応用電力変換工学

舟木剛

第3回　本日のテーマ

直流-直流変換

平成16年10月27日

DC-DCコンバータ

- 本授業で対象とするのは
  - スイッチモードDC-DCコンバータ
  - スイッチング電源とも呼ぶ
- 比較対象となるのは
  - リニアDC-DCコンバータ
  - リニアレギュレータとも呼ぶ

リニア電圧レギュレータとは

- リニアレギュレータの回路図と等価回路図
- 出力電圧は次式で表される

$$V_o = I_L R_L$$

- 負荷電流をトランジスタで制御
  - ベース電流を調整
  - トランジスタはベース電流の線形領域で使用
    - 通常のパワエレ回路の場合ベース電流は飽和領域もしくはカットオフ領域で使用
  - トランジスタは可変抵抗として振舞う

リニア電圧レギュレータの得失

- 効率が悪い
  - 負荷電力

$$P_L = V_o I_L$$

  - トランジスタで消費される電力

$$P_{Tr} = V_{CE} I_L$$ 但し，ベース電流は小さいとして無視

  - 特に高い電圧を低い電圧に変換するときに顕著

スイッチングコンバータ

- スイッチングコンバータ回路図と等価回路図
  - 回路図自体はリニアレギュレータと同じ
- リニアレギュレータの効率改善
- トランジスタを電子スイッチとして動作させる
  - （周期的に）オン・オフ動作を繰り返す
    - BJTの場合飽和とカットオフ
- DCチョッパーとも言う
- 理想スイッチの場合損失は発生しない
  - 実際は理想的でないので損失が発生する

スイッチングコンバータの出力電圧

- 出力電圧の平均値（直流成分）

$$V_o = \frac{1}{T}\int_0^T v_o(t)dt = \frac{1}{T}\int_0^{DT} V_s dt = V_s D$$

- 出力電圧はデューティ比Dを調整して制御
  – デューティ比はスイッチのオン・オフ時間比

$$D \equiv \frac{t_{on}}{t_{on}+t_{off}} = \frac{t_{on}}{T} = t_{on} f$$

fをスイッチング周波数という

- ここらへんは学部パワエレの講義でやっているはず

バック(Buck)コンバータ

※BackではなくBuck

Buck:振り落とす（他動）

- バックコンバータの回路図
  - オン･オフ時各々の等価回路図
  - Cはローパスフィルタのために使用
    - 用途によっては不要
- （環流）ダイオード
  - スイッチオフ時の電流経路を形成
  - スイッチオン時は逆バイアスされオフ
- ダウンコンバータとも呼ぶ

バックコンバータの動作解析

- 仮定
  - 回路動作を周期定常状態とする
  - スイッチオン中，ダイオードはオフしている
  - インダクタに流れる電流は，各スイッチ動作期間中正
    - 連続導通という
      - 不連続導通とは，スイッチ動作中にLの電流が0になる場合
  - スイッチング周期T
    - スイッチオン期間DT
    - オフ期間T-DT
  - 各部品は理想的
  - フィルタコンデンサ容量は充分大きい

バックコンバータの動作状態の表現

- 仮定に基づいて
  - Lに流れる電流は周期的　$i_L(t+T)=i_L(t)$
  - Lの平均電圧は0　$V_L = \frac{1}{T}\int_0^t v_L(\lambda)d\lambda = 0$
  - Cの平均電流は0　$I_C = \frac{1}{T}\int_0^t i_C(\lambda)d\lambda = 0$
  - 電源の供給電力は，負荷の消費電力に等しい

$$P_S = P_O \quad (+\text{損失})$$

バックコンバータ・スイッチオン時

- Lに印加されている電圧　絵

$$v_L = V_S - V_O = L\frac{di_L}{dt}$$

  – Lに流れる電流の微分方程式

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_S - V_O}{L}$$

    - 電流は直線的に増加（Cを大きいとするとV_O一定）　絵

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_S - V_O}{L} \Rightarrow \Delta i_{L,on} = \frac{V_S - V_O}{L}DT$$

バックコンバータ･スイッチオフ時

- Lに印加されている電圧
  - 電源電圧は縁切りされる

$$v_L = -V_O = L\frac{di_L}{dt}$$

  - Lに流れる電流の微分方程式

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{-V_O}{L}$$

    - 電流は直線的に減少（Cを大きいとするとV_O一定）

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{(1-D)T} = \frac{-V_O}{L} \quad \Rightarrow \quad \Delta i_{L,off} = \frac{-V_O}{L}(1-D)T$$

バックコンバータ･Lの電流

- 定常状態では一周期後には同じ電流値となる

$$\Delta i_{L,on} + \Delta i_{L,off} = 0$$

- 電源電圧と出力電圧の関係は

$$\frac{V_S - V_O}{L} DT + \frac{-V_O}{L}(1-D)T = 0 \quad \Rightarrow \quad V_O = V_S D$$

- 別解
  - Lに印加される電圧の平均が零となる事から

$$V_L = (V_S - V_O)DT - V_O(1-D)T = 0 \quad \Rightarrow \quad V_O = V_S D$$

バックコンバータ・電流脈動

- Lの平均電流と負荷の平均電流は等しい
  - Cの平均電流は零

$$I_L = I_R = \frac{V_O}{R}$$

- 電流の最大・最小値

$$I_{\max} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_O}{R} + \frac{1}{2}\left[\frac{V_O}{L}(1-D)T\right] = V_O\left[\frac{1}{R} + \frac{1-D}{2Lf}\right]$$

$$I_{\min} = I_L - \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_O}{R} - \frac{1}{2}\left[\frac{V_O}{L}(1-D)T\right] = V_O\left[\frac{1}{R} - \frac{1-D}{2Lf}\right]$$

バックコンバータ･連続導通

- 連続導通となるにはI_{min}が0以上
- 連続導通と不連続導通の境界

$$I_{\min} = 0 = V_O \left[\frac{1}{R} - \frac{1-D}{2Lf} \right]$$

$$\frac{1}{R} - \frac{1-D}{2Lf} = 0$$

- 連続導通となるLの最小値

$$L_{\min} = \frac{(1-D)R}{2f}$$

バックコンバータ･電圧脈動

- Cの電流 $I_C = I_L - I_R$
- Cの電荷と電圧の関係 $Q = CV_O$
  - 充電電荷について

$$\Delta Q = C\Delta V_O = \frac{1}{2}\frac{T}{2}\frac{\Delta i_L}{2} = \frac{T\Delta i_L}{8}$$

$$\Delta V_O = \frac{T\Delta i_L}{8C}$$

$$= \frac{T}{8C}\frac{V_O}{L}(1-D)T = \frac{V_O(1-D)}{8LCf^2}$$

- リップル率

$$\frac{\Delta V_O}{V_O} = \frac{1-D}{8LCf^2}$$

ブースト(Boost)コンバータ

出力電圧が入力より大

- バックコンバータの回路図　　絵
  - オン･オフ時各々の等価回路図
  - Cはローパスフィルタのために使用
- 動作解析
  - 仮定
    - 定常状態
    - スイッチング周期T,デューティ比D
    - Lの電流は連続
    - Cは十分大きく, 電圧がV_Oに一定に保たれる
    - 理想素子

ブーストコンバータ･スイッチON時

- Lを含む経路に対するKVLより

$$v_L = V_S = L\frac{di_L}{dt}$$

  – 電源電圧は一定より
    - 電流は一定の割合で増加

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_S}{L}$$

  – スイッチオン時に増加する電流は

$$\Delta i_{L,on} = \frac{V_S DT}{L}$$

ブーストコンバータ・スイッチOFF時

- スイッチOFFの瞬間，Lを流れる電流がダイオードを流れる経路に変更する
  - 転流(commutation)という
  - この時のKVLより

$$v_L = V_S - V_O = L\frac{di_L}{dt} \Rightarrow \frac{di_L}{dt} = \frac{V_S - V_O}{L}$$

  - Cが大きくV_Oが一定の仮定より
    - 電流は一定の割合で減少

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{(1-D)T} = \frac{V_S - V_O}{L}$$

  - スイッチオフ時に増加する電流は

$$\Delta i_{L,off} = \frac{(V_S - V_O)(1-D)T}{L}$$

ブーストコンバータの出力

- 定常状態ではLに流れる電流は一周期後に同じ値となる

$$\Delta i_{L,on} + \Delta i_{L,off} = 0$$

⇨

$$\frac{V_S DT}{L} + \frac{(V_S - V_O)(1-D)T}{L} = 0$$

$$V_S(D+1-D) - V_O(1-D) = 0$$

- 出力電圧

$$V_O = \frac{V_S}{1-D}$$

  – ブーストコンバータの出力は入力より大となる

- Lに印加される電圧の平均は零となる

$$V_L = V_S D + (V_S - V_O)(1-D) = 0$$

ブーストコンバータ･Lに流れる電流

- 出力電力
  - Cの電圧一定の仮定

$$P_O = \frac{{V_O}^2}{R}$$

- 入力の平均電力はLに流れる平均電流で表される

$$V_S I_L = \frac{{V_O}^2}{R} = \frac{\left(\dfrac{V_S}{1-D}\right)^2}{R} = \frac{{V_S}^2}{(1-D)^2 R}$$

- Lに流れる平均電流は

$$I_L = \frac{V_S}{(1-D)^2 R}$$

ブーストコンバータ･Lに流れる電流

- 最大･最小電流値

$$I_{\max} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_S}{(1-D)^2 R} + \frac{V_S DT}{2L}$$

$$I_{\min} = I_L - \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_S}{(1-D)^2 R} - \frac{V_S DT}{2L}$$

- 電流が連続となる限界

$$I_{\min} = 0 = \frac{V_S}{(1-D)^2 R} - \frac{V_S DT}{2L} \quad \Rightarrow \quad \frac{V_S}{(1-D)^2 R} = \frac{V_S DT}{2L} = \frac{V_S D}{2Lf}$$

  – Lの最小値 $\quad L_{\min} = \frac{D(1-D)^2 R}{2f}$

ブーストコンバータ･出力電圧脈動

- 電流の計算はC=∞と仮定
- 電流値とCを用いて電圧脈動を評価
  - – オン時の放電電荷
    - 出力電圧一定の時，負荷電流=Cの電流 $I_C = -\dfrac{V_O}{R}$
    - 電圧変化をΔV_Oとすると $\left|\Delta Q\right| = \left(\dfrac{V_O}{R}\right) DT = C\Delta V_O$

$$\Delta V_O = \frac{V_O DT}{RC} = \frac{V_O D}{RCf}$$

- 電圧脈動は $\left|\dfrac{\Delta V_O}{V_O}\right| = \dfrac{D}{RCf}$

バックブースト(Buck-Boost)コンバータ

出力電圧は入力電圧の大小どちらも可

- バックコンバータの回路図　　絵
  - オン･オフ時各々の等価回路図
  - Cはローパスフィルタのために使用
- 動作解析
  - 仮定
    - 定常状態
    - スイッチング周期T,デューティ比D
    - Lの電流は連続
    - Cは十分大きく, 電圧がV_Oに一定に保たれる
    - 理想素子

バックブーストコンバータ・スイッチON時

- Lを含む経路に対するKVLより

$$v_L = V_S = L \frac{di_L}{dt}$$

  - 電源電圧は一定より
    - 電流は一定の割合で増加

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_S}{L}$$

  - スイッチオン時に増加する電流は

$$\Delta i_{L,on} = \frac{V_S DT}{L}$$

バックブーストコンバータ・スイッチOFF時

- スイッチOFFの瞬間，スイッチ電流がダイオード電流に転流
  - この時のKVLより

$$v_L = V_O = L\frac{di_L}{dt} \Rightarrow \frac{di_L}{dt} = \frac{V_O}{L}$$

  - Cが大きくV_Oが一定の仮定より
    - 電流は一定の割合で減少

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{(1-D)T} = \frac{V_O}{L}$$

  - スイッチオフ時に増加する電流は

$$\Delta i_{L,off} = \frac{V_O(1-D)T}{L}$$

バックブーストコンバータの出力

- 定常状態ではLに流れる電流は一周期後に同じ値となる $\Delta i_{L,on} + \Delta i_{L,off} = 0$

$$\Rightarrow \quad \frac{V_S DT}{L} + \frac{V_O(1-D)T}{L} = 0$$

- 出力電圧 $V_O = -\frac{D}{1-D}V_S$
  - 極性が反転
  - D>0.5で出力電圧は入力より大となる
  - D<0.5で出力電圧は入力より小となる

波形の絵

- Lに印加される電圧の平均

$$V_L = V_S D + V_O(1-D) = 0$$

バックブーストコンバータ･Lに流れる電流

- 電源が負荷に直接接続される経路が無い
  - Lに溜まったエネルギーを負荷に供給
  - 間接型という。バック及びブーストコンバータは直接型
- 出力電力
  - Cの電圧一定の仮定

$$P_O = \frac{V_O^{\ 2}}{R}$$

$$P_S = V_S I_S = \frac{V_O^{\ 2}}{R}$$

- 入力電力
  - 入力電流平均値はオン時のLに流れる電流の平均値と同じ

$$I_S = I_L D \qquad \frac{V_O^{\ 2}}{R} = V_S I_L D$$

- Lに流れる平均電流は

$$I_L = \frac{V_O^{\ 2}}{V_S R D} = \frac{P_O}{V_S D} = \frac{V_S D}{(1-D)^2 R}$$

バックブーストコンバータ・Lに流れる電流

- 最大・最小電流値

$$I_{\max} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_S D}{(1-D)^2 R} + \frac{V_S DT}{2L}$$

$$I_{\min} = I_L - \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_S D}{(1-D)^2 R} - \frac{V_S DT}{2L}$$

- 電流が連続となる限界

$$I_{\min} = 0 = \frac{V_S D}{(1-D)^2 R} - \frac{V_S DT}{2L} \quad \Rightarrow \quad \frac{V_S D}{(1-D)^2 R} = \frac{V_S DT}{2L} = \frac{V_S D}{2Lf}$$

– Lの最小値

$$L_{\min} = \frac{(1-D)^2 R}{2f}$$

バックブーストコンバータ･出力電圧脈動

- 電流の計算はC=∞と仮定
- 電流値とCを用いて電圧脈動を評価
  - – オン時の放電電荷
    - 出力電圧一定の時，負荷電流=Cの電流 $I_C = -\dfrac{V_O}{R}$
    - 電圧変化をΔV_Oとすると $\left|\Delta Q\right| = \left(\dfrac{V_O}{R}\right) DT = C\Delta V_O$

$$\Delta V_O = \frac{V_O DT}{RC} = \frac{V_O D}{RCf}$$

- 電圧脈動は $\left|\dfrac{\Delta V_O}{V_O}\right| = \dfrac{D}{RCf}$ ブーストコンバータと同じ

チュック(Cuk)コンバータ

- バックコンバータの回路図　　絵
  - オン･オフ時各々の等価回路図
  - 出力電圧は入力電圧の大小どちらも可
  - 出力電圧の極性反転
  - Cは入力のエネルギーを出力に転送する役割
  - 入力と出力が直接つながらない間接型
- 動作解析
  - 仮定
    - 定常状態
    - 2つのLは十分大きく，電流が一定に保たれる
    - Cは十分大きく，電圧が一定に保たれる
    - スイッチング周期T,デューティ比D
    - 理想素子

チュックコンバータ･C1に流れる電流

- C1を含む経路に対するKCLより
  - オン時，L2の電流と等しい $i_{C1,on} = -i_{L2}$
  - オフ時，L1の電流と等しい $i_{C1,off} = i_{L1}$

絵

- 電源電力と負荷電力は等しい

$$-V_O I_{L2} = V_S I_{L1}$$

- 定常状態ではCに流れる電流は一周期後に同じ値となる

$$I_{C1,on} DT + I_{C1,off} (1-D)T = 0$$

$$-I_{L2} DT + I_{L1} (1-D)T = 0$$

入出力電流比 $$\frac{I_{L1}}{I_{L2}} = \frac{D}{1-D}$$

チュックコンバータ・出力

- 入力電力と出力電力同じ

$$P_S = P_O$$

$$V_S I_{L1} = -V_O I_{L2}$$

$$\frac{I_{L1}}{I_{L2}} = \frac{-V_O}{V_S}$$

- 入出力電圧比 $\displaystyle \frac{V_O}{V_S} = -\frac{I_{L1}}{I_{L2}} = -\frac{D}{1-D}$

- L2より負荷側を見るとバックコンバータと同じ
  - L2,C2,Rから成る回路
  - 出力電圧リプル率

$$\frac{\Delta V_O}{V_O} = \frac{1-D}{8L_2C_2f^2}$$

チュックコンバータC1での脈動

- 定常状態ではC1がオン中に放電する電荷とオフ中に充電する電荷と同じ値となる
  - i_{L1}一定の仮定より

$$\Delta v_{c1} = \frac{1}{C_1}\int_{DT}^{T} I_{L1}\,dt = \frac{I_{L1}}{C_1}(1-D)T$$

$$V_S I_{L1} = -R I_{L2}^{\ 2} \qquad I_{L2}^{\ 2} = \left(\frac{1-D}{D}\right)^2 I_{L1}^{\ 2} \quad \Rightarrow \quad I_{L1} = \left(\frac{D}{1-D}\right)^2 \frac{V_S}{R}$$

  - C1の電圧脈動成分

$$\Delta v_{c1} = \frac{D^2 V_S T}{R C_1 (1-D)} = \frac{D^2 V_S}{R C_1 f (1-D)} = \frac{D V_O}{R C_1 f}$$

チュックコンバータの連続導通条件

- オン中L1に印加される電圧 $$V_{L1} = V_S = L_1 \frac{di_{L1}}{dt}$$
  - オン期間中の電流増分 $$\frac{\Delta i_{L1}}{DT} = \frac{V_S}{L_1}$$

$$\Rightarrow \quad \Delta i_{L1} = \frac{V_S DT}{L_1} = \frac{V_S D}{L_1 f}$$

- オン中L2に印加される電圧
  - C1の電圧
    - L1,L2の平均電圧は0となることから,KVLより $V_{C1} = V_S - V_O$ で一定とする

$$V_{L2} = V_O + (V_S - V_O) = V_S = L_2 \frac{di_{L2}}{dt}$$

  - オン期間中の電流増分

$$\frac{\Delta i_{L2}}{DT} = \frac{V_S}{L_2} \quad \Rightarrow \quad \Delta i_{L2} = \frac{V_S DT}{L_2} = \frac{V_S D}{L_2 f}$$

チュックコンバータの連続導通条件

- L1の連続導通条件
  - 平均電流

$$I_{L1} = \left(\frac{D}{1-D}\right)^2 \frac{V_S}{R}$$

$$I_{L1,\min} = I_{L1} - \frac{\Delta i_{L1}}{2} = \left(\frac{D}{1-D}\right)^2 \frac{V_S}{R} - \frac{V_S D}{2L_1 f} = 0$$

  - L1最低値

$$\left(\frac{D}{1-D}\right)^2 \frac{V_S}{R} = \frac{V_S D}{2L_1 f} \quad \Rightarrow \quad L_{1,\min} = \frac{(1-D)^2 R}{2Df}$$

- L2の連続導通条件
  - 平均電流

$$I_{L2} = \frac{1-D}{D} I_{L1} = \frac{1-D}{D}\left(\frac{D}{1-D}\right)^2 \frac{V_S}{R} = \frac{D}{1-D}\frac{V_S}{R}$$

$$I_{L2,\min} = I_{L2} - \frac{\Delta i_{L2}}{2} = \frac{D}{1-D}\frac{V_S}{R} - \frac{V_S D}{2L_2 f} = 0$$

  - L2最低値

$$\frac{D}{1-D}\frac{V_S}{R} = \frac{V_S D}{2L_2 f} \quad \Rightarrow \quad L_{2,\min} = \frac{(1-D)R}{2f}$$