パワーエレクトロニクス
第11回　ソフトスイッチング
共振型コンバータ

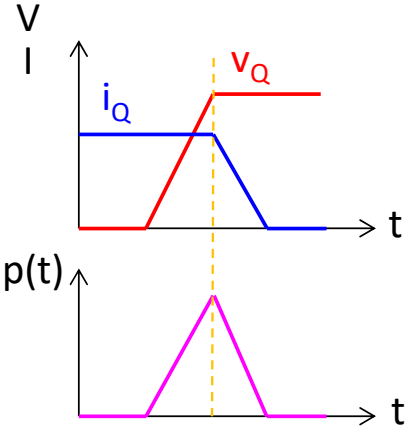
2026年7月1日

授業の予定

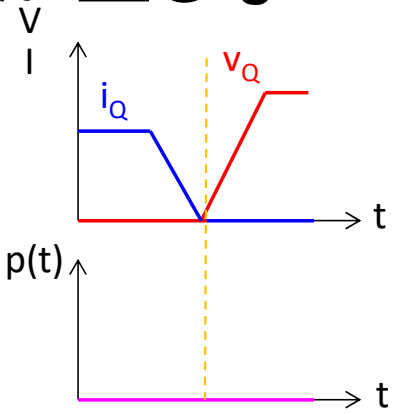
- パワーエレクトロニクス緒論
- パワーエレクトロニクスにおける基礎理論
- パワー半導体デバイス
- 整流回路
- 整流回路の交流側特性と他励式インバータ
- 交流電力制御とサイクロコンバータ
- 直流チョッパ
- DC-DCコンバータと共振形コンバータ
- 自励式インバータ
- 演習

スイッチング損失

- 理想スイッチングデバイス
  - スイッチング損失無(サージ電圧は別)
- ハードスイッチング
  - スイッチング動作時の電圧・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
  - スイッチング動作時に電圧・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

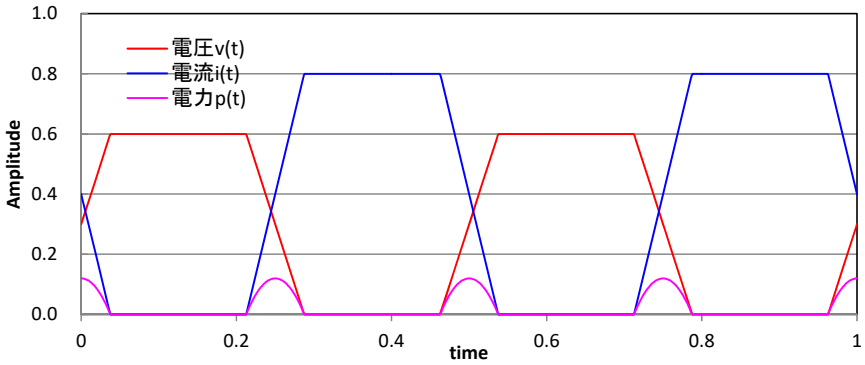


パワーデバイスでの損失

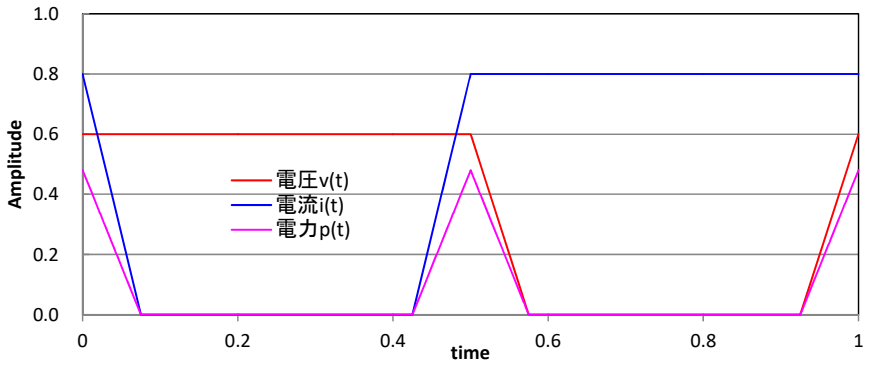
- 導通損失
  - オン状態における順方向電圧降下による損失
    - PN接合があると立ち上がり電圧が重畳される
      - PNの接合がないMOSFETが有利
- スイッチング損失
  - ターンオン･ターンオフの状態遷移時の損失
  - 状態遷移に有限の時間が必要
    - ゲート容量の充電･放電
    - 空乏層電荷の充電･放電
    - 少数キャリアの注入･排出

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
- スイッチング周波数に比例して大きくなる



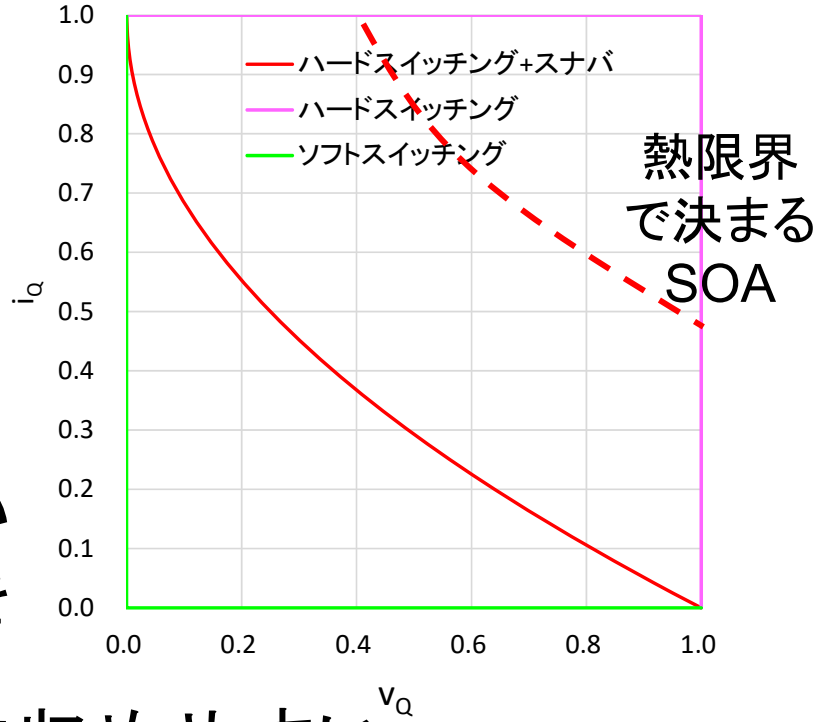
電圧･電流が同時変化
抵抗負荷等



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）

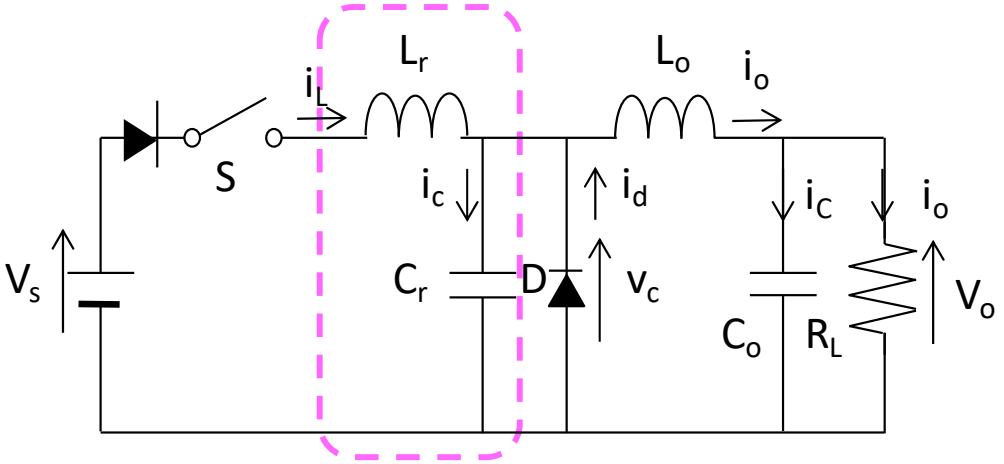
スイッチング動作とSOA

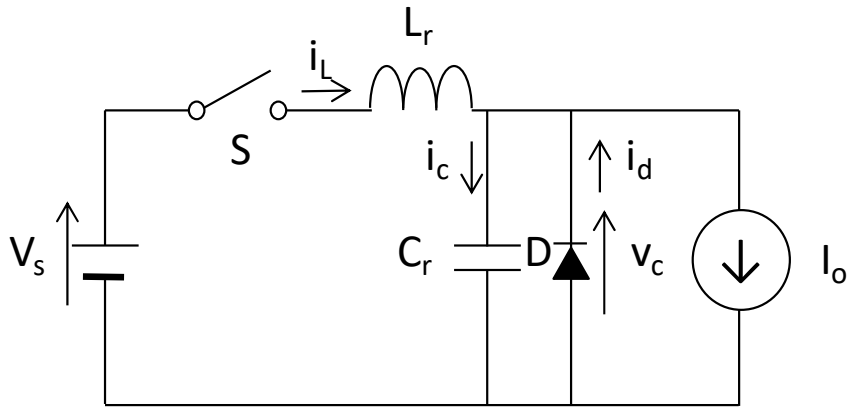
- 安全動作領域(FBSOA: Forward Bias Safety Operating Area)
  - スイッチング時の電圧・電流
  - デバイスの熱容量で決まる
  - 電圧・電流が
    SOAの範囲内に
    収まる必要有
  - ハードスイッチングでは厳しい
    - スナバによりSOA内での動作を容易にする
  - ソフトスイッチングはSOA内に収めやすい
    - 電圧・電流のピーク値を除く



ZCS-共振型コンバータ

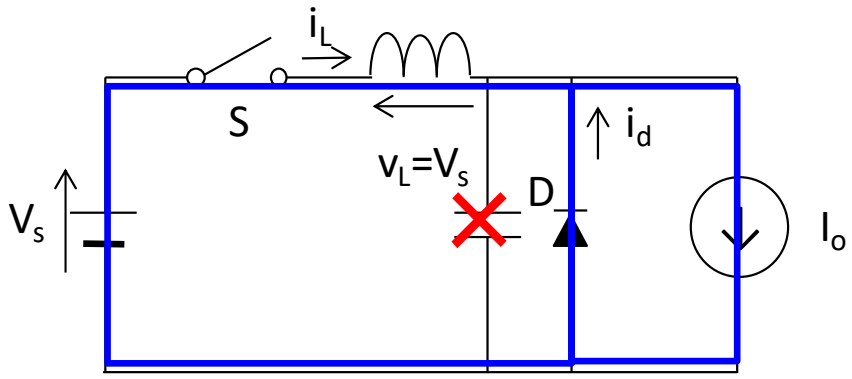
- 基本回路構成はBuckコンバータ
- 入力側LC共振回路
  - インダクタLr
  - コンデンサCr
- 出力インダクタンスLo大
  - 出力電流Ioの変化小
    - Io≒一定
  - Lo>>Lr
- 動作モード
  - 4種類(周期定常状態)
    - S-ON　　D-ON
    - S-ON　　D-OFF
    - S-OFF　　D-OFF
    - S-OFF　　D-ON





ZCS-共振型コンバータ

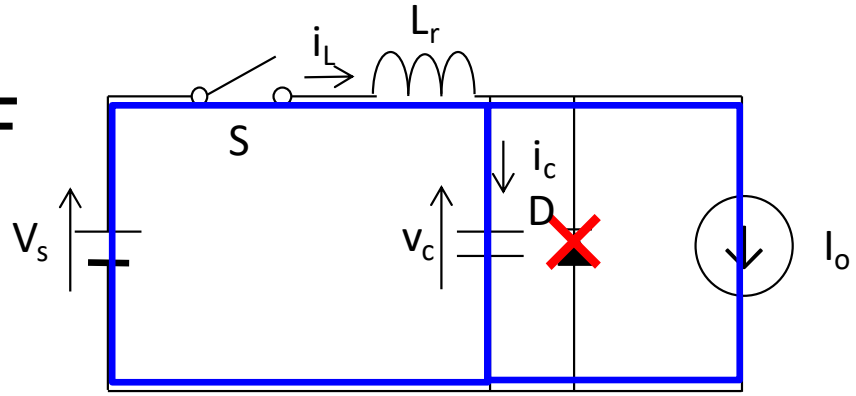
- 動作モード①(0≦t≦t1)
  - t=0でスイッチON
  - 直前の負荷電流Ioはダイオードを環流(連続導通)
    - vc=0 (Crの電圧）



  - 電源(Lr)電流iLが上昇
    - ダイオードはON状態維持
    - iL=IoまでダイオードはON状態維持
      - IoとiLの差がidとして流れる
    - iL=Ioでダイオードがターンオフ(t=t1)

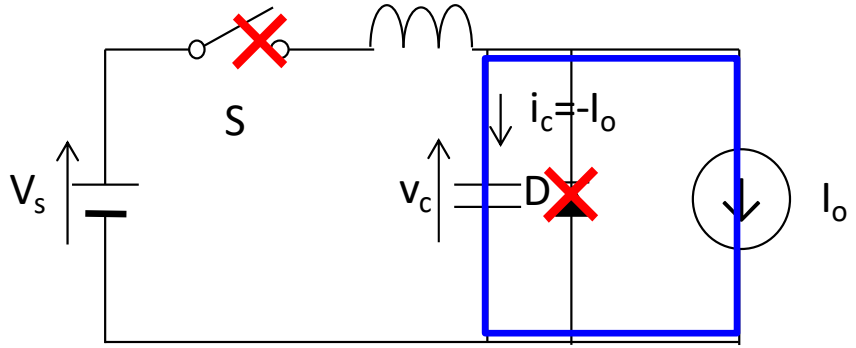
ZCS-共振型コンバータ

- 動作モード②(t1<t≦t2)
  - スイッチON,ダイオードOFF
  - 出力電流Ioー定
    - ic=iL-IoでCrを充電
      - iL>Io
    - Crの電圧vcの上昇によりiLが減少
    - iL=0でスイッチ電流は0(t=t2)→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Crの電圧vcが，ダイオードを逆バイアス

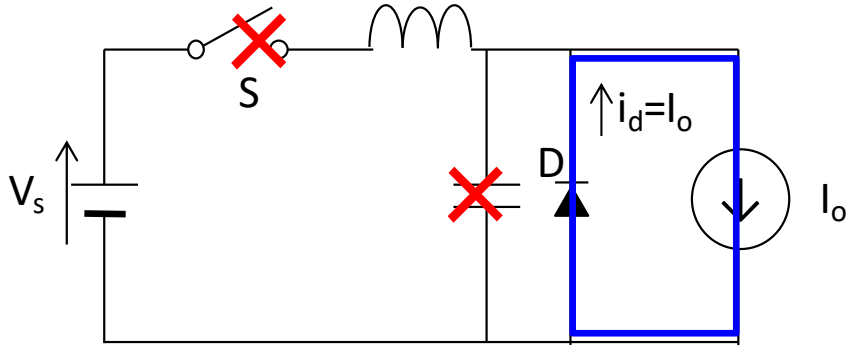


ZCS-共振型コンバータ

- 動作モード③(t2<t≦t4)
  - スイッチゲートON･遮断状態
  - ダイオードOFF
  - 出力電流Ioー定
    - icc=-IoでCrを放電
    - Vc>0の状態でスイッチのゲートターンオフ(t=t3<t4) ZCS
  - スイッチOFF(t3≦t≦t4)
    - Vc<0でダイオードが順バイアスされターンオン(t=t4)

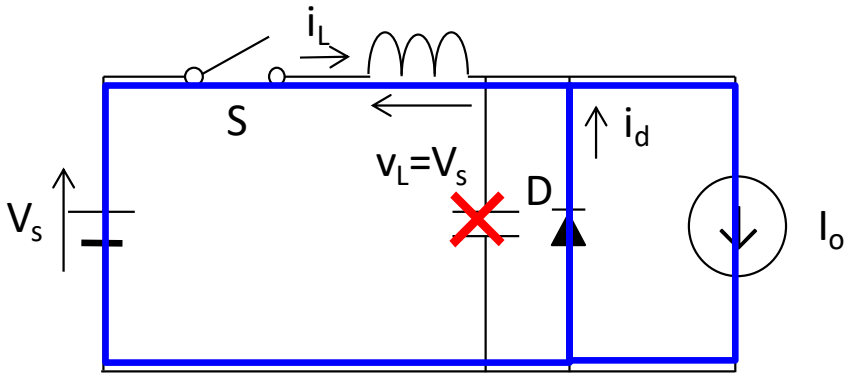


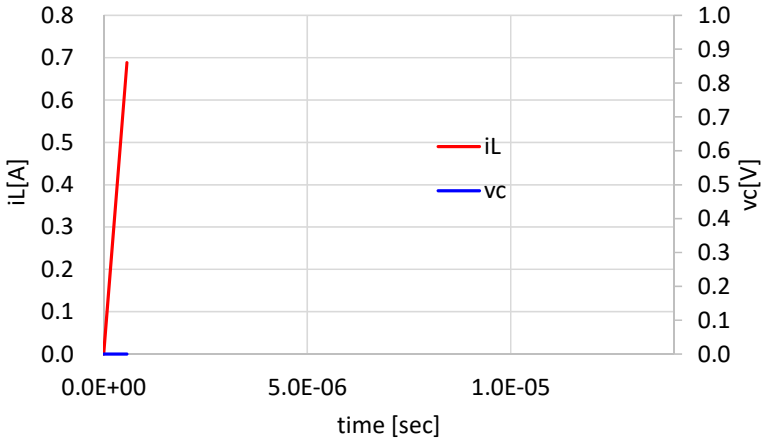
- 動作モード④(t4<t≦T)
  - スイッチOFF
  - ダイオードON
    - id=Io



ZCS-共振型コンバータ:回路解析

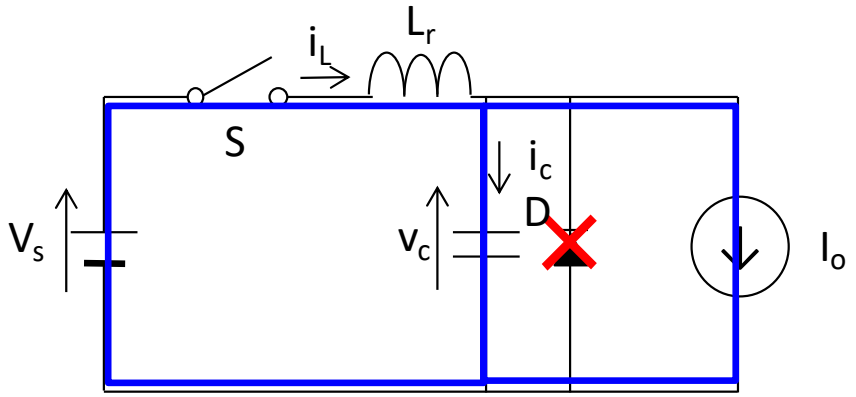
- 動作モード①(0≦t≦t1)
  - Lrの電流i_L
    - 初期値:$i_L(0) = 0$
    - 印加電圧:V_s
    - $i_L(t) = \frac{1}{L_r}\int_0^t V_s dt$
      - $i_L(t_1) = \frac{V_s t_1}{L_r} = I_o$
      - $t_1 = \frac{L_r I_o}{V_s}$





ZCS-共振型コンバータ:回路解析

- 動作モード②(t1<t≦t2)
  - 初期値vc(t=t1)=0



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

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

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

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

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

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

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

$$C_r s V_c = I_c$$

ZCS-共振型コンバータ:回路解析

- 動作モード②(t1<t≦t2)

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

$$= \frac{V_s}{s} - L_r\left[sI_C + I_o - I_o \right]$$

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

$$C_r sV_c = I_c$$

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

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

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

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

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

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

ZCS-共振型コンバータ:回路解析

- 動作モード②(t1<t≦t2)
  - 各部の電圧･電流

$$i_c(t) = V_s\sqrt{\frac{C_r}{L_r}}\sin\sqrt{\frac{1}{L_rC_r}}(t-t1)$$

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

$$= I_o + V_s\sqrt{\frac{C_r}{L_r}}\sin\sqrt{\frac{1}{L_rC_r}}(t-t1)$$

$$v_c(t) = V_s\left[1-\cos\sqrt{\frac{1}{L_rC_r}}(t-t1)\right]$$

ZCS-共振型コンバータ:回路解析

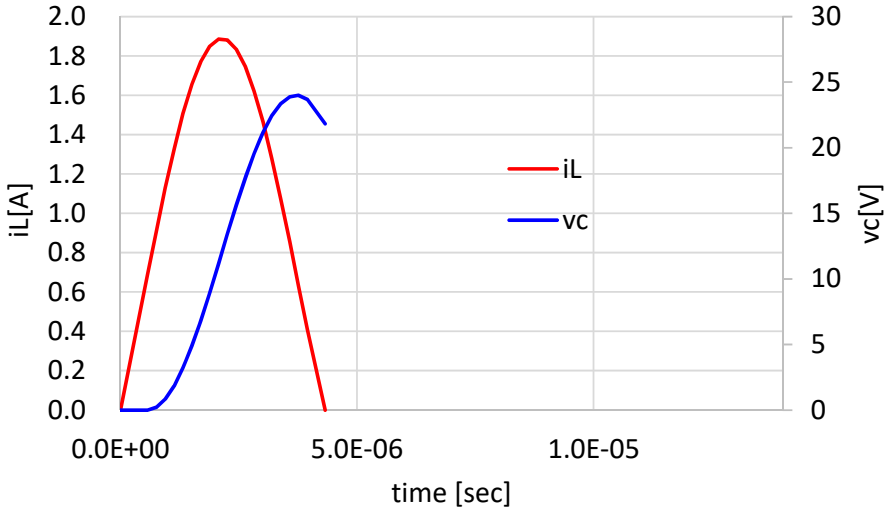
- 動作モード②(t1<t≦t2)
  - t2を求める

$$i_L(t2) = I_o + V_s\sqrt{\frac{C_r}{L_r}}\sin\sqrt{\frac{1}{L_rC_r}}(t2-t1) = 0$$

$$V_s\sqrt{\frac{C_r}{L_r}}\sin\sqrt{\frac{1}{L_rC_r}}(t2-t1) = -I_o$$

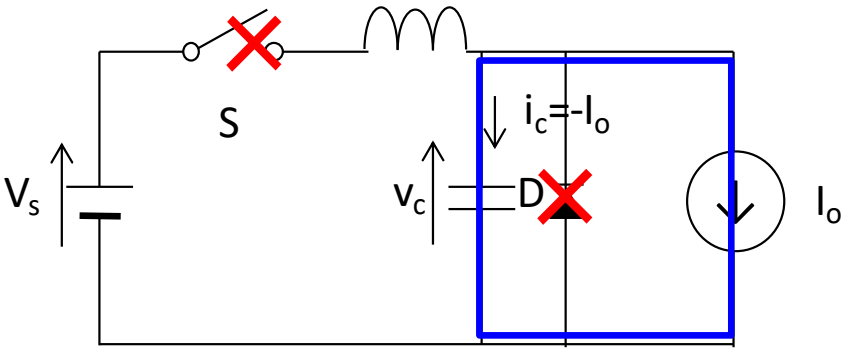
$$\sin\sqrt{\frac{1}{L_rC_r}}(t2-t1) = -\frac{I_o}{V_s}\sqrt{\frac{L_r}{C_r}}$$

$$t2 = t1 + \sqrt{L_rC_r}\sin^{-1}\left(-\frac{I_o}{V_s}\sqrt{\frac{L_r}{C_r}}\right)$$



ZCS-共振型コンバータ:回路解析

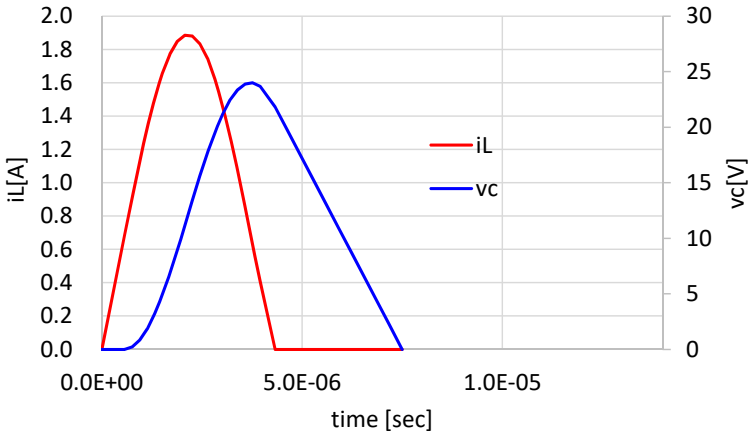
- 動作モード③(t2<t≦t4)
  - コンデンサCrが-Ioで放電



$$v_c(t)=\frac{1}{C_r}\int_{t2}^{t} i_c dt + v_c(t2)$$

$$=\frac{1}{C_r}\int_{t2}^{t} -I_o dt + v_c(t2)$$

$$=-\frac{I_o}{C_r}(t-t2)+v_c(t2)$$



ZCS-共振型コンバータ:回路解析

- 動作モード③(t2<t≦t4)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(t2<t≦t4)つづき
  - $v_c(t_2) = V_s\left[1-\cos\sqrt{\frac{1}{L_rC_r}}(t_2-t_1)\right]$

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

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

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

ZCS-共振型コンバータ:回路解析

- 動作モード③(t2<t≦t4)つづき
  - $\sin^{-1}x = \cos^{-1}\sqrt{1-x^2}$
  - $$v_c(t_2) = V_s\left[1-\cos\left(\cos^{-1}\sqrt{1-\left(\frac{I_o}{V_s}\right)^2\frac{L_r}{C_r}}\right)\right]$$
    $$= V_s\left[1-\sqrt{1-\left(\frac{I_o}{V_s}\right)^2\frac{L_r}{C_r}}\right]$$
  - $t_4 = t_2 + \frac{C_r}{I_o}v_c(t_2)$

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

ZCS-共振型コンバータ:回路解析

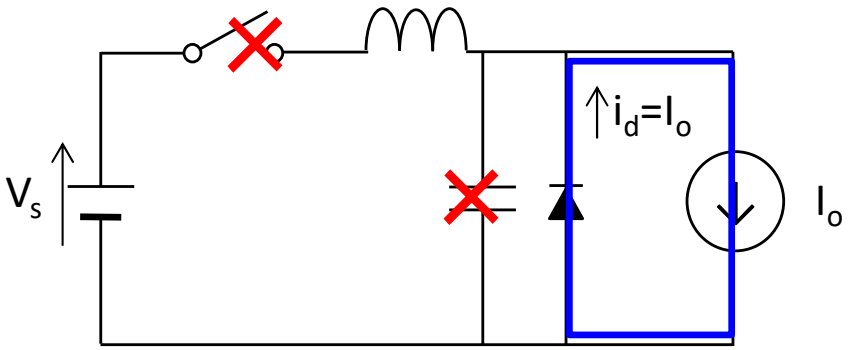
- 動作モード④(t4<t≦T)
  - インダクタ電流
    - スイッチOFF

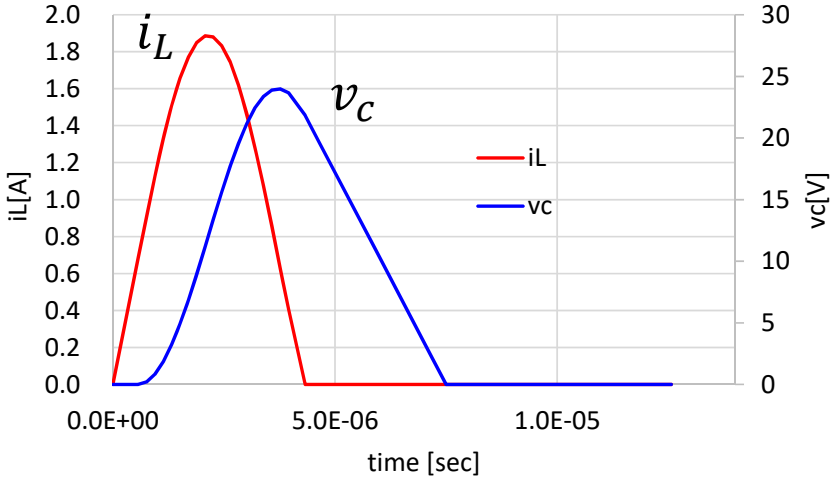
$$i_L = 0$$

  - コンデンサ
    - 電圧はダイオード導通中

$$v_c = 0$$

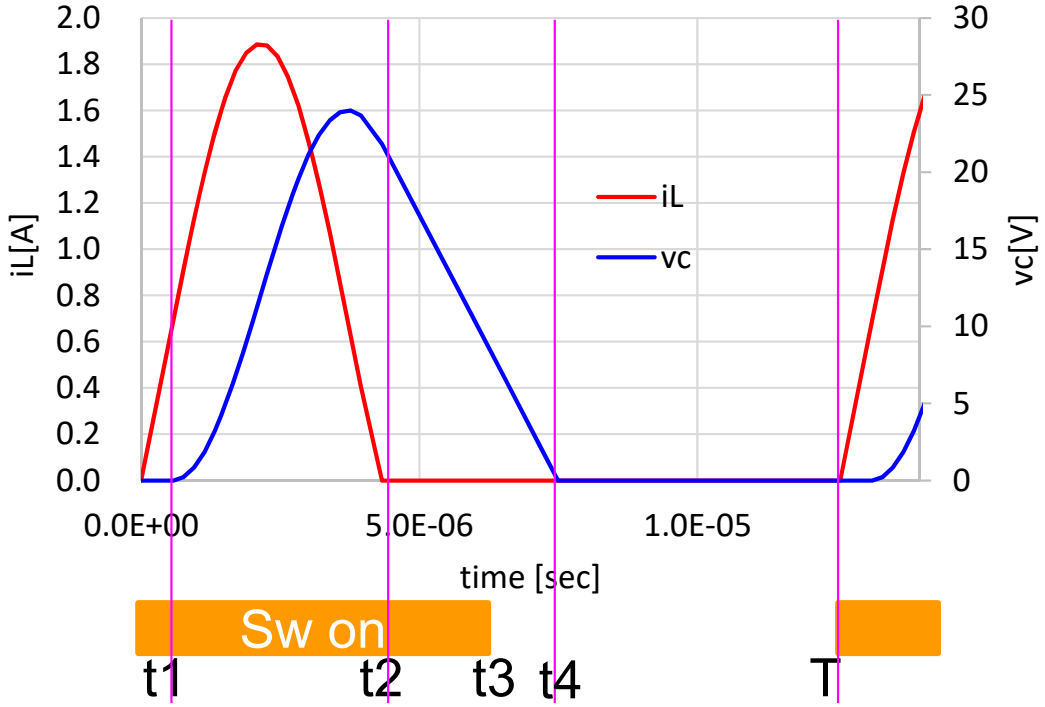
    - 電流は，出力電圧と同じ
      - $i_c = 0$





ZCS-共振型コンバータ

- 動作区間
  - 0≦t≦t1　　スイッチON　　ダイオードON
  - t1<t≦t2　　スイッチON　　ダイオードOFF
  - t2<t≦t3　　スイッチターンオフ　　ダイオードOFF
  - t3<t≦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

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

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

$$\left. - \frac{1}{\frac{C_r}{t_4 - t_2}V_s\left[1 - \cos\sqrt{\frac{1}{L_r C_r}}(t_2 - t_1)\right]}V_s C_r\left[\cos\sqrt{\frac{1}{L_r C_r}}(t_2 - t_1) - 1\right]\right\}$$

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

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

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

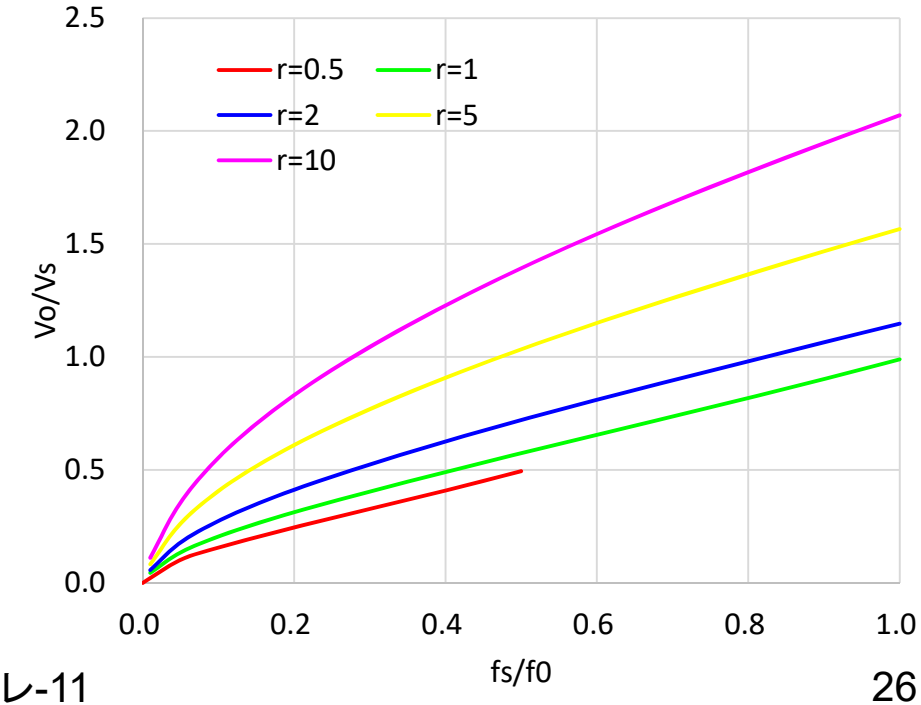
ZCS-共振型コンバータ

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

ZCS-共振型コンバータ

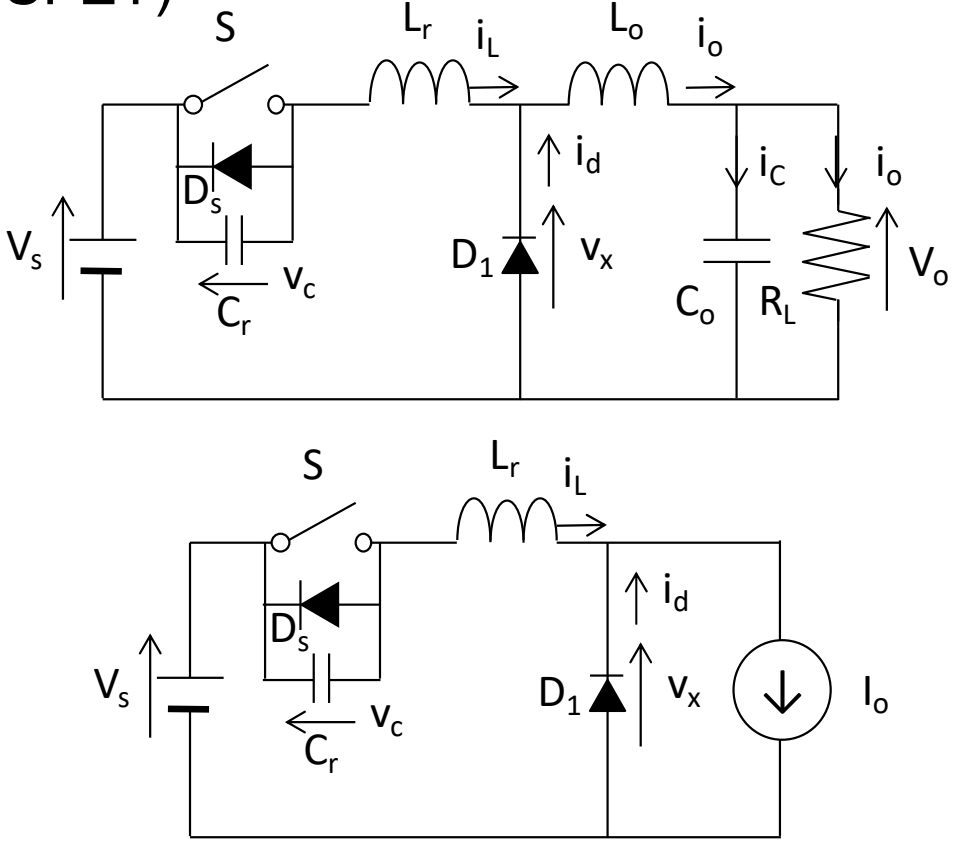
- スイッチング周波数$f_s = \frac{1}{T}$に対する昇圧比
  - $\frac{V_o}{V_s} = f_s \left\{ \frac{t_4 - t_2}{C_r \left[1 - \cos \sqrt{\frac{1}{L_r C_r}} (t_2 - t_1) \right] 2L_r} {t_1}^2 - t_1 + t_4 \right\}$
    - $R_L = \frac{V_o}{I_o}$
    - $r = \frac{R_L}{Z_o}$
    - $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}}$

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



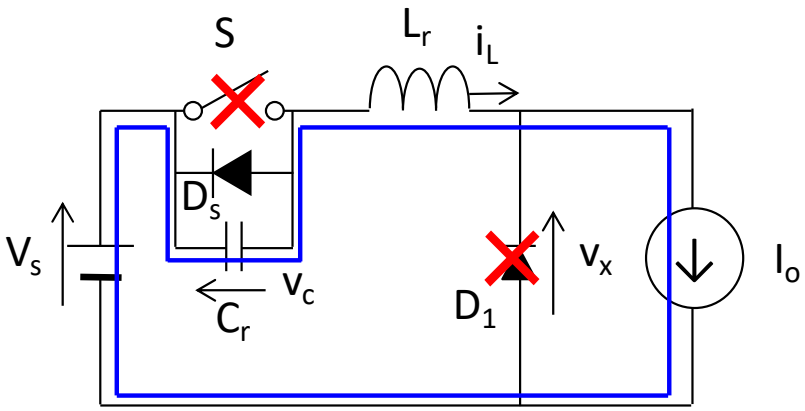
ZVS-共振型コンバータ

- 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Lr
  - コンデンサCr
  - スイッチの逆並列ダイオード(MOSFET)
- 出力インダクタンスLo大
  - 出力電流Ioの変化小
    - Io≒一定
  - Lo>>Lr
- 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



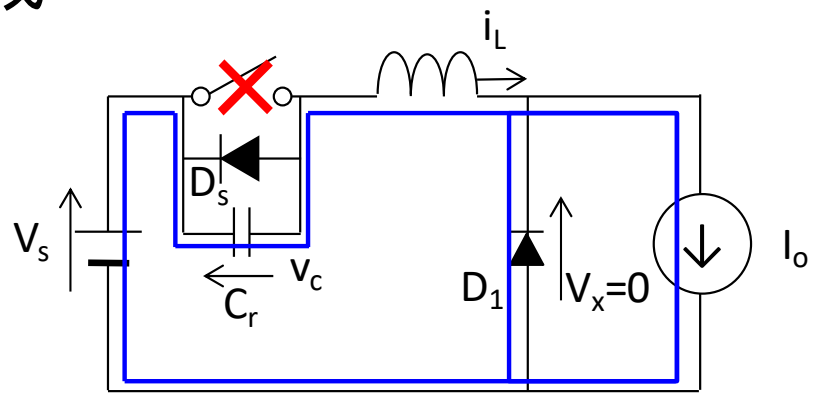
ZVS-共振型コンバータ

- 動作モード①(0≦t≦t1)
  - 直前(t<0)
    - スィッチON
      - vc=0 (Crの電圧)
    - D1,Ds OFF
  - t=0でスイッチOFF
  - 共振回路のLr
    - 電流源iL=Ioを維持
  - 共振回路のCr
    - iL=IoでCrを充電
      - $v_c(t_1) = V_s$



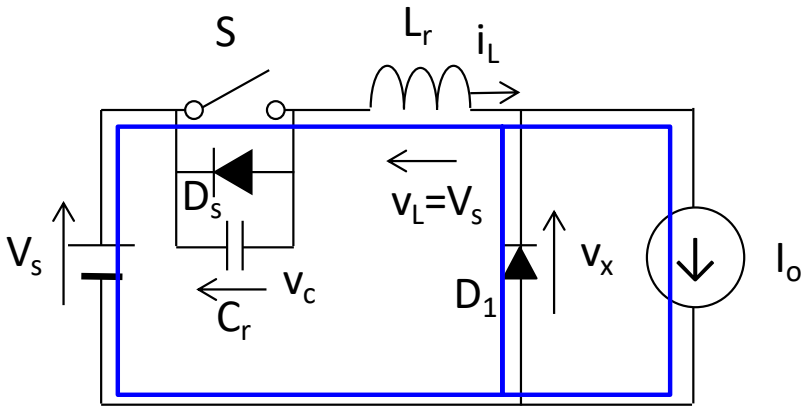
ZVS-共振型コンバータ

- 動作モード②(t1<t≦t2)
  - S-OFF, Ds-OFF
  - T=t1でvc=Vs
    - D1がターンオン
      - Vx=0
    - Vs, Cr, Lrが直列共振回路形成
    - Io-iLがD1を流れる

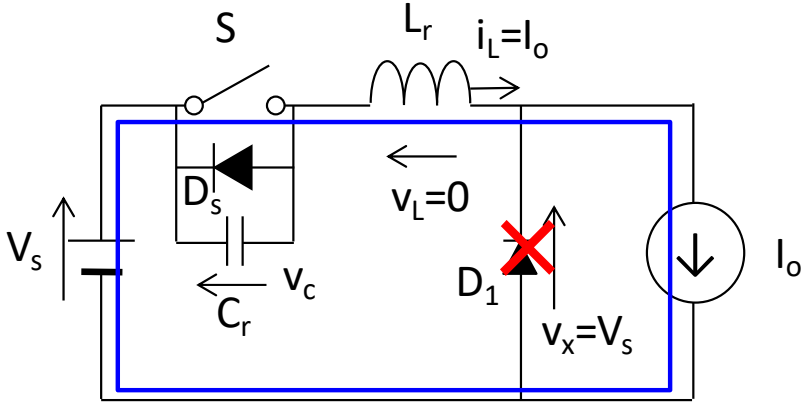


ZVS-共振型コンバータ

- 動作モード③(t2<t≦t3)
  - Cr, Lrの共振でvc=0(t=t2)
    - Dsターンオン
      - iL<0を流す
      - VsがiLの逆電流を減少させる
    - Vc=0の状態でSのゲートターンオン(t2<t≦t3) ZVS

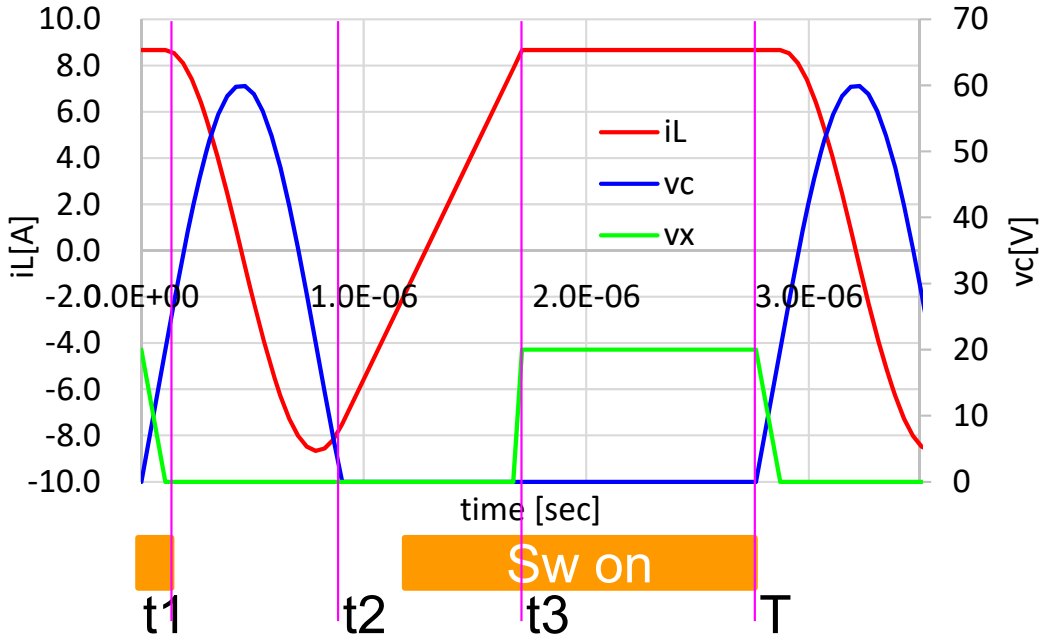


- 動作モード④(t3<t≦T)
  - iL=ioとなる(t=t3)
    - D1がターンオフ
    - Lrは定電流Ioを維持



ZVS-共振型コンバータ:回路解析

- 動作区間
  - 0≦t≦t1　スイッチOFF　D1　OFF　DS　OFF
  - t1<t≦t2　スイッチOFF　D1　ON　DS　OFF
  - t2<t≦t3　スイッチターンオン　D1　ON　DS　ON
  - t3<t≦T　スイッチON　D1　ON　DS　OFF



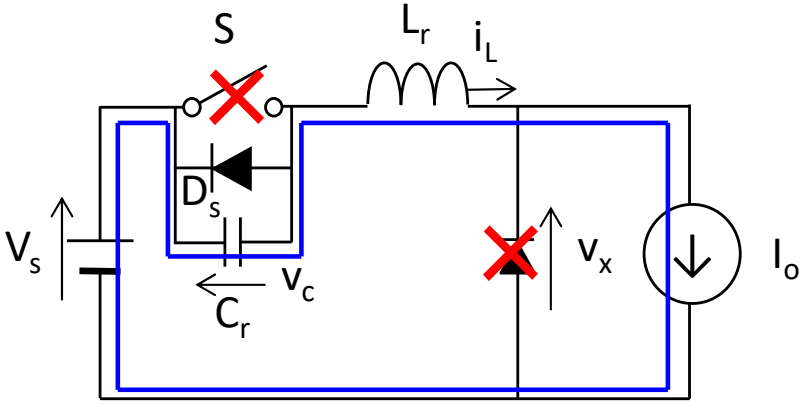
ZVS-共振型コンバータ:回路解析

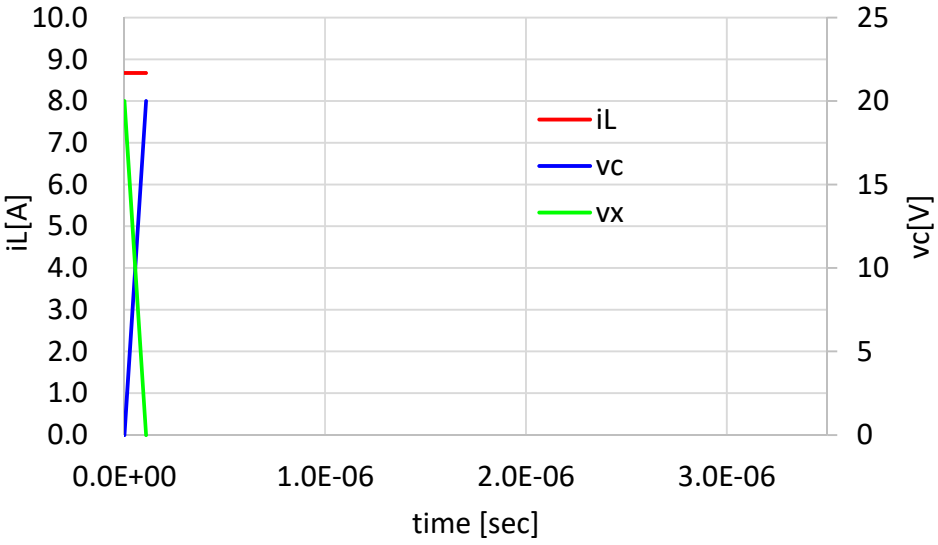
- 動作モード①(0≦t≦t1)
  - Lrの電流iL
    - 初期値iL=Io,vc=0
    - 電源電圧Vs
    - 条件　ic=iL=Io
    - vc=Vsとなる時点がt1

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

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

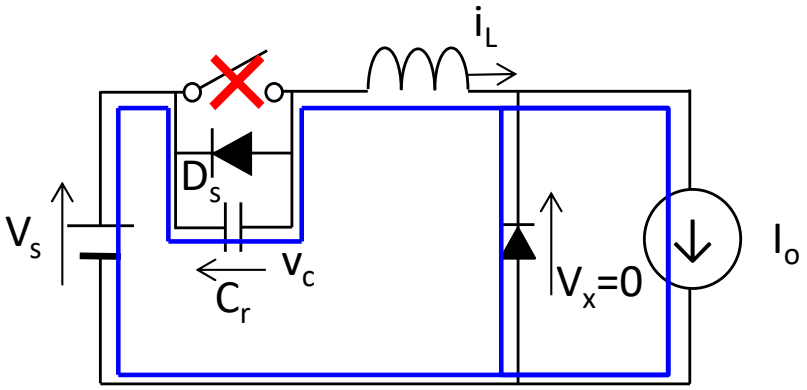
$$t_1 = \frac{C_r}{I_o} V_S$$





ZVS-共振型コンバータ:回路解析

- 動作モード②(t1<t≦t2)
  - 初期値vc0=Vs, iL0=Io



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

$$V_c = \frac{V_s}{s} - L_r\left(sI_L - I_{L0}\right)$$

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

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

$$C_r\left(sV_c - V_{c0}\right) =$$

$$C_r\left(sV_c - V_s\right) = I_L$$

ZVS-共振型コンバータ:回路解析

- 動作モード②(t1<t≦t2)

$$I_L = C_r\left(sV_c - V_s\right)$$

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

$$= -sL_rC_r\left(sI_L - I_o\right)$$

$$I_L\left(1+s^2L_rC_r\right) = sL_rC_rI_o$$

$$I_L = \frac{sL_rC_rI_o}{1+s^2L_rC_r}$$

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

$$i_L(t) = I_o\cos\sqrt{\tfrac{1}{L_rC_r}}t$$

ZVS-共振型コンバータ:回路解析

- 動作モード②(t1<t≦t2)
  - 各部の電圧･電流
    - 時間軸をt1に合せて

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

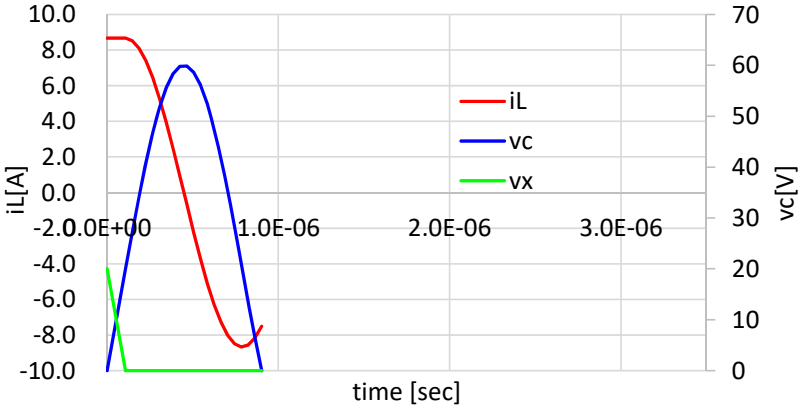
$$v_c(t) = V_s - L_r \frac{di_L(t)}{dt}$$

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

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

ZVS-共振型コンバータ:回路解析

- 動作モード②(t1<t≦t2)
  - t2を求める(vc=0)



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

$$= 0$$

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

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

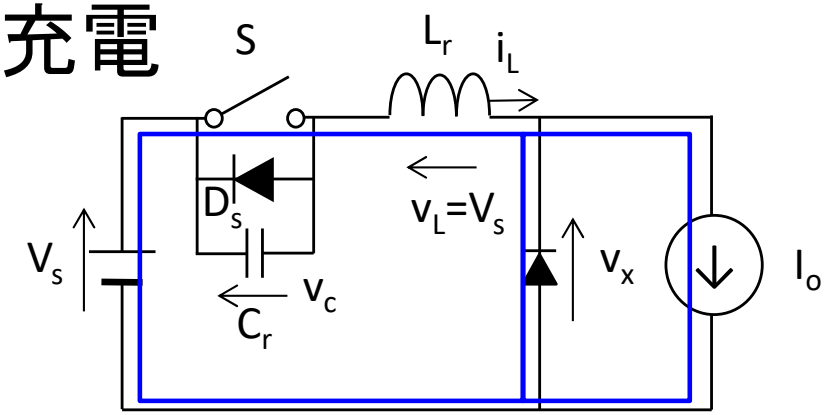
$$t_2 = \sqrt{L_rC_r}\sin^{-1}\left(-\frac{V_s}{I_o}\sqrt{\frac{C_r}{L_r}}\right) + t_1$$

ZVS-共振型コンバータ:回路解析

- 動作モード③(t2<t≦t3)
  - リアクトルLrが電源電圧Vsで充電

$$i_L(t)=\frac{1}{L_r}\int_{t2}^{t}V_s\,dt+i_L(t_2)$$

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

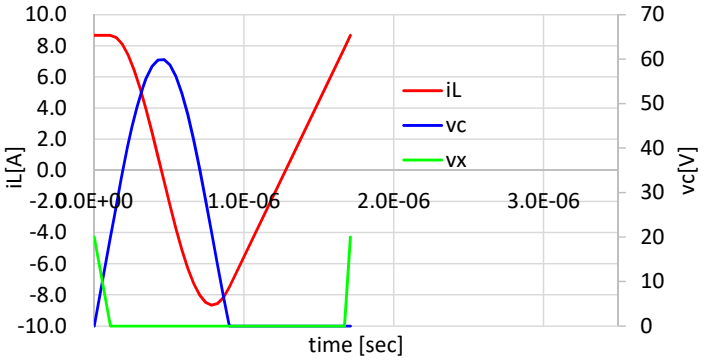


  - t3でリアクトル電流がIo

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

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

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



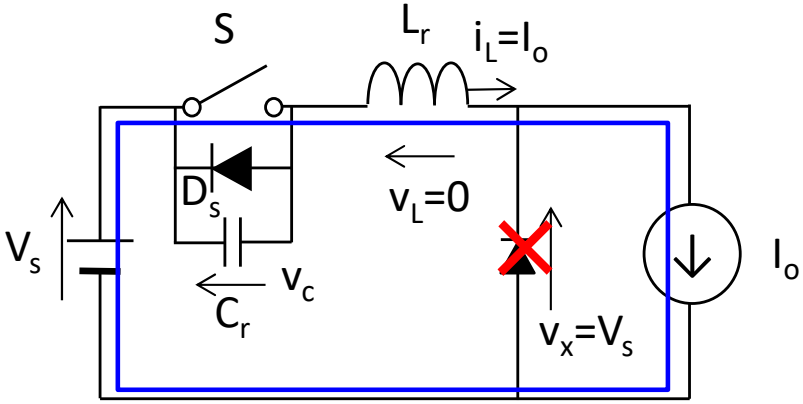
ZVS-共振型コンバータ:回路解析

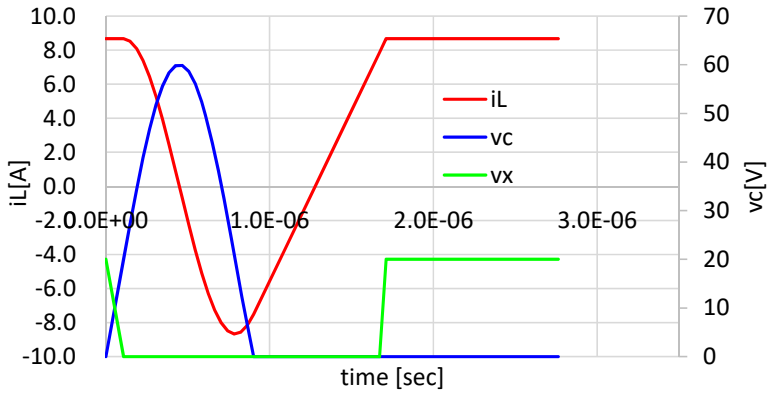
- 動作モード④(t3<t≦T)
  - インダクタ電流
    - スイッチON

$$i_L = I_o$$

  - 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

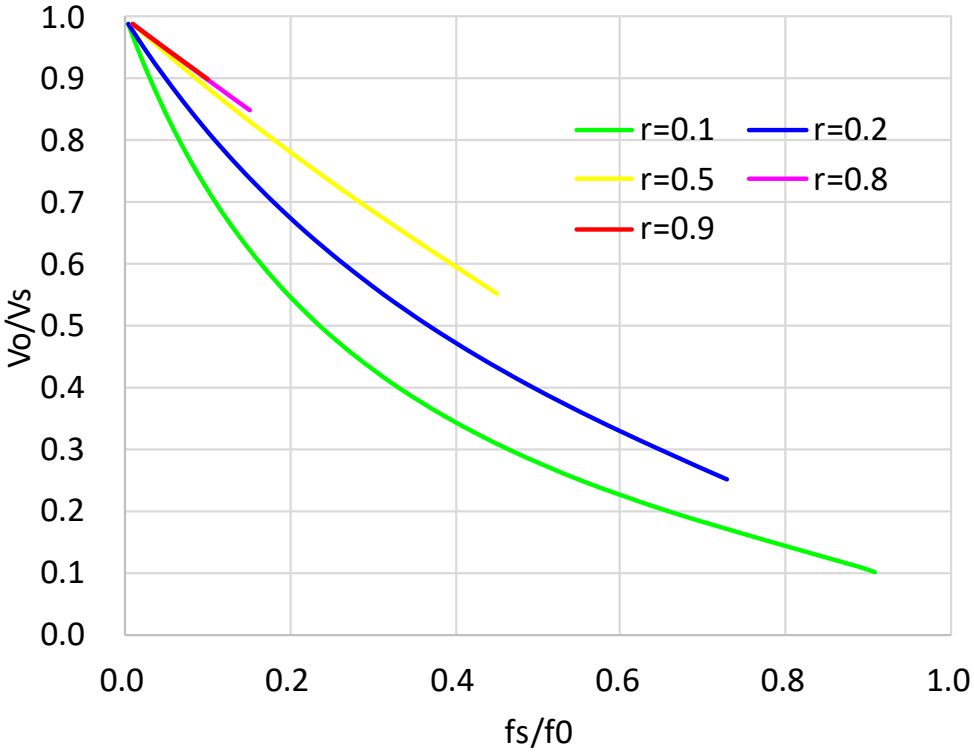
- 出力電圧
  - 環流ダイオードD1の印加電圧vx
    - 0≦t ≦ t1 $v_x(t) = V_s - \frac{I_o t}{C_r} = V_s\left[1 - \frac{t}{t_1}\right]$
    - t1 ≦t<t2 $v_x(t) = 0$
    - t2≦t<t3 $v_x(t) = 0$
    - t3 ≦t<T $v_x(t) = V_s$

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

$$= \frac{V_s}{T}\left\{\frac{t_1}{2} + T - t_3\right\}$$

ZVS-共振型コンバータ

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



- 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