

応用電力変換工学

舟木剛

第2回 本日のテーマ

スイッチングデバイスの残り

直流-直流変換

2005年10月19日

数値解析でのスイッチ素子の扱い方

状態(オン・オフ)表現

- 理想スイッチ表現
 - オン:閉回路, オフ:開回路
- 可変抵抗表現
 - オン:低抵抗0.001 , オフ:高抵抗1M

数値振動の発生

- スwitchの動作と回路中に存在するL, Cにおいて実際の回路では発生しない数値振動や発振(発散)が発生
 - スwitch素子を理想状態から遠ざける(損失を与える)
 - スナバ回路を付加する。 過電圧・過電流阻止用に回路に使用するスナバ回路と値が異なるので注意

DC-DCコンバータ

スイッチモードDC-DCコンバータ (スイッチング電源)

- バックコンバータ
- ブーストコンバータ
- バック・ブーストコンバータ
- チュックコンバータ
- フライバックコンバータ
- フォワードコンバータ

リニア電圧レギュレータ

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

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

– 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チョッパースとも言う

・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(バク)

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

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

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

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

課題

バック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

- ターンオン・オフ時の境界値
- リプル率
- 連続導通・不連続導通
- 効率(入出力電力比)

－ 過渡応答

- コンバータ起動

－ 設計条件

- 入力電圧 10V, 10W
- スイッチング周波数 10kHz, デューティ比0.5ぐらい