

クランプ付単インダクタ2出力方式 半波電圧共振型ソフトスイッチング電源

○小堀 康功, 深谷 太詞(小山工業高等専門学校)

築地 伸和, 須永 祥希, 荒船 拓也, 高井 伸和, 小林 春夫(群馬大学)

アウトライン

1. はじめに
2. ソフトスイッチング電源の概要
 - 2-1 従来降圧型スイッチング電源
 - 2-2 半波型電圧共振電源
 - 2-3 シミュレーション結果
3. 新方式電圧共振電源
 - 3-1 クランプ方式電圧共振電源
 - 3-2 応答特性の確認
4. 単インダクタ2出力 (SIDO) 電源
 - 4-1 従来SIDO電源の概要
 - 4-2 共振電源のSIDO化
 - 4-3 効率検討
5. まとめ

1. はじめに

●電源の課題:

- 1) 低コスト化: 回路・部品の削減
- 2) 高機能化: 低リップル・高効率化

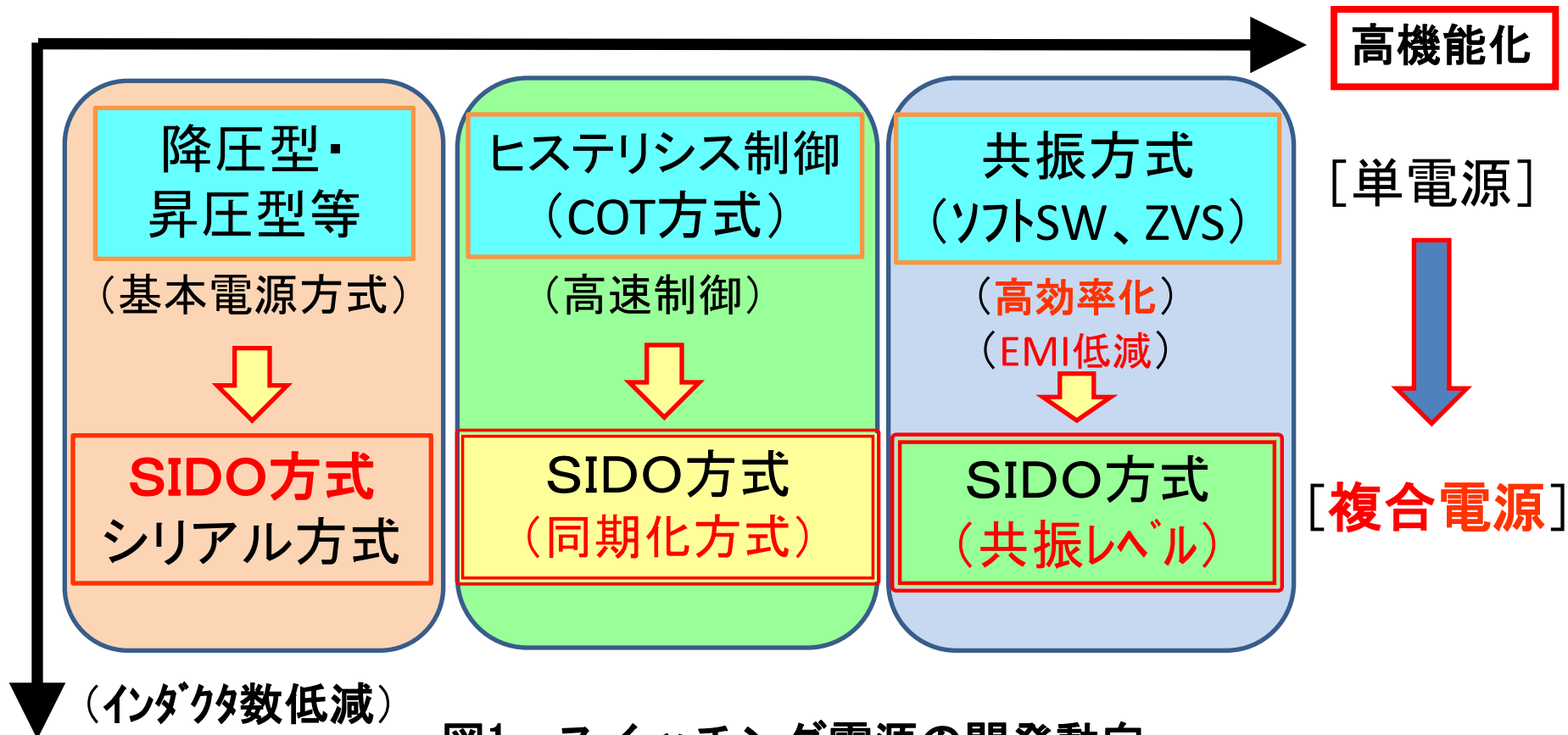


図1 スイッチング電源の開発動向

* SIDO : Single-Inductor Dual-Output
* COT : Constant ON Time

* ZVS : Zero Voltage Switching
* ZCS : Zero Current Switching

アウトライン

1. はじめに

2. ソフトスイッチング電源の概要

- 2-1 従来降圧型スイッチング電源
- 2-2 半波型電圧共振電源
- 2-3 シミュレーション結果

3. 新方式電圧共振電源

- 3-1 クランプ方式電圧共振電源
- 3-2 応答特性の確認

4. 単インダクタ2出力 (SIDO) 電源

- 4-1 従来SIDO電源の概要
- 4-2 共振電源のSIDO化
- 4-3 効率検討

5. まとめ

2. ソフトスイッチング電源の概要

2-1 従来 降圧型スイッチング電源

【構成】

- ・出力電圧 V_o と基準電圧 V_r を比較増幅 \Rightarrow 増幅誤差電圧 ΔV_o
- ・増幅誤差電圧と鋸歯状波SAWを比較 \Rightarrow PWM信号

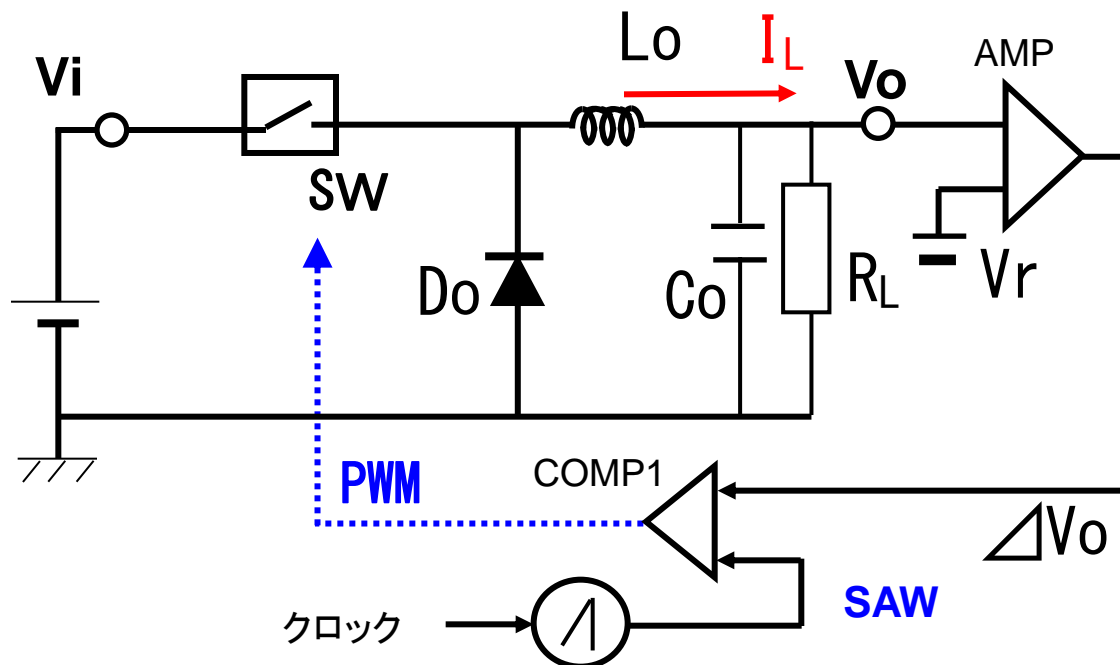


図2 降圧型電源

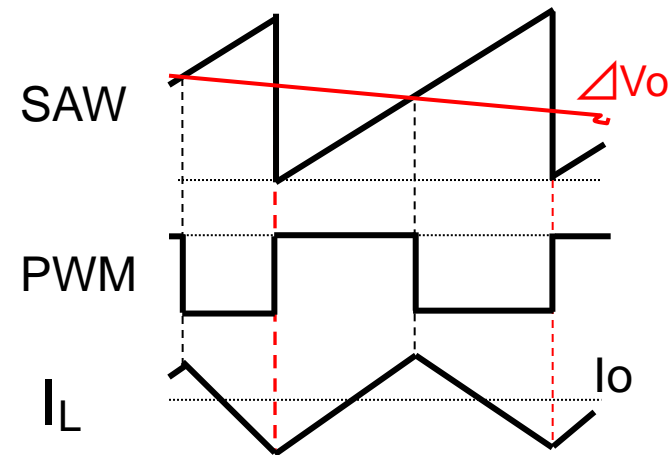


図3 主要波形

2-2 半波型電圧共振電源

【構成】

- ・スイッチと直列に **共振インダクタ**、並列に **共振コンデンサ**
- ・ $V_r = V_D$ の検出で、SAW信号をリセット/スタート \Rightarrow **SW=ON (ZVS)**

【特徴】 **共振条件**: $V_i < |V_r| = I_o \cdot Z_r$: ($Z_r = \sqrt{L_r / C_r}$) 特性インピーダンス

共振周波数: $f_r = 1 / 2\pi \sqrt{L_r \cdot C_r}$ 、 $L_r < L_o$

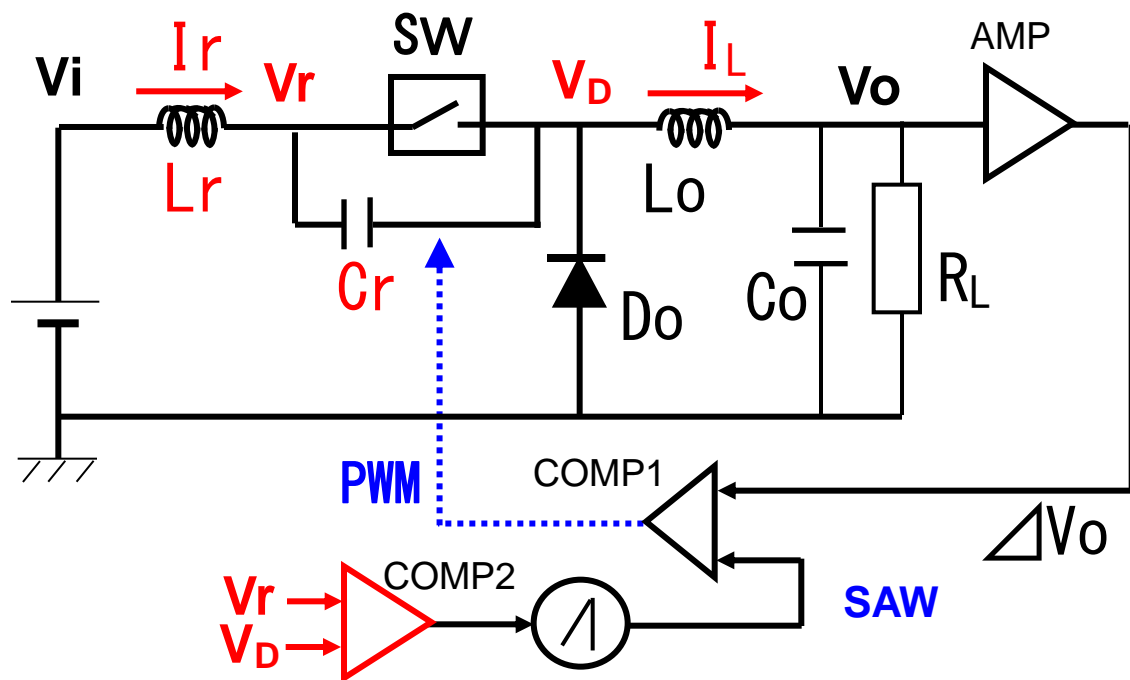


図7 半波型電圧共振電源

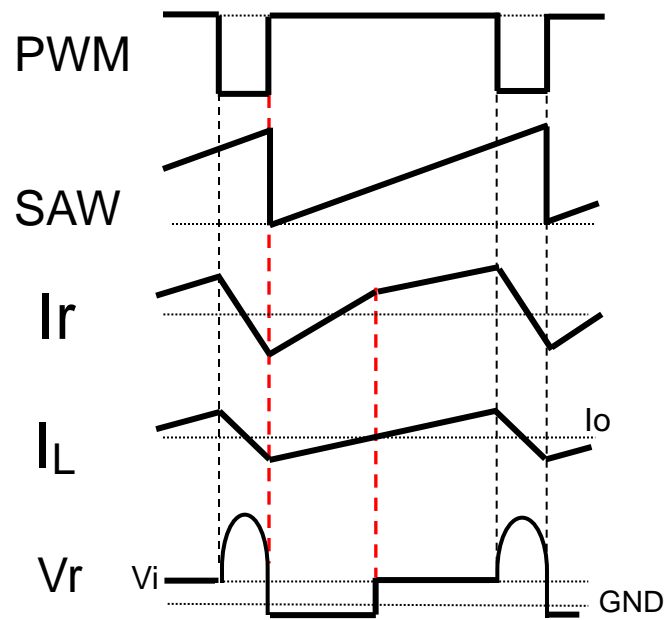


図8 主要共振波形

2-2 半波型電圧共振電源

【動作説明】

* State 0:

- **PWM=「H」: SW=ON** のとき
- $V_D = V_r \doteq V_i$
- $D_o = \text{OFF} \Rightarrow I_r = I_L$: 増加中

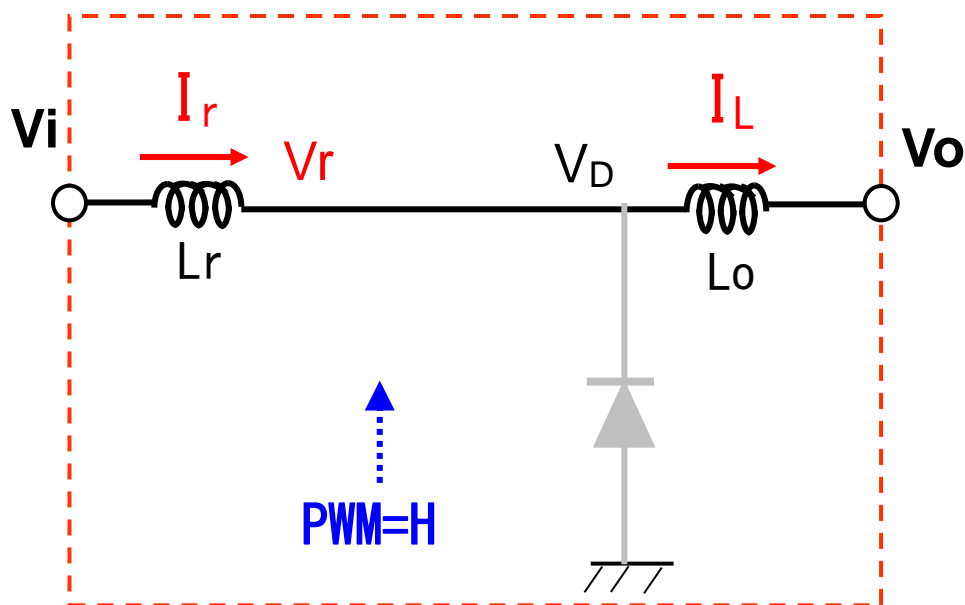


図 7-1 半波型電圧共振電源

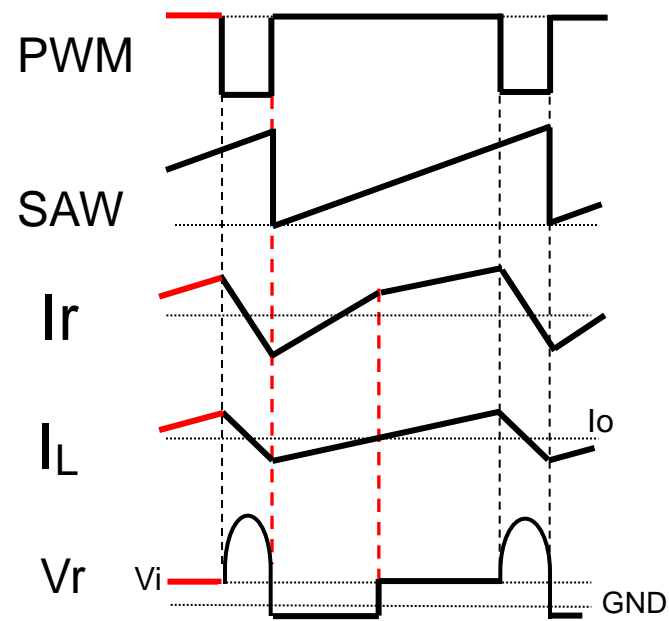


図 8-1 主要共振波形

2-2 半波型電圧共振電源

【動作説明】 State 1:

- $V_o > V_{ref} \Rightarrow \text{PWM} = \text{「L」}$ に反転 $\Rightarrow \text{SW} = \text{OFF}$
- $C_r \cdot L_r$ は共振状態となり、 V_r は大きく上昇 ($V_r > V_i$)
- $I_r = 0$ で、 I_L は D_o より供給され、 $V_D = -V_F$
その後 $I_r = \text{反転}$ 、 $V_r = \text{減少} \Rightarrow V_r = V_D$ を検出
- SAW信号をリセット $\Rightarrow \text{PWM} = \text{「H」}$ に反転

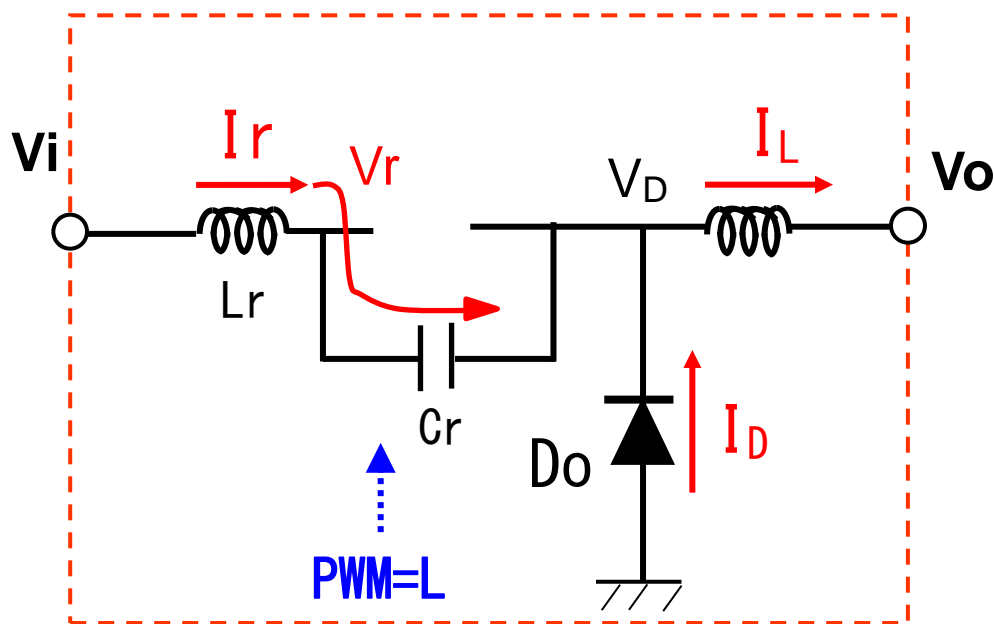


図 7-2 半波型電圧共振電源

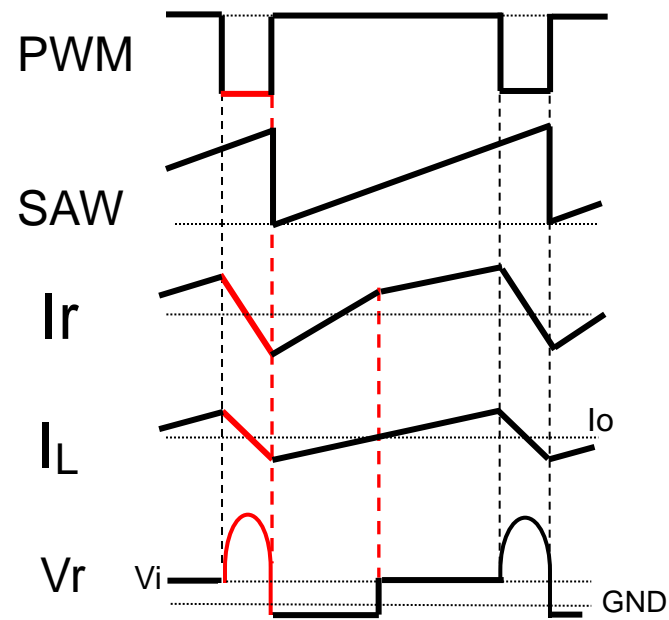


図 8-2 主要共振波形

2-2 半波型電圧共振電源

【動作説明】 State 2:

- PWM=「H」になり、**SW=ON** $\Rightarrow V_r = V_D$ により **ZVS** を実現
- **I_r は逆流から順方向増加に転じる $\Rightarrow I_D$ は減少**
 $\Rightarrow I_D = 0$ で、 $V_D = V_i$ に変化
- **$D_o=OFF$ となるが、 $V_r = V_i > V_o$ より、 I_L は増加し続ける**

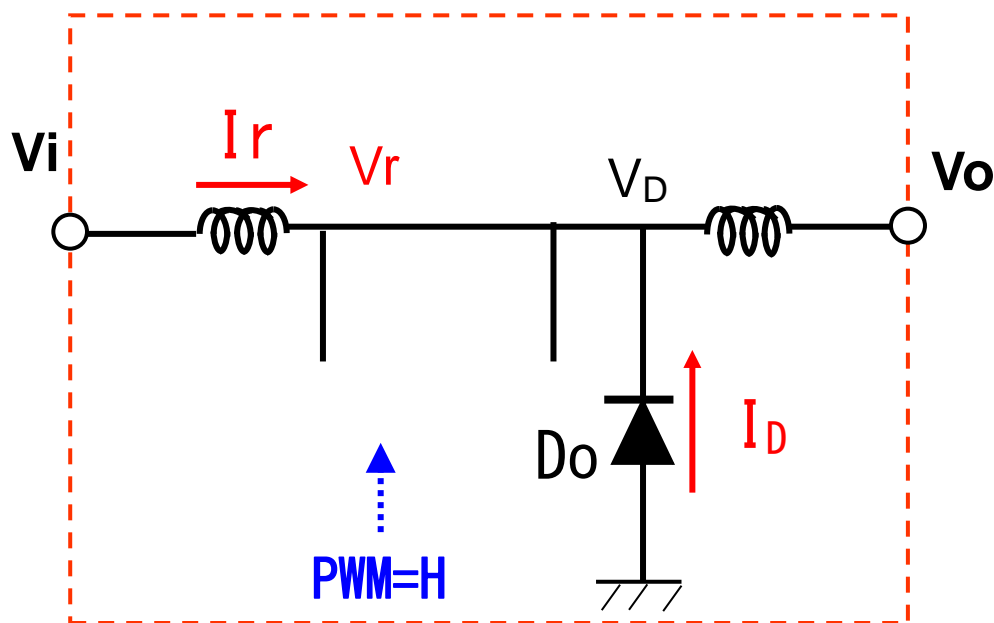


図 7-3 半波型電圧共振電源

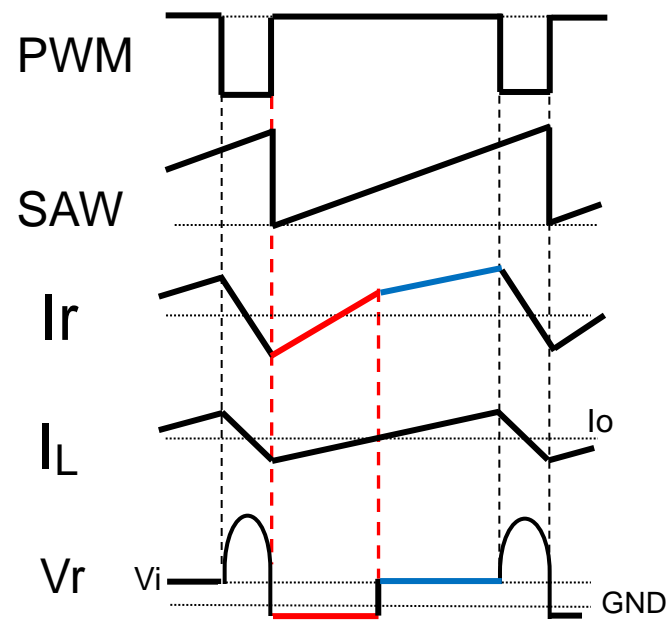


図 8-3 主要共振波形

2-2 半波型電圧共振電源

【動作説明】

* State 3:

- ・ I_L の増加により、 $V_o > V_r$ となり
- ・ **PWM=「L」** に転じ、 $SW = OFF \Rightarrow$ State 1 に戻る

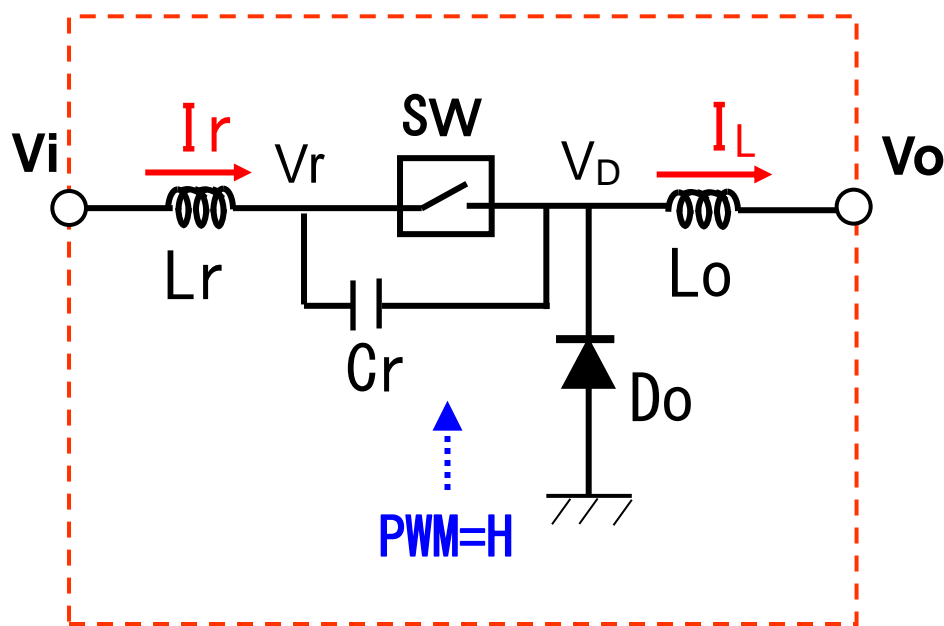


図 7-4 半波型電圧共振電源

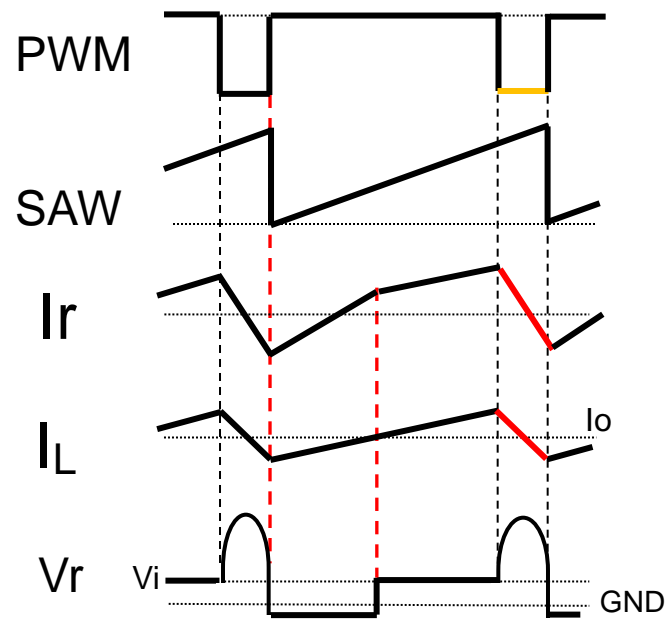


図 8-4 主要共振波形

2-3 シミュレーション結果

1) シミュレーション条件

- $V_i=10V$, $V_o=5V$, $I_o=0.25A$
 $L_o=50\mu H$, $L_r=20\mu H$,
 $C_o=200\mu F$, $C_r=100pF$

2) 共振波形

- $F_{op} = 380\text{ kHz}$
- $V_r = 125V$, $I_r = 0.25\text{ A}$

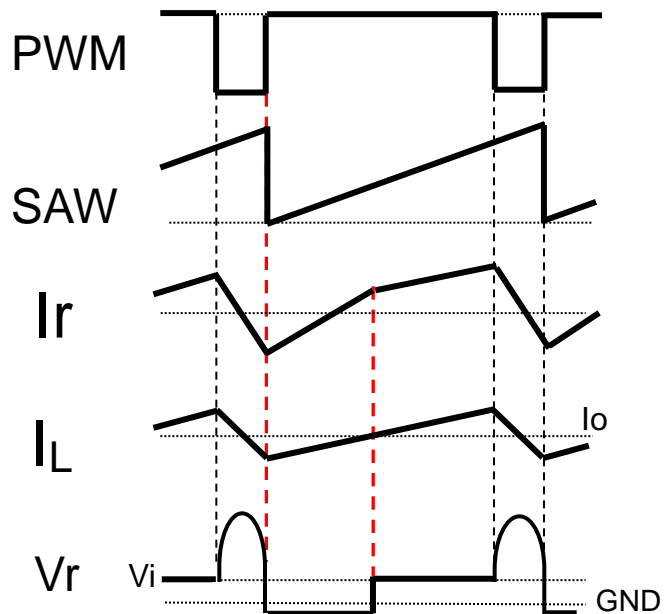


図8 主要共振波形

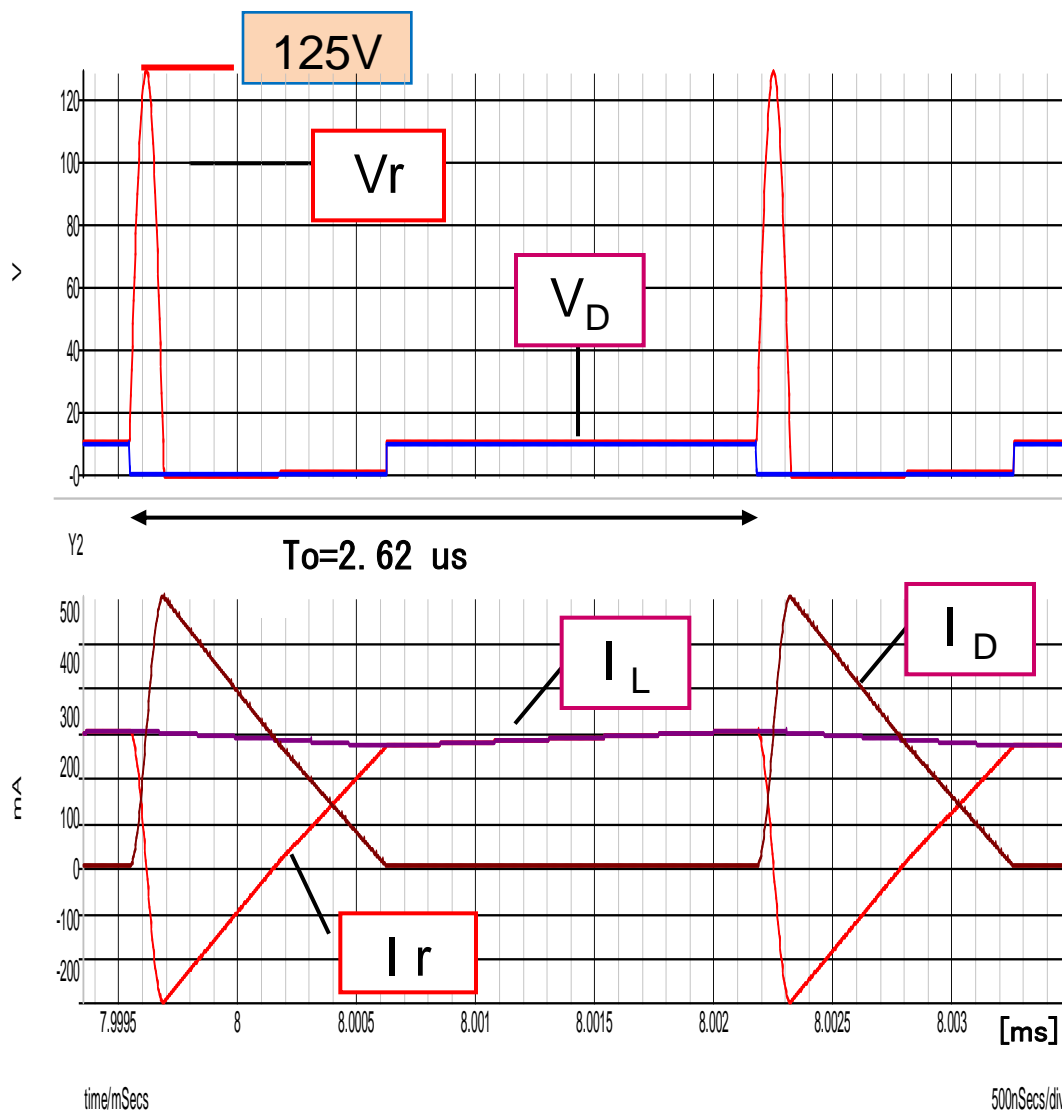


図9 シミュレーション波形

500nSecs/div

2-3 シミュレーション結果

● 共振条件、共振電圧

・ $V_i < V_r = I_o \cdot Z_r \doteq 125 \text{ V}$

ただし $Z_r = \sqrt{L_r / C_r} = \sqrt{20\mu / 100\text{p}} = 447\Omega$

* $I_o = 1 \text{ A}$ では、 $V_r \doteq -500\text{V} \Rightarrow$ **高耐圧素子が必要**

★ 出力電圧特性

* 定常リップル $< 2\text{mV}_{\text{pp}}$ @ 0.5A

* 過渡応答特性

$\Delta V_o < \pm 15\text{mV}$ @ $\Delta I_o = 0.25\text{A}$

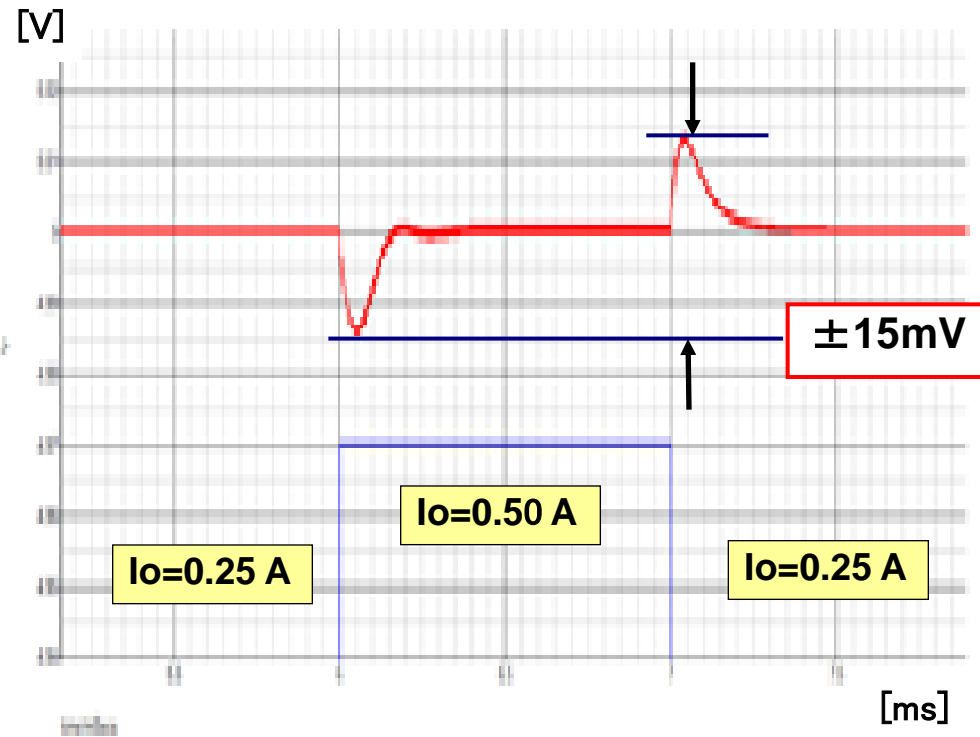


図 1 0 過渡応答特性

アウトライン

1. はじめに
2. ソフトスイッチング電源の概要
 - 2-1 従来降圧型スイッチング電源
 - 2-2 半波型電圧共振電源
 - 2-3 シミュレーション結果
- 3. 新方式電圧共振電源**
 - 3-1 クランプ方式電圧共振電源
 - 3-2 応答特性の確認
4. 単インダクタ2出力 (SIDO) 電源
 - 4-1 従来SIDO電源の概要
 - 4-2 共振電源のSIDO化
 - 4-3 効率検討
5. まとめ

3. 新方式電圧共振電源

3-1 クランプ方式電圧共振電源

・共振電圧 V_r を、ツェナーダイオードでクランプ

● シミュレーション結果 ($V_z = 40V$)

$$V_r = 125 V \Rightarrow 44 V, \quad I_r = 220mA \Rightarrow 60mA$$

⇒ クランプによる特性の変化はないか？

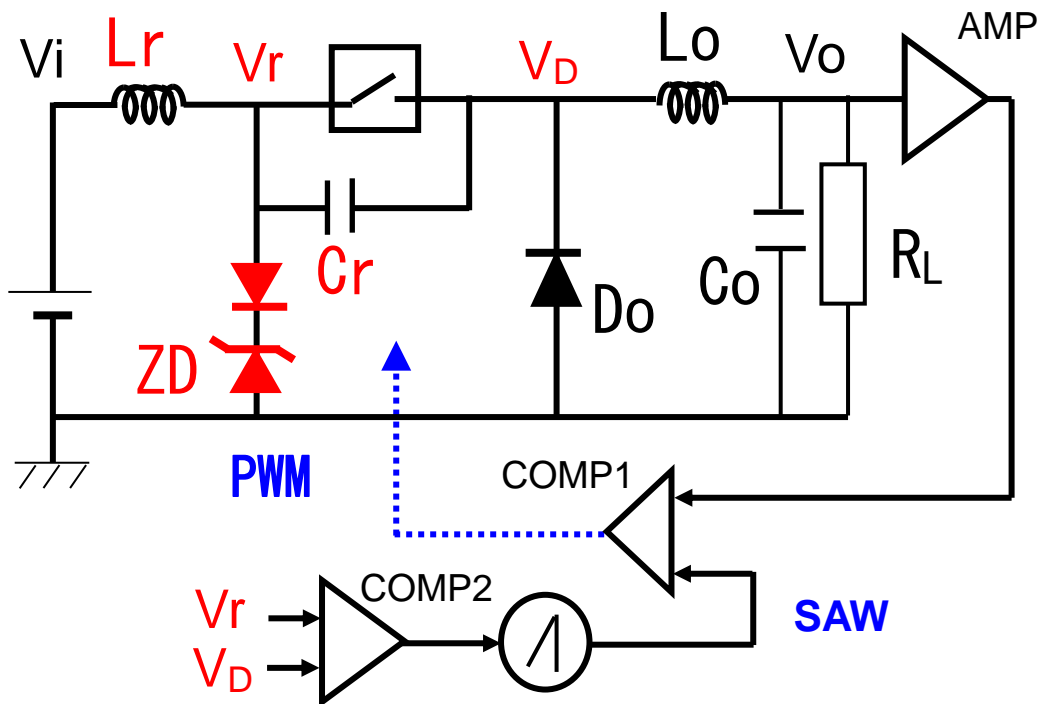


図 1 1 クランプ回路付き電圧共振電源

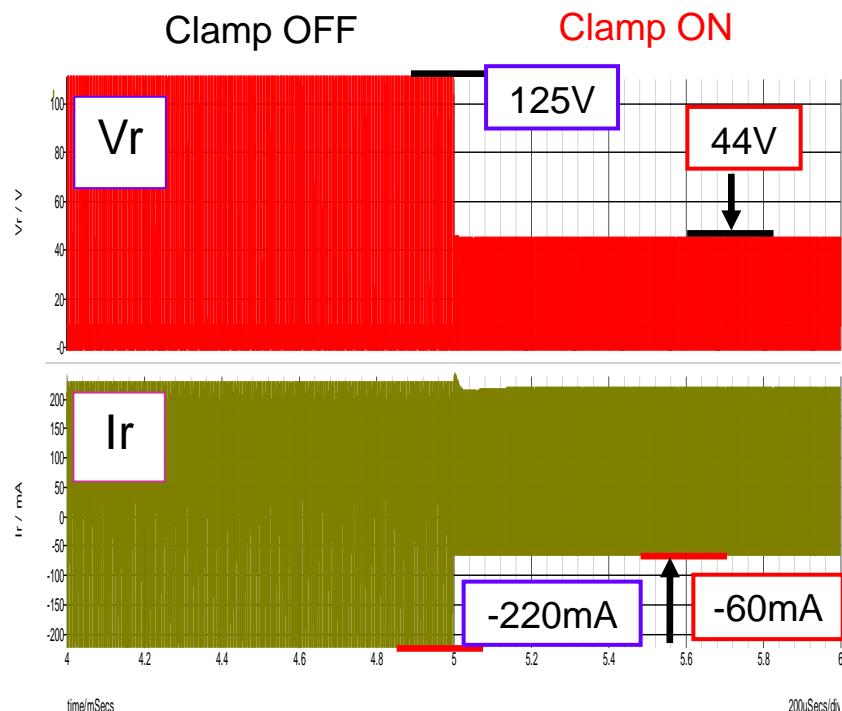


図 1 2 共振電圧の変化 14

3-2 応答特性の確認

● シミュレーション結果 ($V_z = 40V$)

- ・条件: $V_i = 10V$, $V_o = 5.0V$, $I_o = 0.25A$
- ・共振波形: $F_o = 490kHz$

● 過渡応答特性

- ・定常出力リップル: $\Delta V_o < 2 \text{ mVpp}$
- ・オーバーシュート: $< \pm 15 \text{ mV}$ ($I_o = 0.50A / 0.25A$)

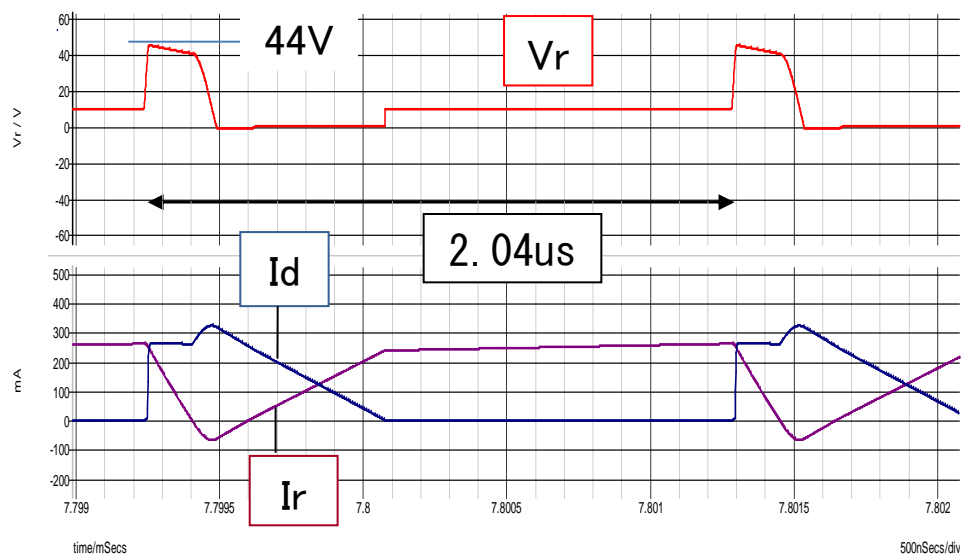


図 1 3 クランプ回路付き共振波形

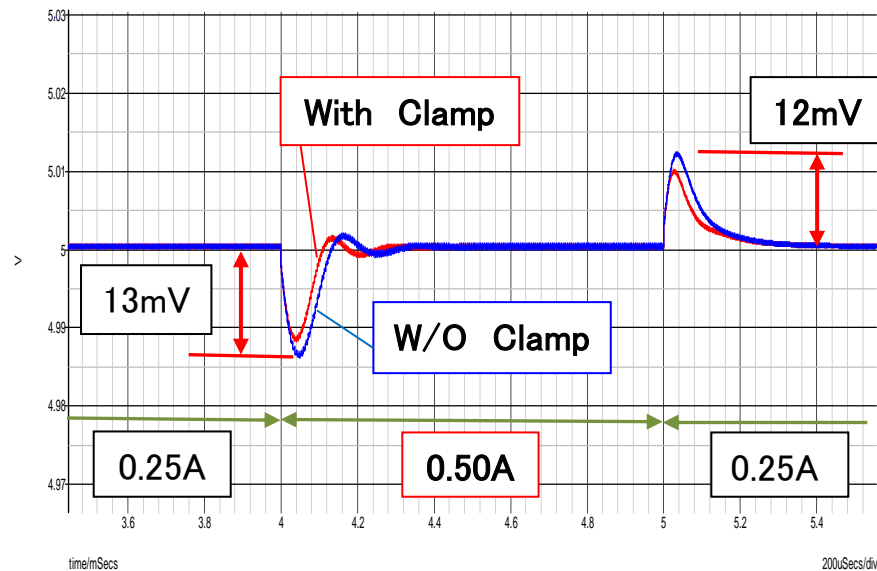


図 1 4 過度応答特性

- クランプ電圧 対 動作周期 T_{op} ($V_z = 40 \sim 120 \text{ V}$)
- 負荷電流 I_o 対 動作周期 T_{op} ($I_o = 0.2 \sim 1.0 \text{ A}$)
 - ・クランプ無: $T_o = 2.5 \text{ } \mu\text{s} \sim 11.0 \text{ } \mu\text{s}$
 - ・クランプ付: $T_o' = 1.9 \text{ } \mu\text{s} \sim 7.1 \text{ } \mu\text{s}$

- * クランプ電圧による
動作周期の変化無し
- * クランプの有無により
動作周期は半減
(負荷電流が大きい時)
- * 傾き = $7 \text{ } \mu\text{s}/\text{A}$

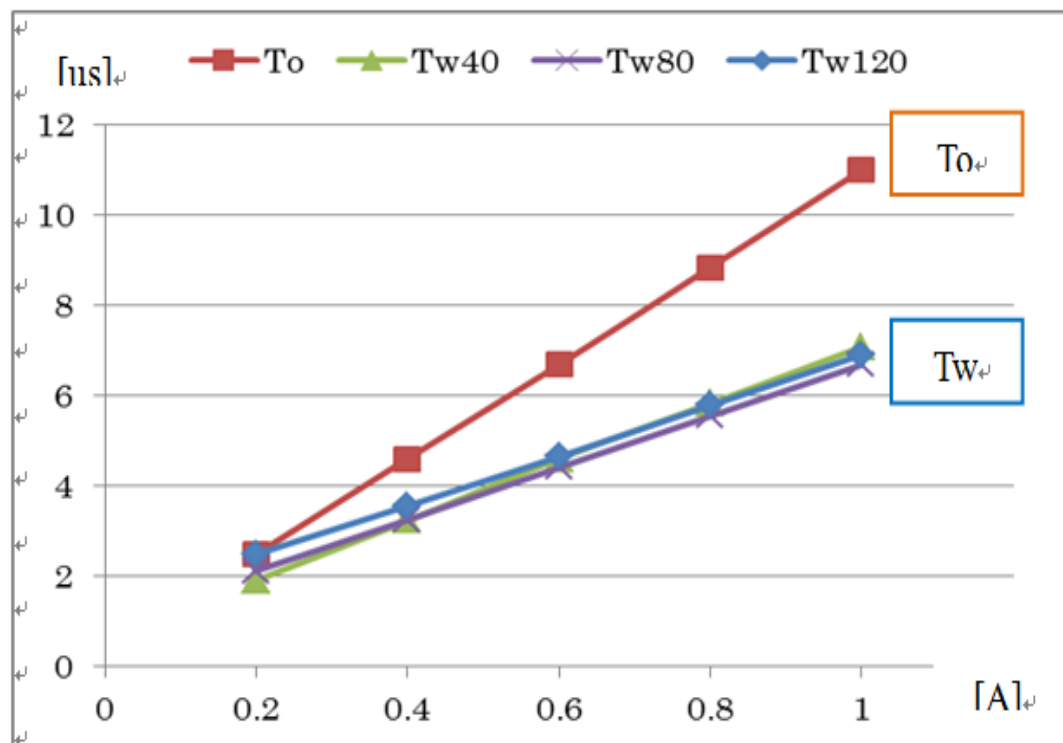


図 1 5 負荷電流 対 制御周期

アウトライン

1. はじめに
2. ソフトスイッチング電源の概要
 - 2-1 従来降圧型スイッチング電源
 - 2-2 半波型電圧共振電源
 - 2-3 シミュレーション結果
3. 新方式電圧共振電源
 - 3-1 クランプ方式電圧共振電源
 - 3-2 応答特性の確認
4. **単インダクタ2出力 (SIDO) 電源**
 - 4-1 従来SIDO電源の概要
 - 4-2 共振電源のSIDO化
 - 4-3 効率検討
5. まとめ

4. 単インダクタ2出力 (SIDO) 電源

4-1 従来SIDO電源の概要

- * 構成: パワーステージ+2個のサブ電源
- * 制御法: **Exclusive制御方式** = 誤差電圧の大きいサブ電源にその周期の制御を実施
- * 結果: $\Delta V1 > \Delta V2$ のとき、SEL=「H」⇒ サブ電源1 を選択

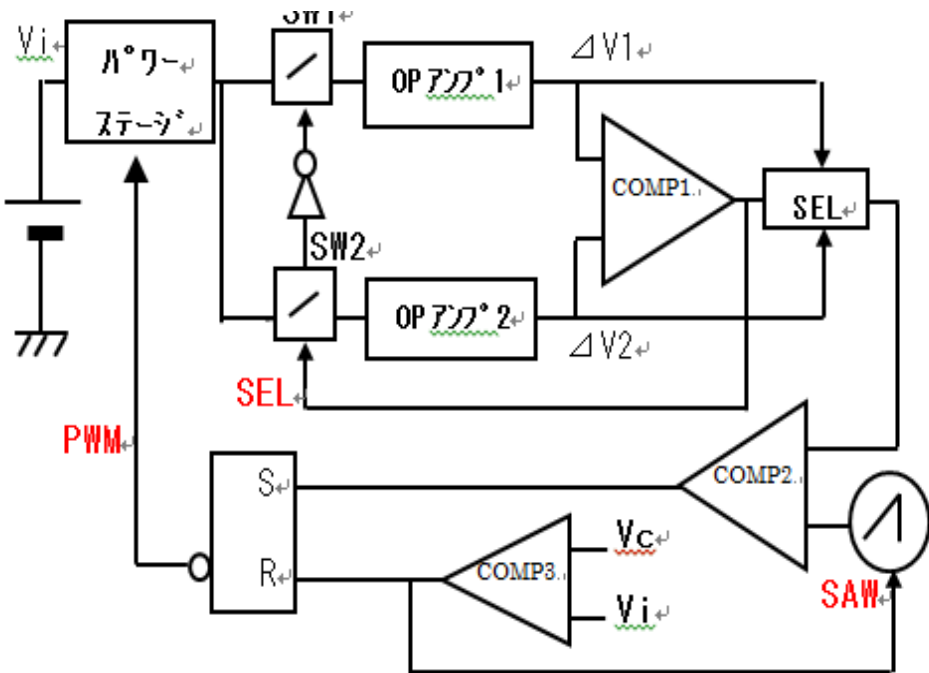


図 1 6 SIDO電源の構成

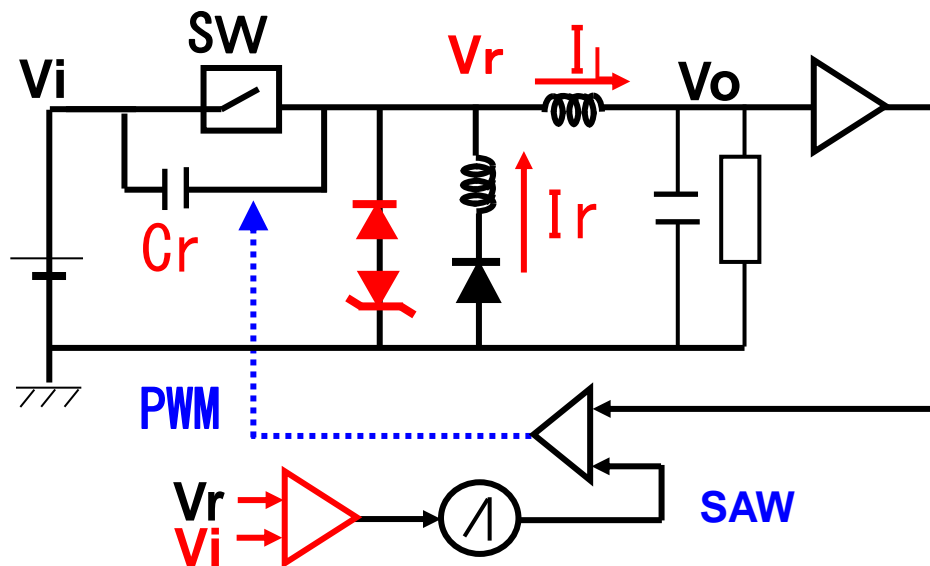


図 1 7 半波型共振回路 2

4-2 共振電源のSIDO化 ($V_z=20V$)

* 入出力条件: $V_i=10V$, $V_1=5.0V$, $V_2=4.0V$

負荷: $I_1 = 0.50A$, $I_2 = 0.25A$

* 結果: SEL信号により制御周期は変化 (SAWピーク値が変化)

ただし、 V_r のピーク値は一定 ($-28V$)

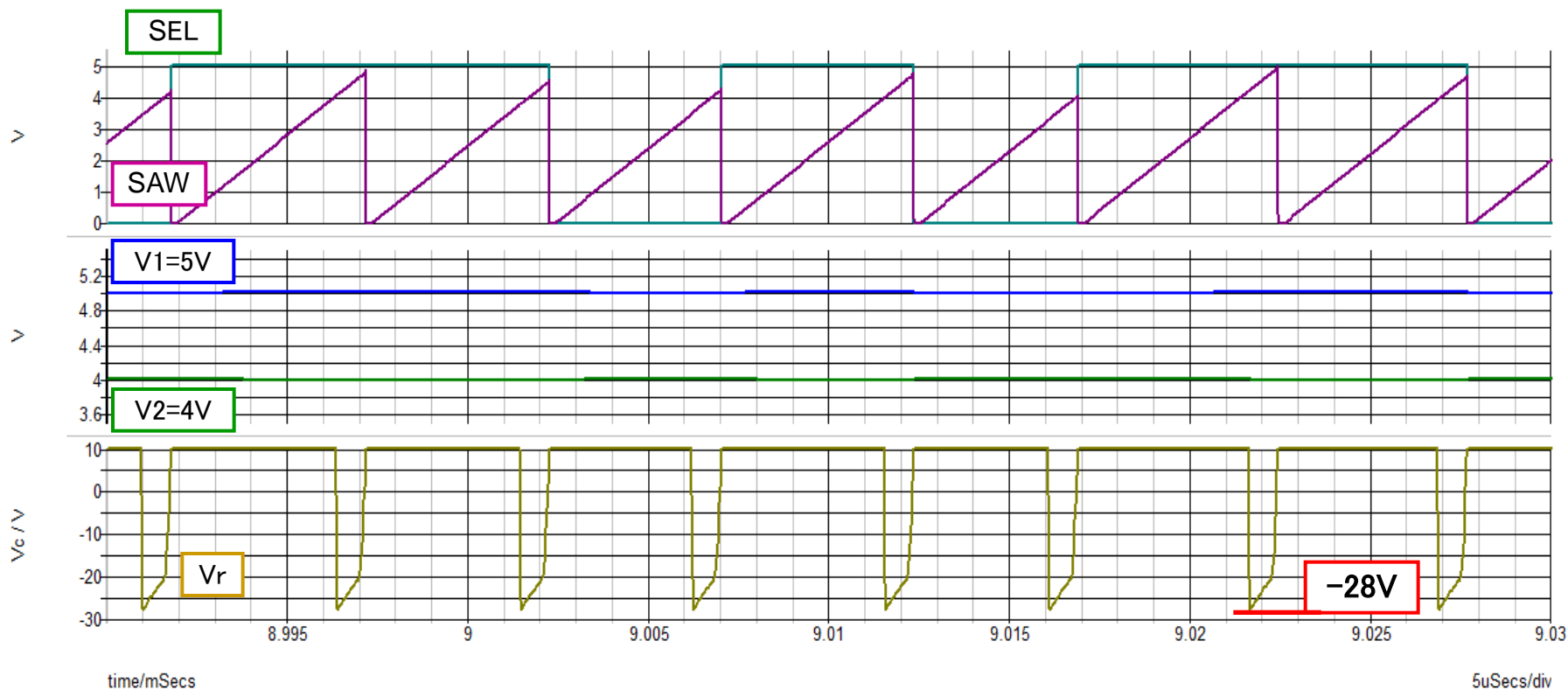


図 18 シミュレーション波形

4-2 共振電源のSIDO化

● 過渡応答特性

* 負荷条件: $I_1=0.75/0.50\text{A}$, $I_2 = 0.50/0.25\text{A}$

* 出力電圧: 定常リップル $< 10\text{mVpp}$ @ $\Sigma I_o=1.0\text{A}$

* クロス/セルフレギュレーション: $< \pm 12\text{mV}$ @ $\Delta I_o=\pm 0.25\text{A}$

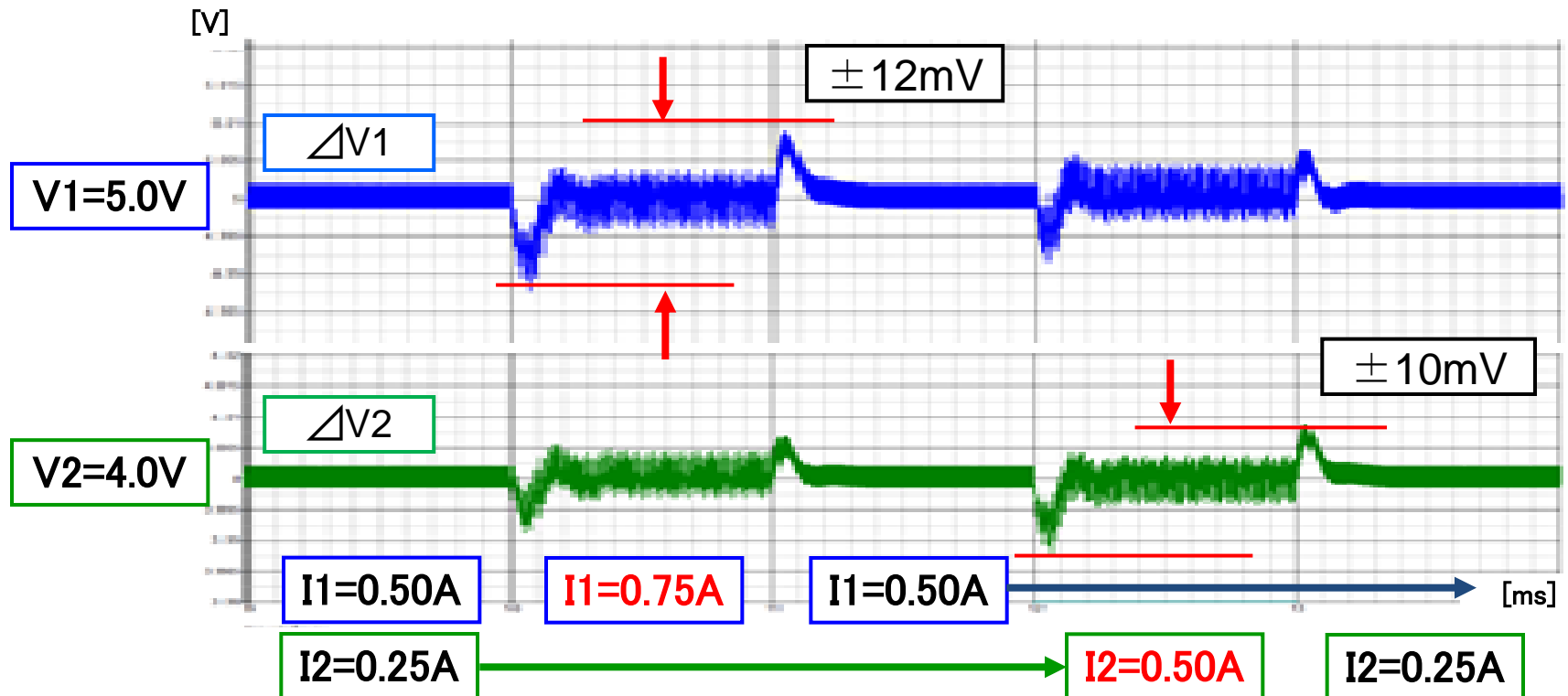


図 1 9 SIDO電源の過渡応答特性

4-3 電源損失の検討(シミュレーション結果)

●単出力ソフトSW電源

* 条件: $V_i=10V$ 、 $V_o=5.0V$
(4割程 UP)

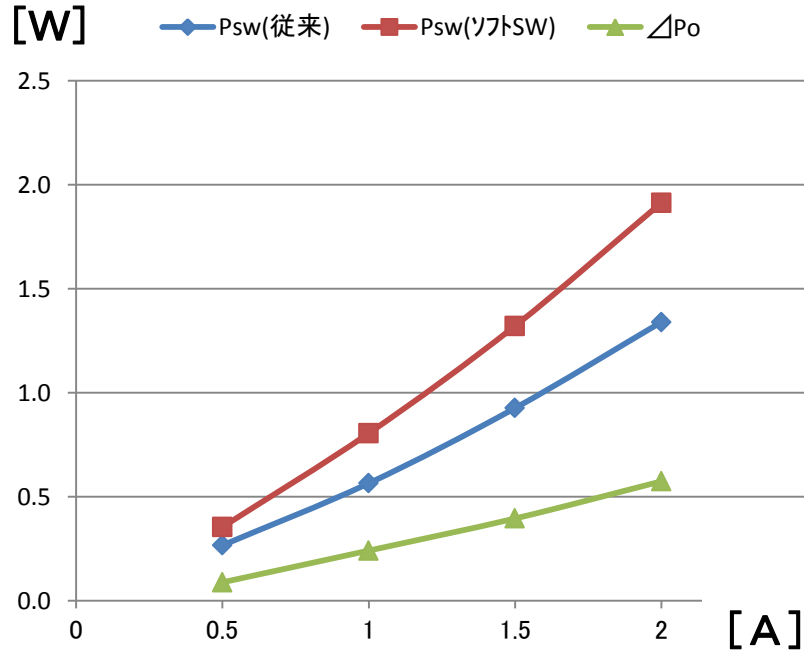


図 2 0 単出力電源の損失

●SIDOソフトSW電源

* 条件: $V_i=12V$ 、 $V_1=6.0V$ 、 $V_2=5.0V$

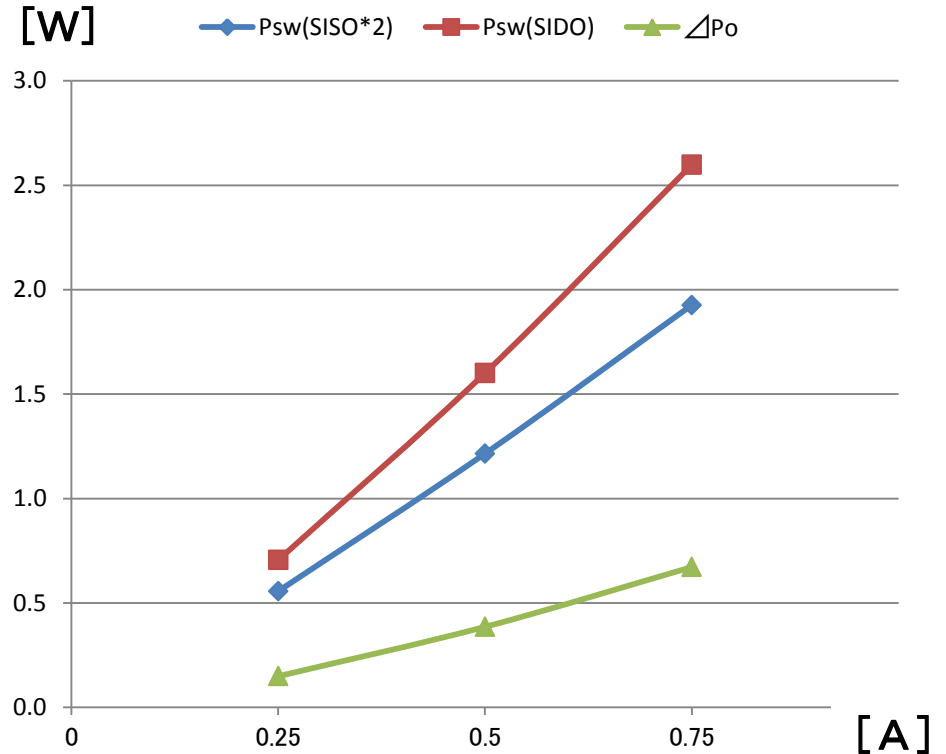


図 2 1 SIDO電源の損失

◆DC-DC電源へのソフトSW方式の単純適用は、厳しい

4-4 スイッチング電圧のスペクトラム

◆スイッチ素子の両端電圧のスペクトラム比較

* ソフトSW: 共振電圧は大きく、低域ではスペクトラム大
しかし、50MHz以上では、従来電源より小さい

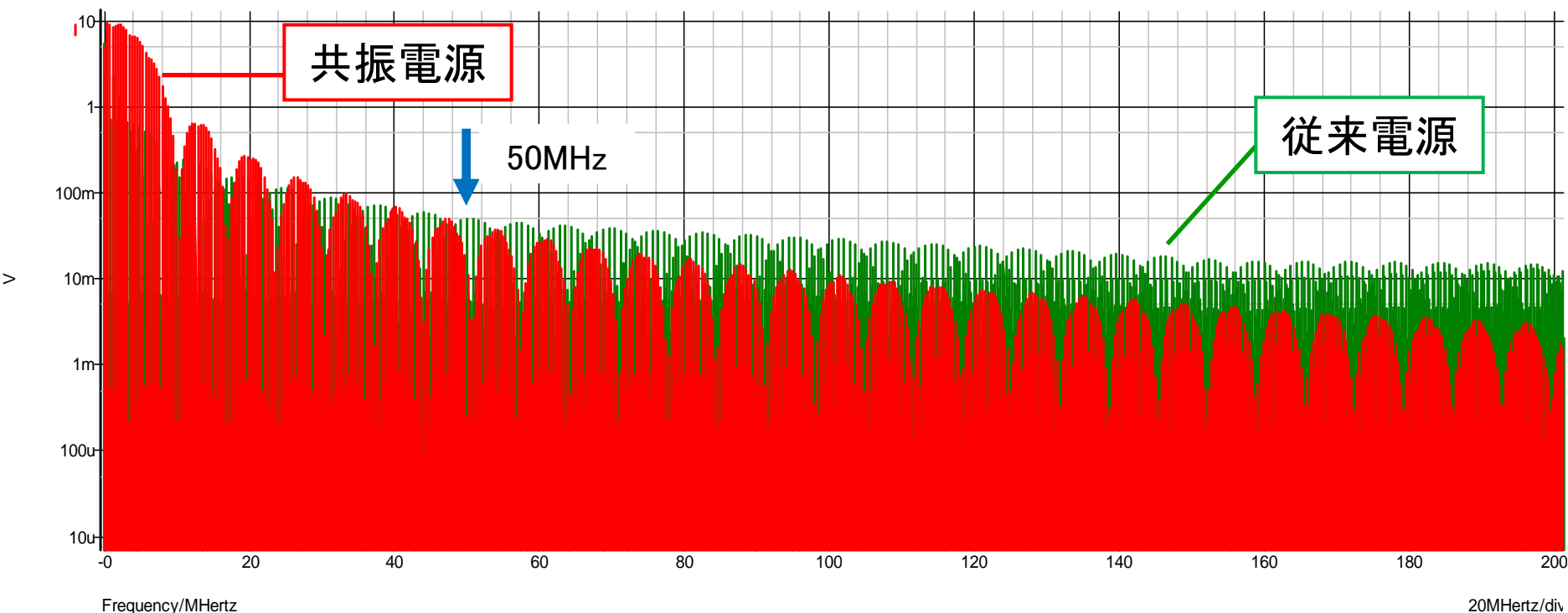


図 2 2 スイッチ素子の両端電圧のスペクトラム

◆ 今後に 更なるEMI低減を検討していく

5. まとめ

半波型電圧共振ソフトスイッチング電源において、
新電圧共振ソフトスイッチング電源を検討

- 1) ツエナーによるクランプ回路の適用 ⇒ 低耐圧素子の使用可
共振電圧: $V_r = 30V \sim 50V$ に低減 (ツエナー電圧に依存)
- 2) 定常出力電圧リップル $< 2mV_{pp}$ @ $I_o = 0.5A$
過渡応答特性 $< \pm 15mV$ @ $\Delta I_o = 0.25A$
- 3) Exclusive方式 SIDO電源 ⇒ インダクタ数の低減
定常出力電圧リップル $< 10mV_{pp}$ @ $I_o = 1.0A$
過渡応答特性 $< \pm 12mV$ @ $\Delta I_o = 0.25A$
- 4) SW素子電圧のスペクトラム: 50MHz以上では、従来より小さい

ご 静 聴

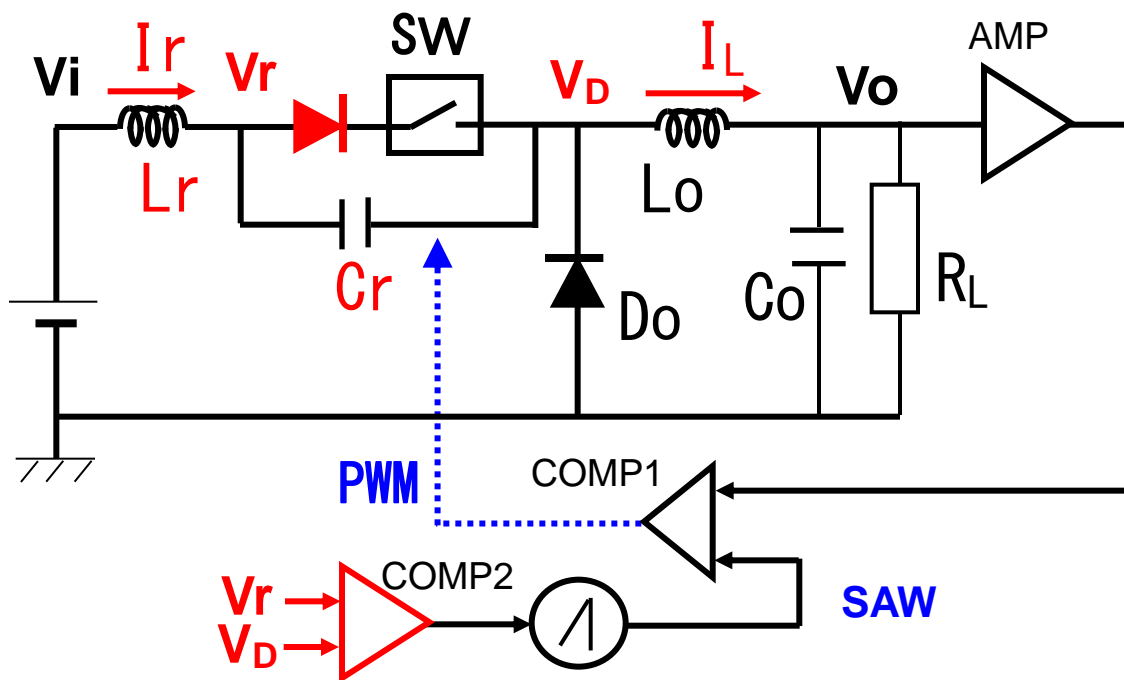
ありがとうございました。

参考：全波型電圧共振電源

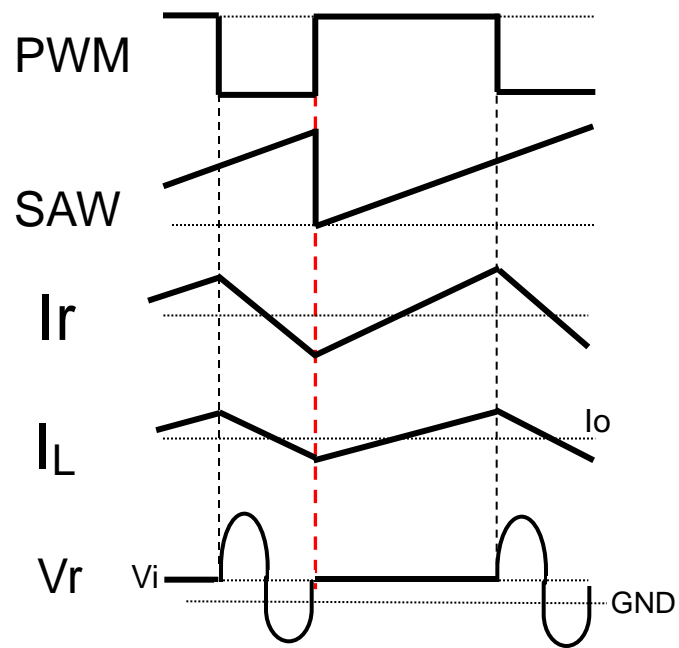
【構成】

- ・半波型構成に、スイッチと直列に **ダイオード挿入**
- ・ $V_r < V_D$ 時の共振を持続（負電圧に共振持続）
- ・次の $V_r = V_D$ の検出で、SAW信号をリセット/スタート

【特徴】動作周波数は、負荷電流で変化しない！



図A 半波型電圧共振電源



図B 主要共振波形 25

2-2 半波型電圧共振電源

【特徴】

- * 共振条件: $V_i < V_r = I_o \cdot Z_r$ ($Z_r = \sqrt{L_r / C_r}$) 特性インピーダンス
- * 共振周波数: $F_r = 1 / 2\pi \sqrt{L_r \cdot C_r}$
- * 動作周波数 $F_{op} \propto$ 負荷電流 I_o (除く: 全波型共振)
- * ZVSによる効率改善 \leftrightarrow 共振電流によるロス増大

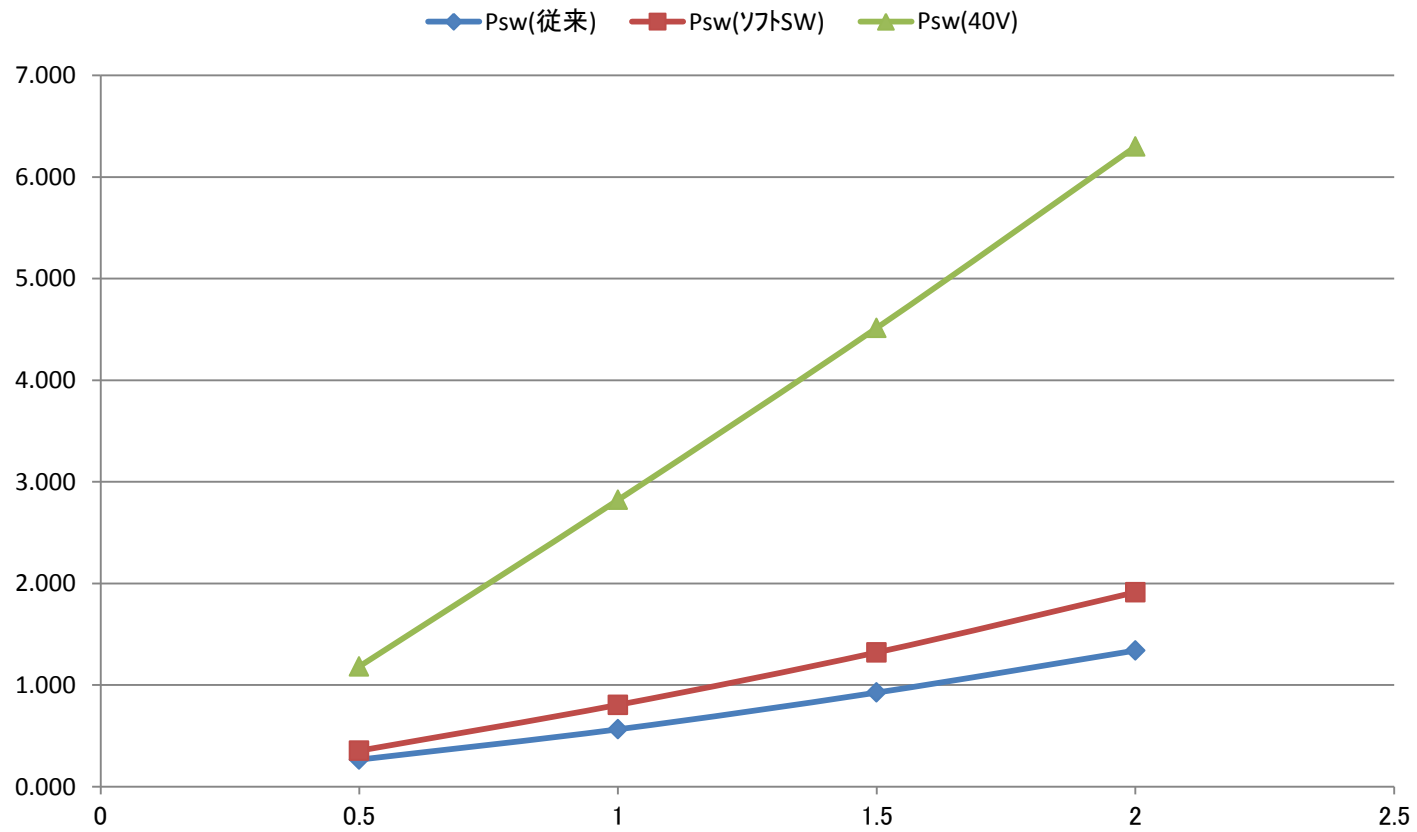
【DC-DCコンバータでは】

- * ZVSによる効果: 一般に効率改善が困難 \Rightarrow 今回は基礎検討!
- * 共振電圧 V_r : 非常に高い ($> 100V$) \Rightarrow 高耐圧素子 必要
- * 無負荷時の共振起動の確保必要 (ダミー電流)



【今回の検討事項】

- * クランプ回路による「共振電圧 V_r の低減」 \Rightarrow 諸特性のチェック
- * 負荷電流による動作周波数、効率改善の検討
- * SIDO電源化による部品点数削減検討
- * 同期整流化による効率改善検討



●スイッチングロス

* ターンオン時の損失

$$\Delta P_{ON} = \frac{1}{6} \cdot V \cdot I \cdot \Delta T_{ON} \quad [W]$$

* ターンオフ時の損失

$$\Delta P_{OFF} = \frac{1}{6} \cdot V \cdot I \cdot \Delta T_{OFF} \quad [W]$$

★ スイッチング損失

$$\Delta P = \frac{1}{6} \cdot V \cdot I \cdot (\Delta T_{ON} + \Delta T_{OFF}) \cdot F_{SW} \quad [W]$$

● 近年の高速化により
スイッチング・ロスは急増

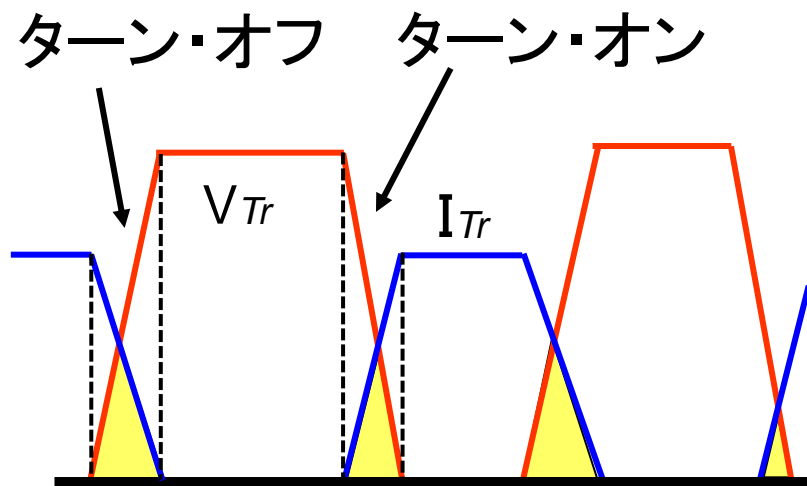
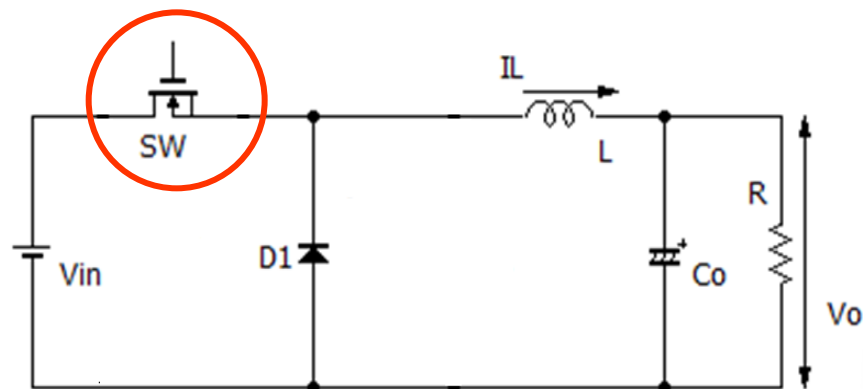


図4 スイッチングロス

★ ZVS-PWM制御共振電源

【構成】 還流ダイオードと並列に 共振コンデンサのみ 追加

【特徴】 共振条件: $V_i < 2V_o$: 低出力電圧では 使用不可

【動作】 C_r と L_o で共振: $V_r = V_i$ の検出で SW=ON (ZVS)

0) ステージ0: SW = ON $\Rightarrow I_L$ は増加し、 V_o も増加

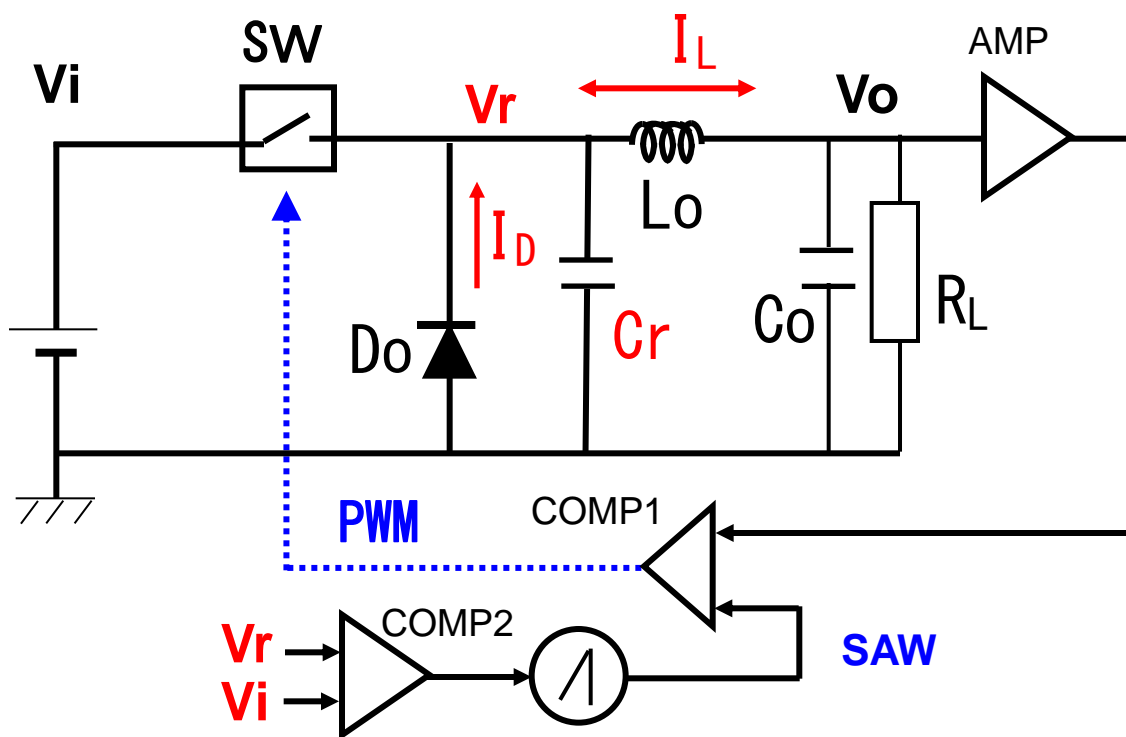


図5 ZVS-PWM共振電源

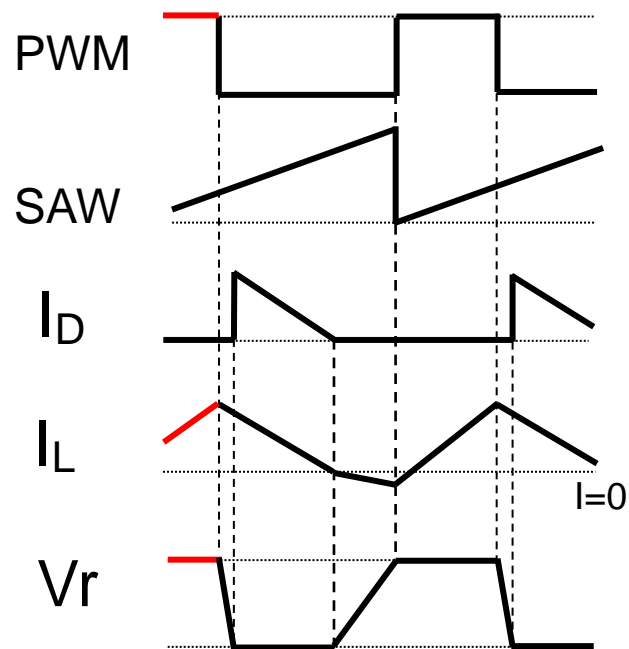


図6 主要共振波形 29

- 1) **ステージ1**: $V_o > V_{ref}$ となり、 $SW = OFF$
 I_L により V_r 減少 ($C_r \cdot L_o$ で共振)
- 2) **ステージ2**: $V_r < 0V$ で、 $Do = ON \Rightarrow$ 共振停止
 ただし、 Do を介して、 I_L は順方向に流れ続ける
- 3) **ステージ3**: L_o はエネルギーを放出し、逆方向に電流
 $\Rightarrow C_r$ に充電 $\Rightarrow V_r$ は上昇
- 4) **ステージ4**: $V_r = V_i$ 検出で、 $SW=ON$ 、 SAW をリセット/スタート
 L_o は逆電流が減少し、遂には順方向電流 \Rightarrow ステージ0に戻る

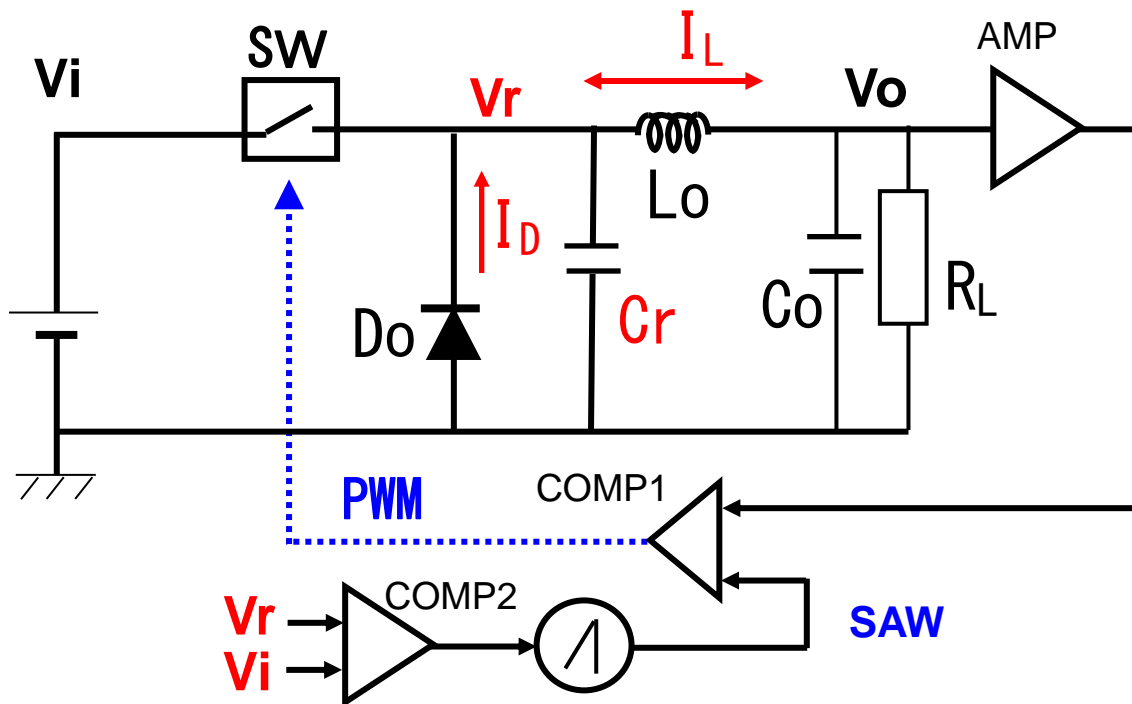


図5 ZVS-PWM制御共振電源

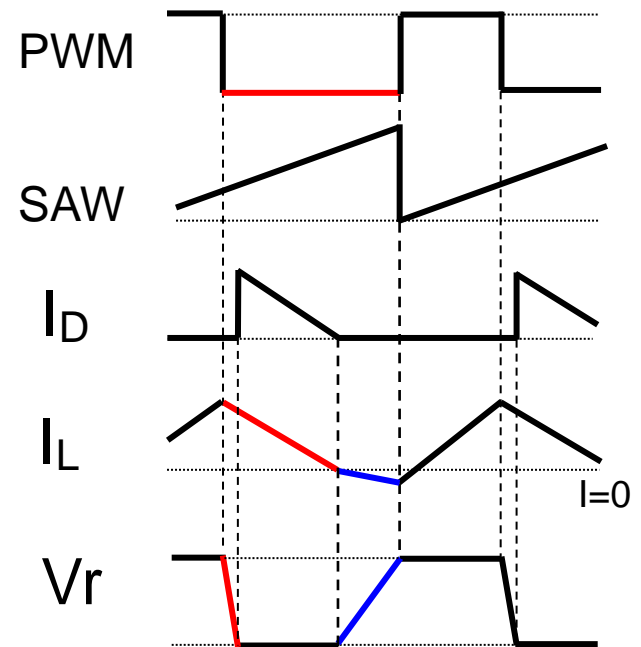


図6 主要共振波形 30

● 制御周波数の変化 ($V_z = 40V$)

・条件: $V_i = 10V$, $V_o = 5.0V$, $I_o = 0.2A \sim 1.0A$

* 結果:

・クランプ無: $T_o = 2.5 \mu \sim 11.0 \mu s$

・クランプ付: $T_o' = 1.9 \mu \sim 7.1 \mu s$ ($V_z = 40V$)

★クランプ電圧による差無し

クランプにより

周期変化は半減

まだ、 $k = 7 \mu s/A$ の傾斜

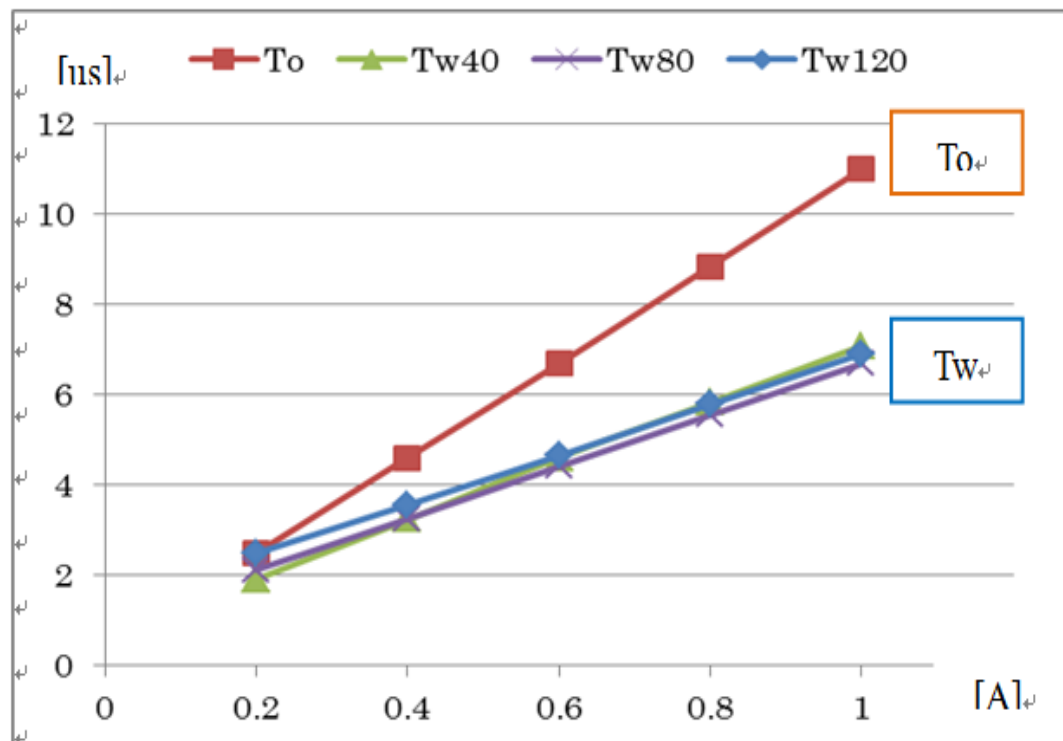
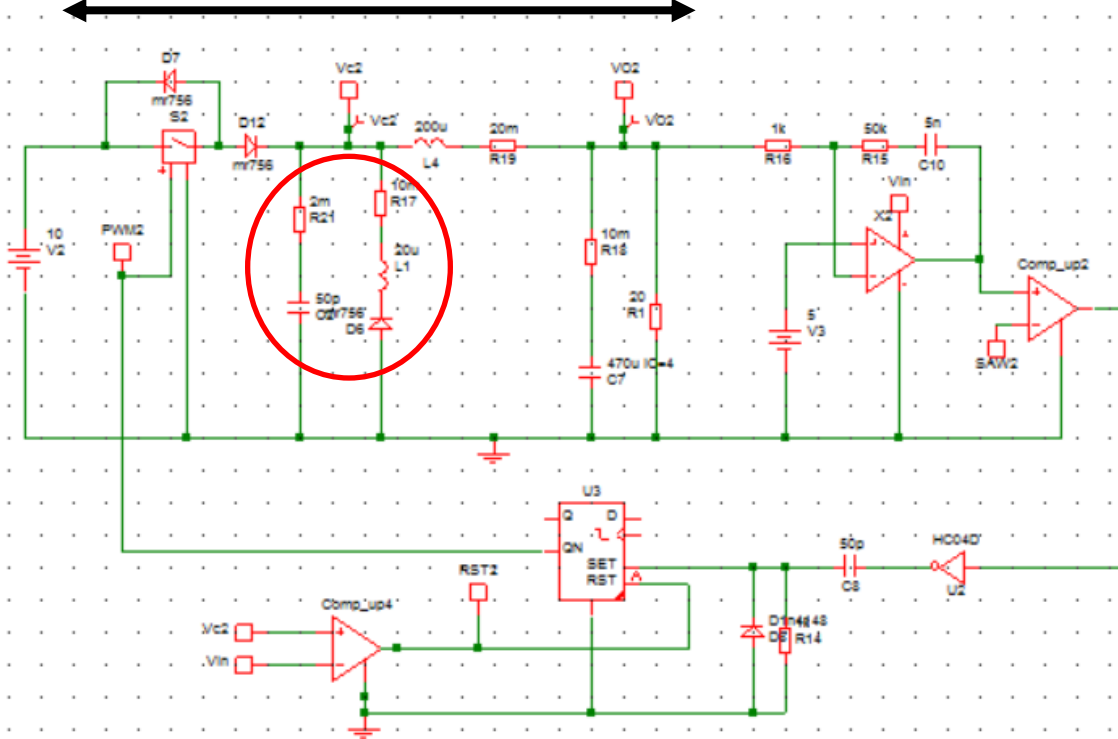


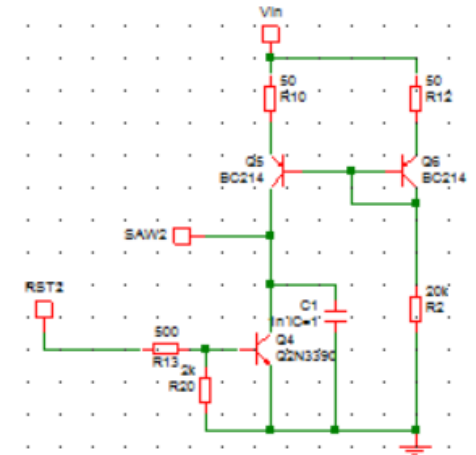
図 1 6 負荷電流 対 制御周期

【シミュレーション回路】 [効率実測時は、PMOS使用]

[パワーステージ]



[鋸歯状波発生回路]



[コントロール部]