

パワーエレクトロニクス
第11回 DC-DCコンバータ
共振型コンバータ

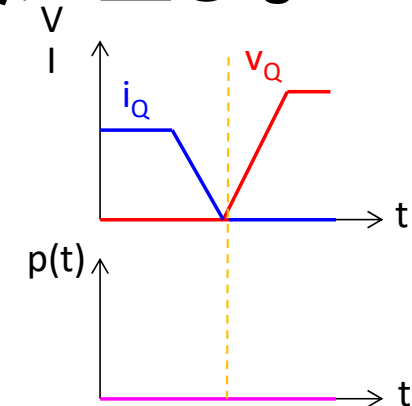
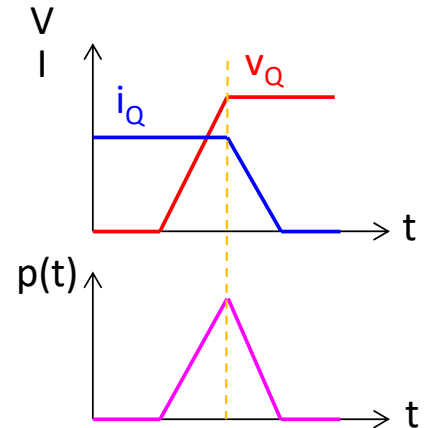
2025年7月2日

授業の予定

- パワーエレクトロニクス緒論
- パワーエレクトロニクスにおける基礎理論
- パワー半導体デバイス
- 整流回路
- 整流回路の交流側特性と他励式インバータ
- 交流電力制御とサイクロコンバータ
- 直流チョッパ
- DC-DCコンバータと共振形コンバータ
- 自励式インバータ
- 演習

スイッチング損失

- 理想スイッチングデバイス
 - スwitching損失無(サージ電圧は別)
- ハードスイッチング
 - スwitching動作時の電圧・電流積による損失
 - 高速スイッチングによる積分時間低減
 - スナバ回路によるスイッチング波形整形
 - 素子保護機能も付加
- ソフトスイッチング
 - スwitching動作時に電圧・電流積が生じない
 - ZVS:ターンオン時順方向印加電圧0
 - ZCS:ターンオフ時導通電流0

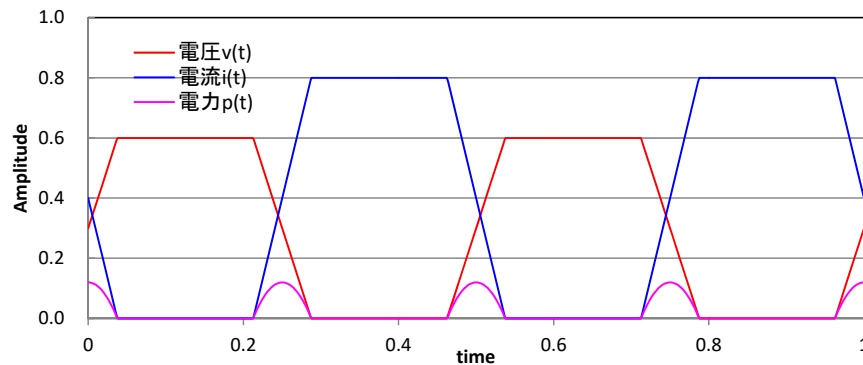


パワーデバイスでの損失

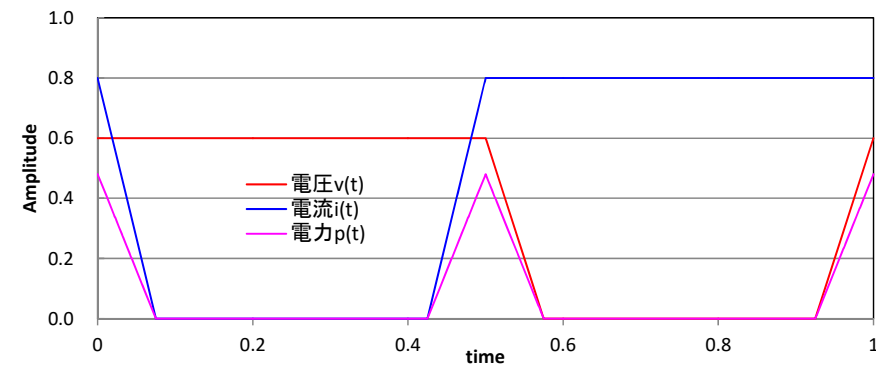
- 導通損失
 - オン状態における順方向電圧降下による損失
 - PN接合があると立ち上がり電圧が重畳される
 - PNの接合がないMOSFETが有利
- スイッチング損失
 - ターンオン・ターンオフの状態遷移時の損失
 - 状態遷移に有限の時間が必要
 - ゲート容量の充電・放電
 - 空乏層電荷の充電・放電
 - 少数キャリアの注入・排出

スイッチング損失

- ターンオン・ターンオフ時に発生
 - 電圧・電流積
 - ZVSターンオン, ZCSターンオフで低減可能
- スwitchング周波数に比例して大きくなる



電圧・電流が同時変化
抵抗負荷等

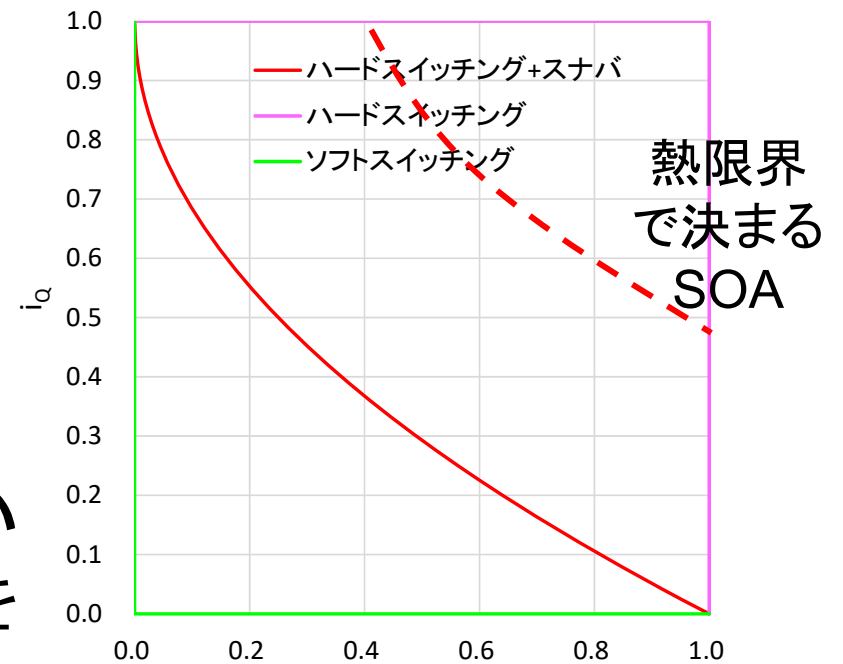


電圧・電流のタイミングがずれて変化
ダイオードクランプ誘導負荷
(実際のデバイス動作に近い)

スイッチング動作とSOA

- 安全動作領域(FBSOA: Forward Bias Safety Operating Area)

- スwitching時の電圧・電流
- デバイスの熱容量で決まる
- 電圧・電流がSOAの範囲内に収まる必要有
- ハードスイッチングでは厳しい
 - スナバによりSOA内での動作を容易にする
- ソフトスイッチングはSOA内に収めやすい
 - 電圧・電流のピーク値を除く



ZCS-共振型コンバータ

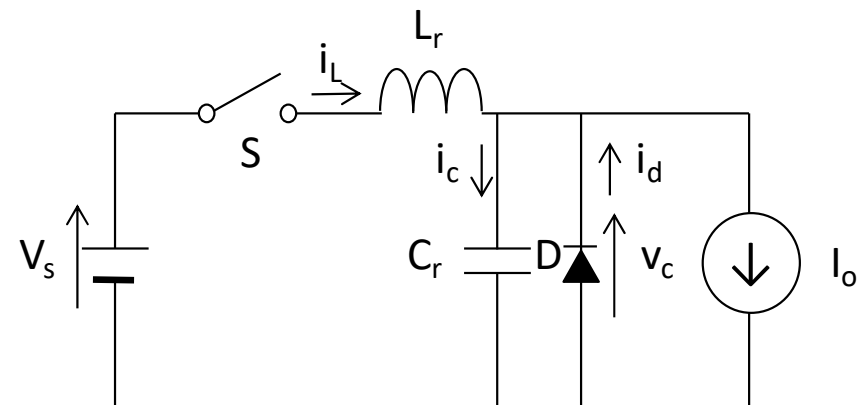
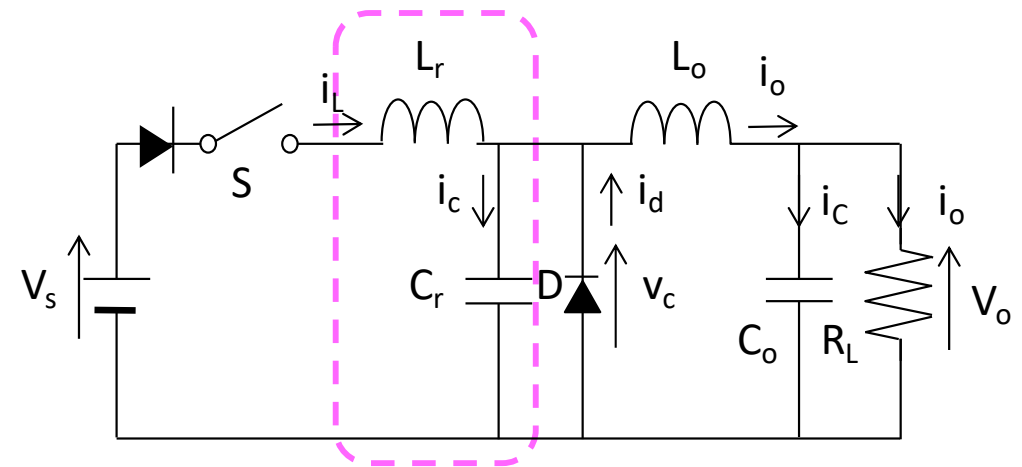
- 基本回路構成はBuckコンバータ

- 入力側LC共振回路
 - インダクタ L_r
 - コンデンサ C_r

- 出力インダクタンス L_o 大
 - 出力電流 i_o の変化小
 - $i_o \div \text{一定}$
 - $L_o \gg L_r$

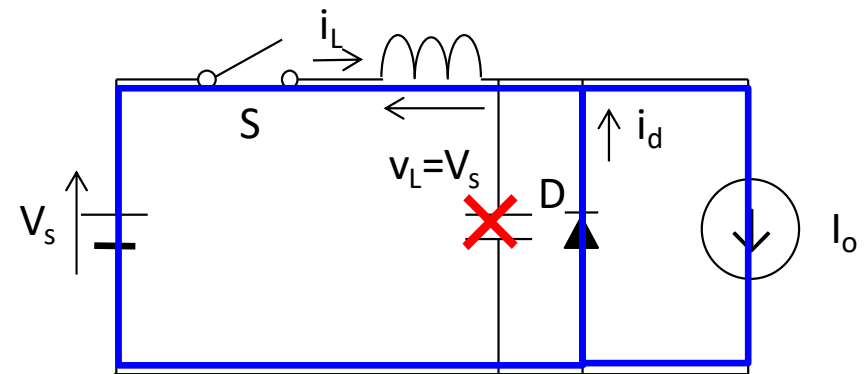
- 動作モード
 - 4種類(周期定常状態)

- | | |
|---------|-------|
| • S-ON | D-ON |
| • S-ON | D-OFF |
| • S-OFF | D-OFF |
| • S-OFF | D-ON |



ZCS-共振型コンバータ

- 動作モード①($0 \leq t \leq t_1$)
 - $t=0$ でスイッチON
 - 直前の負荷電流 I_o はダイオードを環流(連続導通)
 - $v_c=0$ (C_r の電圧)



- 電源(L_r)電流 i_L が上昇
 - ダイオードはON状態維持
 - $i_L = I_o$ までダイオードはON状態維持
 - I_o と i_L の差が i_d として流れる
 - $i_L = I_o$ でダイオードがターンオフ($t = t_1$)

ZCS-共振型コンバータ

- 動作モード②($t_1 < t \leq t_2$)

- スイッチON, ダイオードOFF

- 出力電流 I_o 一定

- $i_c = i_L - I_o$ で C_r を充電

- $i_L > I_o$

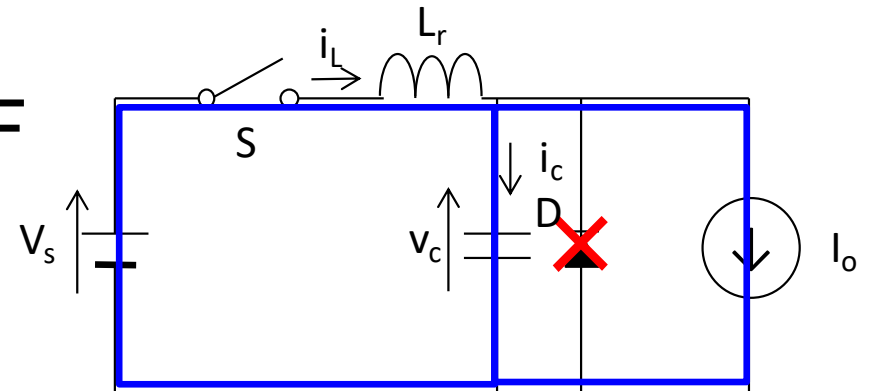
- C_r の電圧 v_c の上昇により i_L が減少

- $i_L = 0$ でスイッチ電流は0($t = t_2$)→遮断状態に移行

- バイポーラ素子(IGBT等)

- ボディダイオードのあるMOSFET等の場合はブロッキングダイオードを直列に挿入する必要有

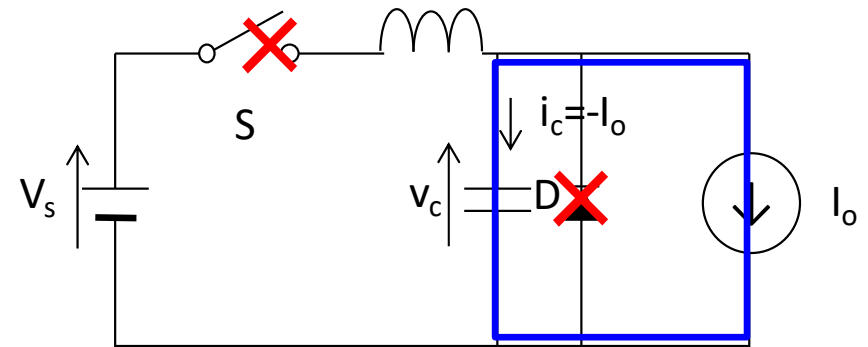
- コンデンサ C_r の電圧 v_c が、ダイオードを逆バイアス



ZCS-共振型コンバータ

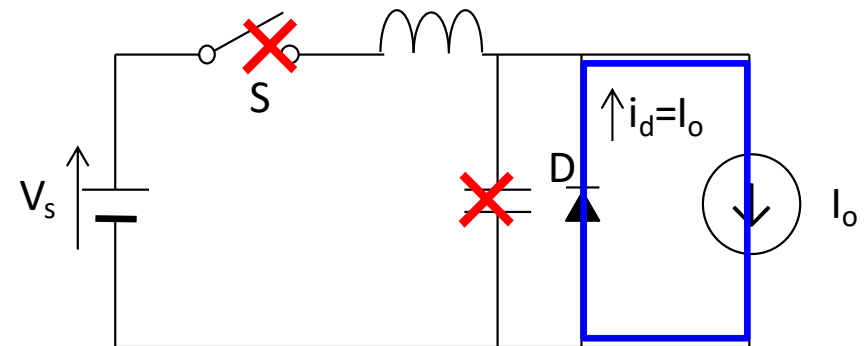
動作モード③($t_2 < t \leq t_4$)

- スイッチゲートON・遮断状態
- ダイオードOFF
- 出力電流 I_o 一定
 - $i_c = -I_o$ でCrを放電
 - $V_c > 0$ の状態ですwitchのゲートターンオフ($t = t_3 < t_4$) **ZCS**
- スイッチOFF($t_3 \leq t \leq t_4$)
 - $V_c < 0$ でダイオードが順バイアスされターンオン($t = t_4$)



動作モード④($t_4 < t \leq T$)

- スイッチOFF
- ダイオードON
 - $i_d = I_o$



ZCS-共振型コンバータ:回路解析

- 動作モード①($0 \leq t \leq t_1$)

- L_r の電流 i_L

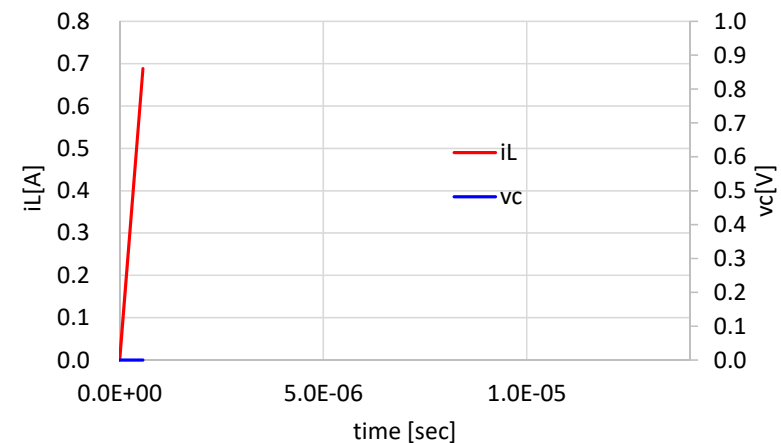
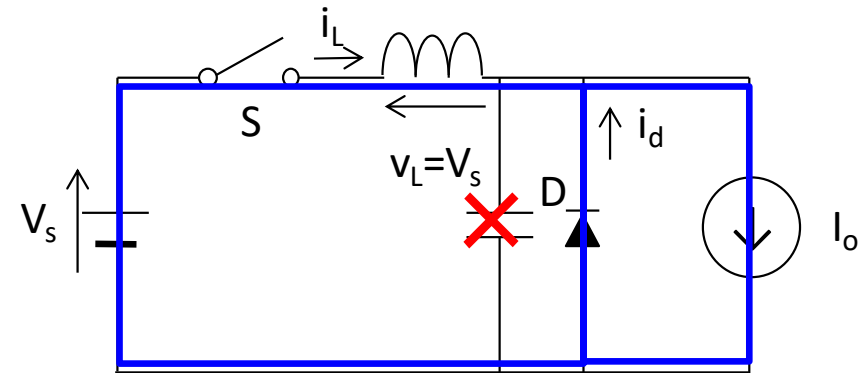
- 初期値: $i_L(0) = 0$

- 印加電圧: V_s

- $$i_L(t) = \frac{1}{L_r} \int_0^t V_s dt$$

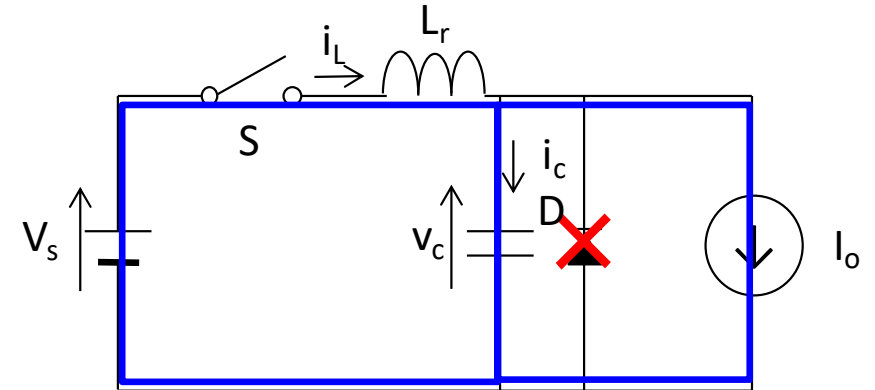
- $$i_L(t_1) = \frac{V_s t_1}{L_r} = I_o$$

- $$t_1 = \frac{L_r I_o}{V_s}$$



ZCS-共振型コンバータ:回路解析

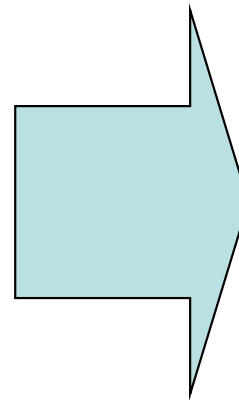
- 動作モード②($t_1 < t \leq t_2$)
 - 初期値 $v_c(t=t_1)=0$



$$v_c(t) = V_s - L_r \frac{di_L(t)}{dt}$$

$$i_c(t) = i_L(t) - I_o$$

$$C_r \frac{dv_c(t)}{dt} = i_c(t)$$



$$V_c = \frac{V_s}{s} - L_r (sI_L - I_{L(t1)})$$

$$= \frac{V_s}{s} - L_r (sI_L - I_o)$$

$$I_C = I_L - \frac{I_o}{s} \Rightarrow I_L = I_C + \frac{I_o}{s}$$

$$C_r (sV_c - V_{c(t1)}) =$$

$$C_r sV_c = I_c$$

ZCS-共振型コンバータ:回路解析

• 動作モード②($t_1 < t \leq t_2$)

$$V_c = \frac{V_s}{s} - L_r \left[s \left(I_c + \frac{I_o}{s} \right) - I_o \right]$$

$$= \frac{V_s}{s} - L_r [sI_c + I_o - I_o]$$

$$= \frac{V_s}{s} - L_r s I_c$$

$$C_r s V_c = I_c$$

$$I_c = C_r s \left(\frac{V_s}{s} - L_r s I_c \right)$$

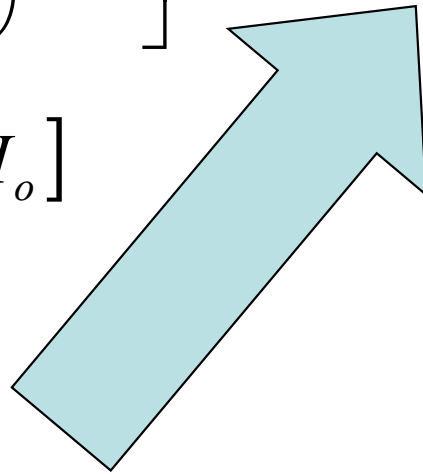
$$= C_r (V_s - L_r s^2 I_c)$$

$$I_c = C_r V_s \frac{1}{1 + L_r C_r s^2}$$

$$= C_r V_s \sqrt{\frac{1}{L_r C_r}} \frac{\sqrt{\frac{1}{L_r C_r}}}{\frac{1}{L_r C_r} + s^2}$$

$$= V_s \sqrt{\frac{C_r}{L_r}} \frac{\sqrt{\frac{1}{L_r C_r}}}{\frac{1}{L_r C_r} + s^2}$$

$$i_c(t + t_1) = V_s \sqrt{\frac{C_r}{L_r}} \sin \sqrt{\frac{1}{L_r C_r}} t$$



ZCS-共振型コンバータ:回路解析

- 動作モード②($t_1 < t \leq t_2$)
 - 各部の電圧・電流

$$i_c(t) = V_s \sqrt{\frac{C_r}{L_r}} \sin \sqrt{\frac{1}{L_r C_r}} (t - t_1)$$

$$\begin{aligned} i_L(t) &= I_o + i_c(t) \\ &= I_o + V_s \sqrt{\frac{C_r}{L_r}} \sin \sqrt{\frac{1}{L_r C_r}} (t - t_1) \end{aligned}$$

$$v_c(t) = V_s \left[1 - \cos \sqrt{\frac{1}{L_r C_r}} (t - t_1) \right]$$

ZCS-共振型コンバータ:回路解析

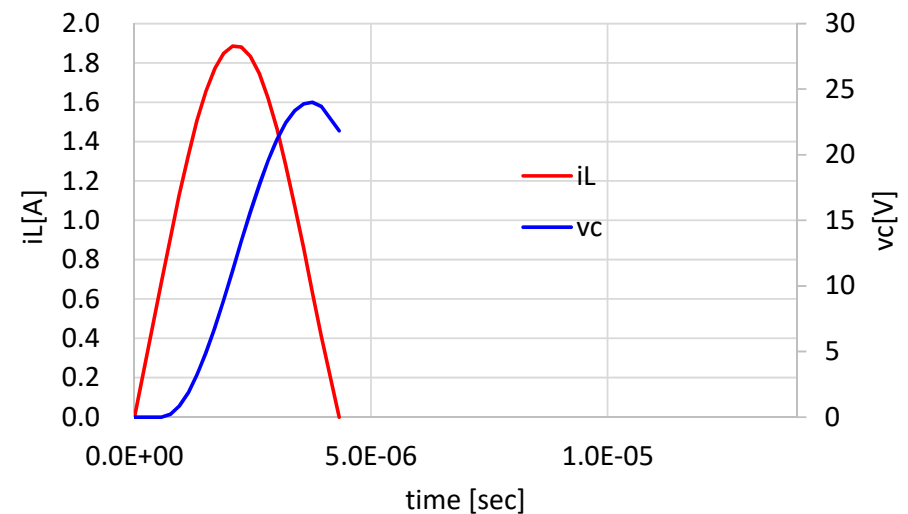
- 動作モード②($t_1 < t \leq t_2$)
 - t_2 を求める

$$i_L(t_2) = I_o + V_s \sqrt{\frac{C_r}{L_r}} \sin \sqrt{\frac{1}{L_r C_r}} (t_2 - t_1) = 0$$

$$V_s \sqrt{\frac{C_r}{L_r}} \sin \sqrt{\frac{1}{L_r C_r}} (t_2 - t_1) = -I_o$$

$$\sin \sqrt{\frac{1}{L_r C_r}} (t_2 - t_1) = -\frac{I_o}{V_s} \sqrt{\frac{L_r}{C_r}}$$

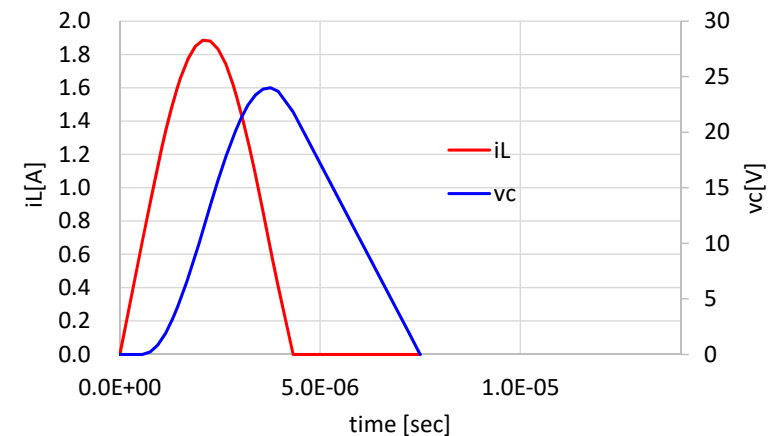
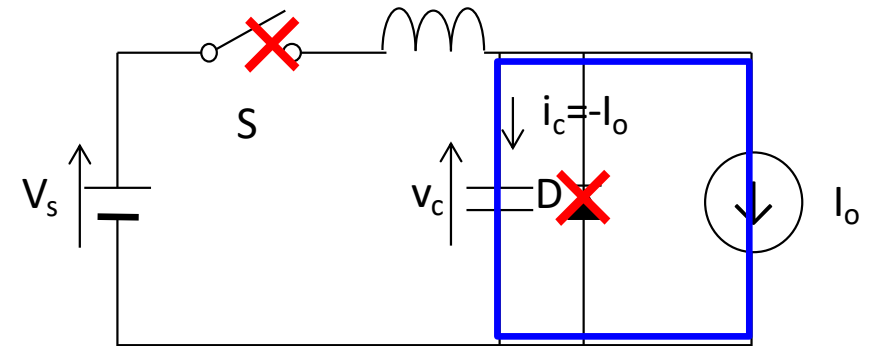
$$t_2 = t_1 + \sqrt{L_r C_r} \sin^{-1} \left(-\frac{I_o}{V_s} \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} \right)$$



ZCS-共振型コンバータ:回路解析

- 動作モード③($t_2 < t \leq t_4$)
 - コンデンサ C_r が $-I_o$ で放電

$$\begin{aligned}
 v_c(t) &= \frac{1}{C_r} \int_{t_2}^t i_c dt + v_c(t_2) \\
 &= \frac{1}{C_r} \int_{t_2}^t -I_o dt + v_c(t_2) \\
 &= -\frac{I_o}{C_r} (t - t_2) + v_c(t_2)
 \end{aligned}$$



ZCS-共振型コンバータ:回路解析

- 動作モード③($t_2 < t \leq t_4$)つづき
 - t_4 でコンデンサの電圧が0
 - $v_c(t_4) = 0$
 - $-\frac{I_o}{C_r}(t_4 - t_2) + v_c(t_2) = 0$
 - $t_4 = t_2 + \frac{C_r}{I_o} v_c(t_2)$
 - $t_2 = t_1 + \sqrt{L_r C_r} \sin^{-1} \left(-\frac{I_o}{V_s} \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} \right)$

ZCS-共振型コンバータ:回路解析

- 動作モード③($t_2 < t \leq t_4$)つづき

$$\begin{aligned} \bullet \quad v_c(t_2) &= V_s \left[1 - \cos \sqrt{\frac{1}{L_r C_r}} (t_2 - t_1) \right] \\ &= V_s \left[1 - \cos \sqrt{\frac{1}{L_r C_r}} \left(t_1 + \sqrt{L_r C_r} \sin^{-1} \left(-\frac{I_o}{V_s} \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} \right) - t_1 \right) \right] \\ &= V_s \left[1 - \cos \sqrt{\frac{1}{L_r C_r}} \left(\sqrt{L_r C_r} \sin^{-1} \left(-\frac{I_o}{V_s} \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} \right) \right) \right] \\ &= V_s \left[1 - \cos \left(\sin^{-1} \left(-\frac{I_o}{V_s} \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} \right) \right) \right] \end{aligned}$$

ZCS-共振型コンバータ:回路解析

- 動作モード③($t_2 < t \leq t_4$)つづき

- $\sin^{-1} x = \cos^{-1} \sqrt{1 - x^2}$

- $$v_c(t_2) = V_s \left[1 - \cos \left(\cos^{-1} \sqrt{1 - \left(\frac{I_o}{V_s} \right)^2 \frac{L_r}{C_r}} \right) \right]$$
$$= V_s \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{I_o}{V_s} \right)^2 \frac{L_r}{C_r}} \right]$$

- $$t_4 = t_2 + \frac{C_r}{I_o} v_c(t_2)$$

$$= t_1 + \sqrt{L_r C_r} \sin^{-1} \left(-\frac{I_o}{V_s} \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} \right) + \frac{C_r}{I_o} V_s \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{I_o}{V_s} \right)^2 \frac{L_r}{C_r}} \right]$$

ZCS-共振型コンバータ:回路解析

- 動作モード④($t_4 < t \leq T$)

- インダクタ電流

- スイッチOFF

$$i_L = 0$$

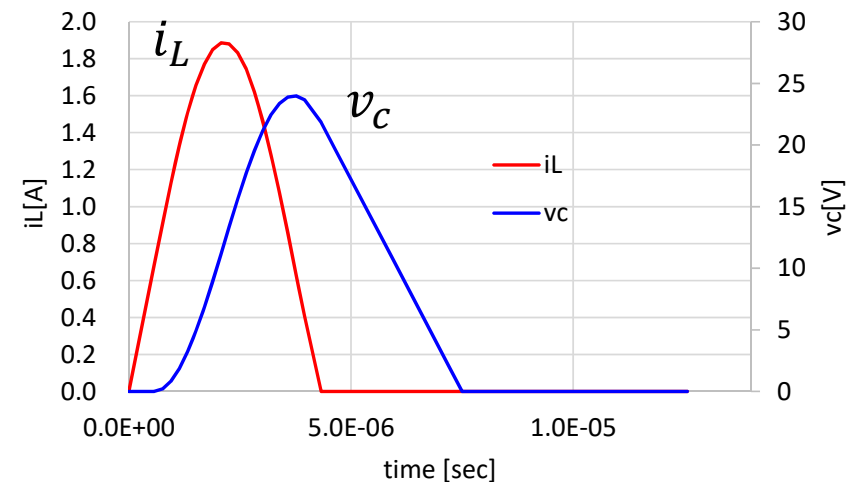
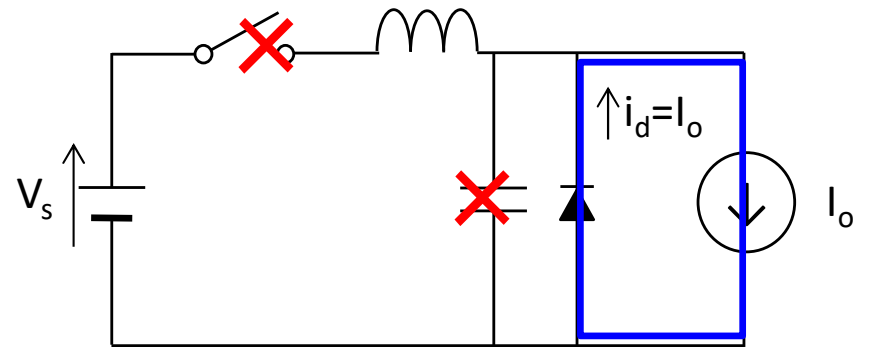
- コンデンサ

- 電圧はダイオード導通中

$$v_c = 0$$

- 電流は, 出力電圧と同じ

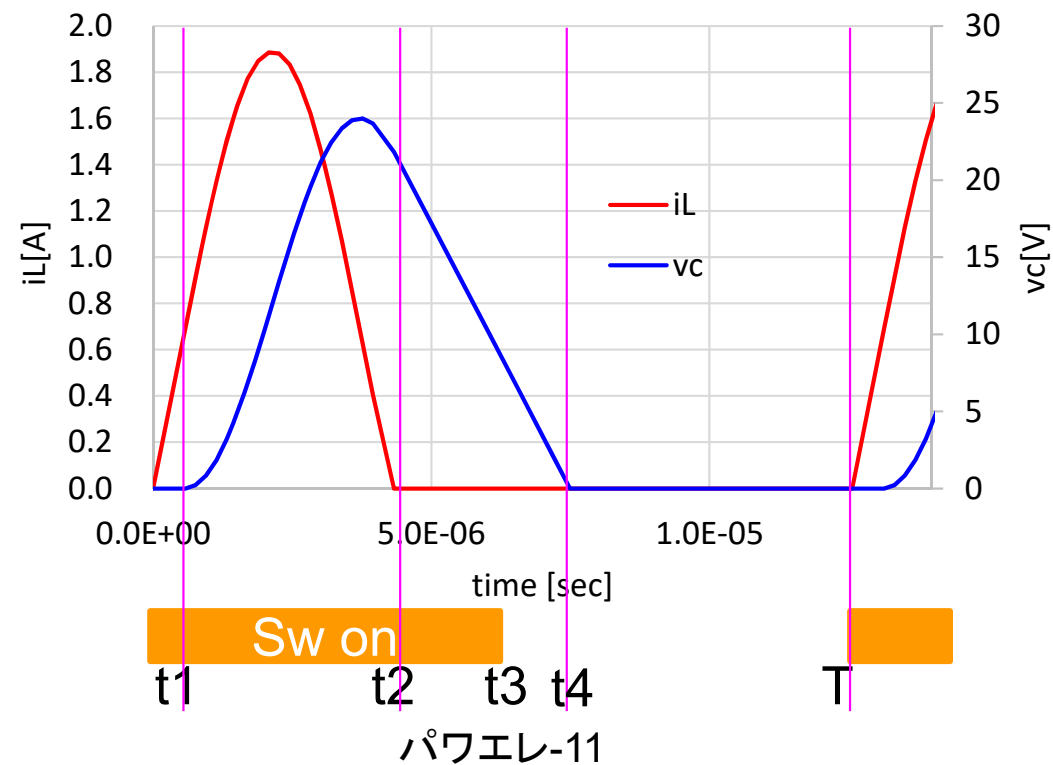
- $i_c = 0$



ZCS-共振型コンバータ

動作区間

- | | | |
|-----------------------|-----------|----------|
| • $0 \leq t \leq t_1$ | スイッチON | ダイオードON |
| • $t_1 < t \leq t_2$ | スイッチON | ダイオードOFF |
| • $t_2 < t \leq t_3$ | スイッチターンオフ | ダイオードOFF |
| • $t_3 < t \leq T$ | スイッチOFF | ダイオードON |



ZCS-共振型コンバータ

- 出力電圧を出力エネルギー W_o と入力エネルギー W_s の関係
 $W_o = W_s$ より求める

- $W_o = \int_0^T V_o I_o dt = V_o I_o T$

- $W_s = \int_0^T V_s i_L dt$

$$= V_s \int_0^{t_1} \frac{V_s t}{L_r} dt + V_s \int_{t_1}^{t_2} \left[I_o + V_s \sqrt{\frac{C_r}{L_r}} \sin \sqrt{\frac{1}{L_r C_r}} (t - t_1) \right] dt$$

$$= V_s \left\{ \frac{V_s}{2L_r} t_1^2 + I_o (t_2 - t_1) - V_s C_r \left[\cos \sqrt{\frac{1}{L_r C_r}} (t_2 - t_1) - 1 \right] \right\}$$

ZCS-共振型コンバータ

- $W_o = W_s$
 - $V_o I_o T = V_s \left\{ \frac{V_s}{2L_r} t_1^2 + I_o(t_2 - t_1) - V_s C_r \left[\cos \sqrt{\frac{1}{L_r C_r}} (t_2 - t_1) - 1 \right] \right\}$
 - $V_o = \frac{V_s}{I_o T} \left\{ \frac{V_s}{2L_r} t_1^2 + I_o(t_2 - t_1) - V_s C_r \left[\cos \sqrt{\frac{1}{L_r C_r}} (t_2 - t_1) - 1 \right] \right\}$
 $= \frac{V_s}{T} \left\{ \frac{V_s}{I_o 2L_r} t_1^2 + (t_2 - t_1) - \frac{1}{I_o} V_s C_r \left[\cos \sqrt{\frac{1}{L_r C_r}} (t_2 - t_1) - 1 \right] \right\}$
 - $v_c(t_2) = V_s \left[1 - \cos \sqrt{\frac{1}{L_r C_r}} (t_2 - t_1) \right]$
 - $I_o = \frac{C_r}{t_4 - t_2} v_c(t_2) = \frac{C_r}{t_4 - t_2} V_s \left[1 - \cos \sqrt{\frac{1}{L_r C_r}} (t_2 - t_1) \right]$

ZCS-共振型コンバータ

- $$\begin{aligned}
 V_o &= \frac{V_s}{T} \left\{ \frac{V_s}{I_o 2L_r} t_1^2 + t_2 - t_1 - \frac{1}{I_o} V_s C_r \left[\cos \sqrt{\frac{1}{L_r C_r}} (t_2 - t_1) - 1 \right] \right\} \\
 &= \frac{V_s}{T} \left\{ \frac{V_s}{\frac{C_r}{t_4 - t_2} V_s \left[1 - \cos \sqrt{\frac{1}{L_r C_r}} (t_2 - t_1) \right] 2L_r} t_1^2 + t_2 - t_1 \right. \\
 &\quad \left. - \frac{1}{\frac{C_r}{t_4 - t_2} V_s \left[1 - \cos \sqrt{\frac{1}{L_r C_r}} (t_2 - t_1) \right]} V_s C_r \left[\cos \sqrt{\frac{1}{L_r C_r}} (t_2 - t_1) - 1 \right] \right\} \\
 &= \frac{V_s}{T} \left\{ \frac{t_4 - t_2}{C_r \left[1 - \cos \sqrt{\frac{1}{L_r C_r}} (t_2 - t_1) \right] 2L_r} t_1^2 + t_2 - t_1 + t_4 - t_2 \right\} \\
 &= \frac{V_s}{T} \left\{ \frac{t_4 - t_2}{C_r \left[1 - \cos \sqrt{\frac{1}{L_r C_r}} (t_2 - t_1) \right] 2L_r} t_1^2 - t_1 + t_4 \right\}
 \end{aligned}$$
- $$\frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{T} \left\{ \frac{t_4 - t_2}{C_r \left[1 - \cos \sqrt{\frac{1}{L_r C_r}} (t_2 - t_1) \right] 2L_r} t_1^2 - t_1 + t_4 \right\}$$

ZCS-共振型コンバータ

- $t_1 = \frac{L_r I_o}{V_s}$
- $t_2 = t_1 + \sqrt{L_r C_r} \sin^{-1} \left(-\frac{I_o}{V_s} \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} \right)$
- $t_4 = \frac{L_r I_o}{V_s} + \sqrt{L_r C_r} \sin^{-1} \left(-\frac{I_o}{V_s} \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} \right) + \frac{C_r}{I_o} V_s \left[1 - \right.$

$$\left. \sqrt{1 - \left(\frac{I_o}{V_s} \right)^2 \frac{L_r}{C_r}} \right]$$

ZCS-共振型コンバータ

- スイッチング周波数 $f_s = \frac{1}{T}$ に対する昇圧比

- $$\frac{V_o}{V_s} = f_s \left\{ \frac{t_4 - t_2}{C_r \left[1 - \cos \sqrt{\frac{1}{L_r C_r}} (t_2 - t_1) \right] 2L_r} t_1^2 - t_1 + t_4 \right\}$$

- $R_L = \frac{V_o}{I_o}$

- $r = \frac{R_L}{Z_o}$

バックコンバータと異なり, 周波数で出力電圧制御する
負荷の大きさで入出力比が変化する

