

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

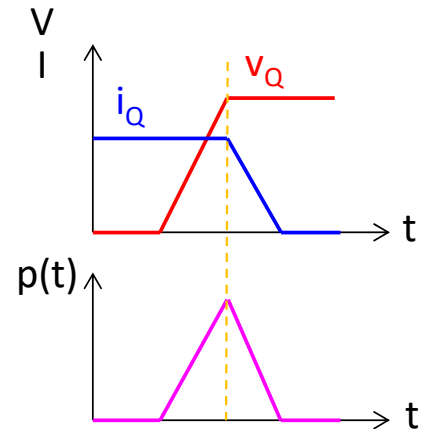
2022年7月6日

授業の予定

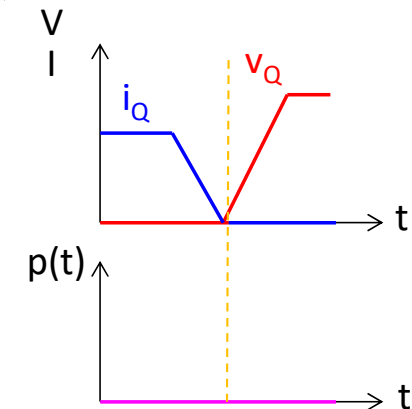
- パワーエレクトロニクス緒論
- パワーエレクトロニクスにおける基礎理論
- パワー半導体デバイス
- 整流回路
- 整流回路の交流側特性と他励式インバータ
- 交流電力制御とサイクロコンバータ
- 直流チョッパ
- DC-DCコンバータと共振形コンバータ
- 自励式インバータ
- 演習

スイッチング損失

- 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

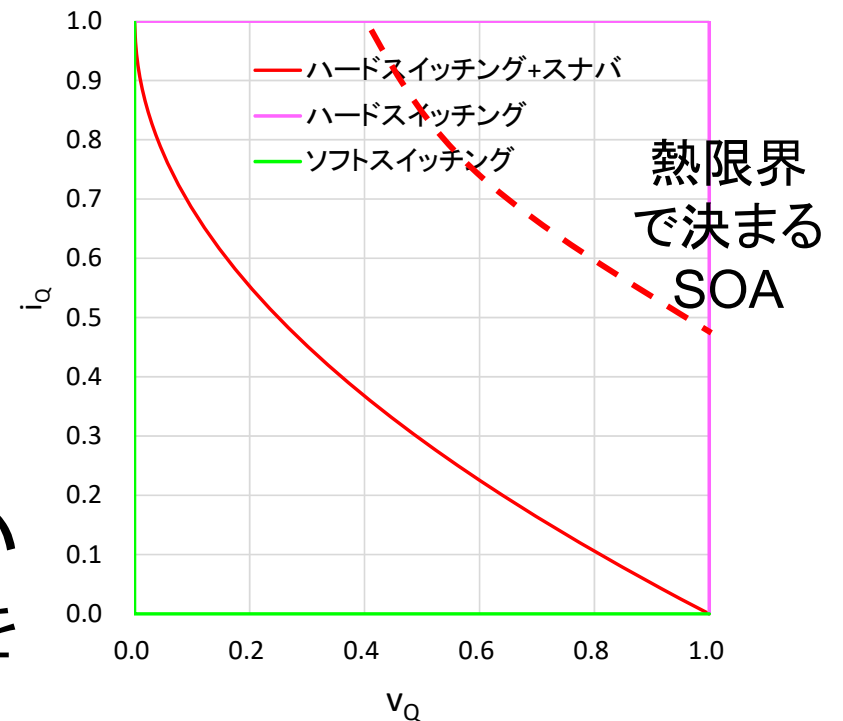


- ソフトスイッチング
 - スwitching動作時に電圧・電流積が生じない
 - ZVS:ターンオン時順方向印加電圧0
 - ZCS:ターンオフ時導通電流0



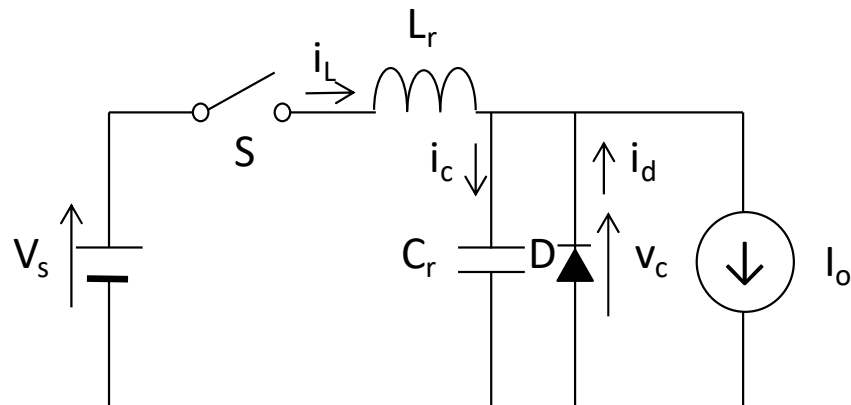
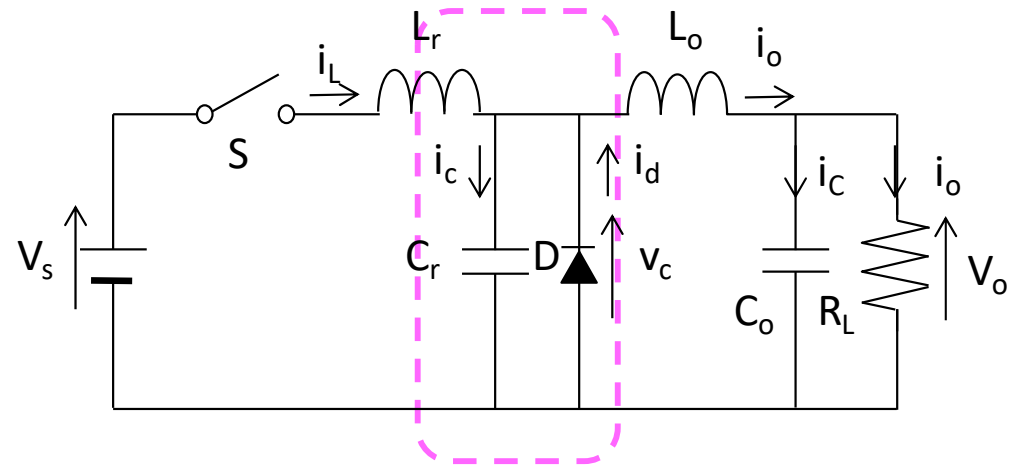
スイッチング動作とSOA

- 安全動作領域(FBSOA)
 - 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
 - $i_o \approx$ 一定
 - $L_o \gg L_r$
- 動作モード

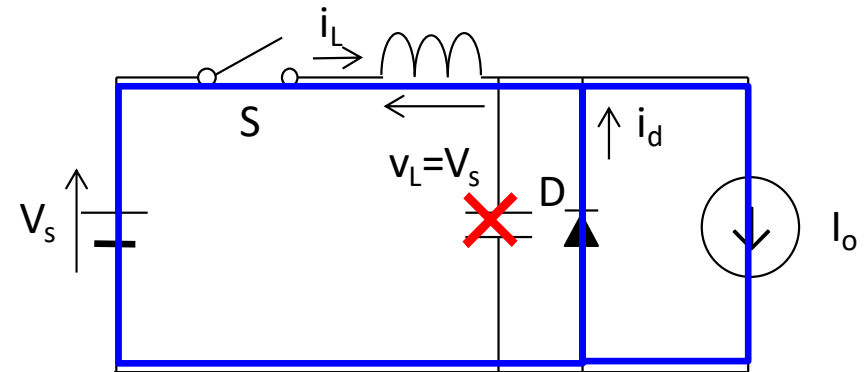


- 4種類(周期定常状態)

• 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

- $i_L > I_o$

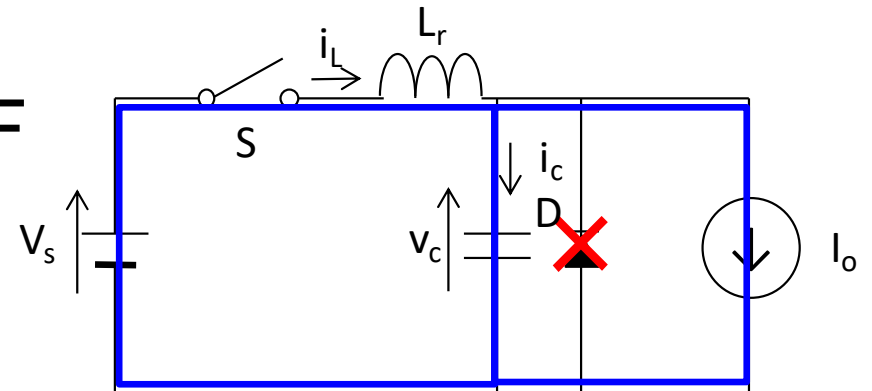
- C_r の電圧 v_c の上昇により i_L が減少

- $i_L = 0$ 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

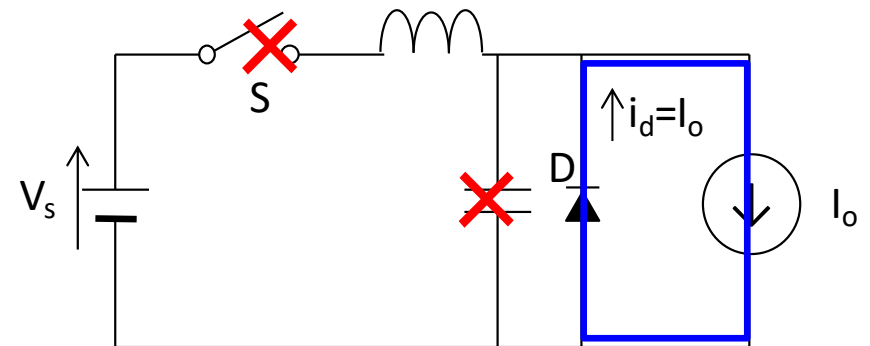
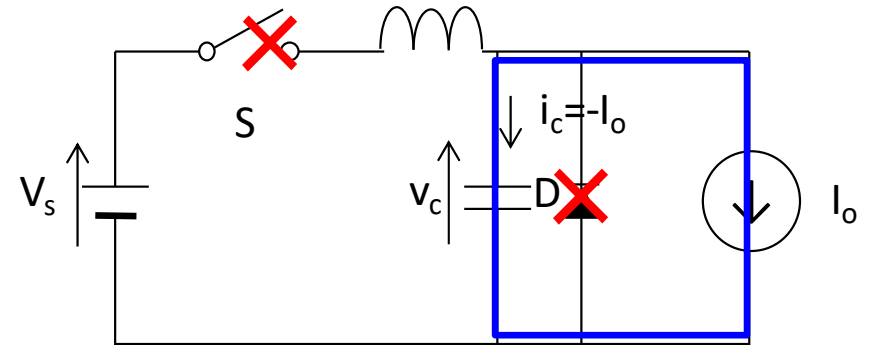
- $V_c > 0$ の状態でスイッチのゲートターンオフ ($t = t_3 < t_4$) **ZCS**

- 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*

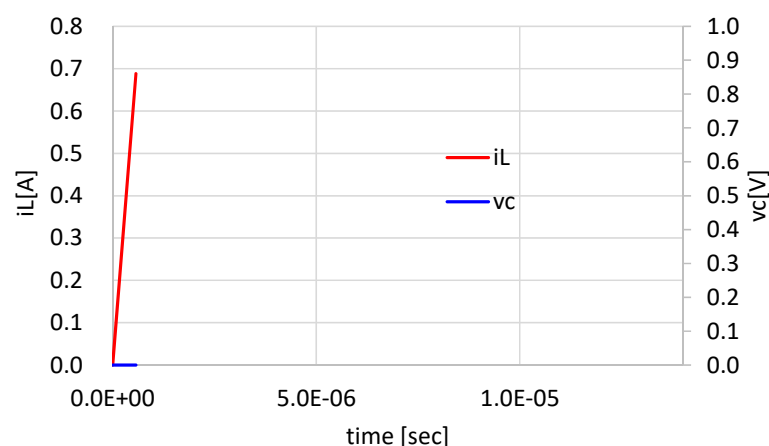
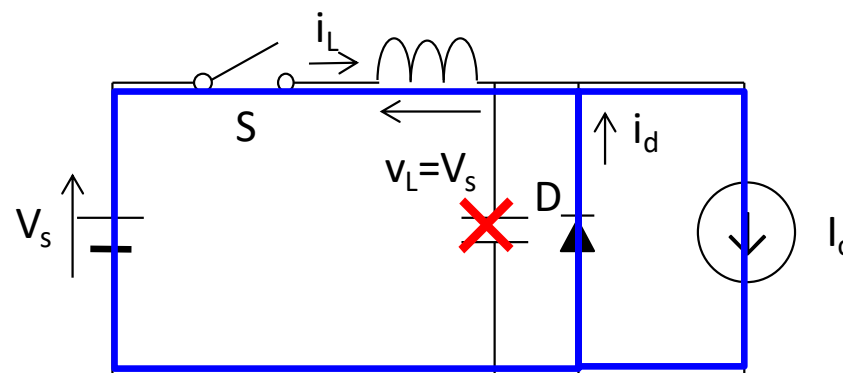
- 初期値: $i_L(0) = 0$

- 印加電圧: V_s

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

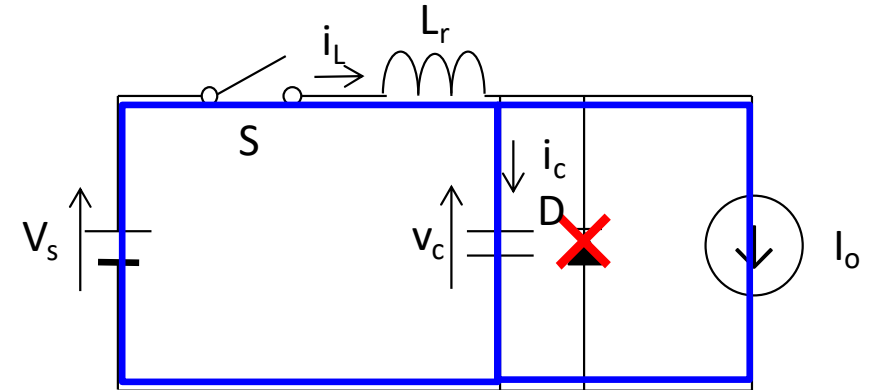
- $$i_L(t_1) = \frac{V_s t_1}{L_r} = I_o$$

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



ZCS-共振型コンバータ:回路解析

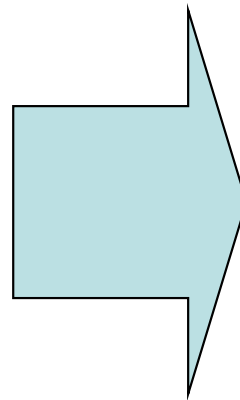
- 動作モード② ($t_1 < t \leq t_2$)
 - 初期値 $v_c(t=t_1)=0$



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

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

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



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

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

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

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

$$C_r sV_c = I_C$$

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

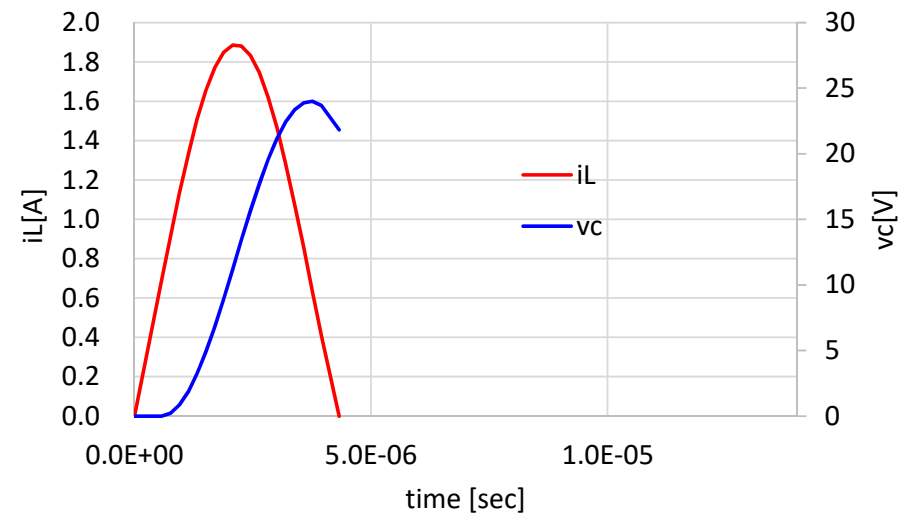
- 動作モード②($t_1 < t \leq t_2$)
 - t_2 を求める

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

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

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

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



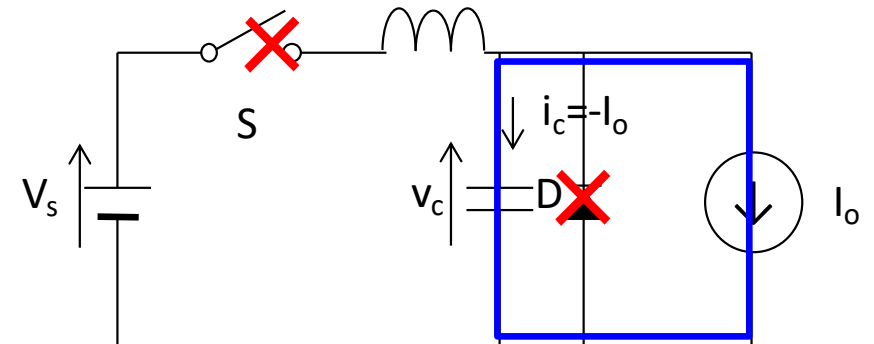
ZCS-共振型コンバータ:回路解析

- 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

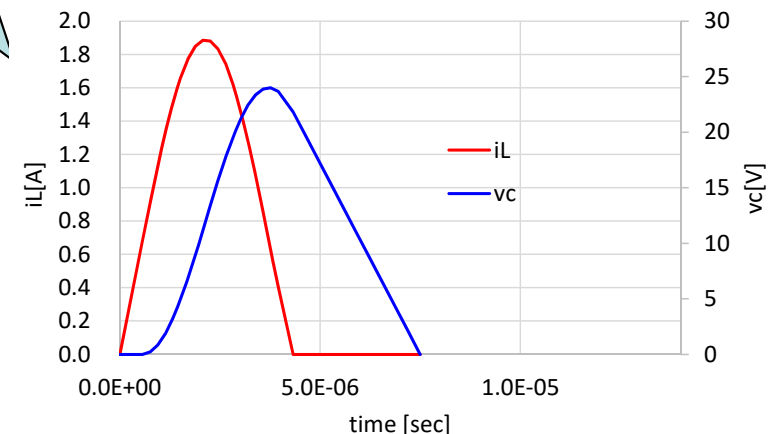
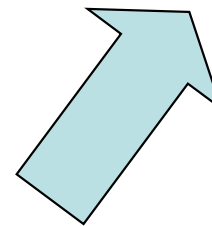
$$\begin{aligned}
 v_c(t) &= \frac{1}{C_r} \int_{t_2}^t i_c dt + v_c(t_2) \\
 &= \frac{1}{C_r} \int_{t_2}^t -I_o dt + v_c(t_2) \\
 &= -\frac{I_o}{C_r} (t - t_2) + v_c(t_2)
 \end{aligned}$$

- 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

$$i_L = 0$$

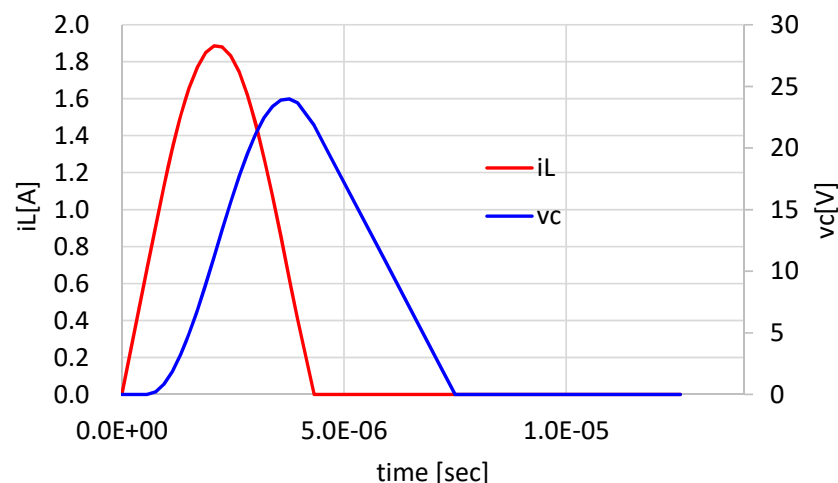
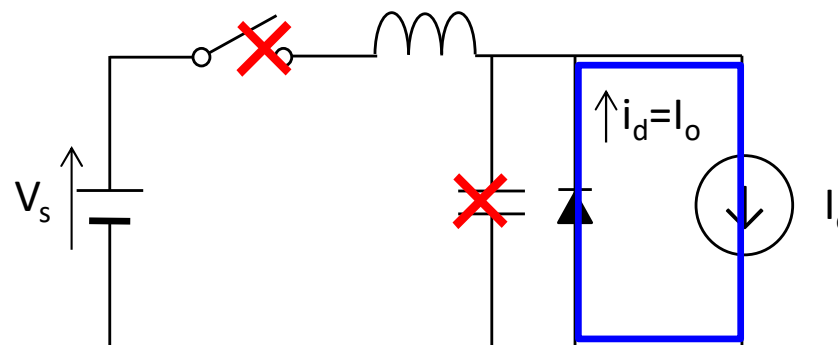
- コンデンサ

- 電圧はダイオード導通中

$$v_c = 0$$

- 電流は, 出力電圧と同じ

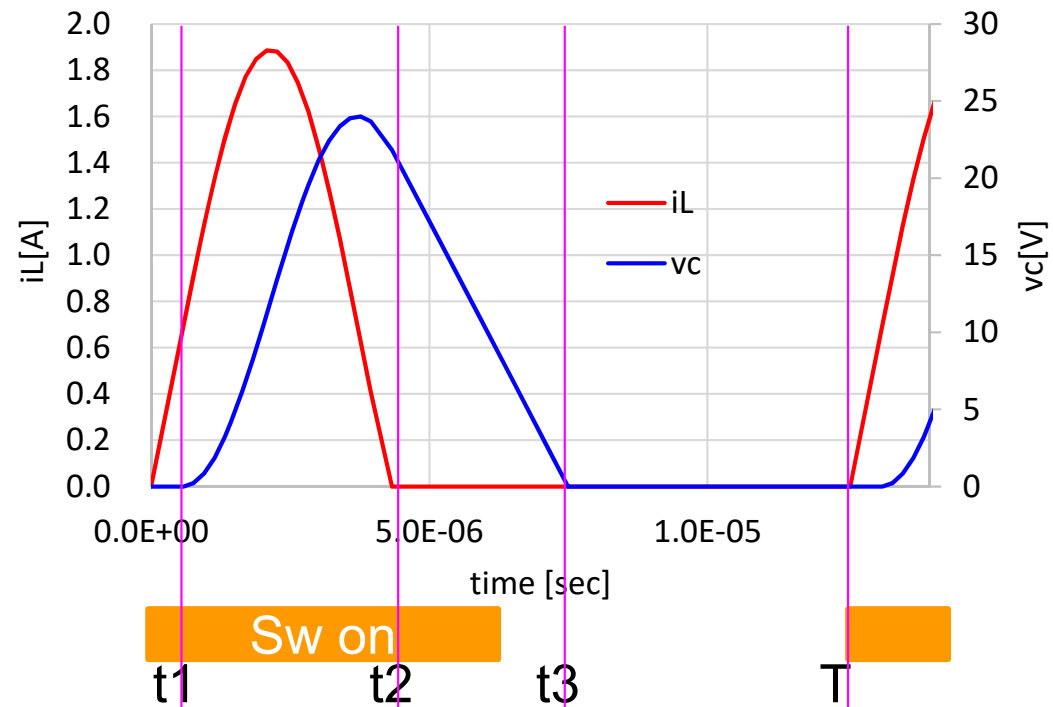
- $i_c = 0$



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

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

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

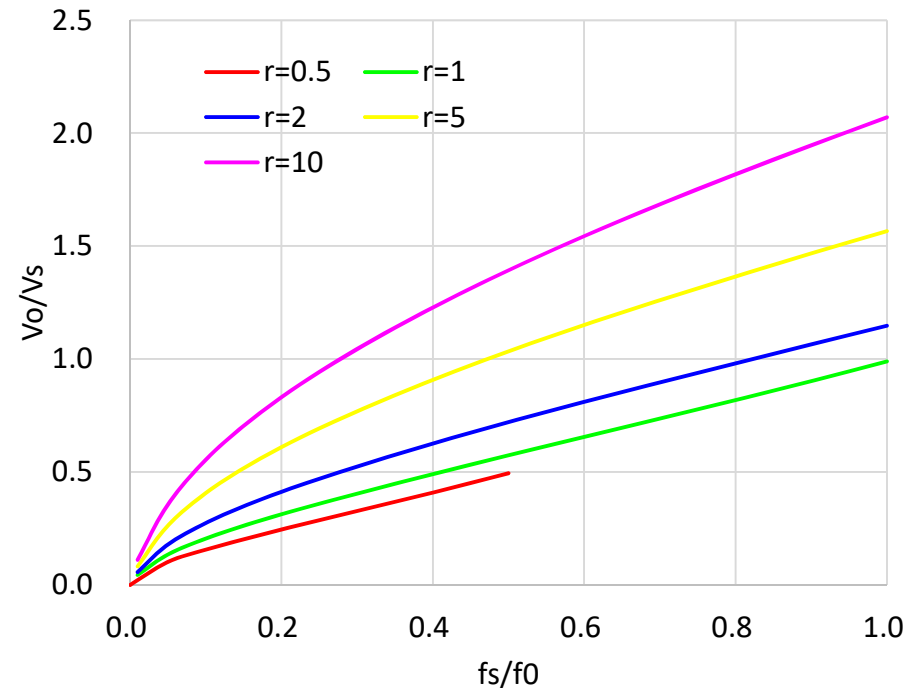
- $$t_2 = t_1 + \frac{1}{\omega_0} \left[\sin^{-1} \left(\frac{I_o Z_o}{V_s} \right) + \pi \right]$$

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

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

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

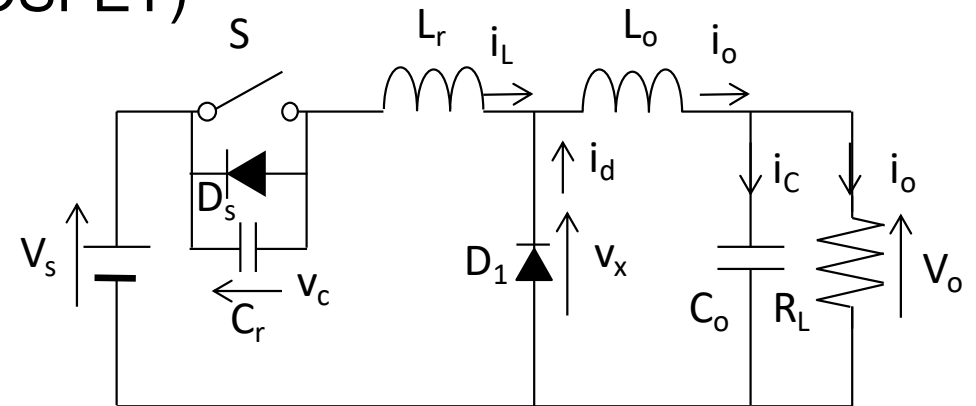
- $$r = \frac{R_L}{Z_o}$$



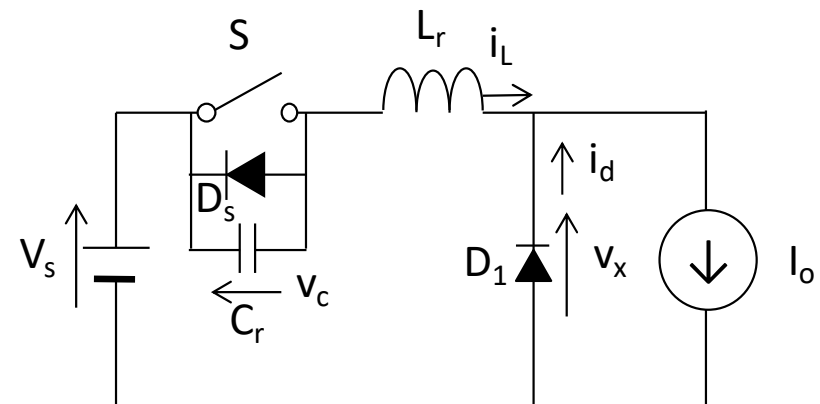
バックコンバータと異なり, 周波数で出力電圧制御する
負荷の大きさで入出力比が変化する

ZVS-共振型コンバータ

- 回路の基本構成はBuckコンバータ
- 入力側直列LC共振回路
 - インダクタ L_r
 - コンデンサ C_r
 - スイッチの逆並列ダイオード(MOSFET)
- 出力インダクタンス L_o 大
 - 出力電流 i_o の変化小
 - $i_o \div$ 一定
 - $L_o \gg L_r$
- 動作モード

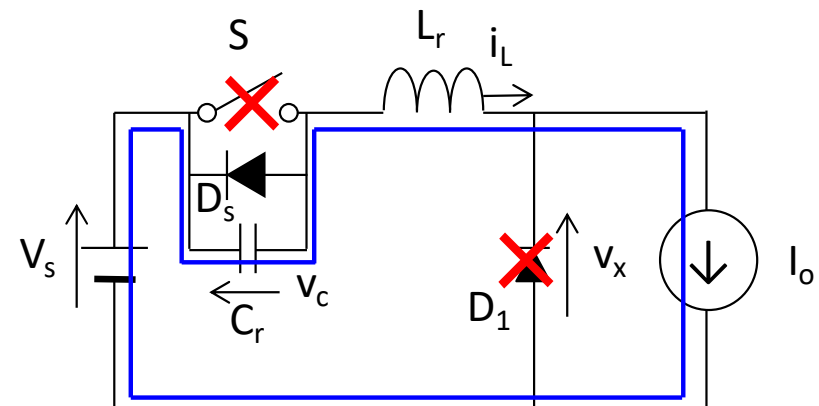


- 4種類(周期定常状態)
 - S-OFF D1-OFF DS-OFF
 - S-OFF D1-ON DS-OFF
 - S-ON D1-ON DS-ON
 - S-ON D1-ON DS-OFF



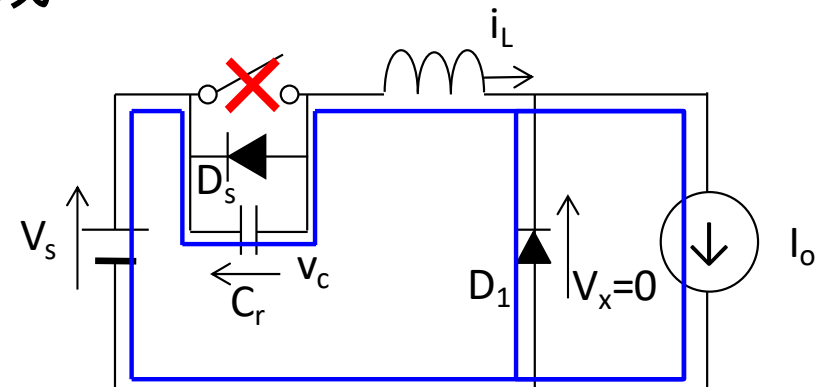
ZVS-共振型コンバータ

- 動作モード①($0 \leq t \leq t_1$)
 - 直前($t < 0$)
 - スイッチON
 - $v_c = 0$ (C_r の電圧)
 - D_1, D_s OFF
 - $t = 0$ でスイッチOFF
 - 共振回路の L_r
 - 電流源 $i_L = I_o$ を維持
 - 共振回路の C_r
 - $i_L = I_o$ で C_r を充電
 - $v_c(t_1) = V_s$



ZVS-共振型コンバータ

- 動作モード②($t_1 < t \leq t_2$)
 - S-OFF, D_s -OFF
 - $T=t_1$ で $v_c=V_s$
 - D_1 がターンオン
 - $V_x=0$
 - V_s, C_r, L_r が直列共振回路形成
 - $I_o - i_L$ が D_1 を流れる



ZVS-共振型コンバータ

- 動作モード③ ($t_2 < t \leq t_3$)

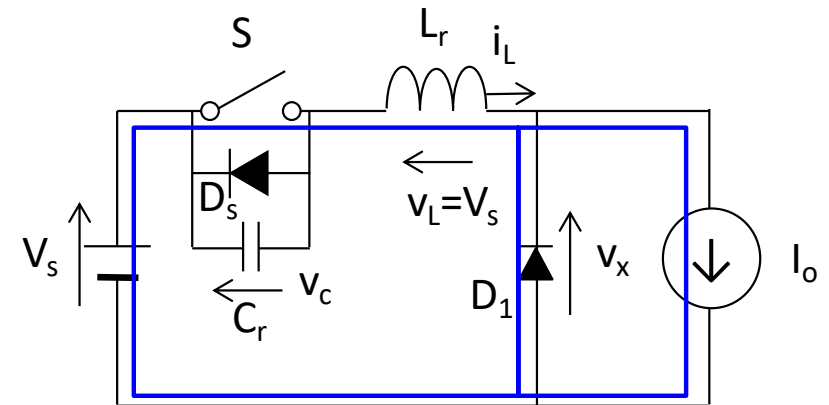
- C_r, L_r の共振で $v_c = 0$ ($t = t_2$)

- D_s ターンオン

- $i_L < 0$ を流す

- V_s が i_L の逆電流を減少させる

- $V_c = 0$ の状態で S のゲートターンオン ($t_2 < t \leq t_3$) **ZVS**

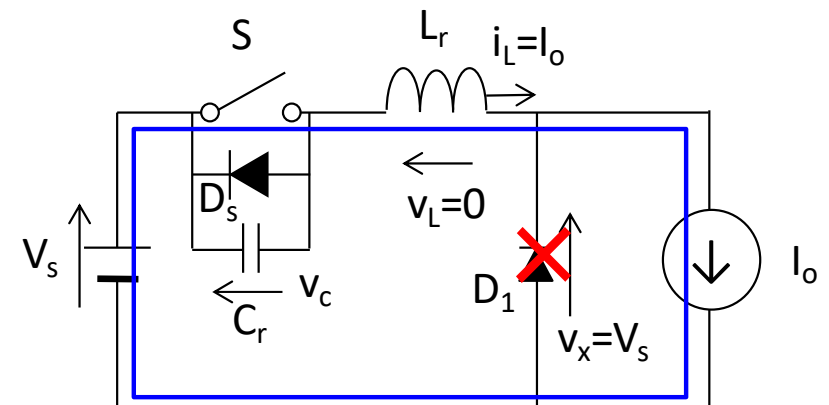


- 動作モード④ ($t_3 < t \leq T$)

- $i_L = i_o$ となる ($t = t_3$)

- D_1 がターンオフ

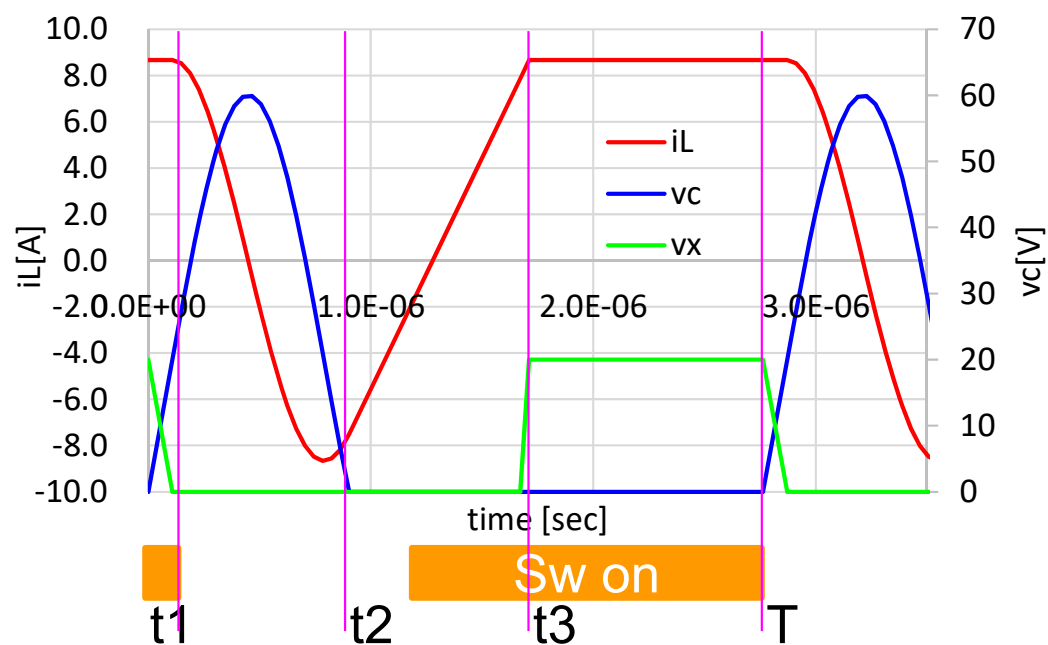
- L_r は定電流 i_o を維持



ZVS-共振型コンバータ:回路解析

• 動作区間

- $0 \leq t \leq t_1$ スイッチOFF D1 OFF DS OFF
- $t_1 < t \leq t_2$ スイッチOFF D1 ON DS OFF
- $t_2 < t \leq t_3$ スイッチターンオン D1 ON DS ON
- $t_3 < t \leq T$ スイッチON D1 ON DS OFF



ZVS-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*

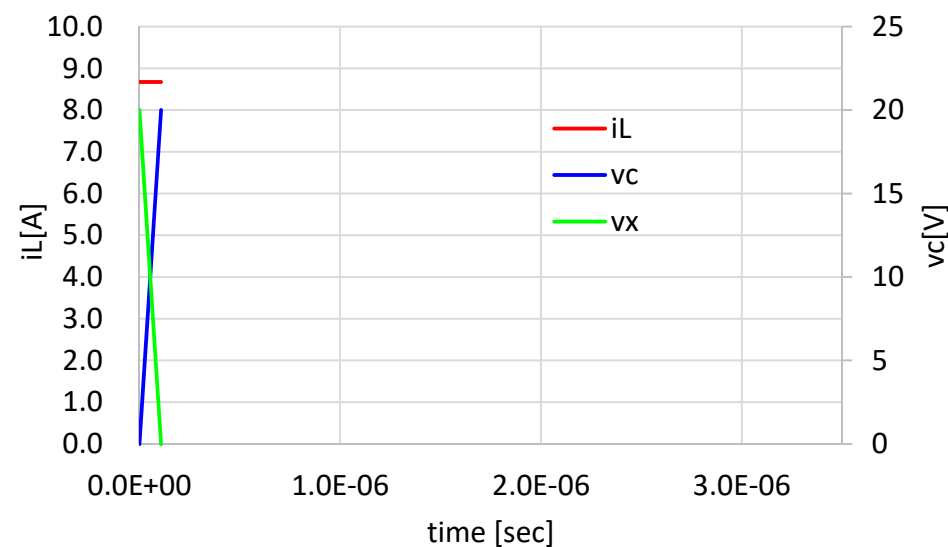
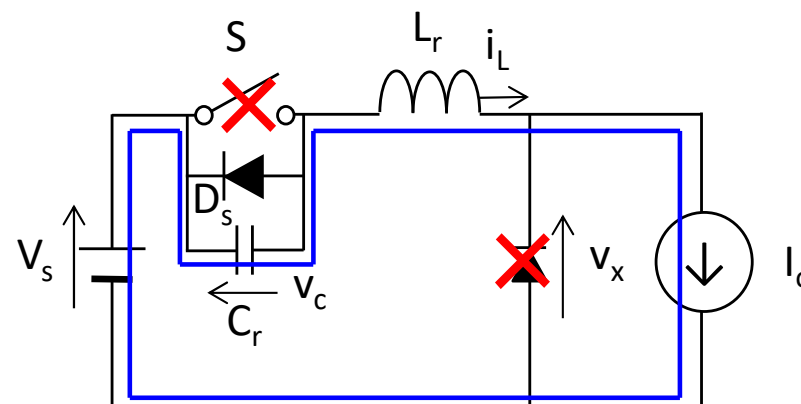
- 初期値 $i_L = I_o, v_c = 0$
- 電源電圧 V_s
- 条件 $i_c = i_L = I_o$

- $v_c = V_s$ となる時点が t_1

$$v_c(t) = \frac{1}{C_r} \int_0^t I_o dt = \frac{I_o t}{C_r}$$

$$\frac{I_o t_1}{C_r} = V_s$$

$$t_1 = \frac{C_r}{I_o} V_s$$

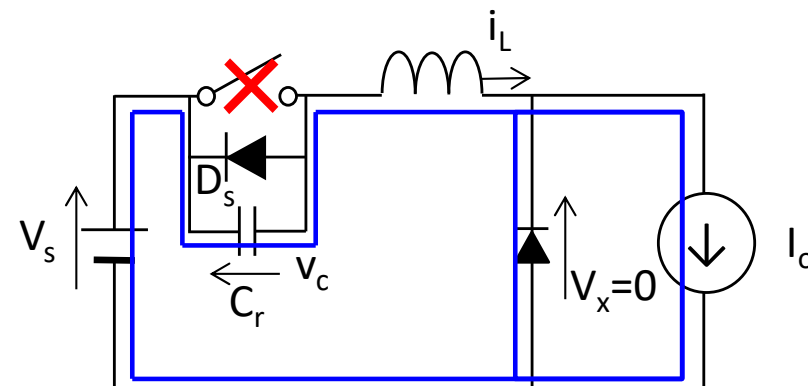
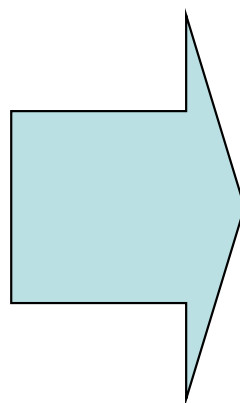


ZVS-共振型コンバータ:回路解析

- 動作モード② ($t_1 < t \leq t_2$)
 - 初期値 $v_{c0} = V_s$, $i_{L0} = I_o$

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

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



$$\begin{aligned} V_c &= \frac{V_s}{s} - L_r (sI_L - I_{L0}) \\ &= \frac{V_s}{s} - L_r (sI_L - I_o) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_r (sV_c - V_{c0}) &= \\ C_r (sV_c - V_s) &= I_L \end{aligned}$$

ZVS-共振型コンバータ:回路解析

- 動作モード②($t_1 < t \leq t_2$)

$$I_L = C_r (sV_c - V_s)$$

$$= C_r \left(s \left[\frac{V_s}{s} - L_r (sI_L - I_o) \right] - V_s \right)$$

$$= -sL_r C_r (sI_L - I_o)$$

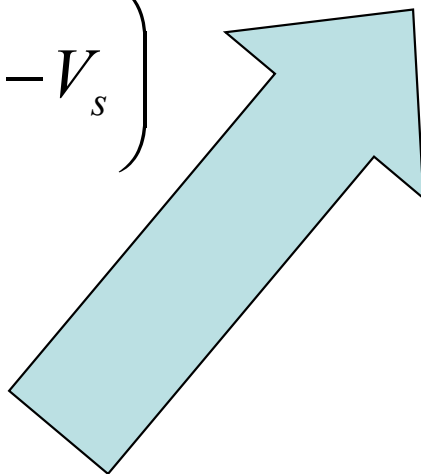


$$I_L (1 + s^2 L_r C_r) = sL_r C_r I_o$$

$$I_L = \frac{sL_r C_r I_o}{1 + s^2 L_r C_r}$$

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

$$i_L(t) = I_o \cos \sqrt{\frac{1}{L_r C_r}} t$$



ZVS-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

- 時間軸を t_1 に合わせて

$$i_L(t) = I_o \cos \sqrt{\frac{1}{L_r C_r}} (t - t_1)$$

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

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

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

ZVS-共振型コンバータ:回路解析

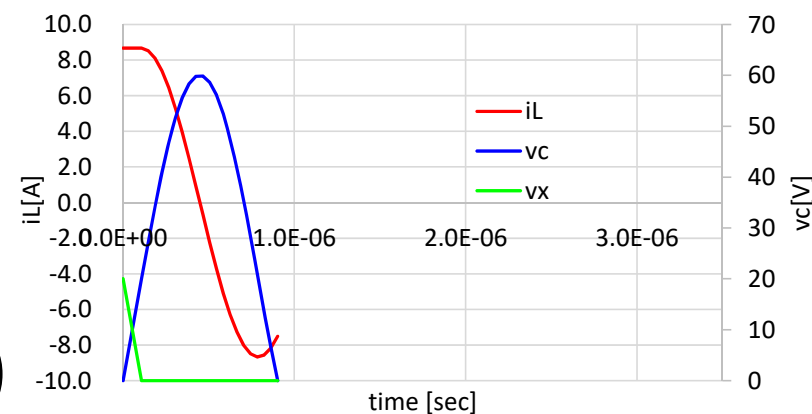
- 動作モード②($t_1 < t \leq t_2$)

- t_2 を求める($v_c=0$)

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

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

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



ZVS-共振型コンバータ:回路解析

動作モード③ ($t_2 < t \leq t_3$)

- リアクトル L_r が電源電圧 V_s で充電

$$i_L(t) = \frac{1}{L_r} \int_{t_2}^t V_s dt + i_L(t_2)$$

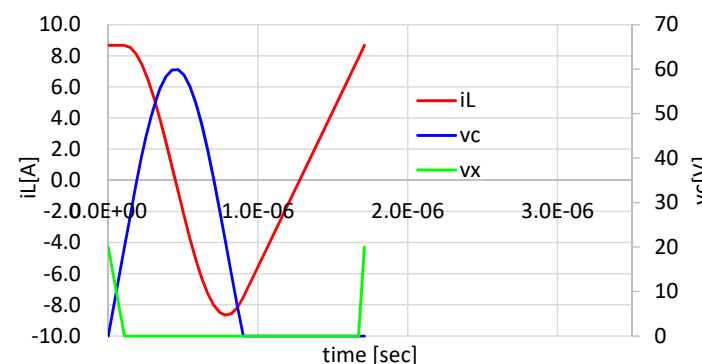
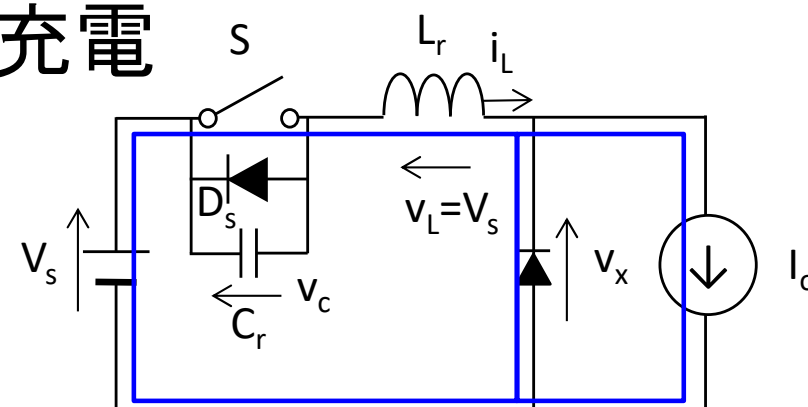
$$= \frac{1}{L_r} V_s (t - t_2) + I_o \cos \sqrt{\frac{1}{L_r C_r}} (t_2 - t_1)$$

- t_3 でリアクトル電流が I_o

$$i_L(t_3) = \frac{1}{L_r} V_s (t_3 - t_2) + I_o \cos \sqrt{\frac{1}{L_r C_r}} (t_2 - t_1) = I_o$$

$$\frac{1}{L_r} V_s (t_3 - t_2) = -I_o \cos \sqrt{\frac{1}{L_r C_r}} (t_2 - t_1) + I_o$$

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



ZVS-共振型コンバータ:回路解析

- 動作モード④ ($t_3 < t \leq T$)

- インダクタ電流

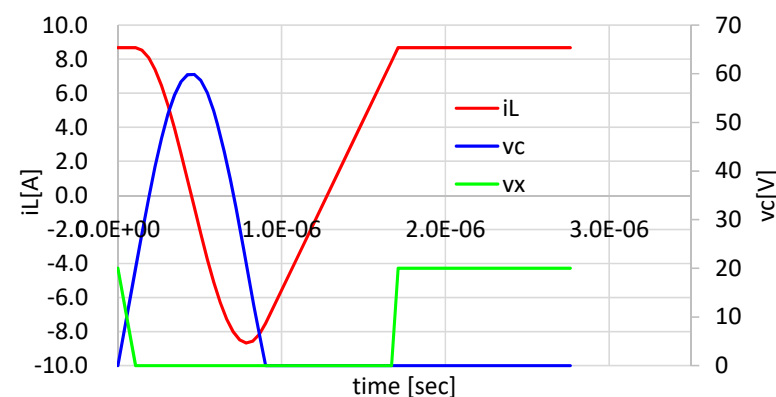
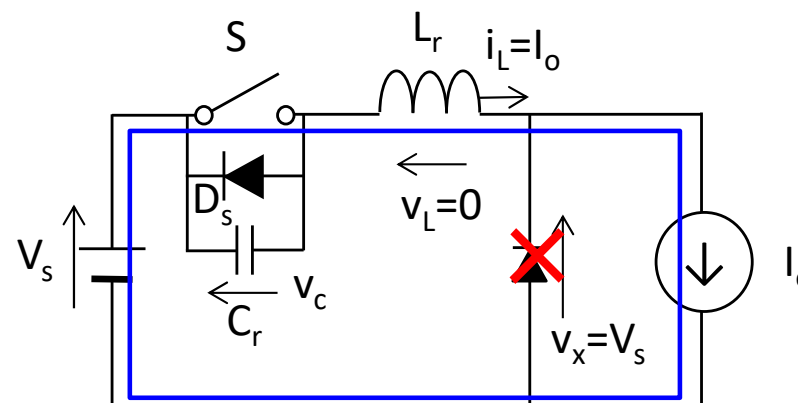
- スイッチON

$$i_L = I_o$$

- インダクタ電圧

- 電流が一定値のため

$$v_L = 0$$



ZVS-共振型コンバータ

- 出力電圧

- 環流ダイオードD1の印加電圧 v_x

- $0 \leq t \leq t_1$ $v_x(t) = V_s - \frac{I_o t}{C_r} = V_s \left[1 - \frac{t}{t_1} \right]$

- $t_1 \leq t < t_2$ $v_x(t) = 0$

- $t_2 \leq t < t_3$ $v_x(t) = 0$

- $t_3 \leq t < T$ $v_x(t) = V_s$

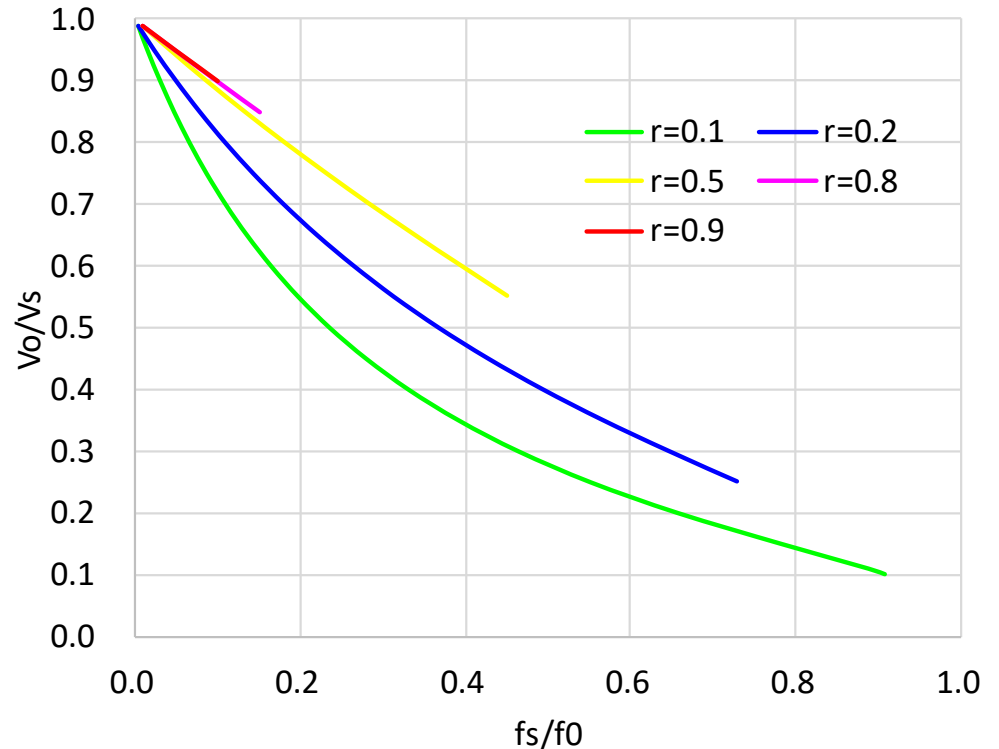
$$V_o = \frac{1}{T} \int_0^T v_x dt = \frac{1}{T} \left[\int_0^{t_1} V_s \left(1 - \frac{t}{t_1} \right) dt + \int_{t_3}^T V_s dt \right] = \frac{V_s}{T} \left\{ \left[t - \frac{t^2}{2t_1} \right]_0^{t_1} + [t]_{t_3}^T \right\}$$

$$= \frac{V_s}{T} \left\{ \frac{t_1}{2} + T - t_3 \right\} \quad \text{パワエレ-12}$$

ZVS-共振型コンバータ

- 昇圧比

- $$\frac{V_o}{V_s} = 1 - f_s \left[-\frac{t_1}{2} + t_3 \right]$$
 - $$t_1 = \frac{I_o C_r}{V_s}$$
 - $$t_2 = t_1 + \frac{1}{\omega_0} \left[\sin^{-1} \left(\frac{V_s}{I_o Z_0} \right) + \pi \right]$$
 - $$t_3 = t_2 + \frac{L_r I_o [1 - \cos \omega_0 (t_2 - t_1)]}{V_s}$$
 - $$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}}$$
 - $$Z_0 = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}}$$
 - $$r = \frac{R_L}{Z_0}$$



- 昇圧比

- $$\frac{V_o}{V_s} = 1 - f_s \left[-\frac{t_1}{2} + t_3 \right]$$

- 出力電圧

- Loの平均電圧は0となる