

パワーエレクトロニクス工学論

9. ソフトスイッチング電源

(共振型スイッチング電源)

9-1 各種ソフトスイッチング方式

9-2 ZVS-PWM制御スイッチング電源

9-3 電圧共振型ソフトスイッチング電源

9-4 新方式共振型ソフトスイッチング電源

9.1 各種ソフトスイッチング方式

(1) ソフトスイッチングの概要

● 特徴

* メリット : **スイッチング損失の低減**・・・効率の向上

* デメリット : 共振用LCの追加、共振周波数の変動

● 動作

* 出力電圧・電流を共振・・・正弦波波形(ノイズ小さい)

* SW素子の $V=0$ (あるいは $I=0$) で スイッチを切換え

⇒ スイッチの損失がない

ZVS : Zero Voltage Switching

ZCS : Zero Current Switching

● 種類(多数の方式あり)

* 電流共振 / 電圧共振 / 複共振

* 直列共振 / 並列共振

◆スイッチング動作波形の比較

(A) 通常の動作

- * 両端電圧の切換えと、
電流の切換えが同時に発生
- * OFF時の電流切換えが遅れる
- * スwitchング・ロス

$$\text{ロス電力: } P = \int V \cdot I$$

(B) ソフトスイッチングの動作

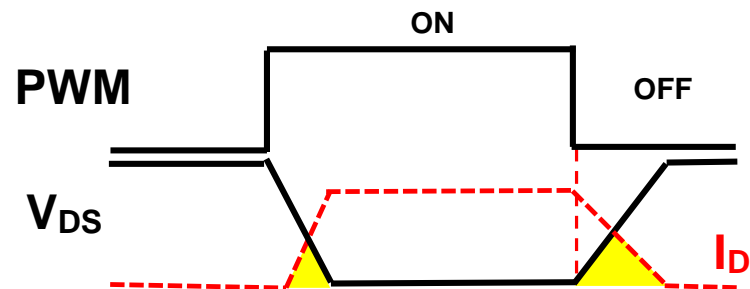
- * 共振により電圧や電流を振動

[ZVSの場合]

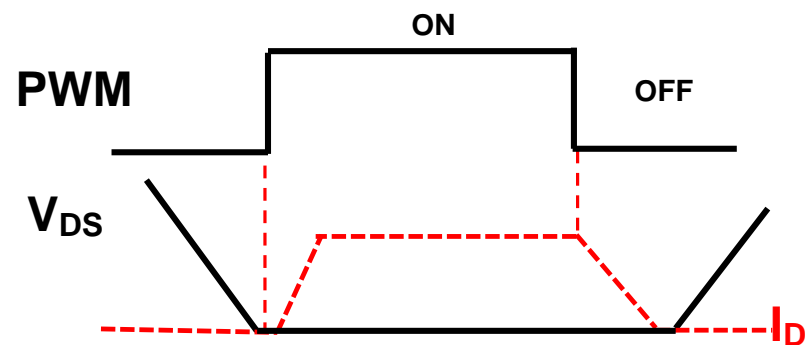
- ・両端電圧=0 でSW=ON

[ZCSの場合]

- ・SW電流=0 でSW=ON



(A) 通常のスイッチング波形

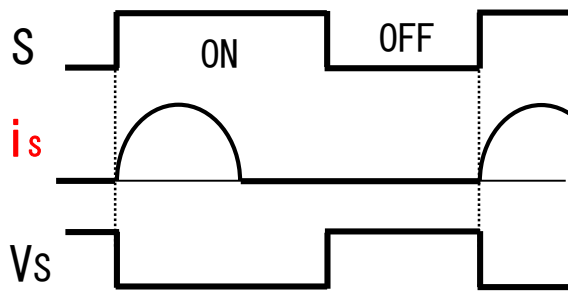
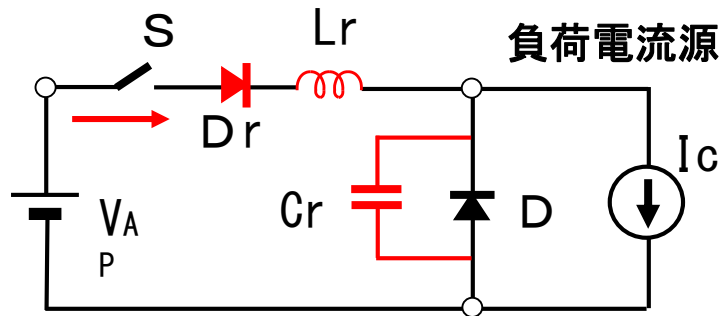


(B) ソフトスイッチング波形

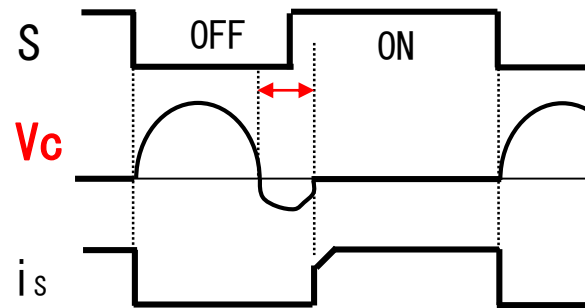
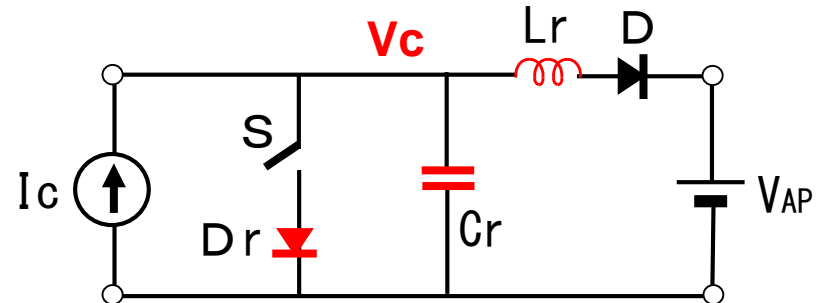
(2) ソフト・スイッチングの基本回路

● 電流共振スイッチ と 電圧共振スイッチ

- * スwitching電源に対して、共振素子(Lr, Cr, Dr)を追加
- * 電流(電圧)共振時、電圧(電流)は通常のスitching
- * コンデンサの挿入位置の相違
- * 電流(電圧)=0の期間にスitch切換え・・・スitch期間は限定



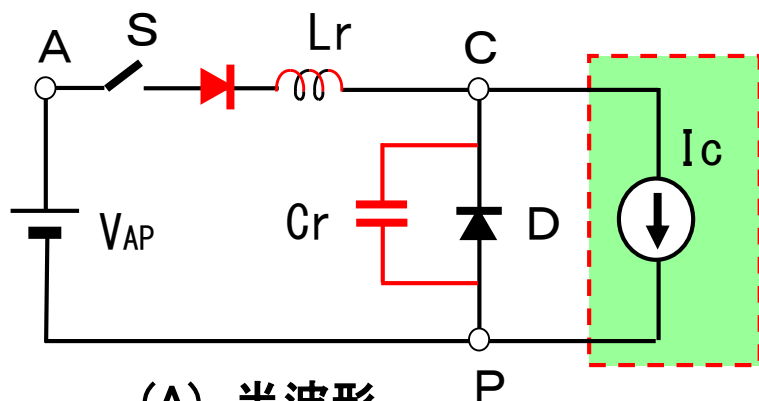
(A) 電流共振スイッチ(半波形)



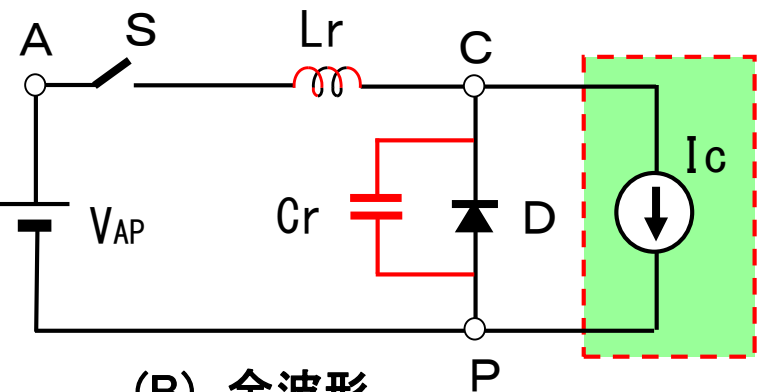
(B) 電圧共振スイッチ(全波形)

(参考1) 電流共振スイッチとコンバータ構成

- 動作:
 - ・共振周波数は固定: SW周波数を可変して出力電圧制御
 - ・半波形/全波形: 半周期/一周期の電流をDで制限

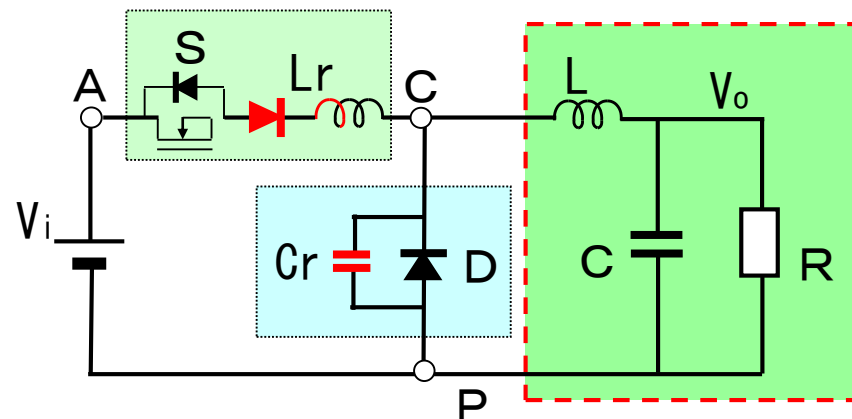


(A) 半波形

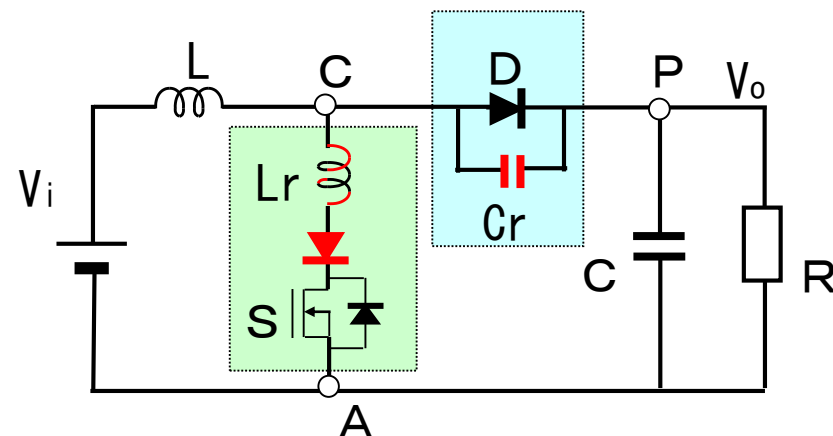


(B) 全波形

電流共振スイッチ(降圧形電源)



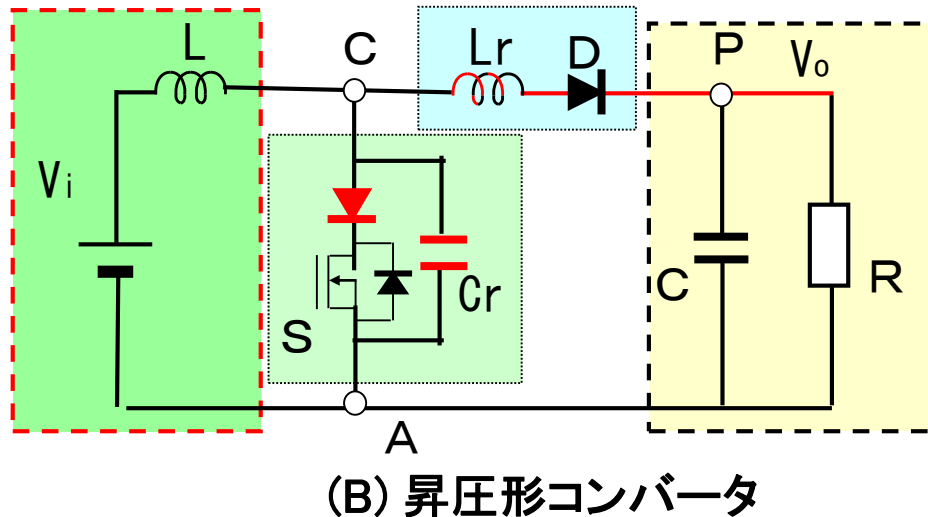
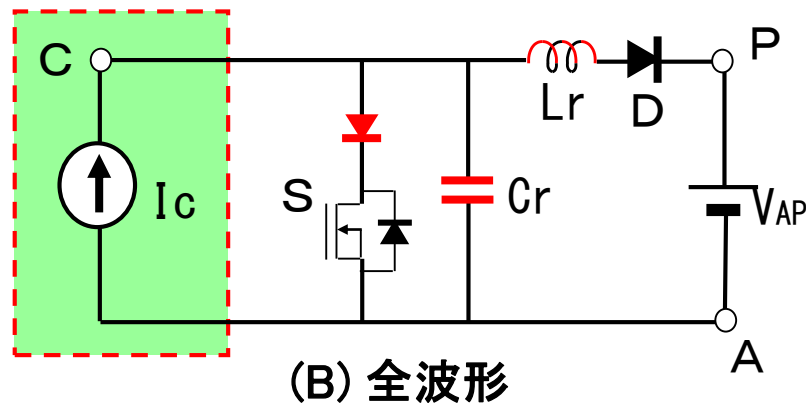
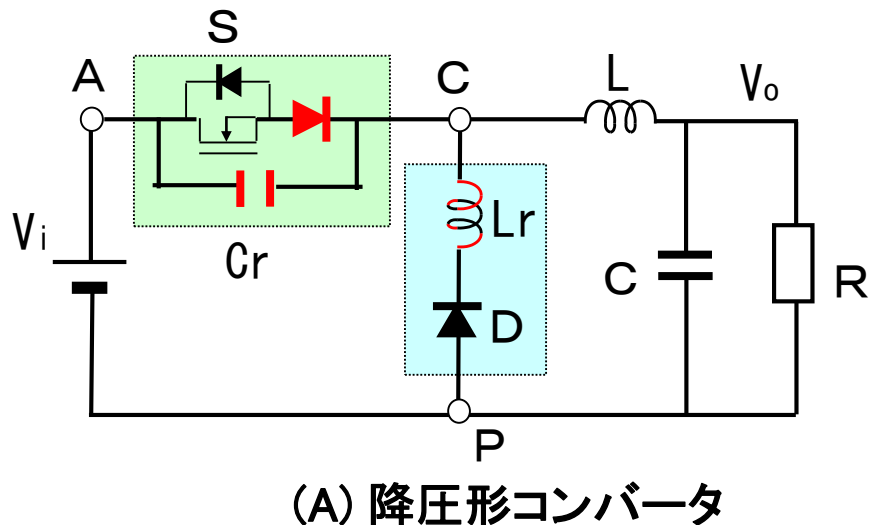
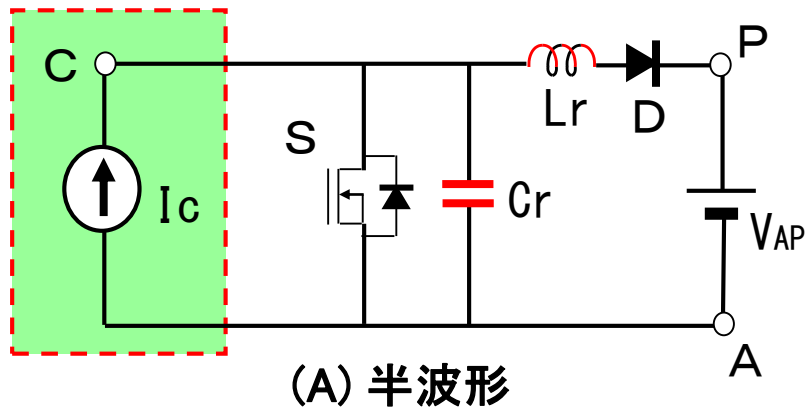
(A) 降圧形コンバータ(半波形)



(B) 昇圧形コンバータ(全波形)

(参考2) 電圧共振スイッチとコンバータ構成

* 半波形／全波形：半周期／一周期の電圧供給を、 D_i で制限



電圧共振スイッチ(昇圧形電源)

9.2 ZVS-PWM制御スイッチング電源

(1) 降圧形ZVS-PWM制御電源

● 構成

* 共振コンデンサ1個のみ追加

* $V_c = V_{in}$ で SW = ON

⇒ スイッチング損失 = 0

● 特徴

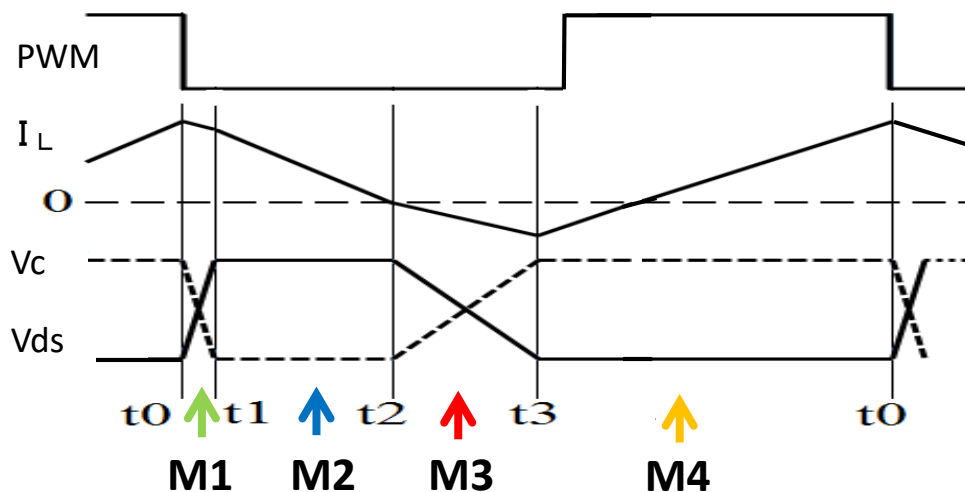
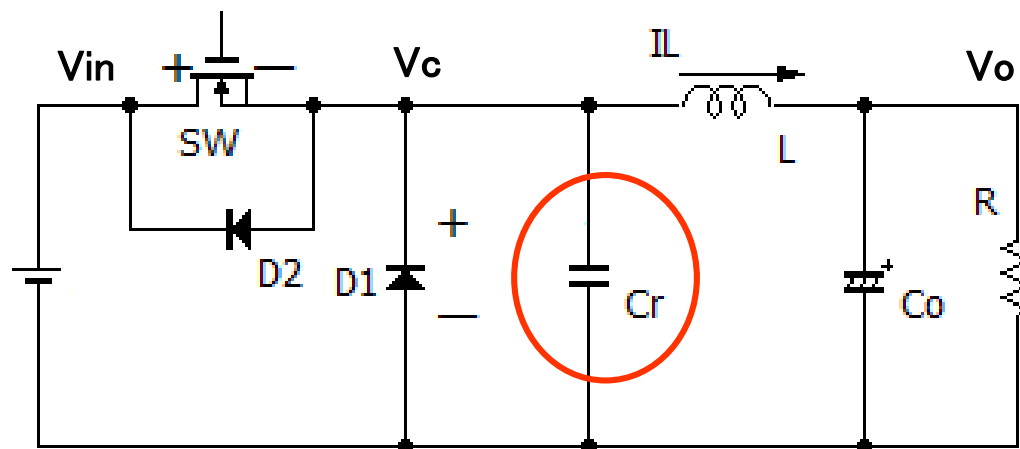
* コイルに双方向電流

LC共振 ⇒ V_c を立上げる

* 制御周波数(周期)

▪ SW-OFF時間: 共振条件

▪ SW-ON時間: 制御条件



ZVS-PWM制御スイッチ電源の構成と動作

● 動作説明

*モード1: $t_0 \sim t_1$

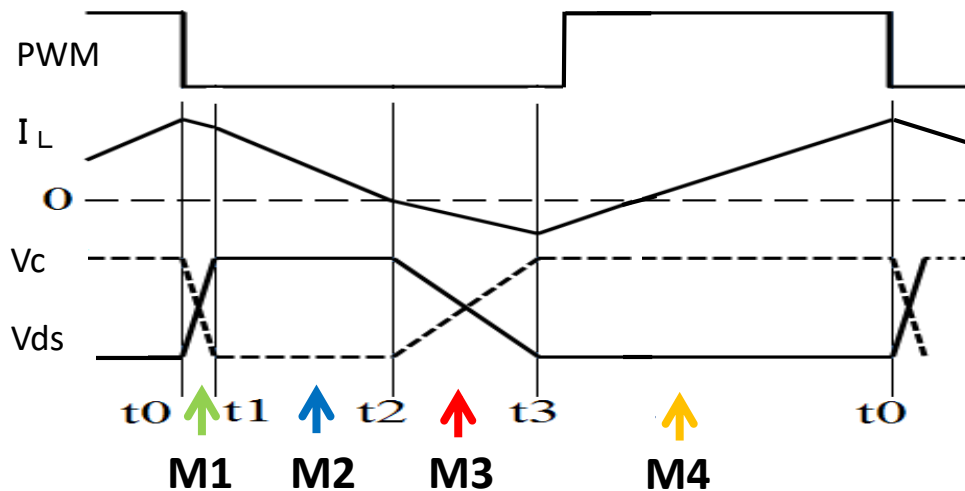
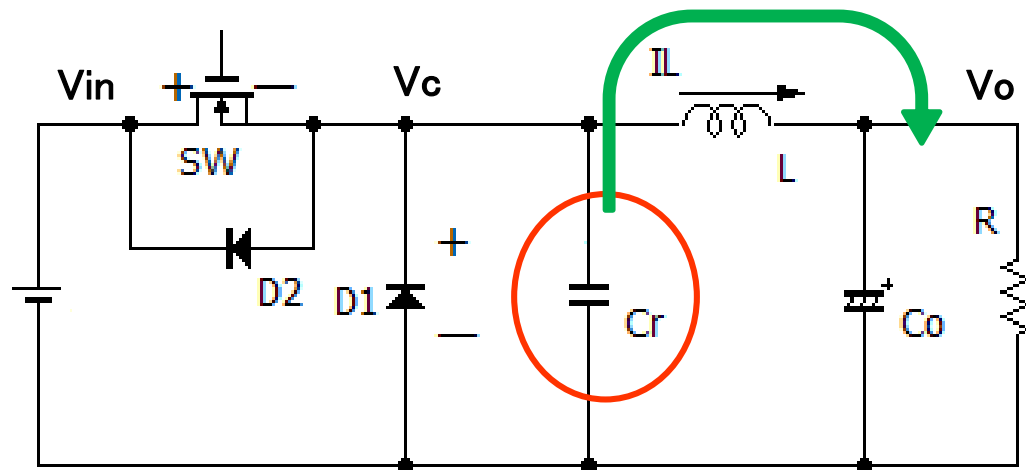
・PWM信号=OFF \Rightarrow SW=OFF

・ I_L 順方向電流により、
共振 C_r の電荷は放出
 $\Rightarrow V_c$ 低下

$$V_c(t) = V_{in} - (I_o / C_r) \cdot t \quad (9-1)$$

・短時間で $V_c = 0V$

$$T1 \doteq V_{in} \cdot C_r / I_o \quad (9-2)$$



ZVS-PWM制御スイッチ電源の構成と動作

*モード2: $t_1 \sim t_2$

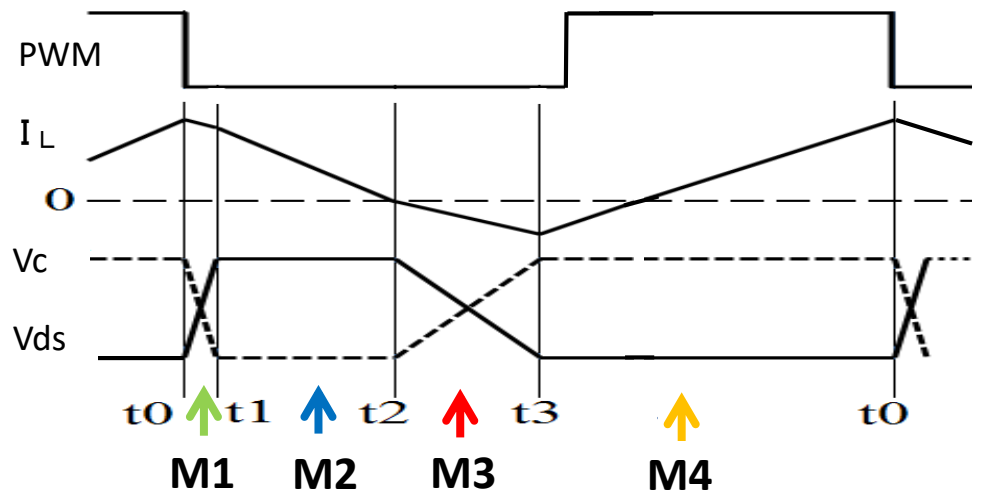
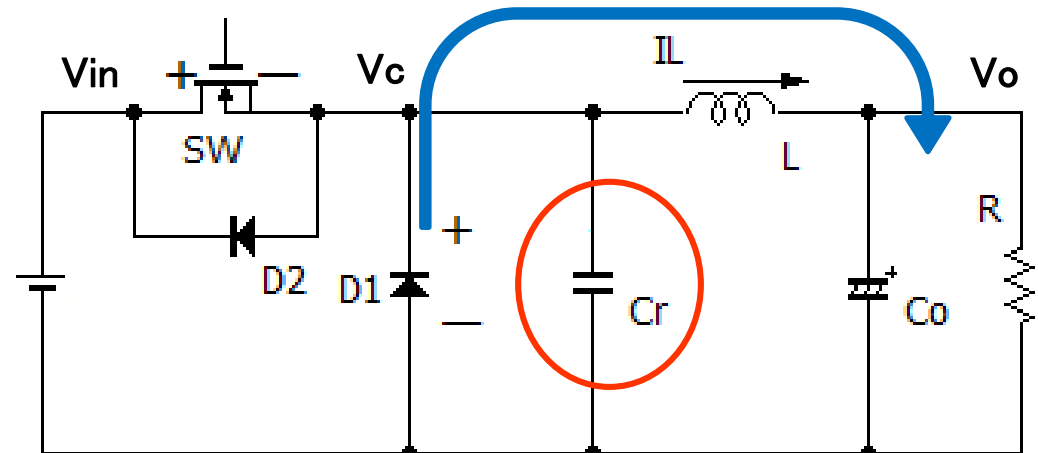
・ $V_c = 0 \text{ V} \Rightarrow D_1 = \text{ON}$

・ I_L は次式により、直線的に減少

$$I_L(t) = I_o - (V_o / L) \cdot t \quad (9-3)$$

・短時間で $I_L = 0 \text{ A}$

$$T_2 = I_o \cdot L / V_o \quad (9-4)$$



ZVS-PWM制御スイッチ電源の構成と動作

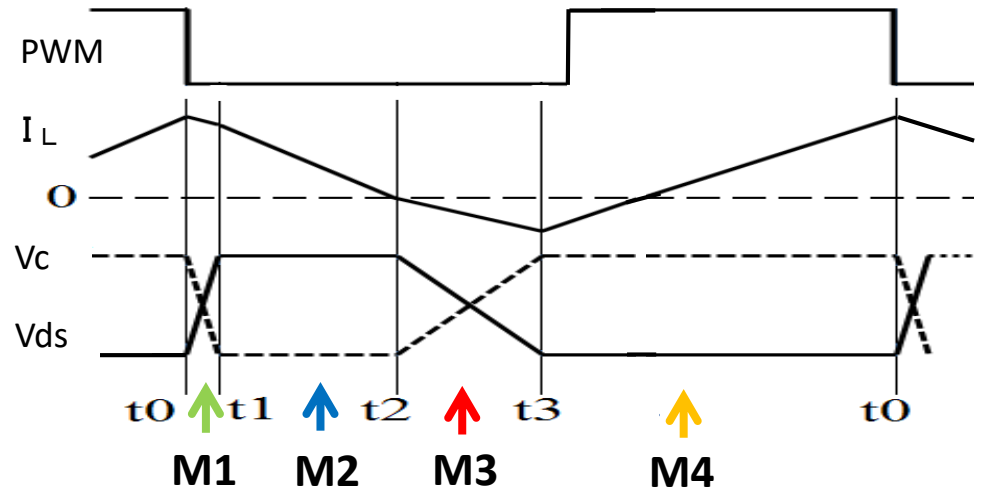
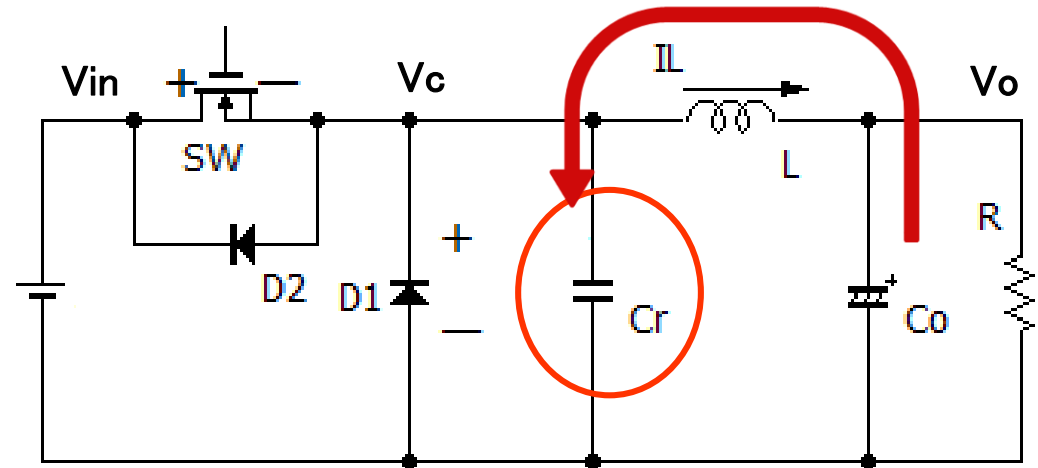
*モード3: $t_2 \sim t_3$

- ・ $I_L = 0 \text{ A} \Rightarrow$ コイル電流は反転(反転電流)
 $\Rightarrow D1=OFF$ より LC共振 ($C_o=$ 電源)
 $\Rightarrow C_r$ は充電を開始し、 V_c 上昇

$$V_c = \text{宿題} \quad (9-5)$$

- ・ V_c は上昇し、遂には $V_c = V_{in}$

$$T3 = \text{宿題} \quad (9-6)$$



ZVS-PWM制御スイッチ電源の構成と動作

*モード4: $t_3 \sim t_0$

・ $V_c = V_{in} \Rightarrow$ ボディ・ダイオード $D2=ON$

$V_c = V_{in}$ をコンパレータで検出

・ PWM = "H" により、SW = ON

$\Rightarrow V_{in}$ の供給により、

I_L の微小反転電流は
すぐに順方向に流れる

$$I_L(t) \doteq t \cdot (V_{in} - V_o) / L \quad (9-7)$$

・ V_o は徐々に上昇し、

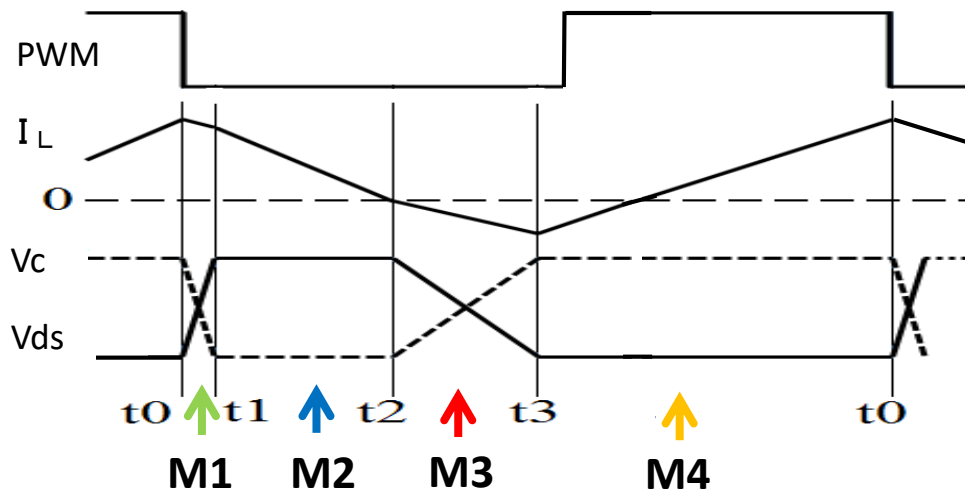
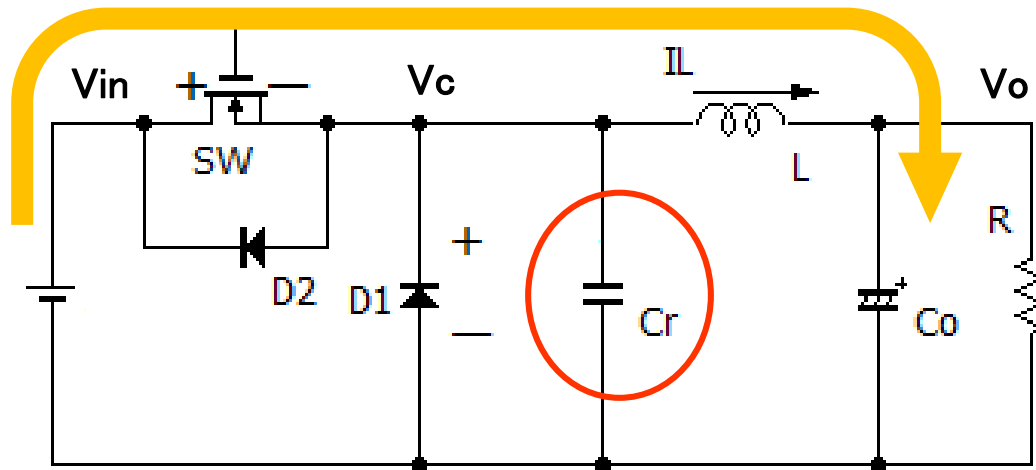
遂には $V_o = V_r$ に達する

$$\begin{aligned} \Delta V_o(t) &= (1/C) \int I_L \cdot dt \\ &= (V_{in} - V_o) / 2LC_o \cdot t^2 \quad (9-8) \end{aligned}$$

・ $V_o = V_r$ を検出し、PWM = "L"



・ モード1 に戻る

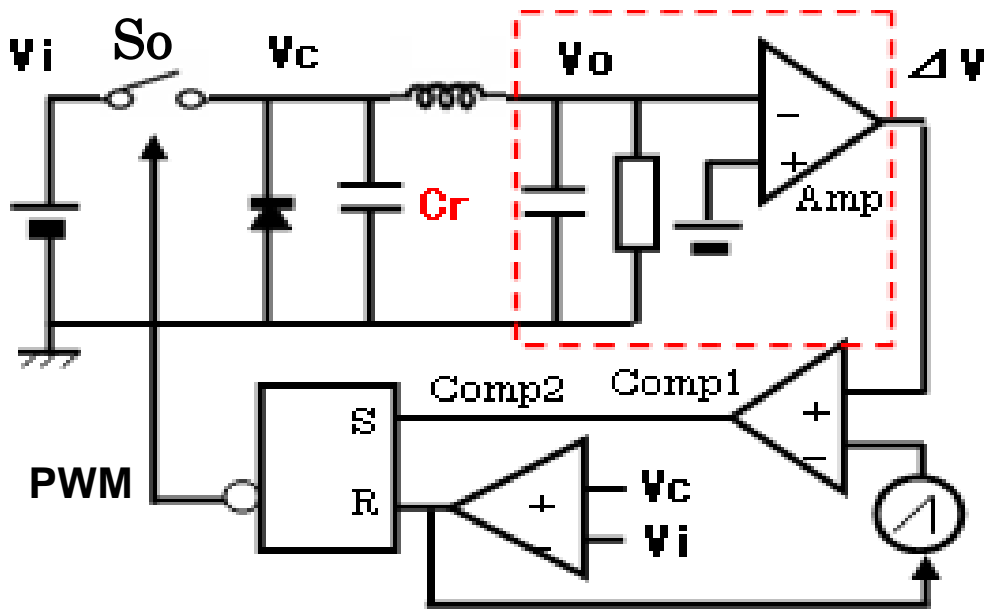


ZVS-PWM制御スイッチ電源の構成と動作

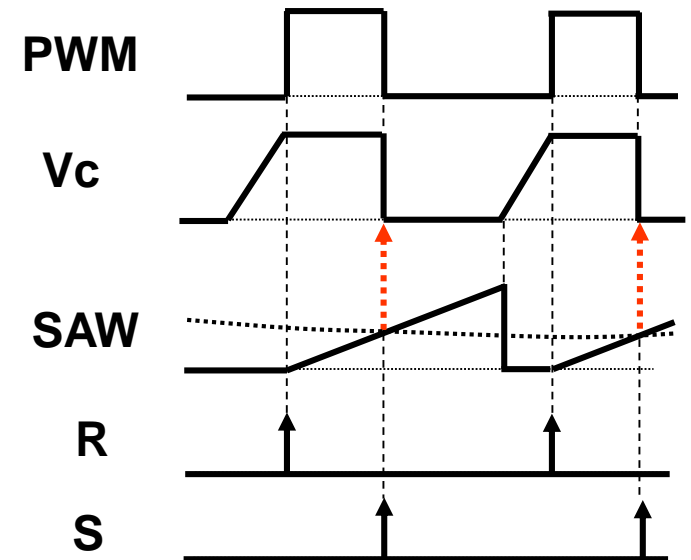
● シミュレーション結果

* 回路構成:

- ・出力誤差電圧とSAW信号を比較 \Rightarrow セット信号S を発生
- ・ $V_c = V_{in}$ により、リセット信号R を発生
 \Rightarrow FF出力 = PWM信号



ZVS-PWM制御電源のシミュレーション回路

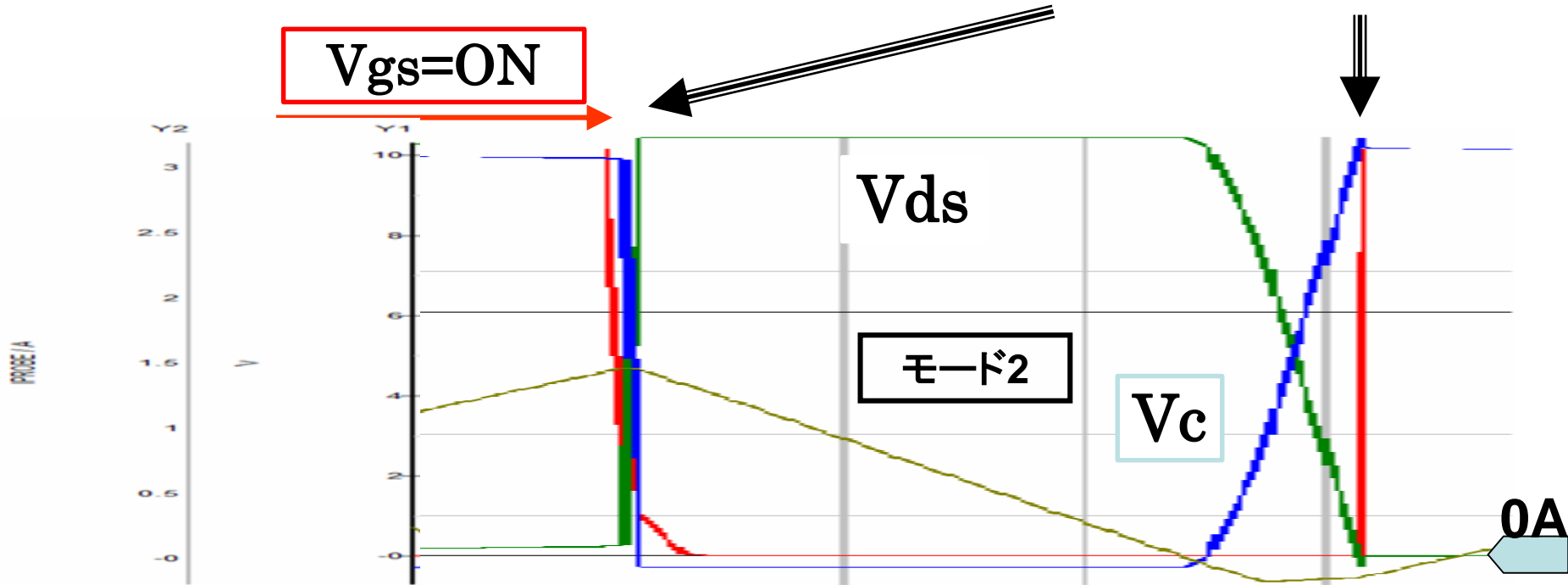
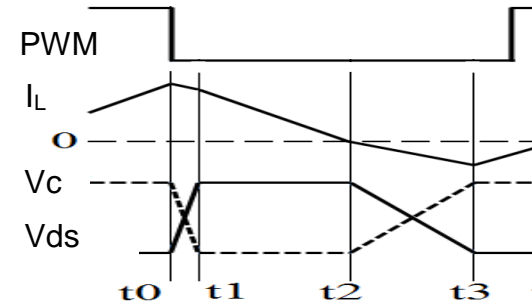


主要波形

● シミュレーション結果(動作波形)

* シミュレーション波形:

- ・共振コンデンサ C_r の値により
モード1の時間を制御可能
- ・コイル値 L の値により
モード2の時間を制御可能



ZVS-PWM制御電源のシミュレーション結果

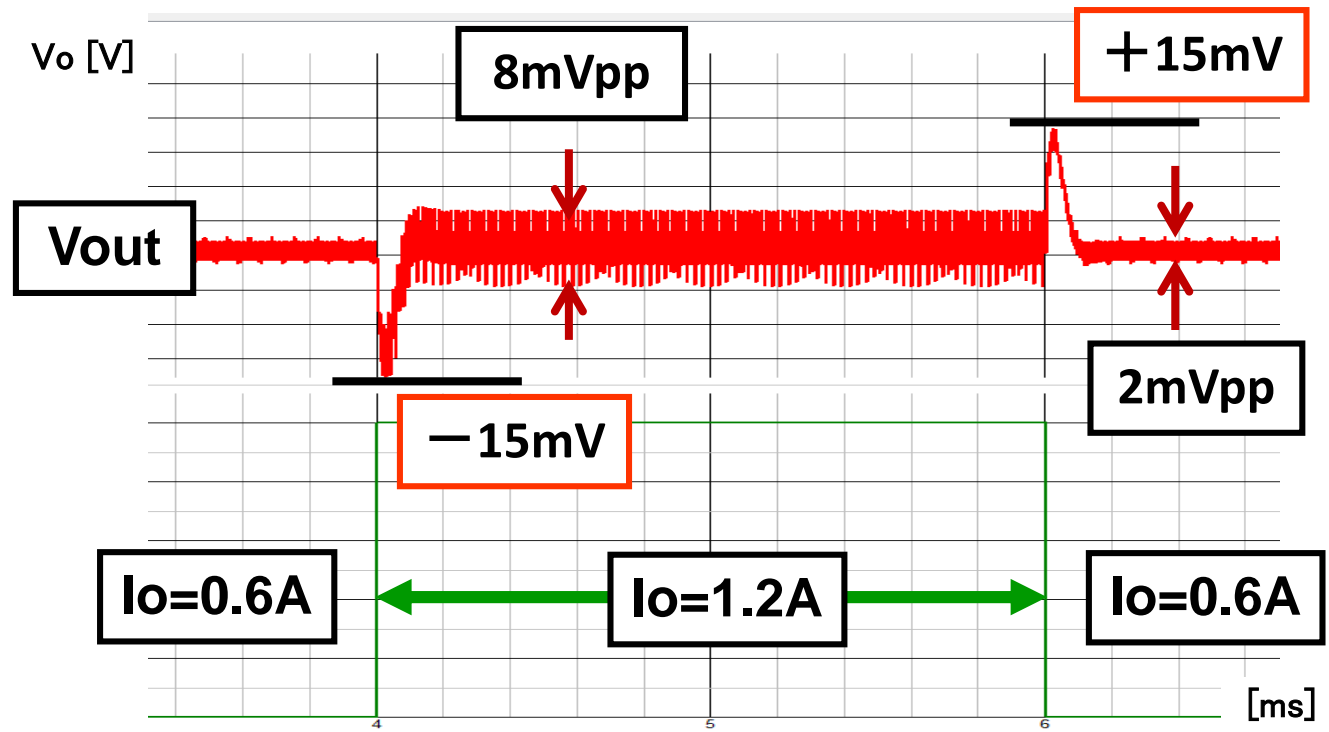
●シミュレーション結果(出カリプル)

条件:

$V_i=10V$, $V_{out}=6.0V$
 $I_o=0.6A/1.2A$, $L=10\mu H$,
 $C_r=10nF$, $C=1000\mu F$

結果:

定常リプル $< 2mV_{pp}$ @ $I_o=0.6A$
過渡応答 $< \pm 15mV$ @ $I_o=0.6/1.2A$



出カリプル・過渡応答特性

● 実測波形

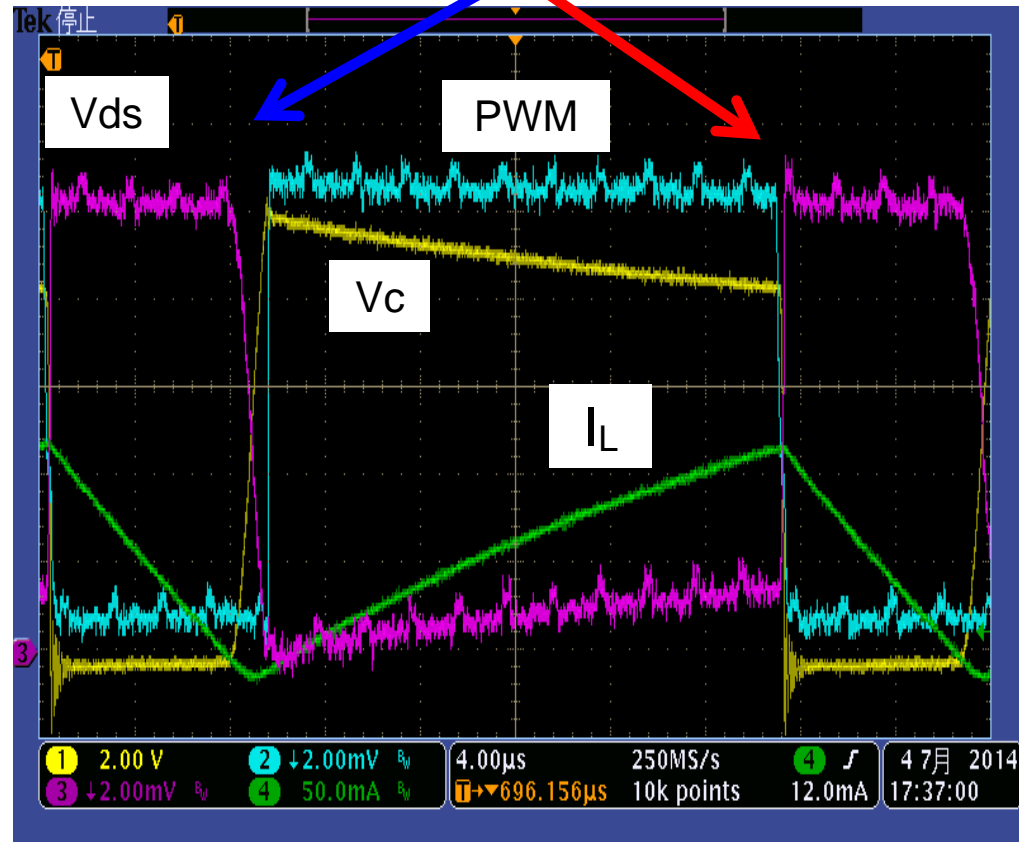
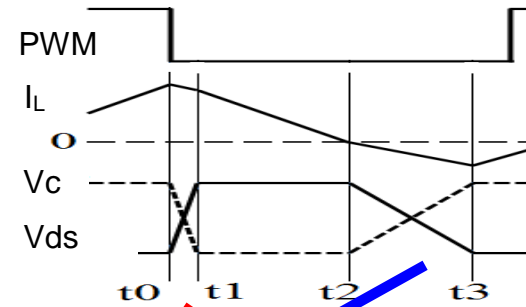
- * 動作条件は、シミュレーション回路と同様
- * 実測波形は、原理波形と類似

● 共振条件

- * 共振条件: $2 \cdot V_o > V_i$
- * Crの動作範囲: $V_c = 0 \sim V_{in}$
- * 起動時の出力電圧:

$V_o > V_i / 2$ に充電必要

★ 起動時のチャージアップ回路必要



ZVS-PWM制御電源の実測波形

(2) 昇圧形ZVS-PWM制御電源

● 構成

- * ダイオードに並列に共振コンデンサを接続

● 動作

- * 共振原理は、降圧形と同様

・M1: SW=OFF

⇒ I_L により C_r は充電

・M2: $V_{sw} = V_o$ ⇒ Di = ON

I_L は次式で減少

$$I_L(t) = I_o - t \cdot (V_o - V_{in}) / L \quad (9-9)$$

・M3: 遂には $I_L = 0$ A となり反転

⇒ C_o より逆電流

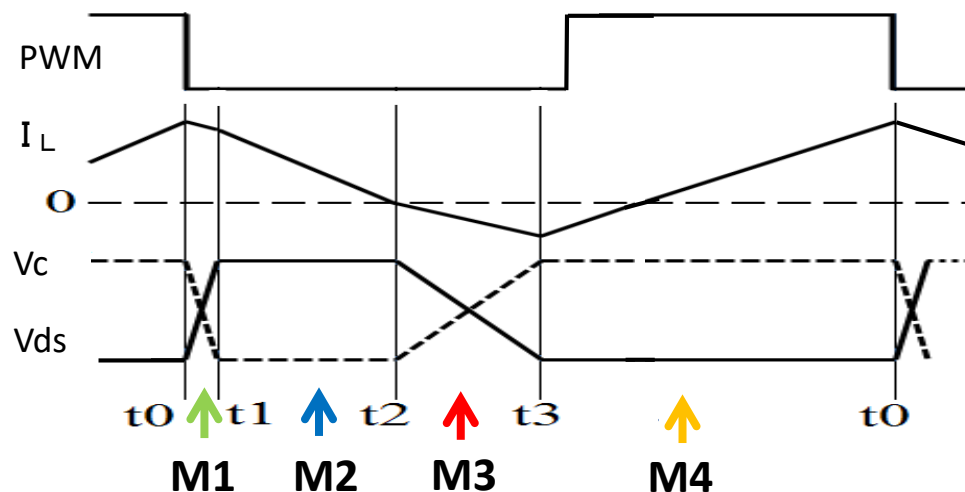
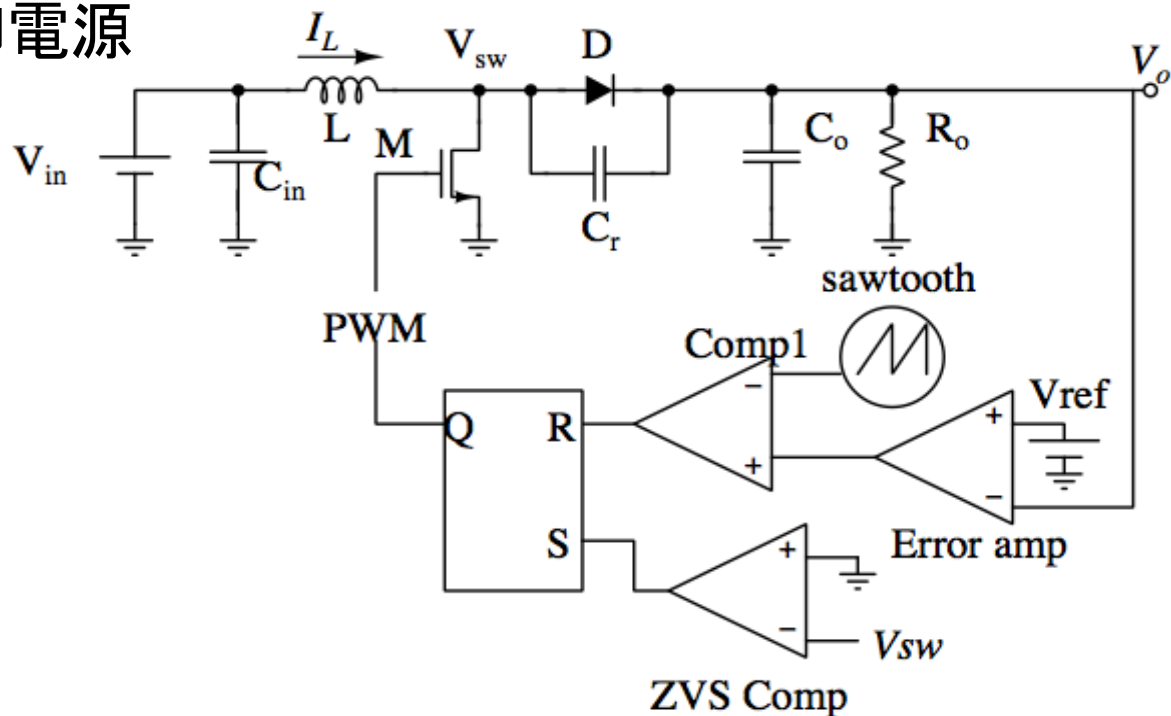
C_r は充電し V_{sw} は低下

・M4: $V_{sw} = 0V$ となり、ボディD=ON

・M5: $V_{sw} = 0V$ をコンパレータで検出

⇒ SW=ON し、コイルにチャージ

・ $V_o = V_r$ により、PWM=OFF



昇圧形ZVS-PWM電源の動作

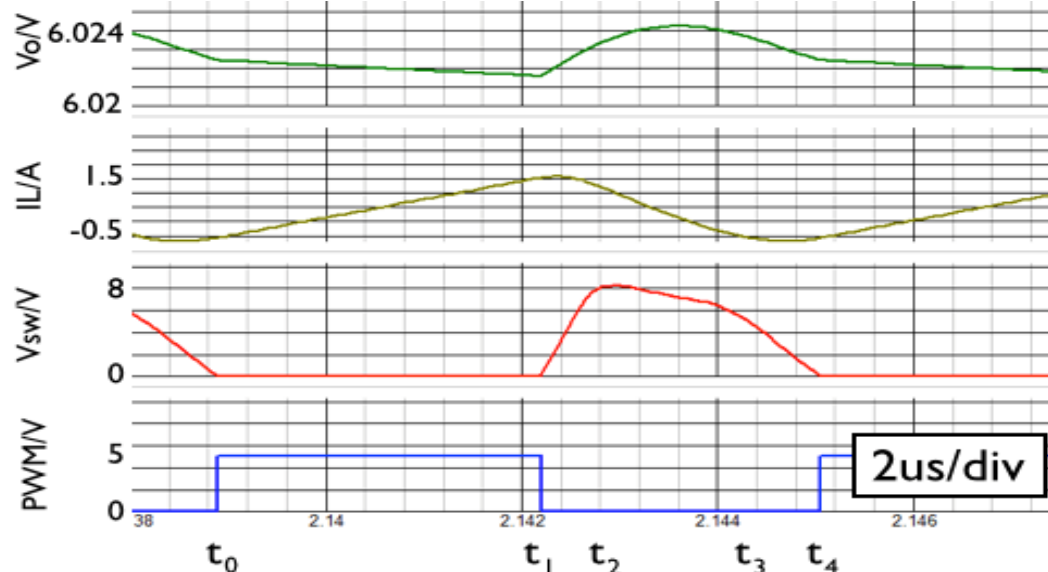
● シミュレーション結果

* 回路条件

$V_i=3.5V$, $V_o=6.0V$, $I_o=0.12A$

$L=3.9\mu H$, $C_o=470\mu F$, $C_r=100nF$

$F_{op}=162.5\text{ kHz}$



昇圧形ZVS-PWM電源のシミュレーション結果

● 実測波形

* 動作周波数

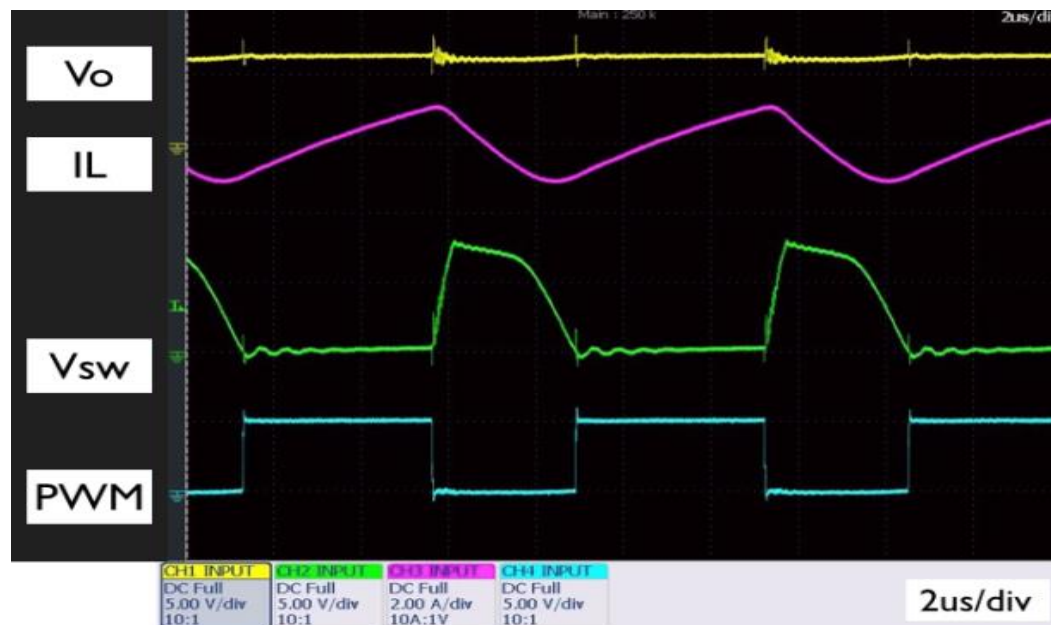
$F_{op}=129\text{ kHz}$ ($< F_{sim}=162.5\text{ kHz}$)

N-MOS、OPアンプ等の遅延
により、動作周波数は低下

* スイッチング損失比較

$\Delta P_{zvs}=0.55W \Leftrightarrow \Delta P_{nor}=29.3W$

損失低減率 = 98 %



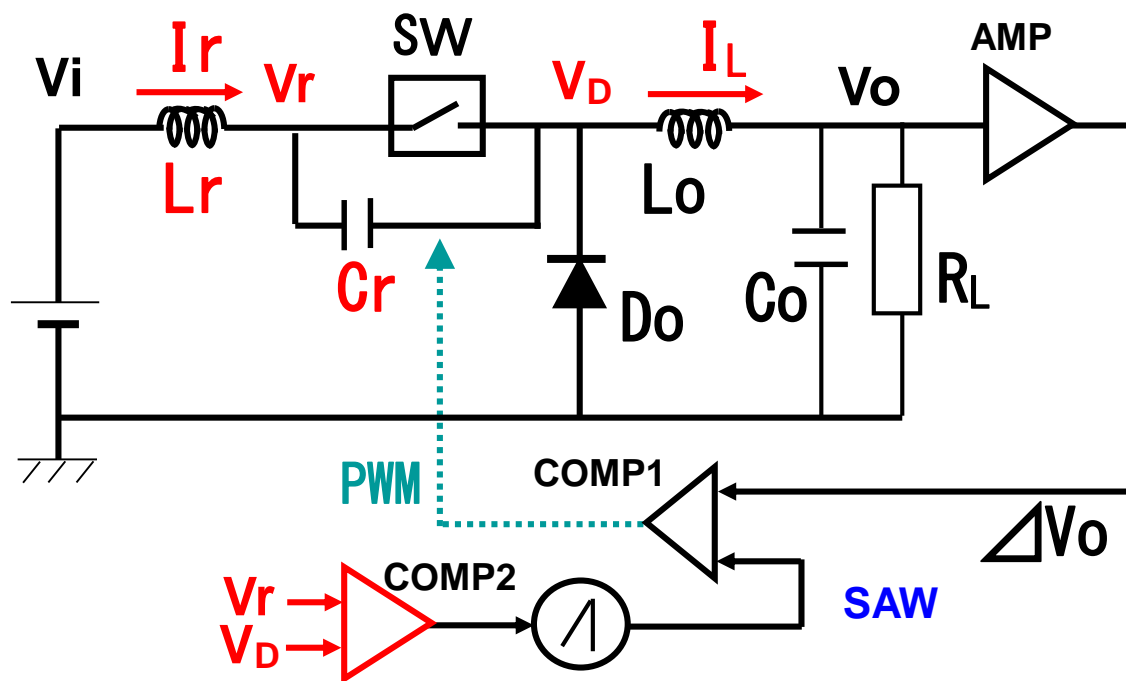
昇圧形ZVS-PWM電源の実測波形

9.3 電圧共振型ソフトスイッチング電源

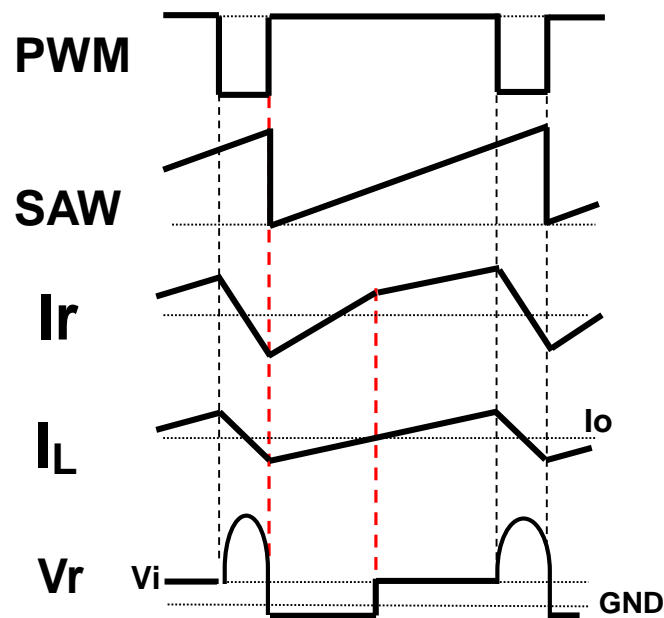
(1) 半波型電圧共振電源

【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: $f_r = 1 / 2\pi \sqrt{L_r \cdot C_r}$ 、 $L_r < L_o$



半波型電圧共振電源



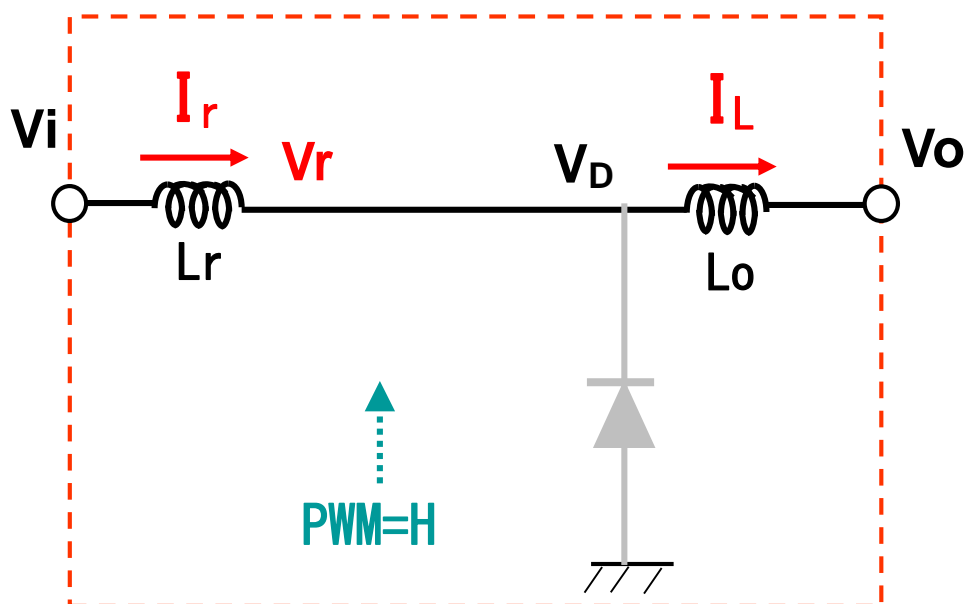
主要波形

(1) 半波型電圧共振電源

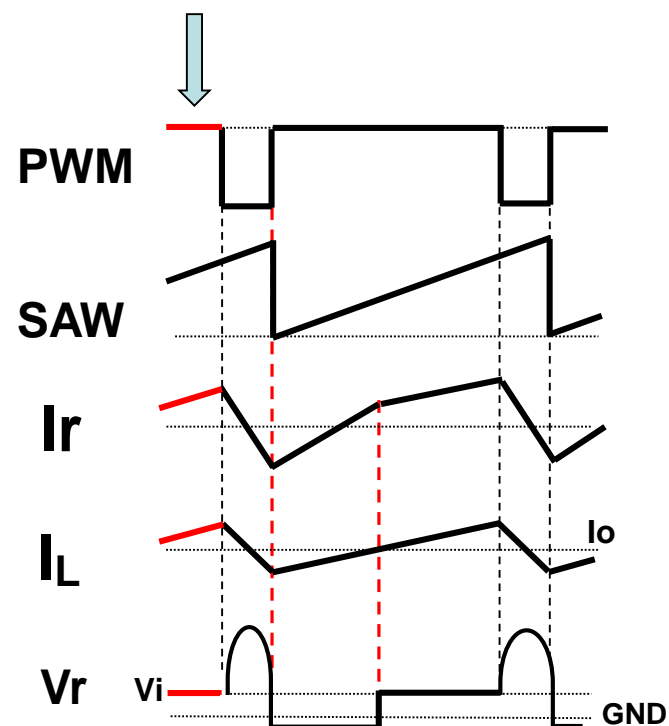
【動作説明】

* 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



半波型電圧共振電源

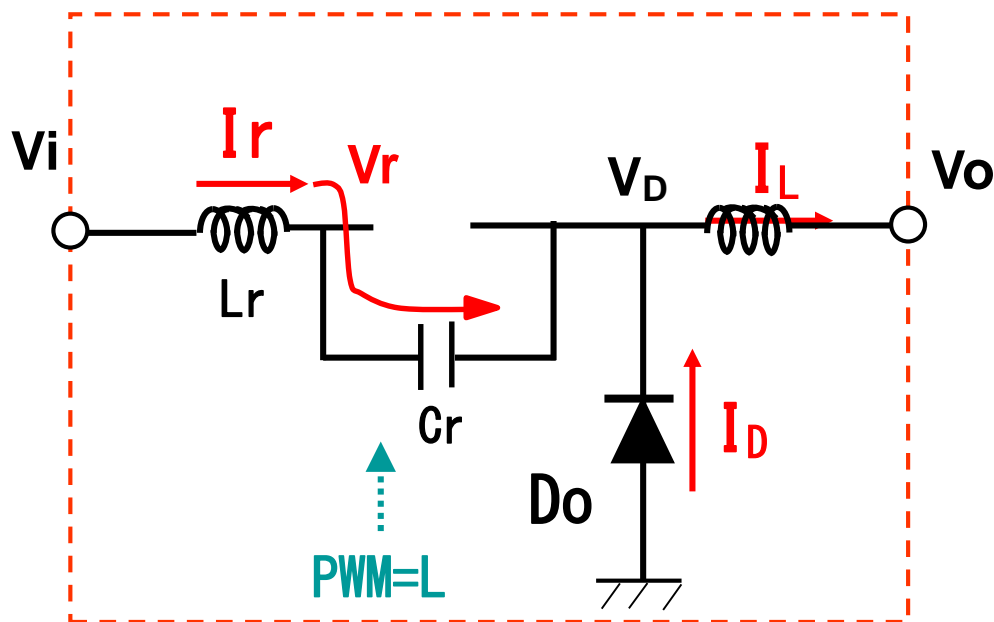


主要波形

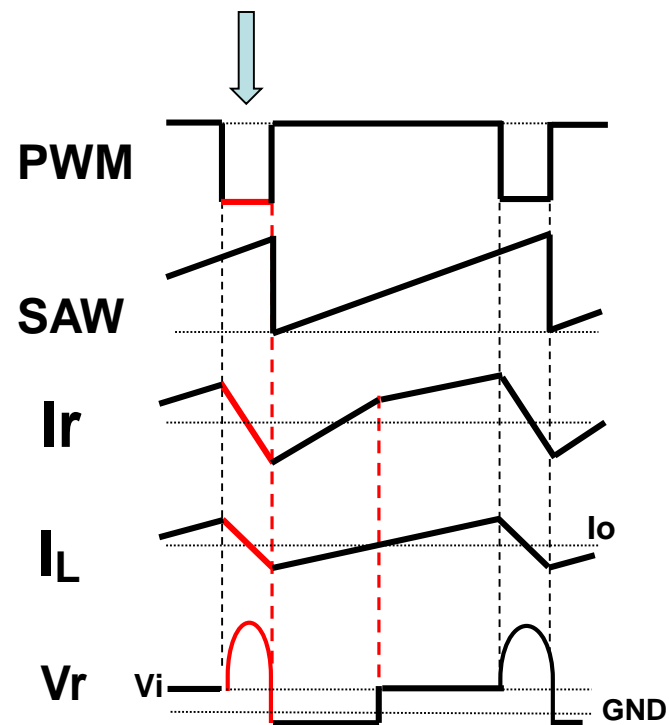
(1) 半波型電圧共振電源

【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



半波型電圧共振電源

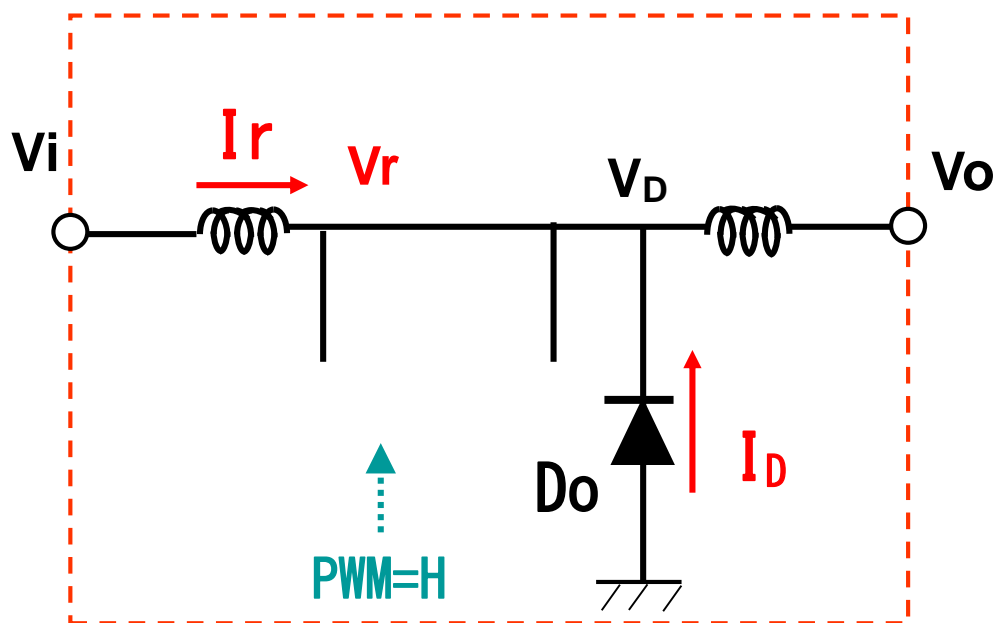


主要波形

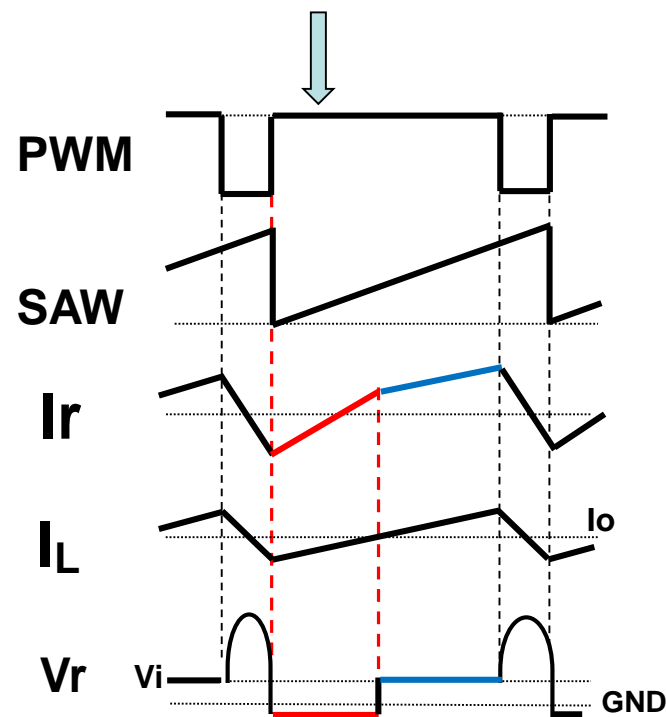
(1) 半波型電圧共振電源

【動作説明】 State 2:

- ・PWM=「H」になり、**SW=ON** ⇒ $V_r = V_D$ により **ZVS** を実現
- ・ **I_r は逆流から順方向増加に転じる ⇒ I_D は減少**
⇒ $I_D = 0$ 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**



半波型電圧共振電源



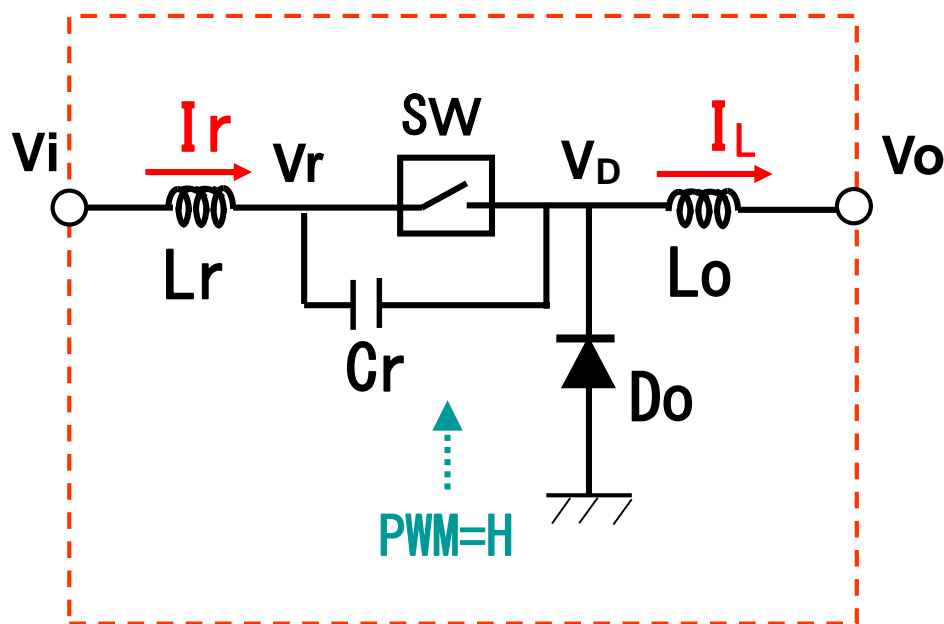
主要波形

(1) 半波型電圧共振電源

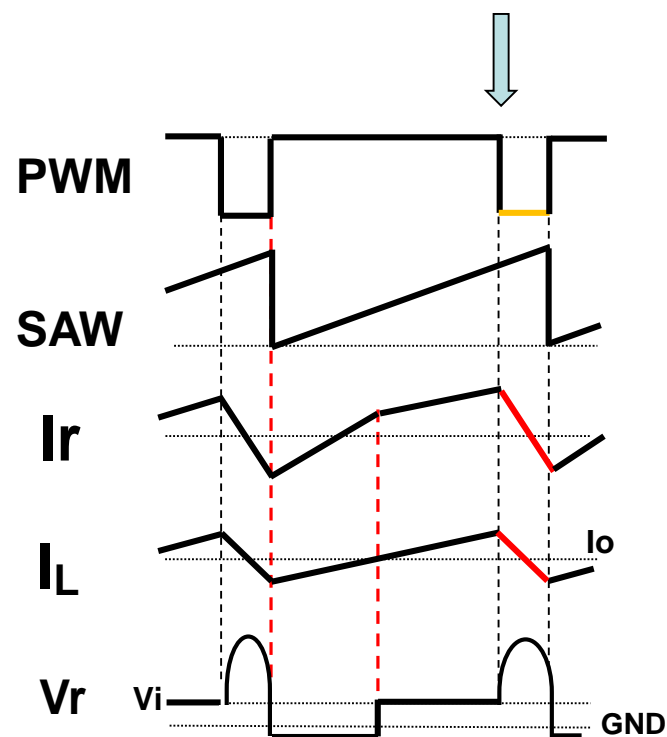
【動作説明】

* 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



半波型電圧共振電源



主要波形

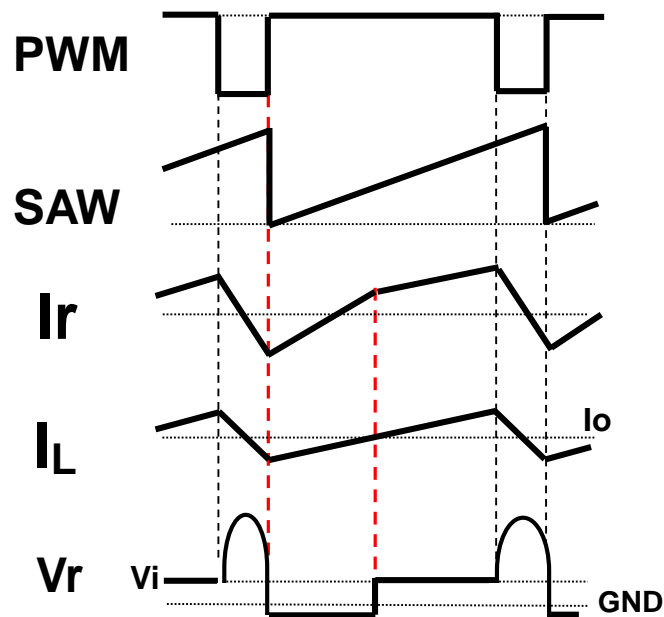
●シミュレーション結果

1)シミュレーション条件

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

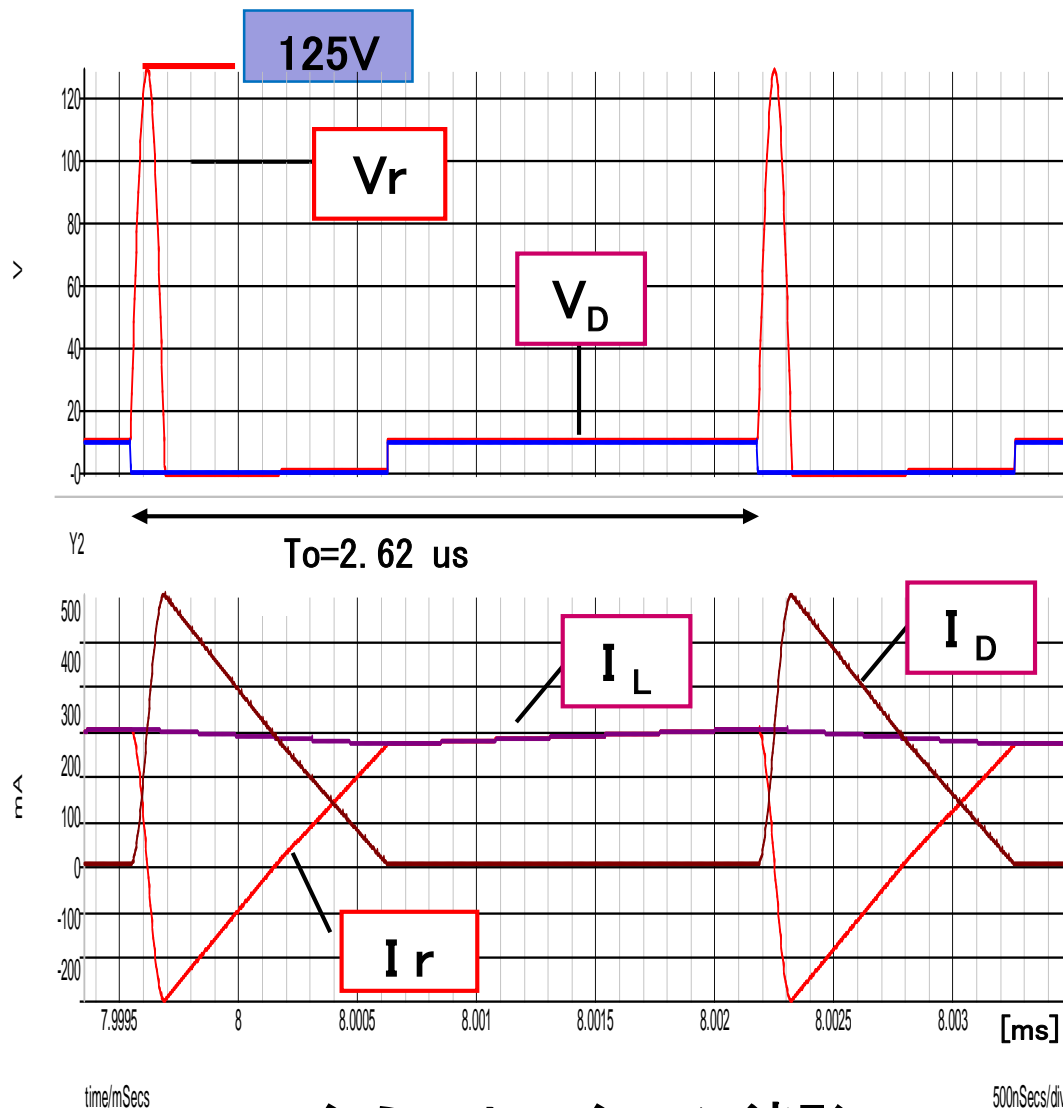
2)共振波形

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



主要波形

共振電圧 = +125V



シミュレーション波形

500nSecs/div

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

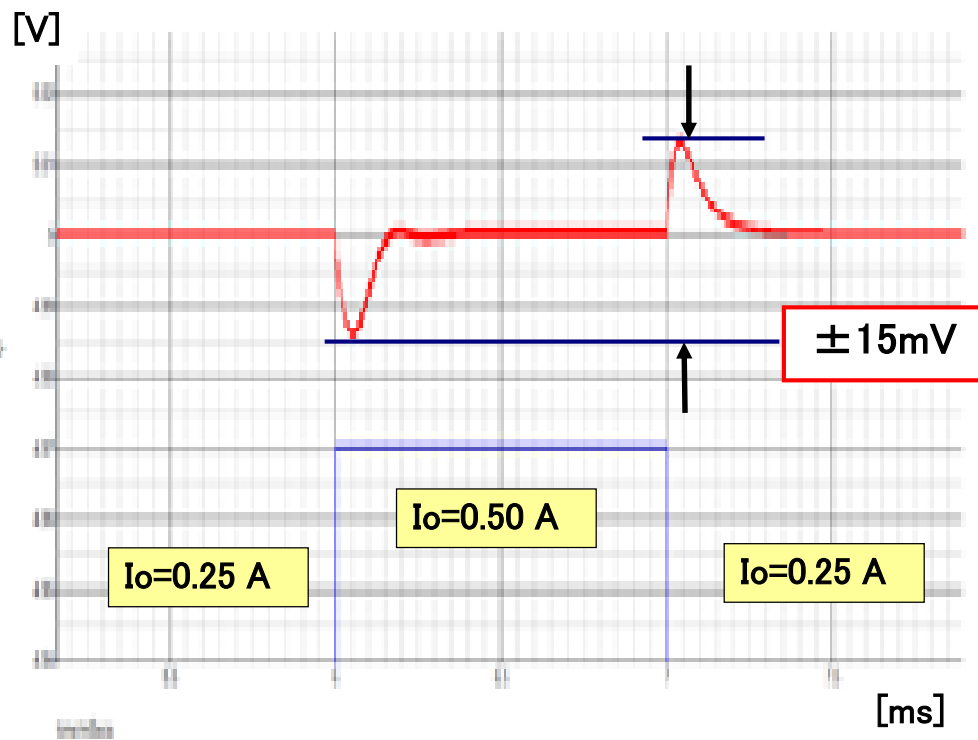
* $I_o = 1 \text{ A}$ では、 $V_r \doteq -500\text{V} \Rightarrow$ **高耐圧素子が必要**

★出力電圧特性

* 定常リップル $< 2\text{mVpp}$ @ 0.5A

* 過渡応答特性

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

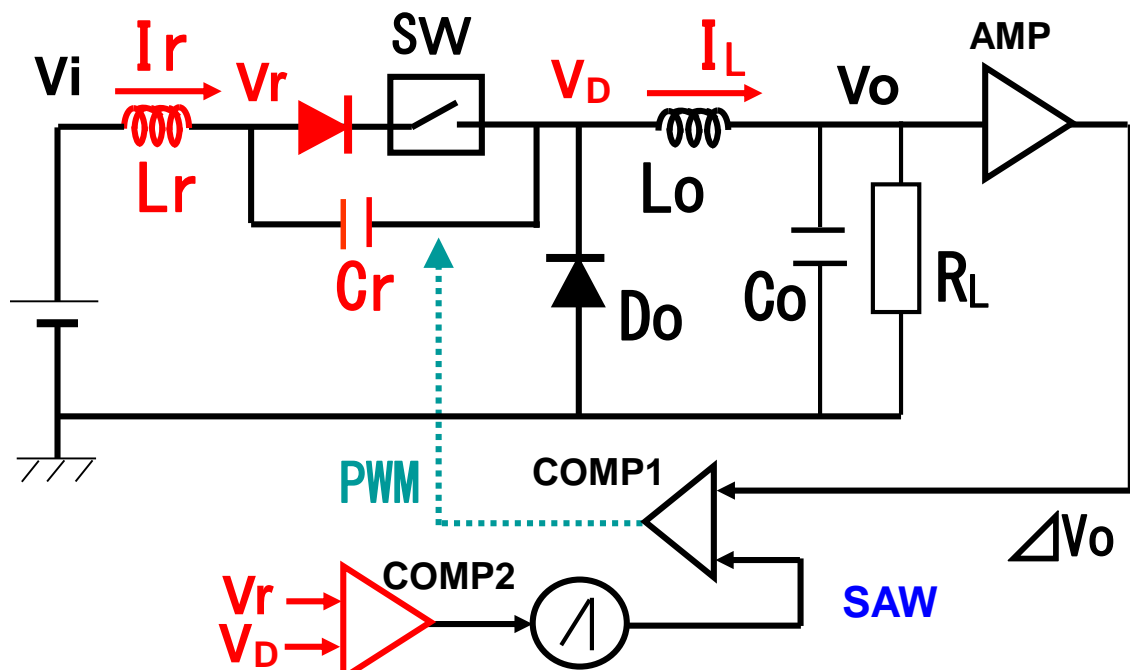


過渡応答特性

(2) 全波形ソフトスイッチング電源

● 構成

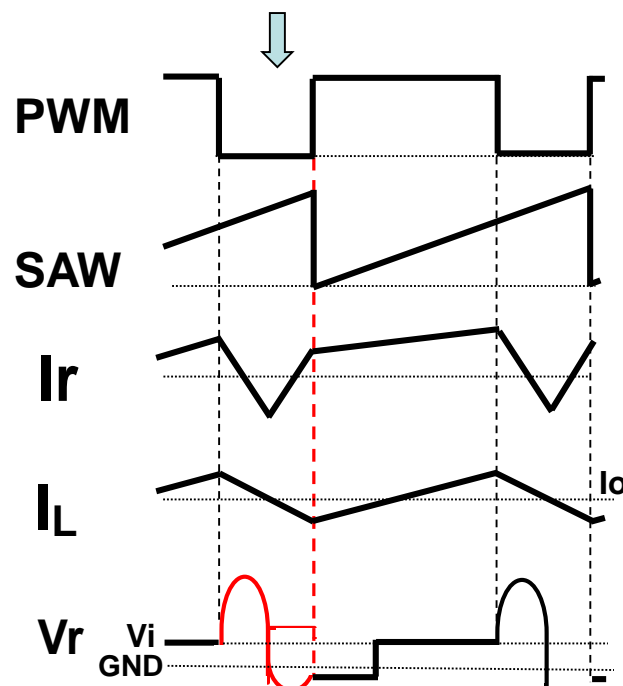
- * 半波形のSWと直列にダイオード挿入
 $V_r < 0$ V 時のボディDi の導通を阻止
- * 共振電圧 $V_r < 0$ V 後、再度の $V_r = 0$ を検出
 \Rightarrow PWM=H、SW=ON \Rightarrow ZVSの実現



全波形ソフトスイッチ電源の構成

● 特徴

- * 共振条件は同じ
- * V_r は正負に大きく振れる
- * PWMデューティは、実際と一致
- * I_o による周波数変化なし



主要波形

(A) 動作説明

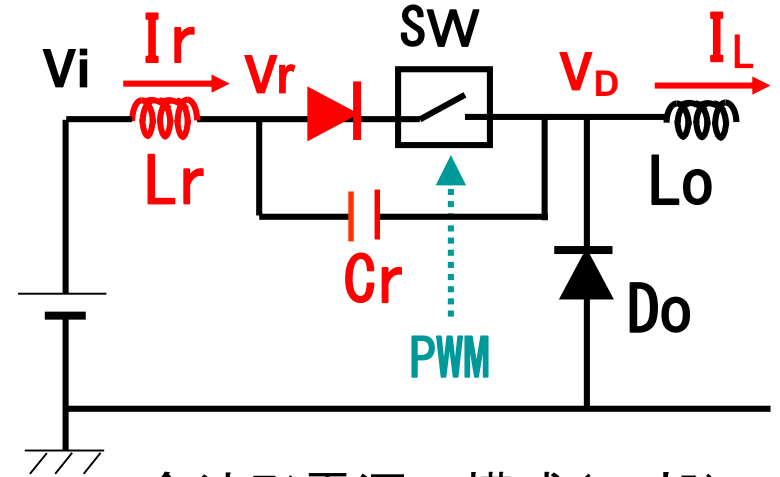
* モード0、モード1は、半波形と同様

* モード2: $t_1 \sim t_2$

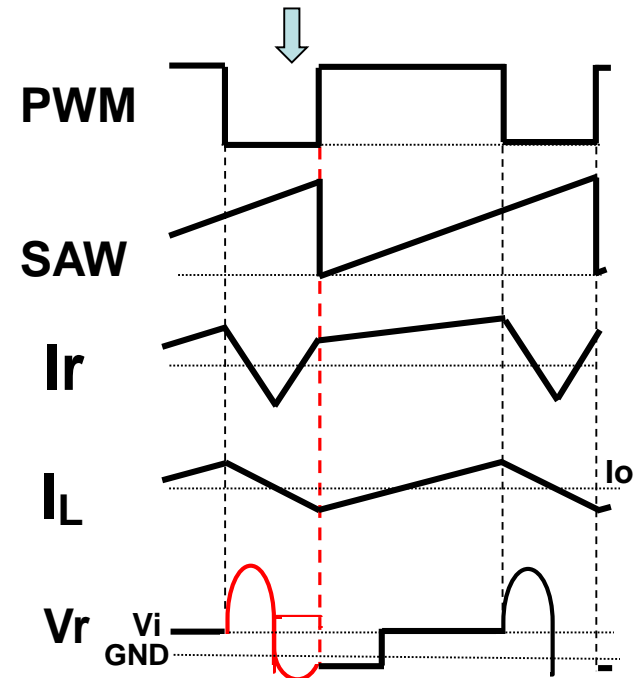
- $V_r < 0$ V でも、ボディDは導通しない
- V_r はネガに共振 \Rightarrow 負ピークを経て $V_r \uparrow$
- $V_r = V_d \doteq 0$ V で、PWM=H, SW=ON
このとき I_r は最大 ($\doteq I_L$)
- I_L により、 I_d は徐々に減少
 $I_D = 0$ A で、 $V_D \uparrow \Rightarrow I_L \uparrow \Rightarrow V_o \uparrow$

* モード3: $t_2 \sim t_3$

- $V_o > V_r$ で、PWM=L, SW=OFF
- モード0 に戻る



全波形電源の構成(一部)

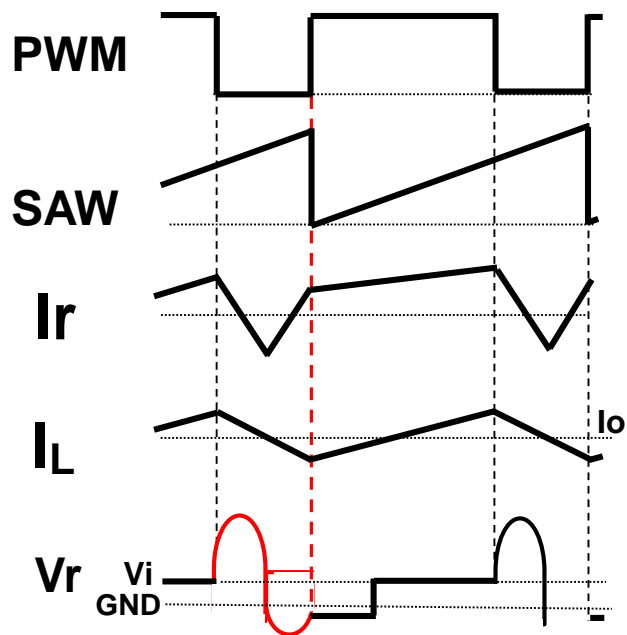


全波形電源の動作波形

(B) シミュレーション結果(動作波形)

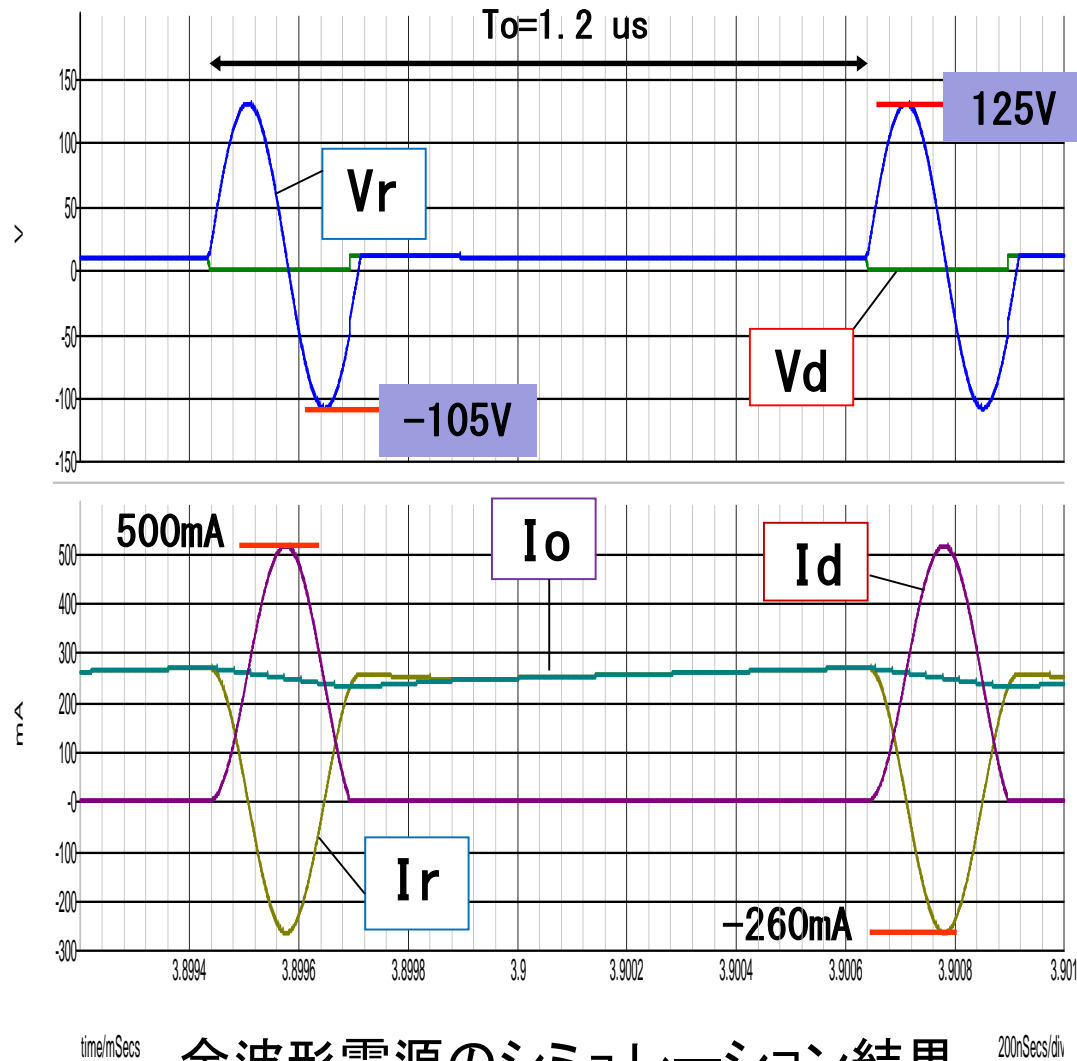
* シミュレーション波形:

- ・共振コンデンサ C_r の値によりモード1の時間を制御可能
- ・コイル値 L の値によりモード2の時間を制御可能
- ・ $F_{op}=830\text{ kHz}$, $V_r=V_i \pm 115\text{V}$,
 $I_r = -0.25\text{A}$, $I_d = 0.50\text{A}$



全波形電源の動作波形

共振電圧 = +125V, -105V



全波形電源のシミュレーション結果

200nSec/div

9.4 新方式共振型ソフトスイッチング電源

【目的】 共振高電圧の制限 ⇒ 低耐圧SW素子の使用

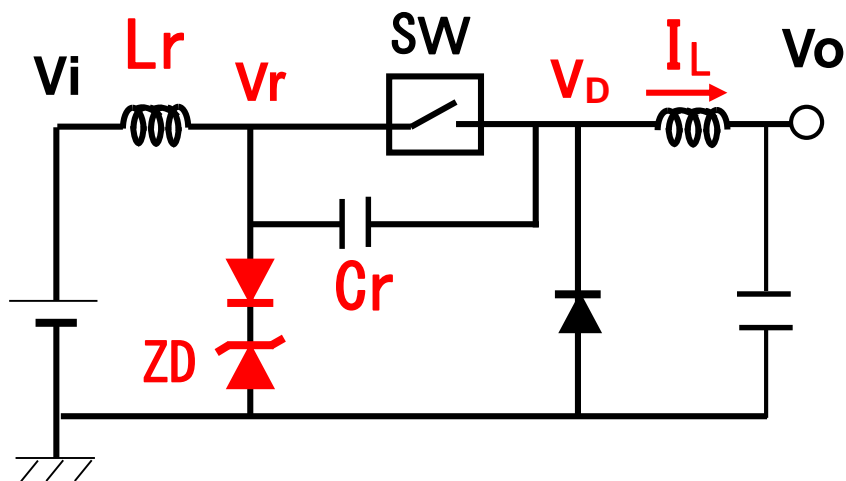
【対策】 ツェナーによる電圧クランプ ⇒ 共振持続、特性のチェック

【構成】 V_r 電圧を、(ダイオード+ツェナー)で制限

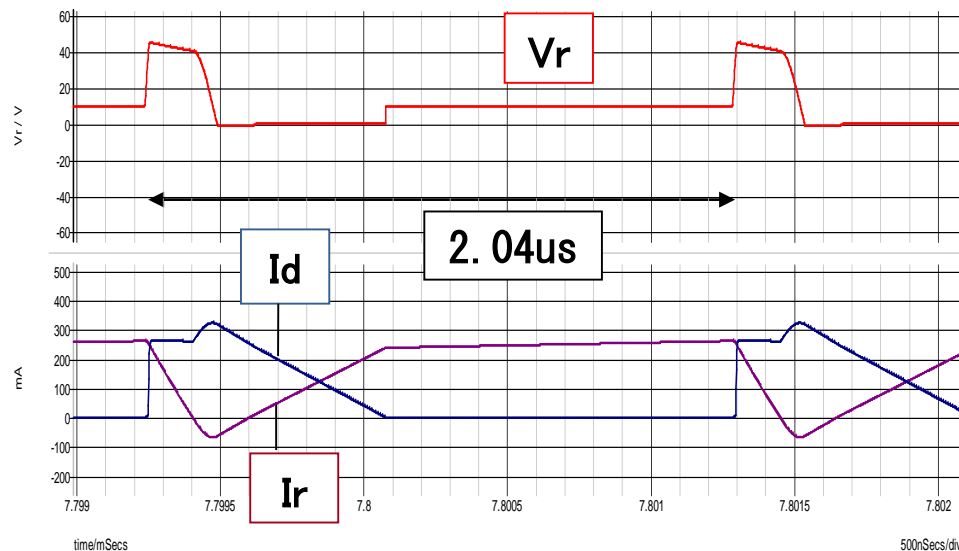
【特徴】 ピーク電圧を、ツェナー電圧で設定可能

【結果】 半波型電圧共振電源

* $V_z=40V$ 時、 $V_p=125V \Rightarrow 44V$ 、 $I_p=250mA \Rightarrow 70mA$



クランプ付半波型電圧共振電源



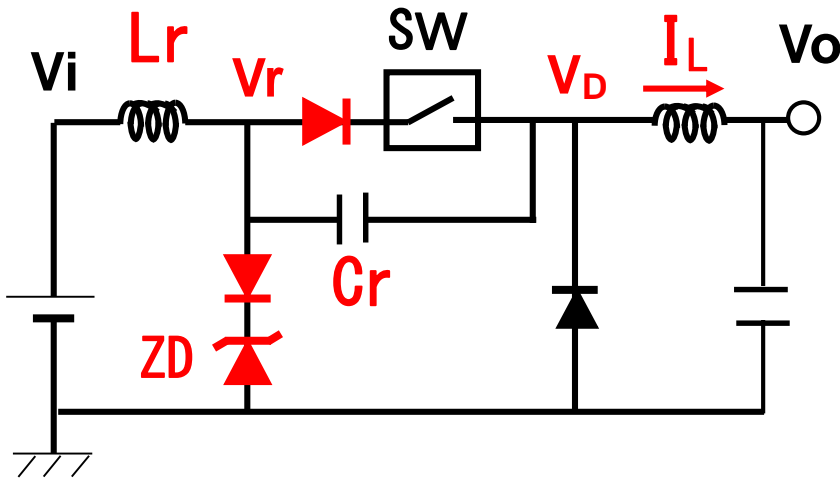
シミュレーション結果

●全波型共振電源：

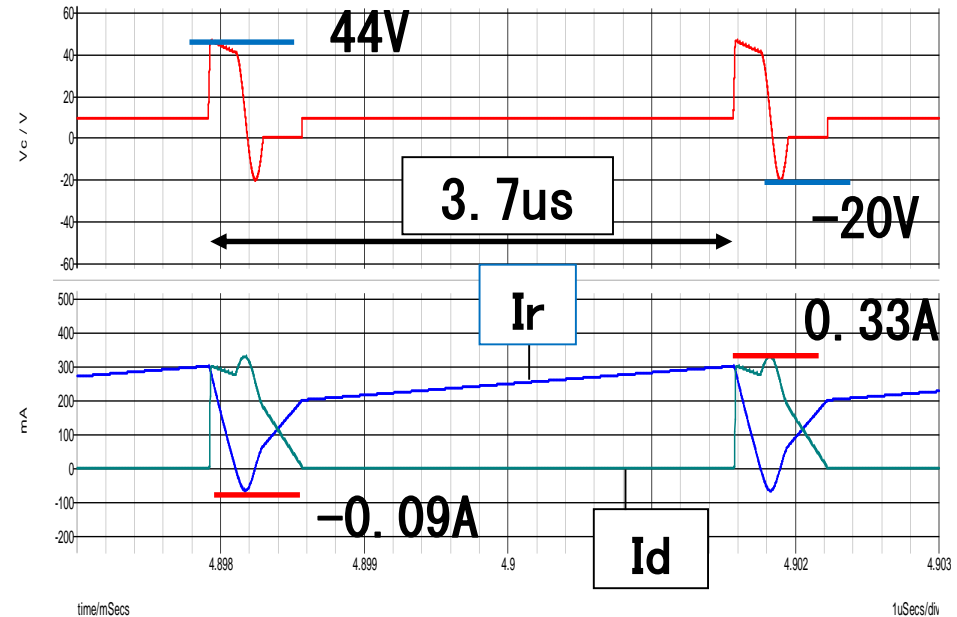
【構成】 V_r ポジ電圧を、(ダイオード+ツェナー)で制限

【特徴】 ピーク電圧を、ツェナー電圧で設定可能

【結果】 $V_z=40V$ 時、 $V_p= 125V \Rightarrow 44V$ 、 $I_p= 250mA \Rightarrow 90mA$



クランプ付全波型電圧共振電源



シミュレーション結果

●シミュレーション結果 [出力電圧リップル]

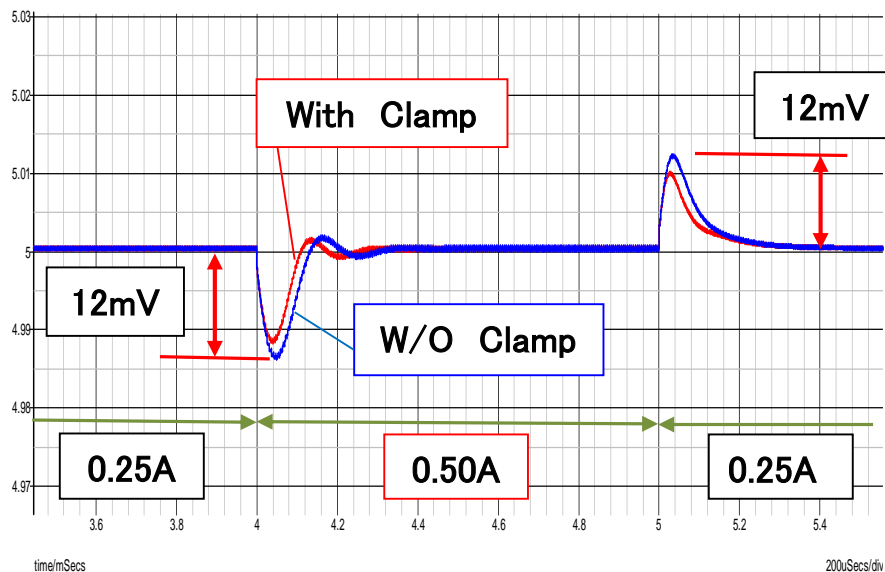
★半波型／全波型 共振電源

* 定常リップル < 2mVpp @ 0.5A

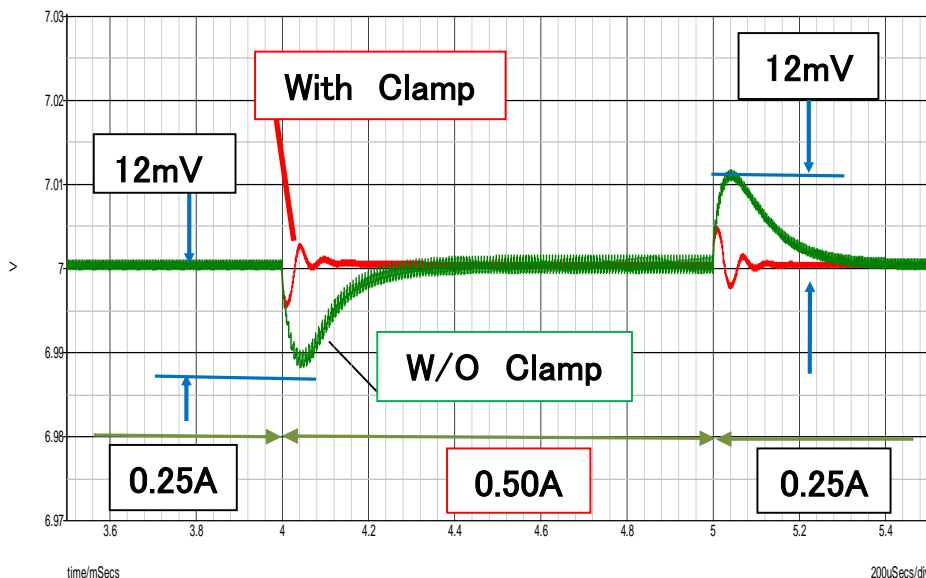
* 過渡応答特性 $\Delta V_o < \pm 12\text{mV}$ @ $\Delta I_o = 0.25\text{A}$

★その他の特徴

* クランプ付特性が、やや良い



半波型共振電源の過渡応答

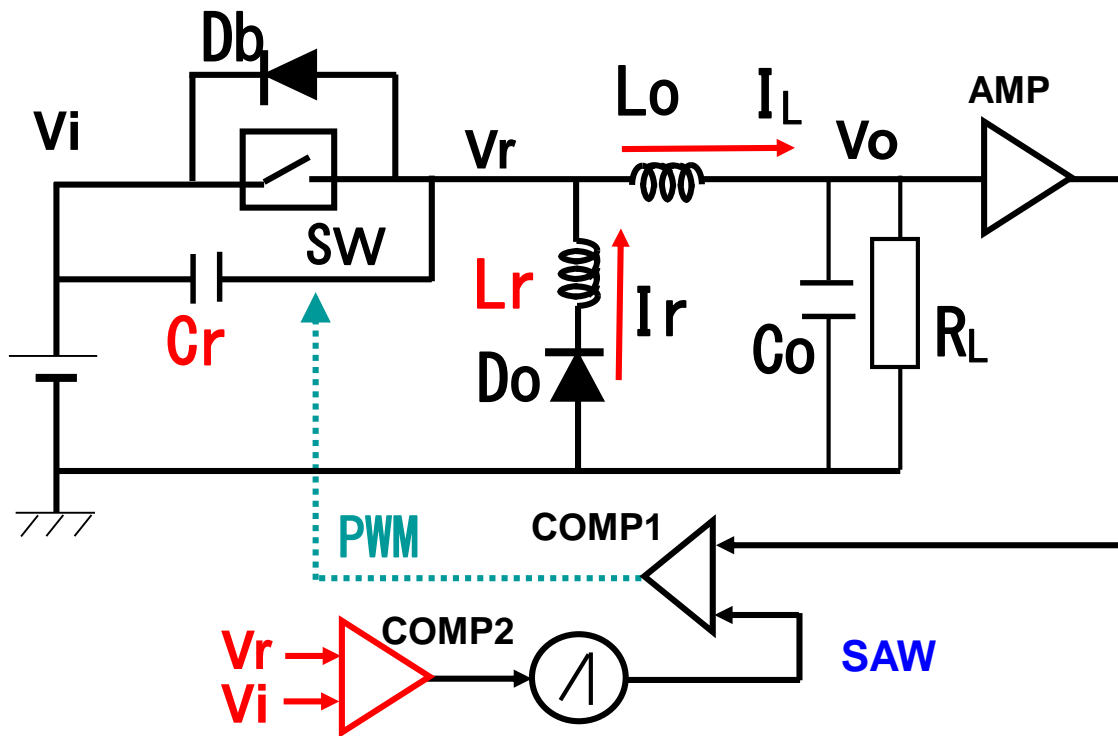


全波型共振電源の過渡応答

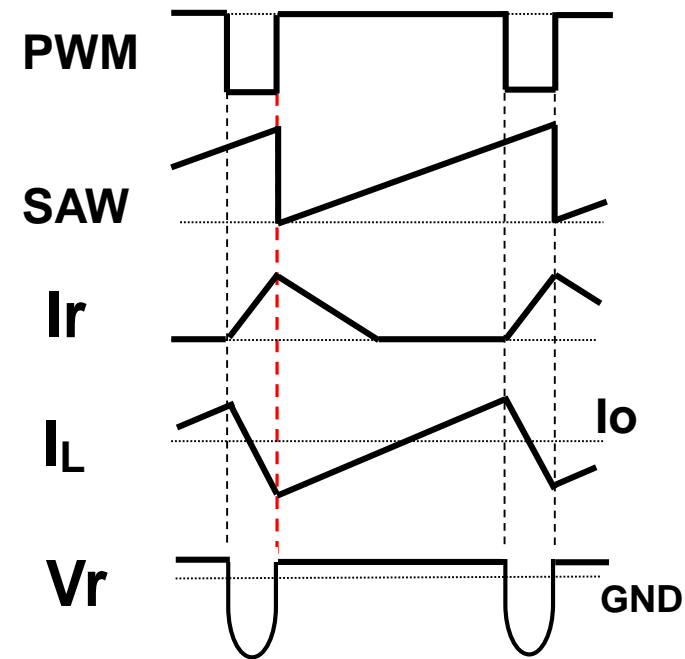
(追加) 別回路 電圧共振型電源

【構成】 ダイオードと直列に L_r を挿入。 C_r 他端は V_i or GND

【特徴】 共振電圧は「負電圧」



クランプ付半波型電圧共振電源



シミュレーション結果

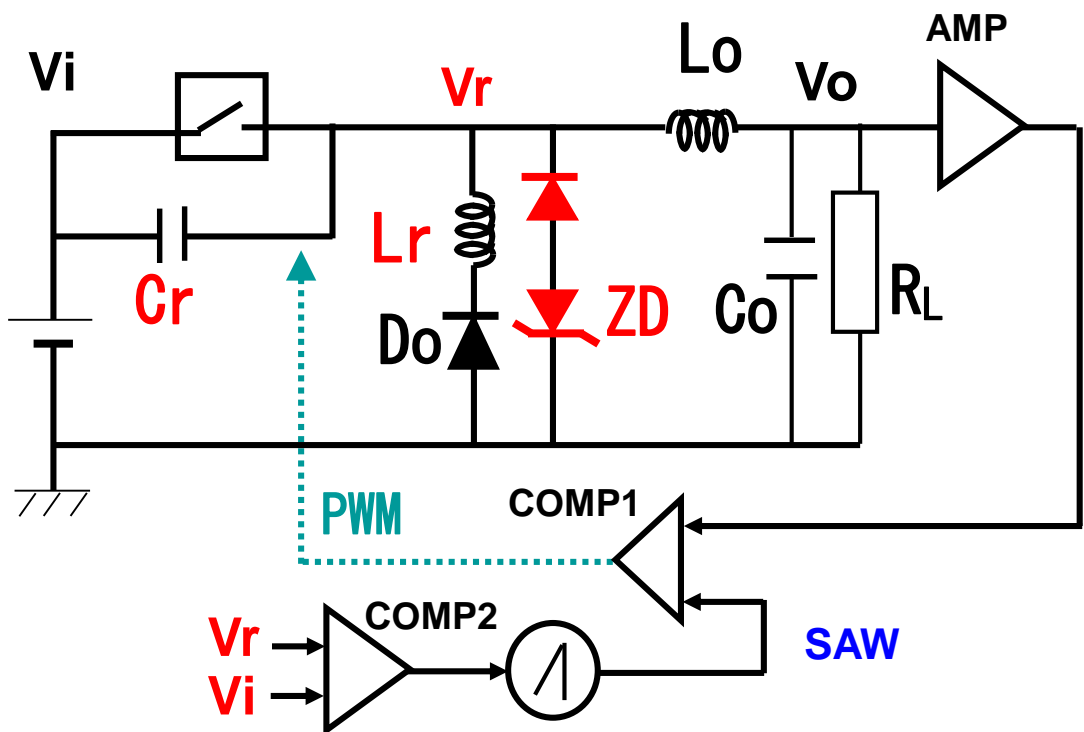
●シミュレーション結果

★半波型共振電源

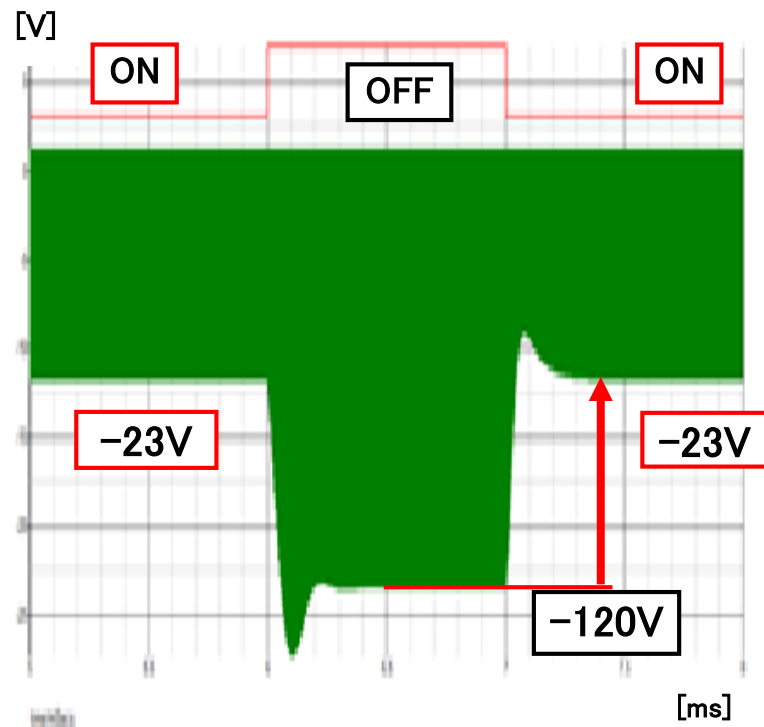
* クランプON/OFF による特性差は無し

* V_p : $-120V \Rightarrow -23V$ ($V_z=20V$)

: $-120V \Rightarrow -50V$ ($V_z=40V$)



半波型共振電源の過渡応答



全波型共振電源の過渡応答

●シミュレーション結果（応答特性）

* シミュレーション結果 ($V_z = 40V$)

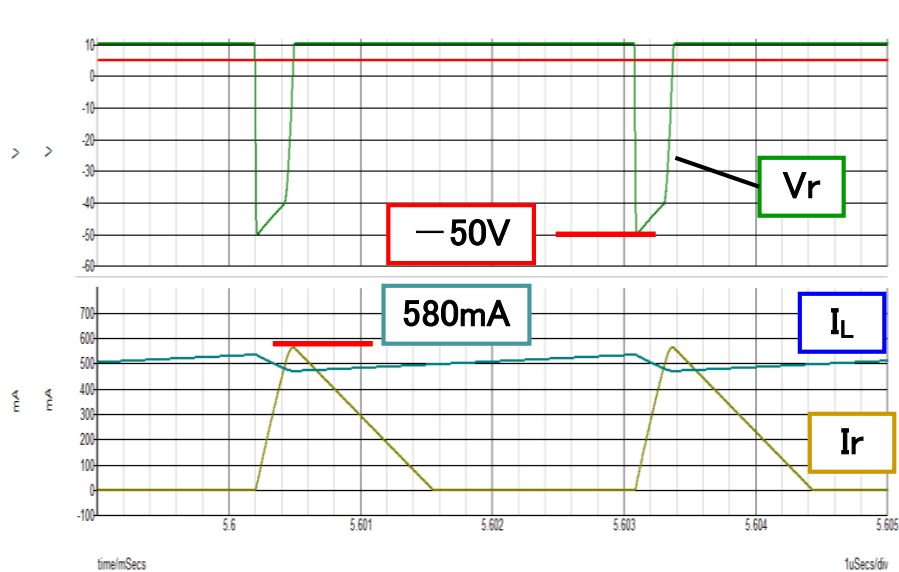
・条件: $V_i = 10V$, $V_o = 5.0V$, $I_o = 0.5A$

・共振波形: $V_r = -50V$ 、 $I_r = 580mA$

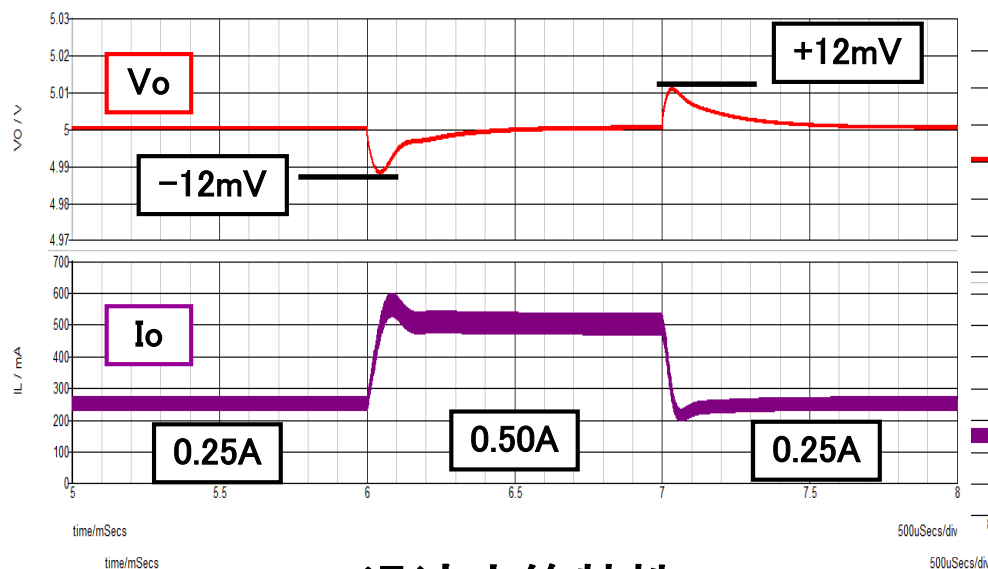
* 過渡応答特性

・定常出力リップル: $\Delta V_o < 2mV_{pp}$

・オーバーシュート: $= \pm 12mV$ ($I_o = 0.5A / 0.25A$)



クランプ回路付き共振波形



過渡応答特性

●シミュレーション結果

★ 負荷電流 I_o 対 動作周期 T_{op} ($V_z = 40 \sim 120 \text{ V}$)

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

・クランプ付: $T_o' = 1.9 \mu \sim 7.1 \mu \text{s}$ ($V_{cl} = 40 \text{ V} \sim 120 \text{ V}$)

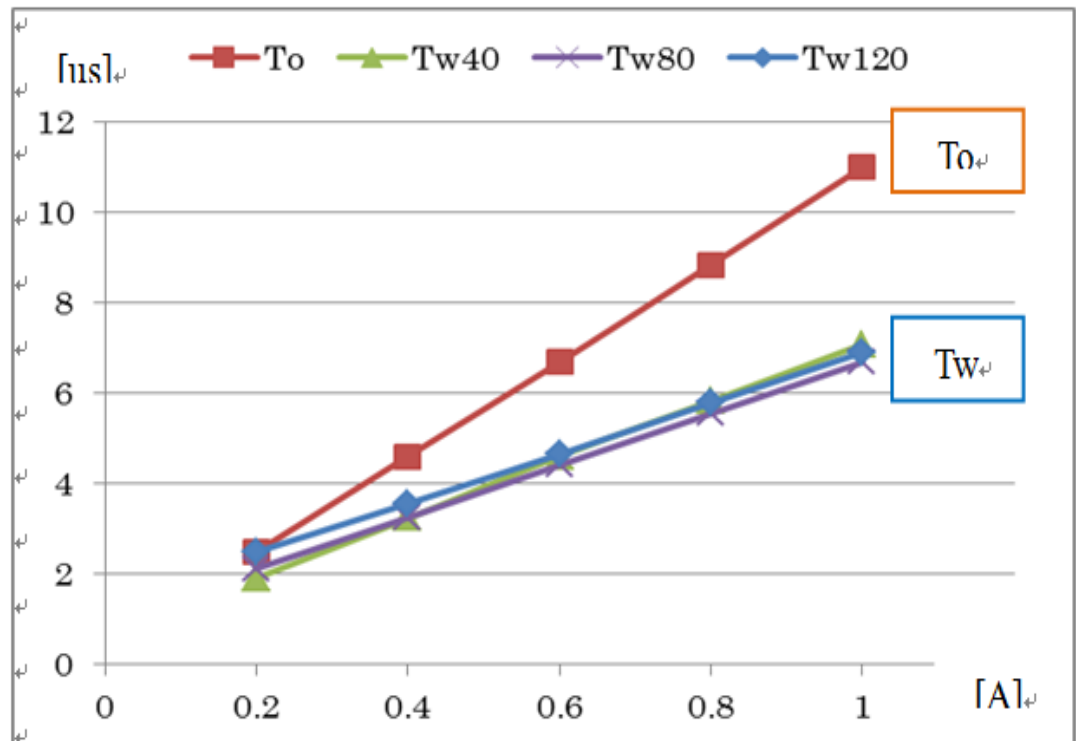
ただし 全波共振では、周期変化無し

* クランプにより

動作周期は半減

* クランプ電圧による

動作周波数の差無し



負荷電流 対 制御周期