

パワーエレクトロニクス工学論

9. 共振型スイッチング電源

9-1 各種共振型スイッチング方式

9-2 ZVS-PWM制御スイッチング電源

A) 降圧形ZVS-PWM電源

B) 昇圧形ZVS-PWM電源

9.1 各種共振型スイッチング方式

(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: 回路の複雑化(共振用LCの追加等)

● 動作

- * 出力電圧・電流を共振・・・正弦波波形(ノイズ小さい)
- * 共振の $V=0$ (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

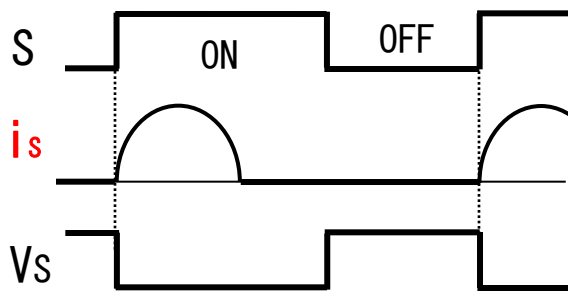
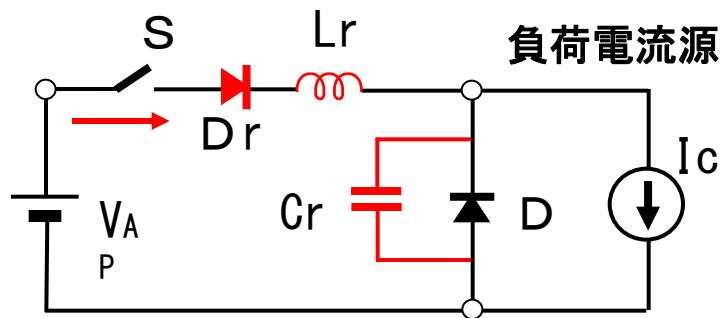
● 種類(多数の方式あり)

- * 電流共振 / 電圧共振 / 複共振
- * 直列共振 / 並列共振

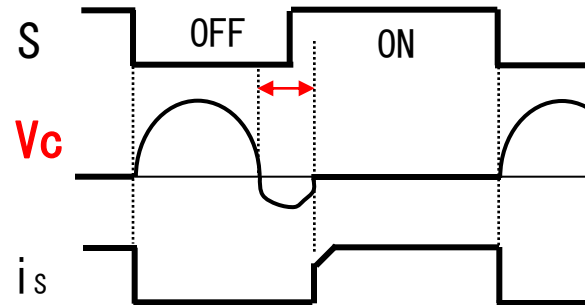
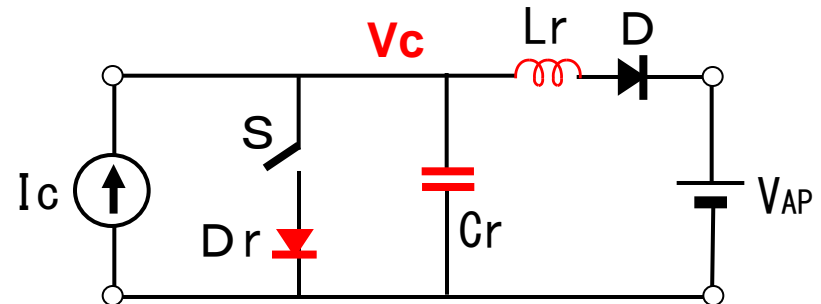
(2) ソフト・スイッチングの基本回路

●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



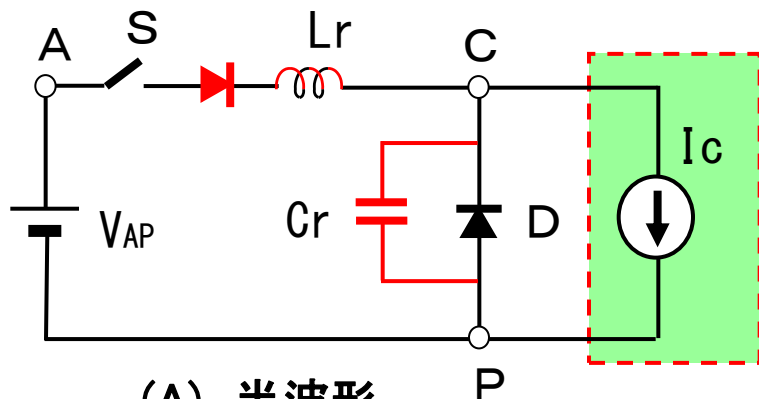
(A) 電流共振スイッチ(半波形)



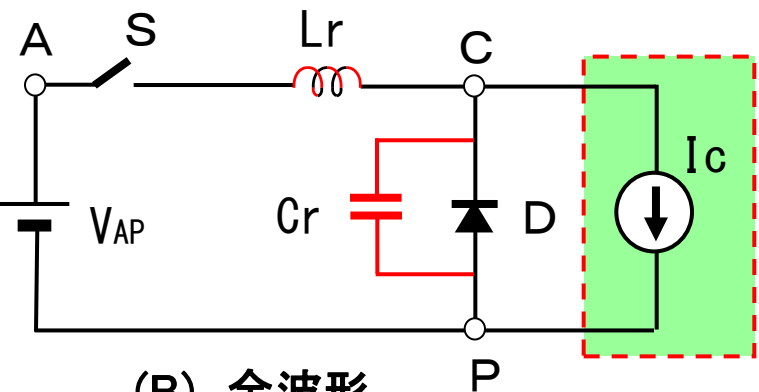
(B) 電圧共振スイッチ(全波形)

(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

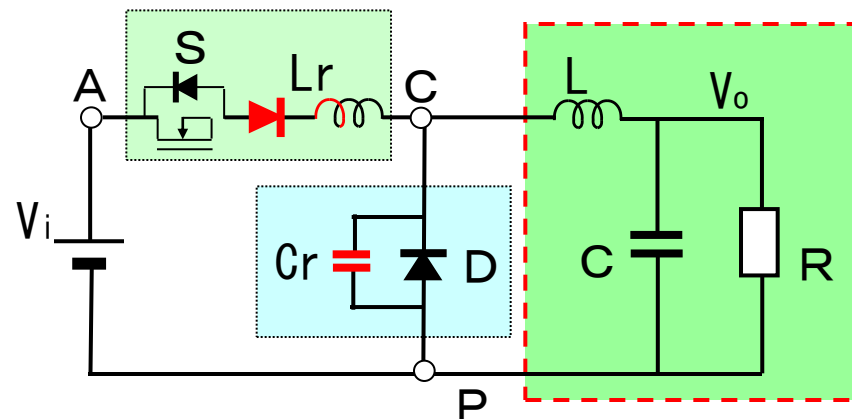


(A) 半波形

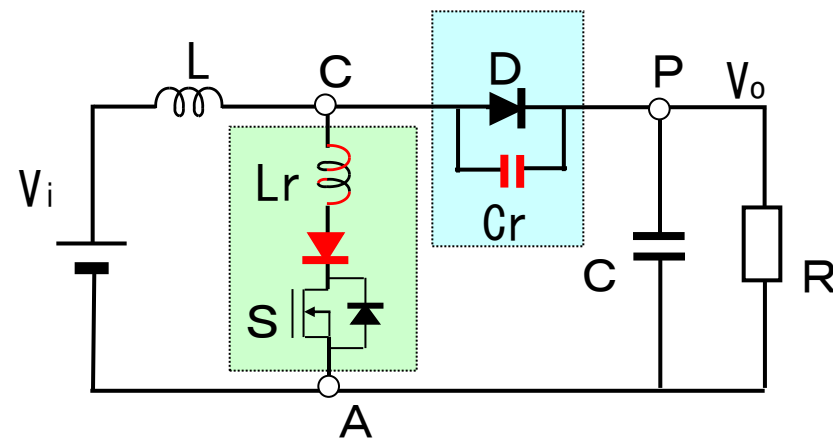


(B) 全波形

電流共振スイッチ(降圧形電源)



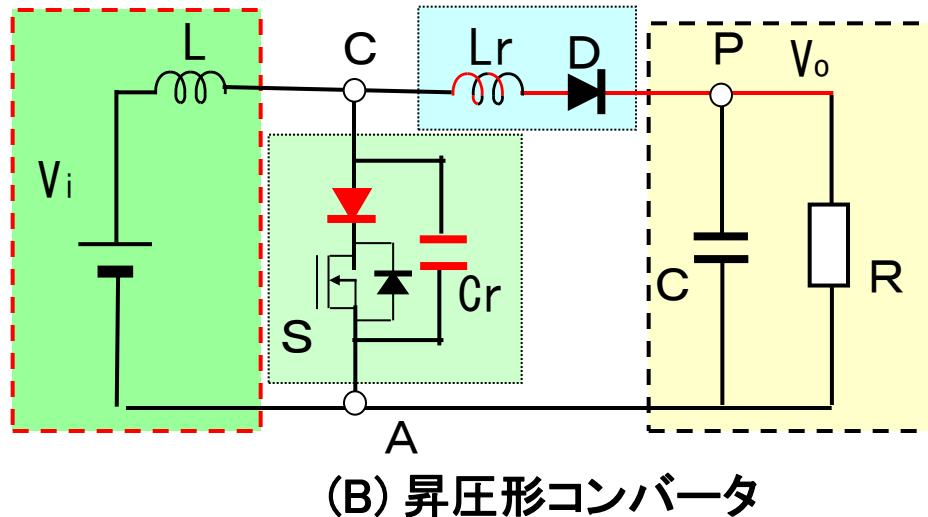
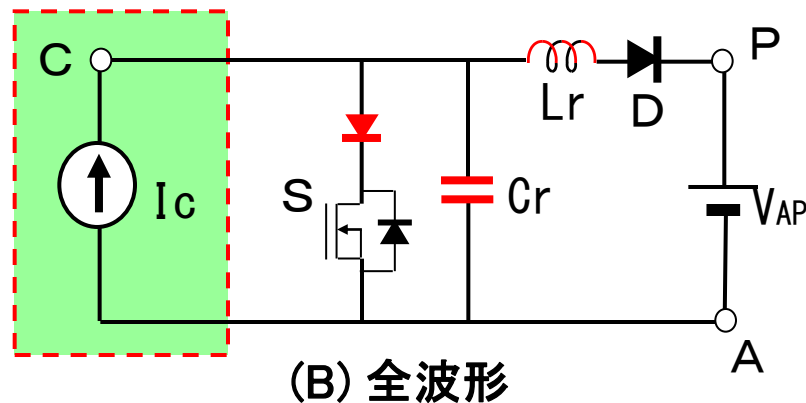
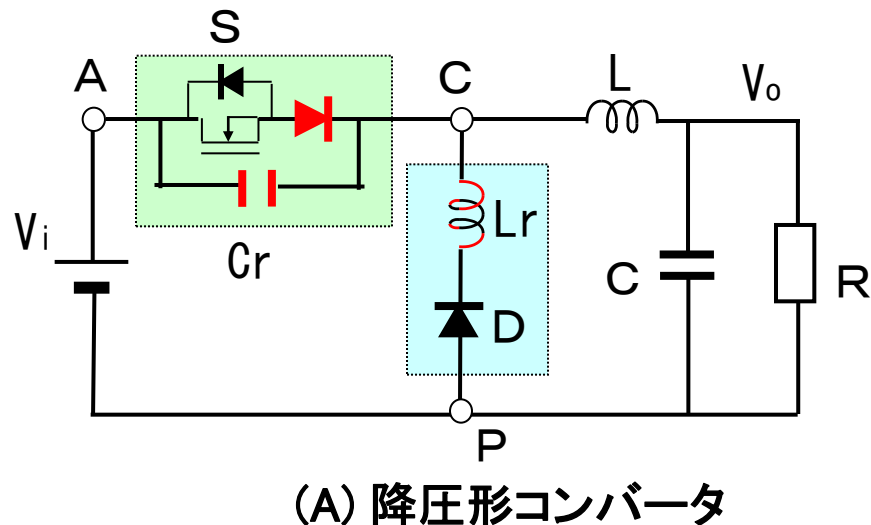
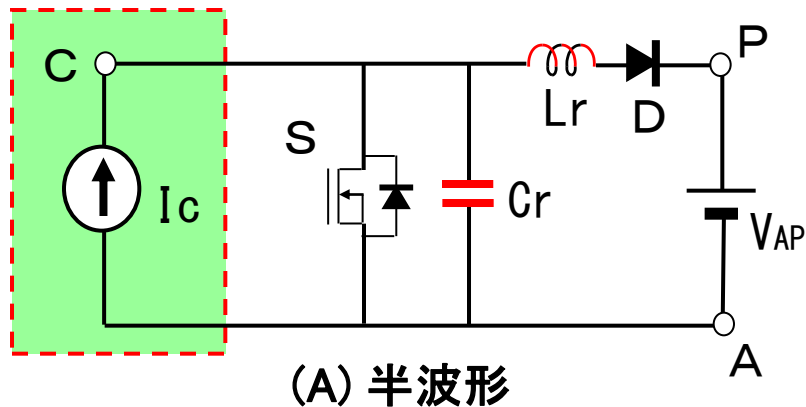
(A) 降圧形コンバータ(半波形)



(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

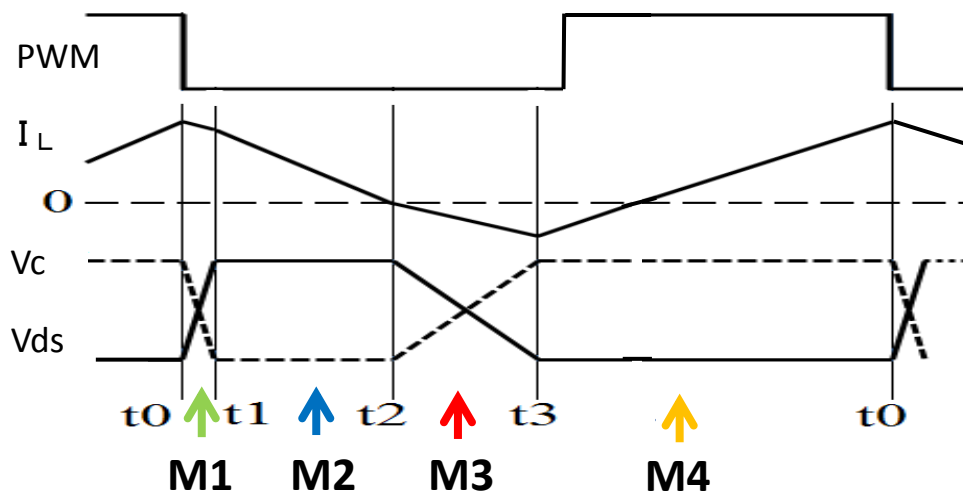
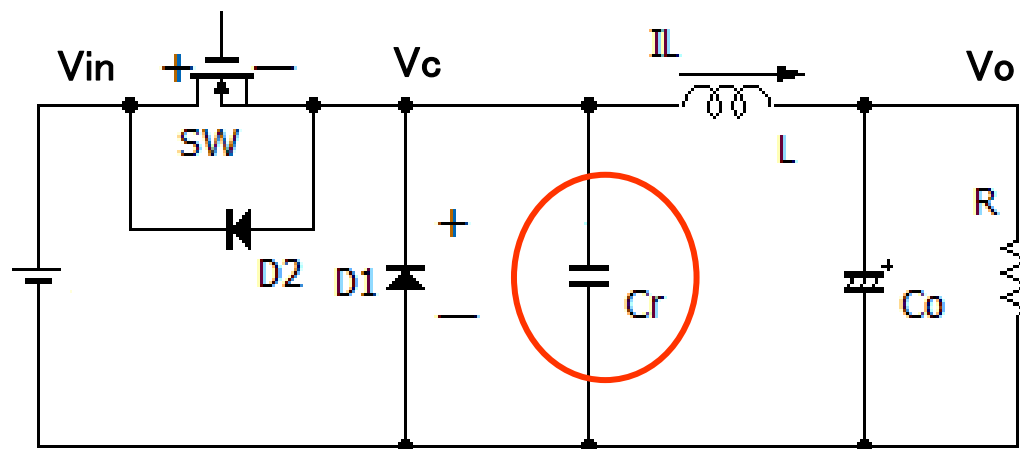
* コイルに双方向電流

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: $t_0 \sim t_1$

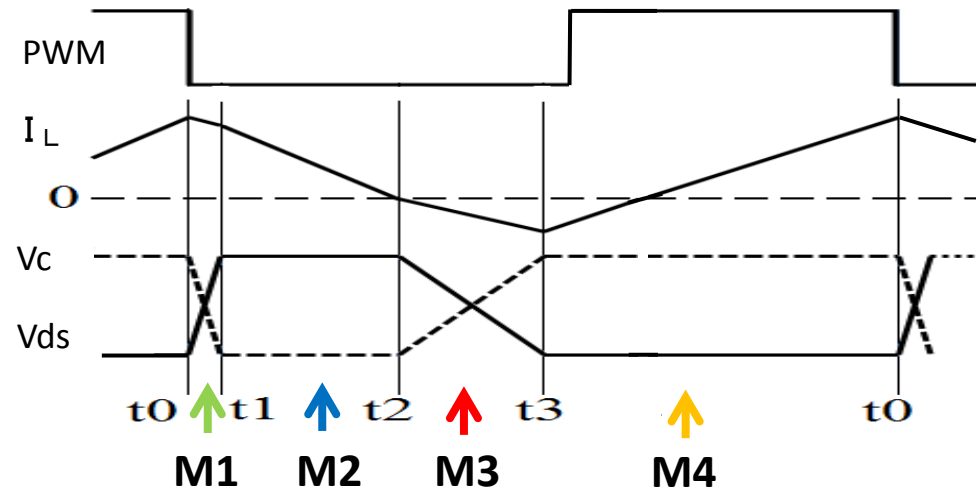
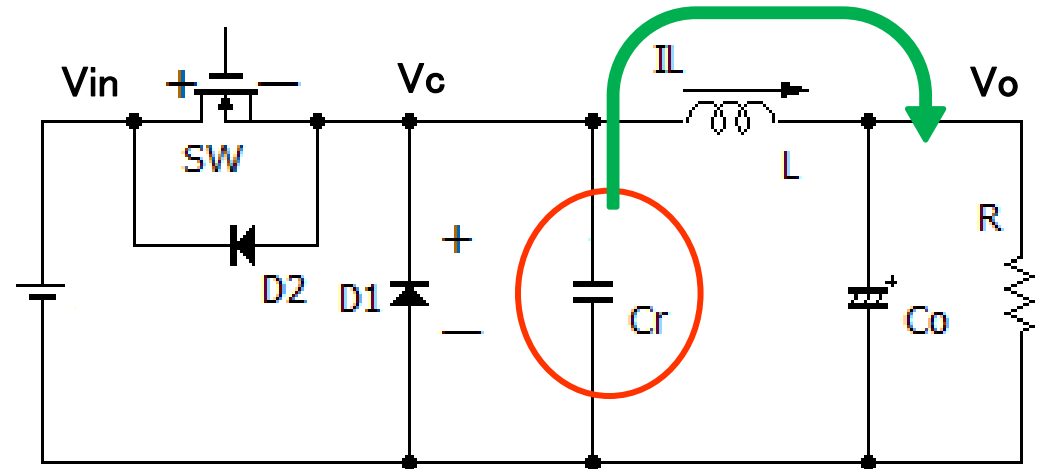
・PWM信号=OFF \Rightarrow SW=OFF

・ 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: $t_1 \sim t_2$

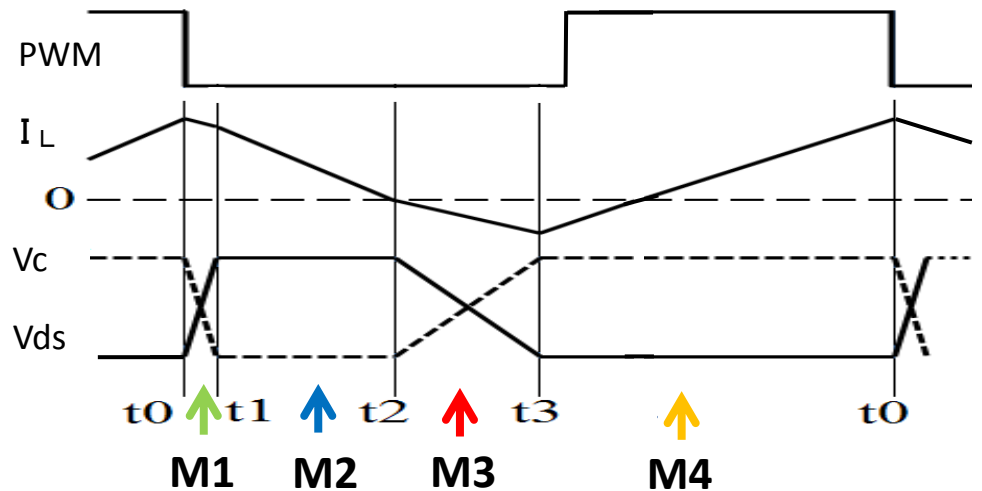
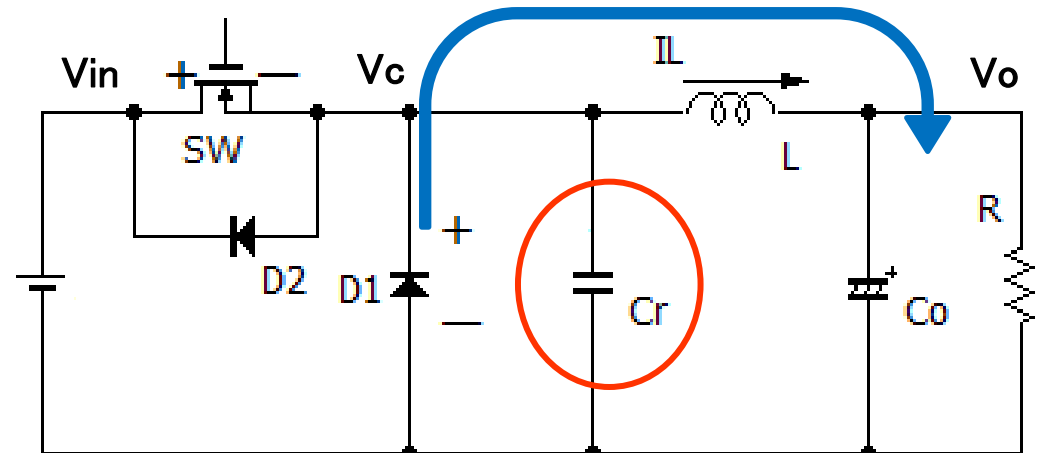
• $V_c = 0 \text{ V} \Rightarrow D_1 = \text{ON}$

• 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

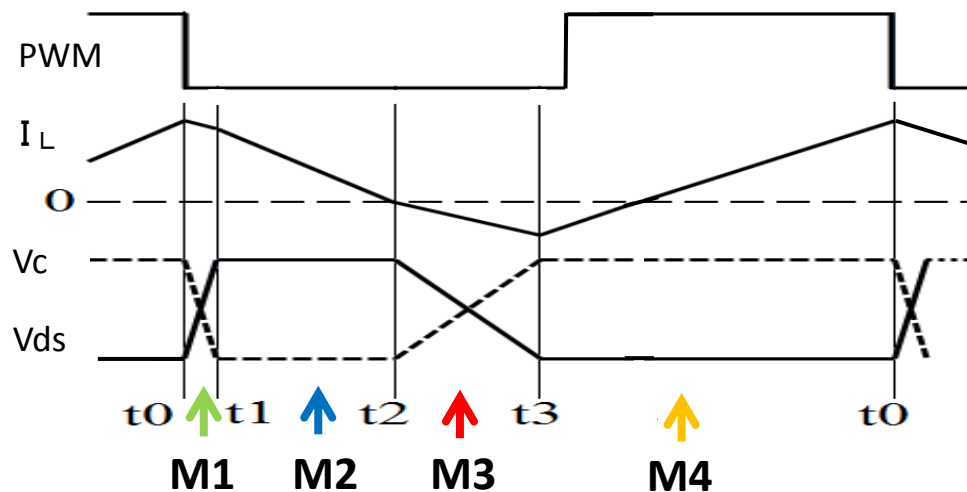
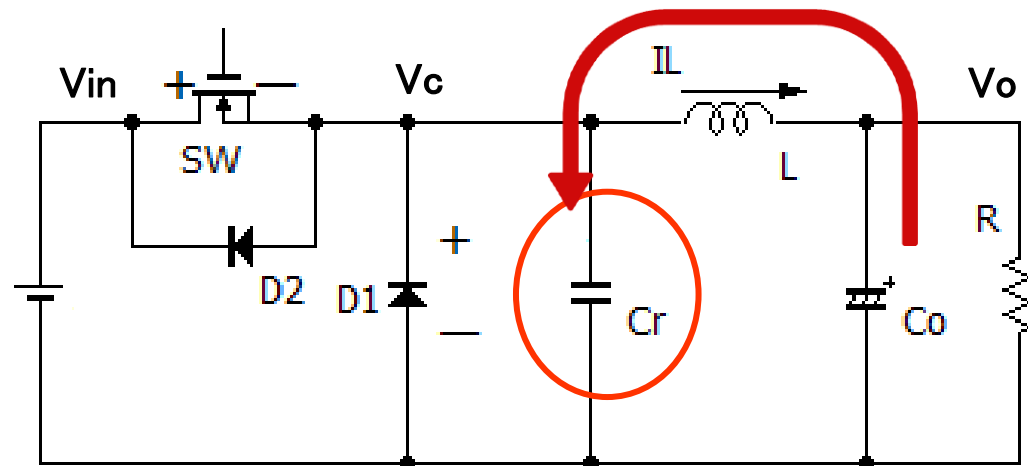
*モード3: $t_2 \sim t_3$

- ・ $I_L = 0 \text{ A} \Rightarrow$ 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、

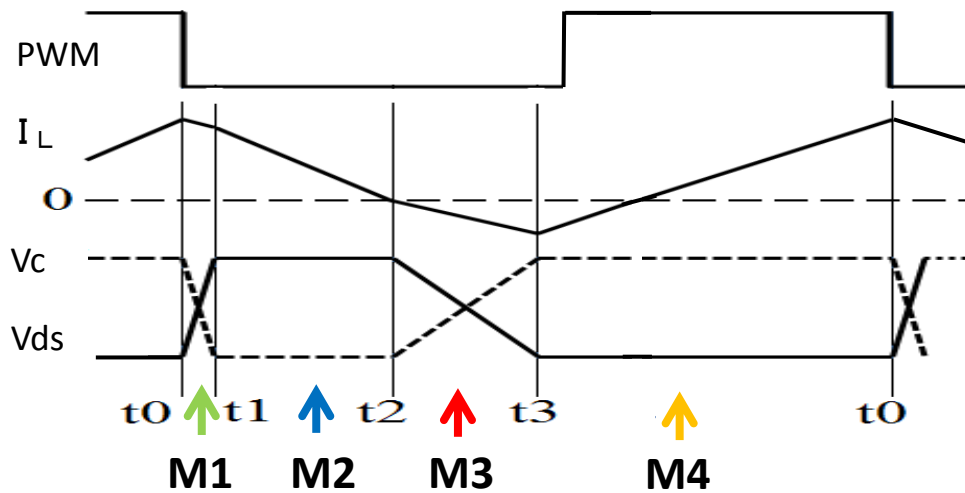
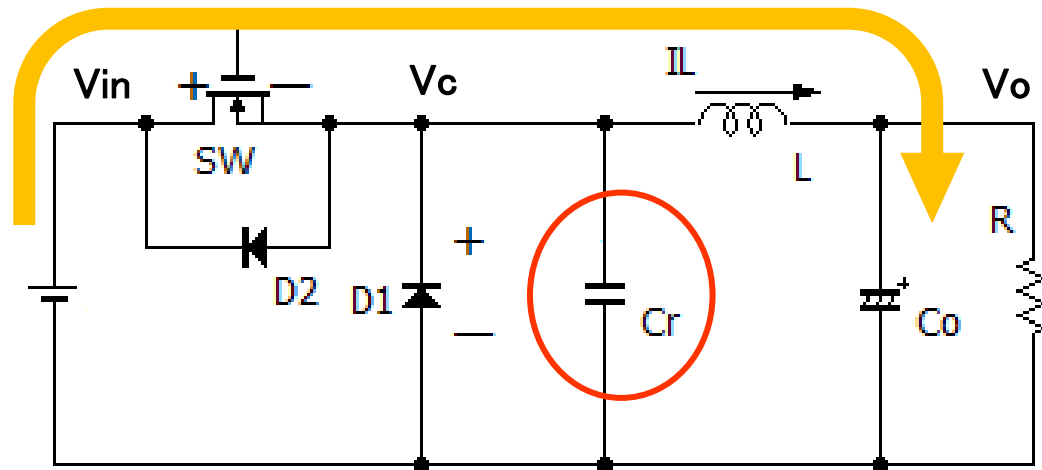
遂には $V_o = V_r$ に達する

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

・ $V_o = V_r$ を検出し、PWM = "L"



・ モード1 に戻る

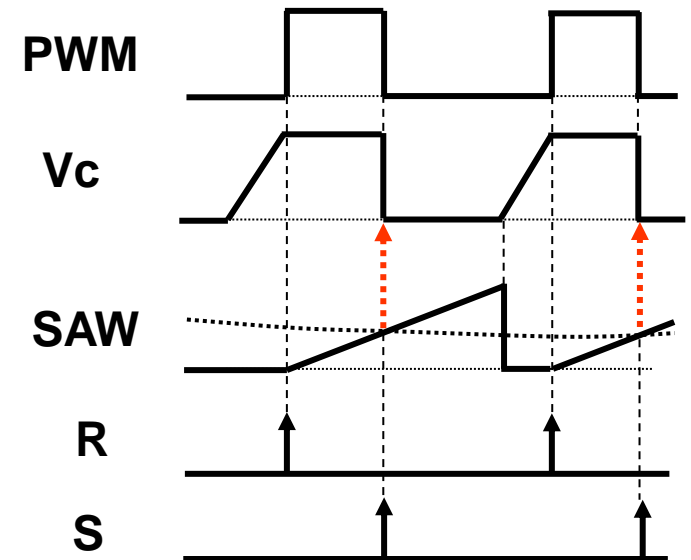
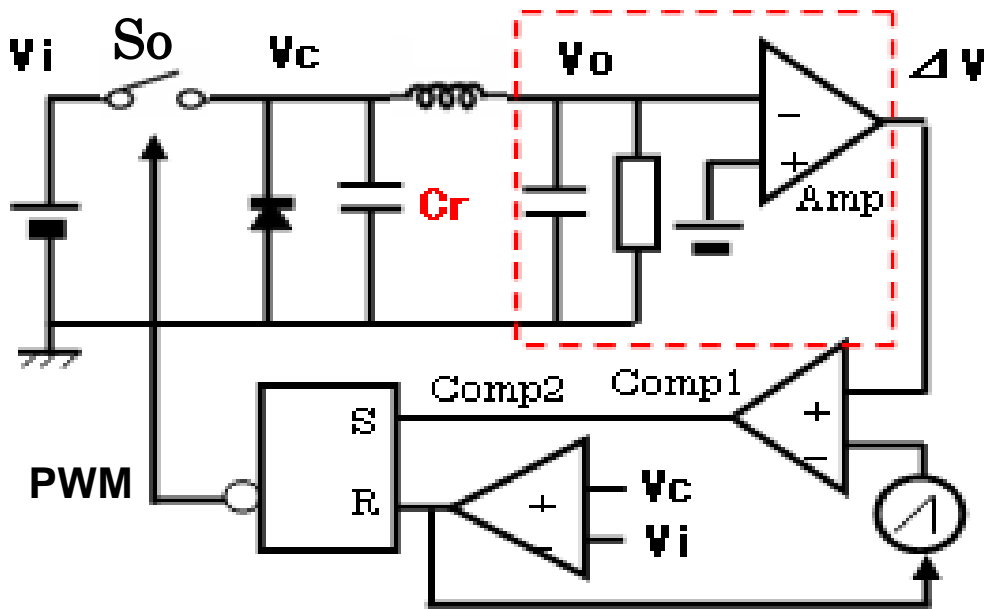


ZVS-PWM制御スイッチ電源の構成と動作

● 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



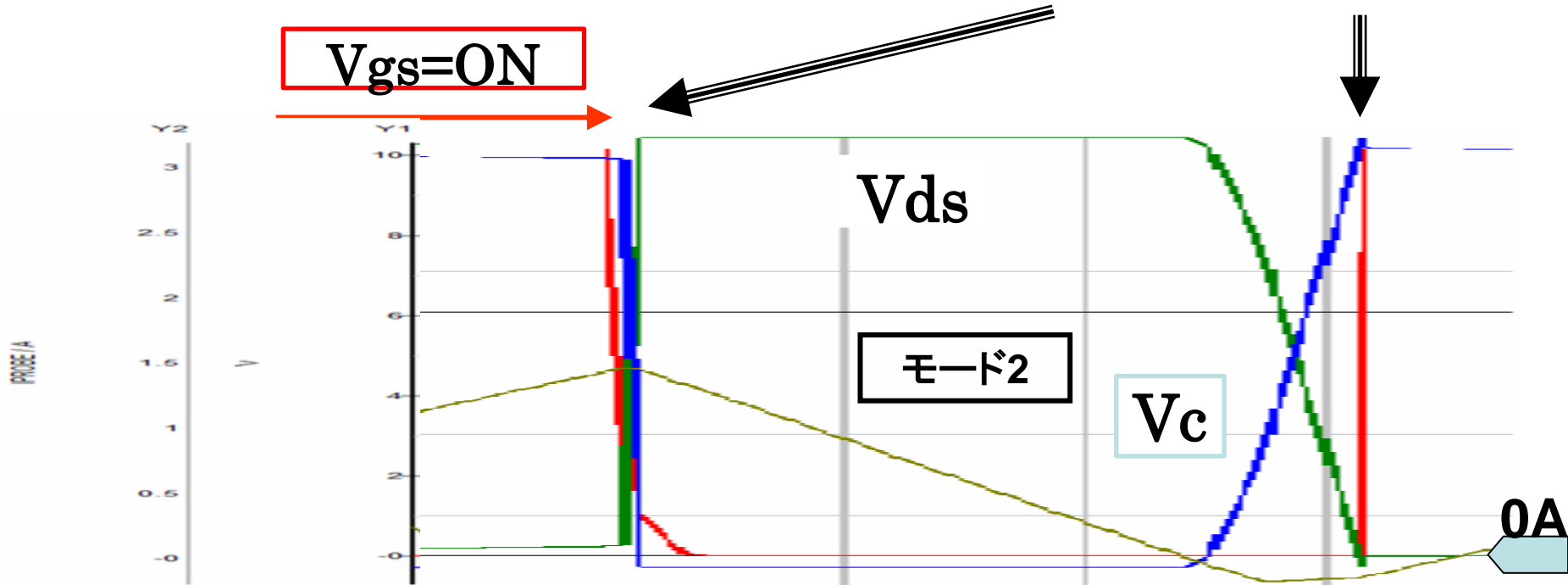
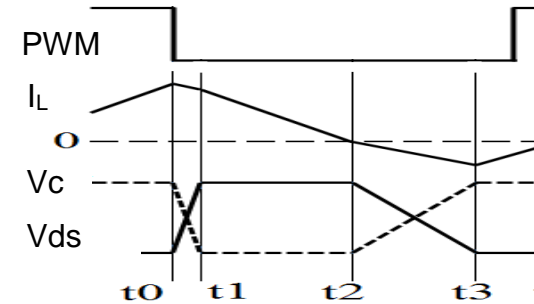
ZVS-PWM制御電源のシミュレーション回路

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

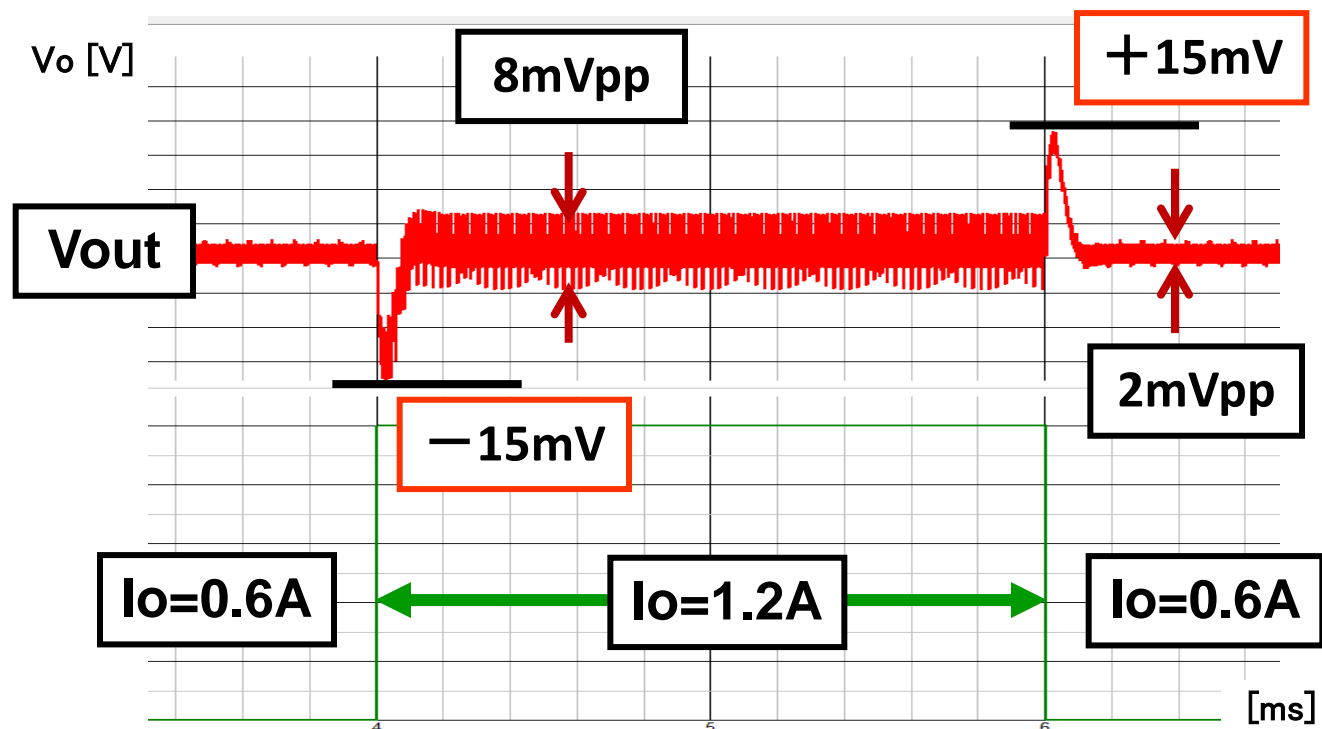
●シミュレーション結果(出カリプル)

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:

定常リップル $< 2mV_{pp}$ @ $I_o=0.6A$
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

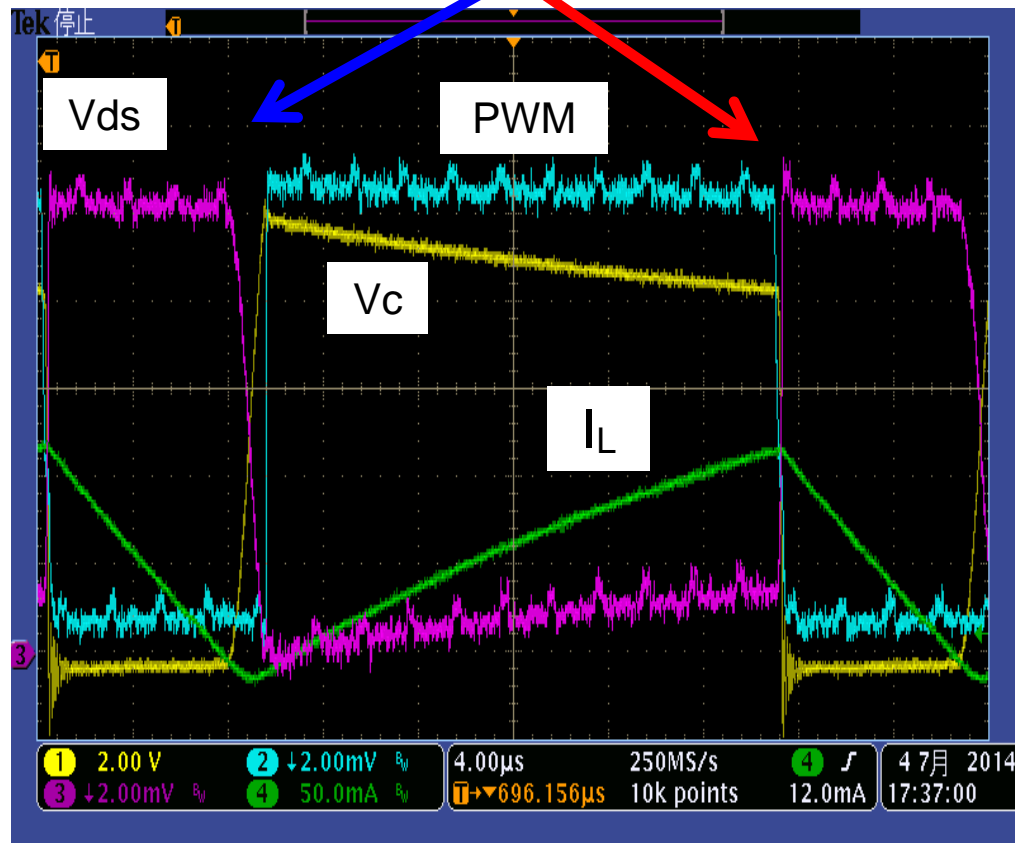
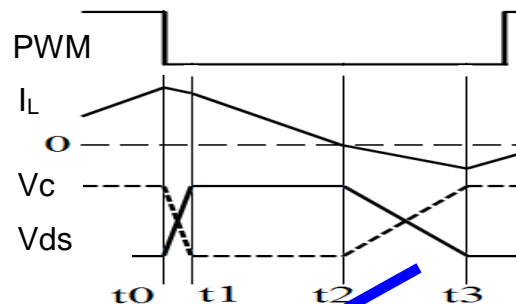
- * 動作条件は、シミュレーション回路と同様
- * 実測波形は、原理波形と類似

● 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: $V_{sw} = V_o$ ⇒ $D_i = ON$

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

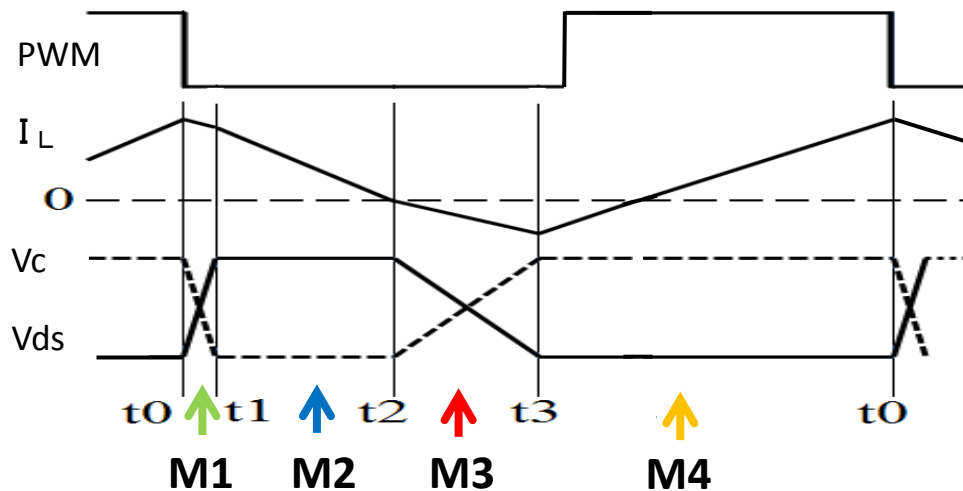
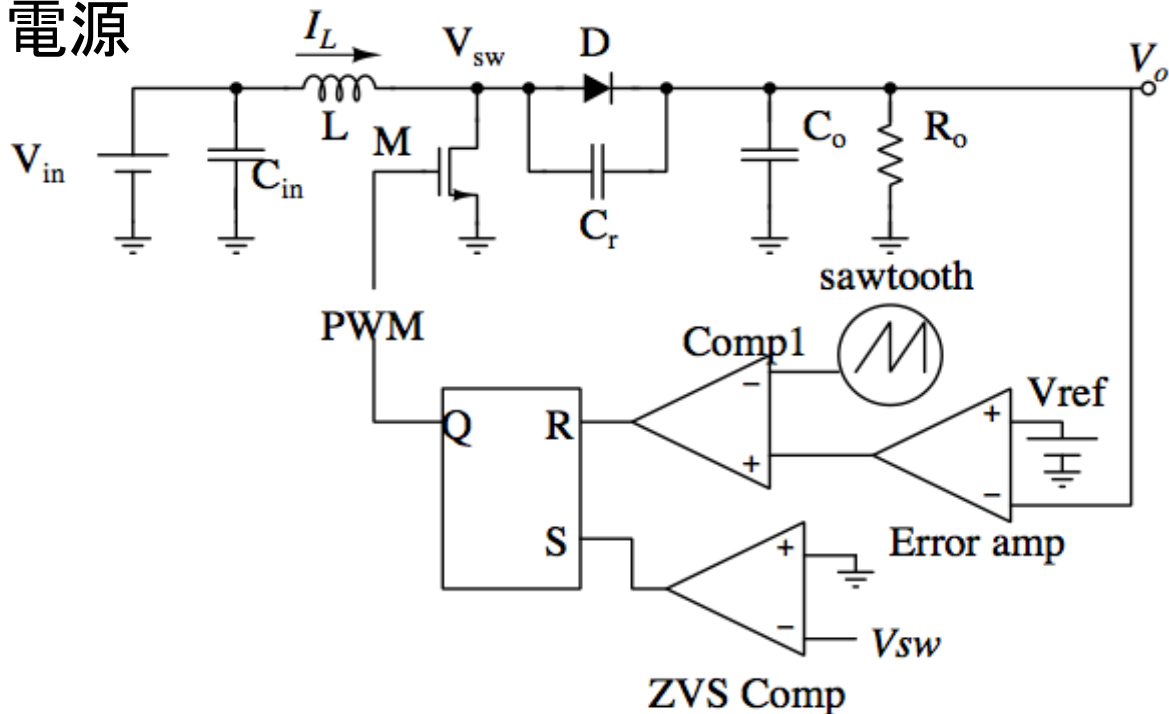
C_r は充電し V_{sw} は低下

・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

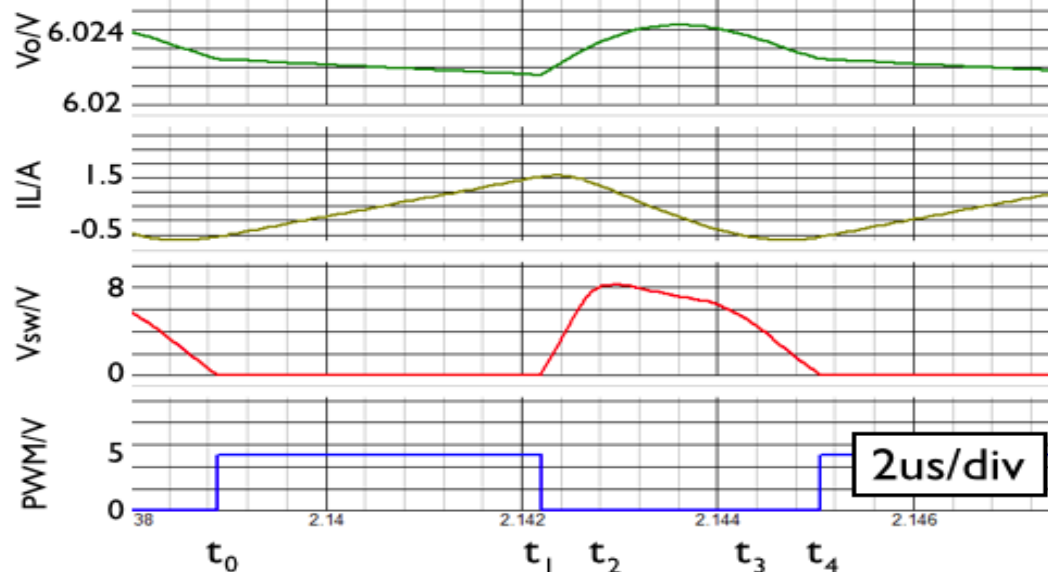
● シミュレーション結果

* 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

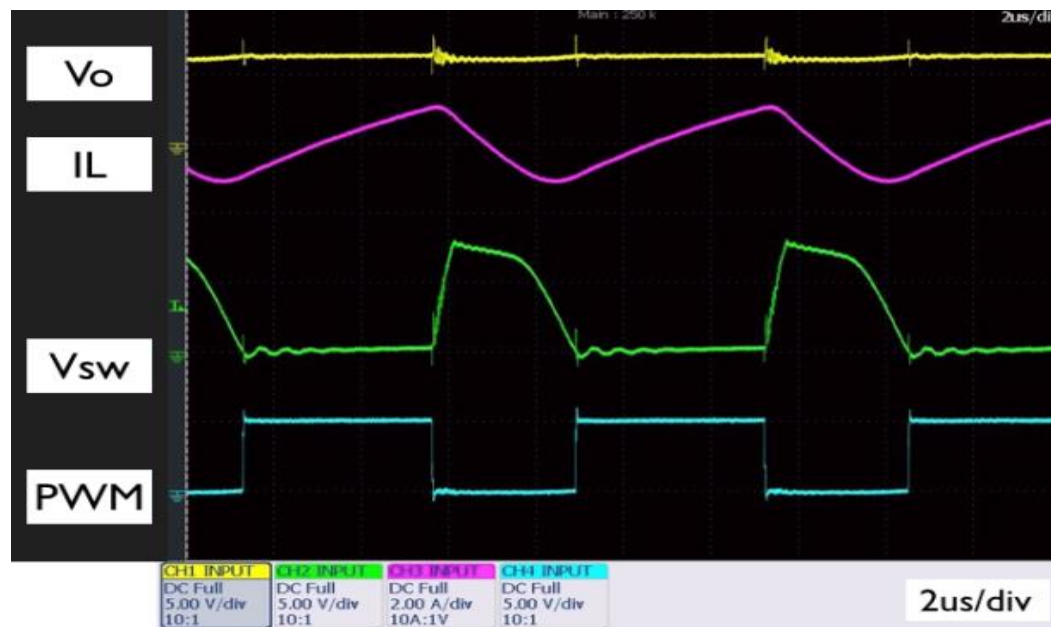
$F_{op}=129\text{ kHz}$ ($< F_{sim}=162.5\text{ kHz}$)

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