

パワーエレクトロニクス
第八回 DC-DCコンバータ

2022年6月8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

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

リニアレギュレータ



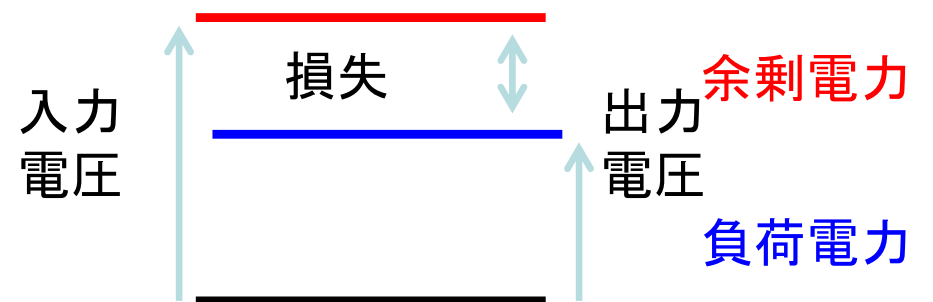
出力電圧 $V_o = I_L R_L$

負荷電力 $V_o I_L$

トランジスタでの消費電力

$$V_{CE} I_L$$

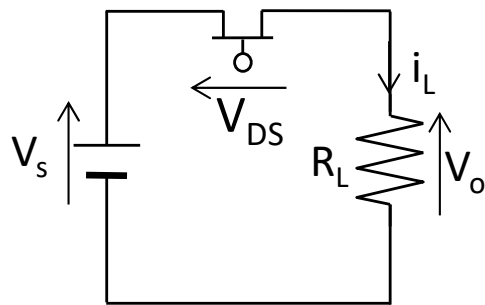
トランジスタは抵抗動作



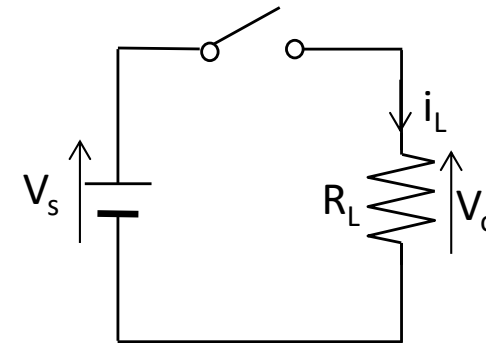
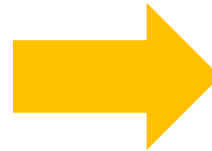
損失大
ノイズ低い
昇圧不可

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

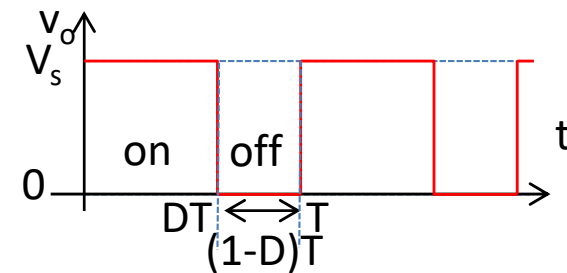


損失少ない
ノイズ多い

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 $D \equiv \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{t_{on}}{T} = t_{on} f$

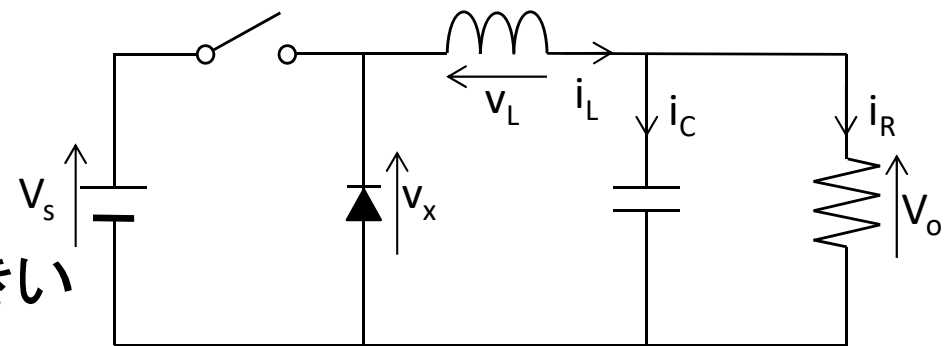


全電力が負荷で消費。効率高い

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
 - 定電圧を得るため十分大きい
 - 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

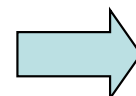
$$v_L = V_S - V_O = L \frac{di_L}{dt}$$

- Lに流れる電流

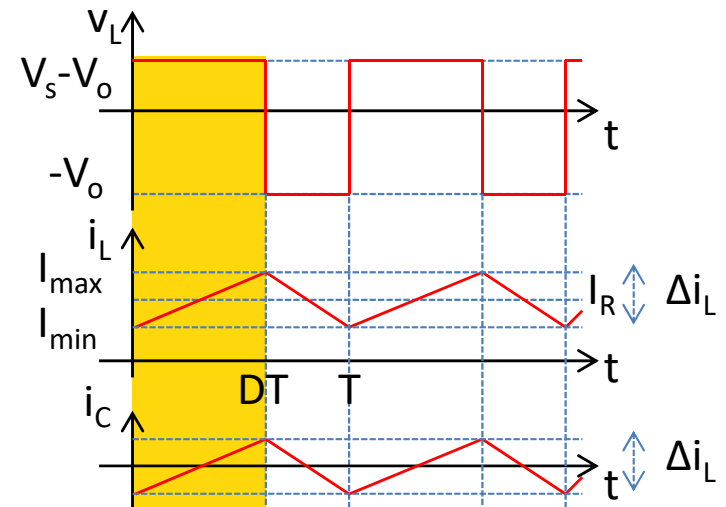
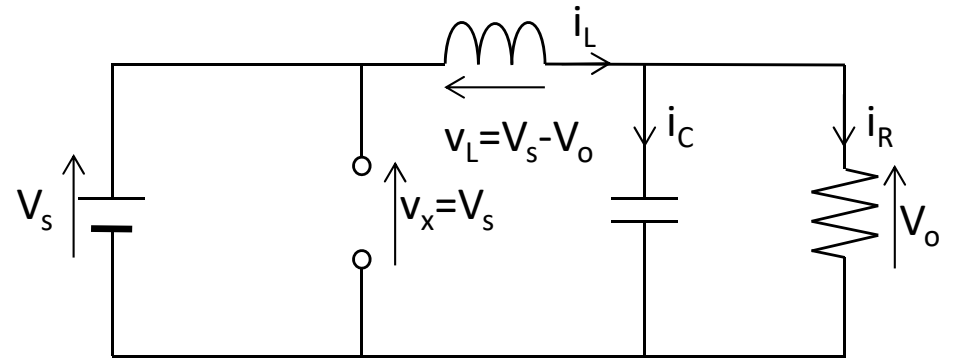
$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_S - V_O}{L}$$

- 電流は直線的に増加
(C大より V_O 一定)

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



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



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

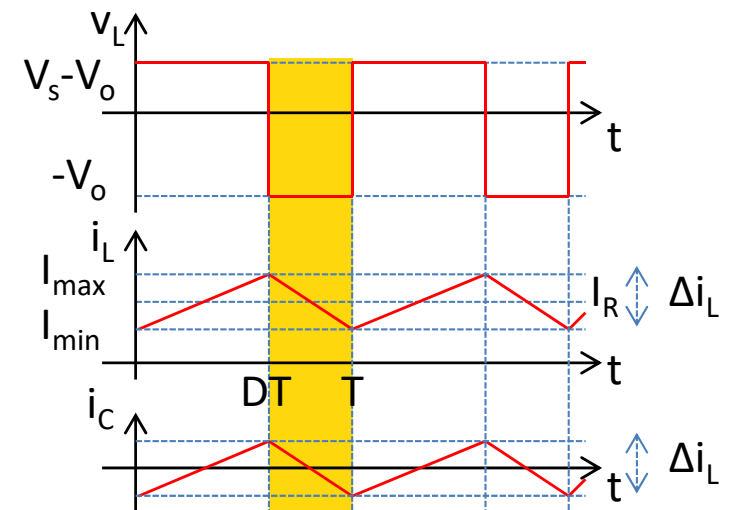
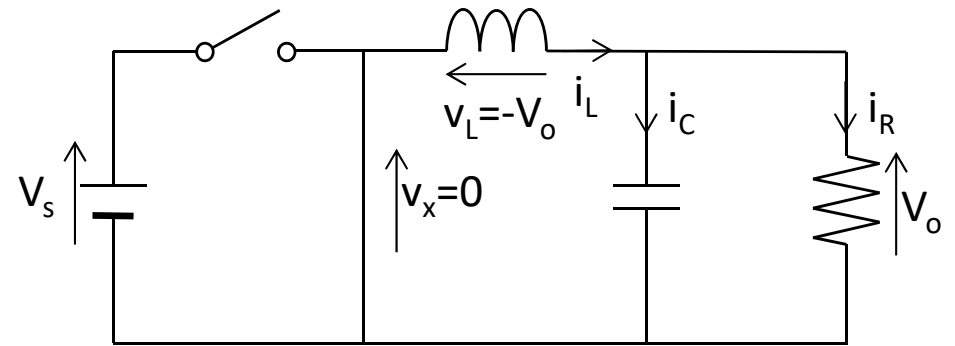
$$v_L = -V_o = L \frac{di_L}{dt}$$

- 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 \Rightarrow 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

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

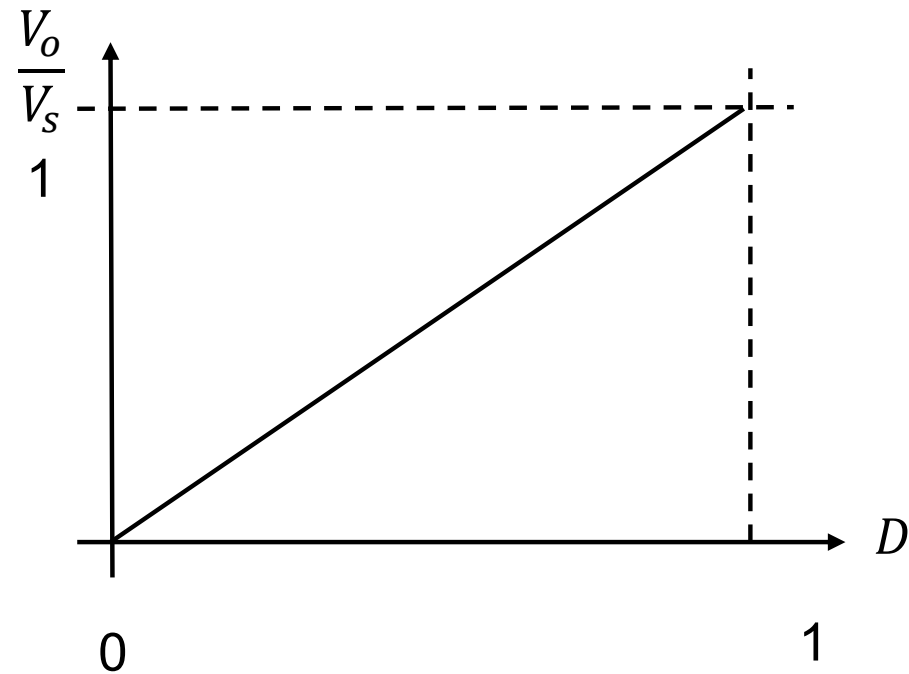
- 別解

- 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 $D + D' = 1$

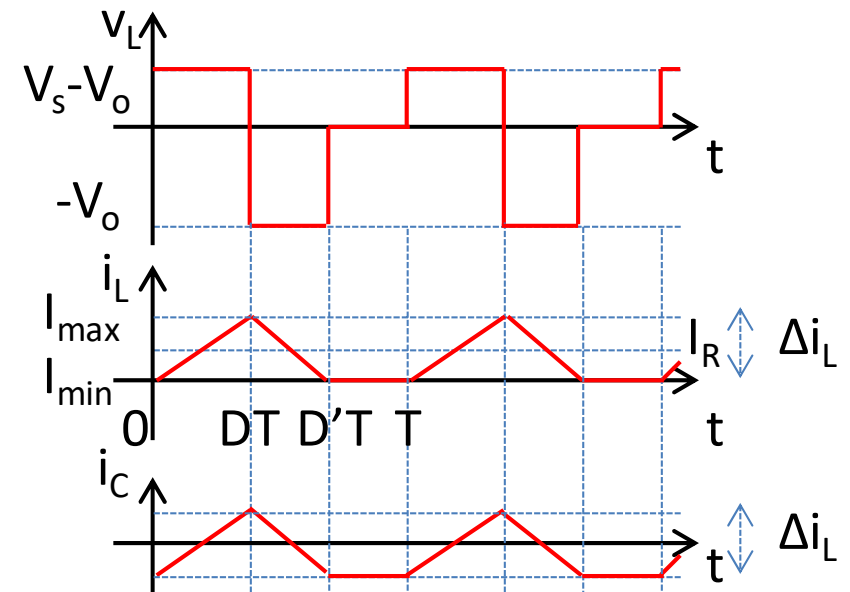
- 不連続導通 $D + D' < 1$

- 電流変化量

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

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

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



バックコンバータ 不連続導通

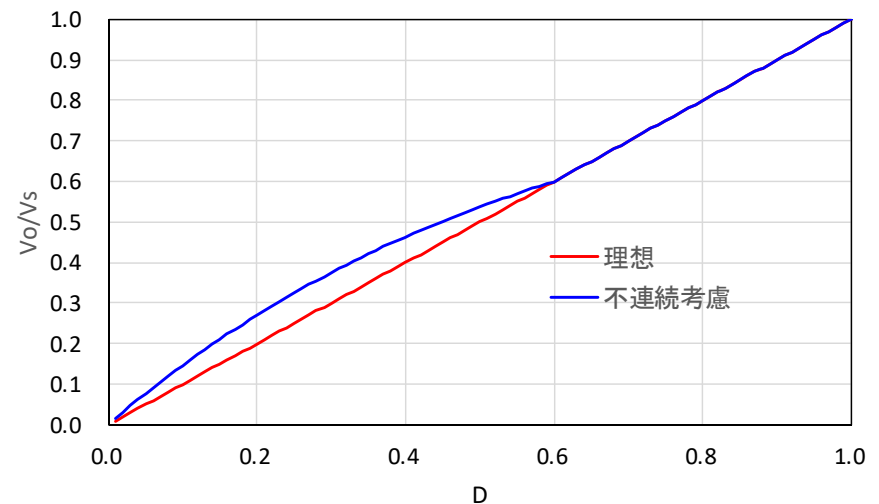
- $(V_s - V_o)D - V_o D' = 0$
- $V_s D = V_o (D + D')$
- $\frac{V_o}{V_s} = \frac{D}{D + D'}$
- Lの平均電流は負荷の平均電流に等しい

$$\begin{aligned} \bullet \quad I_L = I_R &= \frac{V_o}{R} = \frac{1}{T} \left(\frac{\Delta i_{L\text{on}} D T}{2} - \frac{\Delta i_{L\text{off}} D' T}{2} \right) \\ &= \frac{\Delta i_{L\text{on}} (D + D')}{2} = \frac{V_o D' T (D + D')}{2L} \end{aligned}$$

バックコンバータ 不連続導通

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

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



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

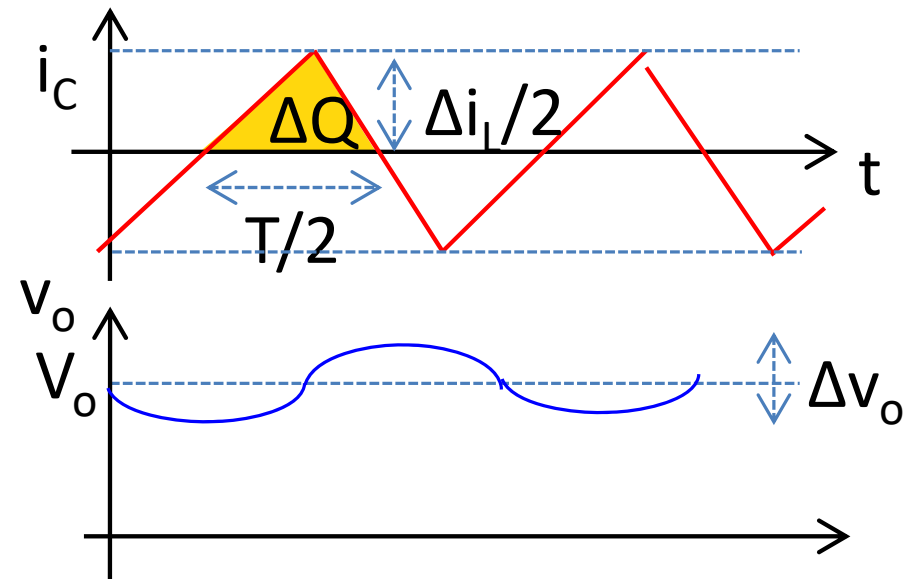
- $Q = CV_o$

- 充電電荷について

- $\Delta Q = C\Delta V_o = \frac{1}{2} \frac{T}{2} \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{T\Delta i_L}{8}$

- $\Delta V_o = \frac{T\Delta i_L}{8C} = \frac{T}{8C} \frac{V_o}{L} (1-D)T$
 $= \frac{V_o(1-D)}{8LCf^2}$

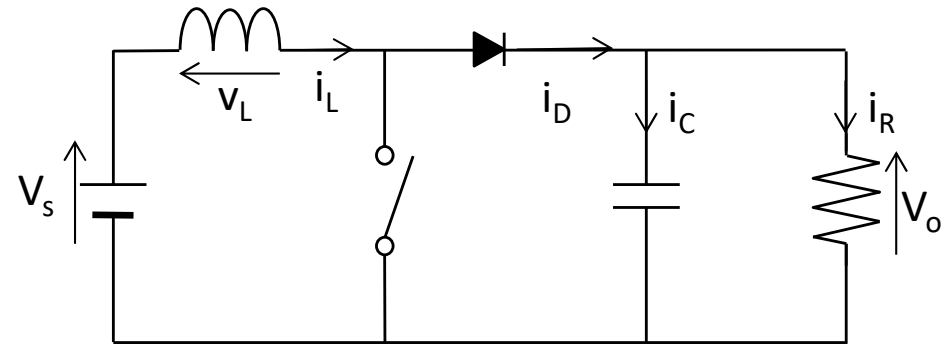
- リップル率: $\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{1-D}{8LCf^2}$



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

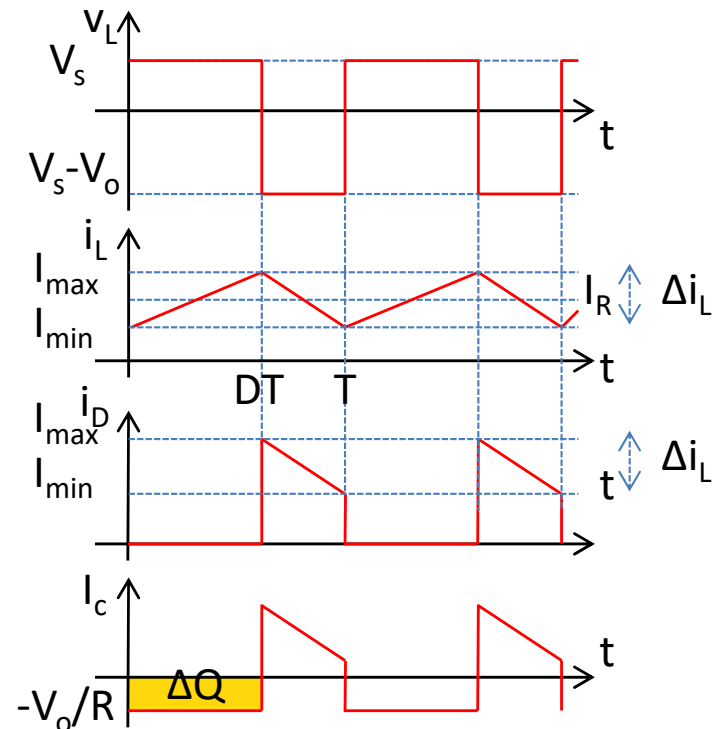
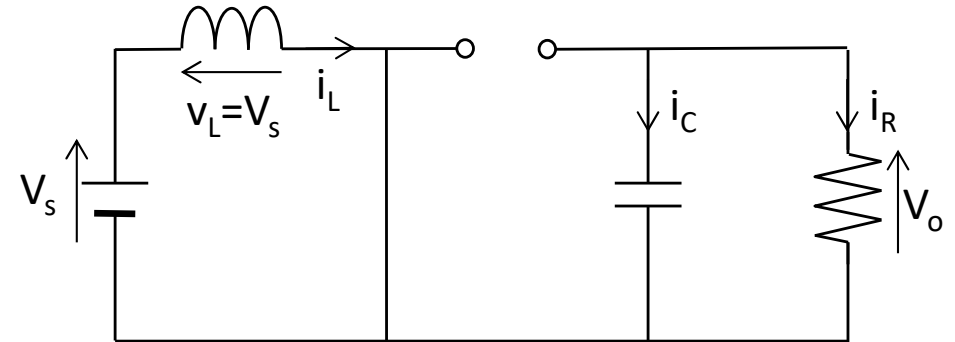
$$v_L = V_S = L \frac{di_L}{dt}$$

- 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

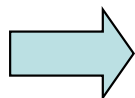
- スイッチを流れる電流がダイオードに移動

- Lにより電流が連続する

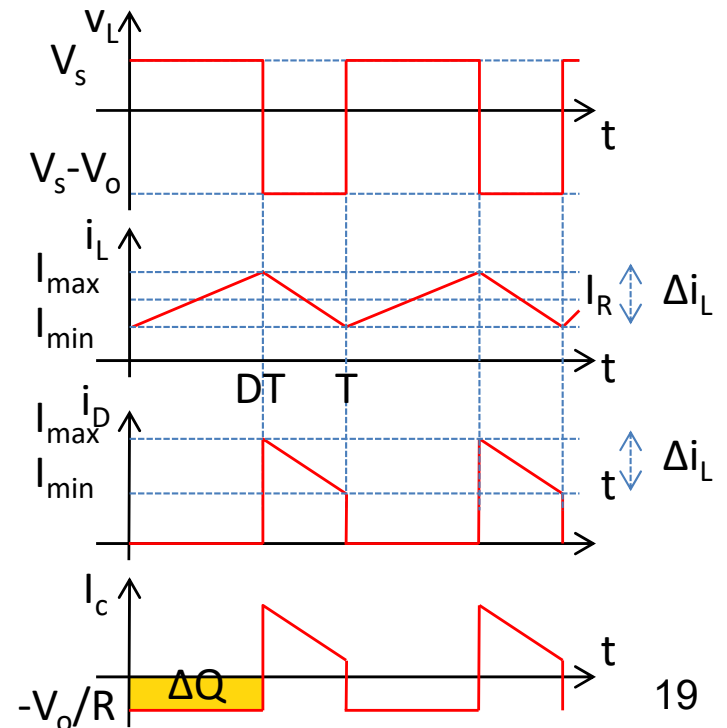
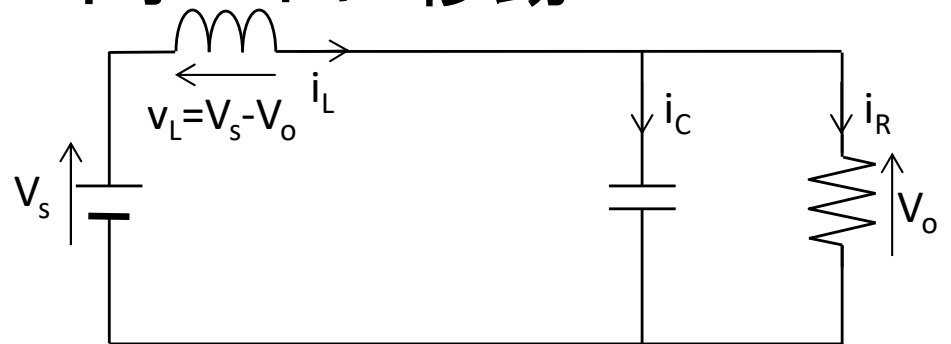
- 転流(commutation)という

- この時のKVLより

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



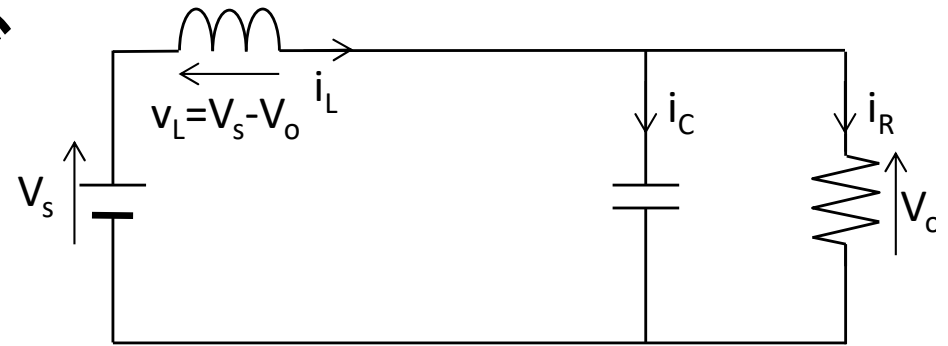
$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_S - V_O}{L}$$



ブーストコンバータ スイッチOFF時2

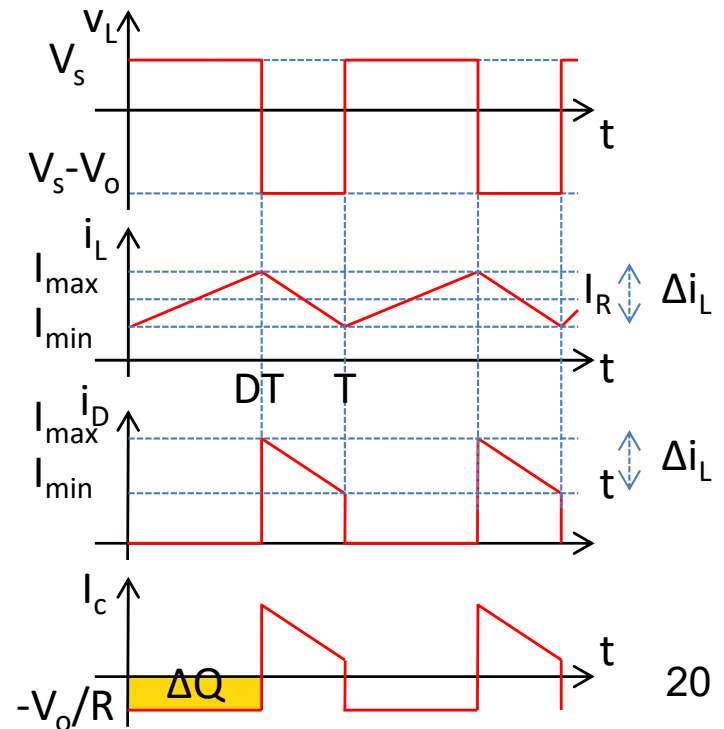
- Cが大きく V_O が一定の仮定より
 - 電流は一定の割合で減少

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



- 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

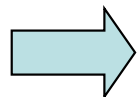
$$\Delta i_{L,on} = \frac{V_S DT}{L}$$

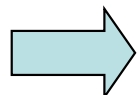
- 減少量

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

- 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

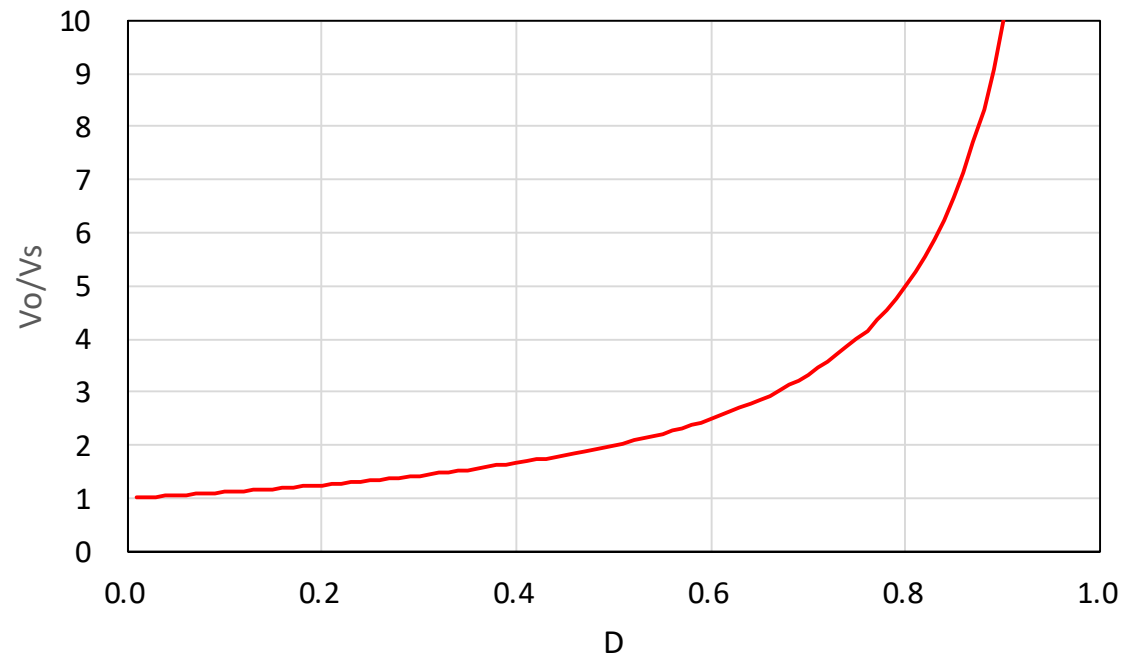
- オン時平均電圧 $V_s D$

- 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 $D + D' = 1$

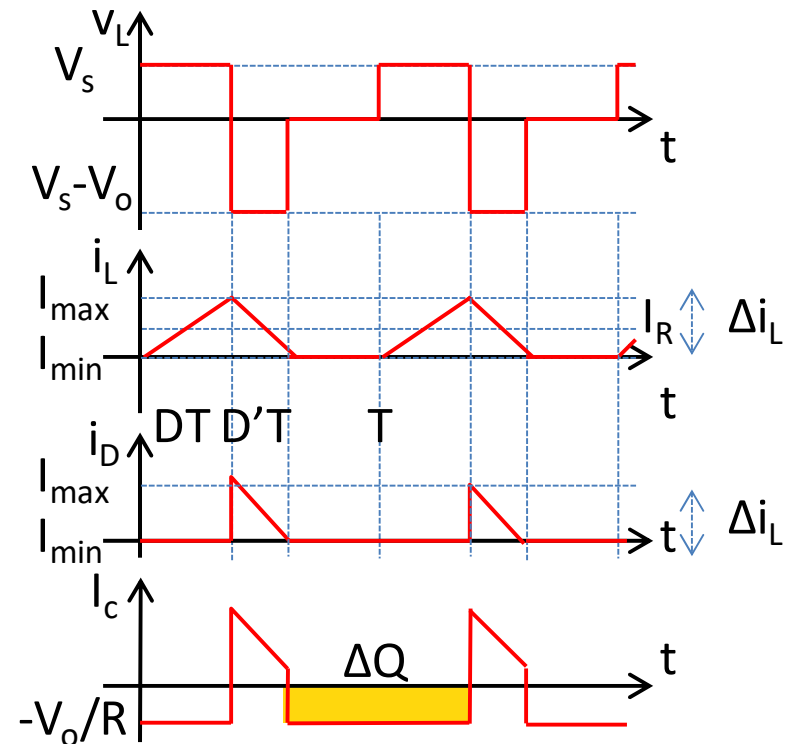
- 不連続導通 $D + D' < 1$

- 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

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

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

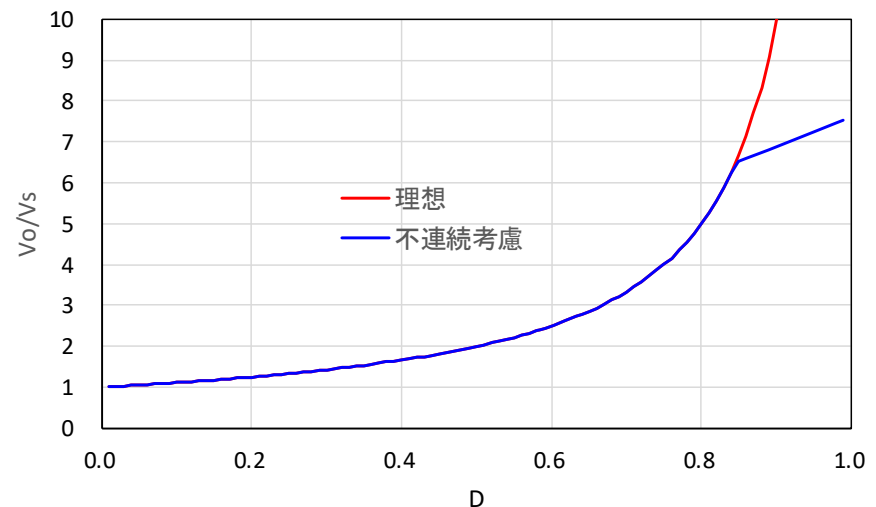
- $\frac{V_o}{V_s} = \frac{D+D'}{D'} = \frac{D + \frac{V_o 2L}{V_s R D T}}{\frac{V_o 2L}{V_s R D T}}$

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

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

- 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

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