

応用電力変換工学

舟木剛

第11回 共振形コンバータ (ZVS)

平成18年12月13日

ゼロ電流スイッチング(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。 $I_o = \text{一定}$
 - $L_o \gg L_r$
 - 損失無視

ゼロ電流スイッチング(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Cr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、 $V_{Lr}=0$
 - Cr,Lrと V_s の直列共振回路
 - 発振開始

ゼロ電流スイッチング(ZVS) 共振形コンバータ

- 動作の概略(定常状態)

- DSがON($t=t_2$)
 - Cr,Lr, 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($t=T$)
 - $i_L = I_0$ となると、D1がOFF → 図
 - 最初に戻る

ゼロ電流スイッチング(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

ゼロ電流スイッチング(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

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

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

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

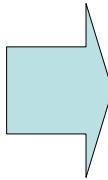
ゼロ電流スイッチング(ZVS) 共振形コンバータ

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

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

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

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



$$\begin{aligned} &= \frac{V_s}{s} - L_r(sI_L - I_o) \\ C_r(sV_c - V_{c0}) &= \\ C_r(sV_c - V_s) &= I_L \end{aligned}$$

ゼロ電流スイッチング(ZVS) 共振形コンバータ

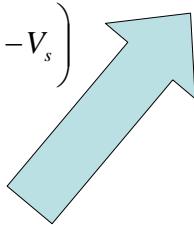
- 動作区間 $t_1 \leq t \leq t_2$

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

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

$$\begin{aligned} &= C_r \left(s \left[\frac{V_s}{s} - L_r(sI_L - I_o) \right] - V_s \right) \\ &= -sL_r C_r(sI_L - I_o) \end{aligned}$$

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



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

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

ゼロ電流スイッチング(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

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

ゼロ電流スイッチング(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 ($v_c = 0$)

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

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

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

ゼロ電流スイッチング(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

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

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

ゼロ電流スイッチング(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

$$v_L = 0$$

ゼロ電流スイッチング(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

- $0 \leqq t \leqq t_1$ $v_x(t) = V_s - \frac{I_o t}{C_r} = V_s \left[1 - \frac{t}{t_1} \right]$
- $t_1 \leqq t < t_2$ $v_x(t) = 0$
- $t_2 \leqq t < t_3$ $v_x(t) = 0$
- $t_3 \leqq t < T$ $v_x(t) = V_s$

ゼロ電流スイッチング(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(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)