

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 のリップルが少ない。 $i_o \approx \text{一定}$
 - $L_o \gg L_r$
 - 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)。 $(t=t_2)$
 - » 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=t3)
 - 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
 - $Io=ic$ 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=t4)
 - $Id=Io$
- 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

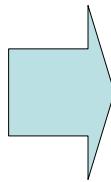
- 動作区間 $t_1 \leq t \leq t_2$

– 初期値 $v_c(t=t_1)=0$

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

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

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



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

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

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

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

$$C_r sV_c = I_c$$

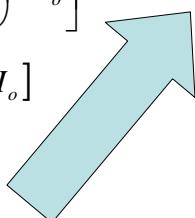
ゼロ電流スイッチング(ZCS) 共振形コンバータ

- 動作区間 $t_1 \leq t \leq t_2$

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

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

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



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

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

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

$$C_r sV_c = I_c$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

– 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

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

ゼロ電流スイッチング(ZCS) 共振形コンバータ

- **出力電圧**

$$\begin{aligned}
 W_o &= W_s \\
 V_o I_o T &= V_s \left\{ \frac{V_s}{2L_r} t1^2 + I_o (t2 - t1) - V_s C_r \left[\cos \sqrt{\frac{1}{L_r C_r}} (t2 - t1) - 1 \right] \right\} \\
 V_o &= \frac{V_s}{I_o T} \left\{ \frac{V_s}{2L_r} t1^2 + I_o (t2 - t1) - V_s C_r \left[\cos \sqrt{\frac{1}{L_r C_r}} (t2 - t1) - 1 \right] \right\} \\
 &= \frac{V_s}{T} \left\{ \frac{V_s}{I_o 2L_r} t1^2 + (t2 - t1) - \frac{1}{I_o} V_s C_r \left[\cos \sqrt{\frac{1}{L_r C_r}} (t2 - t1) - 1 \right] \right\} \\
 I_o &= \frac{C_r}{t3 - t2} v_c(t2) \\
 &= \frac{C_r}{t3 - t2} V_s \left[1 - \cos \sqrt{\frac{1}{L_r C_r}} (t2 - t1) \right]
 \end{aligned}$$

ゼロ電流スイッチング(ZCS) 共振形コンバータ

- 出力電圧

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

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)