パワーエレクトロニクス
第九回　DC-DCコンバータ

平成30年6月27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

リニアレギュレータ

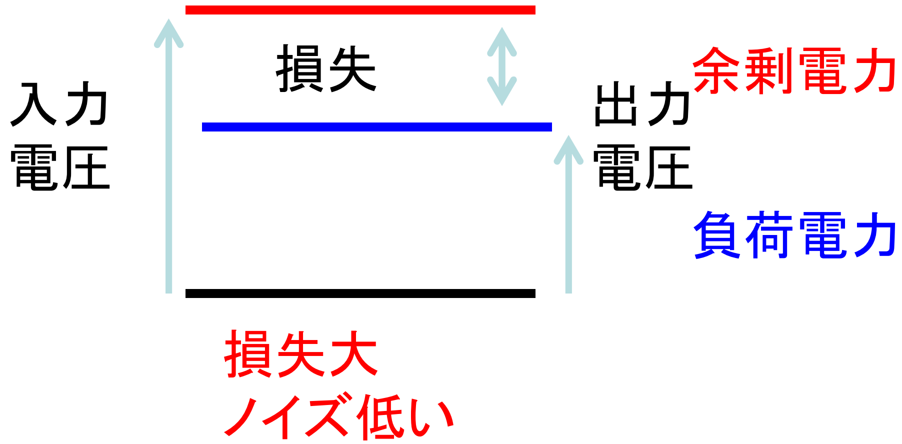
出力電圧　$V_o = I_L R_L$

負荷電力　$V_o I_L$

トランジスタでの消費電力

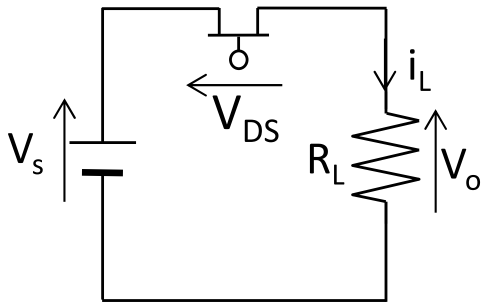
$$V_{CE} I_L$$

トランジスタは抵抗動作

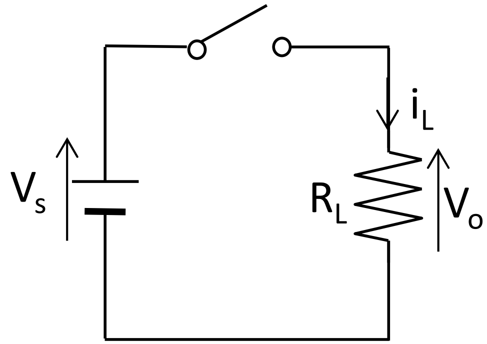


スイッチングコンバータ

トランジスタはON/OFF（スイッチ）動作



等価回路

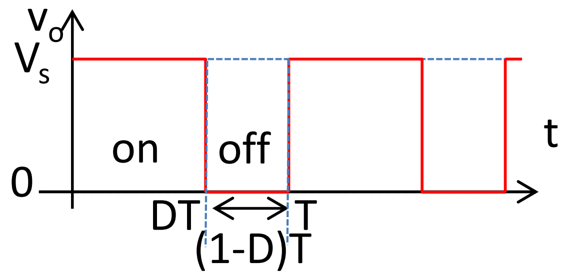


損失少ない
ノイズ多い

出力電圧

$$V_o = \frac{1}{T}\int_0^T v_o(t)dt = \frac{1}{T}\int_0^{DT} V_s dt = V_s D$$

デューティ比 $D \equiv \dfrac{t_{on}}{t_{on}+t_{off}} = \dfrac{t_{on}}{T} = t_{on} f$



全電力が負荷で消費。効率高い

スイッチモードDC-DCコンバータ (スイッチング電源)

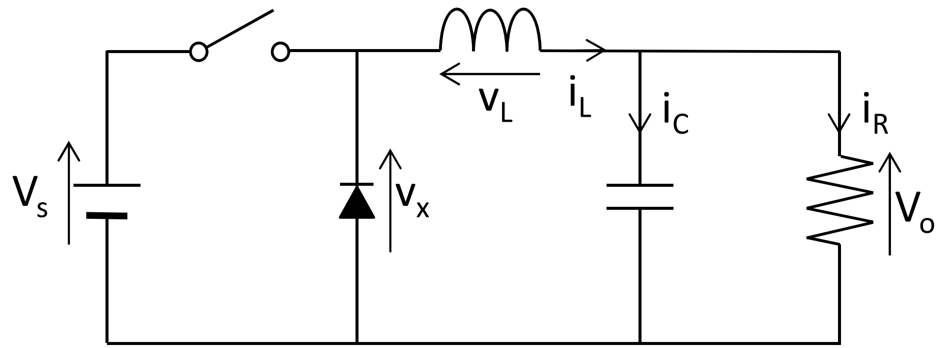
- 非絶縁型
  - 直接型
    - バックコンバータ　降圧
    - ブーストコンバータ　昇圧
  - 間接型
    - バック･ブーストコンバータ　昇降圧
    - チュックコンバータ　昇降圧
- 絶縁型
  - フライバックコンバータ
  - フォワードコンバータ

バック(Buck)コンバータ

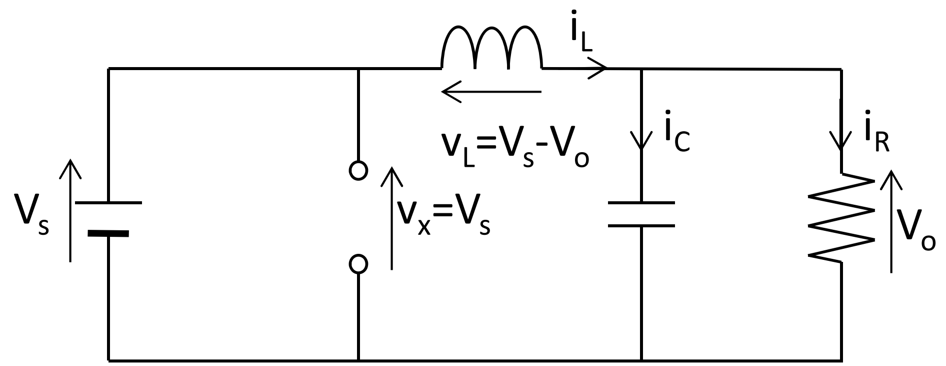
※BackではなくBuck

Buck:振り落とす（他動）

- 電源電圧を降圧
  - ダウンコンバータとも呼ぶ
- 回路構成要素
  - L:一時的に
    エネルギーを貯める
  - C:ローパスフィルタ
    - 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



バックコンバータ
スイッチオン時



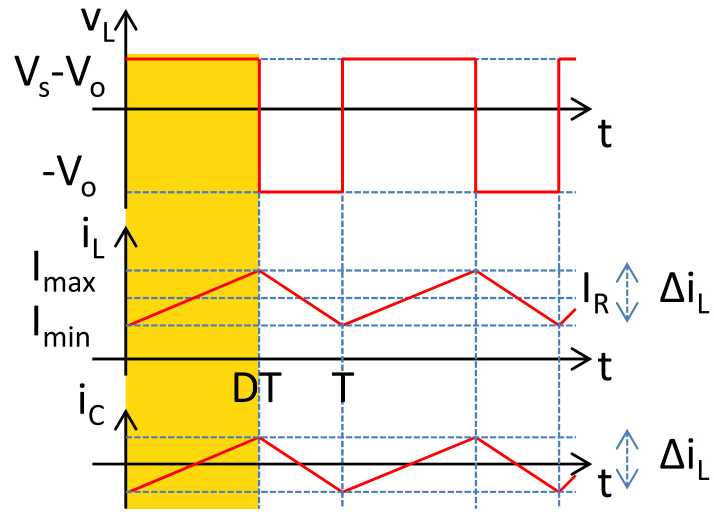
- Lに印加される電圧

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

- Lに流れる電流

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

- 電流は直線的に増加（C大よりV_O一定）

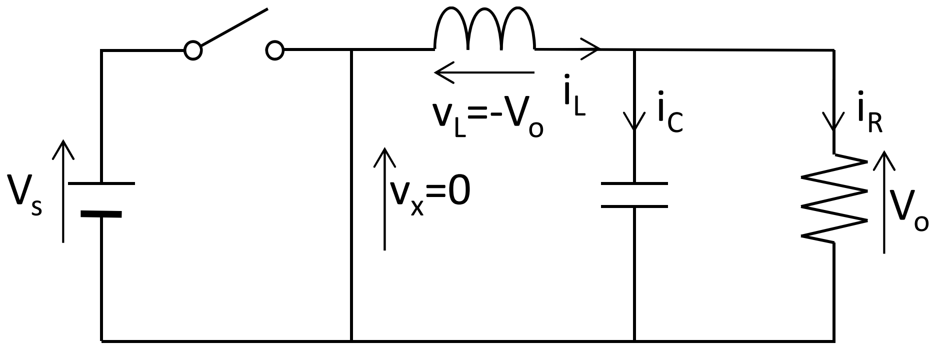


$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_S - V_O}{L} \Rightarrow \Delta i_{L,on} = \frac{V_S - V_O}{L}DT$$

バックコンバータ
スイッチオフ時

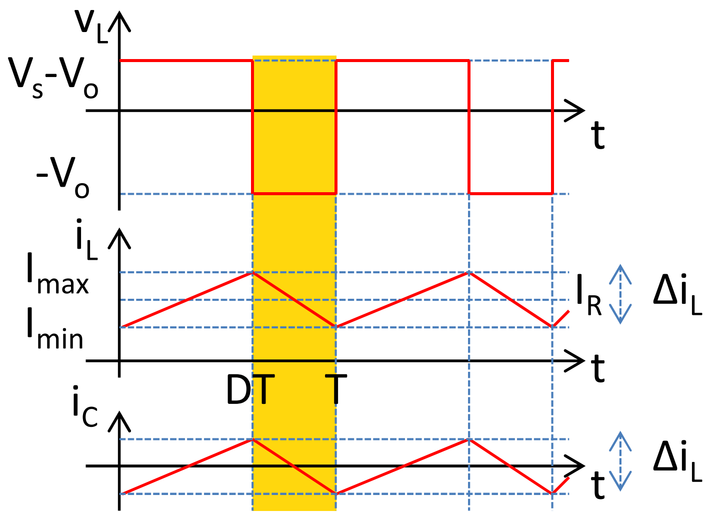
- Lに印加されている電圧
  - 電源は縁切りされる

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



  - 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大より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に流れる電流

- 周期定常状態　⇒　一周期後に同じ電流値

交流回路と同じ

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

- 電源電圧と出力電圧の関係

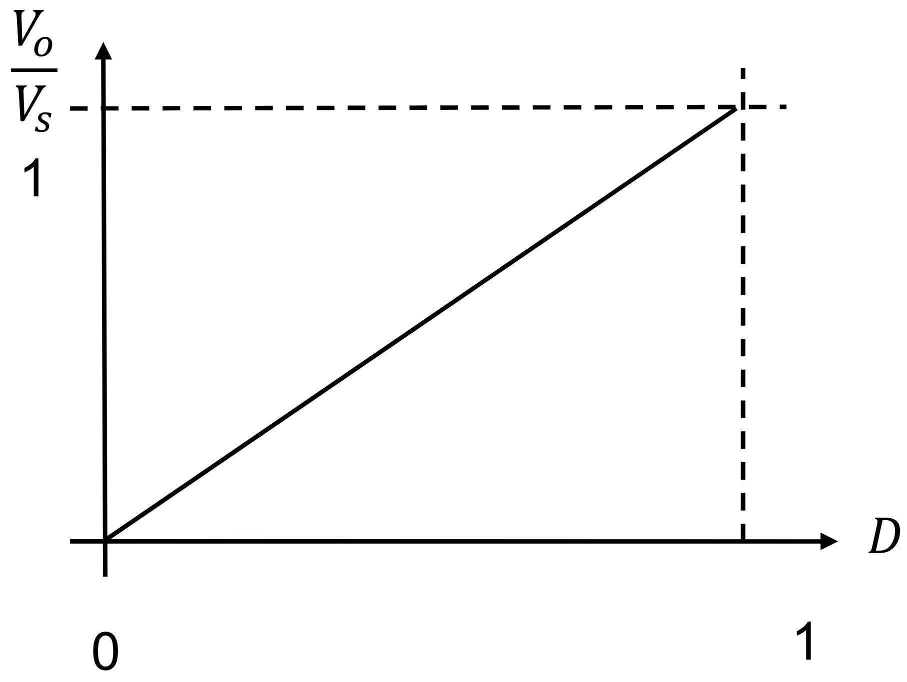
$$\frac{V_S - V_O}{L} DT + \frac{-V_O}{L}(1-D)T = 0 \quad \Rightarrow \quad V_O = V_S D$$

- 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
降圧比(連続導通)

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



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

$$I_{\max} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_O}{R} + \frac{1}{2}\left[\frac{V_O}{L}(1-D)T\right] = V_O\left[\frac{1}{R} + \frac{1-D}{2Lf}\right]$$

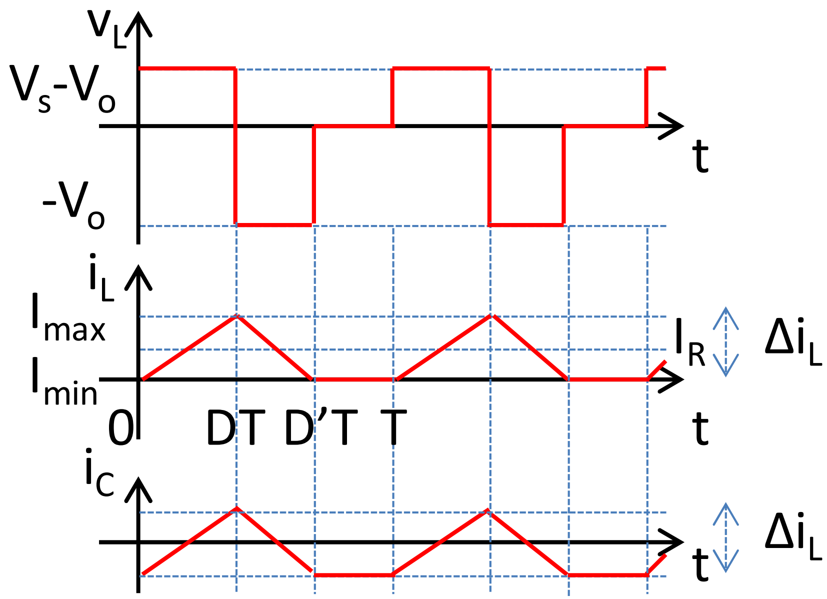
$$I_{\min} = I_L - \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_O}{R} - \frac{1}{2}\left[\frac{V_O}{L}(1-D)T\right] = V_O\left[\frac{1}{R} - \frac{1-D}{2Lf}\right]$$

バックコンバータ
連続導通条件

- $I_{min} = V_o\left[\frac{1}{R} + \frac{1-D}{2L}T\right] > 0$
  - $\frac{1}{R} + \frac{1-D}{2L}T > 0$
    - $L > \frac{(1-D)TR}{2} = L_{min}$
    - $D > 1 - \frac{2L}{RT}$

バックコンバータ
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
  - $\Delta i_{Lon} = \dfrac{(V_s - V_o)DT}{L}$
  - $\Delta i_{Loff} = \dfrac{-V_o D'T}{L}$
  - $\Delta i_{Lon} + \Delta i_{Loff} = \dfrac{(V_s - V_o)DT}{L} + \dfrac{-V_o D'T}{L} = 0$



バックコンバータ
不連続導通

- $(V_s - V_o)D - V_o D' = 0$
- $V_s D = V_o(D + D')$
- $\frac{V_o}{V_s} = \frac{D}{D+D'}$
- Lの平均電流は負荷の平均電流に等しい
  - $I_L = I_R = \frac{V_o}{R} = \frac{1}{T}\left(\frac{\Delta i_{Lon} DT}{2} - \frac{\Delta i_{Loff} D'T}{2}\right)$

$$= \frac{\Delta i_{Lon}(D + D')}{2} = \frac{V_o D'T(D + D')}{2L}$$

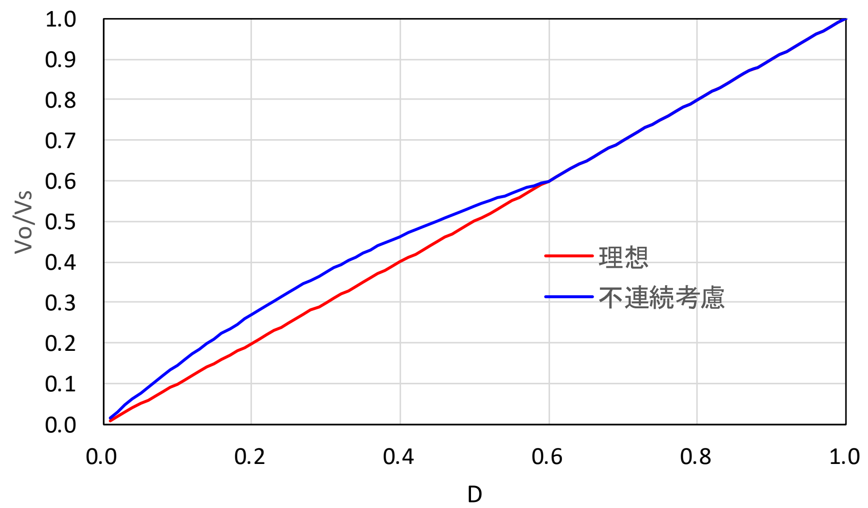
バックコンバータ
不連続導通

- $\frac{V_O}{R} = \frac{V_O D\prime T(D+D\prime)}{2L}$
- $\frac{D\prime T(D+D\prime)}{2L} - \frac{1}{R} = 0$
- $D'(D + D') - \frac{2L}{RT} = 0$
- $D'^2 + DD' - \frac{2L}{RT} = 0$
- $D' = \frac{-D \pm \sqrt{D^2 + \frac{8L}{RT}}}{2}$

$$= \frac{-D + \sqrt{D^2 + \frac{8L}{RT}}}{2}$$

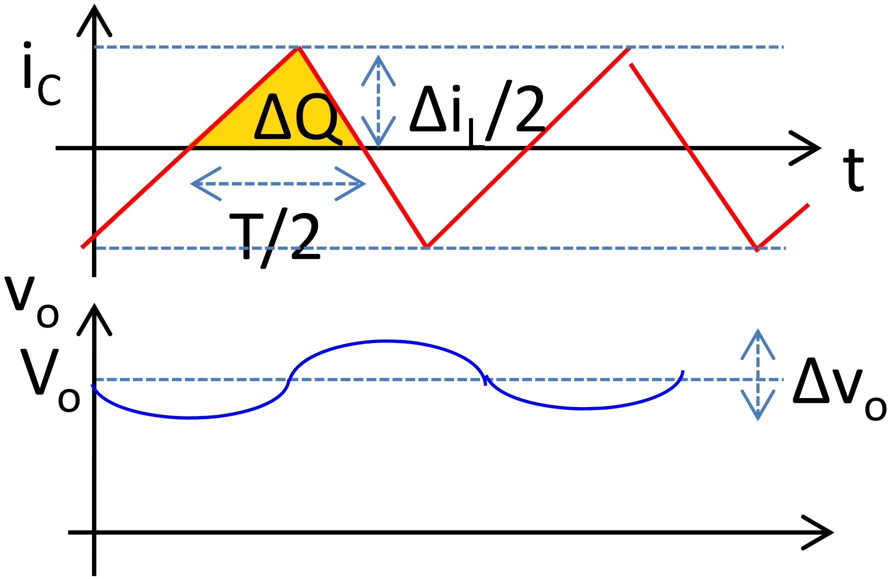
- $\frac{V_O}{V_S} = \frac{D}{D+D\prime} = \frac{D}{D + \frac{-D+\sqrt{D^2+\frac{8L}{RT}}}{2}}$

$$= \frac{2D}{D + \sqrt{D^2 + \frac{8L}{RT}}}$$



バックコンバータ
電圧脈動

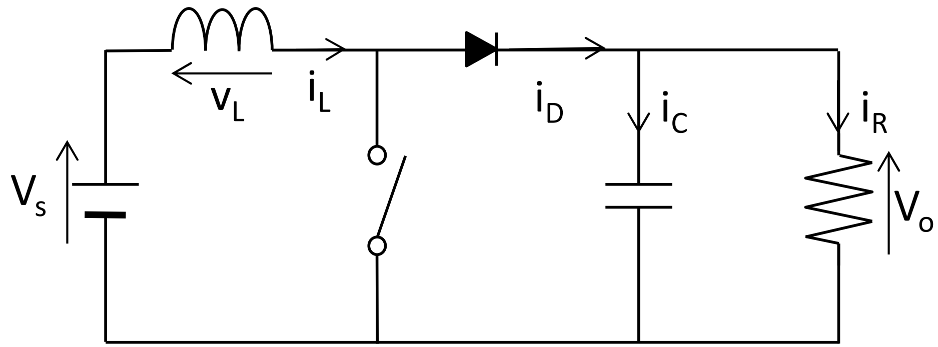
- Cの電流:$I_C = I_L$-I_R
- Cの電荷と電圧の関係
  - $Q = CV_o$
  - 充電電荷について
    - $\Delta Q = C\Delta V_o = \frac{1}{2}\frac{T}{2}\frac{\Delta i_L}{2} = \frac{T\Delta i_L}{8}$
    - $\Delta V_o = \frac{T\Delta i_L}{8C} = \frac{T}{8C}\frac{V_o}{L}(1-D)T = \frac{V_o(1-D)}{8LCf^2}$
- リップル率:$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{1-D}{8LCf^2}$



ブースト(Boost)コンバータ

出力電圧が入力より大

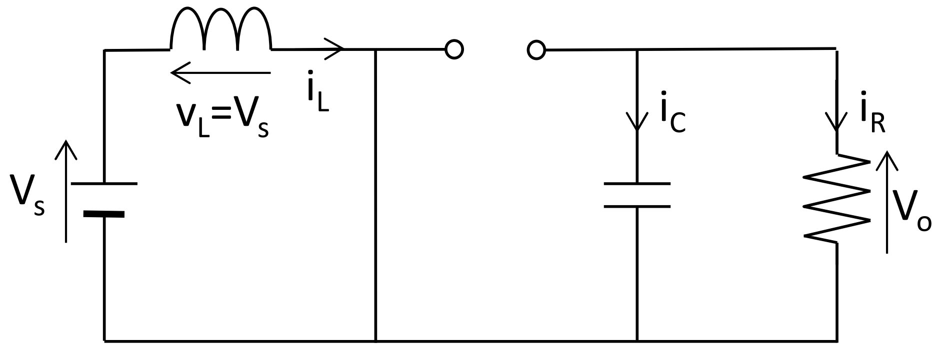
- 電源電圧を昇圧
  - 昇圧コンバータ
- 回路構成要素
  - L:エネルギー蓄積
  - C:ローパスフィルタ
  - 動作解析での仮定
    - 周期定常状態
    - スイッチング周期T,デューティ比D
    - Lの電流は連続
    - Cは十分大きく, 電圧がV_Oに一定に保たれる
    - 理想素子



ブーストコンバータ
スイッチON時

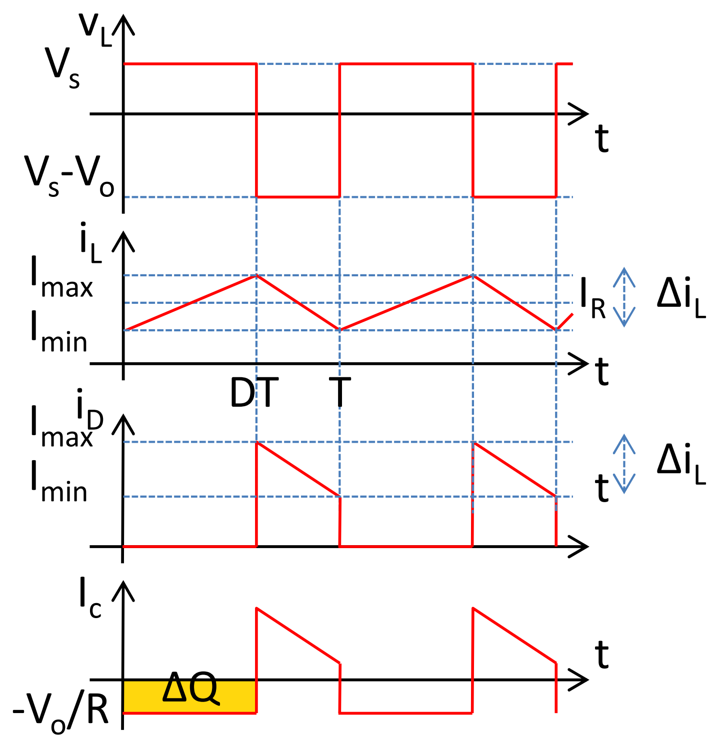
- Lを含む経路に対するKVLより

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



  - 電源電圧は一定より
    - 電流は一定の割合で増加

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

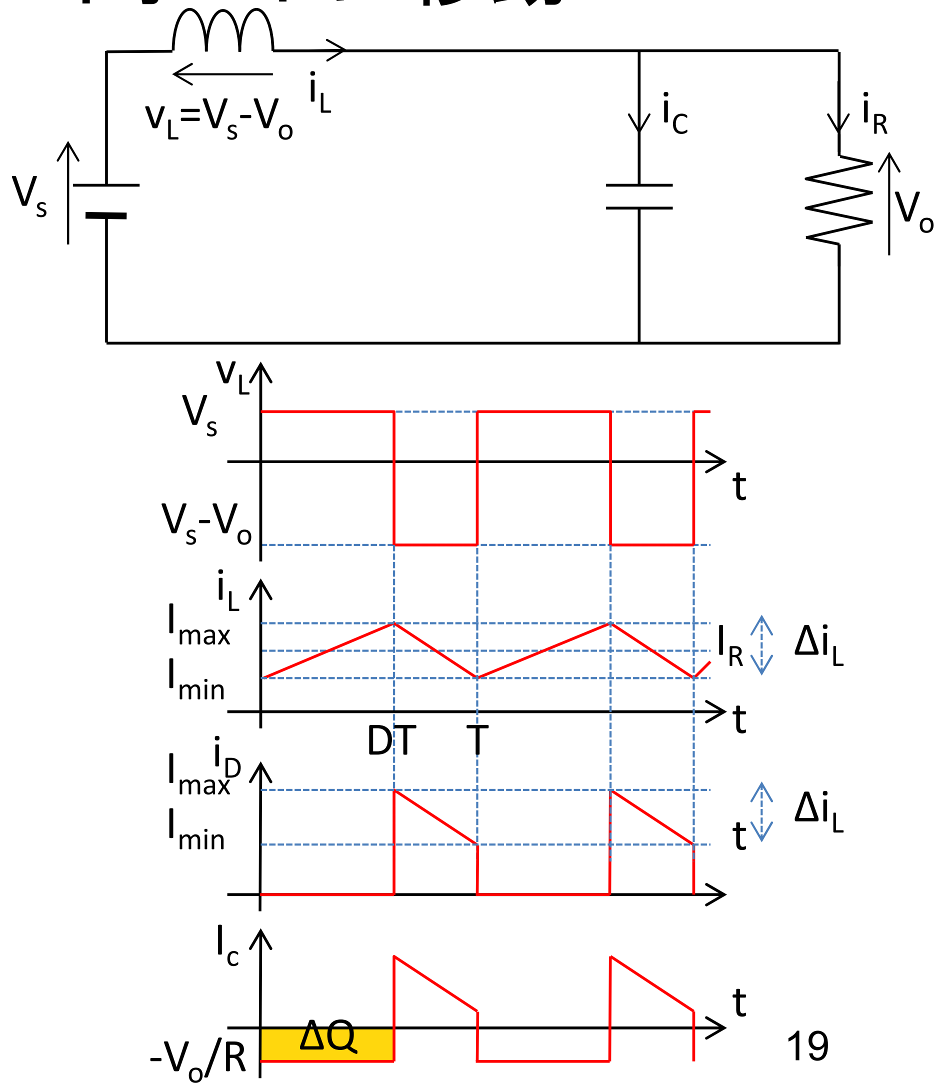


  - スイッチオン時に
    増加する電流

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

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



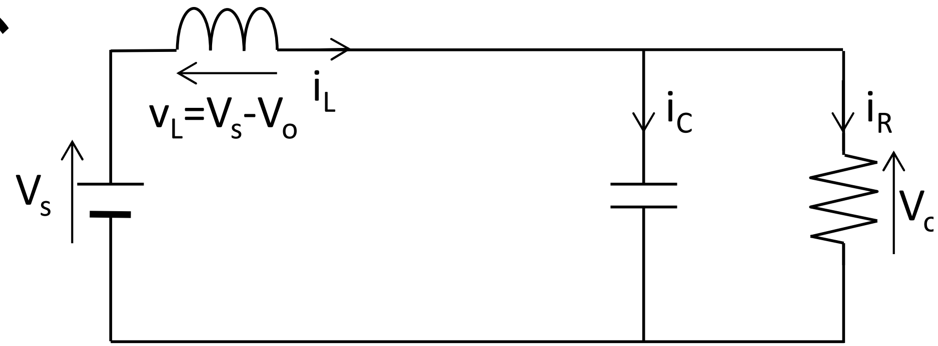
$$v_L = V_S - V_O = L\frac{di_L}{dt}$$

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

ブーストコンバータ
スイッチOFF時2

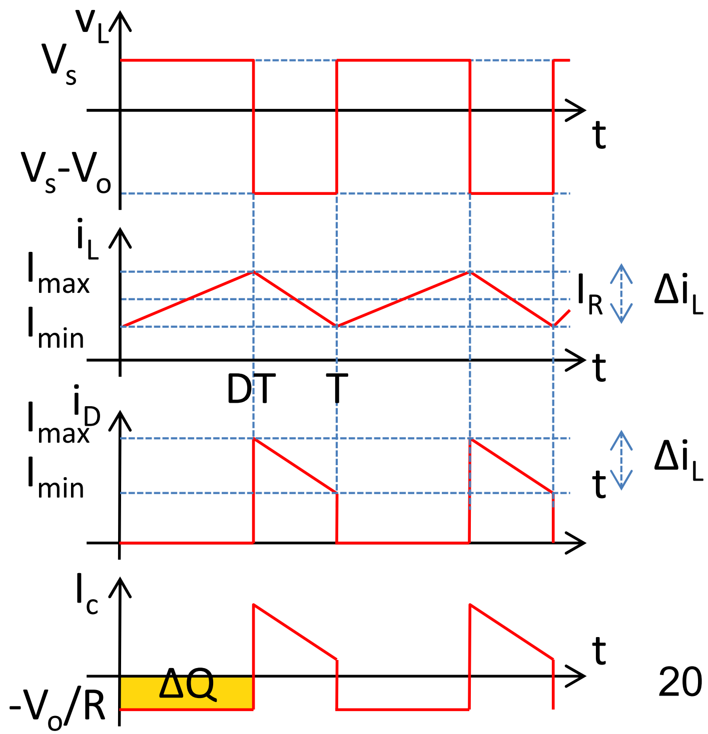
- Cが大きくV_Oが一定の仮定より
  - 電流は一定の割合で減少

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



- 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

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

    - 和が0

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

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

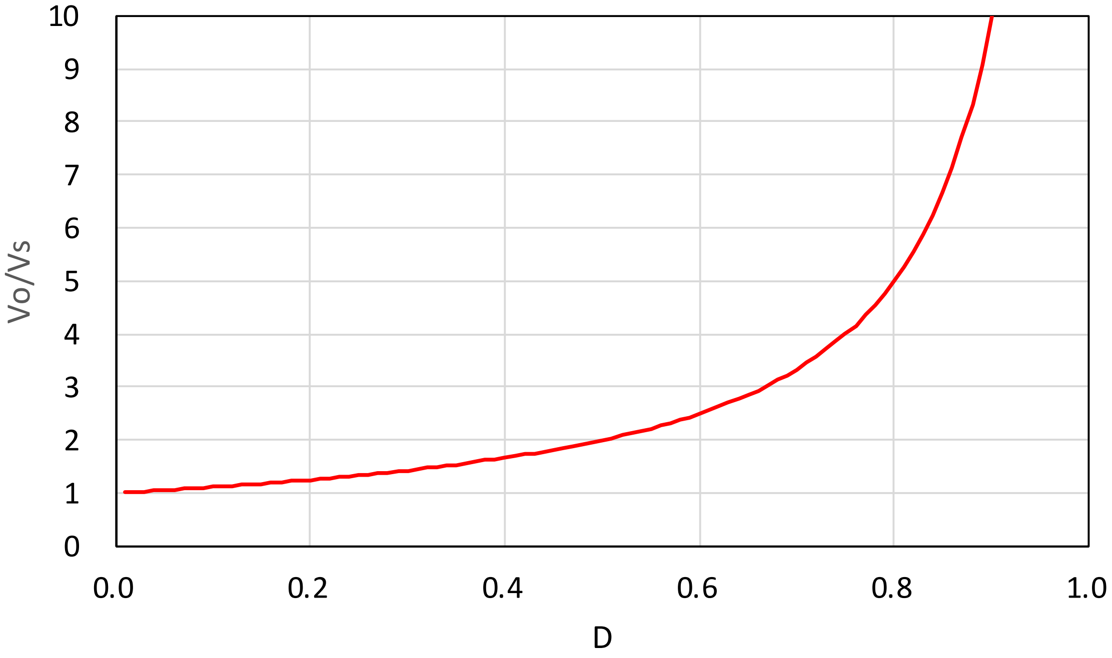
⇨ $$V_S(D+1-D) - V_O(1-D) = 0$$

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

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

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

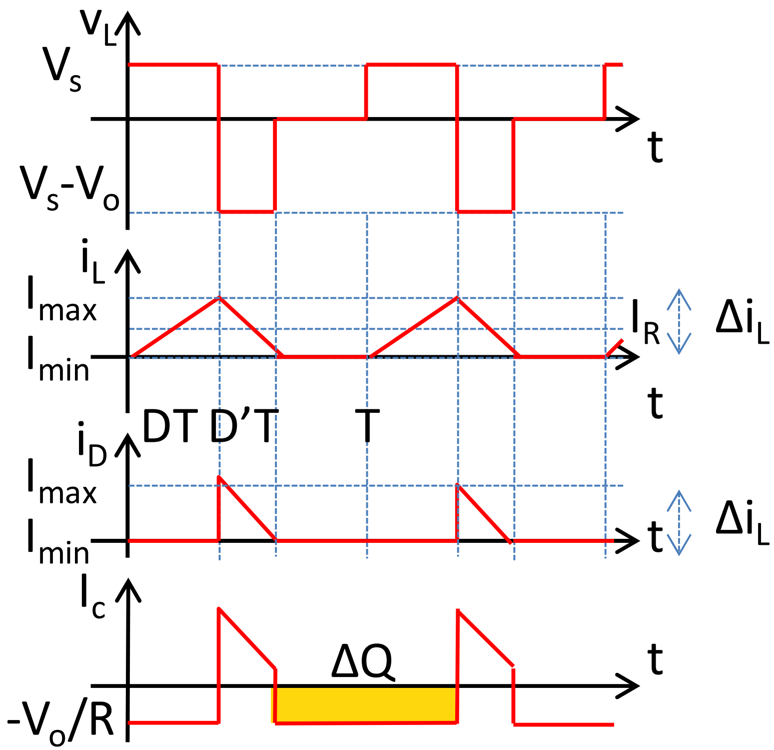
- 電流が連続となる限界

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

  - 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

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

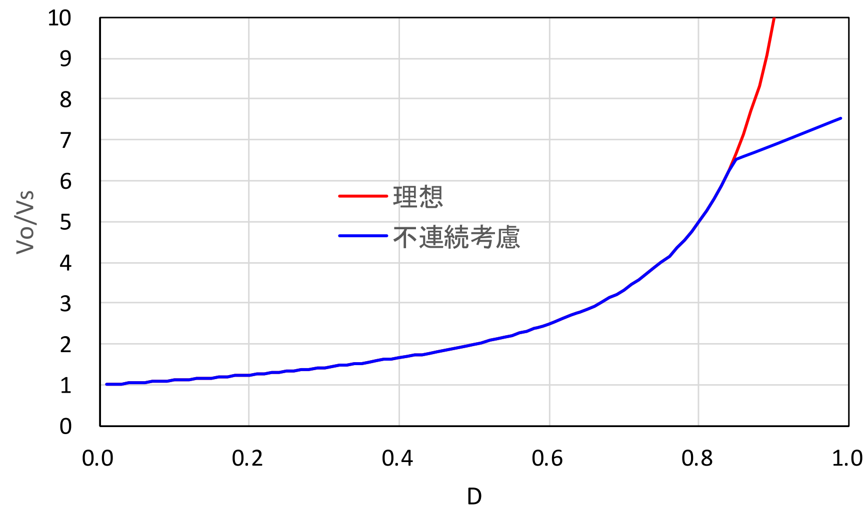
$$= \frac{V_s D T D'}{2L}$$

ブーストコンバータ
不連続導通

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