

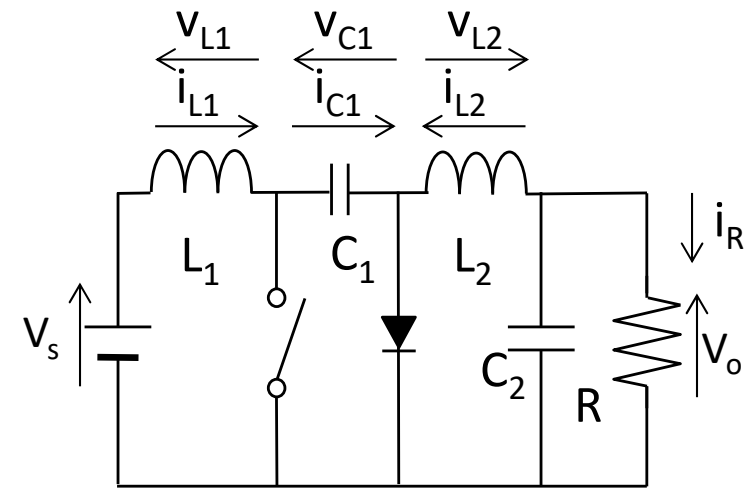
パワーエレクトロニクス

第9回 DC-DCコンバータ③

2025年6月18日

Cuk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
 - C1:エネルギー蓄積
 - L1,L2,C2:ローパスフィルタ
 - 動作解析での仮定
 - 周期定常状態:C1の平均電圧 $V_{C1} = V_S - V_O$
 - スwitchング周期T,デューティ比D
 - L1,L2の電流は連続
 - C2は十分大きく, 電圧が V_O に一定に保たれる
 - 理想素子



Cukコンバータ

- スイッチオン時 ($0 \leq t < DT$)

- C1に流れる電流

- L1大: 平均電流 I_{L1}

- $i_{C1} = -I_{L2}$

- ダイオード側の電位が低い

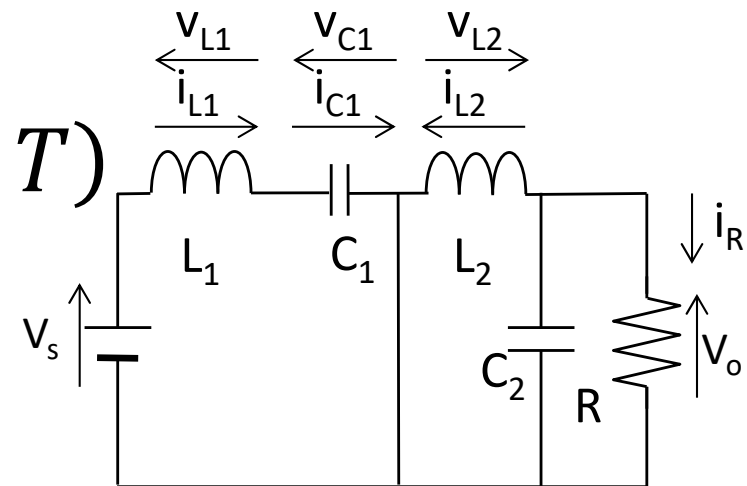
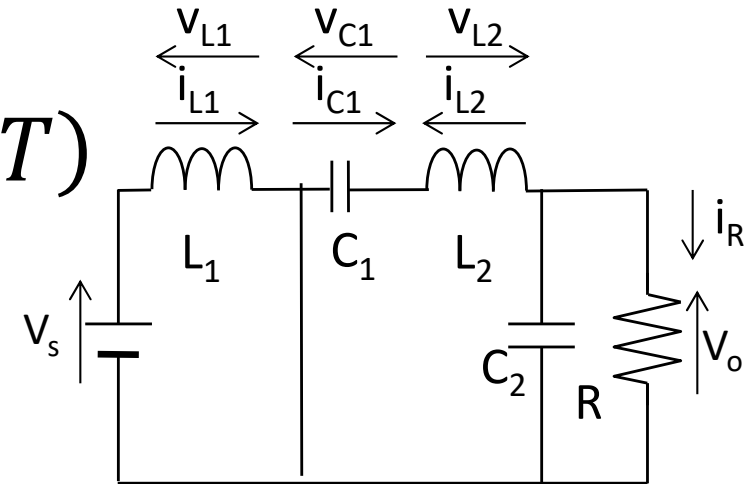
- スイッチオフ時 ($DT \leq t < T$)

- C1に流れる電流

- L2大: 平均電流 I_{L2}

- $i_{C1} = I_{L1}$

- ダイオード導通



Cukコンバータ

- 周期定常状態

- 電源電力と負荷電力は等しい

- $V_S I_{L1} = -V_O I_{L2}$

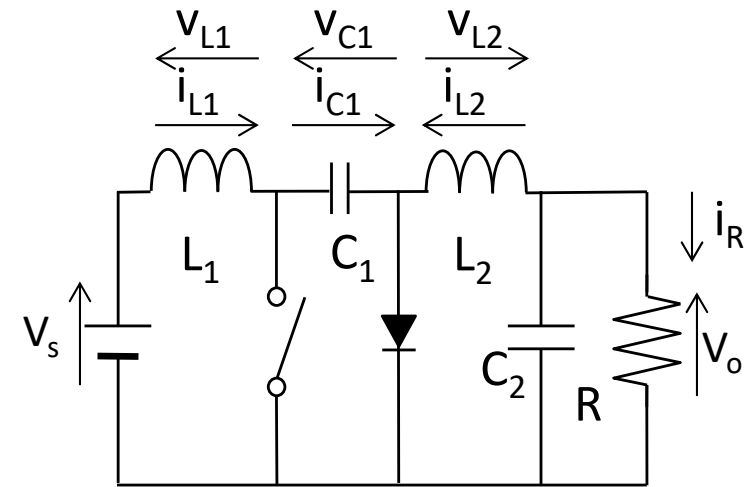
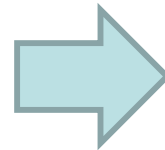
- $\frac{V_O}{V_S} = -\frac{I_{L1}}{I_{L2}}$

- 一周期でC1の電荷は0に戻る(周期定常状態)

- $-I_{L2}DT + I_{L1}(1-D)T = 0$

- $I_{L2}D = I_{L1}(1-D)$

- $\frac{I_{L1}}{I_{L2}} = \frac{D}{1-D}$



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

Cukコンバータ

L1,L2に流れる電流

- L2の平均電流は負荷電流の平均に等しい

- $$I_{L2} = I_R = \frac{-V_O}{R} = \frac{D}{1-D} \frac{V_S}{R}$$

- L1の平均電流

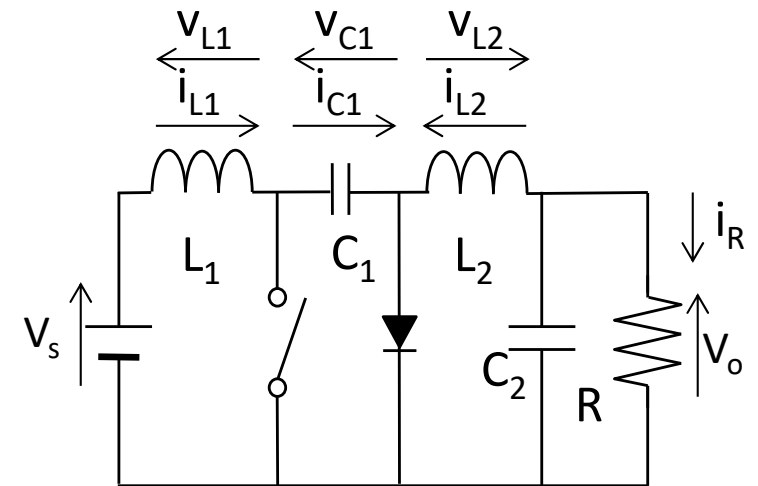
- $$I_{L1} = \frac{D}{1-D} I_{L2} = \left(\frac{D}{1-D} \right)^2 \frac{V_S}{R}$$

- オン時のL1の電流変化

- $$V_{L1} = V_S = L_1 \frac{di_{L1}}{dt} = L_1 \frac{\Delta i_{L1}}{DT}$$

- オン時のL2の電流変化

- $$V_{L2} = V_O + (V_S - V_O) = V_S = L_2 \frac{di_{L2}}{dt} = L_2 \frac{\Delta i_{L2}}{DT}$$



Cukコンバータ

L1に流れる電流

- L1の電流最低値

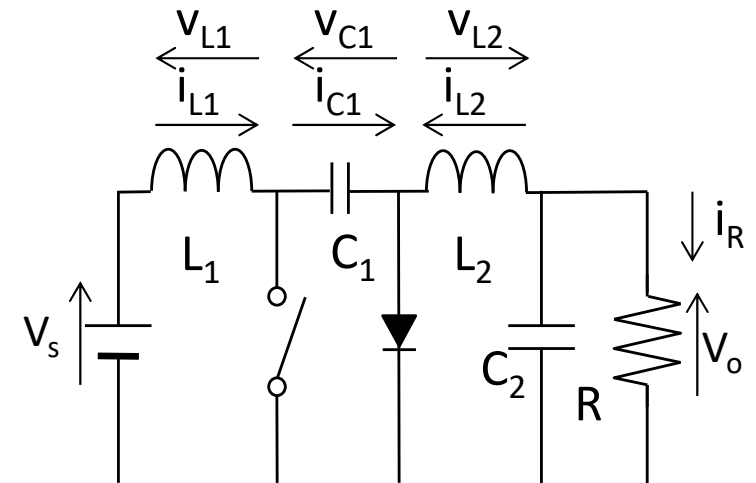
- $$I_{L1min} = I_{L1} - \frac{\Delta i_{L1}}{2} = \left(\frac{D}{1-D} \right)^2 \frac{V_S}{R} - \frac{V_S D T}{2L_1}$$

- 連続導通条件

- $$\left(\frac{D}{1-D} \right)^2 \frac{V_S}{R} - \frac{V_S D T}{2L_1} > 0$$

- $$\frac{D}{(1-D)^2 R} > \frac{T}{2L_1}$$

- $$L_1 > \frac{(1-D)^2 R T}{2D}$$



Cukコンバータ

L2に流れる電流

- L2の電流最低値

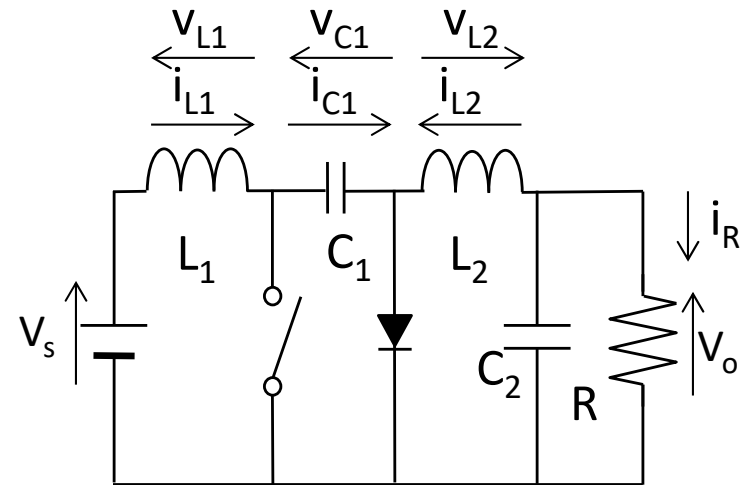
- $$I_{L2min} = I_{L2} - \frac{\Delta i_{L2}}{2} = \frac{D}{1-D} \frac{V_S}{R} - \frac{V_S D T}{2L_2}$$

- 連続導通条件

- $$\frac{D}{1-D} \frac{V_S}{R} - \frac{V_S D T}{2L_2} > 0$$

- $$\frac{1}{(1-D)R} > \frac{T}{2L_2}$$

- $$L_2 > \frac{(1-D)RT}{2}$$



Cukコンバータ

電圧脈動

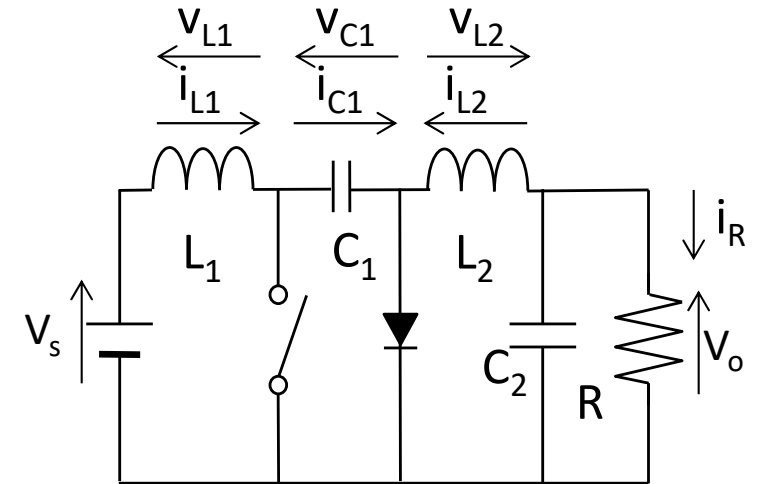
- C2の電流: $I_{C2} = -I_{L2} - I_R$
- C2の電荷と電圧の関係

- $Q_{C2} = C_2 V_o$
- 充電電荷について

- $\Delta Q_{C2} = C_2 \Delta V_o = \frac{1}{2} \frac{T}{2} \frac{-\Delta i_{L2}}{2} = -\frac{T \Delta i_{L2}}{8}$

- $\Delta V_o = -\frac{T \Delta i_{L2}}{8 C_2} = -\frac{T}{8 C_2} \frac{-V_o}{L_2} (1-D) T$
 $= \frac{V_o (1-D)}{8 L_2 C_2} T^2$

- リップル率: $\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{1-D}{8 L_2 C_2} T^2$



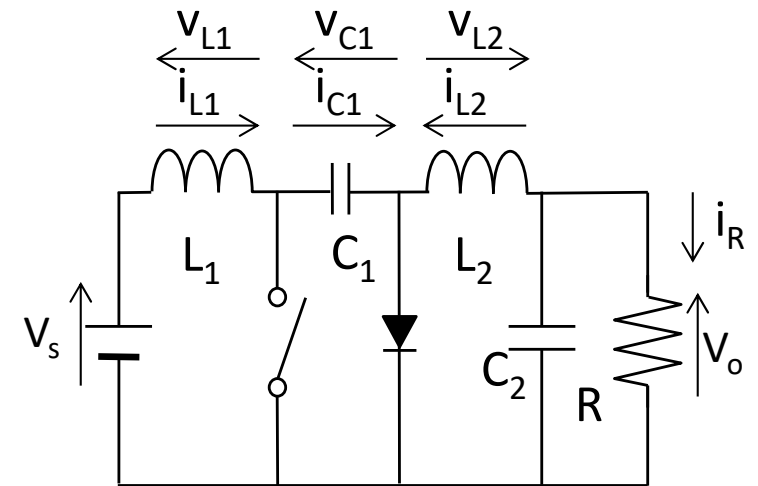
Cukコンバータ

電圧脈動

- C1の電圧変化
 - オフ期間

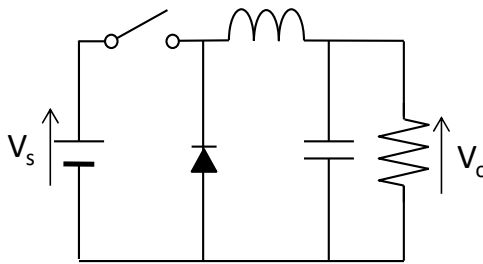
$$\begin{aligned}
 \bullet \Delta v_{C1} &= \frac{1}{C_1} \int_{DT}^T I_{L1} dt = \frac{I_{L1}(1-D)T}{C_1} = \frac{(1-D)T}{C_1} \left(\frac{D}{1-D} \right)^2 \frac{V_S}{R} \\
 &= \frac{V_S D^2 T}{RC_1(1-D)} \\
 &= \frac{RC_1(1-D)}{\frac{D}{1-D} V_O D^2 T} = \frac{V_O DT}{RC_1(1-D)} = \frac{V_O DT}{RC_1}
 \end{aligned}$$

$$\bullet \frac{\frac{V_S D^2 T}{RC_1(1-D)}}{\frac{D}{1-D} V_S} = \frac{DT}{RC_1}$$



DC-DCコンバータの比較 (連続導通動作)

Buckコンバータ

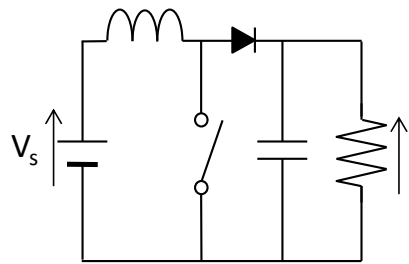


昇圧比

$$V_o/V_s$$

$$D$$

Boostコンバータ



$$\frac{1}{1-D}$$

電圧脈動率

$$\Delta V_o/V_o$$

$$\frac{1-D}{8LCf^2}$$

$$\frac{D}{RCf}$$

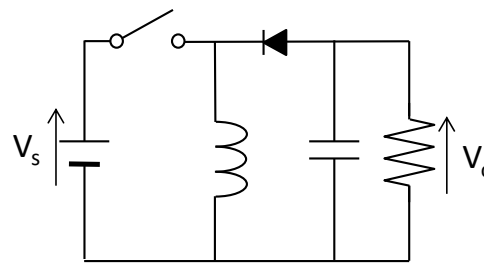
連続導通

$$L_{min}$$

$$\frac{(1-D)R}{2f}$$

$$\frac{D(1-D)^2R}{2f}$$

Buck-boost
コンバータ

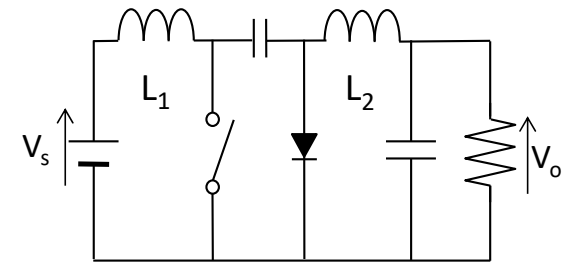


$$\frac{-D}{1-D}$$

$$\frac{D}{RCf}$$

$$\frac{(1-D)^2R}{2f}$$

Cukコンバータ



$$\frac{-D}{1-D}$$

$$\frac{1-D}{8LCf^2}$$

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

$$L_{2min} = \frac{(1-D)R}{2f}$$

非理想素子の影響

スイッチの導通損失

- スwitchでの電圧降下の影響は低電圧回路で大
- バックコンバータの例(周期定常状態)

- スwitchON時 → スwitchでの電圧降下 V_Q

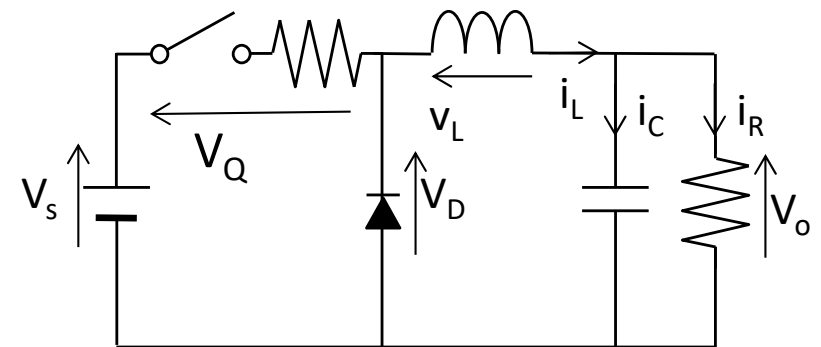
- インダクタにかかる電圧

$$v_L = V_S - V_O - V_Q$$

- スwitchOFF時 → ダイオードでの電圧降下 V_D

- インダクタにかかる電圧

$$v_L = -V_O + V_D$$



非理想素子の影響 スイッチの導通損失

- 周期定常状態では, スイッチング一周期でインダクタにかかる平均電圧は0となる

- $v_L = (V_s - V_o - V_Q)D + (-V_o + V_D)(1 - D)$ ※CCM

- 出力電圧

- $V_o = V_s D - V_Q D + V_D(1 - D)$

- 理想スイッチでの出力電圧

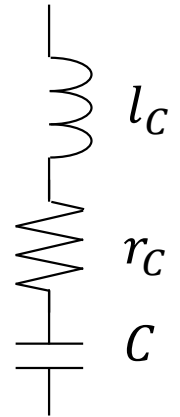
$$V_o = V_s D$$

- スイッチでの電圧降下による出力電圧の低下分
 - $\Delta V_o = -V_Q D + V_D(1 - D)$

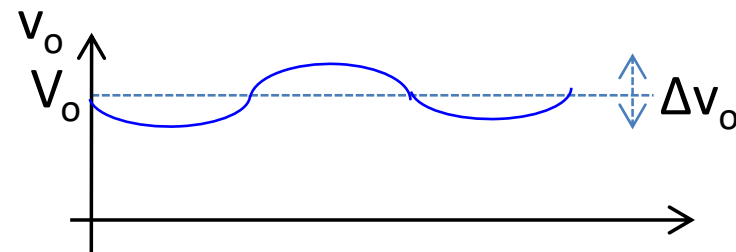
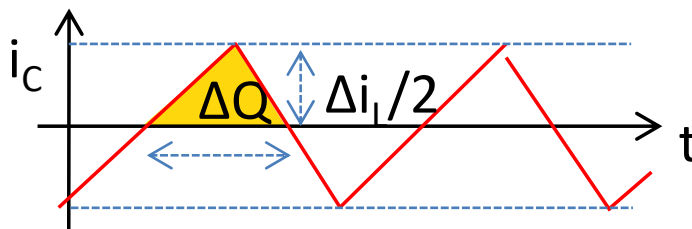
非理想素子の影響

コンデンサESRの出力電圧脈動への影響

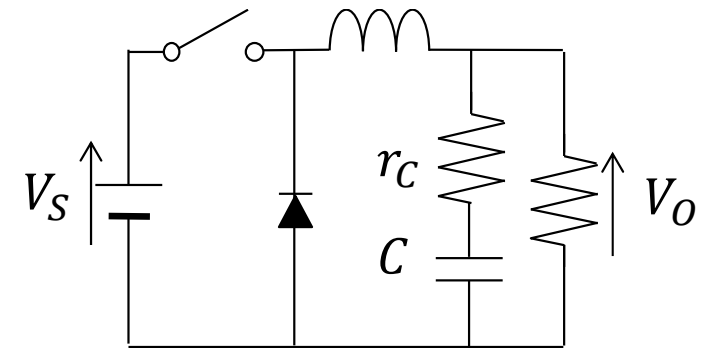
- コンデンサには等価直列抵抗(ESR) r_c , 等価直列リアクタンス(ESL) l_c がある
 - ESLの影響は数100kHz以下では小 $l_c \cong 0$
 - ESRは出力電圧の脈動成分に影響する
 - 理想コンデンサでのバックコンバータ出力電圧脈動成分



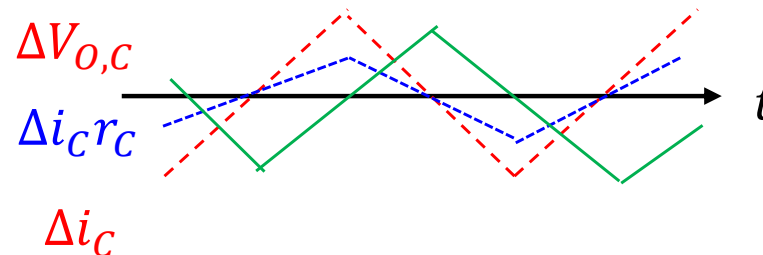
$$\Delta V_{o,c} = \frac{V_o(1-D)}{8LCf^2}$$



非理想素子の影響 コンデンサのESR



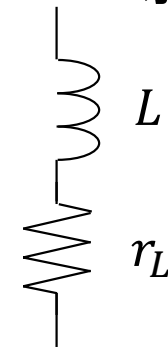
- バックコンバータの周期定常状態
 - 理想コンデンサに流れる電流で近似
 - 連続導通
 - コンデンサ電流(Δi_C)とESR(r_C)による電圧変化 $V_{O,ESR}$ がコンデンサ電圧に重畳
- $$\Delta V_{O,ESR} = \Delta i_C r_C, \Delta V_O < \Delta V_{O,C} + \Delta V_{O,ESR}$$
- ESRの電圧とコンデンサの充電電圧のピークの位相がずれる



非理想素子の影響

インダクタのESR

- インダクタのESR(抵抗)は小さくなるように設計
 - 鉄損, 銅損
 - 損失低減・効率向上
- ブーストコンバータにおけるインダクタのESRの影響
 - 仮定
 - インダクタ電流はほぼ一定
 - 電源電流はインダクタ電流に等しい
 - ダイオードと負荷の平均電流は等しい
 - $I_D = \frac{V_o}{R}$
 - 電源の供給電力 P_S は, 負荷電力 P_o とインダクタのESR(r_L)の消費電力 P_L の和に等しい
 - $P_S = P_o + P_L$



非理想素子の影響(ブーストコンバータ) インダクタのESR

- ESR(r_L)の消費電力

- $P_L = r_L I_L^2$

- ダイオードの平均電流

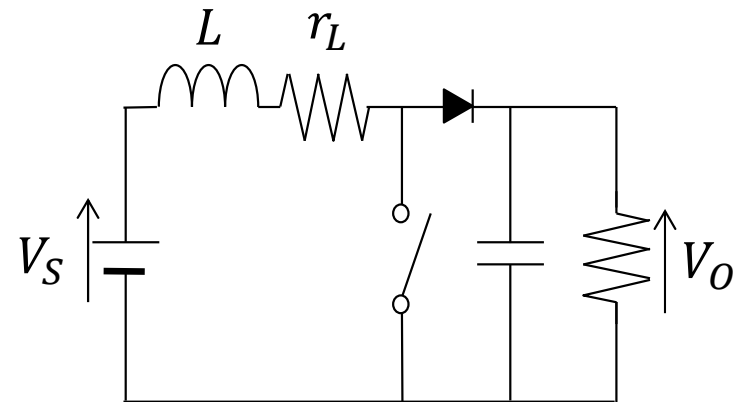
- $I_D = I_L(1 - D)$

- $I_L = \frac{I_D}{1-D} = \frac{V_O}{R(1-D)}$

- まとめる

- $P_S = V_S I_L = P_O + P_L = V_O I_L(1 - D) + r_L I_L^2$

- $V_S = V_O(1 - D) + r_L I_L = V_O(1 - D) + r_L \frac{V_O}{R(1-D)}$



非理想素子の影響 インダクタのESR

- 昇圧比

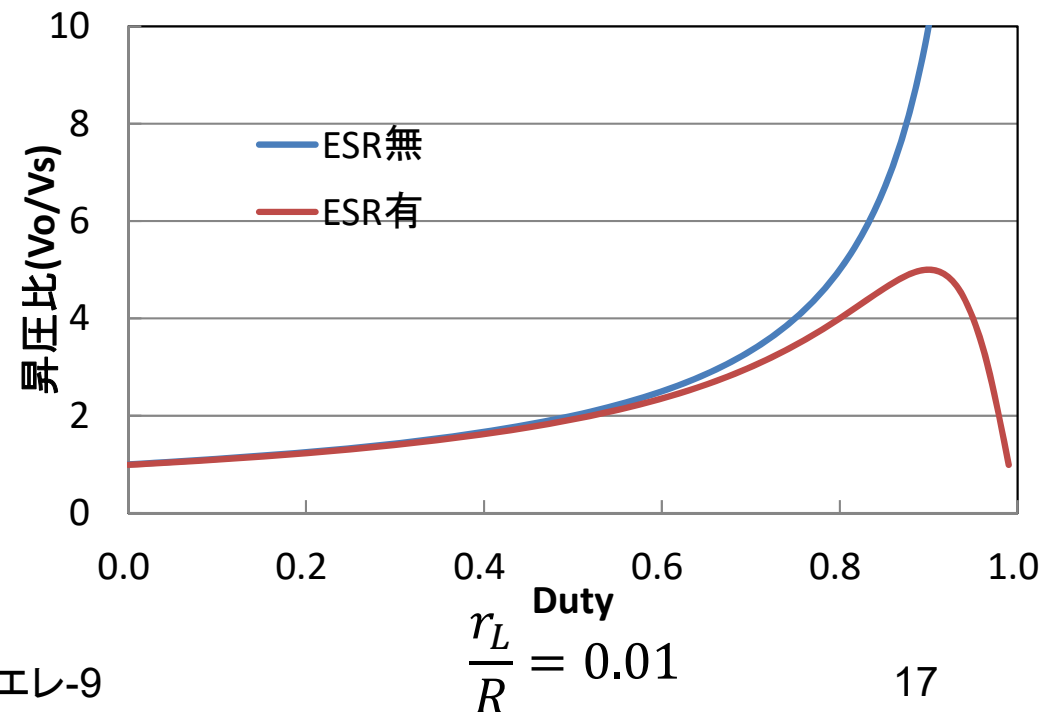
- 理想ブーストコンバータ: $\frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{1-D}$

- インダクタのESRがある場合

- $\frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{1-D} \times \frac{1}{1 + \frac{r_L}{R(1-D)^2}}$

ESRによる修正係数

$$\begin{aligned} V_s &= V_o \left\{ (1-D) + \frac{r_L}{R(1-D)} \right\} \\ &= V_o \frac{R(1-D)^2 + r_L}{R(1-D)} \end{aligned}$$

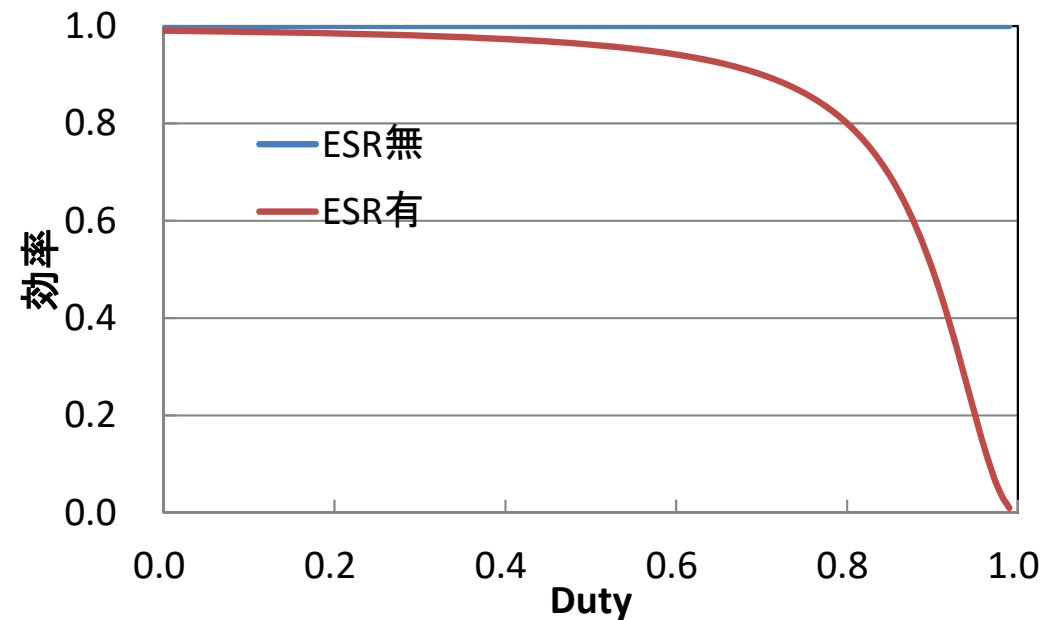


非理想素子の影響(ブーストコンバータ) インダクタのESR

- 効率

- 理想ブーストコンバータ: $\eta = 1$
- インダクタのESRがある場合

- $$\eta = \frac{P_o}{P_o + P_L}$$
$$= \frac{V_o^2 / R}{V_o^2 / R + r_L I_L^2}$$
$$= \frac{V_o^2 / R}{V_o^2 / R + r_L \left(\frac{V_o}{R(1-D)} \right)^2}$$
$$= \frac{1}{1 + \frac{r_L}{R(1-D)^2}}$$



D大のとき効率低