パワーエレクトロニクス
第7回　DC-DCコンバータ②

2026年5月27日

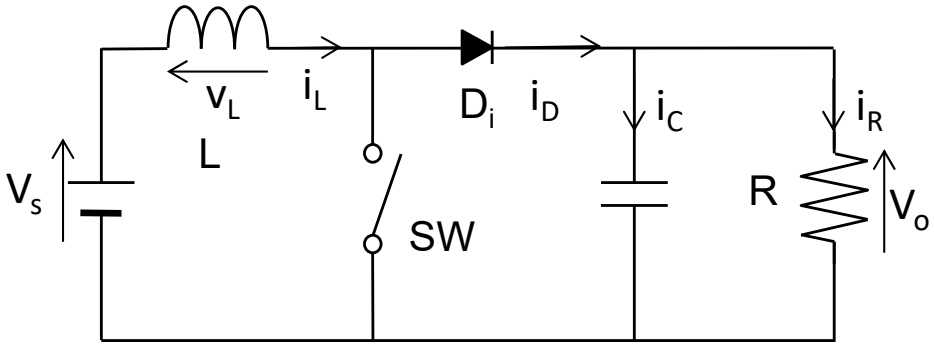
授業の予定

- 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

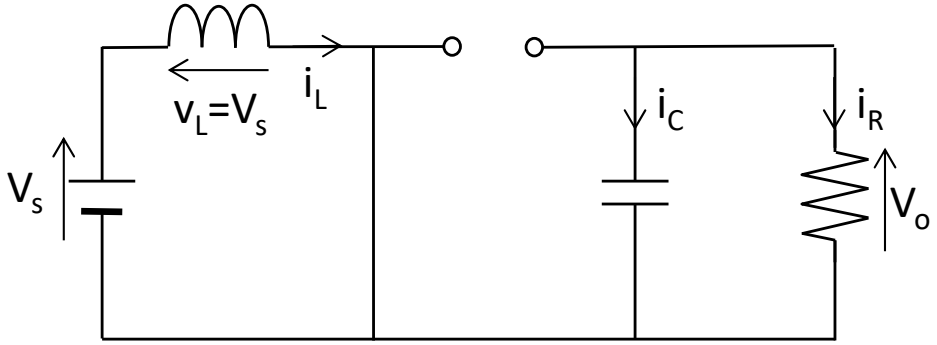
- 電源電圧を昇圧
  - 昇圧コンバータ
  - 直接型
- 回路構成要素
  - L:エネルギー蓄積
  - C:ローパスフィルタ
  - 動作解析での仮定
    - 周期定常状態
    - スイッチング周期T,デューティ比D
    - Lの電流は連続(連続導通)
    - Cは十分大きく，電圧がV_Oに一定に保たれる
    - 理想素子



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

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

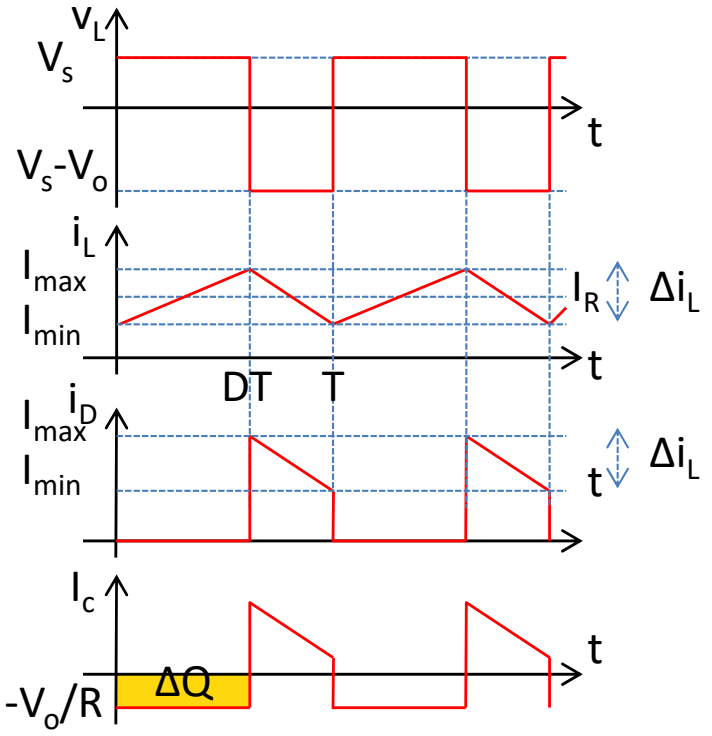


  - 電源電圧は一定より
    - 電流は一定の割合で増加

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

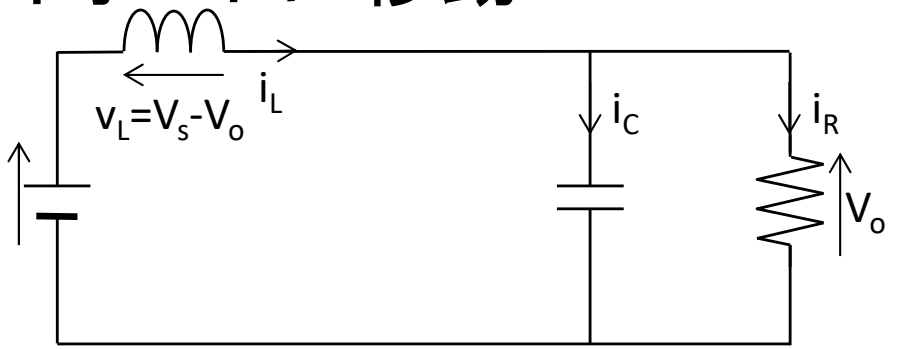
  - スイッチオン時に増加する電流

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



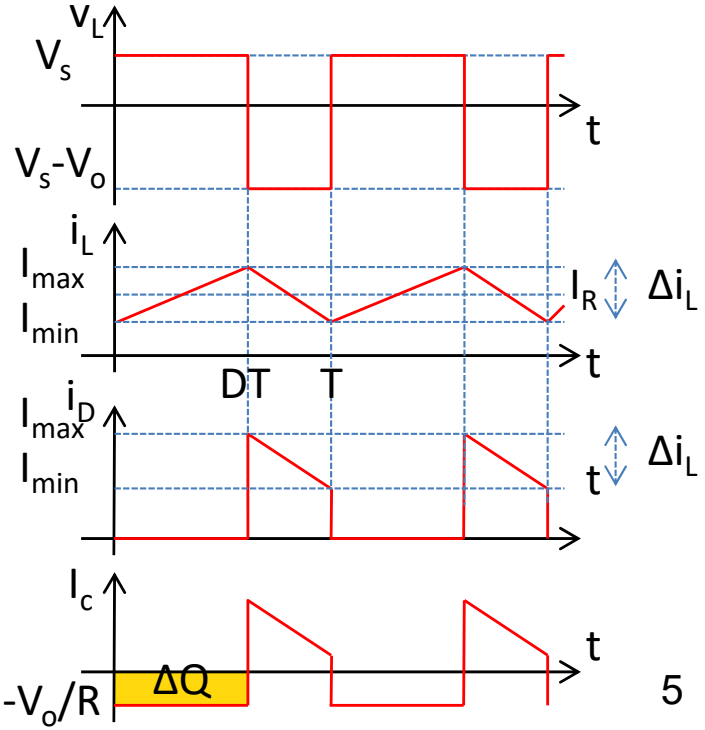
ブーストコンバータ
スイッチOFF時1

- 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



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

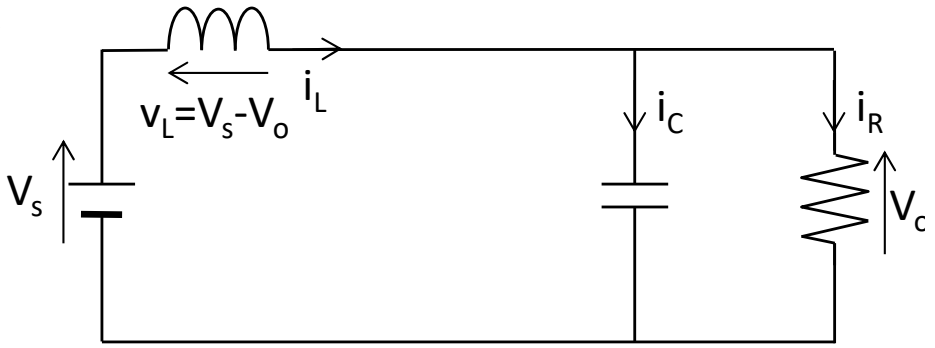
$$\Rightarrow \quad \frac{di_L}{dt} = \frac{V_S - V_O}{L}$$



ブーストコンバータ
スイッチOFF時2

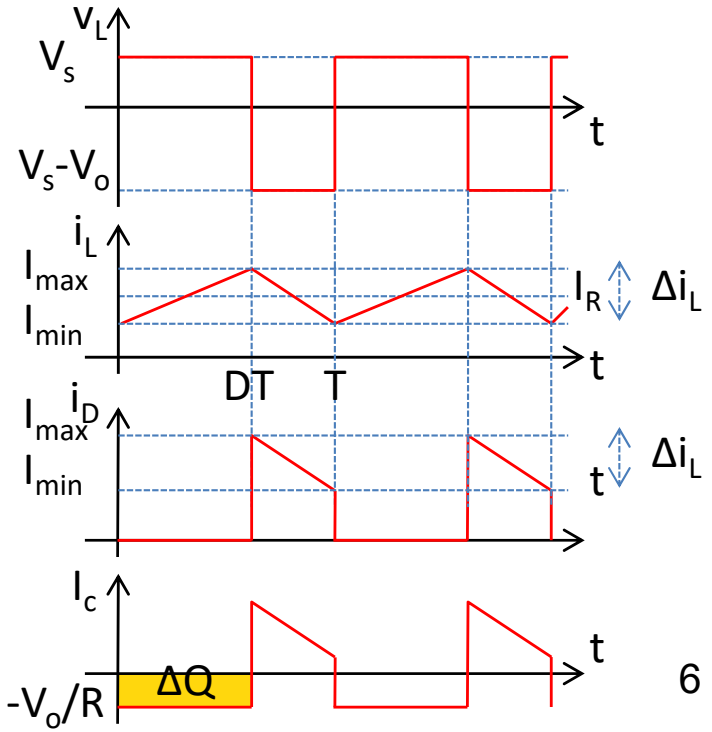
- Cが大きくV_Oが一定の仮定より
  - 電流は一定の割合で減少

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



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

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

$$\Rightarrow \quad V_S(D + 1 - D) - V_O(1-D) = 0$$

ブーストコンバータの出力

- 入出力電圧比
  - $V_S(D+1-D)-V_o(1-D)=0$

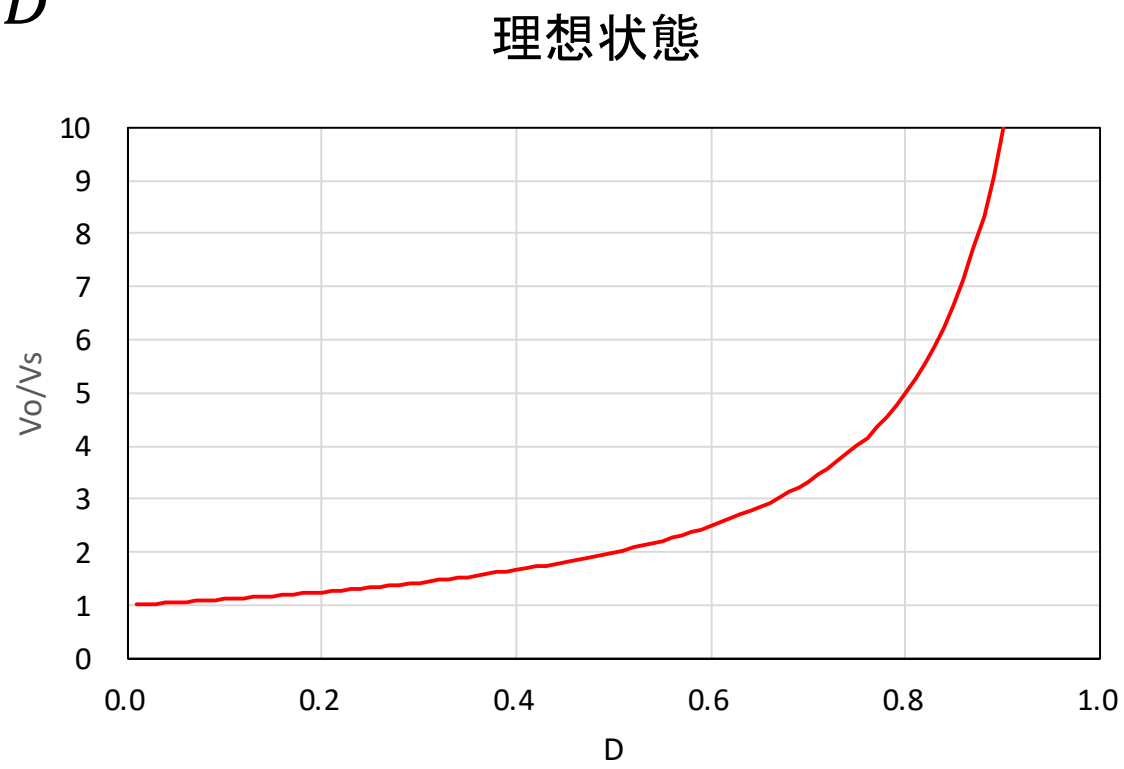
$$V_o=\frac{V_S}{1-D}$$

  - 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_SD
    - オフ時平均電圧　　$(V_S-V_o)(1-D)$

$$V_L=V_SD+(V_S-V_o)(1-D)=0$$

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

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

素子の
定格電流選定に使用

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

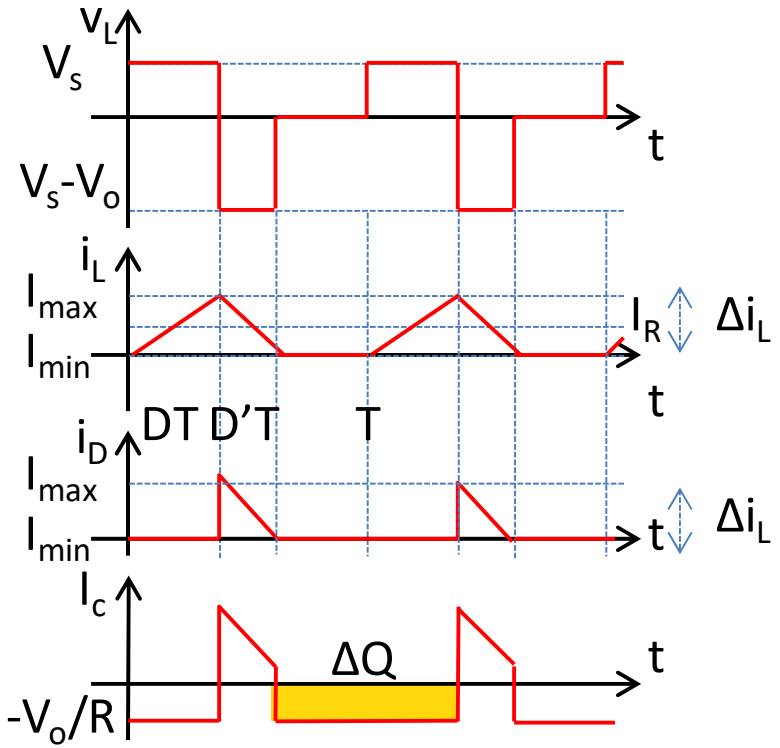
- 電流が連続となる限界

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

  - Lの最小値 $L_{\min} = \dfrac{D(1-D)^2 R}{2f}$ 通流率の範囲 $(1-D)^2 D < \dfrac{2L}{RT}$

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

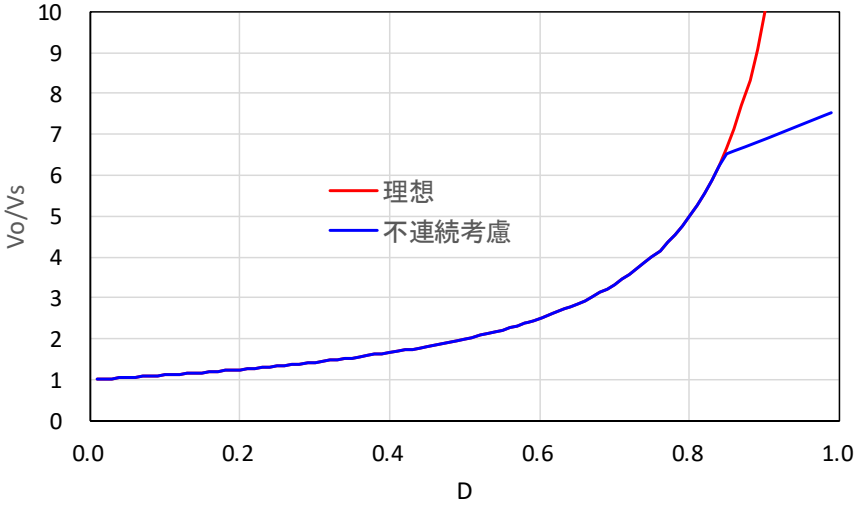
- $V_S D + (V_S - V_O) D' = 0$
- $V_S (D + D') = V_O D'$
- $\frac{V_O}{V_S} = \frac{D+D'}{D'}$
- ダイオードの平均電流は負荷の平均電流に等しい
  - $I_D = I_R = \frac{V_O}{R} = \frac{1}{T} \frac{-\Delta i_{Loff} D' T}{2} = \frac{\Delta i_{Lon} D'}{2}$
    $= \frac{V_S D T D'}{2L}$

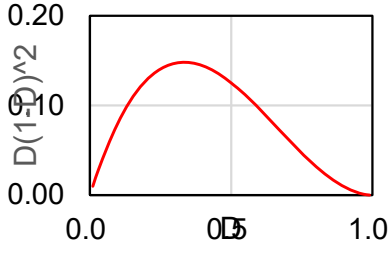
ブーストコンバータ
不連続導通

- $\frac{V_o}{R} = \frac{V_S DTD'}{2L}$
- $D' = \frac{V_o 2L}{V_S RDT}$
- $\frac{V_o}{V_S} = \frac{D+D'}{D'} = \frac{D+\frac{V_o 2L}{V_S RDT}}{\frac{V_o 2L}{V_S RDT}}$
- $\left(\frac{V_o}{V_S}\right)^2 \frac{2L}{RDT} - \frac{V_o 2L}{V_S RDT} - D = 0$
- $\left(\frac{V_o}{V_S}\right)^2 - \frac{V_o}{V_S} - \frac{RD^2T}{2L} = 0$
- 不連続$D(1-D)^2 > \frac{2L}{RT}$

- $\frac{V_o}{V_S} = \frac{1 \pm \sqrt{1+\frac{2RD^2T}{L}}}{2}$

$$= \frac{1+\sqrt{1+\frac{2RD^2T}{L}}}{2}$$





ブーストコンバータ・出力電圧脈動

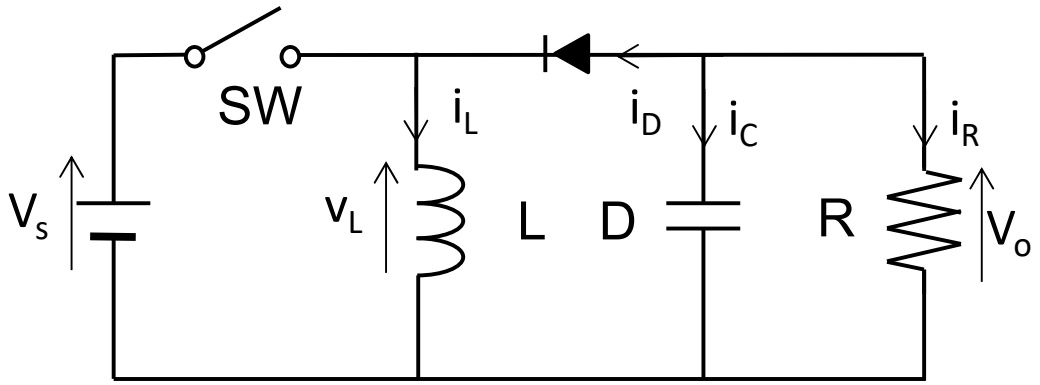
- 電流の計算はC=∞と仮定
- 電流値とCを用いて電圧脈動を評価
  - オン時の放電電荷
    - 出力電圧一定の時，負荷電流=Cの電流　$I_C = -\dfrac{V_O}{R}$
    - 電圧変化をΔV_Oとすると　$\left|\Delta Q\right| = \left(\dfrac{V_O}{R}\right) DT = C\Delta V_O$

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

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

バックブーストコンバータ

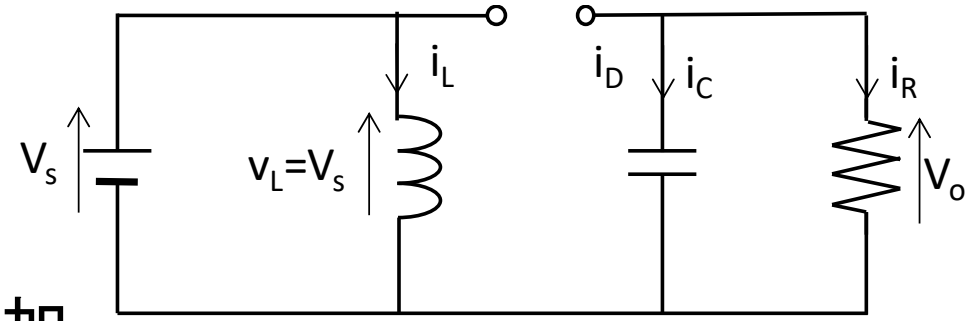
- 電源電圧を昇降圧
  - 昇降圧コンバータ
  - 出力電圧が極性反転
  - 電源と負荷が直接接続する回路動作が無い間接型
- 回路構成要素
  - L:エネルギー蓄積 電源に重畳
  - C:ローパスフィルタ
  - 動作解析での仮定
    - 周期定常状態
    - スイッチング周期T,デューティ比D
    - Lの電流は連続
    - Cは十分大きく，電圧がV_Oに一定に保たれる
    - 理想素子



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

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

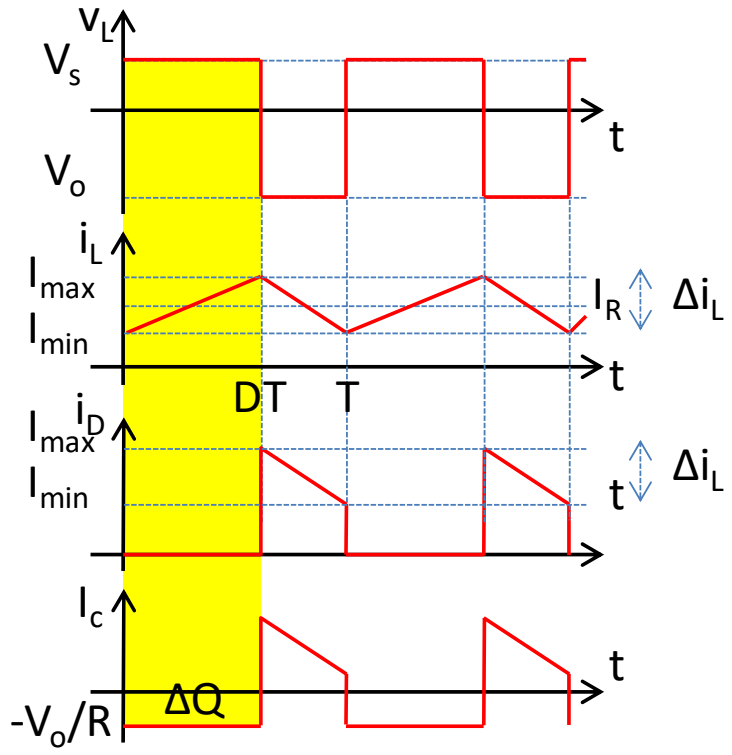


  - 電源電圧は一定より
    - 電流は一定の割合で増加

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

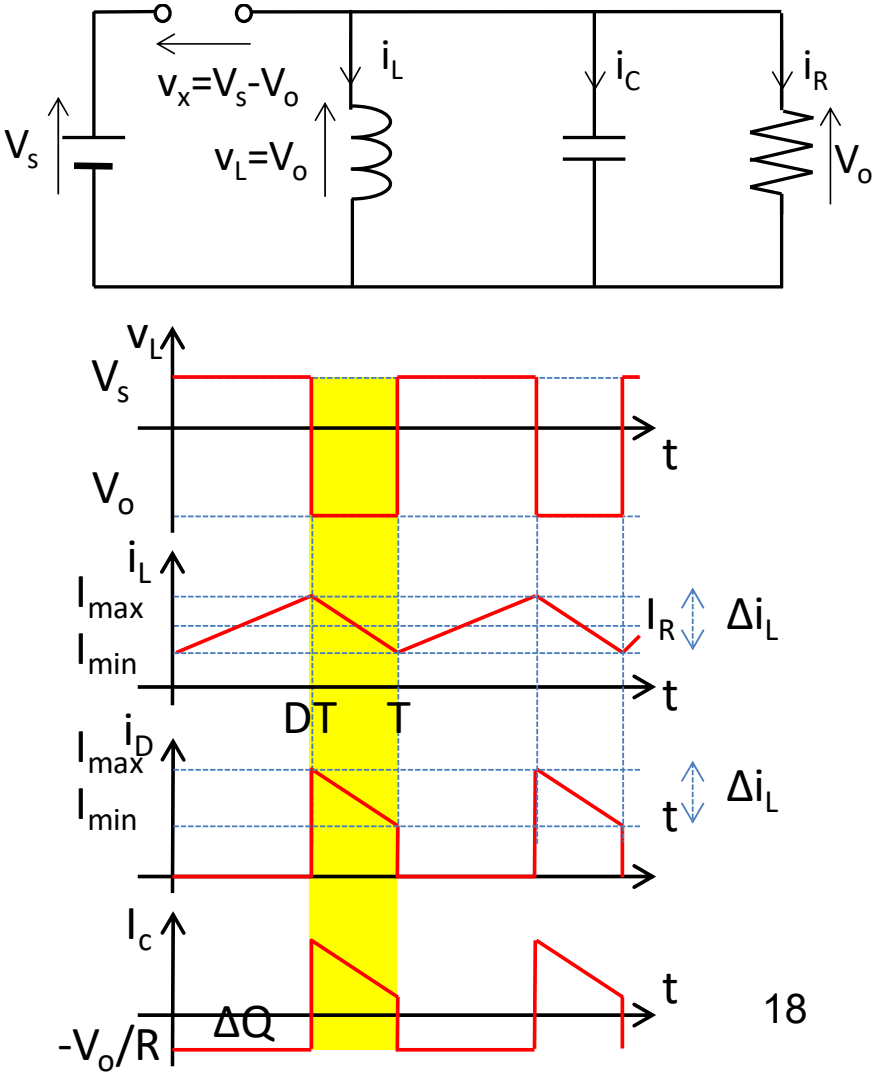
  - スイッチオン時に増加する電流

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



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
    - $V_L = V_o = L\frac{di_L}{dt}$
    - $\frac{di_L}{dt} = \frac{V_o}{L}$
    - $\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_{Loff}}{(1-D)T} = \frac{V_o}{L}$
    - $\Delta i_{Loff} = \frac{V_o(1-D)T}{L}$

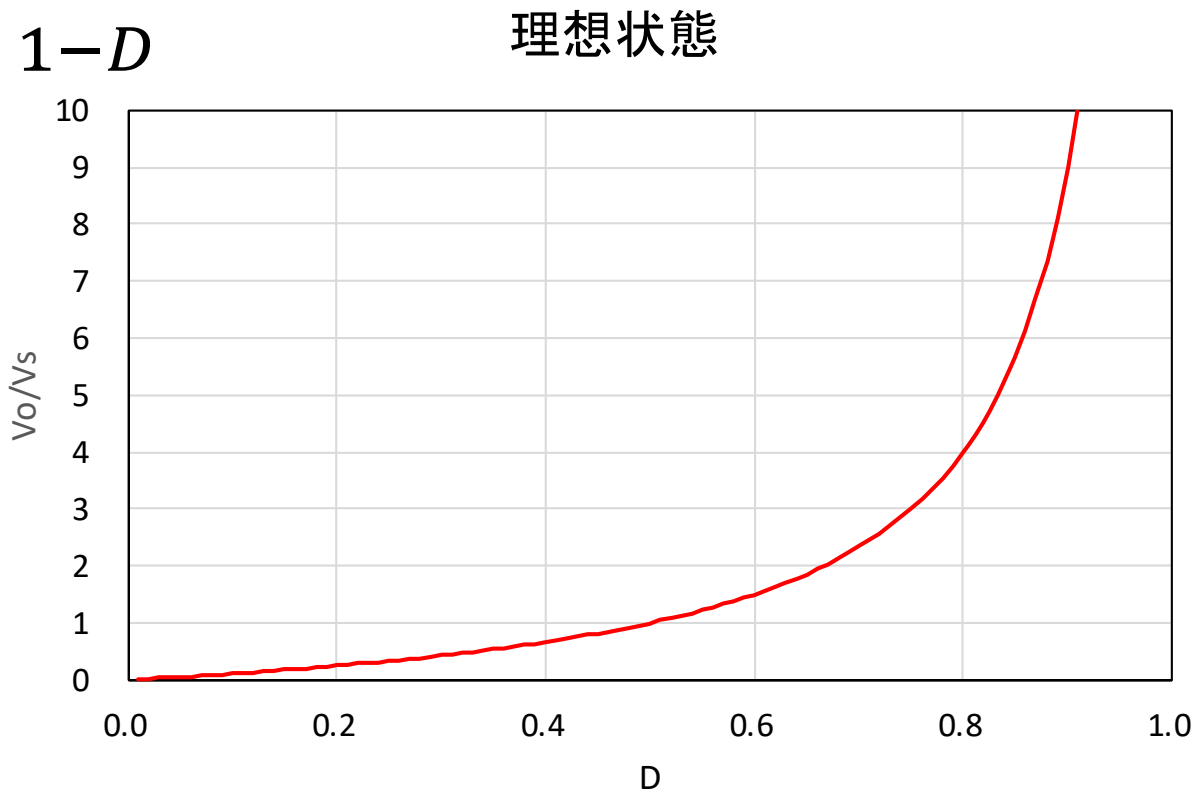


バックブーストコンバータの出力

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

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　$I_s = I_L D$
  - $P_O = P_s = \frac{{V_O}^2}{R} = V_s I_s = V_s I_L D$
  - $I_L = \frac{{V_O}^2}{V_s DR} = \frac{{V_O}^2 V_s}{{V_s}^2 DR} = \left(\frac{-D}{1-D}\right)^2 \frac{V_s}{DR} = \frac{DV_s}{(1-D)^2 R}$

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

通流率の範囲

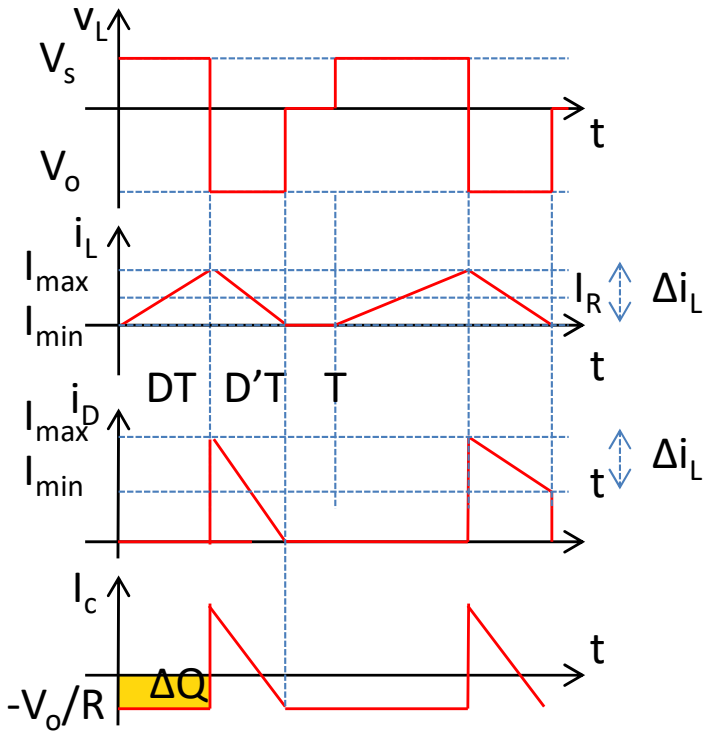
$$\frac{1}{(1-D)^2 R} - \frac{T}{2L} > 0$$

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

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

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
  - $\Delta i_{Lon} = \frac{V_S DT}{L}$
  - $\Delta i_{Loff} = \frac{V_O D'T}{L}$
  - $\Delta i_{Lon} + \Delta i_{Loff} = \frac{V_S DT}{L} + \frac{V_O D'T}{L} = 0$



バックブーストコンバータ
不連続導通

- $V_s D + V_o D' = 0$
- $\frac{V_o}{V_s} = -\frac{D}{D'}$ $D' = -D\frac{V_s}{V_o}$
- ダイオードの平均電流は負荷平均電流と等しい
  - $-I_D = I_R = \frac{V_o}{R} = \frac{1}{T}\frac{-\Delta i_{Loff} D' T}{2} = \frac{\Delta i_{Lon} D'}{2}$

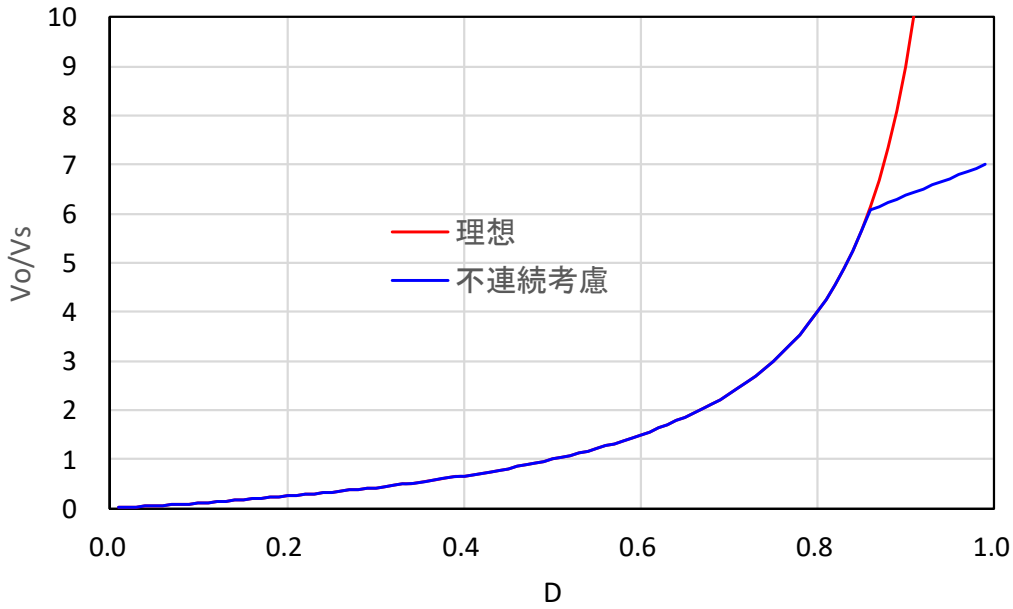
$$= \frac{V_s D T D'}{2L} = \frac{V_s D T D \frac{V_s}{V_o}}{2L} = \frac{{V_s}^2 T D^2}{2LV_o}$$

  - $\frac{V_o}{V_s} = -D\sqrt{\frac{TR}{2L}}$ $\frac{1}{(1-D)^2 R} > \frac{T}{2L}$ $\frac{2L}{RT} > (1-D)^2$

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=∞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　$\left|\dfrac{\Delta V_O}{V_O}\right| = \dfrac{D}{RCf}$