

応用電力変換工学

舟木剛

第11回 共振形コンバータ
(ソフトスイッチング)

平成19年12月19日

ソフトスイッチング

- ソフトスイッチング
 - スイッチが下記の条件で、状態遷移(スイッチング)する
 - 印加電圧が0
 - 通流電流が0
 - 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

- 回路図(全体)
 - LCの共振により、ソフトスイッチング(ZCS)を実現
- 回路条件(周期定常状態)
 - 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 のリップルが少ない。 $I_o \doteq$ 一定
 - $L_o \gg L_r$
 - 損失無視

ゼロ電流スイッチング(ZCS) 共振形コンバータ

- 動作の概略(定常状態)
 - スイッチON($t=0$)
 - 直前は、負荷電流 i_o がダイオードを環流(C_r の電圧 $v_c=0$)
 - 電源側、共振回路の L_r により、電源電流 i_L はゆっくり立ち上がる(ダイオードONのまま)→図
 - i_L が i_o になるまで、ダイオードに電流が流れる
 - $i_L > i_o$ で、ダイオードがOFF($t=t_1$)
 - ダイオードOFF時→図
 - 出力電流 i_o 一定の仮定より、 $i_c = i_L - i_o$ が C_r を充電
 - » C_r の電圧 v_c の上昇と共に、 i_L が減少
 - » $i_L \leq 0$ となったところで、スイッチが電流を流さなくなる。(バイポーラ素子)。 $(t=t_2)$
 - » コンデンサ C_r の電圧 v_c が、ダイオードを逆バイアスしつづける

ゼロ電流スイッチング(ZCS) 共振形コンバータ

- 動作の概略(定常状態)
 - スイッチOFF($t=t_3$)
 - コンデンサ C_r に電圧 v_c が残っている間にスイッチOFF
 - 電流が流れていないので、スイッチング損失無し
 - $I_o = -i_c$ のため、 C_r の電圧 v_c は一定比率で低下
 - C_r の電圧 $v_c=0$ となると、ダイオードON($t=t_4$)
 - $I_d = I_o$
- 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

ゼロ電流スイッチング(ZCS) 共振形コンバータ

- 動作区間 $0 \leq t \leq t_1$

- L_r の電流 i_L

- 初期値 $i_L(t=0)=0$
 - 電源電圧 V_s

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

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

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

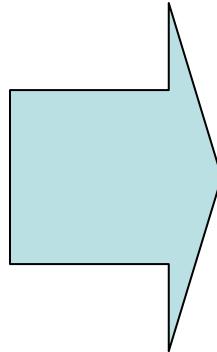
ゼロ電流スイッチング(ZCS) 共振形コンバータ

- 動作区間 $t_1 \leq t \leq t_2$
 - 初期値 $v_c(t=t_1)=0$

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

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

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



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

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

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

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

$$C_r s V_c = I_c$$

ゼロ電流スイッチング(ZCS) 共振形コンバータ

- 動作区間 $t_1 \leq t \leq t_2$

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

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

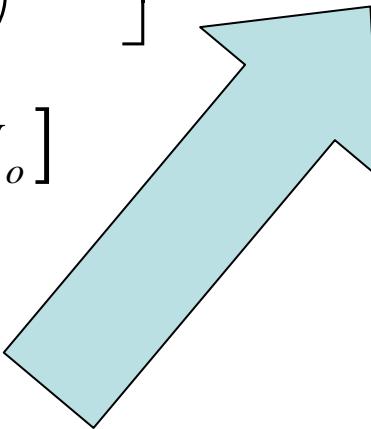
$$= \frac{V_s}{s} - L_r s I_C$$

$$C_r s V_c = I_c$$



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

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



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

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

ゼロ電流スイッチング(ZCS) 共振形コンバータ

- 動作区間 $t_1 \leq t \leq t_2$
 - 各部の電圧・電流

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

$$\begin{aligned} i_L(t) &= I_o + i_c(t) \\ &= I_o + V_s \sqrt{\frac{C_r}{L_r}} \sin \sqrt{\frac{1}{L_r C_r}} (t - t_1) \end{aligned}$$

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

ゼロ電流スイッチング(ZCS) 共振形コンバータ

- 動作区間 $t_1 \leq t \leq t_2$
 - t_2 を求める

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

$$= 0$$

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

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

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

ゼロ電流スイッチング(ZCS) 共振形コンバータ

- 動作区間 $t_2 \leq t \leq t_3$
 - コンデンサ C_r が $-I_o$ で放電

$$v_c(t) = \frac{1}{C_r} \int_{t_2}^t i_c dt + v_c(t_2)$$
$$-\frac{I_o}{C_r}(t_3 - t_2) + v_c(t_2) = 0$$

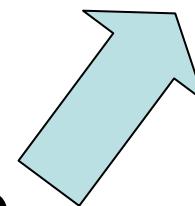
$$= \frac{1}{C_r} \int_{t_2}^t -I_o dt + v_c(t_2)$$

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

- T3 でコンデンサの電圧が 0

$$v_c(t_3) = 0$$

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



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 $t_3 \leq t \leq t_4$
 - インダクタ電流
 - スイッチOFF
 - 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

$$i_c = -I_o$$

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 W_o と入力エネルギー W_s の関係

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

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

ゼロ電流スイッチング(ZCS) 共振形コンバータ

- 出力電圧

$$\begin{aligned} W_o &= W_s \\ V_o I_o T &= V_s \left\{ \frac{V_s}{2L_r} t_1^2 + I_o (t_2 - t_1) - V_s C_r \left[\cos \sqrt{\frac{1}{L_r C_r}} (t_2 - t_1) - 1 \right] \right\} \\ V_o &= \frac{V_s}{I_o T} \left\{ \frac{V_s}{2L_r} t_1^2 + I_o (t_2 - t_1) - V_s C_r \left[\cos \sqrt{\frac{1}{L_r C_r}} (t_2 - t_1) - 1 \right] \right\} \\ &= \frac{V_s}{T} \left\{ \frac{V_s}{I_o 2L_r} t_1^2 + (t_2 - t_1) - \frac{1}{I_o} V_s C_r \left[\cos \sqrt{\frac{1}{L_r C_r}} (t_2 - t_1) - 1 \right] \right\} \\ I_o &= \frac{C_r}{t_3 - t_2} v_c(t_2) \\ &= \frac{C_r}{t_3 - t_2} V_s \left[1 - \cos \sqrt{\frac{1}{L_r C_r}} (t_2 - t_1) \right] \end{aligned}$$

ゼロ電流スイッチング(ZCS) 共振形コンバータ

- 出力電圧

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

ゼロ電圧スイッチング(ZVS) 共振形コンバータ

- 回路図(全体)
 - LCの共振により、ソフトスイッチング(ZVS)を実現
- 回路条件(周期定常状態)
 - 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。 $I_o \doteq$ 一定
 - $L_o \gg L_r$
 - 損失無視

ゼロ電圧スイッチング(ZVS) 共振形コンバータ

- 動作の概略(定常状態)
 - スイッチOFF($t=0$)
 - 直前($t<0$)
 - スイッチON。(電源からエネルギー供給)
 - D1,Dsオフ(電流0)
 - Crの電圧 $v_c=0$
 - スイッチオフ時点で、スイッチ電圧0(ZVS) → 図
 - 共振回路の L_r により、電源電流 $i_L=I_0$ を保つ
 - i_L が C_r を充電
 - » 電圧 v_c が、時間比例で上昇
 - D1がON($t=t_1$)
 - $V_c=V_s$ になると、D1がONする → 図
 - i_L 一定なので、 $V_{Lr}=0$
 - » C_r,L_r と V_s の直列共振回路
 - » 発振開始

ゼロ電圧スイッチング(ZVS) 共振形コンバータ

- 動作の概略(定常状態)
 - DSがON($t=t_2$)
 - C_r, L_r, V_s の共振で $v_c=0$ まで低下
 - DSがON
 - » $i_L < 0$ を流す
 - L_r に印加した V_s が i_L を増やす
 - i_L が時間比例で増加
 - DSがON中に, SをONしておく
 - スイッチ電圧0(ZVS)
 - DSがOFF($t=t_3$)
 - $i_L > 0$ となる時点でDSがOFF → 図
 - i_L はスイッチSを流れる
 - D1がOFF($t=T$)
 - $i_L = i_o$ となると, D1がOFF → 図
 - 最初に戻る

ゼロ電圧スイッチング(ZVS) 共振形コンバータ

- 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 |

ゼロ電圧スイッチング(ZVS) 共振形コンバータ

- 動作区間 $0 \leq t \leq t_1$
 - L_r 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

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

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

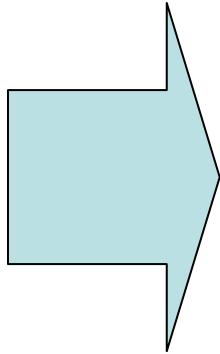
$$t_1 = \frac{C_r}{I_o} V_s$$

ゼロ電圧スイッチング(ZVS) 共振形コンバータ

- 動作区間 $t_1 \leq t \leq t_2$
 - 初期値 $v_{c0} = V_s, i_{L0} = I_o$

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

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



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

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

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

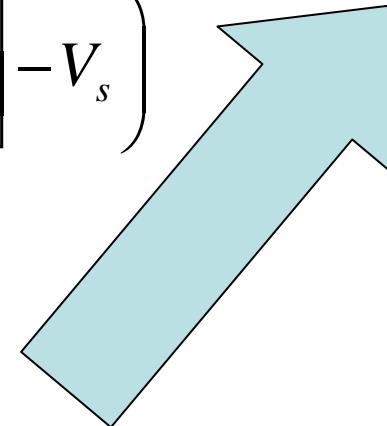
$$C_r (sV_c - V_s) = I_L$$

ゼロ電圧スイッチング(ZVS) 共振形コンバータ

- 動作区間 $t_1 \leq t \leq t_2$

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

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



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

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

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

ゼロ電圧スイッチング(ZVS) 共振形コンバータ

- 動作区間 $t_1 \leq t \leq t_2$

- 各部の電圧・電流

- 時間軸を t_1 に合せて

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

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

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

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

ゼロ電圧スイッチング(ZVS) 共振形コンバータ

- 動作区間 $t_1 \leq t \leq t_2$
 - t_2 を求める($v_c=0$)

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

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

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

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

ゼロ電圧スイッチング(ZVS) 共振形コンバータ

- 動作区間 $t_2 \leq t \leq t_3$
 - リアクトル L_r が電源電圧 V_s で充電

$$\begin{aligned} i_L(t) &= \frac{1}{L_r} \int_{t_2}^t V_s dt + i_L(t_2) \\ &= \frac{1}{L_r} V_s (t - t_2) + I_o \cos \sqrt{\frac{1}{L_r C_r}} (t_2 - t_1) \end{aligned}$$

- T3でリアクトル電流が I_o

$$\begin{aligned} i_L(t_3) &= \frac{1}{L_r} V_s (t_3 - t_2) + I_o \cos \sqrt{\frac{1}{L_r C_r}} (t_2 - t_1) = 0 \\ \frac{1}{L_r} V_s (t_3 - t_2) &= -I_o \cos \sqrt{\frac{1}{L_r C_r}} (t_2 - t_1) \quad t_3 = -\frac{L_r}{V_s} I_o \cos \sqrt{\frac{1}{L_r C_r}} (t_2 - t_1) + t_2 \end{aligned}$$

ゼロ電圧スイッチング(ZVS) 共振形コンバータ

- 動作区間 $t_3 \leq t \leq t_4$
 - 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 v_x

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

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

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

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

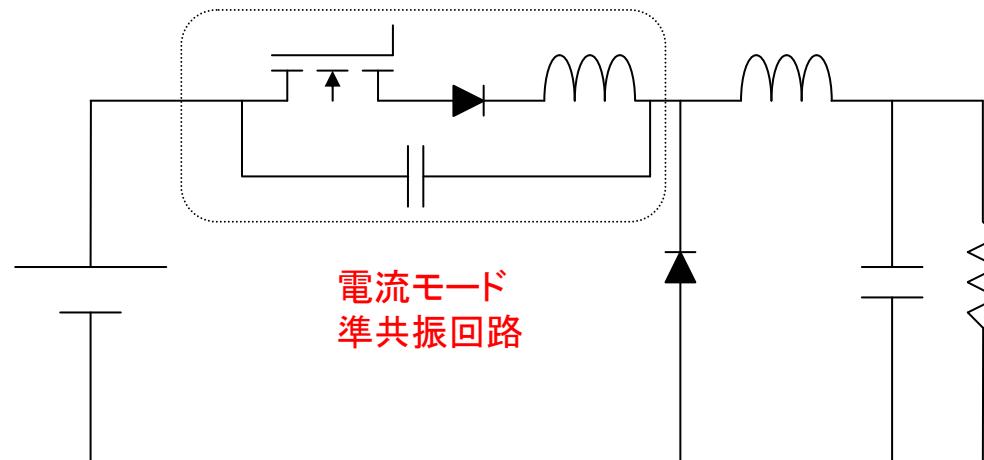
ゼロ電圧スイッチング(ZVS) 共振形コンバータ

- 出力電圧
 - L_o の平均電圧は0となる

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

宿題

- 共振コンバータ(ZCS)の回路
 - 動作を解析せよ



宿題

- 共振コンバータ(ZVS)の回路シミュレーション
 - 定常状態における理論値比較
 - 昇降圧比
 - 限界
 - 連続導通時, 不連続導通時
 - ターンオン・オフ時の境界値
 - リップル率
 - 連続導通・不連続導通
 - 効率(入出力電力比)