

パワーエレクトロニクス
第九回 DC-DCコンバータ②

2023年6月14日

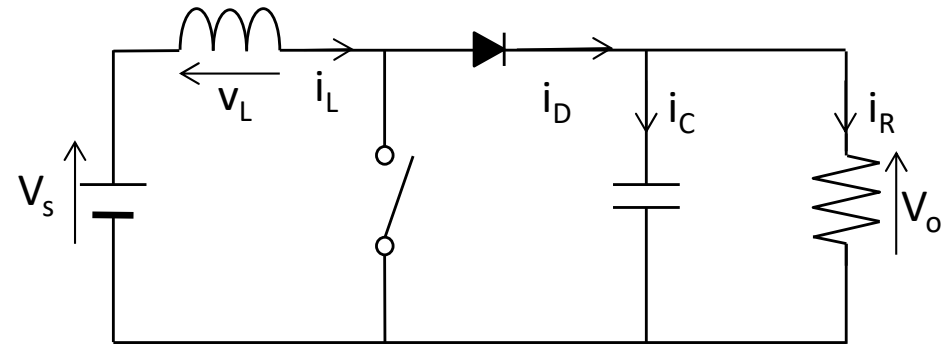
授業の予定

- パワーエレクトロニクス緒論
- パワーエレクトロニクスにおける基礎理論
- パワー半導体デバイス
- 整流回路
- 整流回路の交流側特性と他励式インバータ
- 交流電力制御とサイクロコンバータ
- 直流チョッパ
- DC-DCコンバータと共振形コンバータ
- 自励式インバータ
- 演習

ブースト(Boost)コンバータ

出力電圧が入力より大

- 電源電圧を昇圧
 - 昇圧コンバータ
- 回路構成要素
 - L:エネルギー蓄積
 - C:ローパスフィルタ
 - 動作解析での仮定
 - 周期定常状態
 - スwitch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

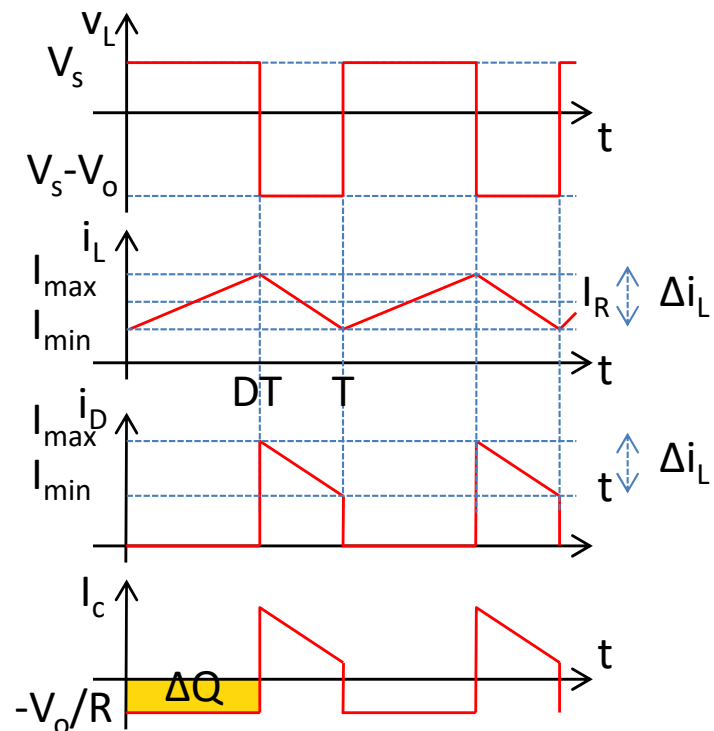
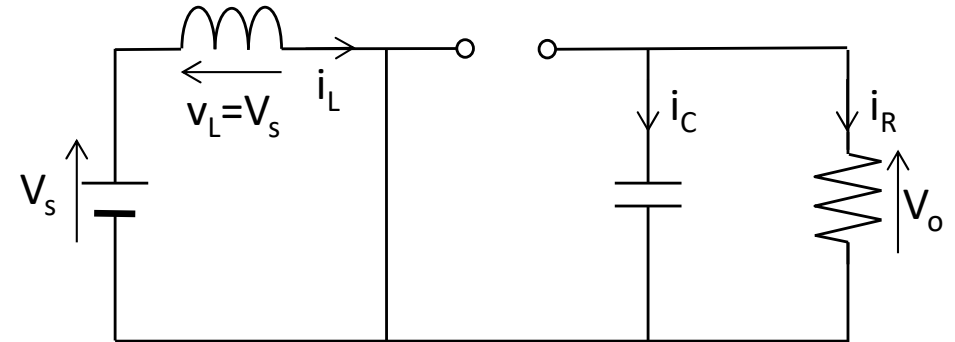
$$v_L = V_S = L \frac{di_L}{dt}$$

- 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

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



ブーストコンバータ スイッチOFF時1

- スイッチOFFの瞬間

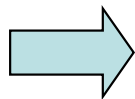
- スイッチを流れる電流がダイオードに移動

- Lにより電流が連続する

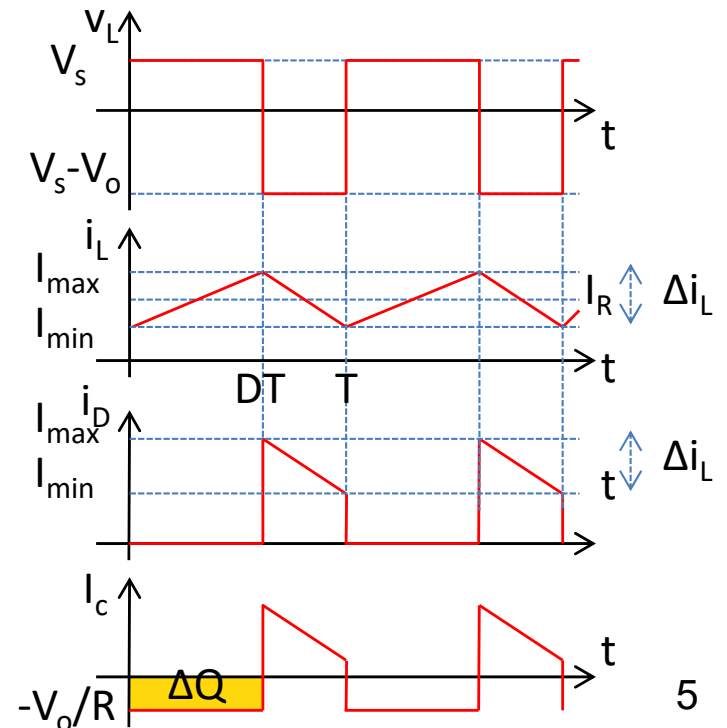
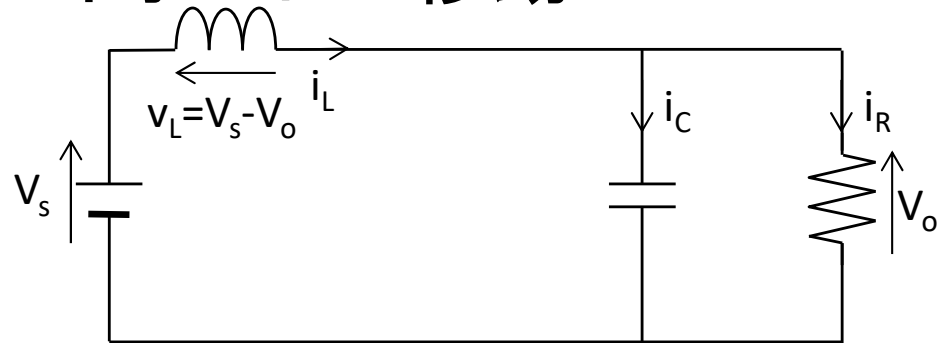
- 転流(commutation)という

- この時のKVLより

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



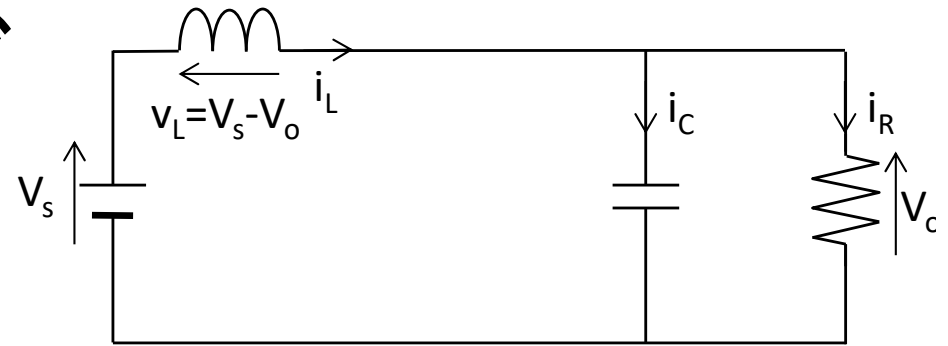
$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_S - V_O}{L}$$



ブーストコンバータ スイッチOFF時2

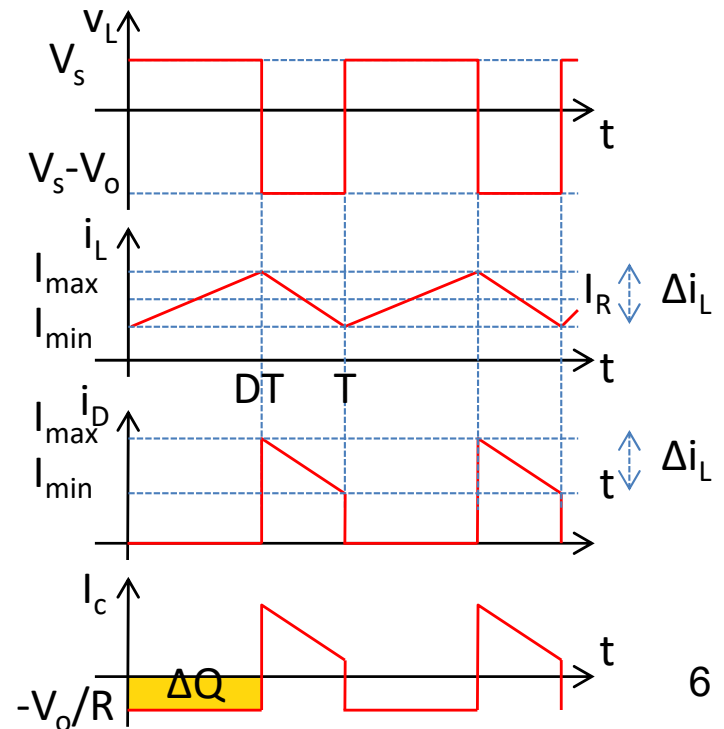
- Cが大きく V_O が一定の仮定より
 - 電流は一定の割合で減少

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



- 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

- 周期定常状態

- Lに流れる電流は一周期後に同じ値となる

- 増加量

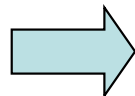
$$\Delta i_{L,on} = \frac{V_S DT}{L}$$

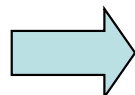
- 減少量

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

- 和が0

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


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


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

ブーストコンバータの出力

- 入出力電圧比

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

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

- ブーストコンバータの出力は入力より大となる

- $1 - D < 1$

- 別解

- Lに印加される電圧の平均は零となる

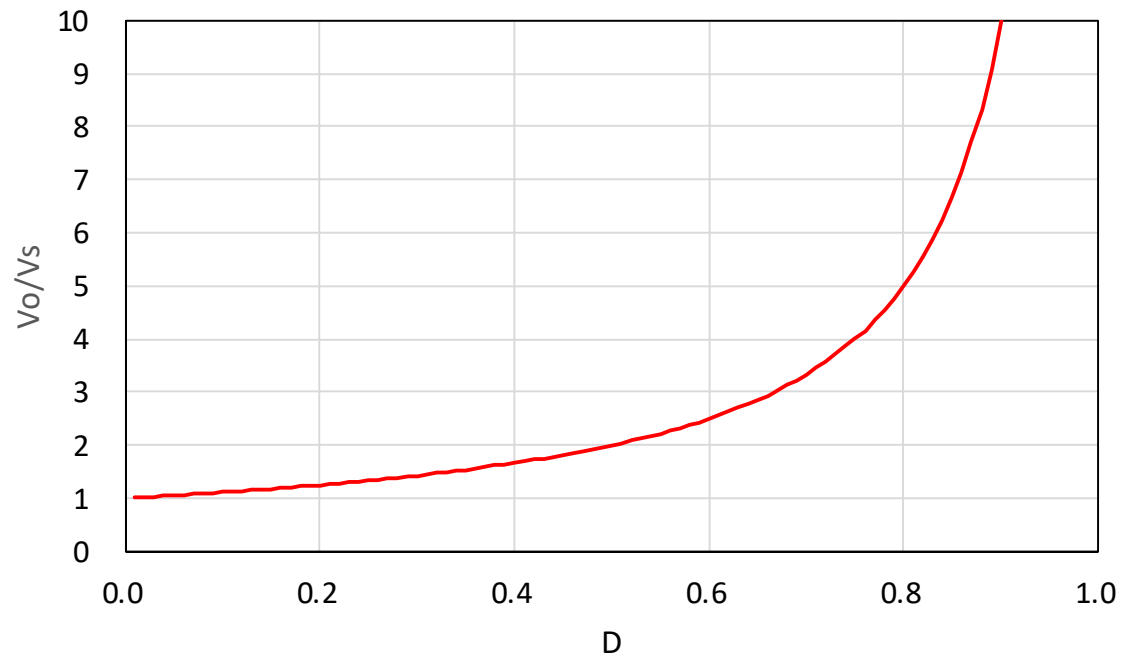
- オン時平均電圧 $V_S D$

- オフ時平均電圧 $(V_S - V_O)(1 - D)$

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

ブーストコンバータ 昇圧比(連続導通)

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



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

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

- Lに流れる平均電流

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

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

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

ブーストコンバータ 不連続導通

- ダイオードの導通期間 $D'T$

- 連続導通 $D + D' = 1$

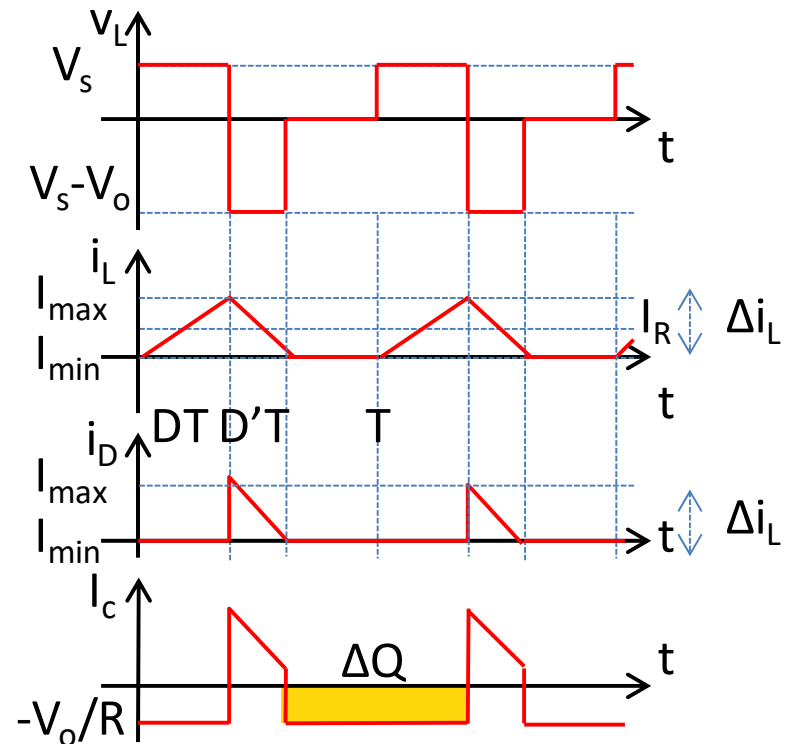
- 不連続導通 $D + D' < 1$

- 電流変化量

- $\Delta i_{Lon} = \frac{V_s DT}{L}$

- $\Delta i_{Loff} = \frac{(V_s - V_o) D'T}{L}$

- $\Delta i_{Lon} + \Delta i_{Loff} = \frac{V_s DT}{L} + \frac{(V_s - V_o) D'T}{L} = 0$



ブーストコンバータ 不連続導通

- $V_S D + (V_S - V_O) D' = 0$
- $V_S (D + D') = V_O D'$
- $\frac{V_O}{V_S} = \frac{D + D'}{D'}$
- ダイオードの平均電流は負荷の平均電流に等しい

$$\begin{aligned} \bullet I_D = I_R &= \frac{V_O}{R} = \frac{1}{T} \frac{-\Delta i_{Loff} D' T}{2} = \frac{\Delta i_{Lon} D'}{2} \\ &= \frac{V_S D T D'}{2L} \end{aligned}$$

ブーストコンバータ 不連続導通

- $\frac{V_o}{R} = \frac{V_s D T D'}{2L}$

- $D' = \frac{V_o 2L}{V_s R D T}$

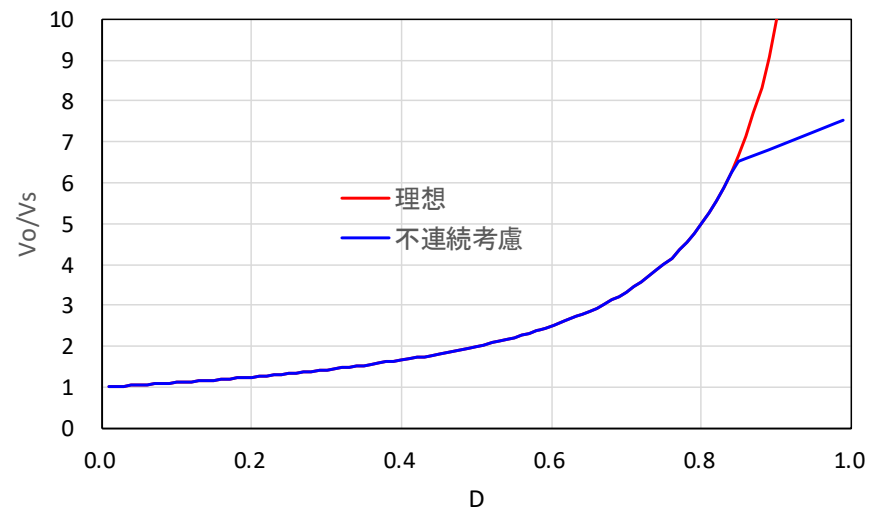
- $\frac{V_o}{V_s} = \frac{D+D'}{D'} = \frac{D + \frac{V_o 2L}{V_s R D T}}{\frac{V_o 2L}{V_s R D T}}$

- $\left(\frac{V_o}{V_s}\right)^2 \frac{2L}{R D T} - \frac{V_o 2L}{V_s R D T} - D = 0$

- $\left(\frac{V_o}{V_s}\right)^2 - \frac{V_o}{V_s} - \frac{R D^2 T}{2L} = 0$

- 不連続 $D(1-D)^2 > \frac{2L}{R T}$

- $\frac{V_o}{V_s} = \frac{1 \pm \sqrt{1 + \frac{2R D^2 T}{L}}}{2}$
 $= \frac{1 + \sqrt{1 + \frac{2R D^2 T}{L}}}{2}$



ブーストコンバータ・出力電圧脈動

- 電流の計算は $C=\infty$ 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 $I_C = -\frac{V_o}{R}$

- 電圧変化を ΔV_o とすると $|\Delta Q| = \left(\frac{V_o}{R}\right)DT = C\Delta V_o$

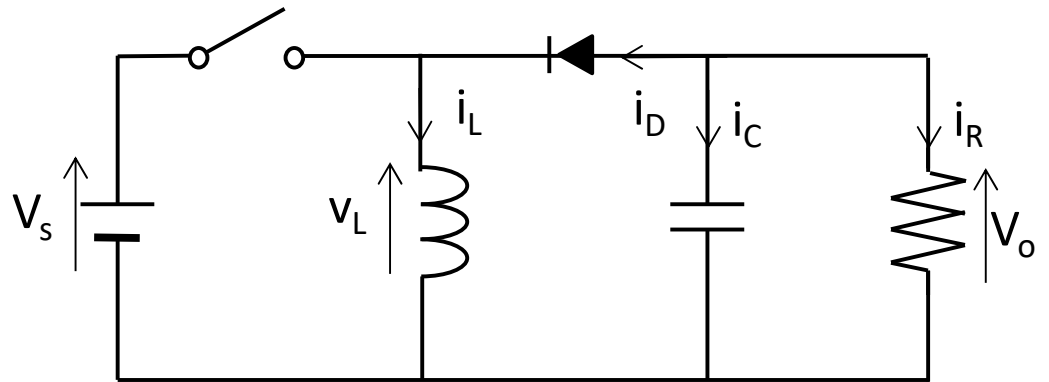
$$\Delta V_o = \frac{V_o DT}{RC} = \frac{V_o D}{RCf}$$

- 電圧脈動

$$\left|\frac{\Delta V_o}{V_o}\right| = \frac{D}{RCf}$$

バックブーストコンバータ

- 電源電圧を昇降圧
 - 昇降圧コンバータ
 - 出力電圧が極性反転
 - 電源と負荷が直接接続する回路動作が無い
- 回路構成要素
 - L: エネルギー蓄積電源に重畳
 - C: ローパスフィルタ
 - 動作解析での仮定
 - 周期定常状態
 - スwitch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

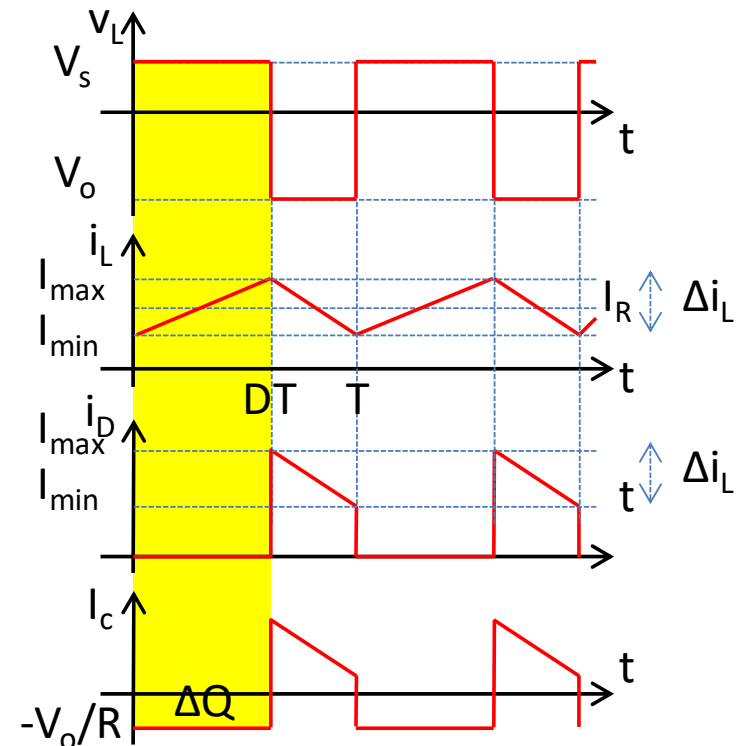
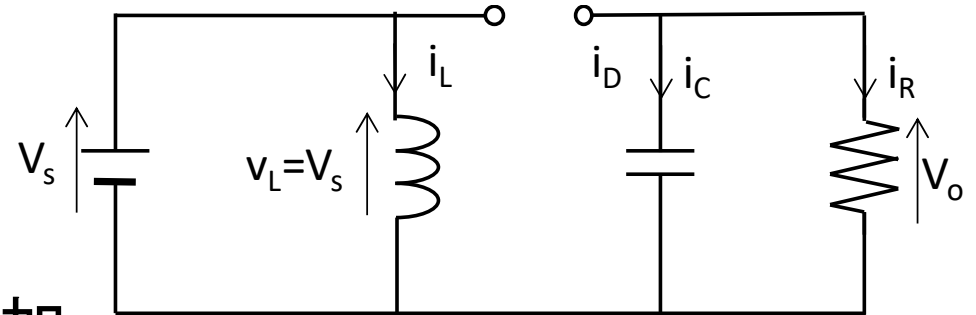
$$v_L = V_S = L \frac{di_L}{dt}$$

- 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

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



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

- スイッチを流れる電流がダイオードに転流

- Lにより電流が連続

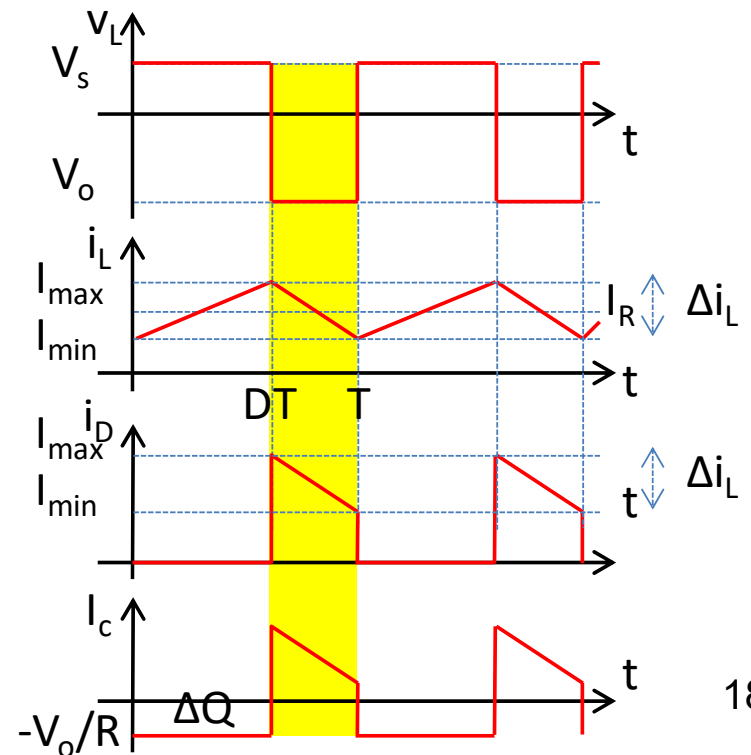
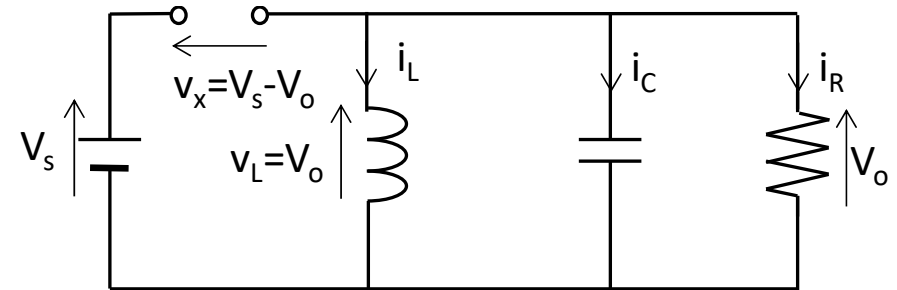
- KVL

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

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

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

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



バックブーストコンバータの出力

- 周期定常状態

- Lに流れる電流は一周期後に同じ値となる

- 増加量 $\Delta i_{Lon} = \frac{V_s D T}{L}$

- 減少量 $\Delta i_{Loff} = \frac{V_o(1-D)T}{L}$

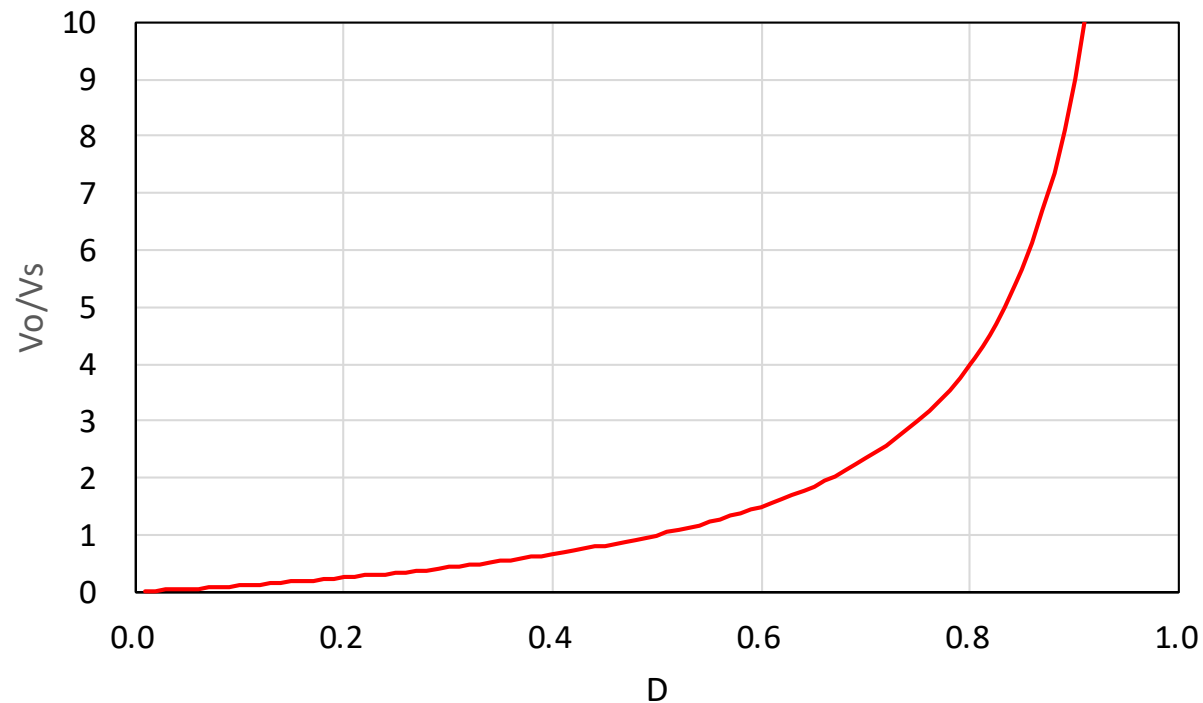
- 和が0 $\Delta i_{Lon} + \Delta i_{Loff} = \frac{V_s D T}{L} + \frac{V_o(1-D)T}{L} = 0$

- $V_s D + V_o(1 - D) = 0$

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

バックブーストコンバータ 昇圧比(連続導通)

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



簡単のため極性は反転して示している

バック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 $P_O = \frac{V_O^2}{R}$

- 入力電力

- 入力平均電流 I_S で表す $P_S = V_S I_S$

- Lに流れる平均電流 I_L との関係 $I_S = I_L D$

- $P_O = P_S = \frac{V_O^2}{R} = V_S I_S = V_S I_L D$

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

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

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

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

- 電流が連続となる限界

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

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

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

バックブーストコンバータ 不連続導通

- ダイオードの導通期間 $D'T$

- 連続導通 $D + D' = 1$

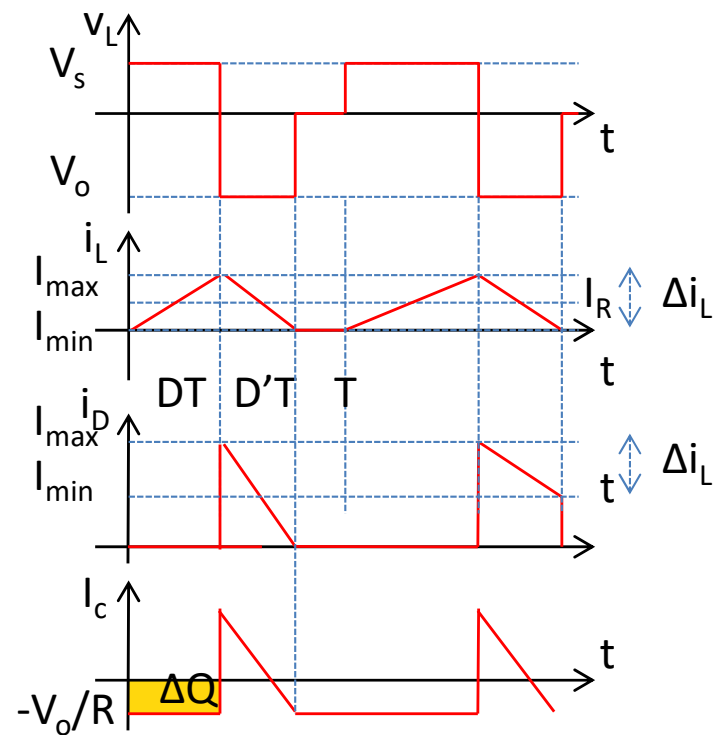
- 不連続導通 $D + D' < 1$

- 電流変化量

- $\Delta i_{Lon} = \frac{V_s D T}{L}$

- $\Delta i_{Loff} = \frac{V_o D' T}{L}$

- $\Delta i_{Lon} + \Delta i_{Loff} = \frac{V_s D T}{L} + \frac{V_o D' T}{L} = 0$



バックブーストコンバータ 不連続導通

- $V_s D + V_o D' = 0$
- $\frac{V_o}{V_s} = -\frac{D}{D'} \quad D' = -D \frac{V_s}{V_o}$
- ダイオードの平均電流は負荷平均電流と等しい
 - $$\begin{aligned} -I_D = I_R &= \frac{V_o}{R} = \frac{1}{T} \frac{-\Delta i_{Loff} D' T}{2} = \frac{\Delta i_{Lon} D'}{2} \\ &= \frac{V_s D T D'}{2L} = \frac{V_s D T D \frac{V_s}{V_o}}{2L} = \frac{V_s^2 T D^2}{2L V_o} \end{aligned}$$
 - $\frac{V_o}{V_s} = -D \sqrt{\frac{TR}{2L}} \quad \frac{1}{(1-D)^2 R} > \frac{T}{2L} \quad \frac{2L}{RT} > (1-D)^2$

バックブーストコンバータ 不連続導通

- 連続導通条件

- $\frac{2L}{RT} > (1 - D)^2$

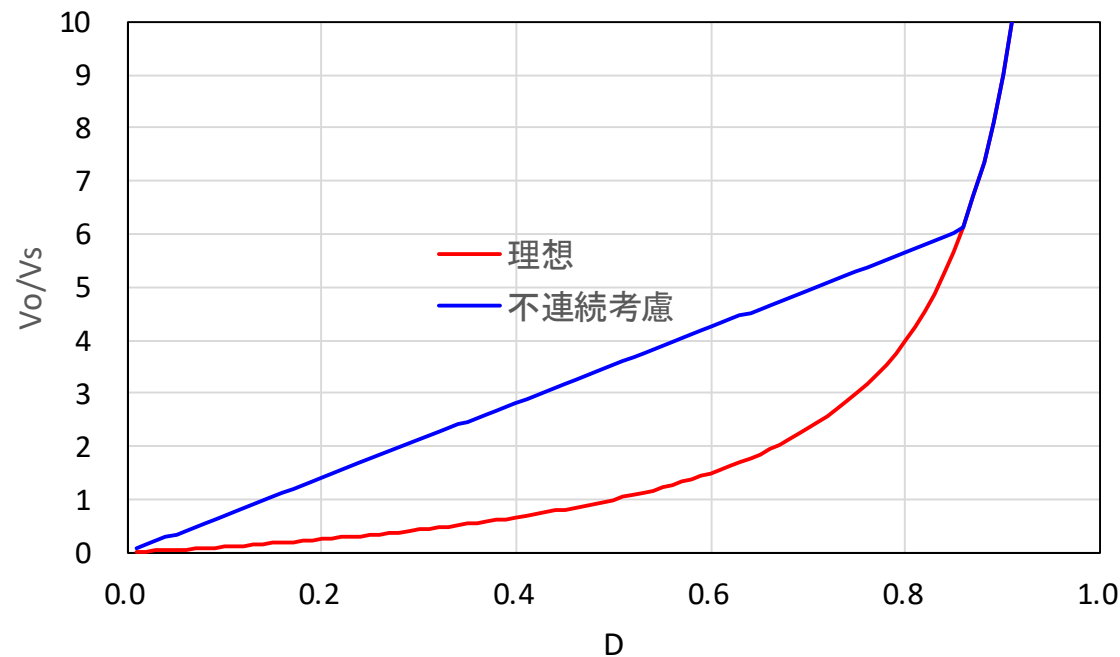
- $\sqrt{\frac{2L}{RT}} > 1 - D$

- $D > 1 - \sqrt{\frac{2L}{RT}}$

- 不連続導通時

- $\frac{V_o}{V_s} = D \sqrt{\frac{TR}{2L}}$

- 連続導通時 $\frac{V_o}{V_s} = \frac{D}{1-D}$



バックブーストコンバータ・出力電圧脈動

- 電流の計算は $C=\infty$ 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 $I_C = -\frac{V_o}{R}$

- 電圧変化を ΔV_o とすると $|\Delta Q| = \left(\frac{V_o}{R}\right)DT = C\Delta V_o$

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

- 電圧脈動

$$\left|\frac{\Delta V_o}{V_o}\right| = \frac{D}{RCf}$$