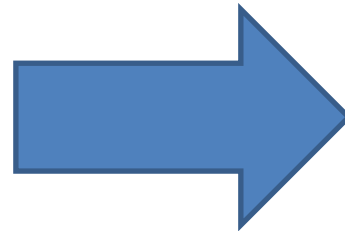
$$D = 1.57 / 2.49 \cdot 100 \\ = 63.1\%$$

D=63.8%に近づいた

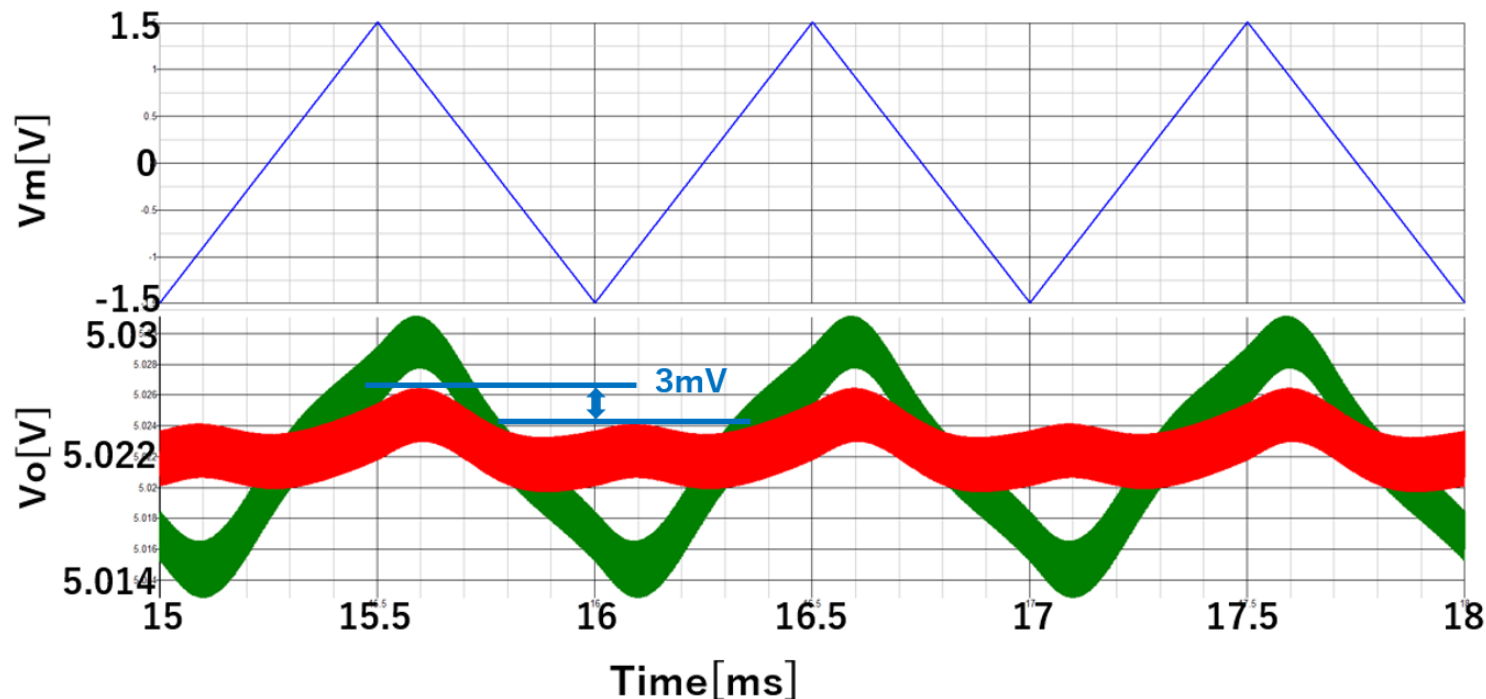
変調リップル補正結果

変調リップルは補正された

補正前
15 mV



補正後
3mV

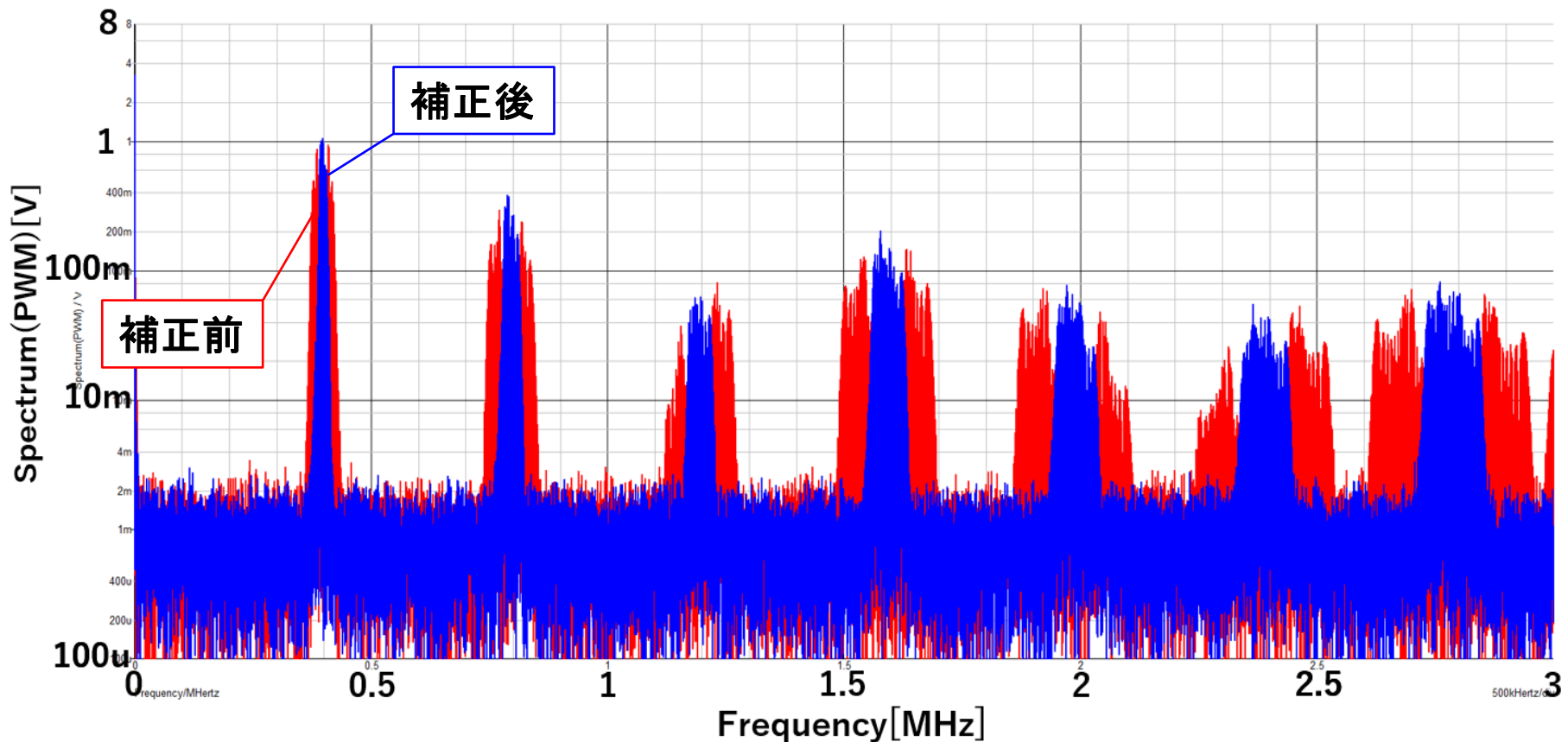


補正前後の変調リップル

補正後のSWノイズ

PWMパルスのスペクトラムレベル

ほぼ影響なし



補正前後のPWMのスペクトラム

アウトライン

1. 研究背景と研究目的
2. 昇圧形ソフトスイッチング電源と原理
3. 昇圧形電源のEMI低減
4. 昇圧形電源のリプル補正
5. **まとめと今後の課題**

5. まとめ

- スイッチにおける電力損失の低減
 - 昇圧形ソフトスイッチング電源によるターンオフ時のZVSを実現
- EMIの低減
 - PWMの立ち下がリエッジの位相変調によりPWMをスペクトラム拡散
- 変調リップル
 - SAWの傾きを変化させることで改善

今後の課題

1) 過渡応答特性の改善

→位相補償回路を追加

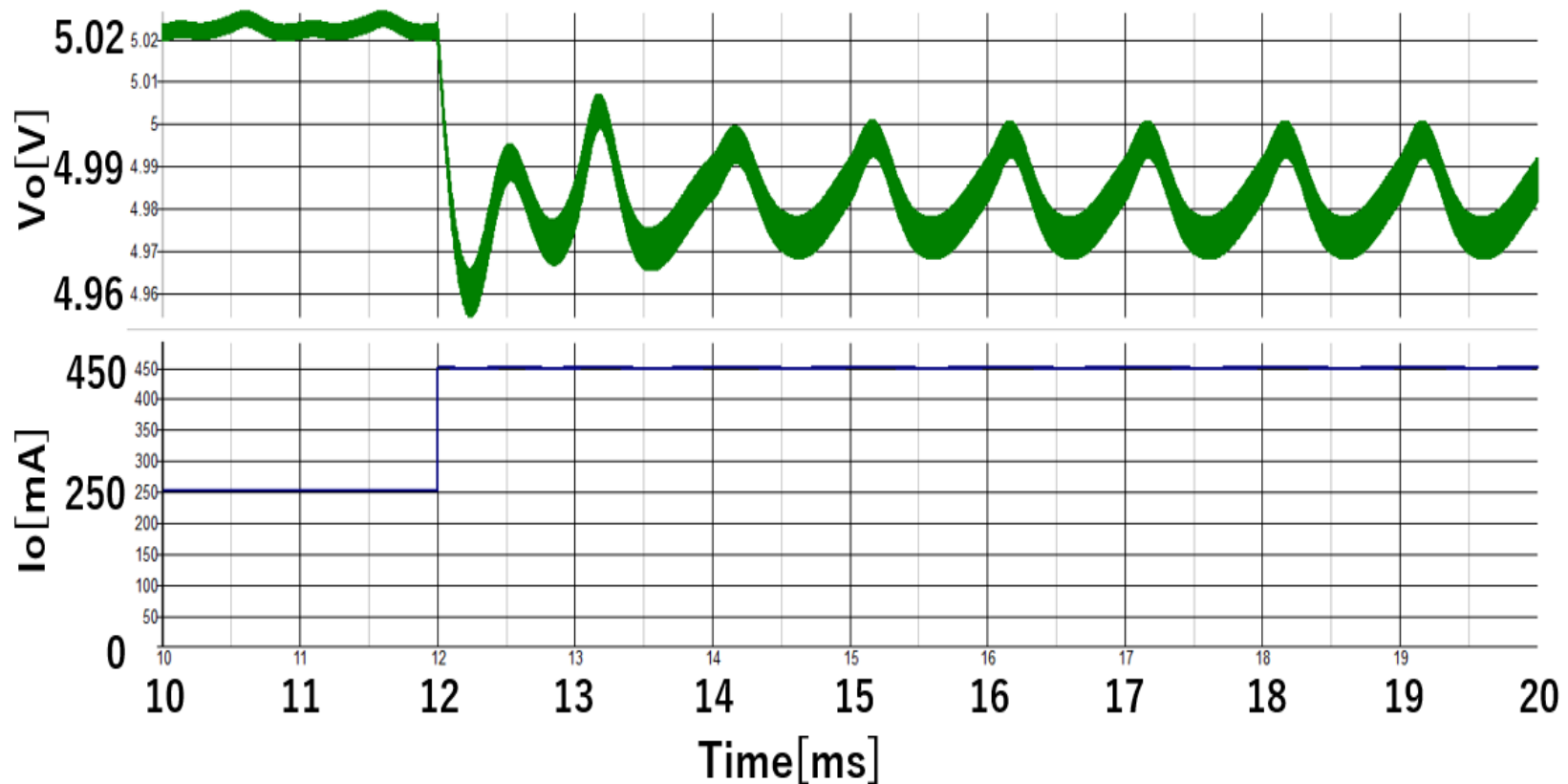
2) ターンオン時がZVSでない

→ノイズ除去用LPFの削除

→ V_{sw} のゼロ電圧検出タイミングの変更などの検討

今後の課題(1)

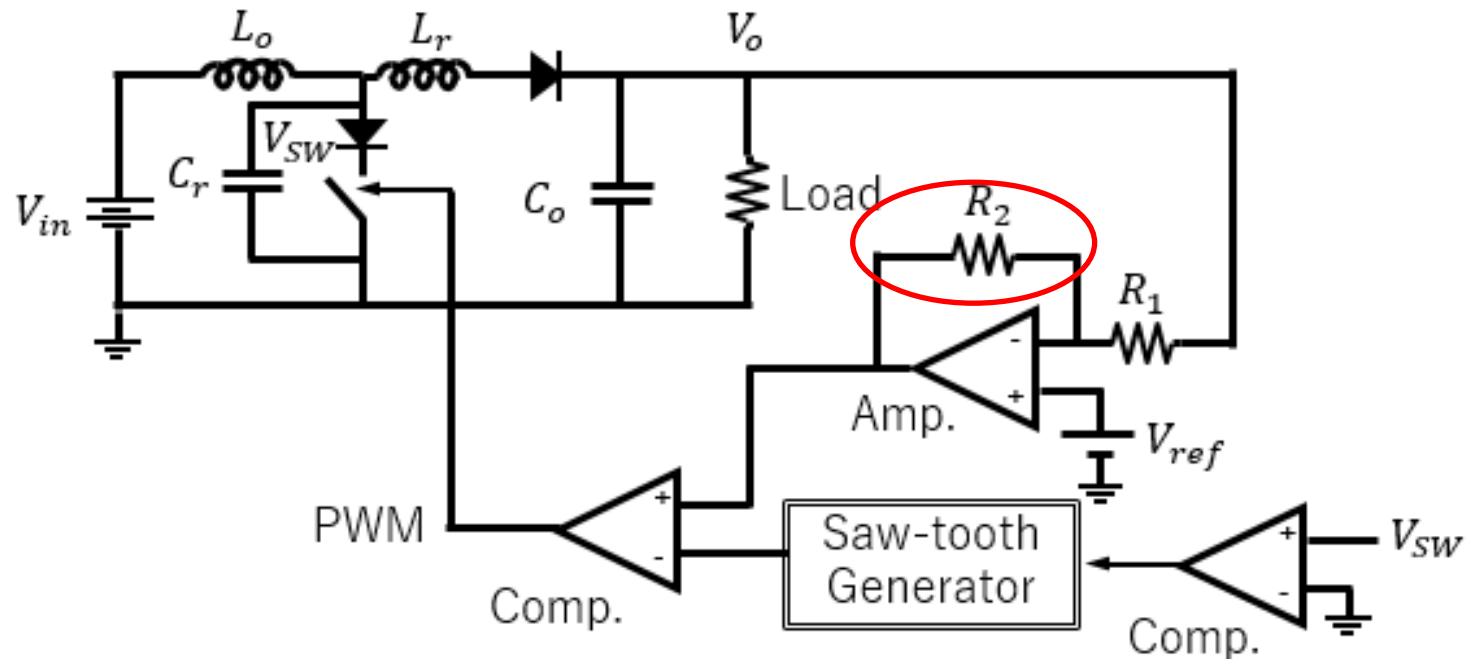
過渡応答特性は不十分



過渡応答特性

今後の課題(1)

- 過渡応答特性の改善
→ 位相遅れ補償・位相進み補償を追加

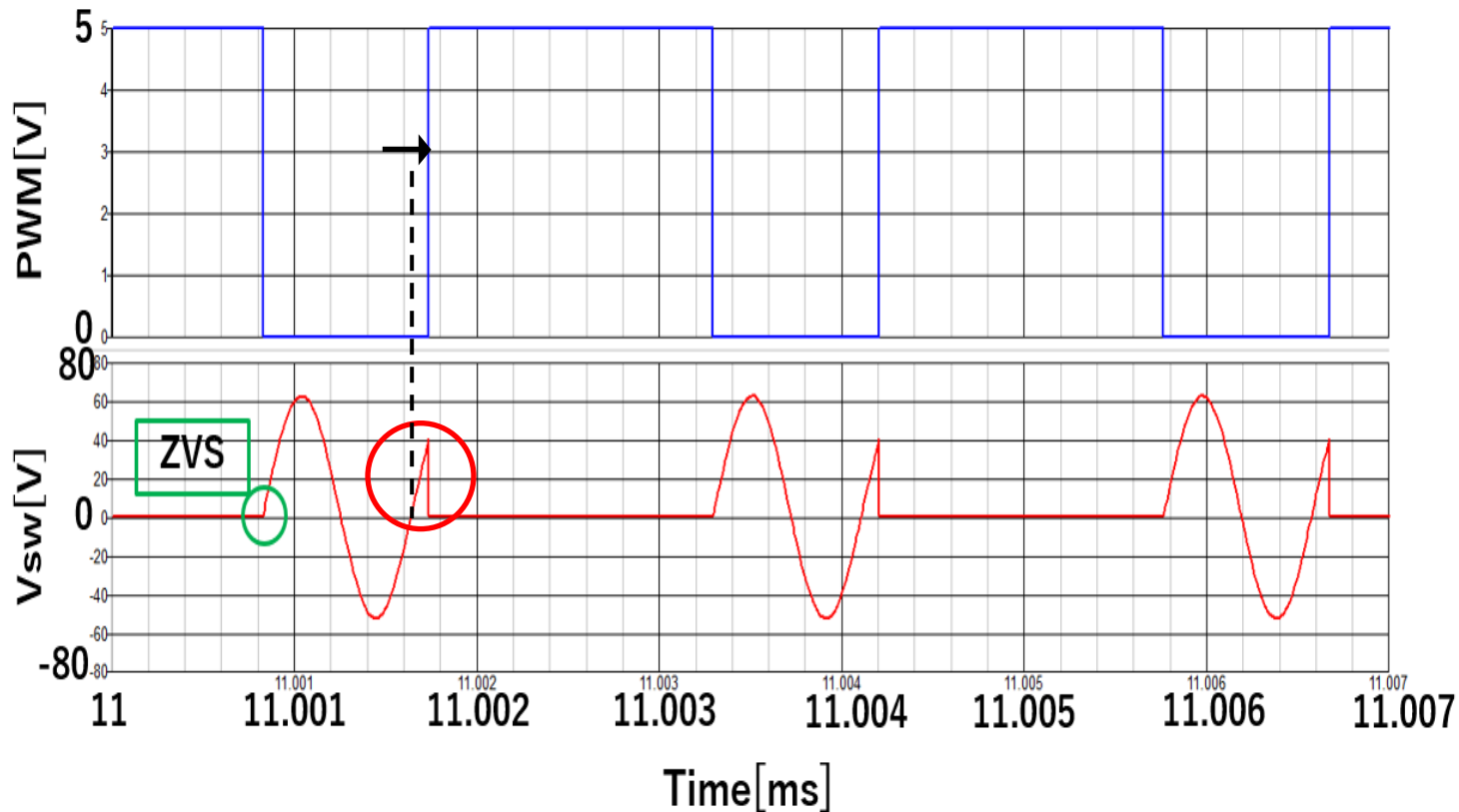


昇圧形ソフトスイッチング電源

今後の課題(2)

ターンオン時が遅延し、ZVSできていない

⇒ $V_{sw}=40V$ に達する

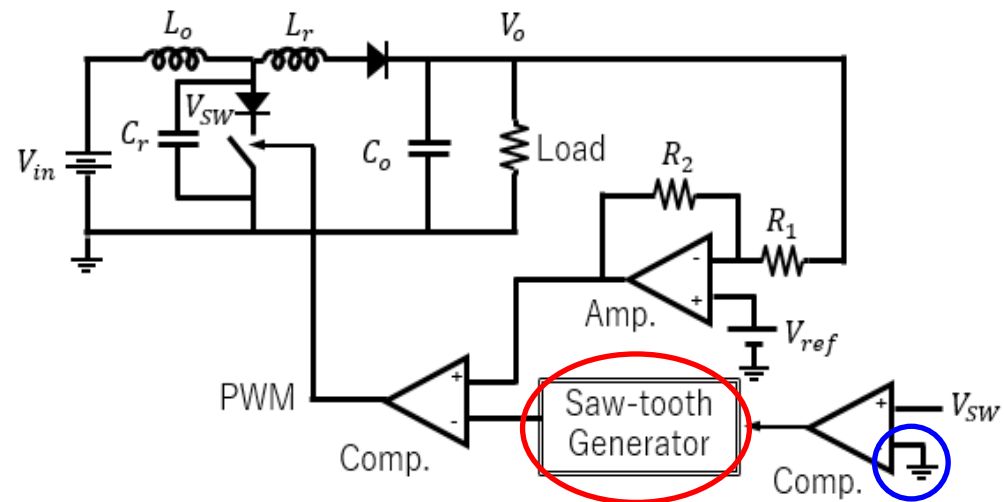
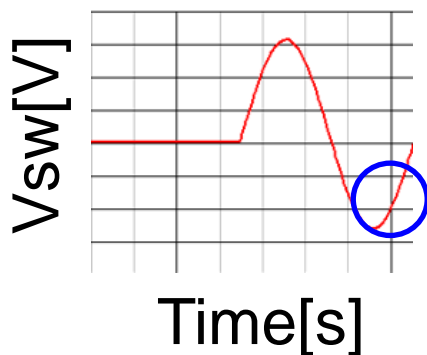
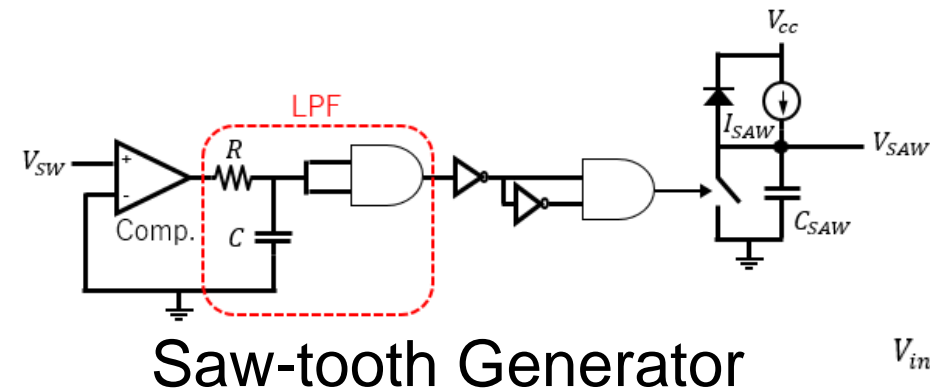


ゼロ電圧スイッチング

今後の課題(2)

対策1: **ノイズ除去用LPF** の削除

対策2: V_{sw} の **ゼロ電圧検出タイミング** の変更



ご清聴 ありがとうございます。

Q&A

- Q. 今後さらにより高周波のものを検討していくのか。
A. そのつもりである。
- Q 研究は円滑に進んだのか。
A. そもそも昇圧形ソフトスイッチング電源を動作させることに苦勞した。