パワーエレクトロニクス
第拾回　DC-DCコンバータ

平成31年6月19日

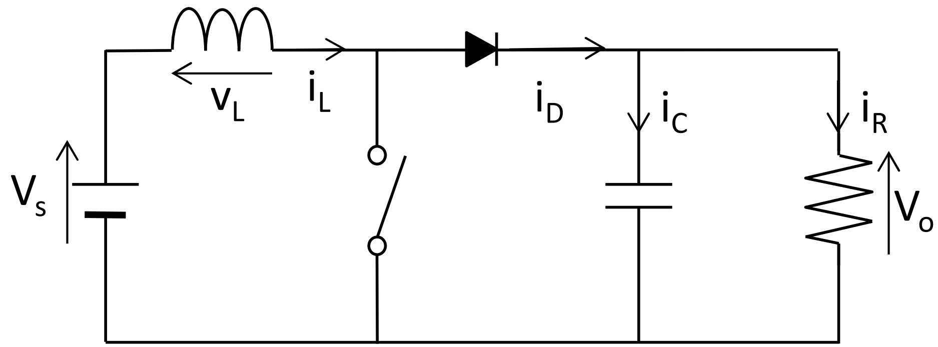
授業の予定
シラバスより

- 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（2回）
- 整流回路（2回）
- 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（2回）
- 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

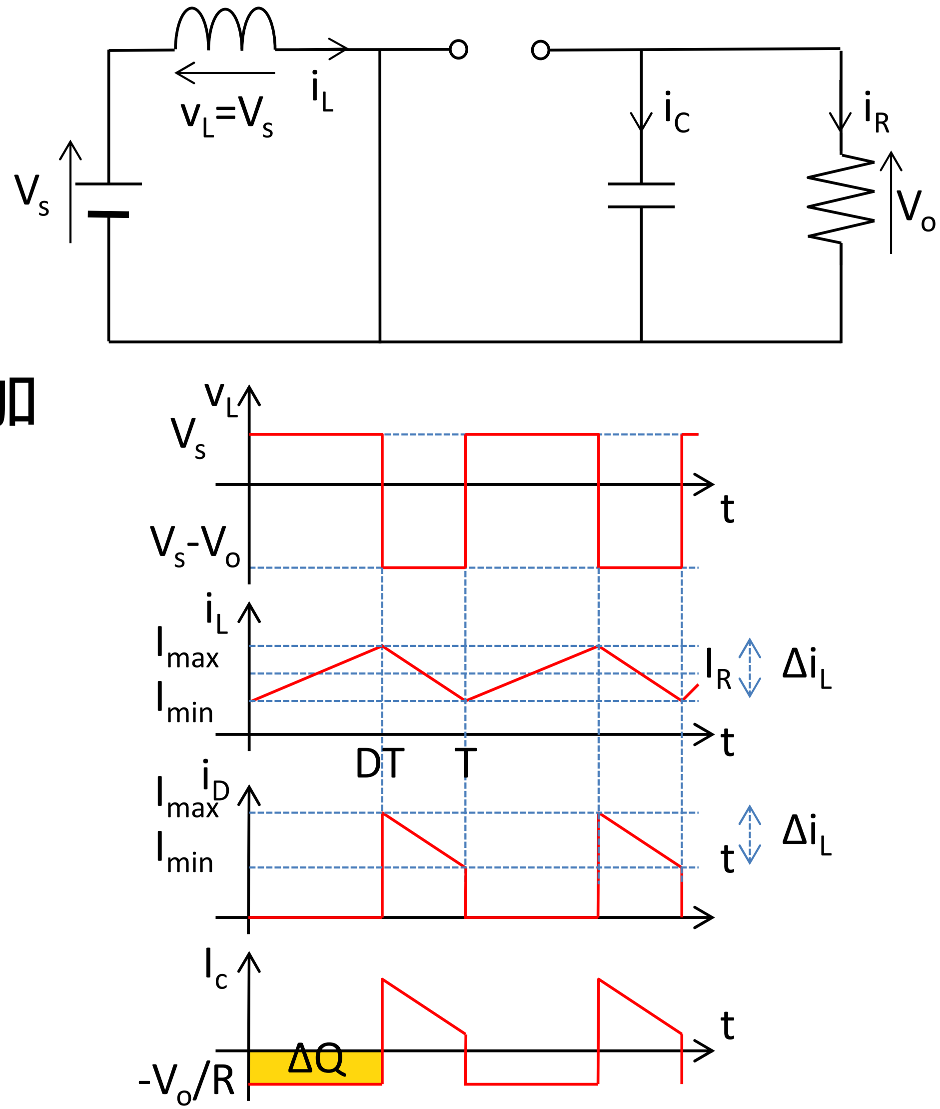
$$v_L = V_S = L\frac{di_L}{dt}$$

  - 電源電圧は一定より
    - 電流は一定の割合で増加

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

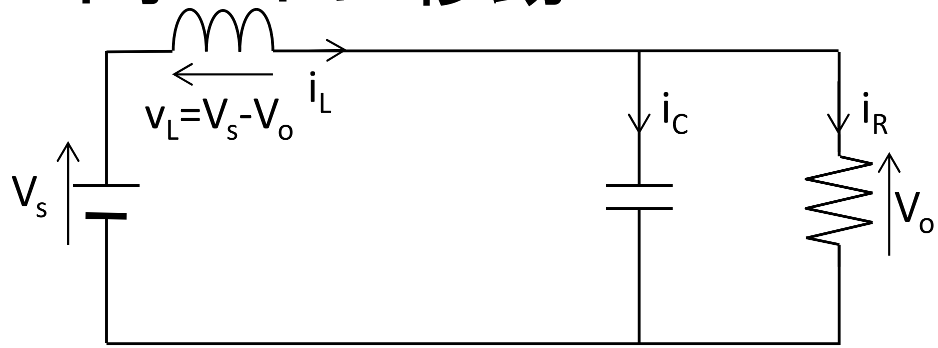
  - スイッチオン時に
    増加する電流

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



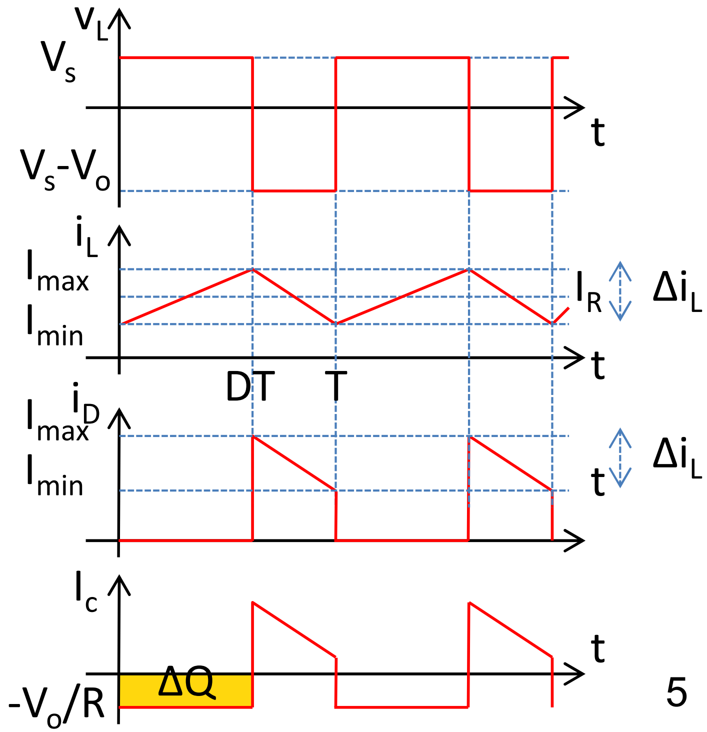
ブーストコンバータ
スイッチOFF時1

- 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



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

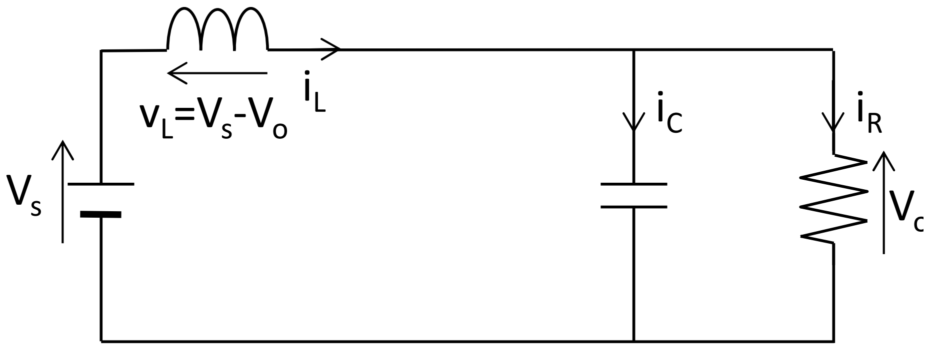
$$\Rightarrow \quad \frac{di_L}{dt} = \frac{V_S - V_O}{L}$$



ブーストコンバータ
スイッチOFF時2

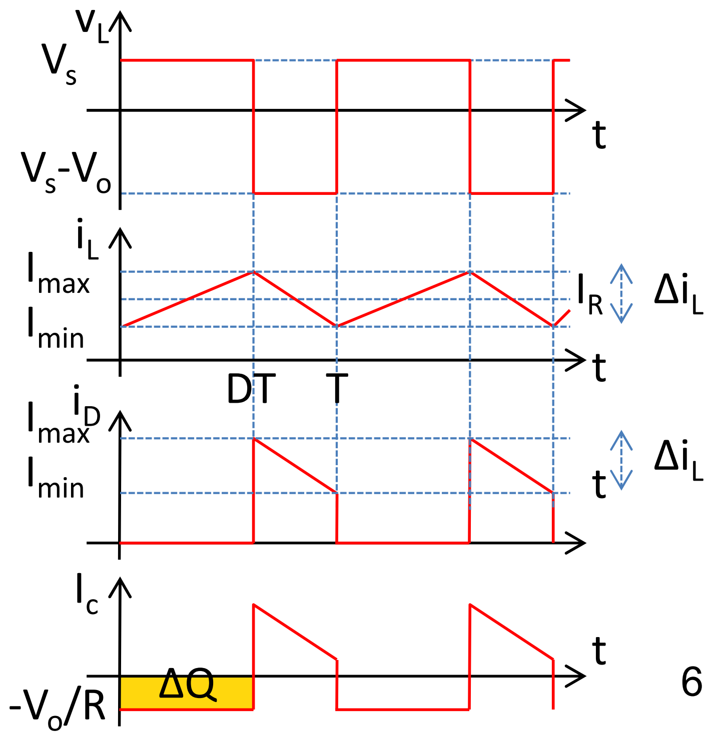
- Cが大きくV_Oが一定の仮定より
  - 電流は一定の割合で減少

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



- 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

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

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

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

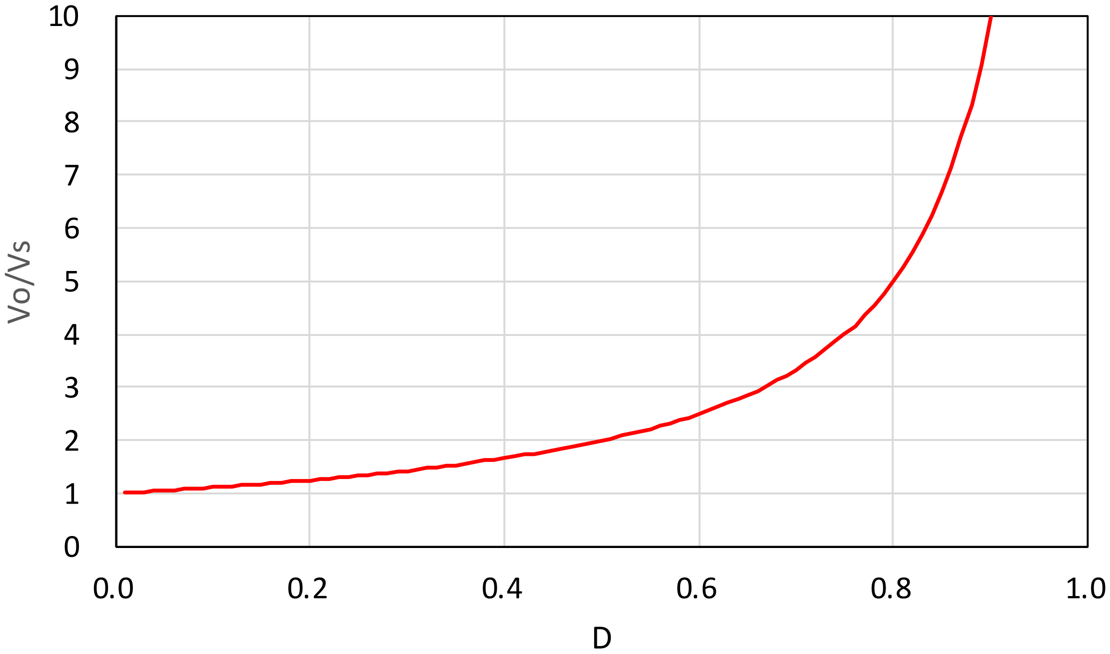
$$V_o = \frac{V_s}{1 - D}$$

  - 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　　$V_s D$
    - 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)

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



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

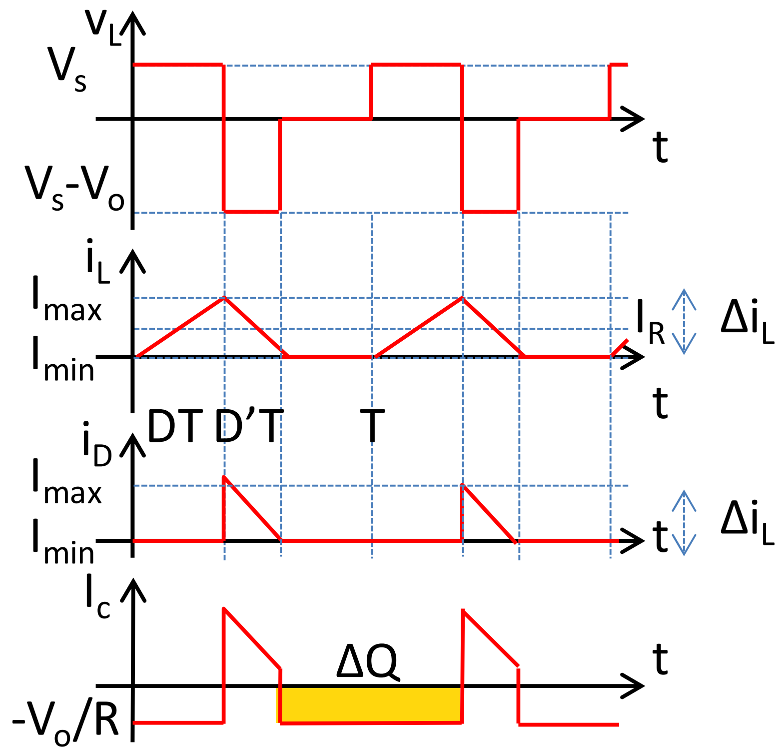
$$I_{\min} = 0 = \frac{V_S}{(1-D)^2 R} - \frac{V_S DT}{2L} \Rightarrow \frac{V_S}{(1-D)^2 R} = \frac{V_S DT}{2L} = \frac{V_S D}{2Lf}$$

- 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

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

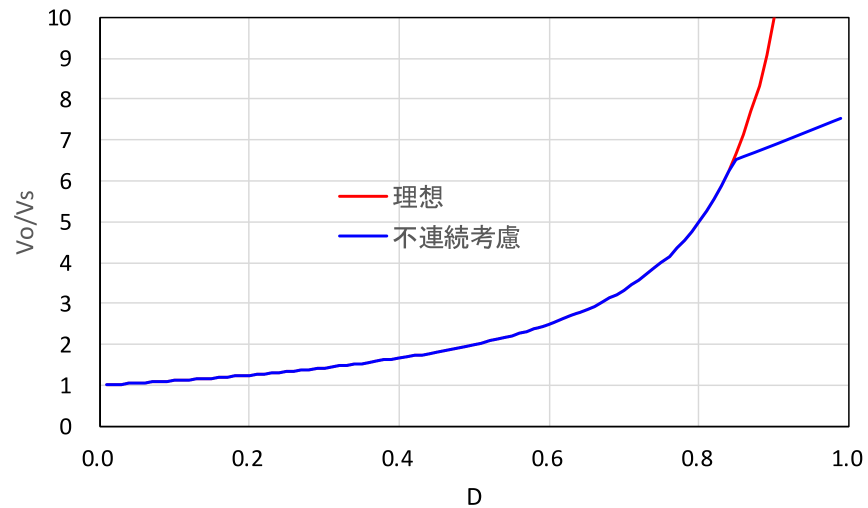
$$= \frac{V_s D T D'}{2L}$$

ブーストコンバータ
不連続導通

- $\frac{V_O}{R} = \frac{V_S D T D'}{2L}$
- $D' = \frac{V_O 2L}{V_S R D T}$
- $\frac{V_O}{V_S} = \frac{D+D'}{D'} = \frac{D+\frac{V_O 2L}{V_S RDT}}{\frac{V_O 2L}{V_S RDT}}$
- $\left(\frac{V_O}{V_S}\right)^2 \frac{2L}{RDT} - \frac{V_O 2L}{V_S RDT} - D = 0$
- $\left(\frac{V_O}{V_S}\right)^2 - \frac{V_O}{V_S} - \frac{RD^2T}{2L} = 0$
- 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

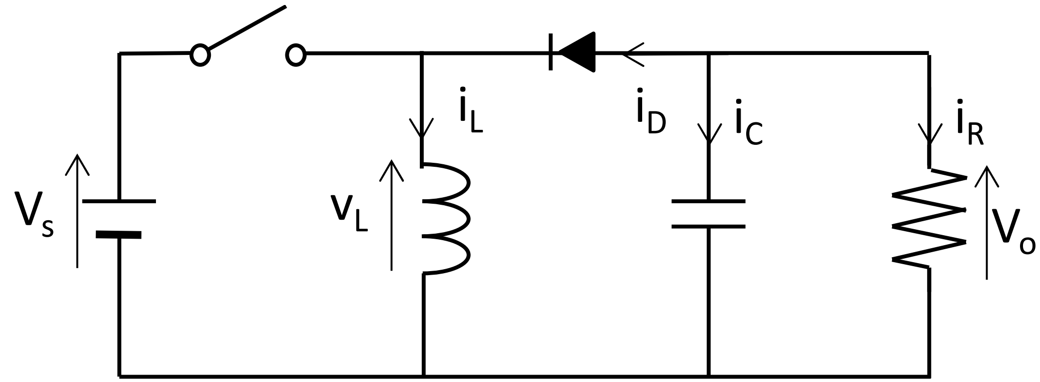
- 電流の計算はC=∞と仮定
- 電流値とCを用いて電圧脈動を評価
  - オン時の放電電荷
    - 出力電圧一定の時，負荷電流=Cの電流 $I_C = -\frac{V_O}{R}$
    - 電圧変化をΔV_Oとすると $\left|\Delta Q\right| = \left(\frac{V_O}{R}\right)DT = C\Delta V_O$

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

- 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

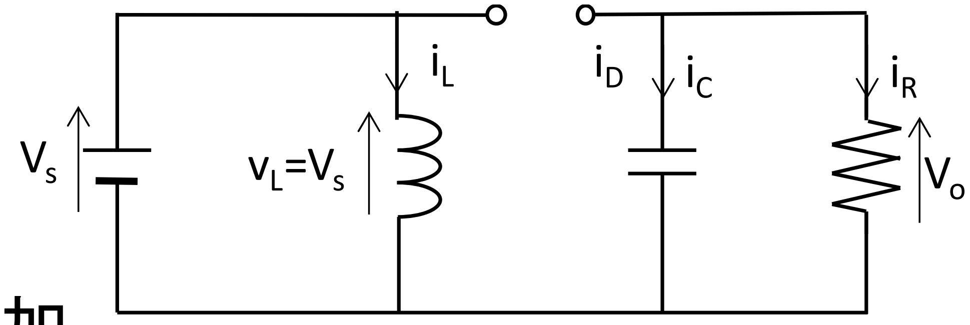
- 電源電圧を昇降圧
  - 昇降圧コンバータ
  - 出力電圧が極性反転
- 回路構成要素
  - L:エネルギー蓄積
    電源に重畳
  - C:ローパスフィルタ
  - 動作解析での仮定
    - 周期定常状態
    - スイッチング周期T,デューティ比D
    - Lの電流は連続
    - Cは十分大きく, 電圧がV_Oに一定に保たれる
    - 理想素子



バックブーストコンバータ
スイッチON時

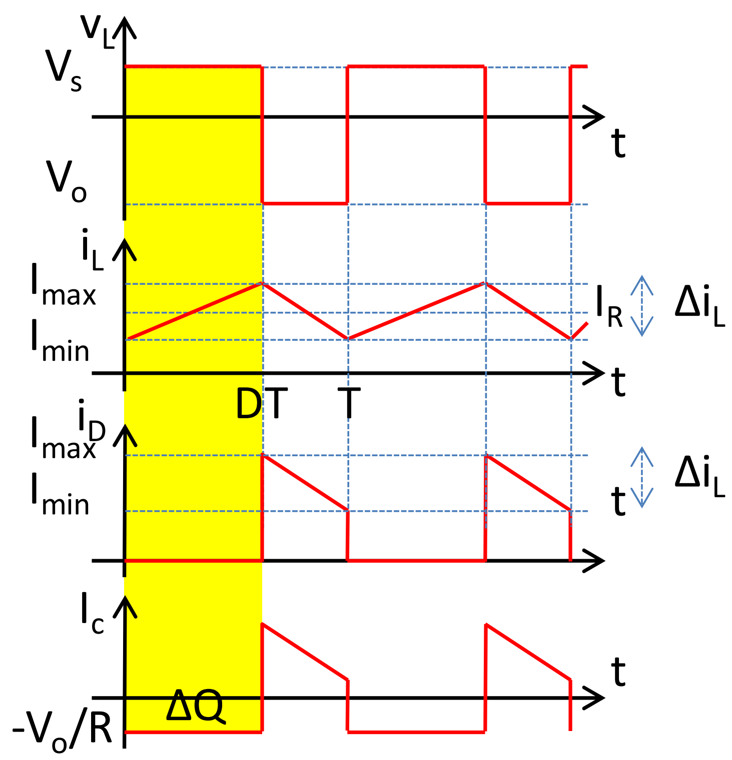
- Lを含む経路に対するKVLより

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



  - 電源電圧は一定より
    - 電流は一定の割合で増加

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

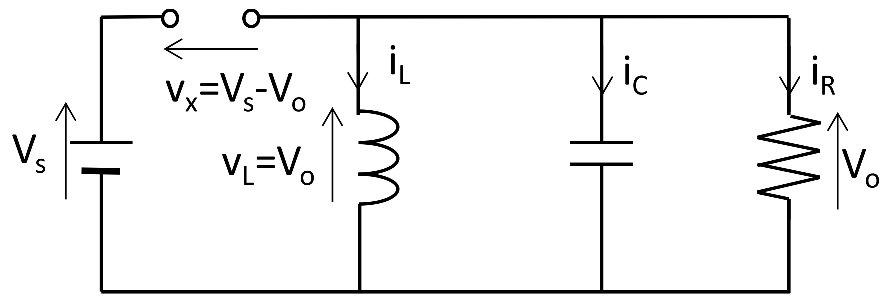


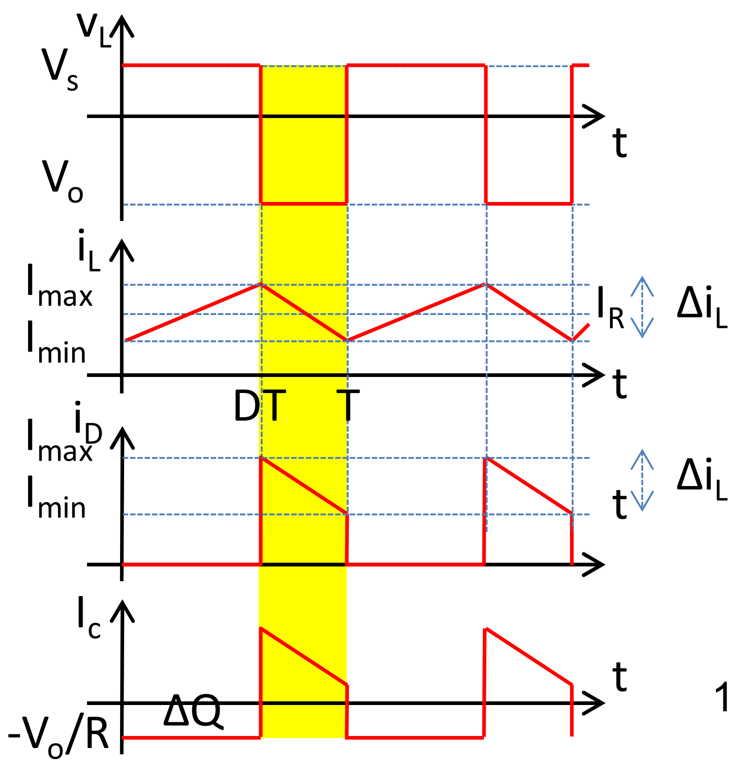
  - スイッチオン時に
  増加する電流

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

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



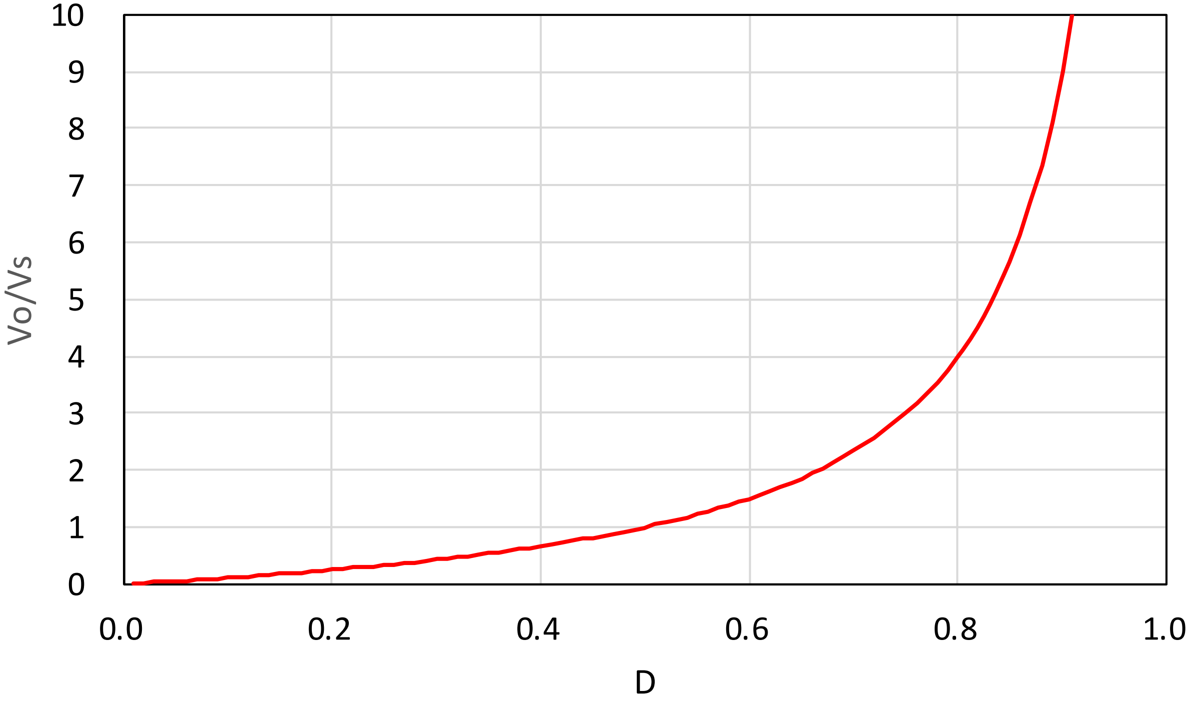


バックブーストコンバータの出力

- 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　$\Delta i_{Lon} + \Delta i_{Loff} = \frac{V_S DT}{L} + \frac{V_O(1-D)T}{L} = 0$
    - $V_S D + V_O(1-D) = 0$
    - $\frac{V_O}{V_S} = -\frac{D}{1-D}$
    - 入出力電圧の極性が反転する

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

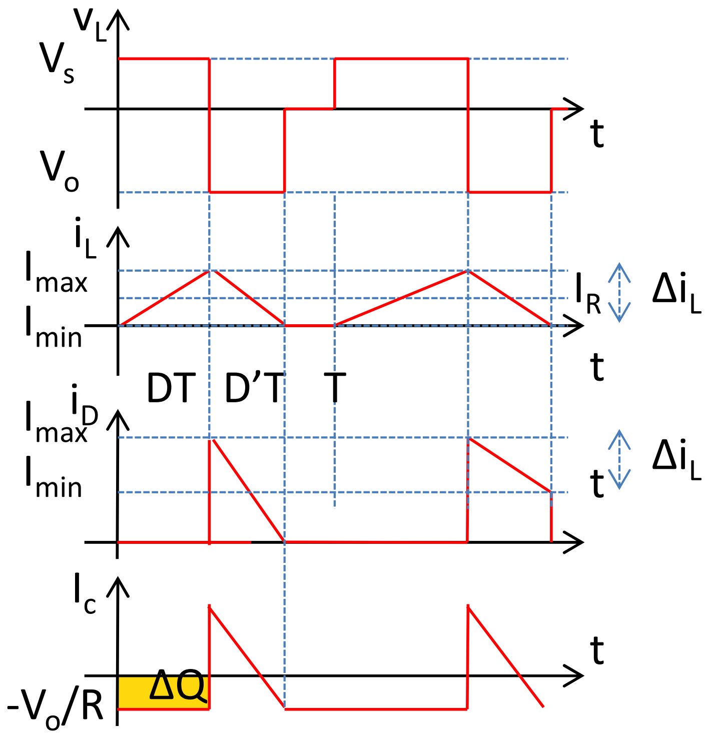
- 出力電力
  - Cの電圧一定の仮定 $P_O = \frac{{V_O}^2}{R}$
- 入力電力
  - 入力平均電流I_sで表す $P_s = V_s I_s$
  - Lに流れる平均電流I_Lとの関係 $I_s = I_L D$
  - $P_O = P_s = \frac{{V_O}^2}{R} = V_s I_s = V_s I_L D$
  - $I_L = \frac{{V_O}^2}{V_s D R} = \frac{{V_O}^2 V_s}{{V_s}^2 D R} = \left(\frac{-D}{1-D}\right)^2 \frac{V_s}{DR} = \frac{D V_s}{(1-D)^2 R}$

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



バックブーストコンバータ
不連続導通

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

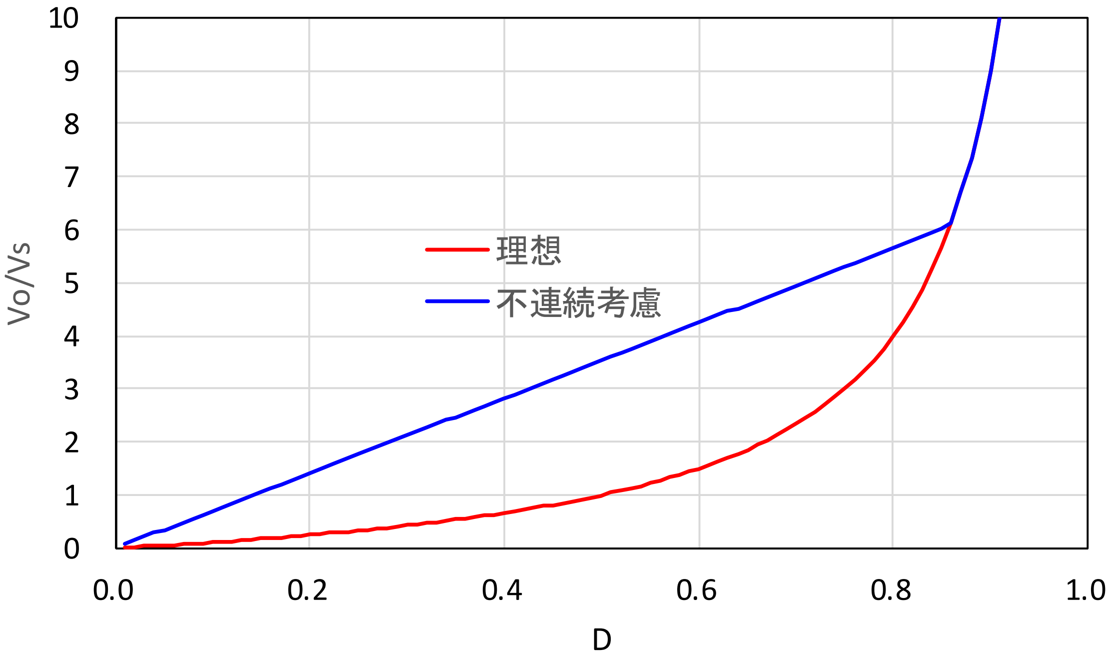
$$= \frac{V_s D T D'}{2L} = \frac{V_s D T D\frac{V_s}{V_o}}{2L} = \frac{{V_s}^2 T D^2}{2L V_o}$$

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

バックブーストコンバータ 不連続導通

- 連続導通条件
- $\frac{2L}{RT} > (1-D)^2$
- $\sqrt{\frac{2L}{RT}} > 1-D$
- $\mathrm{D} > 1-\sqrt{\frac{2L}{RT}}$

- 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 $|\Delta Q| = \left(\dfrac{V_O}{R}\right) DT = C\Delta V_O$

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

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