

パワーエレクトロニクス
第拾参回 共振型コンバータ

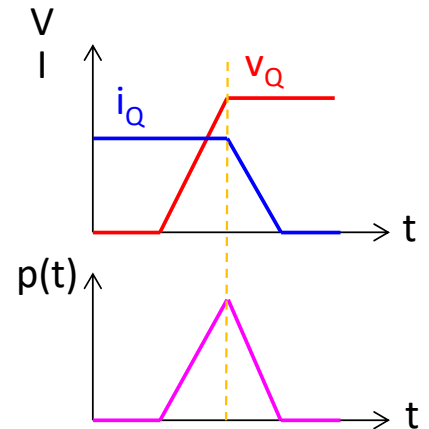
平成31年7月10日

授業の予定

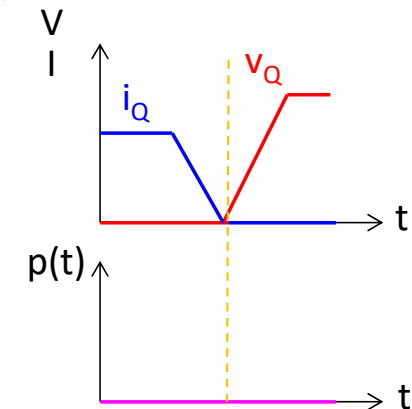
- パワーエレクトロニクスに必要な基礎知識
- パワー半導体デバイス
- 整流回路
- 他励式インバータ
- 交流電力制御とサイクロコンバータ
- 直流チョッパ
- DC-DCコンバータと共振形コンバータ
- 自励式インバータ
- 演習

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

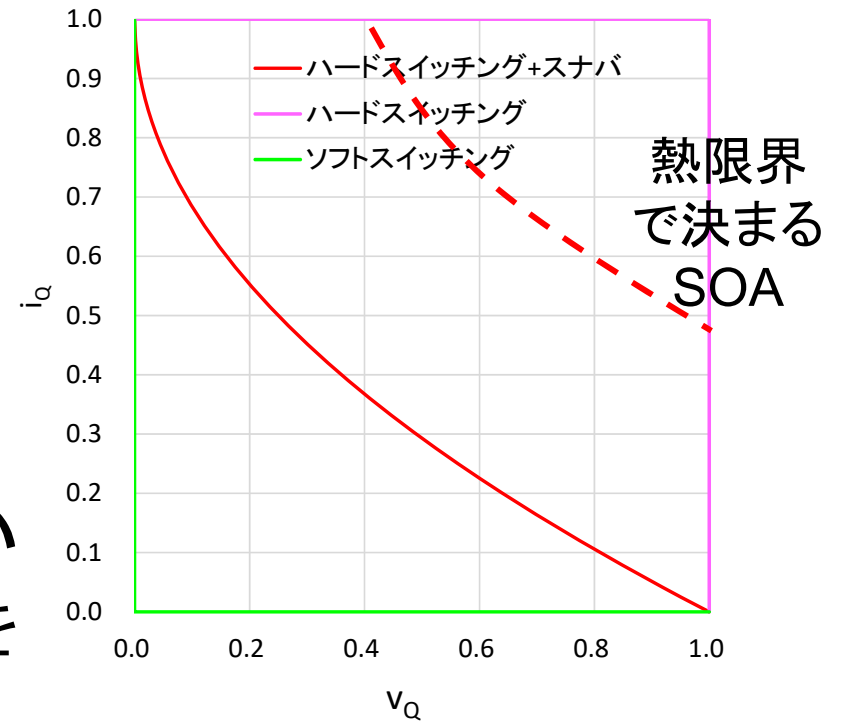


- ソフトスイッチング
 - スwitching動作時に電圧・電流積が生じない
 - ZVS:ターンオン時順方向印加電圧0
 - ZCS:ターンオフ時導通電流0



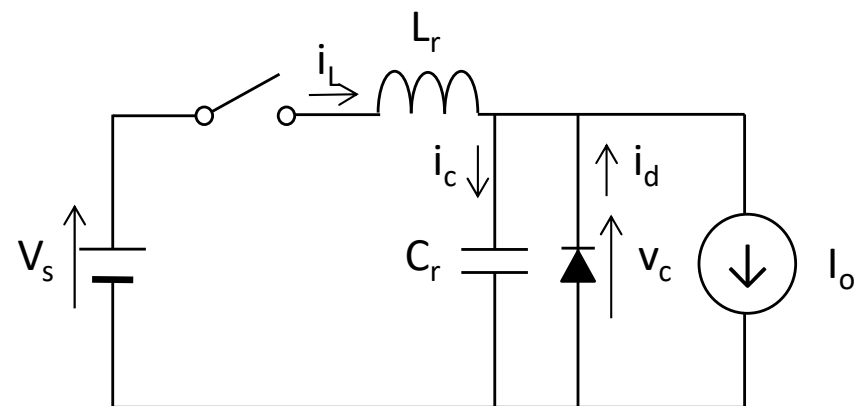
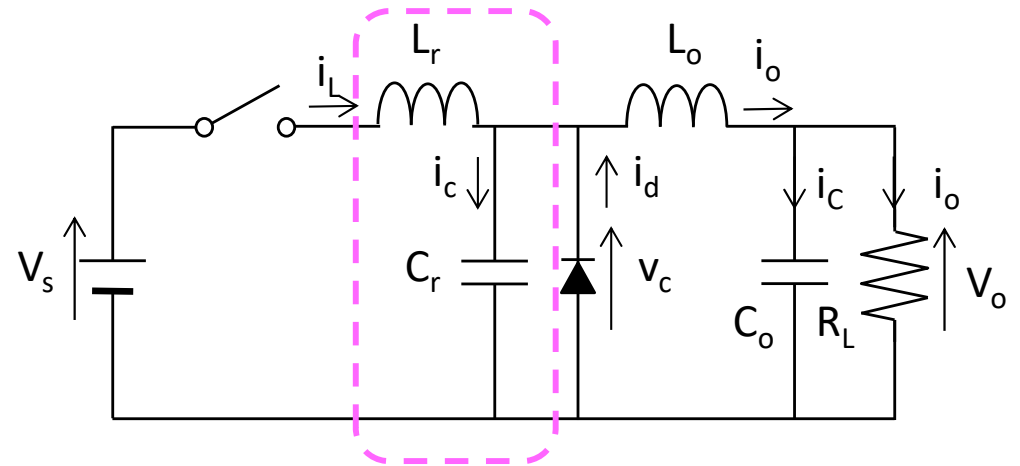
スイッチング動作とSOA

- 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



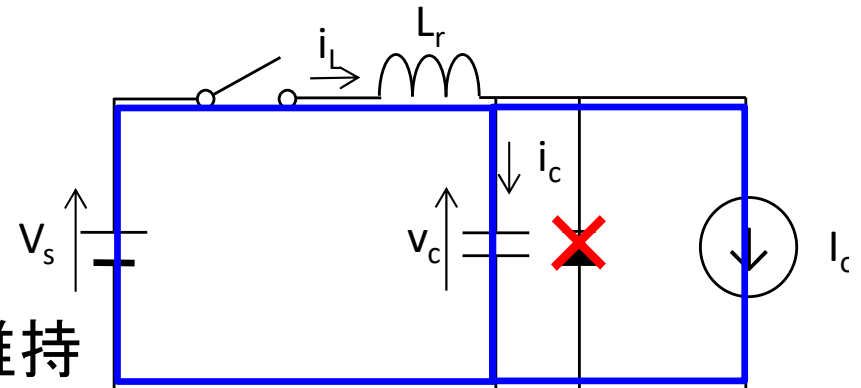
ZCS-共振型コンバータ

- 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
 - $i_o \approx \text{一定}$
 - $L_o \gg L_r$
- 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
 - 直前は負荷電流 I_o がダイオードを環流
 - $v_c=0$ (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
 - $i_L=I_o$ 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

- $i_L > I_o$

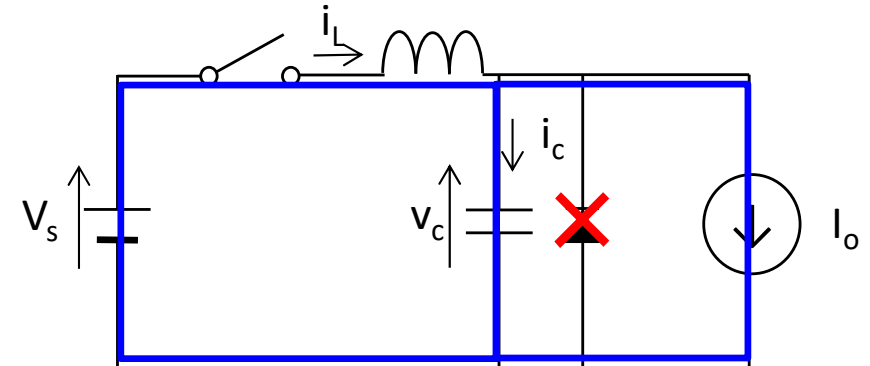
- C_r の電圧 v_c の上昇により i_L が減少

- $i_L = 0$ 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

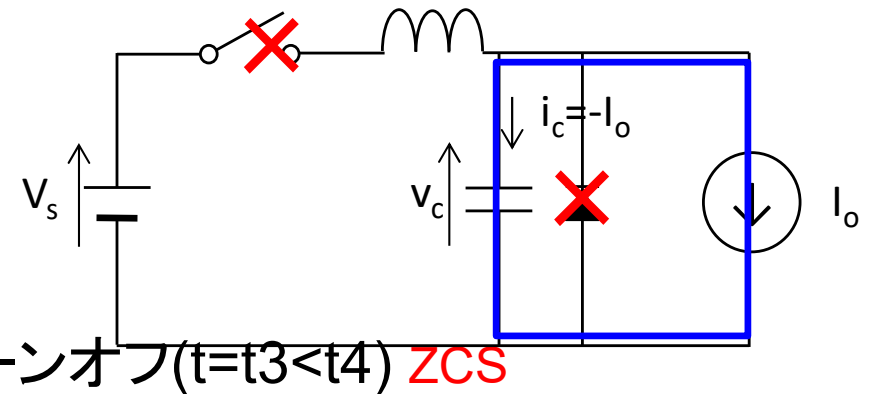
- コンデンサ C_r の電圧 v_c が、ダイオードを逆バイアス



ZCS-共振型コンバータ

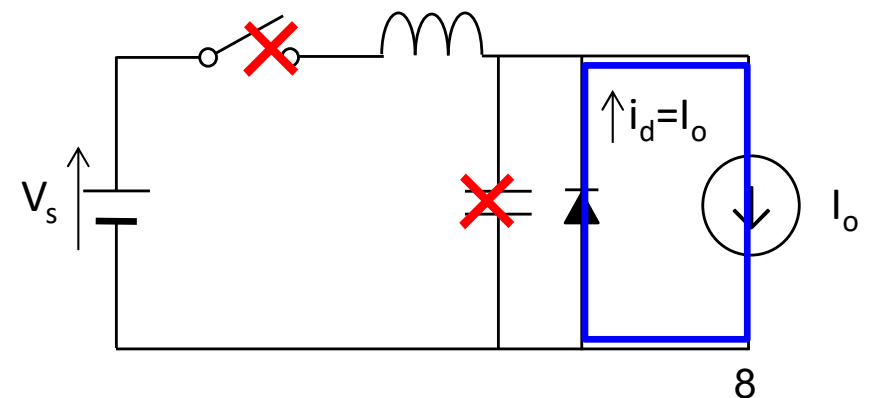
- 動作モード③ ($t_2 < t \leq t_4$)

- 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 ($t = t_3 < t_4$)
- 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

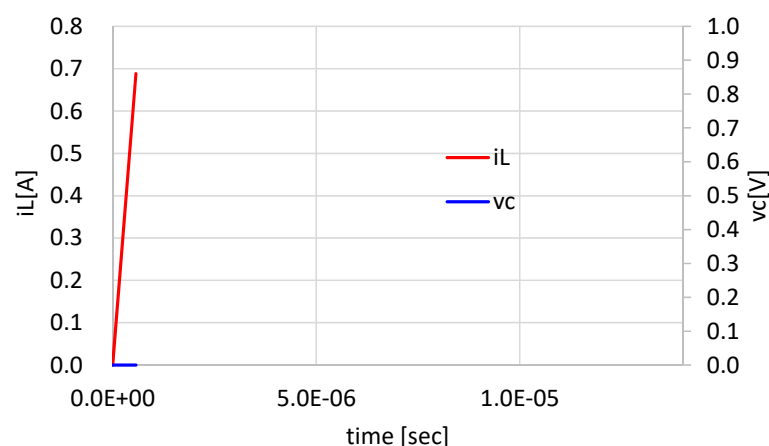
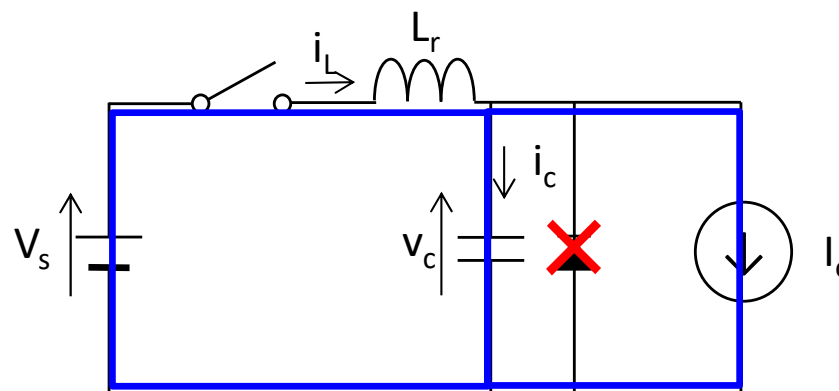
- 初期値: $i_L(0) = 0$

- 印加電圧: V_s

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

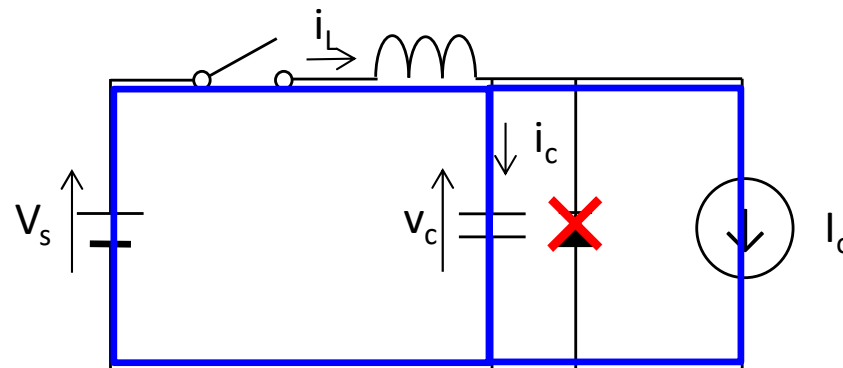
- $i_L(t_1) = \frac{V_s t_1}{L_r} = I_o$

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



ZCS-共振型コンバータ:回路解析

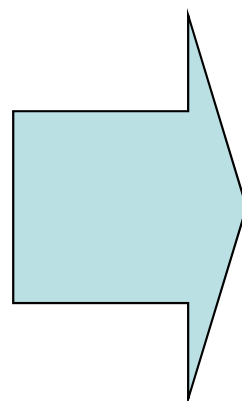
- 動作モード② ($t_1 < t \leq t_2$)
 - 初期値 $v_c(t=t_1)=0$



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

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

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



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

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

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

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

$$C_r sV_c = I_C$$

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

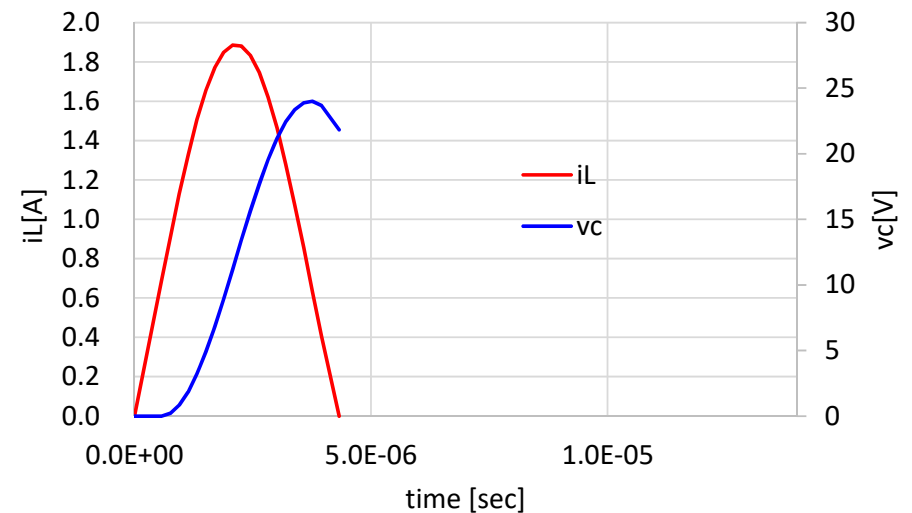
- 動作モード②($t_1 < t \leq t_2$)
 - t_2 を求める

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

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

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

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



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

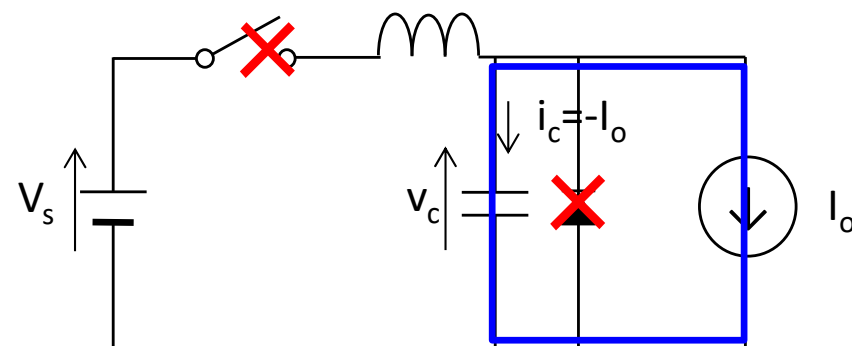
$$v_c(t) = \frac{1}{C_r} \int_{t_2}^t i_c dt + v_c(t_2)$$

$$= \frac{1}{C_r} \int_{t_2}^t -I_o dt + v_c(t_2)$$

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

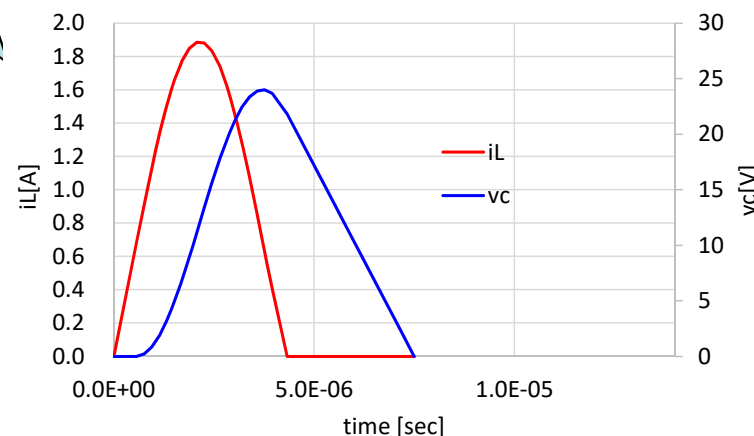
- T3でコンデンサの電圧が0

$$v_c(t_3) = 0$$



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

$$t_3 = t_2 + \frac{C_r}{I_o} v_c(t_2)$$



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

$$i_L = 0$$

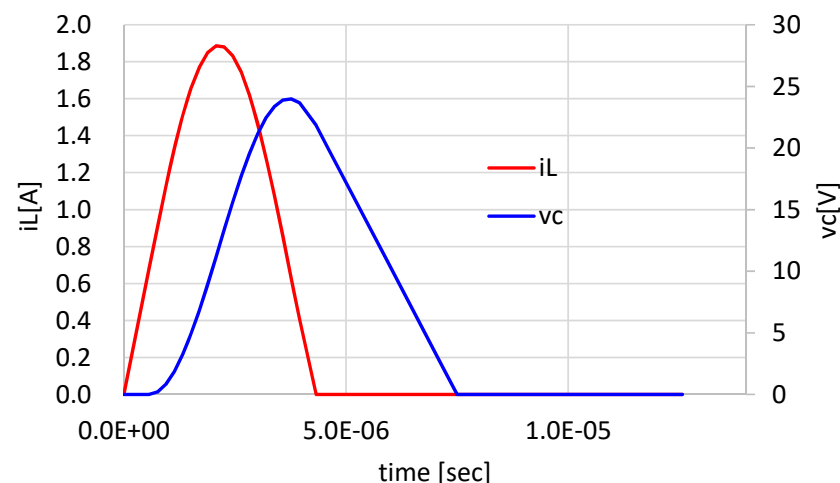
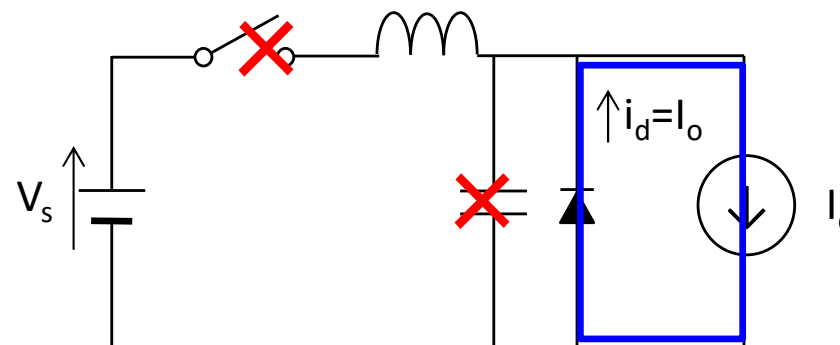
- コンデンサ

- 電圧はダイオード導通中

$$v_c = 0$$

- 電流は, 出力電圧と同じ

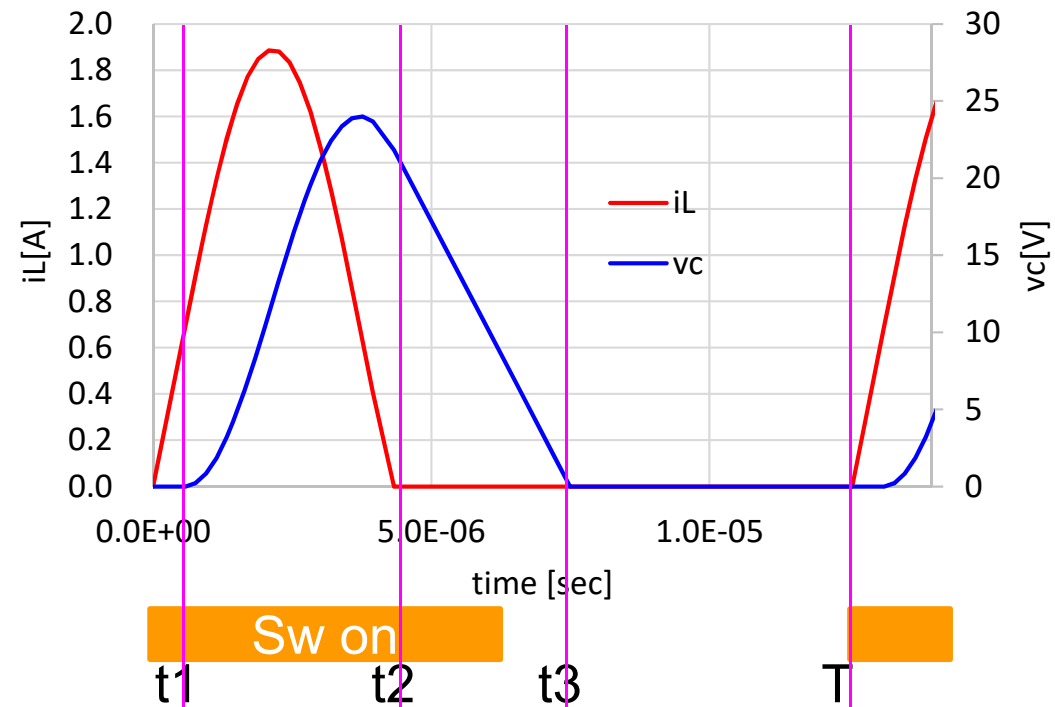
$$i_c = -I_o$$



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
- $t_1 < t \leq t_2$ スイッチ導通 ダイオードOFF
- $t_2 < t \leq t_3$ スイッチOFF 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

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

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

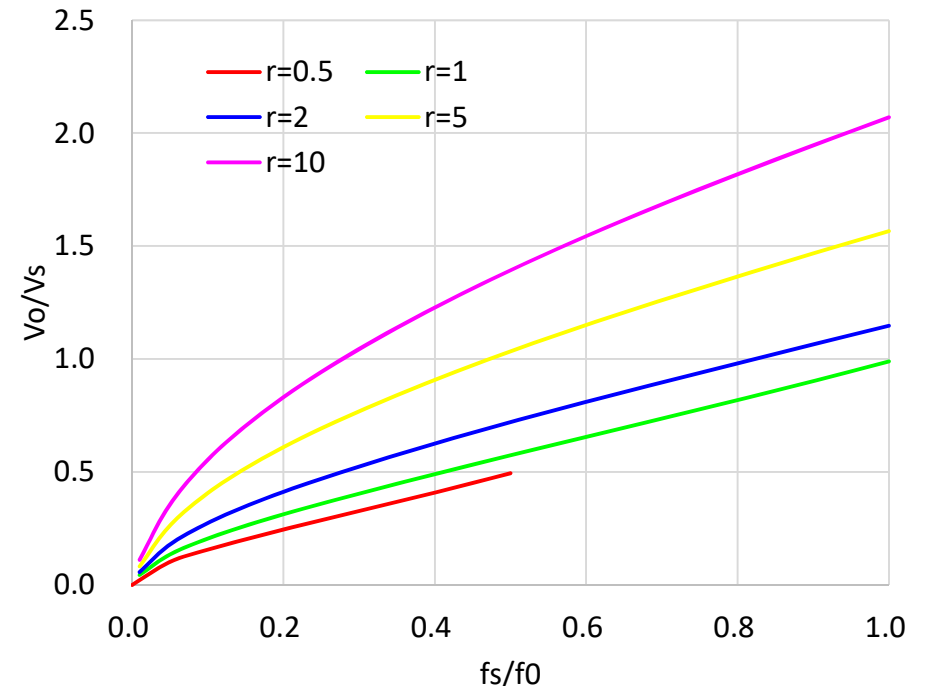
- $t_2 = t_1 + \frac{1}{\omega_0} \left[\sin^{-1} \left(\frac{I_o Z_o}{V_s} \right) + \pi \right]$

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

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

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

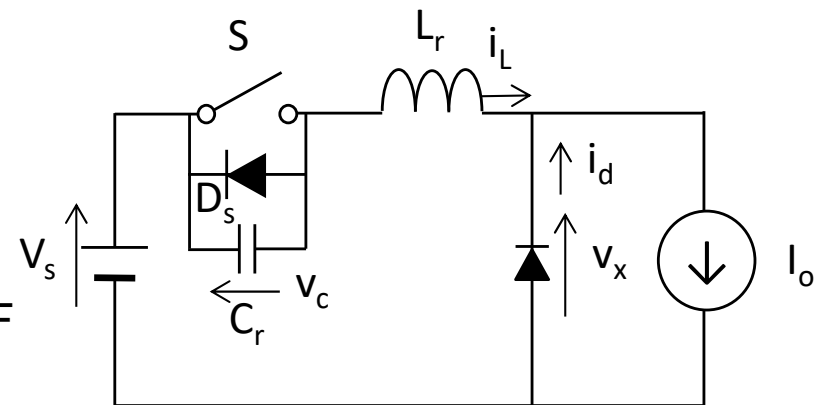
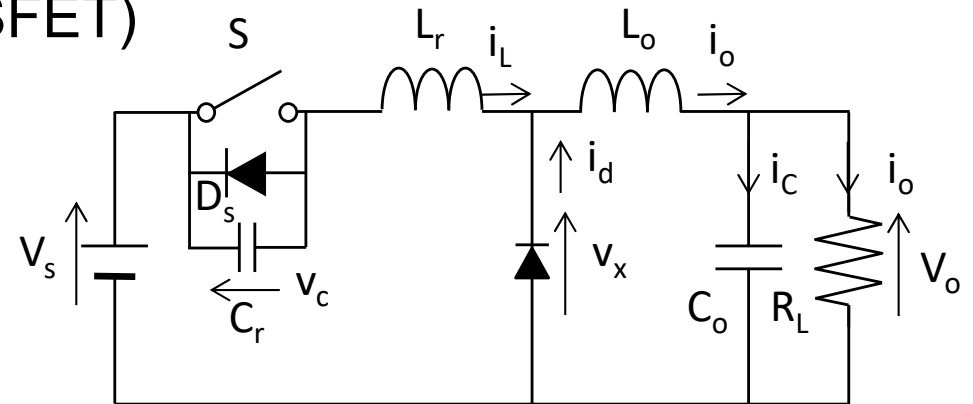
- $r = \frac{R_L}{Z_o}$



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

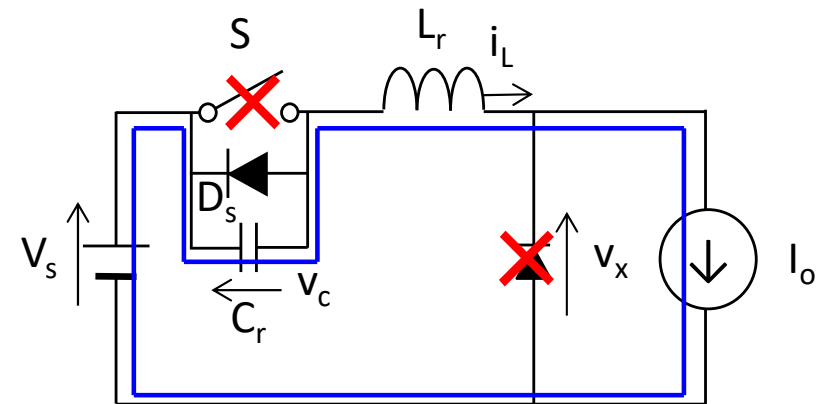
ZVS-共振型コンバータ

- 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

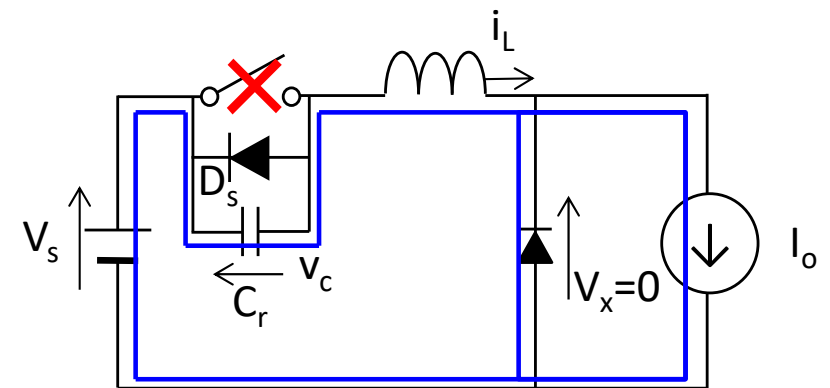
- 動作モード①($0 \leq t \leq t_1$)
 - 直前($t < 0$)
 - スイッチON
 - $v_c = 0$ (C_r の電圧)
 - D_1, D_s OFF
 - $t = 0$ でスイッチOFF
 - 共振回路の L_r
 - 電源電流 $i_L = I_o$ を維持
 - i_L が C_r を充電



ZVS-共振型コンバータ

- 動作モード②($t_1 < t \leq t_2$)

- S-OFF, Ds-OFF
- T= t_1 で $v_c = V_s$
 - D1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D1を流れる



ZVS-共振型コンバータ

- 動作モード③ ($t_2 < t \leq t_3$)

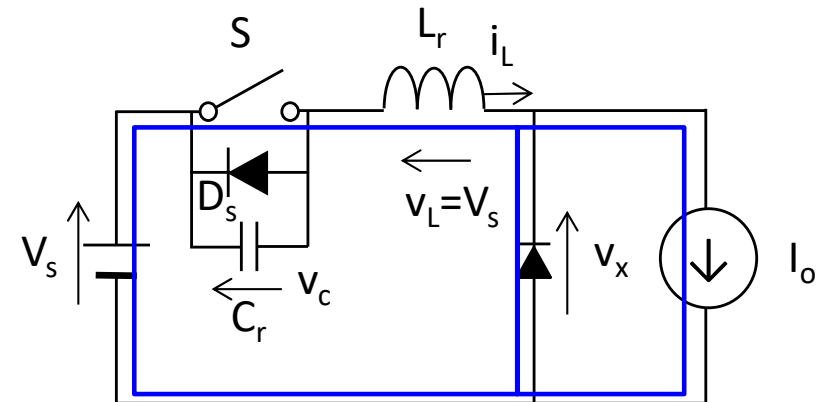
- C_r, L_r の共振で $v_c = 0$ ($t = t_2$)

- 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

- $V_c = 0$ の状態ですのゲートターンオン ($t < t_3$) **ZVS**

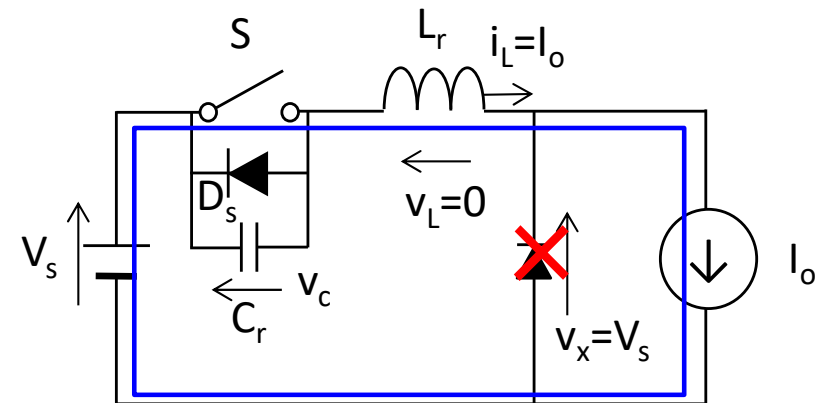


- 動作モード④ ($t_3 < t \leq T$)

- $i_L = i_o$ となる ($t = t_3$)

- D_1 がターンオフ

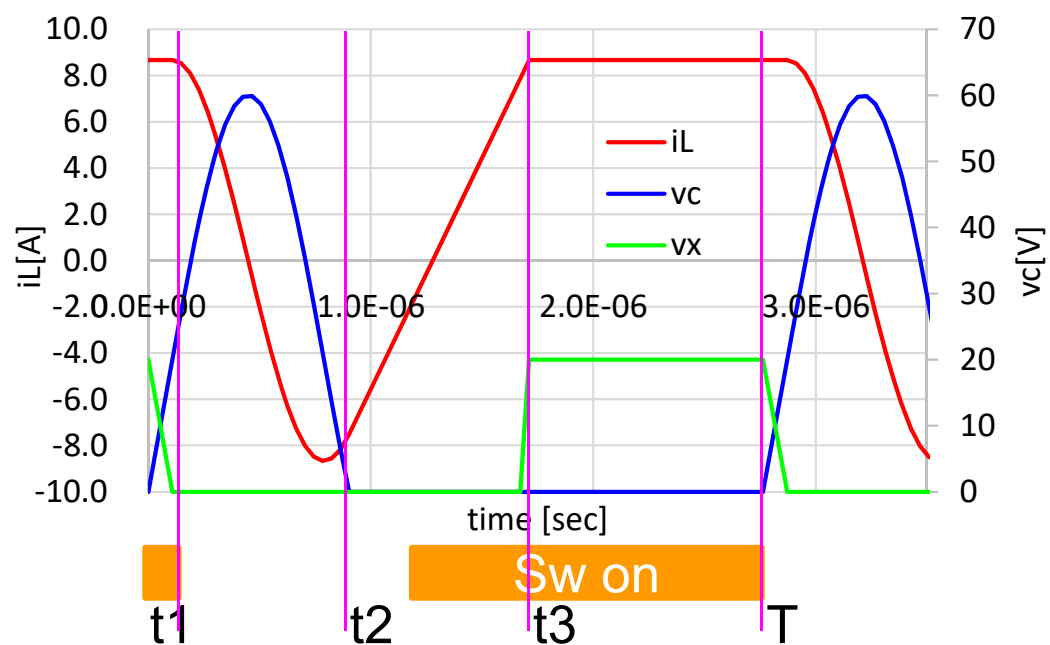
- L_r は定電流 i_o を維持



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
- $t_2 < t \leq t_3$ スイッチ導通 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*

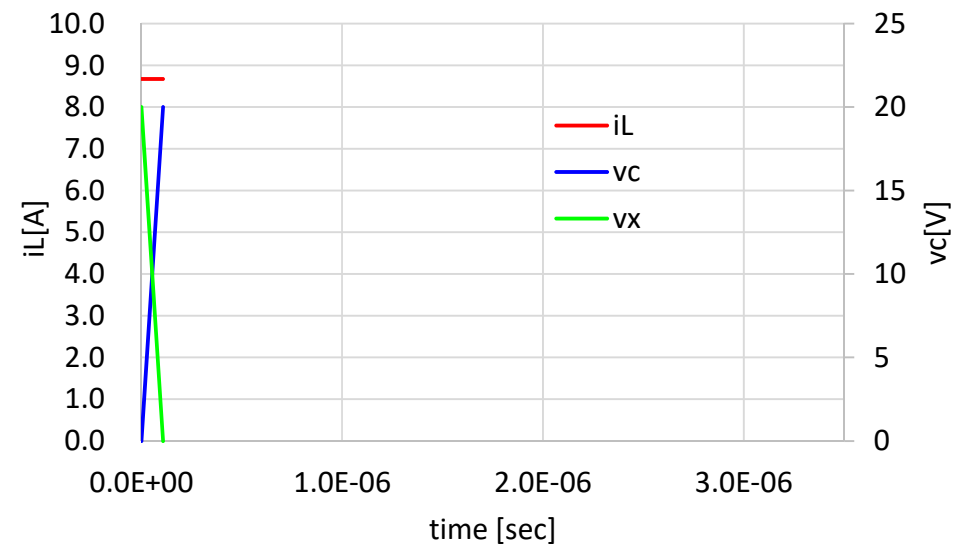
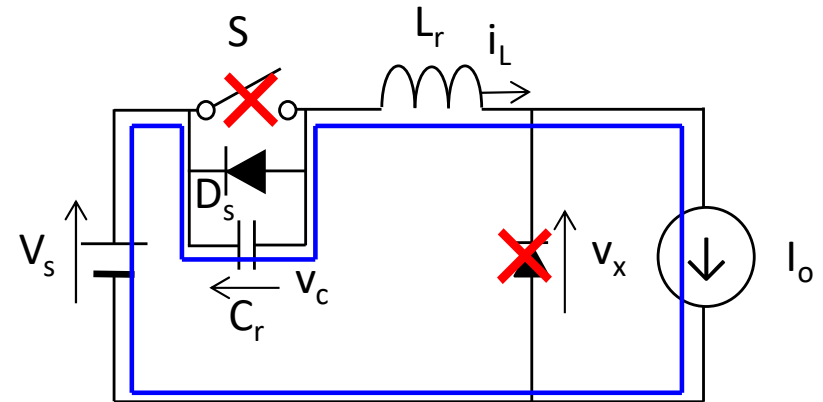
- 初期値 $i_L = I_o, v_c = 0$
- 電源電圧 V_s
- 条件 $i_c = i_L = I_o$

- $v_c = V_s$ となる時点が t_1

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

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

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

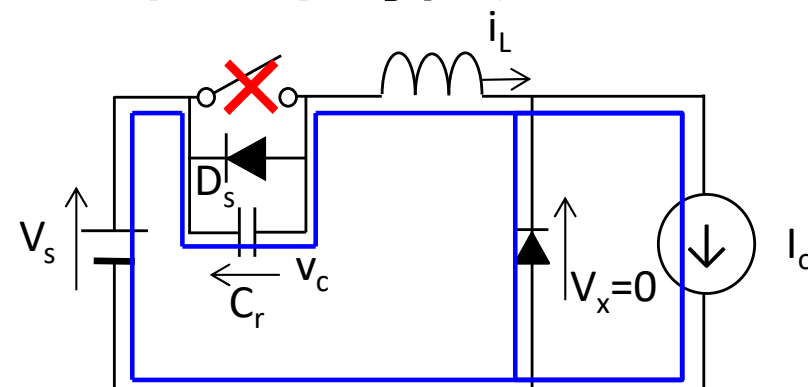
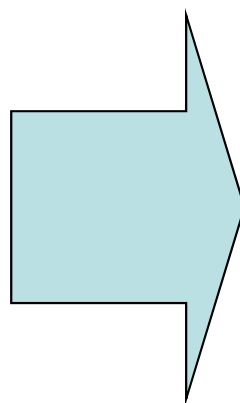


ZVS-共振型コンバータ:回路解析

- 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($t_1 < t \leq t_2$)

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

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

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

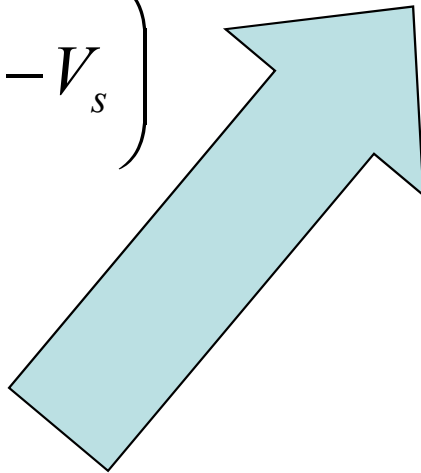


$$I_L (1 + s^2 L_r C_r) = sL_r C_r I_o$$

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

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

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



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

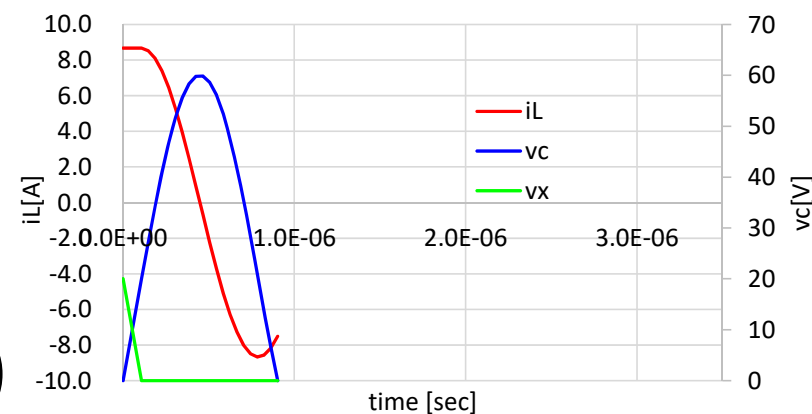
- 動作モード②($t_1 < t \leq t_2$)

- 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

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

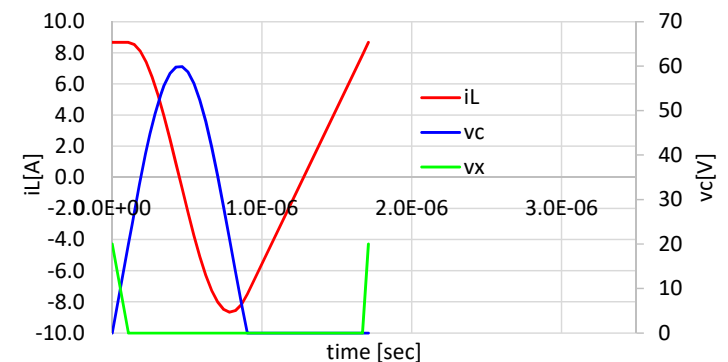
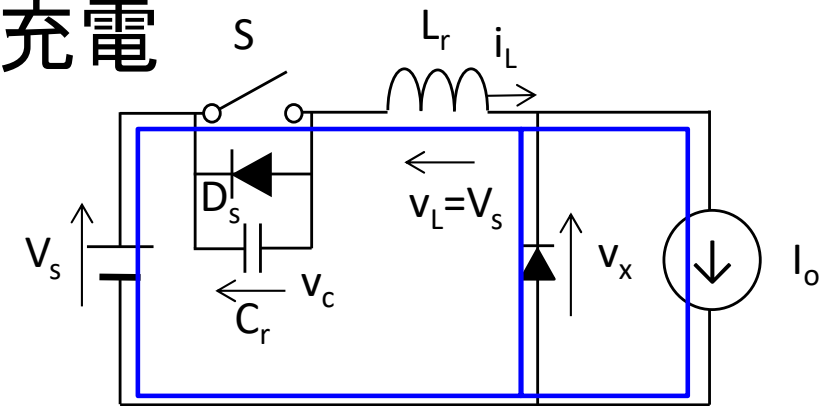
$$= \frac{1}{L_r} V_s (t - t_2) + I_o \cos \sqrt{\frac{1}{L_r C_r}} (t_2 - t_1)$$

- T3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

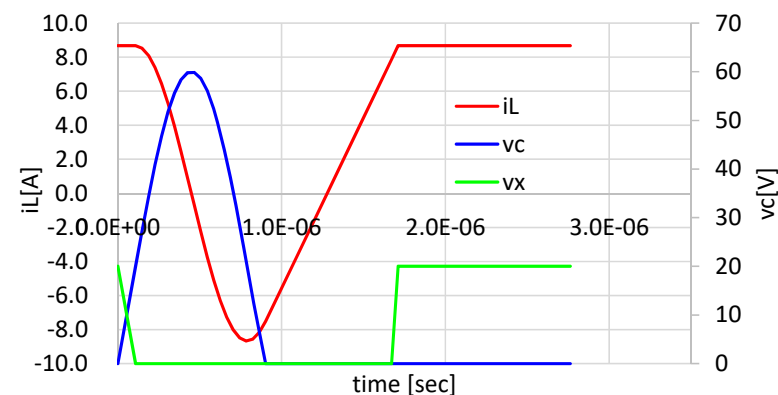
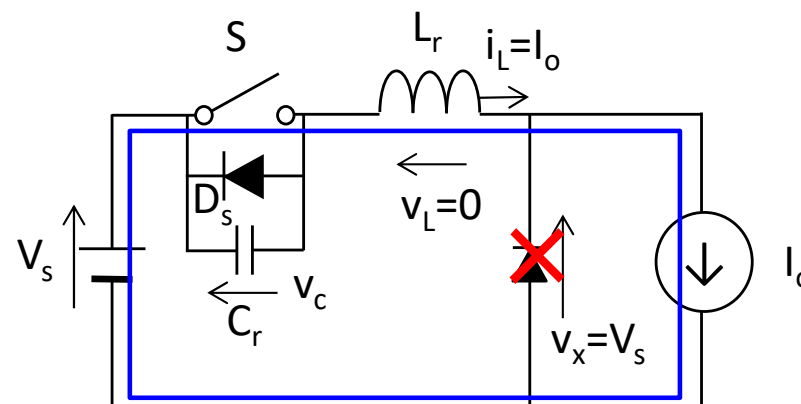
- スイッチON

$$i_L = I_o$$

- 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

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

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

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

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

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

$$2019/7/10 \quad = \frac{V_s}{T} \left\{ \frac{t_1}{2} + T - t_3 \right\} \quad \text{パワエレ-13}$$

ZVS-共振型コンバータ

- 昇圧比

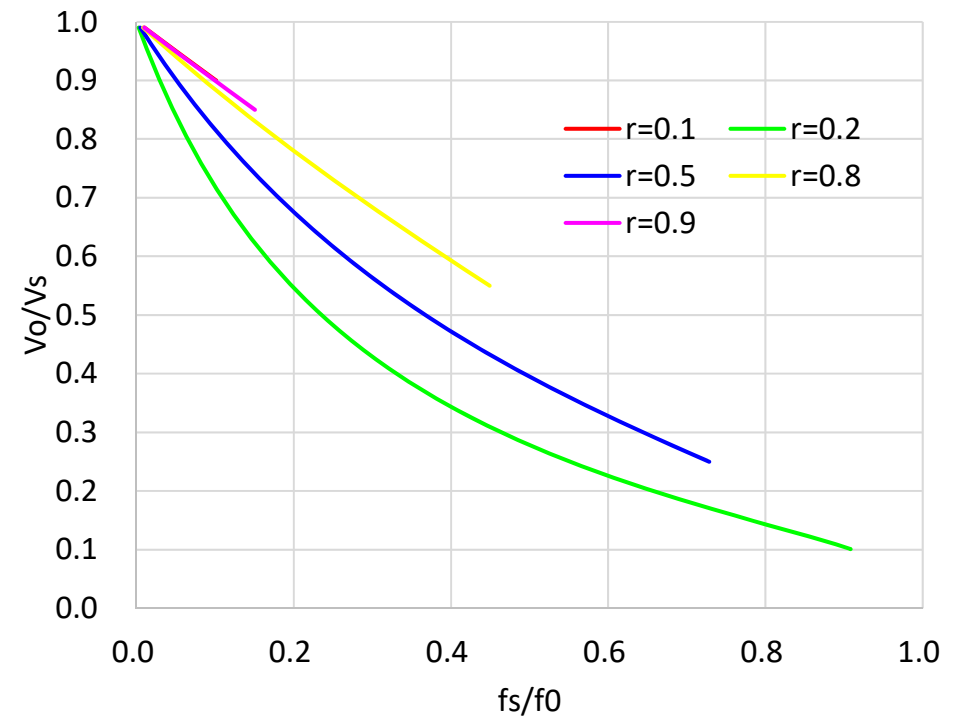
- $\frac{V_o}{V_s} = 1 - f_s \left[-\frac{t_1}{2} + t_3 \right]$
 - $t_1 = \frac{I_o C_r}{V_s}$
 - $t_2 = t_1 + \frac{1}{\omega_0} \left[\sin^{-1} \left(\frac{V_s}{I_o Z_o} \right) + \pi \right]$
 - $t_3 = t_2 + \frac{L_r I_o [1 - \cos \omega_0 (t_2 - t_1)]}{V_s}$
 - $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}}$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

- 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

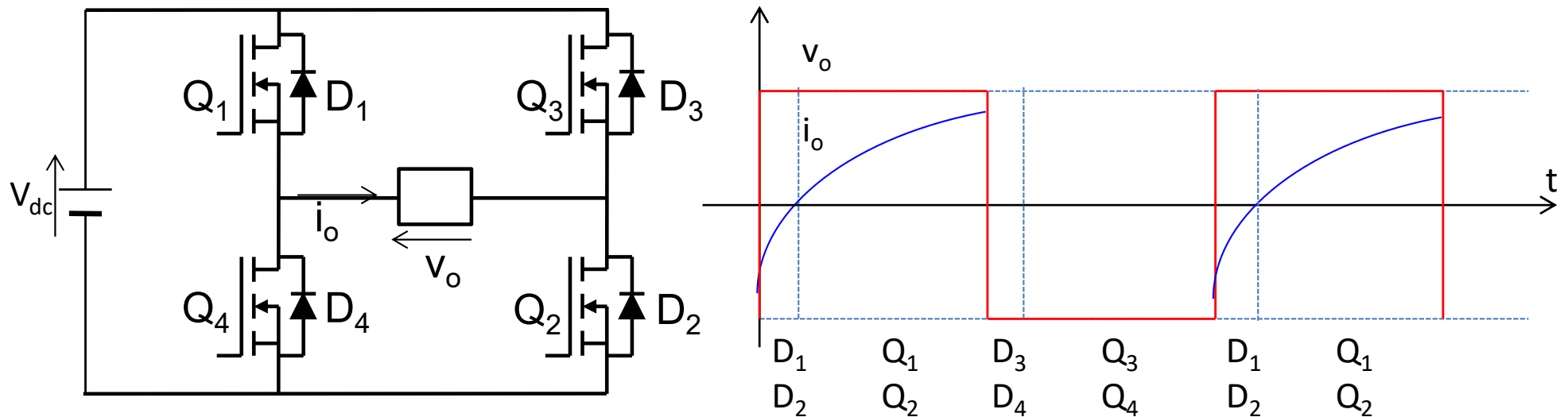


インバーター

- 直流(DC)から交流(AC)を作る
 - 整流回路の逆動作
 - 交流の種類
 - 単相
 - 三相
 - 用途
 - 交流モータの可変速駆動
 - 無停電電源装置(UPS)
 - インバータ交流電源

フルブリッジインバータ

- 環流ダイオードの動作
 - 誘導負荷では正負両方向の電流が流れる
 - 負の電流は環流ダイオードを流れる
 - Q1,Q2ターンオフ→負荷電流はD3,D4に転流。
出力電圧- V_{dc} となる。負荷電流が0になる前にQ3,Q4をターンオン



出力波形の高調波解析

- 出力電圧・電流波形のフーリエ解析

$$v_o(t) = \sum_{n=1}^{\infty} V_n \sin(n\omega_0 t + \theta_n)$$

$$i_o(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega_0 t + \phi_n)$$

- 負荷電流実効値

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_{n,rms}^2} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{I_n}{\sqrt{2}}\right)^2}$$

ただし $I_n = \frac{V_n}{Z_n}$ Z_n はn次高調波の負荷インピーダンス

- 負荷電力

$$P = I_{rms}^2 R = \sum_{n=1}^{\infty} P_n = \sum_{n=1}^{\infty} I_{n,rms}^2 R$$

ただし $I_{n,rms} = \frac{I_n}{\sqrt{2}}$

出力波形の高調波解析

- 方形波出力電圧は奇数次調波のみを含む
 - 波形の対称性より

$$v_o(t) = \sum_{n, \text{odd}} \frac{4V_{dc}}{n\pi} \sin n\omega_0 t$$

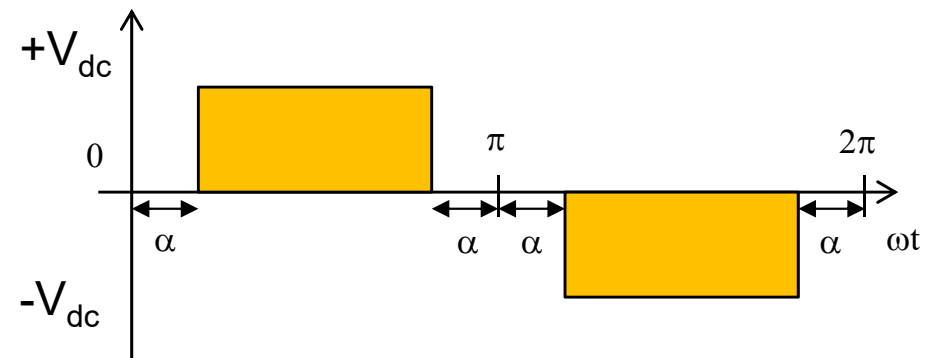
- 交流出力電圧・電流波形の品質評価
 - 総合歪率(直流分を含まない場合)

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (V_{n,rms})^2}}{V_{1,rms}} = \frac{\sqrt{V_{rms}^2 - V_{1,rms}^2}}{V_{1,rms}}$$

出力電圧振幅と高調波の制御

- 基本波出力電圧は直流電圧で制御可
- パルス幅でも出力電圧制御可

- $\pm V_{dc}$ と0を使用
- 出力電圧が0となる期間 α
- 出力電圧実効値



- $$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi-\alpha} V_{dc}^2 d\omega t} = V_{dc} \sqrt{1 - \frac{2\alpha}{\pi}}$$

- n 次高調波の振幅
$$V_n = \frac{4V_{dc}}{n\pi} \cos n\alpha$$

PWM制御

- 出力基本波より高い周波数でスイッチング
 - 出力電圧を制御
 - 出力生波形の総合歪率は増加する
 - 高調波成分はフィルタで除去容易
 - 欠点
 - 制御の複雑化
 - スwitching損失増加
 - 三角波比較方式
 - 信号波(変調波)と搬送波(三角波)を比較してパルス生成

PWM制御

- バイポーラ変調

- 変調波 → 正弦波: v_{sin}

- 搬送波 → 三角波: v_{tri}

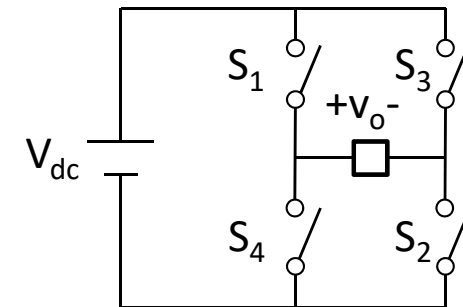
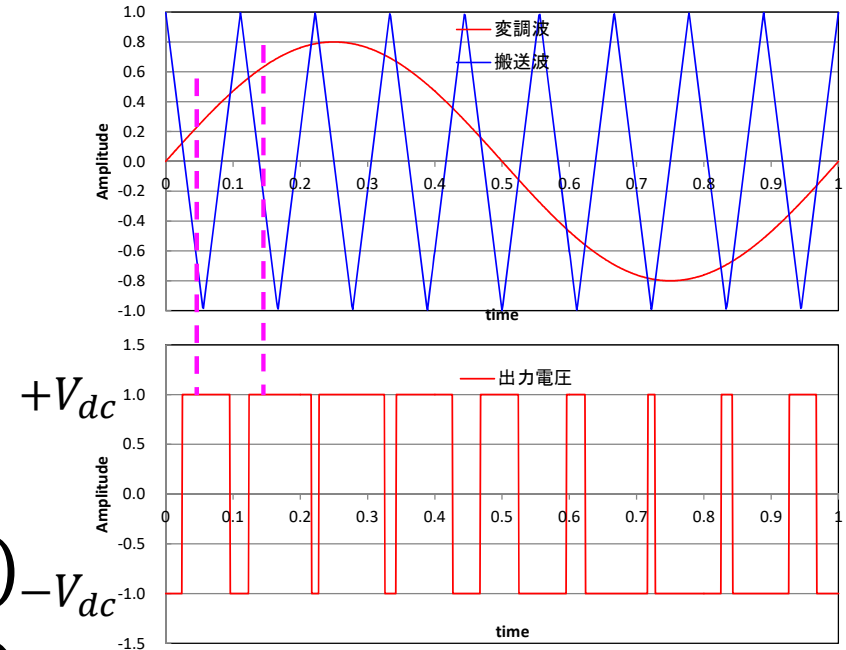
- 出力電圧

$$v_o = \begin{cases} +V_{dc} & (v_{sin} \geq v_{tri}) \\ -V_{dc} & (v_{sin} < v_{tri}) \end{cases}$$

- ±Vdcを出力するのでバイポーラ

- スイッチの状態

$$\begin{cases} ON: S_1, S_2 \rightarrow v_o = +V_{dc} \\ ON: S_3, S_4 \rightarrow v_o = -V_{dc} \end{cases}$$



PWM制御

- 周波数変調比: $m_f = \frac{f_{carrier}}{f_{reference}} = \frac{f_{tri}}{f_{sin}}$
 - 搬送波と信号波の周波数の比
 - 比が大きいと高調波成分は高周波となる
- 振幅変調比: $m_a = \frac{V_{m,reference}}{V_{m,carrier}} = \frac{V_{m,sin}}{V_{m,tri}}$
 - 搬送波と信号波の振幅の比
 - $0 \leq m_a \leq 1$ では基本波振幅は m_a に比例する
 - $V_1 = m_a V_{dc}$
 - $1 < m_a$ では線形とならない(比例しない)

PWM制御

- 直流成分 $K_{00} = \frac{1}{2}$ (0,1出力)
- 基本波成分 $K_{01} = \frac{M}{4} e^{-j\frac{\pi}{2}}$ (n=-1もある)
 - 基本波の整数倍 $K_{0n} = 0$
- 搬送波成分 $K_{mn} = \frac{1}{2\pi m} J_n \left(\frac{\pi}{2} m M \right) j^{m+1} [(-1)^{n+m} - 1]$
 - J_n はn次のベッセル関数

まとめ

- ソフトスイッチングコンバータ
- DCACインバータ