応用電力変換工学

舟木剛

第12回　直列・並列・直並列共振形コンバータ

平成18年12月20日

直列共振形コンバータ

- 直列共振インバータ部回路図（全体）
  - 負荷抵抗Rに対して，直列にLCを挿入
  - インバータ部は，矩形波電圧を出力
  - LC部の共振周波数を，スイッチング周波数に設定
- 回路条件
  - RLC回路の回路方程式 $\begin{cases} V_S = \left(j\omega L + \dfrac{1}{j\omega C} + R \right) I \\ V_O = RI \end{cases}$

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

  - 入出力電圧の比 $\dfrac{V_O}{V_S} = \dfrac{R}{j\omega L + \dfrac{1}{j\omega C} + R} = \dfrac{R}{R + j\left(\omega L - \dfrac{1}{\omega C} \right)}$
    - 実数化して

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

直列共振形コンバータ

- 共振条件
  - 虚数部が0 $j\omega_0 L + \dfrac{1}{j\omega_0 C} = 0 \Longrightarrow \omega_0 = \dfrac{1}{\sqrt{LC}}$
  - LC共振部がフィルタとして動作
    - 共振周波数成分のみ出力

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

    - 共振回路部のフィルタ特性 $Q = \dfrac{\omega L}{R} = \dfrac{1}{\omega CR}$
      - 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
    - 周波数制御による，出力電圧制御

直列共振形コンバータ

- 直列共振DC-DCコンバータ回路図（全体）
  - 直列共振インバータに整流回路を接続
  - 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
    - ターンオンZVS
    - ターンオフ≒ZCS
- 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
    - 整流器部Vb

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

  - 入出力電圧の比
    - 実数化して

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

      - 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

- スイッチング周波数が共振周波数に対して低い時
  - Ω ω0/2<ωs<ω0のとき
    - ターンオン時
      - 順方向電圧・電流によるスイッチング損失
    - ターンオフ時
      - 逆方向（ダイオード）電流となり，ZCS
  - Ω 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
      - ターンオン・オフ共にZCS化可能
        - » 但し，不連続導通

宿題

- 直列共振コンバータ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　　　w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）

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
  - 整流器部の入力
    - ±Ioの矩形波電流
    - コンデンサ電圧
      - 直流出力電圧を決定

並列共振形コンバータ

- 回路条件
  - 交流部等価回路
    - 交流負荷抵抗RLを等価な交流抵抗Reとする
  - スイッチング周波数成分を考える
    - インバータ部は，スイッチング周波数の交流電圧源

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

    - 共振コンデンサ部は正弦波電圧を出力
      - 共振部のインピーダンス（スイッチング角周波数ω）
      - 整流器入力交流電圧基本波の振幅Vb1

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

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

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

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

$$= V_{a1}\frac{\frac{1}{\frac{1}{-jX_C}+\frac{1}{R_e}}}{jX_L + \frac{1}{\frac{1}{-jX_C}+\frac{1}{R_e}}} = V_{a1}\frac{1}{\frac{jX_L}{-jX_C} + \frac{jX_L}{R_e} + 1} = V_{a1}\frac{1}{1 - \frac{X_L}{X_C} + j\frac{X_L}{R_e}}$$

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

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

    - 交流負荷抵抗RLを等価な交流抵抗Reとの関係

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

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

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

    - 直列共振型より出力電圧高い
    - 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

- 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

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

$$\begin{aligned}
V_{b1} &= V_{a1} - I_{a1}\left(-jX_{Cs} + jX_L\right) \\
&= V_{a1} - \left(-jX_{Cs} + jX_L\right) \frac{V_{a1}}{-jX_{Cs} + jX_L + \frac{1}{\frac{1}{-jX_{Cp}} + \frac{1}{R_e}}} \\
&= V_{a1} \frac{-\left(-jX_{Cs} + jX_L\right) - jX_{Cs} + jX_L + \frac{1}{\frac{1}{-jX_{Cp}} + \frac{1}{R_e}}}{-jX_{Cs} + jX_L + \frac{1}{\frac{1}{-jX_{Cp}} + \frac{1}{R_e}}} \\
&= V_{a1} \frac{\frac{1}{\frac{1}{-jX_{Cp}} + \frac{1}{R_e}}}{-jX_{Cs} + jX_L + \frac{1}{\frac{1}{-jX_{Cp}} + \frac{1}{R_e}}} = V_{a1} \frac{1}{j\left(-X_{Cs} + X_L\right)\left(\frac{1}{-jX_{Cp}} + \frac{1}{R_e}\right) + 1}
\end{aligned}$$

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

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

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

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

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

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

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