

パワーエレクトロニクス
第拾弐回 DC-DCコンバータ
共振型コンバータ

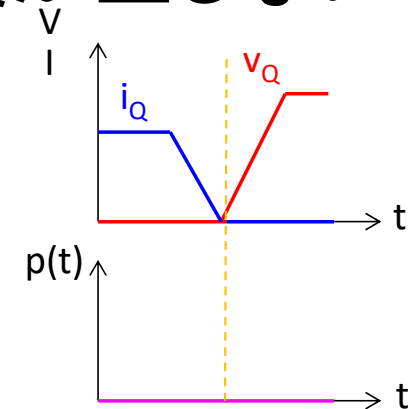
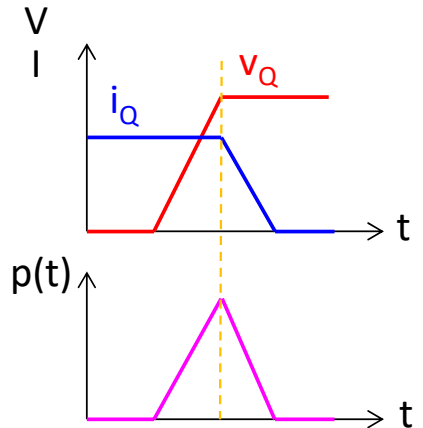
2023年7月5日

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

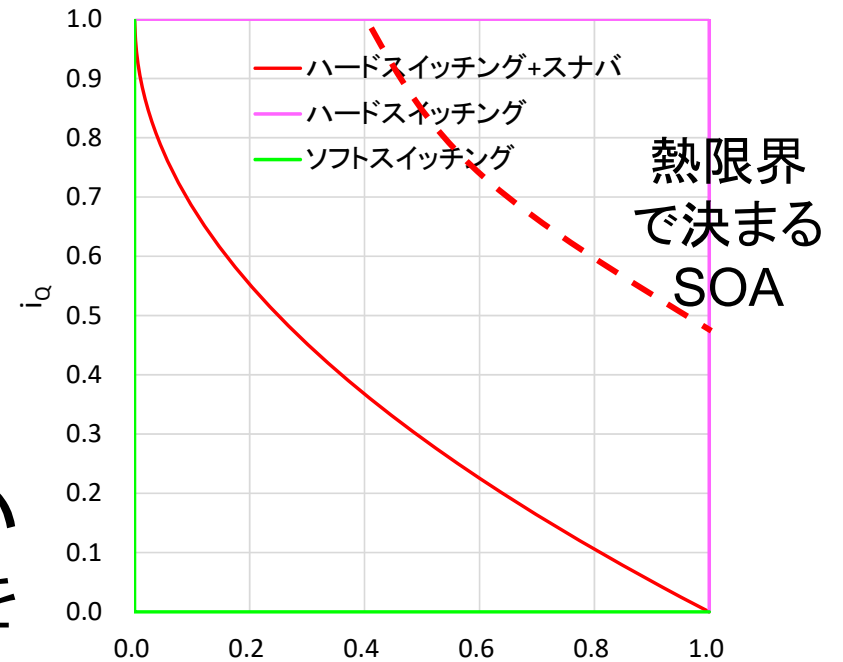
- 理想スイッチングデバイス
 - スwitching損失無(サージ電圧は別)
- ハードスイッチング
 - スwitching動作時の電圧・電流積による損失
 - 高速スイッチングによる積分時間低減
 - スナバ回路によるスイッチング波形整形
 - 素子保護機能も付加
- ソフトスイッチング
 - スwitching動作時に電圧・電流積が生じない
 - ZVS:ターンオン時順方向印加電圧0
 - ZCS:ターンオフ時導通電流0



スイッチング動作とSOA

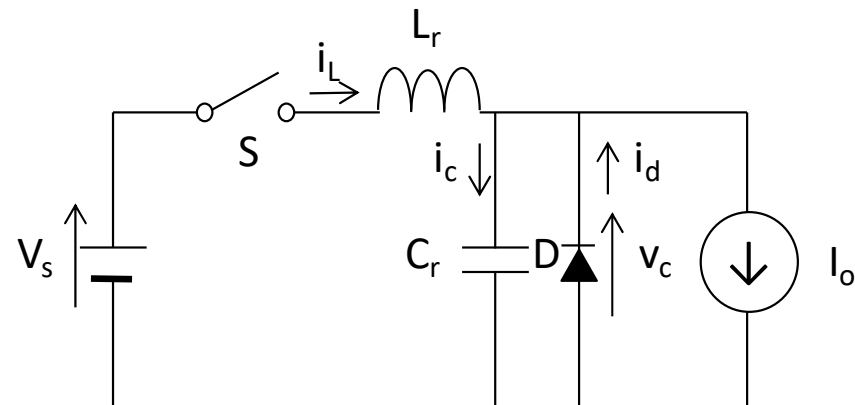
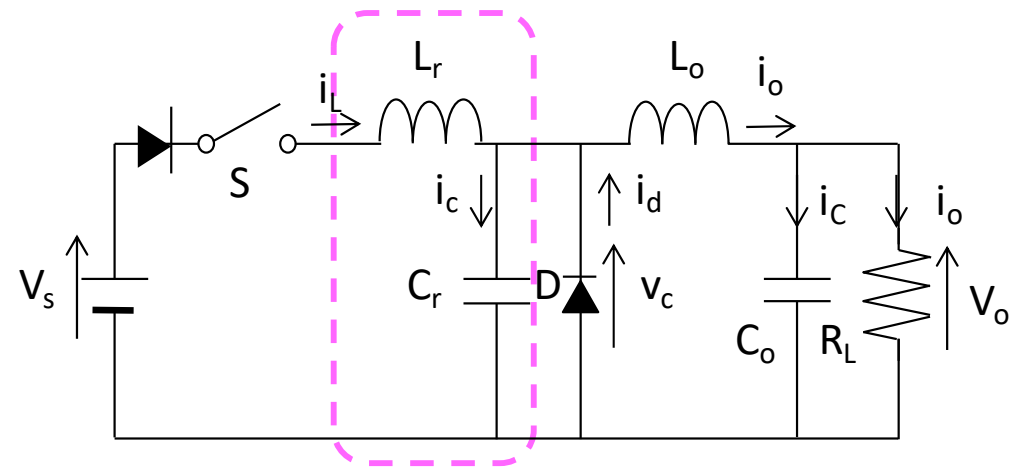
- 安全動作領域(FBSOA: Forward Bias Safety Operating Area)

- 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
 - $i_o \approx \text{一定}$
 - $L_o \gg L_r$
- 動作モード

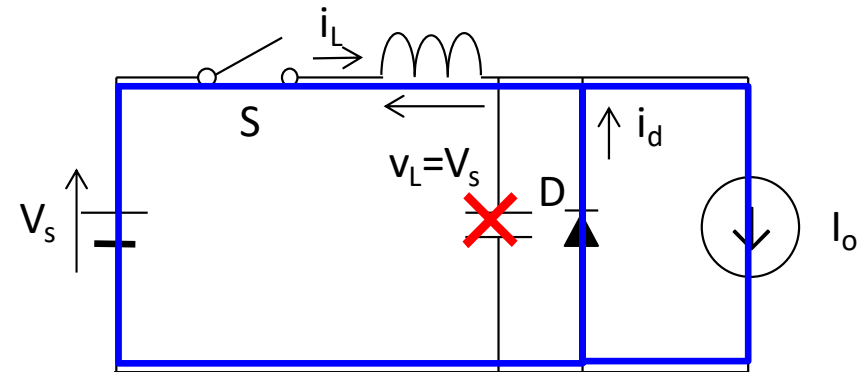


- 4種類(周期定常状態)

• 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(Lr)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

- $i_L > I_o$

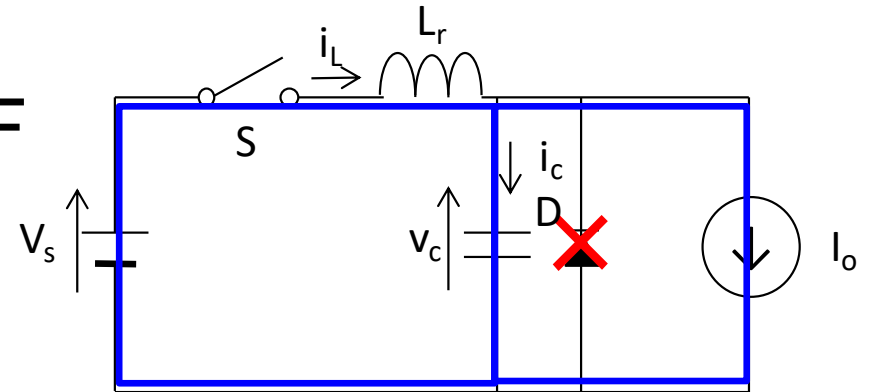
- C_r の電圧 v_c の上昇により i_L が減少

- $i_L = 0$ 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

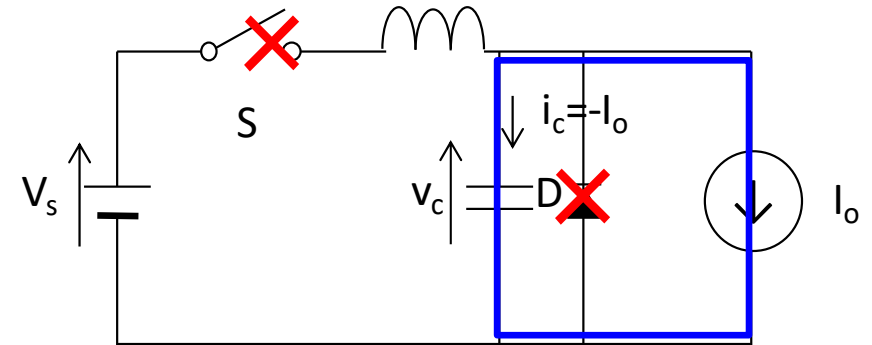


ZCS-共振型コンバータ

- 動作モード③ ($t_2 < t \leq t_4$)

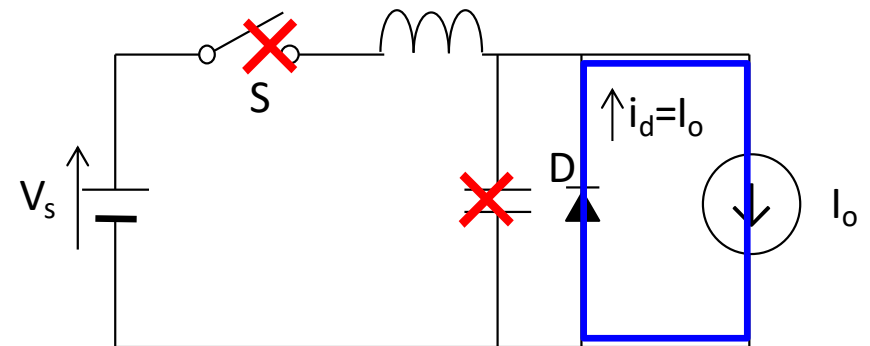
- スイッチゲートON・遮断状態
- ダイオードOFF
- 出力電流 I_o 一定

- $i_c = -I_o$ で C_r を放電
- $V_c > 0$ の状態でスイッチ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($0 \leq t \leq t_1$)

- Lrの電流*i_L*

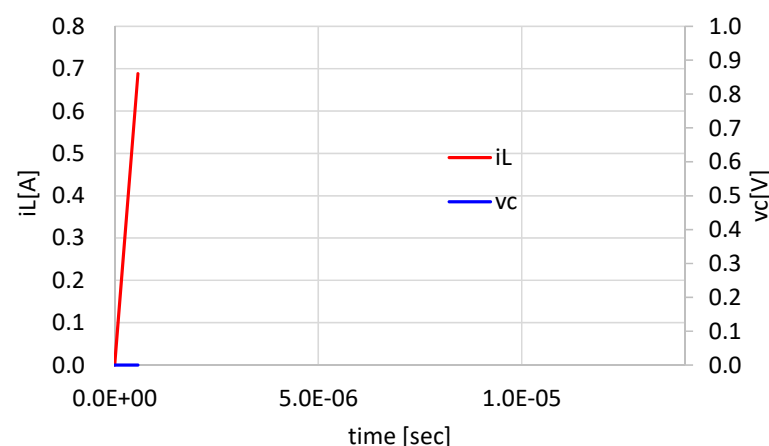
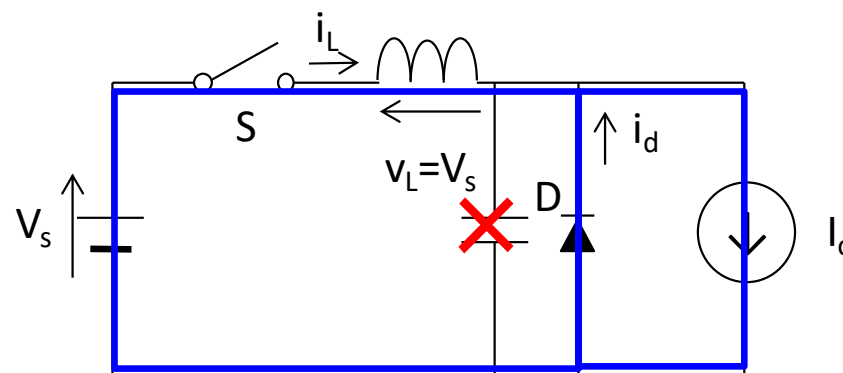
- 初期値: $i_L(0) = 0$

- 印加電圧: V_s

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

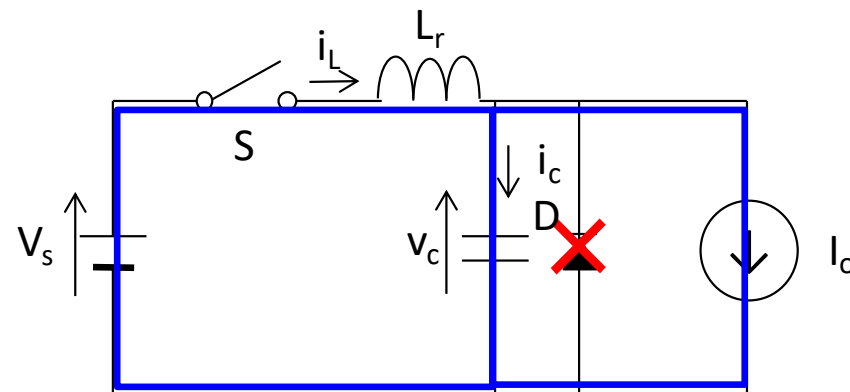
- $$i_L(t_1) = \frac{V_s t_1}{L_r} = I_o$$

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



ZCS-共振型コンバータ:回路解析

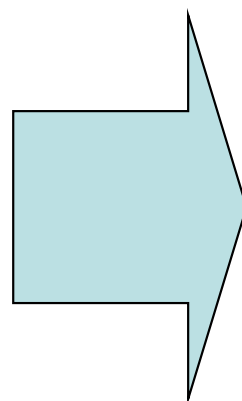
- 動作モード② ($t_1 < t \leq t_2$)
 - 初期値 $v_c(t=t_1)=0$



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

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

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



$$V_c = \frac{V_s}{s} - L_r (sI_L - I_{L(t_1)})$$

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

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

$$C_r (sV_c - V_{c(t_1)}) =$$

$$C_r sV_c = I_c$$

ZCS-共振型コンバータ:回路解析

• 動作モード②($t_1 < t \leq t_2$)

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

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

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

$$C_r s V_c = I_c$$

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

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

$$\begin{aligned} I_c &= C_r V_s \frac{1}{1 + L_r C_r s^2} \\ &= C_r V_s \sqrt{\frac{1}{L_r C_r}} \frac{\sqrt{\frac{1}{L_r C_r}}}{\frac{1}{L_r C_r} + s^2} \\ &= V_s \sqrt{\frac{C_r}{L_r}} \frac{\sqrt{\frac{1}{L_r C_r}}}{\frac{1}{L_r C_r} + s^2} \end{aligned}$$

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

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($t_1 < t \leq t_2$)

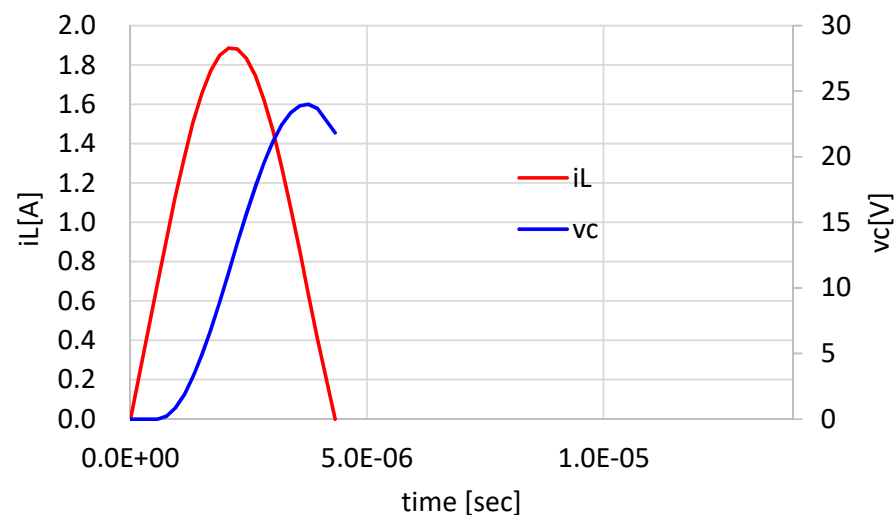
- t_2 を求める

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

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

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

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



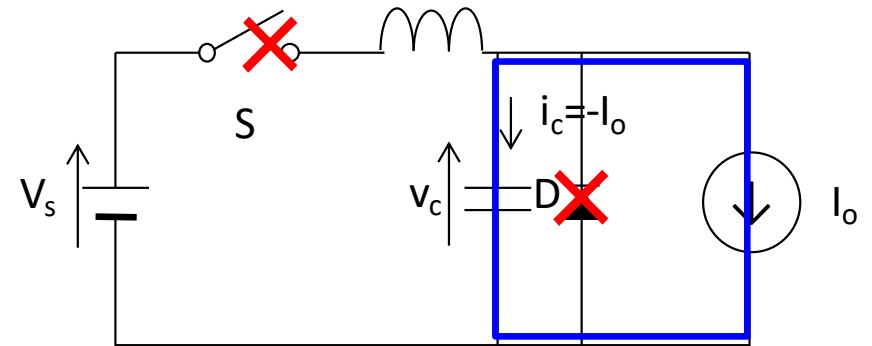
ZCS-共振型コンバータ:回路解析

- 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

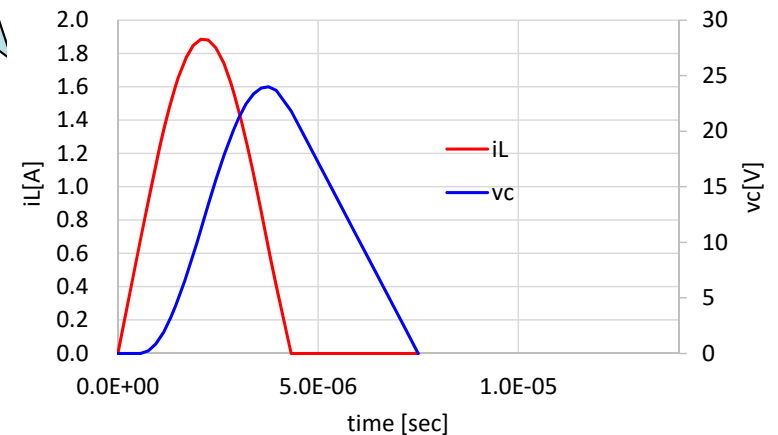
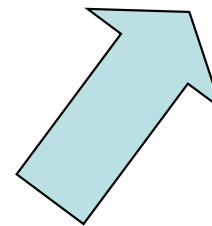
$$\begin{aligned}
 v_c(t) &= \frac{1}{C_r} \int_{t_2}^t i_c dt + v_c(t_2) \\
 &= \frac{1}{C_r} \int_{t_2}^t -I_o dt + v_c(t_2) \\
 &= -\frac{I_o}{C_r} (t - t_2) + v_c(t_2)
 \end{aligned}$$

- t_3 でコンデンサの電圧が0

$$v_c(t_3) = 0$$



$$\begin{aligned}
 -\frac{I_o}{C_r} (t_3 - t_2) + v_c(t_2) &= 0 \\
 t_3 &= t_2 + \frac{C_r}{I_o} v_c(t_2)
 \end{aligned}$$



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

$$i_L = 0$$

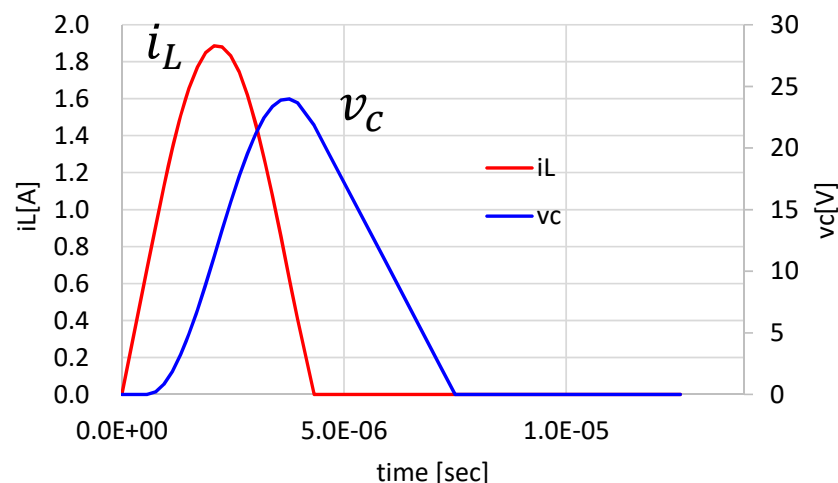
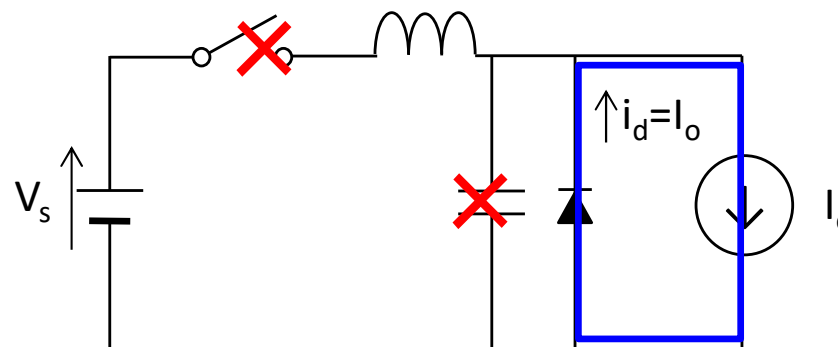
- コンデンサ

- 電圧はダイオード導通中

$$v_c = 0$$

- 電流は, 出力電圧と同じ

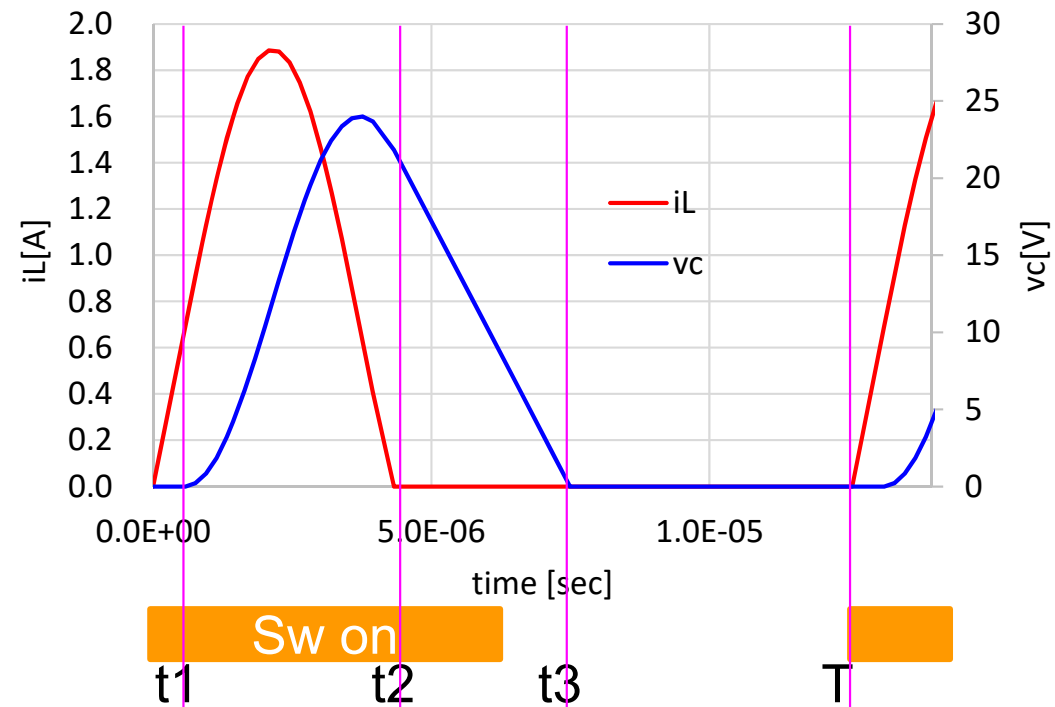
- $i_c = 0$



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

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

$$= V_o I_o T$$

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

$$= V_s \int_0^{t1} \frac{V_s t}{L_r} dt + V_s \int_{t1}^{t2} \left[I_o + V_s \sqrt{\frac{C_r}{L_r}} \sin \sqrt{\frac{1}{L_r C_r}} (t - t1) \right] dt$$

$$= V_s \left\{ \frac{V_s}{2L_r} t1^2 + I_o (t2 - t1) - V_s C_r \left[\cos \sqrt{\frac{1}{L_r C_r}} (t2 - t1) - 1 \right] \right\}$$

ZCS-共振型コンバータ

$$W_o = W_s$$

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

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

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

$$I_o = \frac{C_r}{t_3 - t_2} v_c(t_2) = \frac{C_r}{t_3 - t_2} V_s \left[1 - \cos \sqrt{\frac{1}{L_r C_r}} (t_2 - t_1) \right]$$

$$V_o = \frac{V_s}{T} \left\{ \frac{V_s}{2L_r} t_1^2 \frac{t_3 - t_2}{C_r \left[1 - \cos \sqrt{\frac{1}{L_r C_r}} (t_2 - t_1) \right]} + (t_2 - t_1) + V_s (t_3 - t_2) \right\}$$

ZCS-共振型コンバータ

- スイッチング周波数に対する昇圧比

- $\frac{V_o}{V_s} = f_s \left[-\frac{t_1}{2} + t_3 \right]$

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

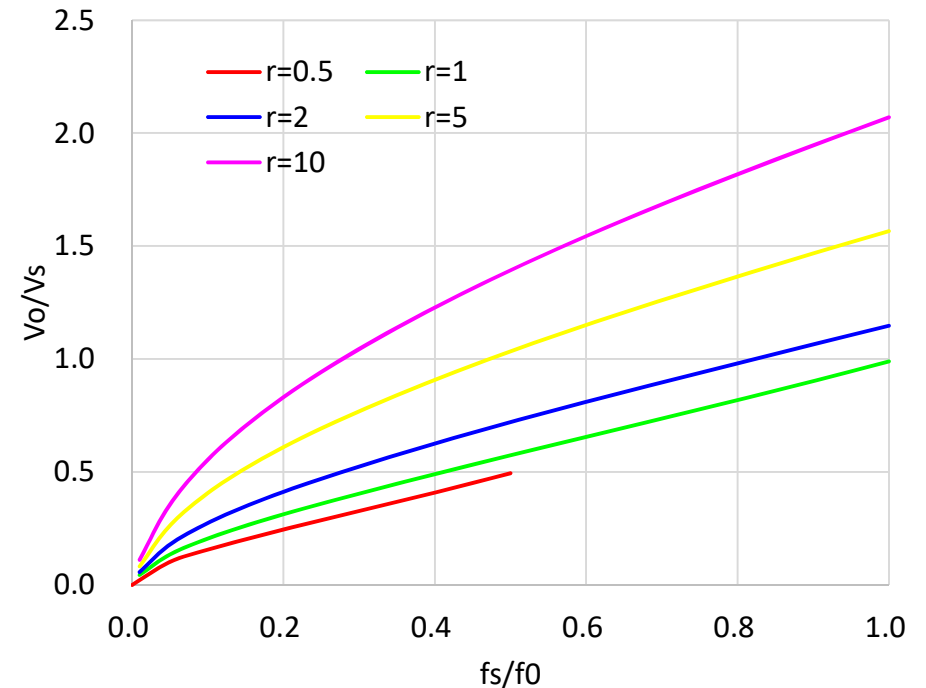
- $t_2 = t_1 + \frac{1}{\omega_0} \left[\sin^{-1} \left(\frac{I_o Z_o}{V_s} \right) + \pi \right]$

- $t_3 = t_2 + \frac{C_r V_s [1 - \cos \omega_0 (t_2 - t_1)]}{I_o}$

- $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}}$

- $Z_o = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}}$

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



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