

パワーエレクトロニクス

第7回 DC-DCコンバータ①

2025年6月4日

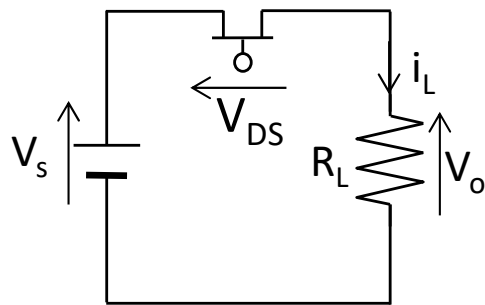
授業の予定

- 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

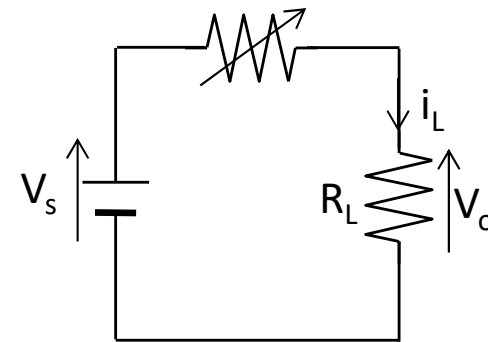
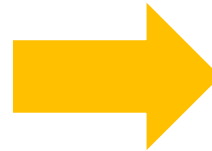
スイッチモードDC-DCコンバータ (スイッチング電源)

- 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



等価回路



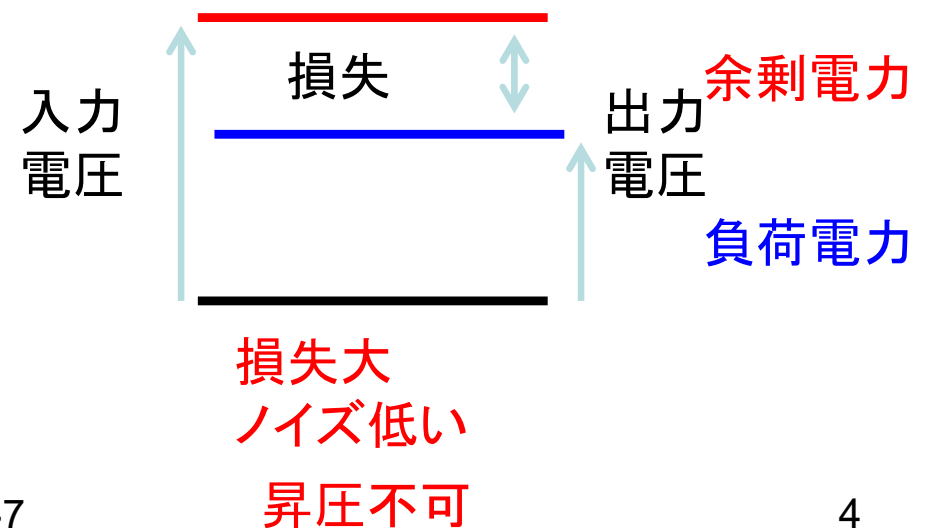
出力電圧 $V_o = I_L R_L$

負荷電力 $V_o I_L$

トランジスタでの消費電力

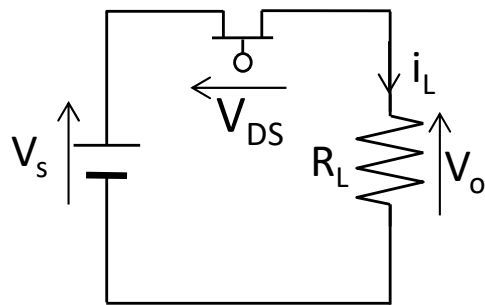
$$V_{CE} I_L$$

トランジスタは抵抗動作

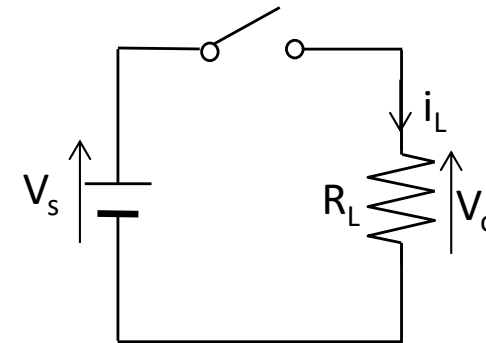
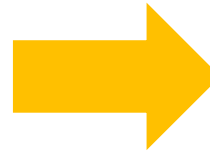


スイッチングコンバータ

トランジスタはON/OFF (スイッチ) 動作



等価回路



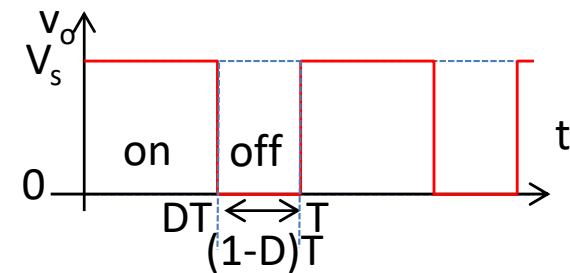
損失少ない
ノイズ多い

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

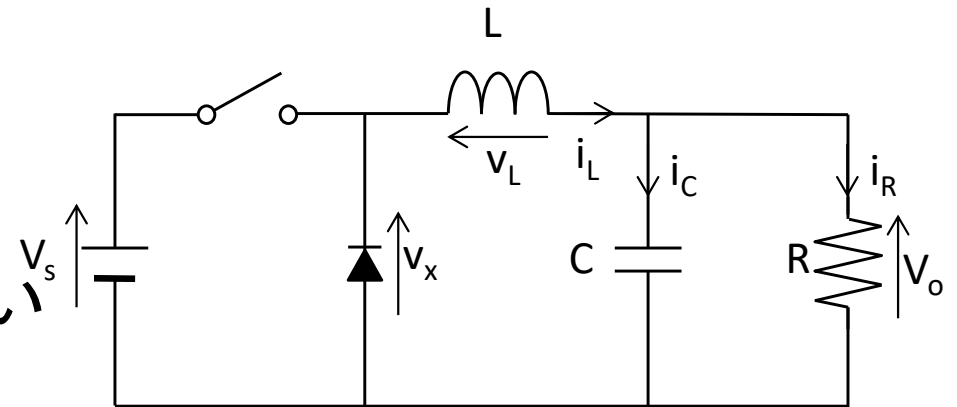
全電力が負荷で消費。効率高い



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
- 周期定常状態を考える



バックコンバータ スイッチオン時

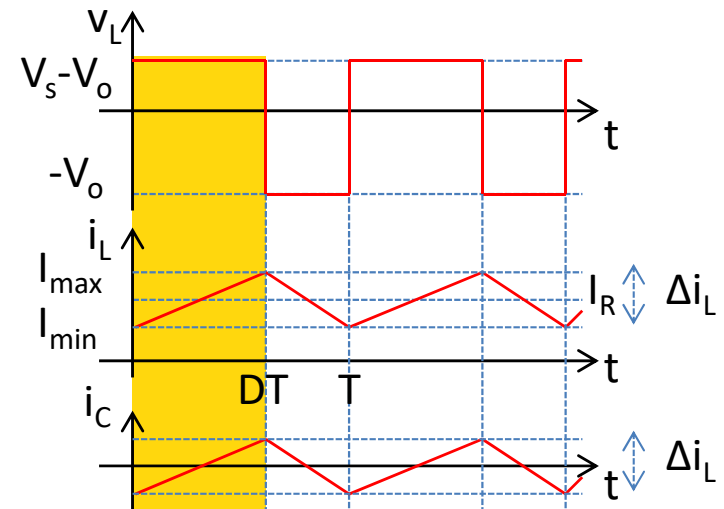
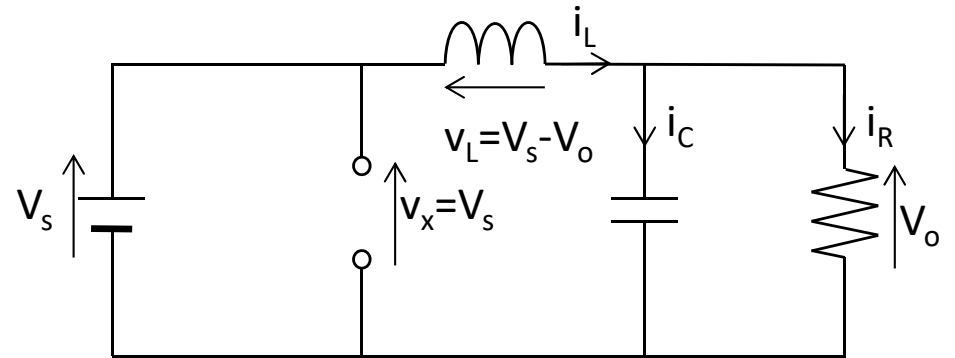
- Lに印加される電圧

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

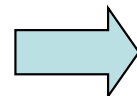
- Lに流れる電流

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

- 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

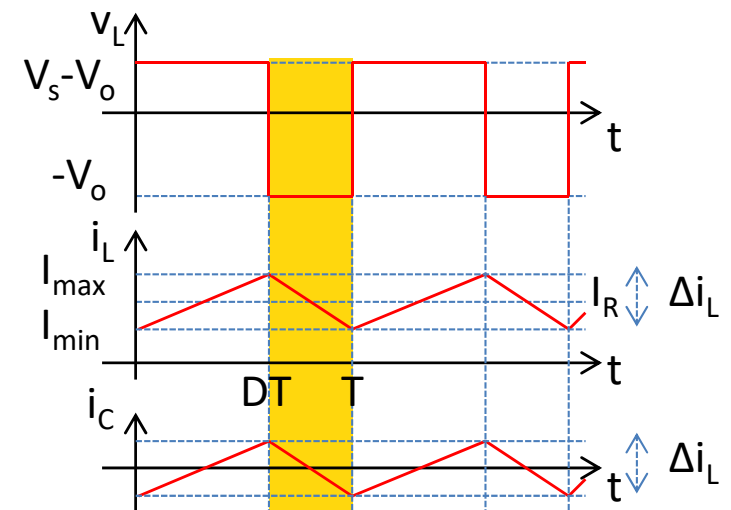
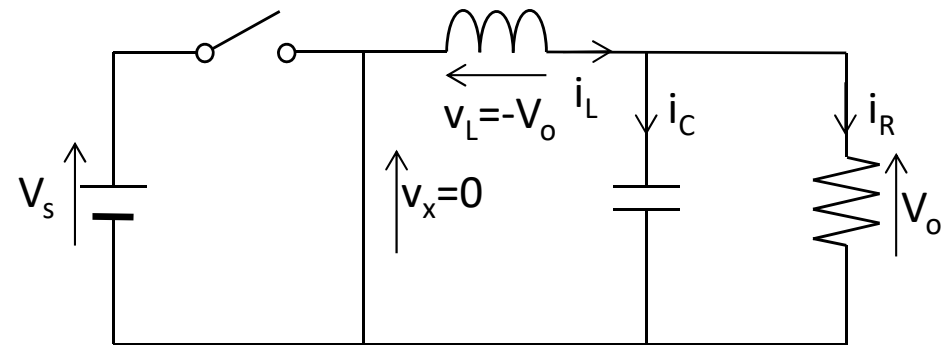
- 電源は縁切りされる

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

- 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

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

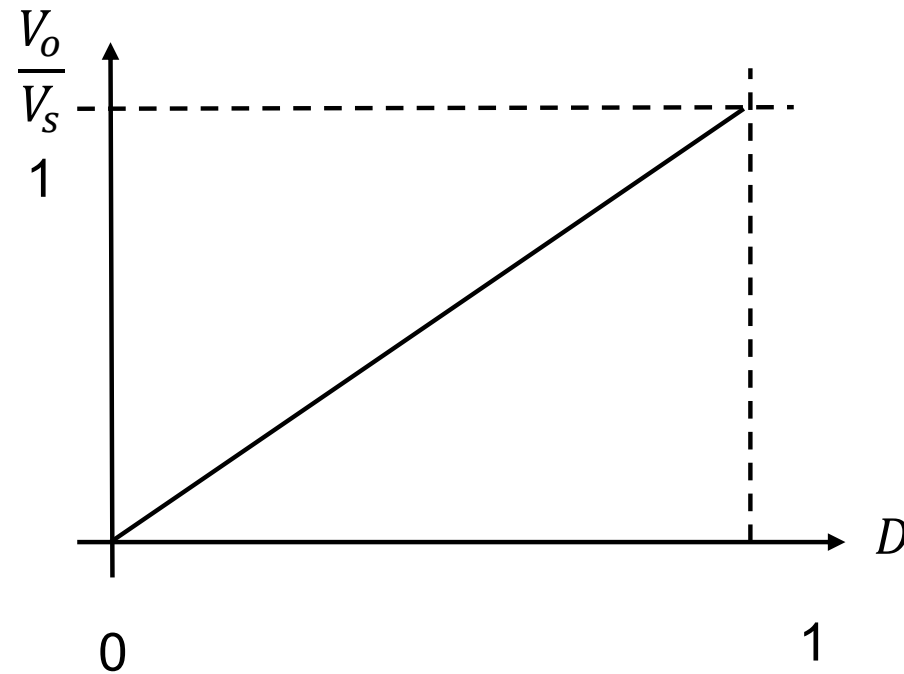
- 別解

- 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 $D'T$

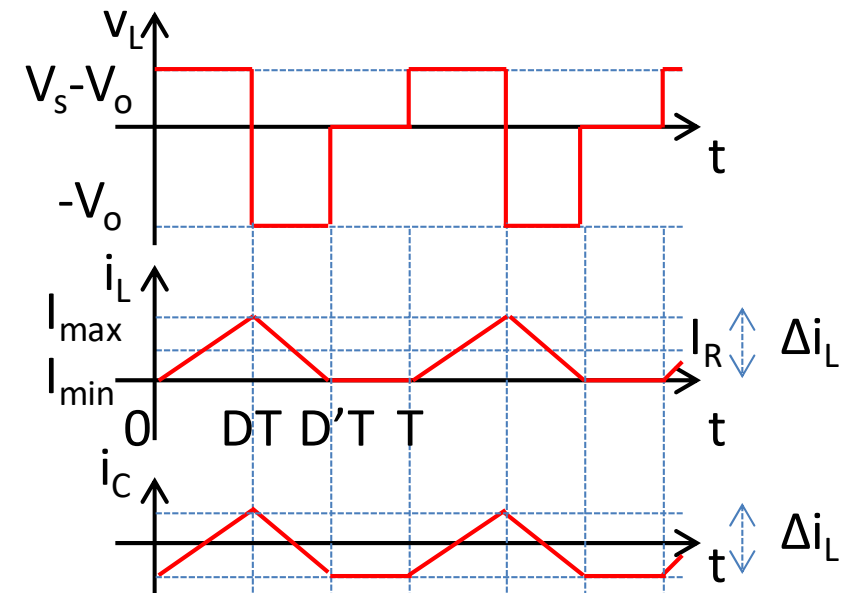
- 連続導通 $D + D' = 1$
- 不連続導通 $D + D' < 1$

- 電流変化量

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

- $\Delta i_{Lo\text{ff}} = \frac{-V_o D'T}{L}$

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



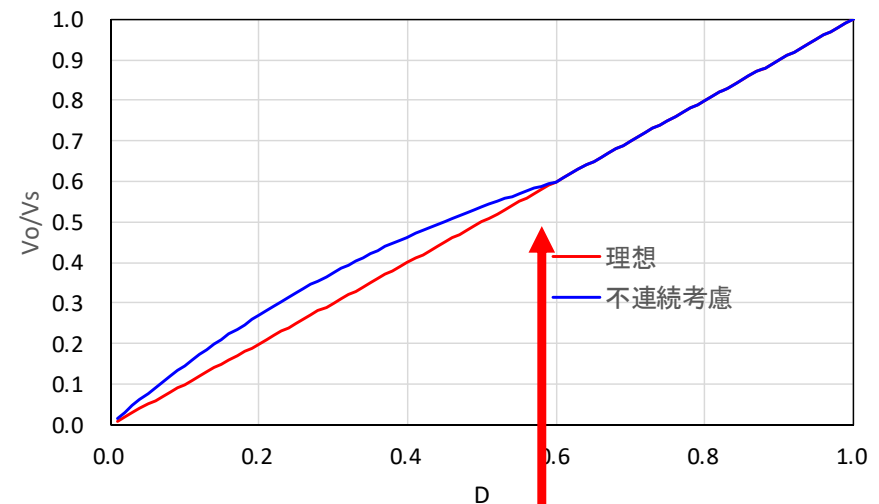
バックコンバータ 不連続導通

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

バックコンバータ 不連続導通

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

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



$$D = 1 - \frac{2L}{RT}$$

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

