応用電力変換工学

舟木剛

第12回　ソフトスイッチング

共振形コンバータ

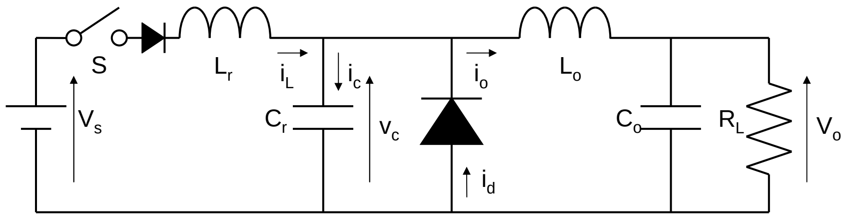
2008年12月17日

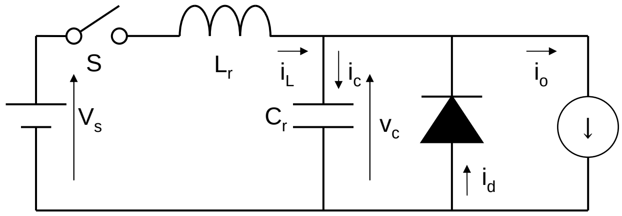
ソフトスイッチング

- ソフトスイッチング
  - スイッチの状態遷移（スイッチング）条件
    - 印加電圧(順方向阻止)が0の状態でターンオン(ZVS)
    - 通流電流が0の状態でターンオフ(ZCS)
  - スイッチング損失が低減
    - 状態遷移中の電圧・電流積が0
  - 種類
    - 共振スイッチコンバータ
    - 負荷共振コンバータ
    - 共振dcリンクコンバータ

ゼロ電流スイッチング(ZCS)共振形コンバータ

- LCの共振により，ソフトスイッチング(ZCS)を実現



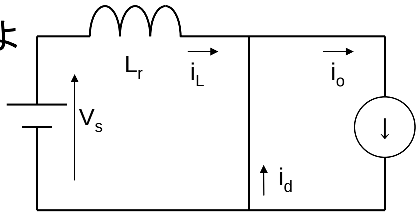


ゼロ電流スイッチング(ZCS)共振形コンバータ

- 回路条件
  - 回路の基本構成は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が大きい
    - 出力電流I_oのリップル少ない
      - I_o≒一定
    - L_o>>L_r
    - 損失無視

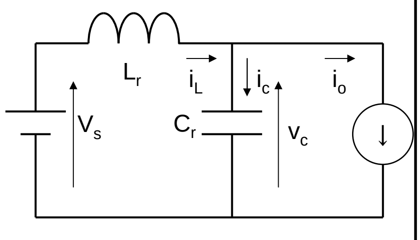
ゼロ電流スイッチング(ZCS)
共振形コンバータの周期定常状態の動作

– 直前
  - 負荷電流I_oがダイオードを環流（v_c=0）
- スイッチON(t=0)
  – 電源電流i_Lは共振用L_rにより，ゆっくり立ち上がる（ダイオードONのまま）
    - i_L<I_oの間，ダイオードに電流が流れる
    - i_L=I_oで，ダイオードがOFF(t=t_1)



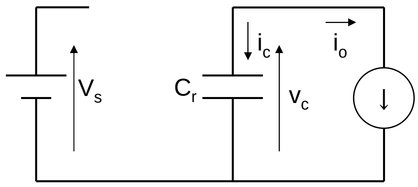
ゼロ電流スイッチング(ZCS)
共振形コンバータの周期定常状態の動作

- スイッチON,ダイオードOFF(t≧t_1)
  – 出力電流I_o一定(L_oが大)
    - i_c=i_L-I_oがC_rを充電
      – v_cの上昇と共にi_Lが減少
        » コンデンサ電圧v_cが，ダイオードを逆バイアス
      – i_L=0でスイッチが電流を流さなくなる。(バイポーラ素子)。スイッチ非導通(t=t_2)



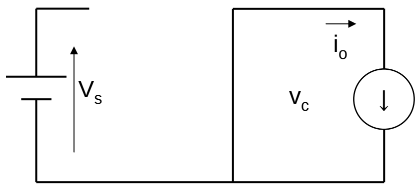
ゼロ電流スイッチング(ZCS)
共振形コンバータの周期定常状態の動作

- ダイオードOFF($t \geqq t_2$)
  - 出力電流I_o一定(L_oが大)
    - $i_c=-I_o$がC_rを放電
      - v_cが減少
        - » コンデンサ電圧v_cが，ダイオードを逆バイアス
  - コンデンサC_r電圧$v_c>0$の間にスイッチOFF
    - 非導通からOFFへ
    - スイッチング損失無し ($I_L=0$:ZCS)
  - $v_c=0$でダイオードがON。($t=t_3$)



ゼロ電流スイッチング(ZCS)
共振形コンバータの周期定常状態の動作

- スイッチOFF,ダイオードON($t>t_3$)
  - $I_d=I_o$



ゼロ電流スイッチング(ZCS)
共振形コンバータの周期定常状態の動作

- 動作区間
  - $0 \leqq t \leqq t_1$　　スイッチON
ダイオードON
  - $t_1 < t \leqq t_2$　　スイッチON
ダイオードOFF
  - $t_2 < t \leqq t_3$　　スイッチ非導通→OFF(ZCS)
ダイオードOFF
  - $t_3 < t < T$　　スイッチOFF
ダイオードON

ゼロ電流スイッチング(ZCS)
共振形コンバータ

- 動作区間0≦t≦t1
  - Lrの電流iL
    - 初期値iL(t=0)=0
    - 電源電圧Vs

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

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

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

ゼロ電流スイッチング(ZCS)
共振形コンバータ

- 動作区間t1≦t≦t2
  - 初期値vc(t=t1)=0

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

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

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

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

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

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

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

$$C_r sV_c=I_c$$

ゼロ電流スイッチング(ZCS)
共振形コンバータ

- 動作区間t1≦t≦t2

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

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

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

$$C_r sV_c=I_c$$

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

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

$$I_c=C_rV_s\frac{1}{1+L_rC_rs^2}$$

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

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

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

ゼロ電流スイッチング(ZCS) 共振形コンバータ

- 動作区間t1≦t≦t2
  - 各部の電圧・電流

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

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

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

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

ゼロ電流スイッチング(ZCS) 共振形コンバータ

- 動作区間t1≦t≦t2
  - t2を求める

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

$$= 0$$

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

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

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

ゼロ電流スイッチング(ZCS) 共振形コンバータ

- 動作区間t2≦t≦t3
  - コンデンサCrが-Ioで放電

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

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

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

  - T3でコンデンサの電圧が0

$$v_c(t3) = 0$$

$$-\frac{I_o}{C_r}(t3 - t2) + v_c(t2) = 0$$

$$t3 = t2 + \frac{C_r}{I_o} v_c(t2)$$

T3は負荷に依存

ゼロ電流スイッチング(ZCS) 共振形コンバータ

- 動作区間t3≦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のため

$$v_c = 0$$

    - 電流は，出力電圧と同じ

$$i_d = -I_o$$

ゼロ電流スイッチング(ZCS)
共振形コンバータ

- 出力電圧
  - 出力エネルギーWoと入力エネルギーWsの関係

$$W_o = \int_0^T V_o I_o dt$$
$$= V_o I_o T$$
$$W_s = \int_0^T V_s i_L dt$$
$$= V_s \int_0^{t1} \frac{V_s t}{L_r} dt + V_s \int_{t1}^{t2} \left[I_o + V_s \sqrt{\frac{C_r}{L_r}} \sin \sqrt{\tfrac{1}{L_r C_r}} (t - t1) \right] dt$$
$$= V_s \left\{ \frac{V_s}{2L_r} t1^2 + I_o (t2 - t1) - V_s C_r \left[\cos \sqrt{\tfrac{1}{L_r C_r}} (t2 - t1) - 1 \right] \right\}$$

ゼロ電流スイッチング(ZCS)
共振形コンバータ

- 出力電圧

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

ゼロ電流スイッチング(ZCS)共振形コンバータ

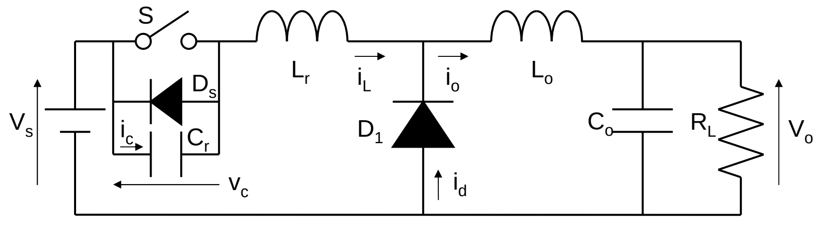
- 出力電圧

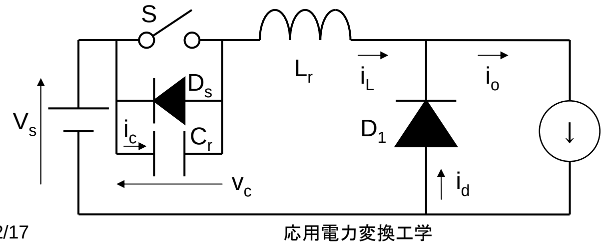
$$I_o = \frac{C_r}{t3-t2} v_c(t2)$$
$$= \frac{C_r}{t3-t2} V_s \left[1-\cos\sqrt{\tfrac{1}{L_r C_r}}(t2-t1)\right]$$

$$V_o = \frac{V_s}{T}\left\{\frac{V_s}{2L_r} t1^2 \frac{t3-t2}{C_r\left[1-\cos\sqrt{\tfrac{1}{L_r C_r}}(t2-t1)\right]} + (t2-t1) + V_s(t3-t2)\right\}$$

ゼロ電圧スイッチング(ZVS)共振形コンバータ

- LCの共振により，ソフトスイッチング(ZVS)を実現





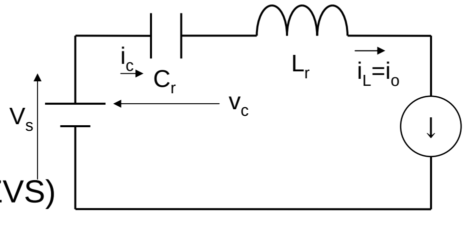
ゼロ電圧スイッチング(ZVS)
共振形コンバータ

- 回路条件
  - 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が大きい
    - 出力電流I_oのリップルが少ない。
      - I_o≒一定
    - L_o>>L_r
    - 損失無視

2008/12/17　応用電力変換工学　21

ゼロ電圧スイッチング(ZVS)
共振形コンバータの周期定常状態動作

- 直前(t<0)
  - スイッチON。
（電源からエネルギー供給）
    - D_sオフ（電流0）
    - 電圧v_c=0
  - D_1オフ（電流0）

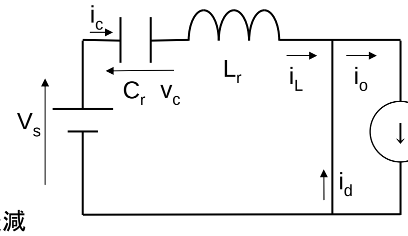


- スイッチOFF(t=0)
  - この時スイッチ電圧v_c=0(ZVS)
  - C_r経由でi_L=I_oとなる
    - i_LがC_rを充電
      - 電圧v_cが時間比例で上昇

2008/12/17　応用電力変換工学　22

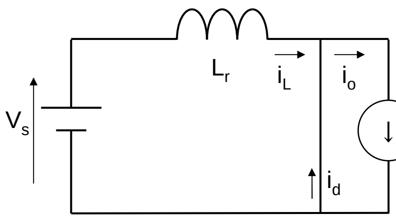
ゼロ電圧スイッチング(ZVS)共振形コンバータの周期定常状態動作

- D_1がON($t=t_1$)
  - $v_c=v_s$となった時点でD_1がONする
    - $i_L=I_o$一定より$V_{Lr}=0$
  - D_1がONの状態($t \geqq t_1$)
    - 電源側
      - C_rとL_rの直列共振回路形成
        - » i_L減少開始(負になってもOK)
        - » v_cは上昇するがピーク後減少開始する
    - 負荷側
      - D_1経由で電流I_o一定



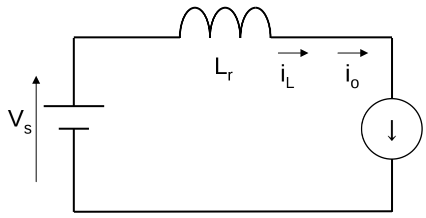
ゼロ電圧スイッチング(ZVS)共振形コンバータの周期定常状態動作

- D_SがONする($t=t_2$)
  - $v_c=0$となった時点
    - C_rとL_rの共振
    - 以降D_SがON
      - $v_c=0$
      - $i_L<0$を流す
  - V_sがL_rに印加($t \geqq t_2$)
    - i_Lが時間比例で増加
  - D_SのON中にSをONする
    - スイッチ電圧0(ZVS)
    - D_SがONなので影響無し
    - i_L負のピークで再び増加に転じる



ゼロ電圧スイッチング(ZVS)
共振形コンバータの周期定常状態動作

- D_SがOFFする($t=t_3$)
  - $I_d=I_o$となった時点
    - D_SがOFF
    - I_LはSを流れる
  - D_1がOFFするまで継続 ($t=T$)



ゼロ電圧スイッチング(ZVS)
共振形コンバータの周期定常状態動作

- 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　　スイッチ導通　D1　ON　DS　ON
  - t3<t≦T　　スイッチON　D1　ON　DS　OFF

ゼロ電圧スイッチング(ZVS) 共振形コンバータ

- 動作区間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

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

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

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

ゼロ電圧スイッチング(ZVS) 共振形コンバータ

- 動作区間t1≦t≦t2
  - 初期値vc0=Vs, iL0=Io

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

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

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

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

$$C_r(sV_c - V_{c0}) =$$
$$C_r(sV_c - V_s) = I_L$$

ゼロ電圧スイッチング(ZVS)
共振形コンバータ

- 動作区間t1≦t≦t2

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

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

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

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

ゼロ電圧スイッチング(ZVS)
共振形コンバータ

- 動作区間t1≦t≦t2
  - 各部の電圧・電流
    - 時間軸をt1に合せて

$$i_L(t) = I_o \cos\sqrt{\tfrac{1}{L_rC_r}}\left(t - t_1\right)$$
$$v_c(t) = V_s - L_r\frac{di_L(t)}{dt}$$
$$= V_s + L_rI_o\sqrt{\tfrac{1}{L_rC_r}}\sin\sqrt{\tfrac{1}{L_rC_r}}\left(t-t_1\right)$$
$$= V_s + I_o\sqrt{\tfrac{L_r}{C_r}}\sin\sqrt{\tfrac{1}{L_rC_r}}\left(t-t_1\right)$$

ゼロ電圧スイッチング(ZVS)共振形コンバータ

- 動作区間t1≦t≦t2
  - t2を求める(vc=0)

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

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

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

ゼロ電圧スイッチング(ZVS)共振形コンバータ

- 動作区間t2≦t≦t3
  - リアクトルLrが電源電圧Vsで充電

$$i_L(t) = \frac{1}{L_r}\int_{t2}^{t} V_s dt + i_L(t_2)$$
$$= \frac{1}{L_r}V_s(t - t_2) + I_o\cos\sqrt{\tfrac{1}{L_rC_r}}(t_2 - t_1)$$

  - T3でリアクトル電流がIo

$$i_L(t_3) = \frac{1}{L_r}V_s(t_3 - t_2) + I_o\cos\sqrt{\tfrac{1}{L_rC_r}}(t_2 - t_1) = 0$$

ゼロ電圧スイッチング(ZVS)共振形コンバータ

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

- 動作区間t3≦t≦t4
  - 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
      $$v_L=0$$

ゼロ電圧スイッチング(ZVS)共振形コンバータ

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

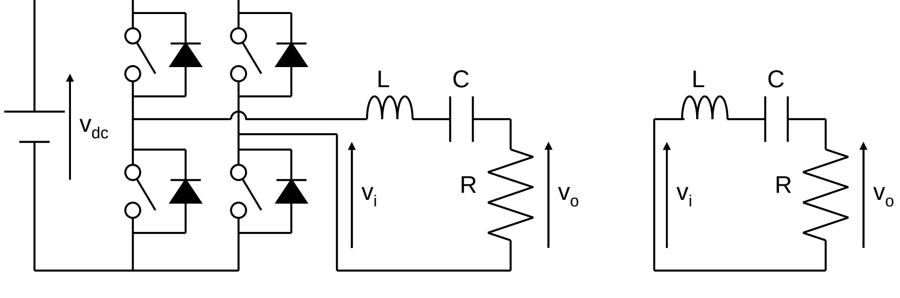
ゼロ電圧スイッチング(ZVS) 共振形コンバータ

- 出力電圧
  - Loの平均電圧は0となる

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

直列共振形コンバータ

- 直列共振インバータ部



直列共振形コンバータ
-インバータ部-

- 直列共振インバータ部
  - 負荷に対して，直列共振部(LC)を挿入
  - インバータ部は，矩形波電圧を出力
    - 共振部によりバンドパスフィルタされた出力となる
  - LC部の共振周波数を，スイッチング周波数に設定

直列共振形コンバータ
-インバータ部-

- 回路条件
  - RLC回路の回路方程式

$$\begin{cases} V_S = \left(j\omega L + \dfrac{1}{j\omega C} + R \right) I \\ V_O = RI \end{cases} \qquad \Rightarrow \qquad V_S = \left(j\omega L + \dfrac{1}{j\omega C} + R \right) \dfrac{V_O}{R}$$

  - 入出力電圧の比
    - 実数化して

$$\frac{V_O}{V_S} = \frac{R}{j\omega L + \dfrac{1}{j\omega C} + R} = \frac{R}{R + j\left(\omega L - \dfrac{1}{\omega C} \right)}$$

$$\left| \frac{V_O}{V_S} \right| = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \dfrac{1}{\omega C} \right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\dfrac{\omega L}{R} - \dfrac{1}{\omega CR} \right)^2}}$$

直列共振形コンバータ
-インバータ部-

- 共振条件
  - 虚数部が0 $\quad j\omega_0 L + \dfrac{1}{j\omega_0 C} = 0 \quad \Longrightarrow \quad \omega_0 = \dfrac{1}{\sqrt{LC}}$
  - LC共振部がフィルタとして動作
    - 矩形波に含まれる共振周波数成分

$$V_1 = \frac{1}{\pi}\left(\int_{-\pi}^{0} -V_{dc}\sin x dx + \int_{0}^{\pi} V_{dc}\sin x dx\right) = \frac{4V_{dc}}{\pi}$$

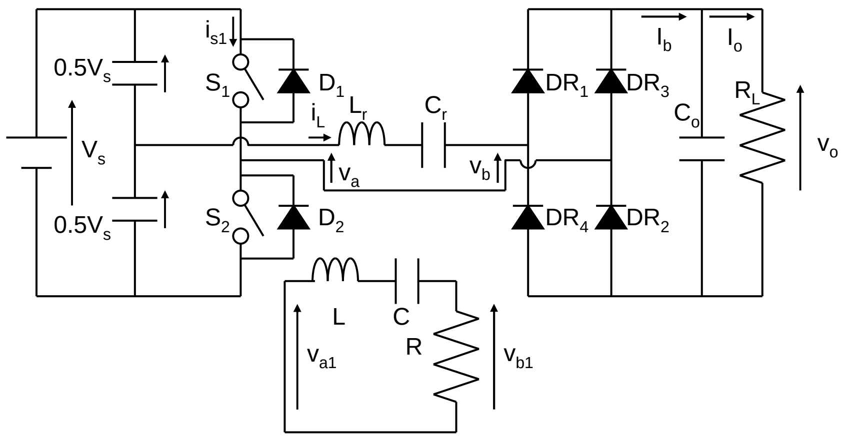
    - 共振回路部のフィルタ特性

$$Q = \frac{\omega L}{R} = \frac{1}{\omega CR}$$

      - 負荷が大きい方が(Rが小)フィルタ特性が良い
    - 共振周波数付近でスイッチングすることによる損失低減
      - 共振による電流零点生成
    - 周波数制御による，出力電圧制御

直列共振形コンバータ

- ハーフブリッジDC-DCコンバータ



直列共振形コンバータ
-DC-DCコンバータ-

- 回路構成
  - ハーフブリッジインバータ
  - 全波整流回路
- 直列共振部でインバータと整流回路を接続
- インバータ部は，矩形波電圧を出力
- LC部でインバータ出力がフィルタされる
- スイッチング周波数で，出力制御

直列共振形コンバータ

- 直列共振DC-DCコンバータの出力制御
  - ωs>ω0の時
    (スイッチング周波数が共振周波数より高い場合)
    - ターンオンZVS
    - ターンオフ≒ZCS(零ではない)
- 回路条件
  - インバータ部出力電圧と，整流器部電圧の関係
    - インバータ部出力電圧Va基本波成分(電源電圧Vs)

$$V_a = \frac{1}{\pi}\left(\int_{-\pi}^{0} -V_S \sin x dx + \int_{0}^{\pi} V_S \sin x dx\right) = \frac{4V_S}{\pi}$$

    - 整流器部交流電圧Vb基本波成分（直流電圧はV0で一定とする）

$$V_b = \frac{1}{\pi}\left(\int_{-\pi}^{0} -V_O \sin x dx + \int_{0}^{\pi} V_O \sin x dx\right) = \frac{4V_O}{\pi}$$

直列共振形コンバータ

- 回路条件
  – インバータ部出力電圧と，整流器部電圧の関係
    - 直列共振部の電流が正弦波 (振幅IL)
      – 直流出力電流平均値Io

$$I_O = \frac{1}{\pi}\left(\int_0^{\pi} I_L \sin x dx\right) = \frac{2I_L}{\pi}$$

    - 共振回路側から整流回路を見た実効抵抗Re
      – 整流回路部交流電流IL・電圧Vb振幅（共振周波数）

$$R_e = \frac{V_b}{I_L} = \frac{\frac{4V_O}{\pi}}{\frac{\pi I_O}{2}} = \frac{8}{\pi^2}\frac{V_O}{I_O} = \frac{8}{\pi^2}R_L$$

直列共振形コンバータ

- 整流器の実効抵抗Reに対する回路方程式
  – RLC回路の回路方程式
    - インバータ部Va(交流回路)
    - 整流器部Vb (直流回路)

$$\begin{cases} V_a = \frac{4V_S}{\pi} = \left(j\omega L + \frac{1}{j\omega C} + R_e\right) I_L \\ V_b = \frac{4V_O}{\pi} = R_e I_L \end{cases}$$

  – 入出力電圧の比
    - 実数化して

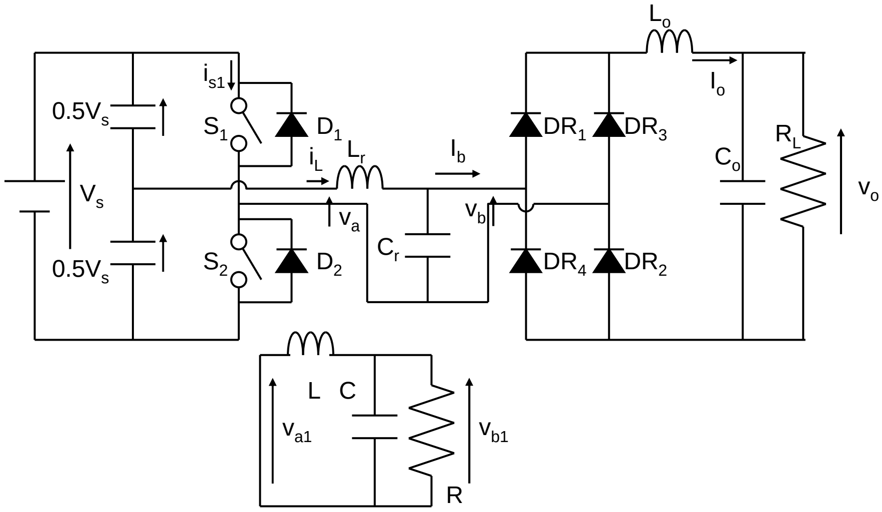
$$\left|\frac{V_O}{V_S}\right| = \frac{R_e}{\sqrt{R_e^{\,2} + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega L}{R_e} - \frac{1}{\omega C R_e}\right)^2}}$$

      – ωを変えることで変換比が変わる
      – Qが変わっても，最大の電圧比は1
      – 負荷が0となると出力電圧が制御できない

直列共振形コンバータ

- 直列共振DC-DCコンバータの出力制御
  スイッチング周波数が共振周波数より低い場合
  - ω0/2<ωs<ω0の時
    - ターンオン時
      - 順方向電圧・電流によるスイッチング損失
        - » 反対アームのダイオード電流を転流
    - ターンオフ時
      - 逆方向(ダイオード)電流となり, ZCS
  - ωs<ω0/2のとき
    - スイッチオン周期の間に, 共振波形が一周期以上
      - ターンオン・オフ共にZCS化可能
        - » 但し, 不連続導通

並列共振形コンバータ



並列共振形コンバータ

- 直列共振コンバータ回路図（全体）
  - 共振部のコンデンサCrを並列接続
    - Crの充電電圧極性で整流回路動作が決まる
  - 直流負荷側にリアクトルを挿入
    - 負荷電流を一定Ioに保つ(定電流出力)
      - 直列共振型は定電圧
  - 整流器部の入力
    - ±Ioの矩形波電流
    - 共振コンデンサ電圧
      - 共振周波数の正弦波電圧
      - 直流出力電圧を決定

並列共振形コンバータ

- 入出力の関係
  - 整流器負荷
    - 等価な交流抵抗Reとする
  - スイッチング周波数(ω)≒共振周波数において
    - インバータ部はスイッチング周波数成分(Va1)のみを考える

$$V_{a1} = \frac{2}{\pi}\int_0^{\pi} V_S \sin x dx = \frac{4V_S}{\pi}$$

  - 共振部
    - 共振部のインピーダンス

$$X_L = \omega L_r, X_C = \frac{1}{\omega C_r}$$

    - 共振コンデンサ部の正弦波電圧Vb1
    - 共振電流Ib1
      - （スイッチング角周波数ω）

並列共振形コンバータ

- 共振部の回路方程式(交流回路)
  - 共振Lでの電圧降下

$$V_{b1} = V_{a1} - jX_L I_{a1}$$

  - 共振Cと負荷抵抗Reは並列

$$V_{b1} = \frac{1}{\frac{1}{-jX_C} + \frac{1}{R_e}} I_{a1}$$

  - 入出力電圧比

$$V_{b1} = V_{a1} - jX_L V_{b1}\left(\frac{1}{-jX_C} + \frac{1}{R_e}\right)$$

$$V_{b1}\left(1 - \frac{X_L}{X_C} + j\frac{X_L}{R_e}\right) = V_{a1}$$

並列共振形コンバータ

- 回路条件
  - 交流部等価回路
    - 共振入力部と出力部の電圧比

$$\left|\frac{V_{b1}}{V_{a1}}\right| = \left|\frac{1}{1 - \frac{X_L}{X_C} + j\frac{X_L}{R_e}}\right|$$

    - 直流出力電圧Voと共振出力部電圧Vb1との関係

$$V_O = \frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} V_{b1}\sin x dx = \frac{V_{b1}}{\pi}\left[\cos x\right]_0^{\pi} = \frac{2V_{b1}}{\pi}$$

    - 直流出力電流Ioと共振出力部電流Ib1との関係

$$I_{b1} = \frac{2}{\pi}\int_0^{\pi} I_O \sin x dx = \frac{4}{\pi} I_O$$

    - 負荷抵抗RLと交流抵抗Reの関係

$$R_e = \frac{V_{b1}}{I_{b1}} = \frac{\frac{\pi}{2}V_O}{4\pi I_O} = \frac{\pi^2}{8}\frac{V_O}{I_O} = \frac{\pi^2}{8}R_L$$

並列共振形コンバータ

- 入出力電圧の比

$$V_s = \frac{\pi}{4} V_{a1}$$

$$V_O = \frac{2}{\pi} V_{b1}$$

$$\frac{V_O}{V_S} = \frac{\frac{2}{\pi} V_{b1}}{\frac{\pi}{4} V_{a1}} = \frac{8}{\pi^2} \frac{V_{b1}}{V_{a1}} = \frac{8}{\pi^2} \frac{1}{1 - \frac{X_L}{X_C} + j\frac{X_L}{R_e}}$$

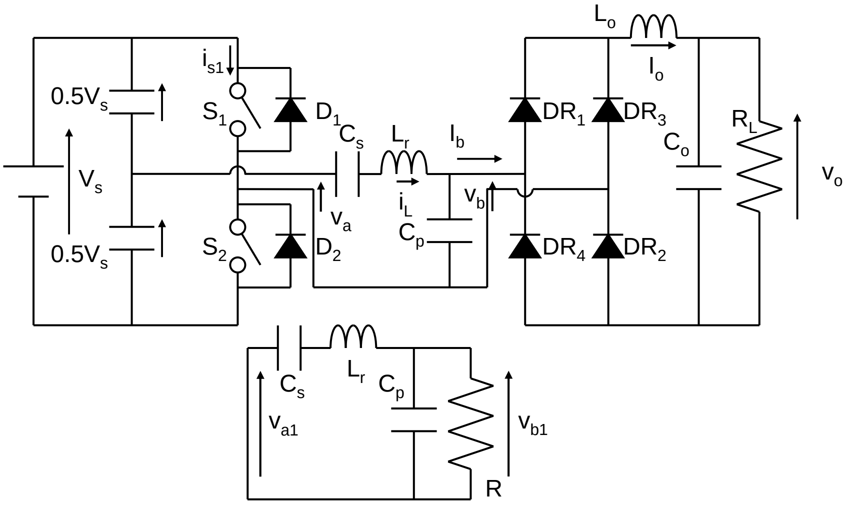
  - 実数化して

$$\left|\frac{V_O}{V_S}\right| = \frac{8}{\pi^2} \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{X_L}{X_C}\right)^2 + \frac{X_L}{R_e}^2}}$$

    – 直列共振型の方が出力電圧高い
    – Qによって，入出力電圧比最大値が変わる

$$Q = \frac{R_L}{\omega L_r}$$

直並列共振形コンバータ



直並列共振形コンバータ

- 回路条件
  - 整流器部以降は並列共振形とおなじ
  - スイッチング周波数成分ωを考える
    - 共振部の入出力電圧比

$$V_{a1} = I_{a1}\left(-jX_{Cs} + jX_L + \frac{1}{\frac{1}{-jX_{Cp}} + \frac{1}{R_e}}\right)$$

$$V_{b1} = V_{a1} - I_{a1}\left(-jX_{Cs} + jX_L\right)$$

$$= V_{a1} - \left(-jX_{Cs} + jX_L\right)\frac{V_{a1}}{-jX_{Cs} + jX_L + \frac{1}{\frac{1}{-jX_{Cp}} + \frac{1}{R_e}}}$$

$$= V_{a1}\frac{-\left(-jX_{Cs} + jX_L\right) - jX_{Cs} + jX_L + \frac{1}{\frac{1}{-jX_{Cp}} + \frac{1}{R_e}}}{-jX_{Cs} + jX_L + \frac{1}{\frac{1}{-jX_{Cp}} + \frac{1}{R_e}}}$$

$$= V_{a1}\frac{\frac{1}{\frac{1}{-jX_{Cp}} + \frac{1}{R_e}}}{-jX_{Cs} + jX_L + \frac{1}{\frac{1}{-jX_{Cp}} + \frac{1}{R_e}}} = V_{a1}\frac{1}{j\left(-X_{Cs} + X_L\right)\left(\frac{1}{-jX_{Cp}} + \frac{1}{R_e}\right) + 1}$$

$$\frac{V_{b1}}{V_{a1}} = \frac{1}{j\left(-X_{Cs} + X_L\right)\left(\frac{1}{-jX_{Cp}} + \frac{1}{R_e}\right) + 1}$$

$$= \frac{1}{1 + \frac{X_{Cs} - X_L}{X_{Cp}} + j\frac{-X_{Cs} + X_L}{R_e}}$$

$$V_s = \frac{\pi}{4}V_{a1}$$

$$V_O = \frac{2}{\pi}V_{b1}$$

直並列共振形コンバータ

- 回路条件
  - 整流器部以降は並列共振形とおなじ
  - スイッチング周波数成分ωを考える
    - 共振部の入出力電圧比

$$\frac{V_O}{V_S} = \frac{\frac{2}{\pi}V_{b1}}{\frac{\pi}{4}V_{a1}} = \frac{8}{\pi^2}\frac{V_{b1}}{V_{a1}} = \frac{8}{\pi^2}\frac{1}{1 + \frac{X_{Cs} - X_L}{X_{Cp}} + j\frac{-X_{Cs} + X_L}{R_e}}$$

$$\left|\frac{V_O}{V_S}\right| = \frac{8}{\pi^2}\frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{X_{Cs} - X_L}{X_{Cp}}\right)^2 + \left(\frac{-X_{Cs} + X_L}{R_e}\right)^2}}$$

$$= \frac{8}{\pi^2}\frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{C_p}{C_s} - \omega^2 LC_p\right)^2 + \left(\frac{\omega L}{R_e} - \frac{1}{\omega C_s R_e}\right)^2}}$$

課題

- 動作を解析せよ