

応用電力変換工学

舟木剛

第10回 共振形コンバータ (ソフトスイッチング)

平成18年12月06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 のリプルが少ない。 $I_o \approx \text{一定}$
 - $L_o \gg L_r$
 - 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=t2)
 - » 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Crに電圧vc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, Crの電圧vcは一定比率で低下
 - Crの電圧vc=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 $v_c(t=t_1)=0$

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

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

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



$$\begin{aligned} V_c &= \frac{V_s}{s} - L_r (sI_L - I_{L(t_1)}) \\ &= \frac{V_s}{s} - L_r (sI_L - I_o) \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} C_r (sV_c - V_{c(t_1)}) &= \\ C_r sV_c &= I_c \end{aligned}$$

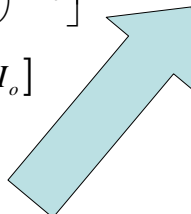
ゼロ電流スイッチング(ZCS) 共振形コンバータ

- 動作区間 $t_1 \leq t \leq t_2$

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

$$C_r sV_c = I_c$$

$$\begin{aligned} I_c &= C_r s \left(\frac{V_s}{s} - L_r sI_c \right) \\ &= C_r (V_s - L_r s^2 I_c) \end{aligned}$$



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

- T3でコンデンサの電圧が0

$$v_c(t_3) = 0$$



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

$$i_L = 0$$

- 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

$$i_c = -I_o$$

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

$$W_o = W_s$$

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

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

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

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

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

ゼロ電流スイッチング(ZCS) 共振形コンバータ

- 出力電圧

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

宿題

- 共振コンバータ(ZCS)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)