

応用電力変換工学

舟木剛

第10回 直流-直流変換
バックブーストコンバータ
チュックコンバータ

2008年12月03日

2008/12/03

応用電力変換工学

1

バックブーストコンバータ

2008/12/03

応用電力変換工学

2

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

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

2008/12/03

応用電力変換工学

3

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

$$v_L = V_o = L \frac{di_L}{dt} \quad \Rightarrow \quad \frac{di_L}{dt} = \frac{V_o}{L}$$

– 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

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

2008/12/03

応用電力変換工学

4

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

$$\rightarrow \frac{V_s DT}{L} + \frac{V_o(1-D)T}{L} = 0$$

- 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

2008/12/03

応用電力変換工学

5

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 $P_o = \frac{V_o^2}{R}$
- 出力電力 $P_o = V_o I_o = \frac{V_o^2}{R}$
- 入力電力
 - 但し I_s は平均入力電流
 - 入力エネルギーは、オン時にインダクタに蓄積されるエネルギーに等しい

$$V_s I_s T = V_o I_o D T \quad I_s = I_o D \quad \frac{V_o^2}{R} = V_s I_o D$$

2008/12/03

応用電力変換工学

6

バックブーストコンバータ・Lに流れる電流

- Lに流れる平均電流は

$$I_L = \frac{V_o^2}{V_s RD} = \frac{P_o}{V_s D} = \frac{V_s D}{(1-D)^2 R}$$

2008/12/03

応用電力変換工学

7

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

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

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

- 電流が連続となる限界

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

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

2008/12/03

応用電力変換工学

8

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(負荷の単独動作)
 - 出力電圧一定の時、負荷電流=Cの電流

$$I_C = -\frac{V_o}{R}$$

- 電圧変化を ΔV_o とすると

$$\Delta V_o = \frac{V_o DT}{RC} = \frac{V_o D}{RCf} \quad |\Delta Q| = \left(\frac{V_o}{R} \right) DT = C \Delta V_o$$

※オフ期間中で求めると、Lの影響も考える必要あり

- 電圧脈動は

$$\left| \frac{\Delta V_o}{V_o} \right| = \frac{D}{RCf} \quad \text{ブーストコンバータと同じ}$$

2008/12/03

応用電力変換工学

9

バックブーストコンバータ・不連続導通

- デューティ:D
- 環流期間:D₁
- スイッチング周期:T
- インダクタ電圧の関係(平均0)

$$V_s DT + V_o D_1 T = 0$$

- 入出力電圧比

$$V_s D + V_o D_1 = 0$$

$$\frac{V_o}{V_s} = -\frac{D}{D_1}$$

2008/12/03

応用電力変換工学

10

バックブーストコンバータ・不連続導通

- 負荷電流平均値=ダイオード電流平均値

$$-I_D = I_R = \frac{V_o}{R}$$

- ダイオード電流平均値

$$I_D = \frac{1}{T} \frac{1}{2} I_{\max} D_1 T = \frac{1}{2} I_{\max} D_1 = -\frac{V_o}{R}$$

- オン期間のインダクタ最大電流 I_{\max} 電流初期値0

$$L \frac{d}{dt} i_L = L \frac{I_{\max}}{DT} = V_s$$

$$I_{\max} = \frac{DT}{L} V_s$$

2008/12/03

応用電力変換工学

11

バックブーストコンバータ・不連続導通

- ひたすら解く
– I_{\max} を消す

$$D_1 = -2 \frac{L}{DTR} \frac{V_o}{V_s}$$

$$-\text{入出力比でまとめる} \quad \frac{V_o}{V_s} = -\frac{D}{D_1} = \frac{D}{2 \frac{L}{DTR} \frac{V_o}{V_s}}$$

$$\left(\frac{V_o}{V_s} \right)^2 = \frac{D^2 TR}{2L}$$

2008/12/03

応用電力変換工学

12

バックブーストコンバータ・不連続導通

- ひたすら解く

$$\left(\frac{V_o}{V_s}\right)^2 = \frac{D^2 TR}{2L}$$

- 境界条件

$$D + D_1 \leq 1$$

$$I_{\min} \leq 0$$

$$D_1 = -\frac{V_s}{V_o} D$$

$$D - \frac{V_o}{V_s} D \leq 1$$

$$\frac{V_s D}{(1-D)^2 R} - \frac{V_s D T}{2L} < 0$$

$$D + \sqrt{\frac{2L}{TR}} \leq 1$$

$$\frac{1}{(1-D)^2 R} < \frac{T}{2L}$$

$$D \leq 1 - \sqrt{\frac{2L}{TR}}$$

$$\frac{2L}{TR} < (1-D)^2$$

2008/12/03

おなじ
応用電力変換工学

$$D \leq 1 - \sqrt{\frac{2L}{TR}}$$

13

チュックコンバータ

2008/12/03

応用電力変換工学

14

チュック(Cuk)コンバータ

- チュ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

2008/12/03

応用電力変換工学

15

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 $i_{C1,off} = i_{L1}$
- 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

$$\begin{aligned} I_{C1,on}DT + I_{C1,off}(1-D)T &= 0 \\ -I_{L2}DT + I_{L1}(1-D)T &= 0 \end{aligned}$$

入出力電流比

$$\frac{I_{L1}}{I_{L2}} = \frac{D}{1-D}$$

2008/12/03

応用電力変換工学

16

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 $\frac{-V_o}{V_s} = \frac{I_{L1}}{I_{L2}} = \frac{D}{1-D}$

- 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

– 出力電圧リップル率

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

2008/12/03

応用電力変換工学

17

チュックコンバータC1の電圧脈動成分

- 定常状態ではオン中にC1が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

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

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

– C1の電圧脈動成分

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

2008/12/03

応用電力変換工学

18

チュックコンバータC1での平均電圧

- 入力エネルギーは、オフ時にC1に充電されるエネルギーに等しい
 $V_s I_{L1} T = V_C I_{L1} (1-D)T \quad V_s = V_C (1-D)$

$$V_C = \frac{1}{1-D} V_s$$

$$V_{C-\max} = V_C + \frac{1}{2} \Delta v_{c1} = \frac{1}{1-D} V_s + \frac{1}{2} \frac{D^2 V_s T}{RC_1 (1-D)} = \frac{V_s}{1-D} \left(1 + \frac{D^2 T}{2 R C_1} \right)$$
$$V_{C-\min} = V_C - \frac{1}{2} \Delta v_{c1} = \frac{1}{1-D} V_s - \frac{1}{2} \frac{D^2 V_s T}{RC_1 (1-D)} = \frac{V_s}{1-D} \left(1 - \frac{D^2 T}{2 R C_1} \right)$$

- 連続充電条件
 $V_{C-\min} \geq 0 \quad \frac{V_s}{1-D} \left(1 - \frac{D^2 T}{2 R C_1} \right) \geq 0 \quad C_1 \geq \frac{D^2 T}{2 R}$

2008/12/03

応用電力変換工学

19

チュックコンバータ・不連続充電

- デューティ:D
 - 充電期間:1-D
- C1放電期間:D1
- スイッチング周期:T
- コンデンサ電圧の関係(平均0)
 $I_{L1}(1-D)T - I_{L2}D_1 T = 0$

- 入出力電流比
 $I_{L1}(1-D) = I_{L2}D_1 \quad \frac{I_{L1}}{I_{L2}} = \frac{D_1}{1-D} = \frac{-V_o}{V_s}$

2008/12/03

応用電力変換工学

20

チュックコンバータ・不連続充電

- 負荷電圧平均値=ダイオード印加電圧平均値

$$V_D = -V_O = RI_{L2}$$

- ダイオード印加電圧平均値(放電期間中以外は0)

$$V_D = \frac{1}{T} \frac{1}{2} V_{C1-\max} D_1 T = \frac{1}{2} V_{C1-\max} D_1 = RI_{L2}$$

- オフ期間のC1充電最大電圧 $V_{C1-\max}$ 電圧初期値0

$$C_{C1} \frac{d}{dt} V_{C1} = C_{C1} \frac{V_{C1-\max}}{(1-D)T} = I_{L1}$$
$$V_{C1-\max} = \frac{(1-D)T}{C_{C1}} I_{L1}$$

2008/12/03

応用電力変換工学

21

チュックコンバータ・不連続充電

- ひたすら解く
– I_{\max} を消す

$$D_1 = \frac{2C_{C1}R}{(1-D)T} \frac{I_{L2}}{I_{L1}}$$

$$\frac{I_{L1}}{I_{L2}} = \frac{D_1}{1-D} = \frac{1}{1-D} \frac{2C_{C1}R}{(1-D)T} \frac{I_{L2}}{I_{L1}}$$

$$\left(\frac{I_{L1}}{I_{L2}} \right)^2 = \frac{2C_{C1}R}{(1-D)^2 T}$$

2008/12/03

応用電力変換工学

22

チュックコンバータ・不連続充電

• ひたすら解く

$$\left(\frac{I_{L1}}{I_{L2}}\right)^2 = \frac{2C_{C1}R}{(1-D)^2T}$$
$$\frac{I_{L1}}{I_{L2}} = \pm \frac{1}{1-D} \sqrt{\frac{2C_{C1}R}{T}} \Rightarrow \frac{-V_o}{V_s} = \frac{1}{1-D} \sqrt{\frac{2C_{C1}R}{T}}$$

• 境界条件

$$D_1 + (1-D) \leq 1$$

$$\frac{2C_{C1}R}{(1-D)T} \frac{I_{L2}}{I_{L1}} + (1-D) \leq 1$$
$$\frac{2C_{C1}R}{(1-D)T} \frac{1-D}{1} \sqrt{\frac{T}{2C_{C1}R}} + (1-D) \leq 1$$

2008/12/03

応用電力変換工学

$$\sqrt{\frac{2C_{C1}R}{T}} \leq D$$

23

直流電源

• スイッチングコンバータ(チョッパ回路)

- 入力と出力が絶縁されていない
 - 入力と出力の接地が共通
 - バックブースト、チュックコンバータでは入出力の電圧極性が逆転するので注意要



- 変圧器で絶縁

- 高周波化して、変圧器を小さくする必要あり
 - 高周波ACリンク
- 卷数比により入出力比の幅が広がる
 - 昇圧形で有利
- 複数巻線で多出力が可能

2008/12/03

応用電力変換工学

24

高周波交流リンクに用いる変圧器

- 変圧器の役目
 - 電圧・電流のステップアップ又はステップダウン
 - 入出力間の電気的絶縁
 - 理想変圧器の入出力の関係
- $$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$$
- 電圧
- $$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$$
- 電流
- 変圧器のえ
- 実際の変圧器には巻線抵抗、漏れインダクタンス、磁化インダクタンス、鉄心損等がある
 - フライバックコンバータでは磁化インダクタンスが重要
 - 磁化インダクタンスにエネルギーを貯める
 - スイッチング周期毎に、鉄心磁束が同じ値になるようにする。
» 戻ってこないと、偏磁する
 - 漏れインダクタンスはスイッチ動作の過渡応答に対して影響する

2008/12/03

応用電力変換工学

25