

パワーエレクトロニクス講義資料 第6回 昇圧, 昇降圧チョッパ回路

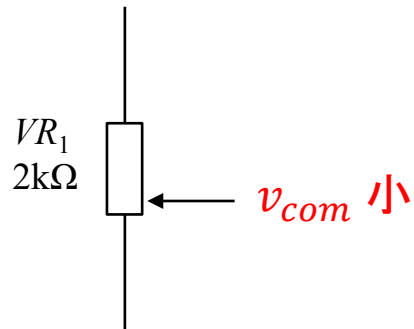
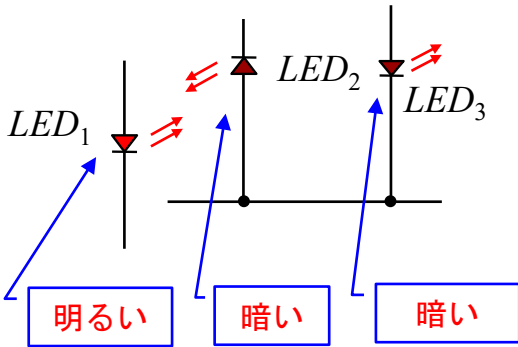
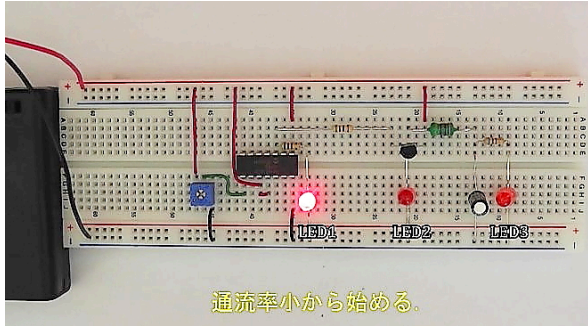
担当：古橋武

[本稿掲載のWebページ](http://mybook-pub-site.sakura.ne.jp/Power_Electronics_Note/index.html)

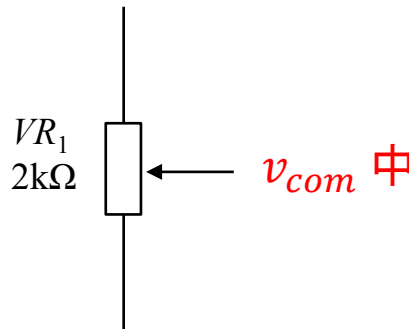
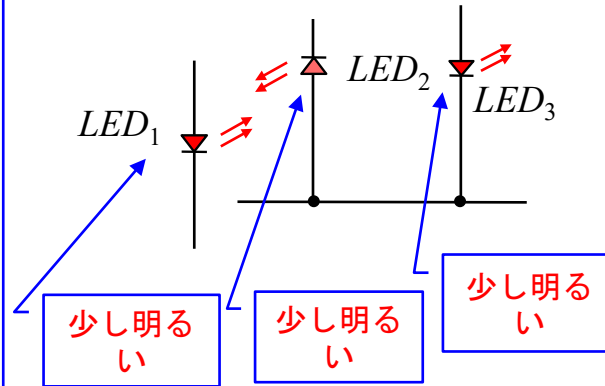
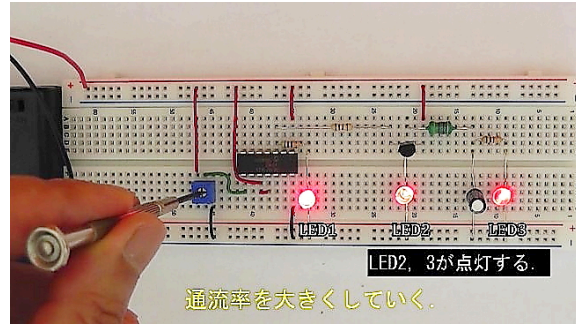
http://mybook-pub-site.sakura.ne.jp/Power_Electronics_Note/index.html

STEP4 製作課題 解答 $LED_1 \sim LED_3$ の明るさが変化する理由

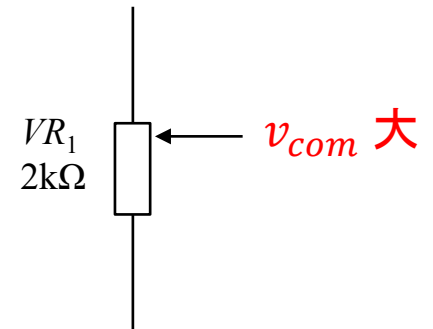
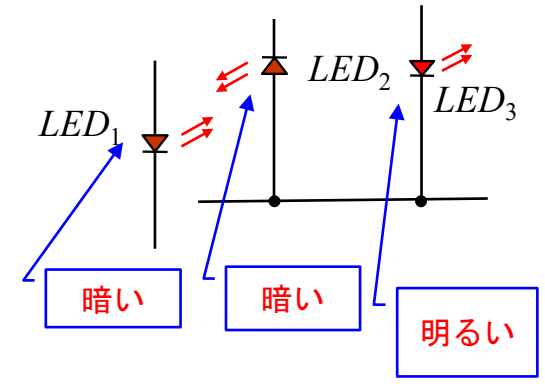
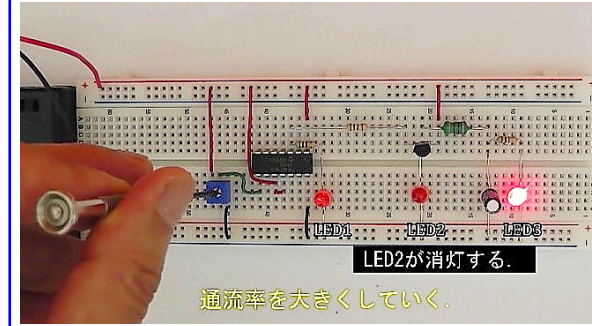
$\delta = \text{小}$

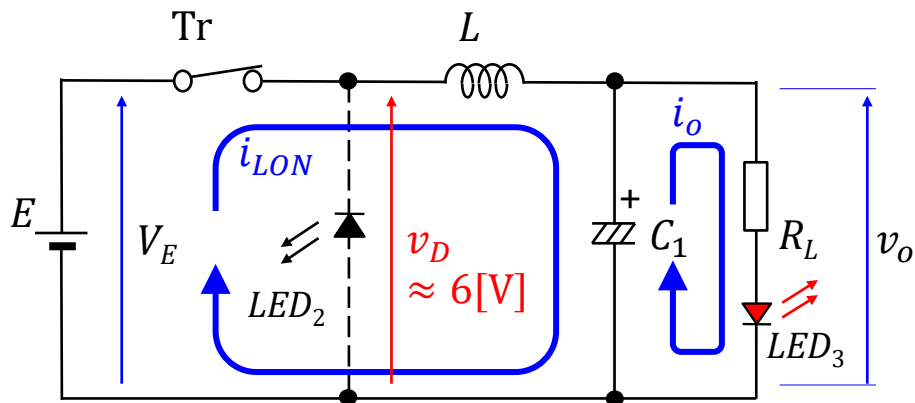
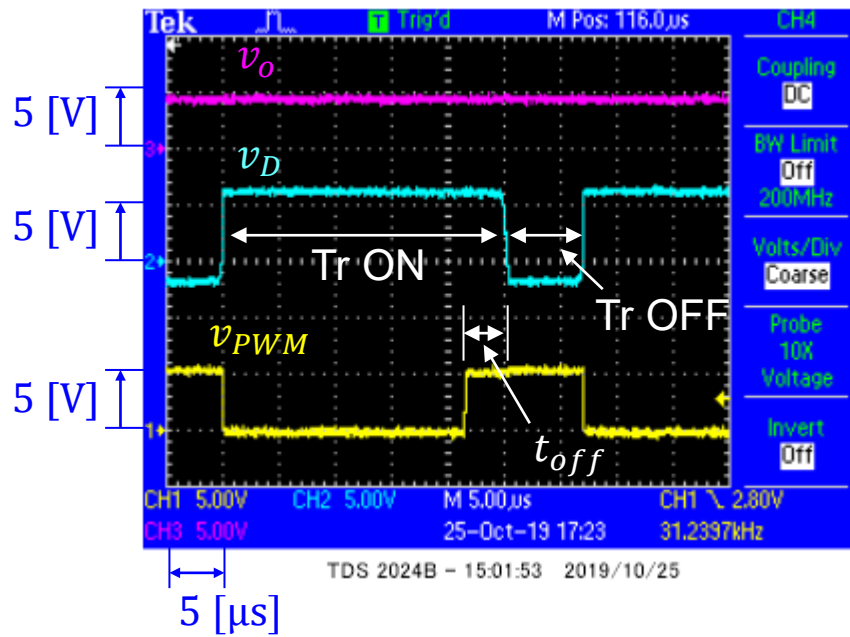


$\delta = \text{中}$

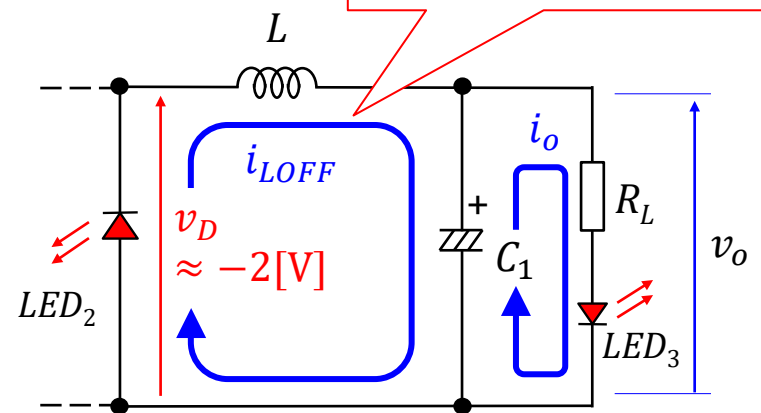


$\delta = \text{大}$





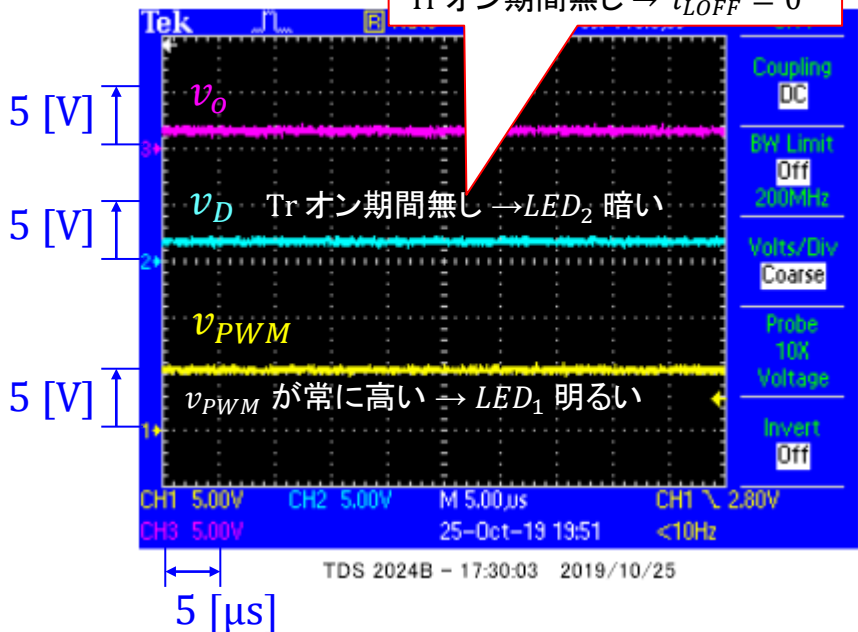
(a) Tr オン



(b) Tr オフ

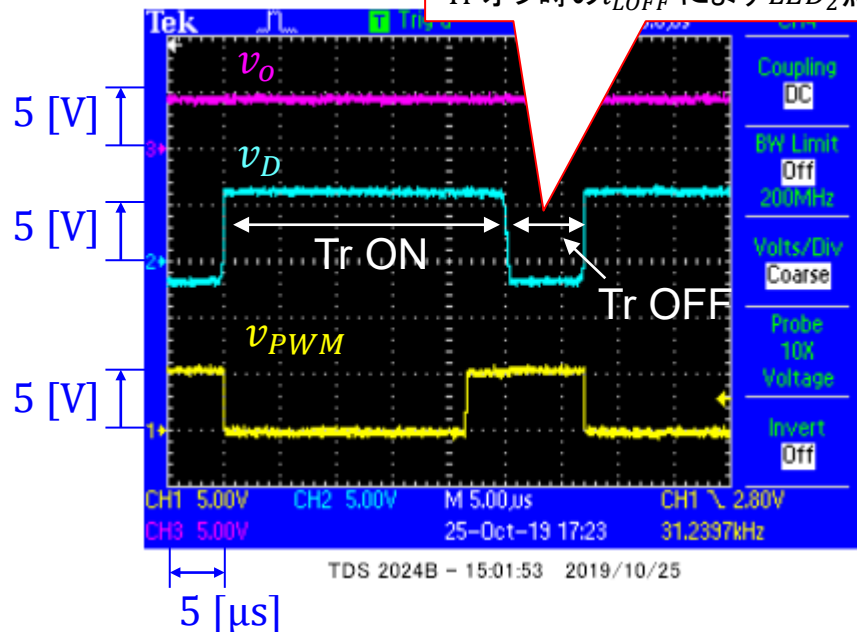
Tr オフ時は電流 i_{LOFF} により LED_2 点灯

Tr オン期間無し $\rightarrow i_{L\text{OFF}} = 0$

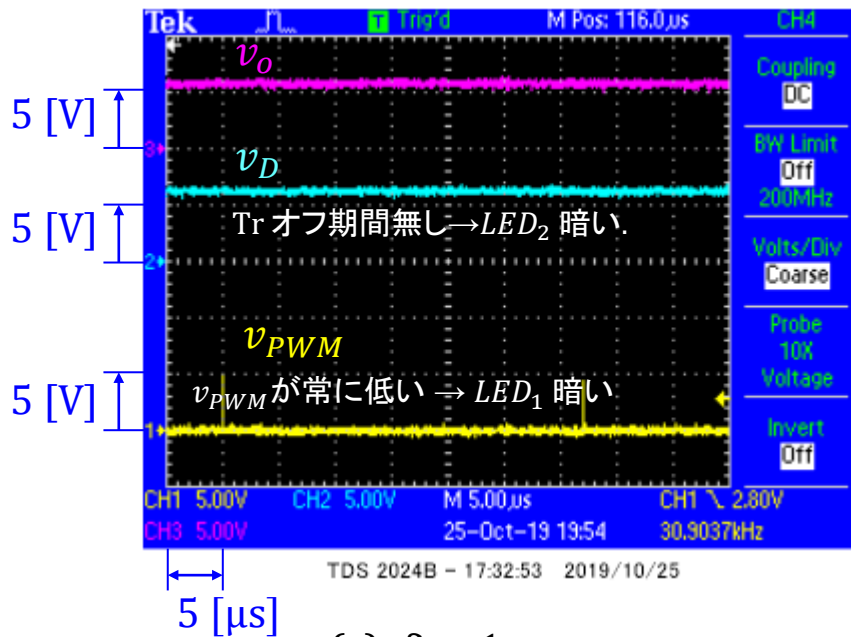


(a) $\delta = 0$

Tr オフ時の $i_{L\text{OFF}}$ により LED₂ 点灯



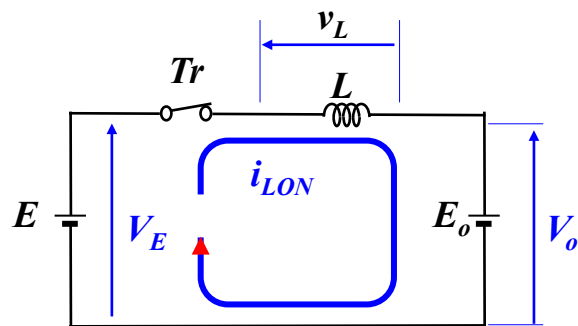
(b) $\delta = \text{中}$



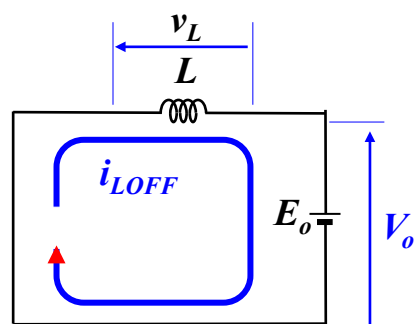
(c) $\delta \approx 1$

STEP4 レポート課題(1) **解答** 下図はチョッパ回路のトランジスタ・オン／オフ時の等価回路である．トランジスタ Tr のスイッチング周波数は回路の抵抗成分を無視できるほどに十分に高いとする．以下の問に答えよ．

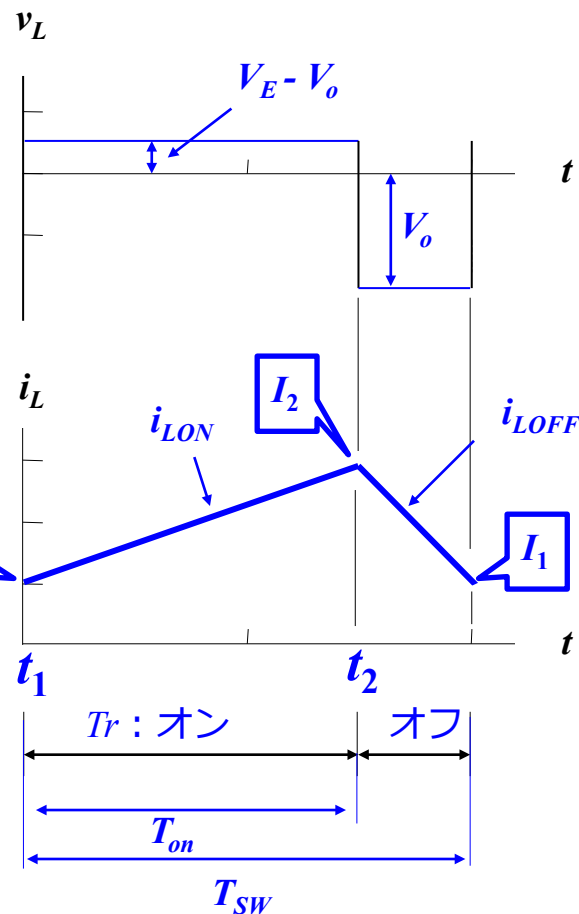
- (a) Tr オン／オフ時の回路方程式をそれぞれ求めよ．
- (b) Tr オン開始時 t_1 の電流を I_1 ， Tr オフ開始時 t_2 の電流を I_2 としてそれぞれの微分方程式を解け．
- (c) Tr オンの終了時の電流が I_2 に一致するとして， $I_2 - I_1$ を通流率 δ とスイッチング周期 T_{SW} の式で表せ．
- (d) 同様に， Tr オフの終了時の電流が I_1 に一致するとして， $I_2 - I_1$ を通流率 δ とスイッチング周期 T_{SW} で表せ．
- (e) (3), (4)の値が等しいとにおいて，出力電圧 V_o と電源電圧 V_E と関係を通流率 δ を用いて表せ．



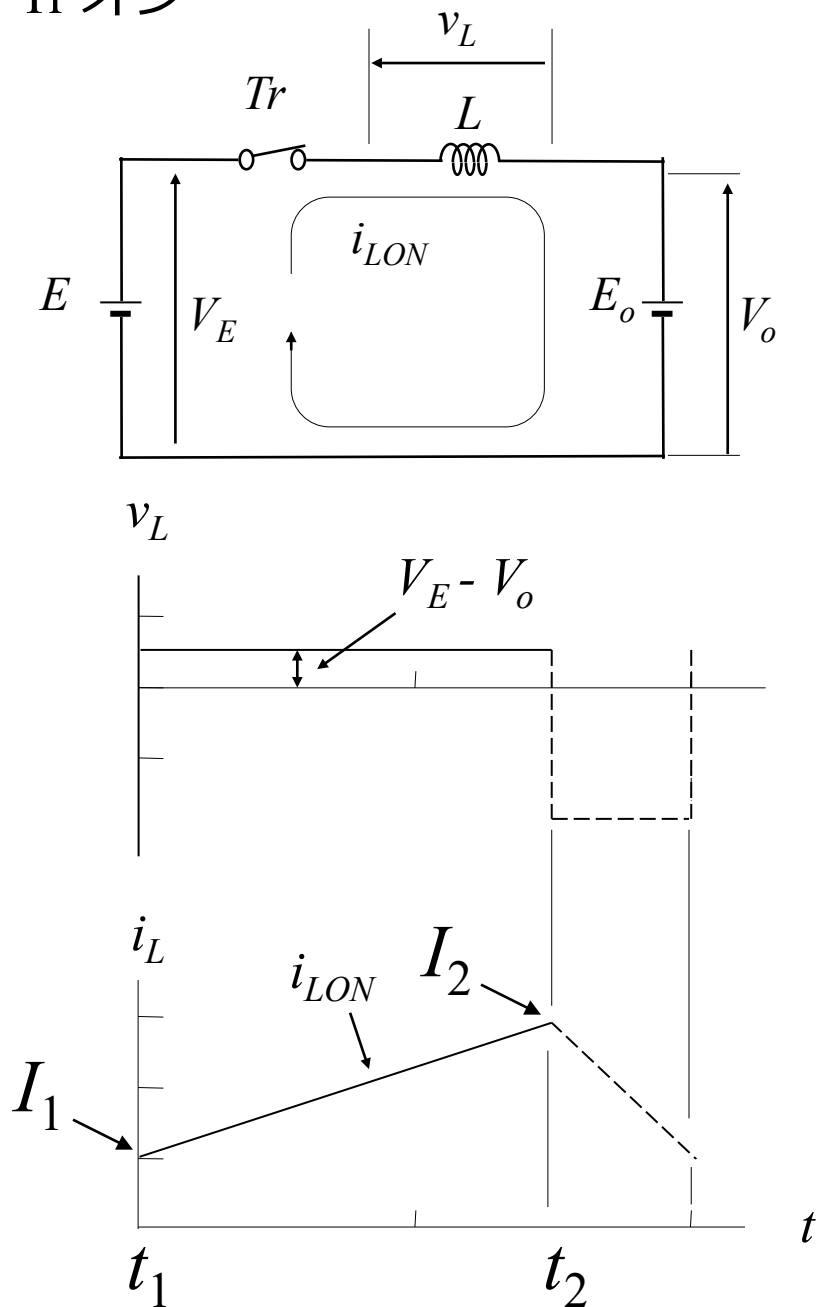
(a) トランジスタ・オン



(b) トランジスタ・オフ



Tr オン



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

両辺を t_1 から t まで積分すると

$$i_L = \frac{V_E - V_o}{L} (t - t_1) + I_1$$

 $t = t_2$ にて $i_L = I_2$ とすると

$$T_{ON} = t_2 - t_1$$

$$I_2 = \frac{V_E - V_o}{L} (t_2 - t_1) + I_1$$

$$= \frac{V_E - V_o}{L} T_{ON} + I_1$$

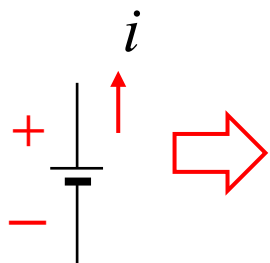
$$= \frac{V_E - V_o}{L} \delta T_{SW} + I_1$$

$$\delta = \frac{T_{ON}}{T_{SW}}$$

δ : 通流率 (デューティファクタ)
トランジスタのオン期間 T_{ON} とスイッチング周期 T_{SW} の比

$$\Delta I = I_2 - I_1 = \frac{V_E - V_o}{L} \delta T_{SW} \quad (4.24)$$

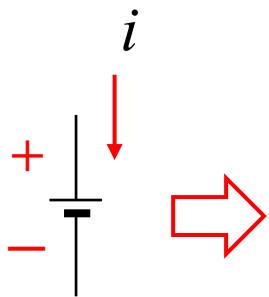
電源の場合



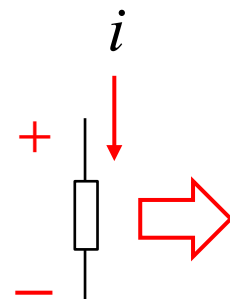
$$p = vi$$

$i = (\text{一定})$ であれば, 時刻 t_0 から t_1 の間に出て行くエネルギー E は

$$E = \int_{t_0}^{t_1} p dt = vi(t_1 - t_0)$$



抵抗の場合



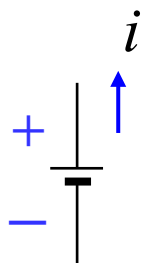
$$v = Ri$$

$$p = vi \\ = Ri^2$$

$i = (\text{一定})$ であれば, 時刻 t_0 から t_1 の間に消費されるエネルギー E は

$$E = \int_{t_0}^{t_1} p dt = Ri^2(t_1 - t_0)$$

電源の場合

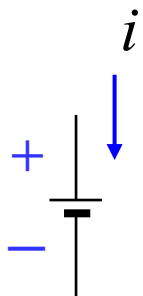


エネルギーは電源から出て行く。

$$p = vi$$

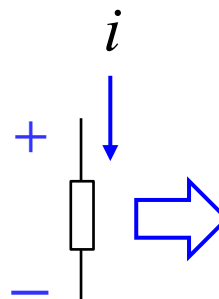
$i = (\text{一定})$ であれば, 時刻 t_0 から t_1 の間に出て行くエネルギー E は

$$E = \int_{t_0}^{t_1} p dt = vi(t_1 - t_0)$$



エネルギーは電源に入っていく。

抵抗の場合



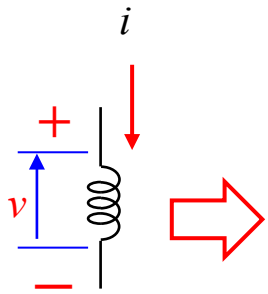
エネルギーは抵抗に入っていく, 熱として消費される。

$$v = Ri$$

$$p = vi \\ = Ri^2$$

$i = (\text{一定})$ であれば, 時刻 t_0 から t_1 の間に消費されるエネルギー E は

$$E = \int_{t_0}^{t_1} p dt = Ri^2(t_1 - t_0)$$

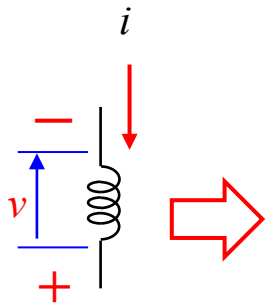


$$\frac{di}{dt} > 0 \text{ であれば}$$

$$v > 0$$

$$v = L \frac{di}{dt}$$

$$p = vi$$



$$\frac{di}{dt} < 0 \text{ であれば}$$

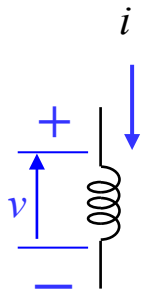
$$v < 0$$

$$E = \int_{t_0}^{t_1} p dt + \frac{1}{2} Li_0^2$$

$$= \int_{t_0}^{t_1} Li \frac{di}{dt} dt + \frac{1}{2} Li_0^2$$

$$= \int_{i_0}^{i_1} Lid i + \frac{1}{2} Li_0^2$$

$$= \frac{1}{2} Li_1^2$$



$$\frac{di}{dt} > 0 \text{ であれば}$$

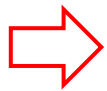
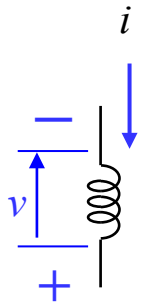
$$v > 0$$



エネルギーはコイルに入
って行き、磁気エ
ネルギーとして蓄え
られる。

$$\frac{di}{dt} < 0 \text{ であれば}$$

$$v < 0$$



エネルギーはコイルか
ら出て行き、電気エ
ネルギーとして放出さ
れる。

$$v = L \frac{di}{dt}$$

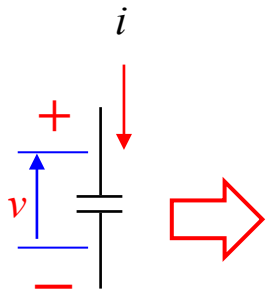
$$p = vi$$

$$E = \int_{t_0}^{t_1} p dt + \frac{1}{2} Li_0^2$$

$$= \int_{t_0}^{t_1} Li \frac{di}{dt} dt + \frac{1}{2} Li_0^2$$

$$= \int_{i_0}^{i_1} Lid i + \frac{1}{2} Li_0^2$$

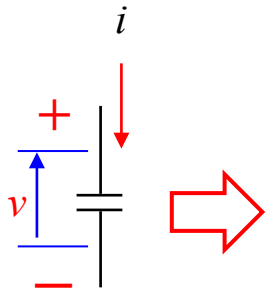
$$= \frac{1}{2} Li_1^2$$



$i > 0$ であれば

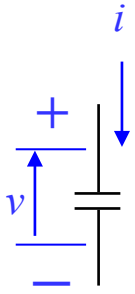
$$i = C \frac{dv}{dt}$$

$$p = vi$$

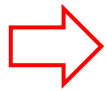


$i < 0$ であれば

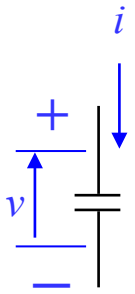
$$\begin{aligned}
 E &= \int_{t_0}^{t_1} p dt + \frac{1}{2} C v_0^2 \\
 &= \int_{t_0}^{t_1} C v \frac{dv}{dt} dt + \frac{1}{2} C v_0^2 \\
 &= \int_{i_0}^{i_1} C v dv + \frac{1}{2} C v_0^2 \\
 &= \frac{1}{2} C v_1^2
 \end{aligned}$$



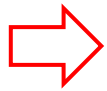
$i > 0$ であれば



エネルギーはコンデンサに入って行き、静電エネルギーとして蓄えられる。



$i < 0$ であれば

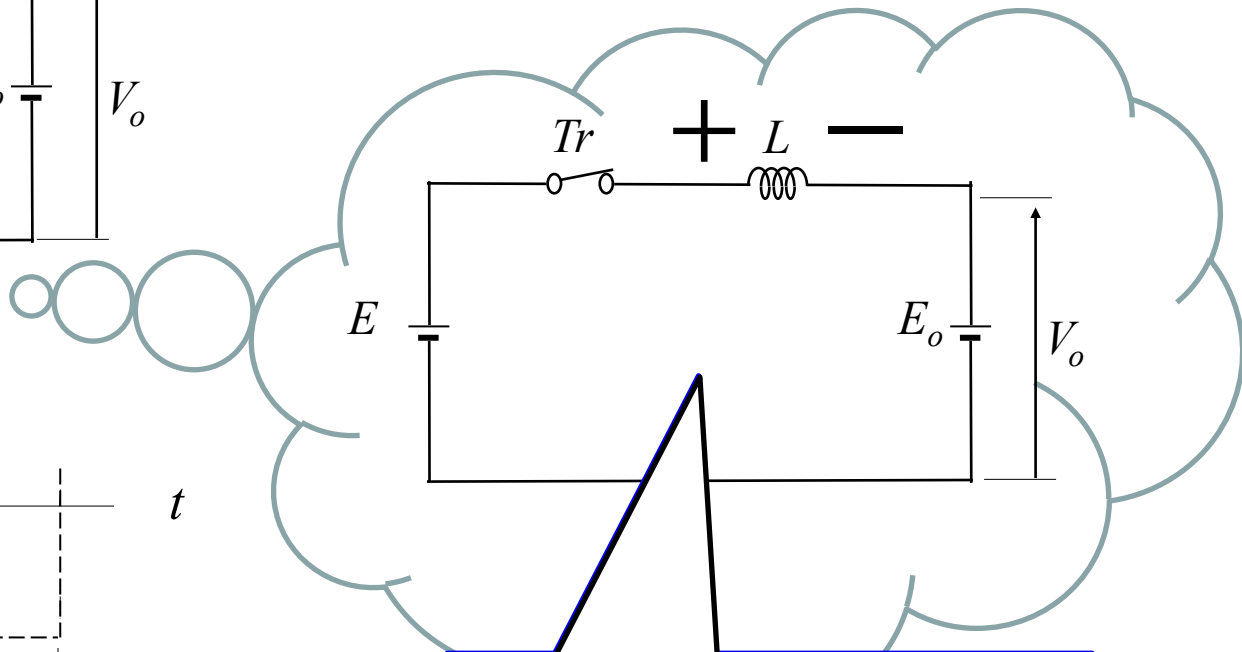
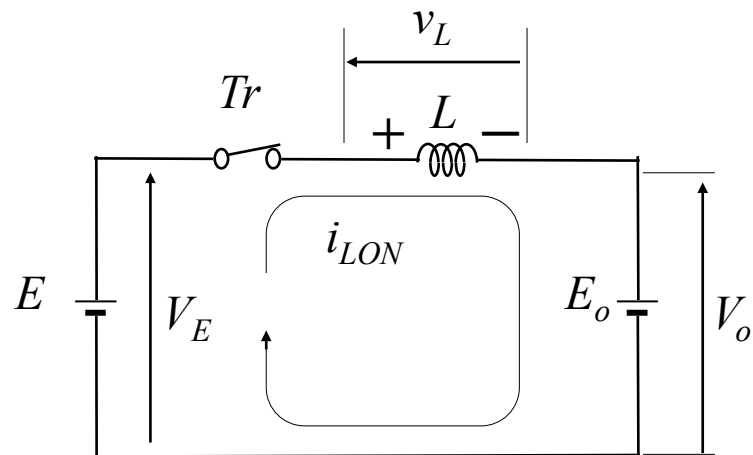


エネルギーはコンデンサから出て行き、電気エネルギーとして放出される。

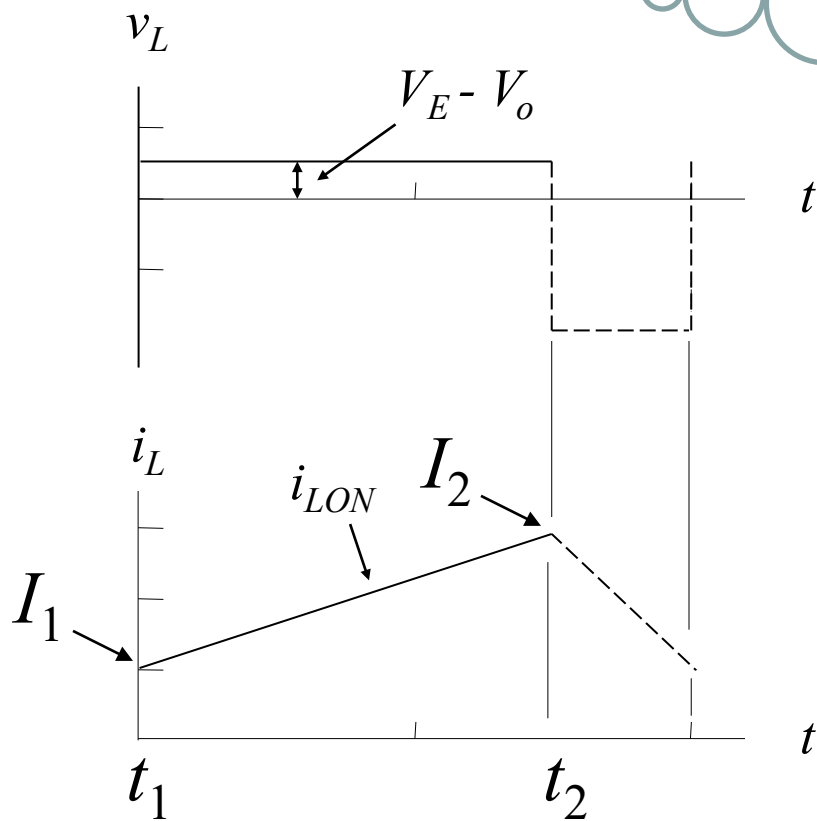
$$i = C \frac{dv}{dt}$$

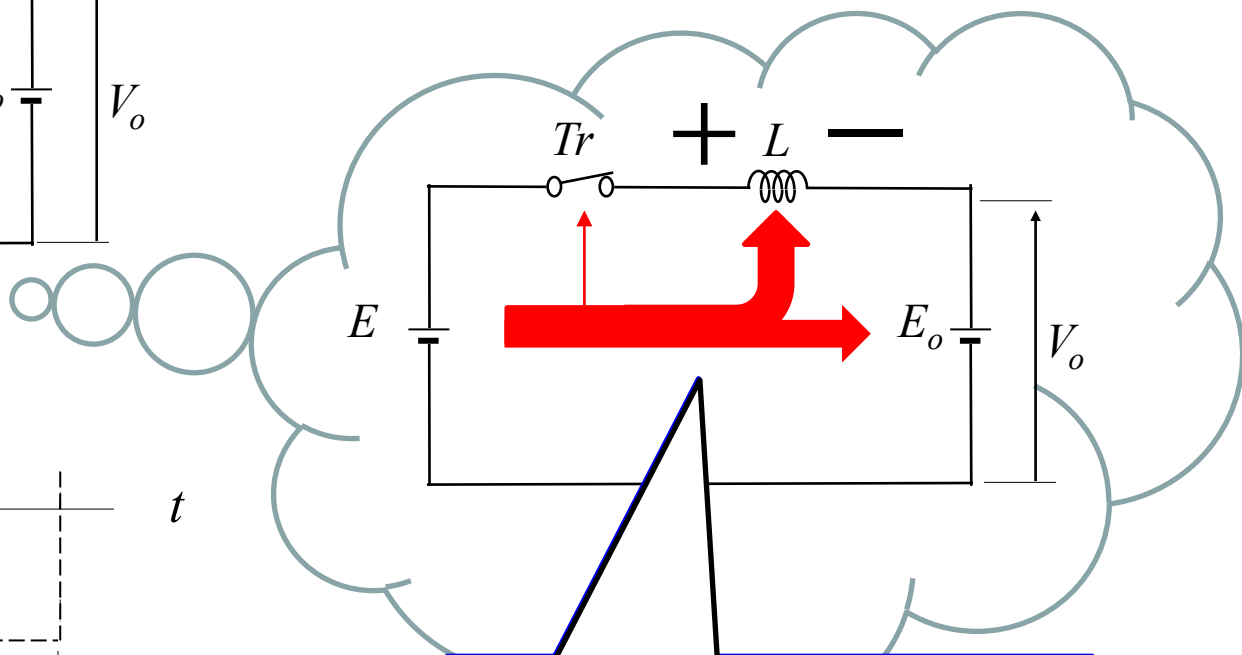
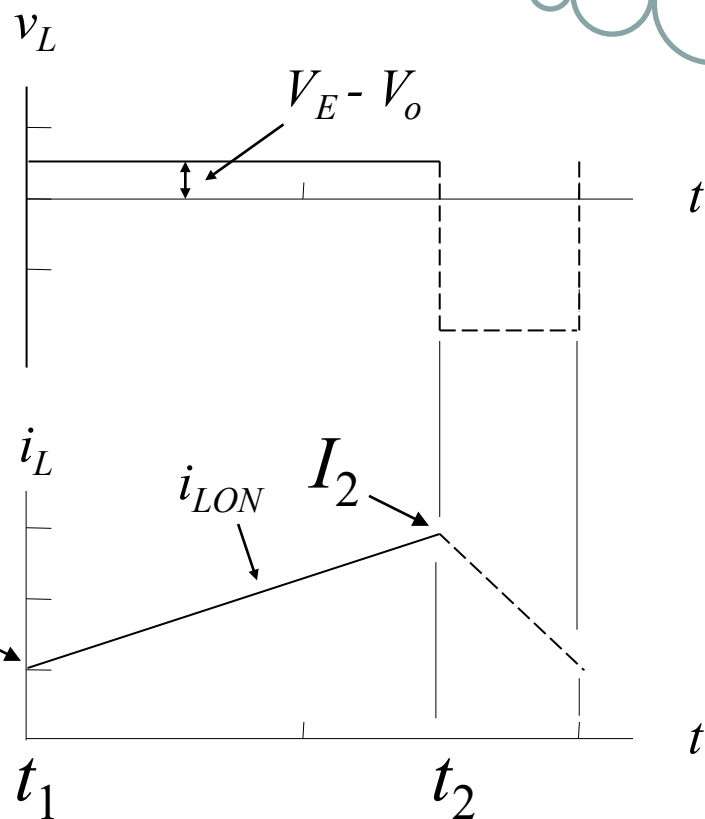
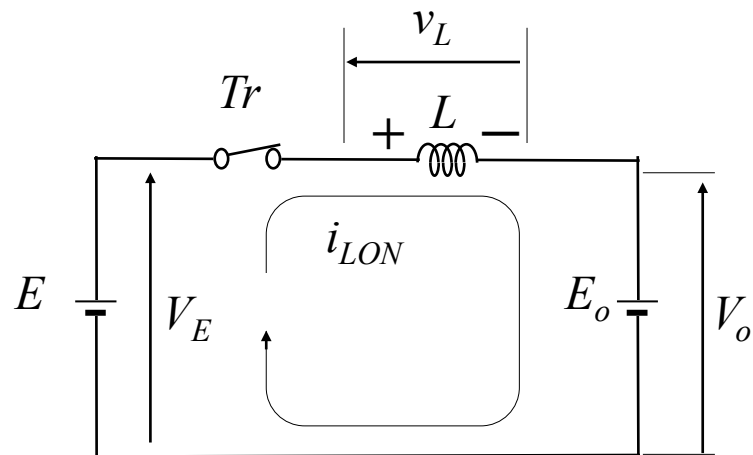
$$p = vi$$

$$\begin{aligned} E &= \int_{t_0}^{t_1} p dt + \frac{1}{2} C v_0^2 \\ &= \int_{t_0}^{t_1} C v \frac{dv}{dt} dt + \frac{1}{2} C v_0^2 \\ &= \int_{i_0}^{i_1} C v dv + \frac{1}{2} C v_0^2 \\ &= \frac{1}{2} C v_1^2 \end{aligned}$$



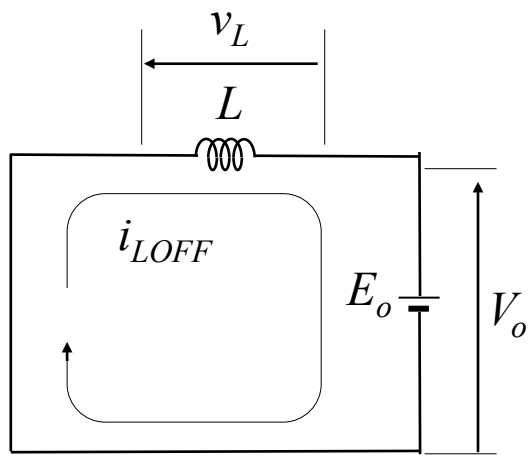
エネルギーは電源からコイルと出力の両方に流れている。





エネルギーは電源からコイルと出力の両方に流れている。

Tr オフ



左図の回路の微分方程式は

$$L \frac{di_L}{dt} = -V_o \quad (4.22)$$

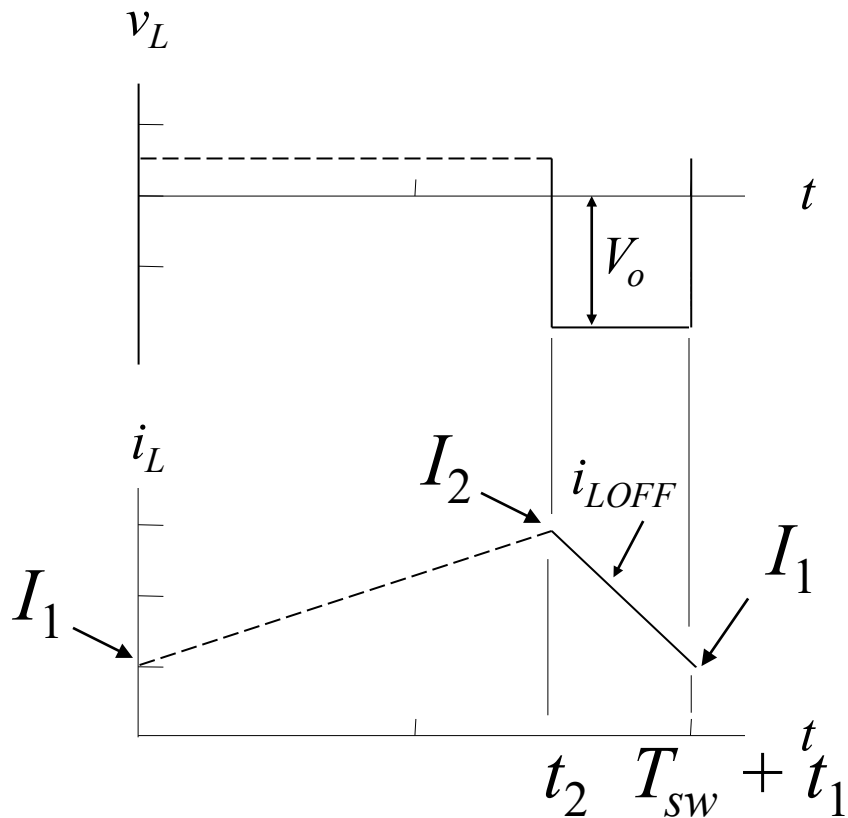
両辺を t_2 から t まで積分すると

$$i_L = \frac{-V_o}{L} (t - t_2) + I_2$$

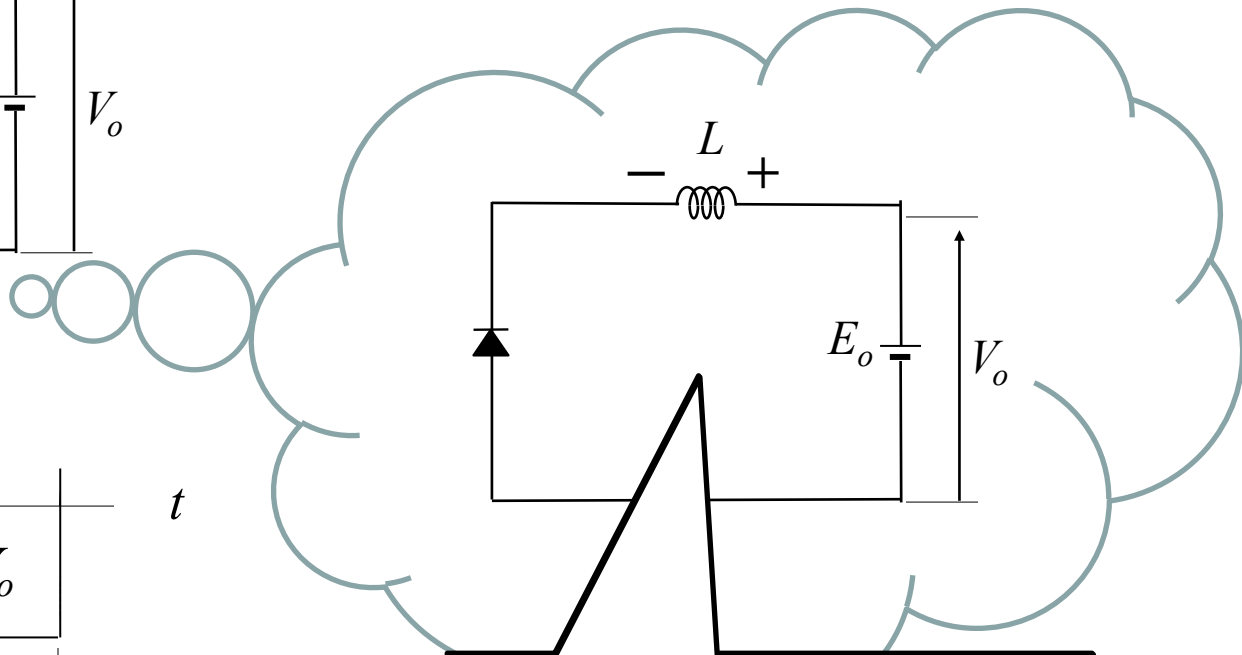
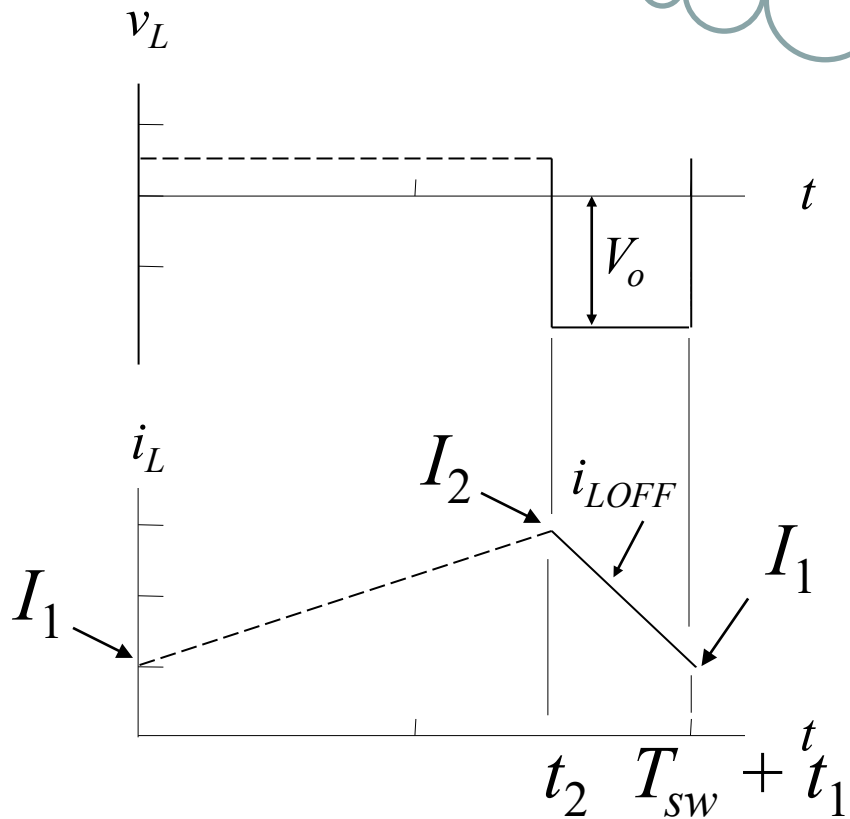
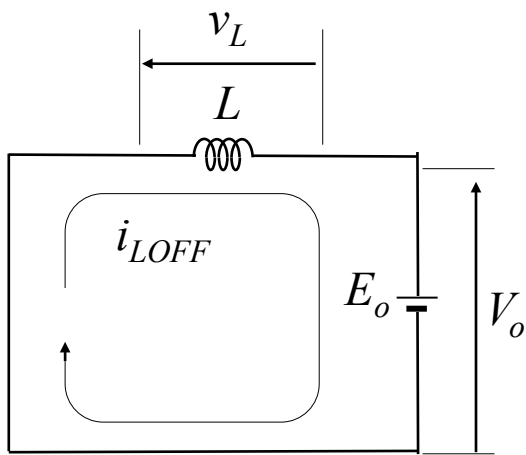
$t = T_{sw} + t_1$ にて $i_L = I_1$ にもどっているとすると

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{-V_o}{L} (t_1 + T_{sw} - t_2) + I_2 \\ &= \frac{-V_o}{L} T_{sw} \left(1 - \frac{t_2 - t_1}{T_{sw}}\right) + I_2 \\ &= \frac{-V_o}{L} T_{sw} (1 - \delta) + I_2 \end{aligned}$$

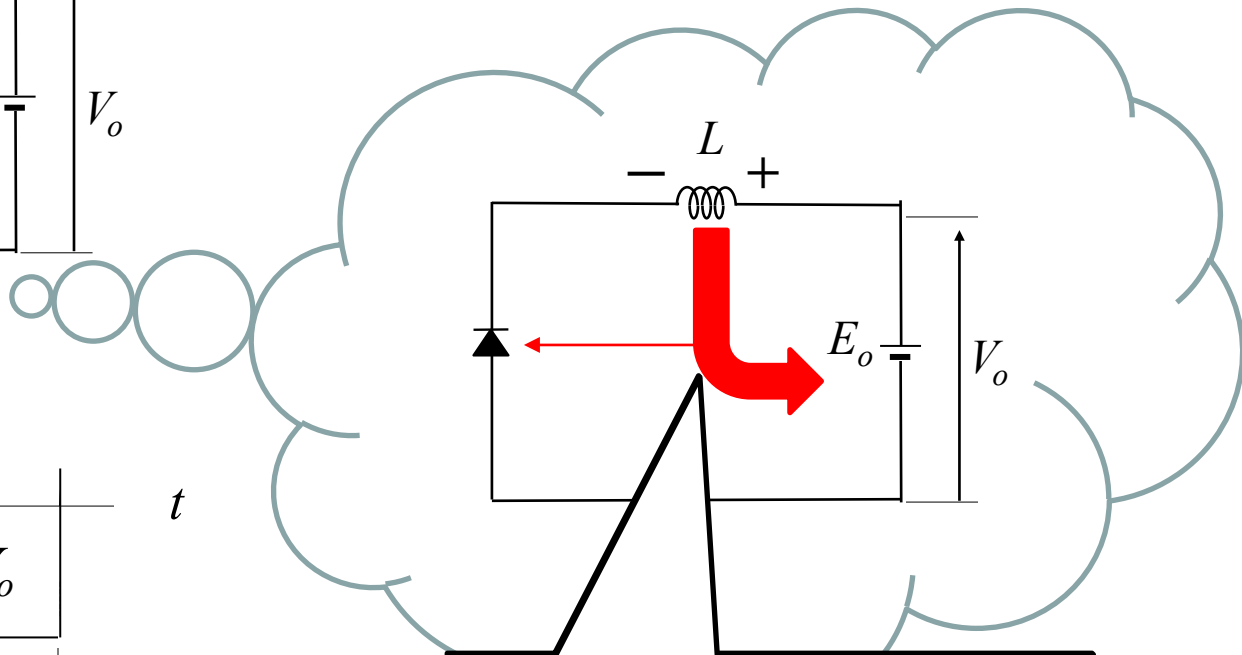
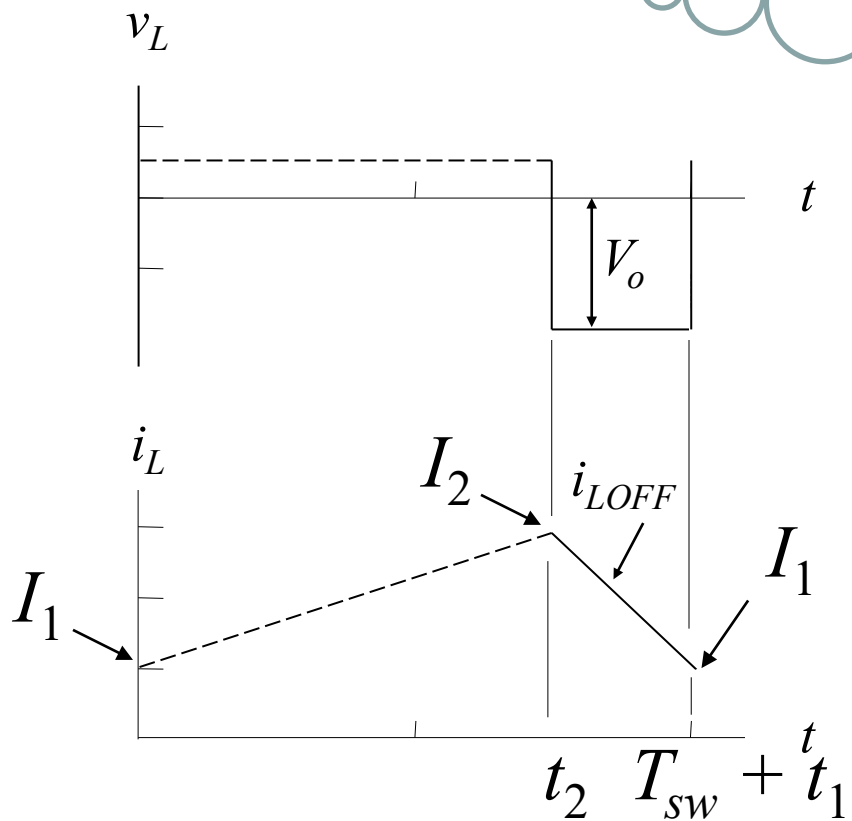
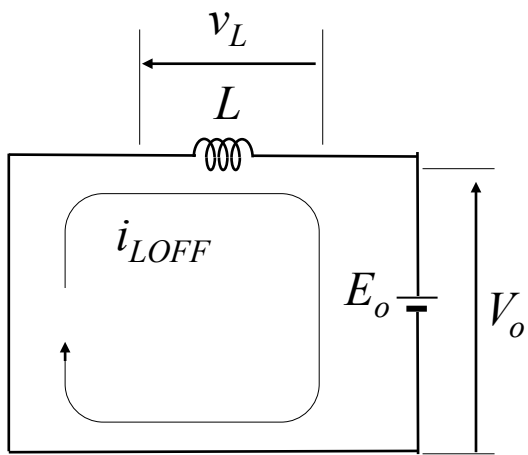
$$\delta = \frac{T_{ON}}{T_{SW}}$$



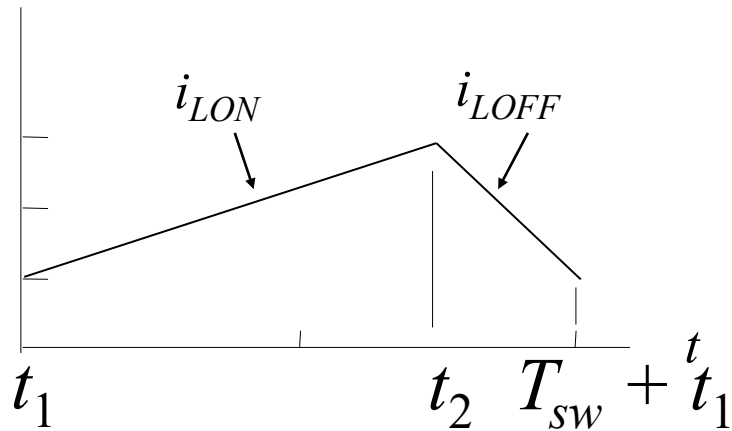
$$\Delta I = I_2 - I_1 = \frac{V_o}{L} T_{sw} (1 - \delta) \quad (4.25)$$



エネルギーはコイルから出力へと流れている。



エネルギーはコイルから出力へと流れている。



$$\Delta I = I_2 - I_1 = \frac{V_E - V_o}{L} \delta T_{SW}$$

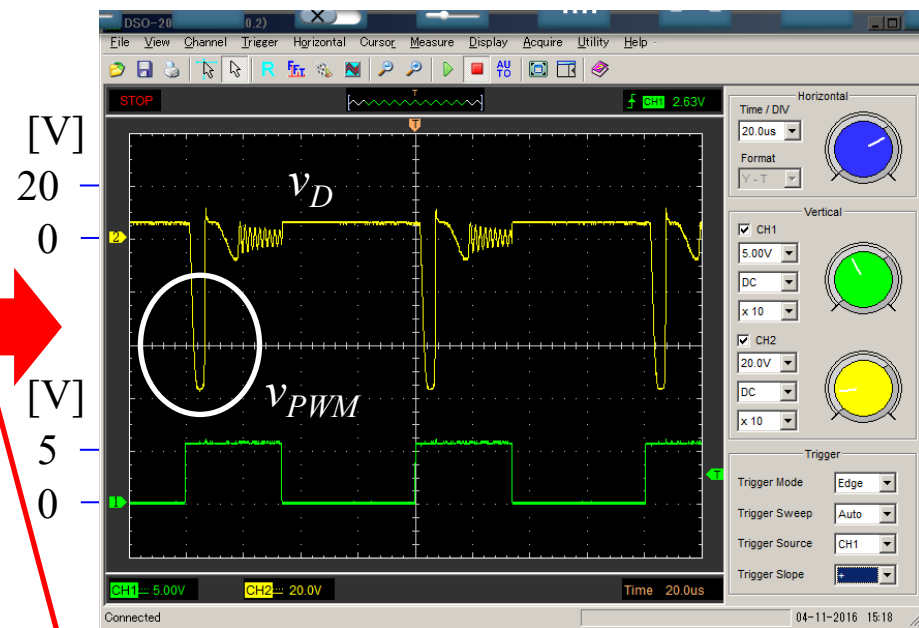
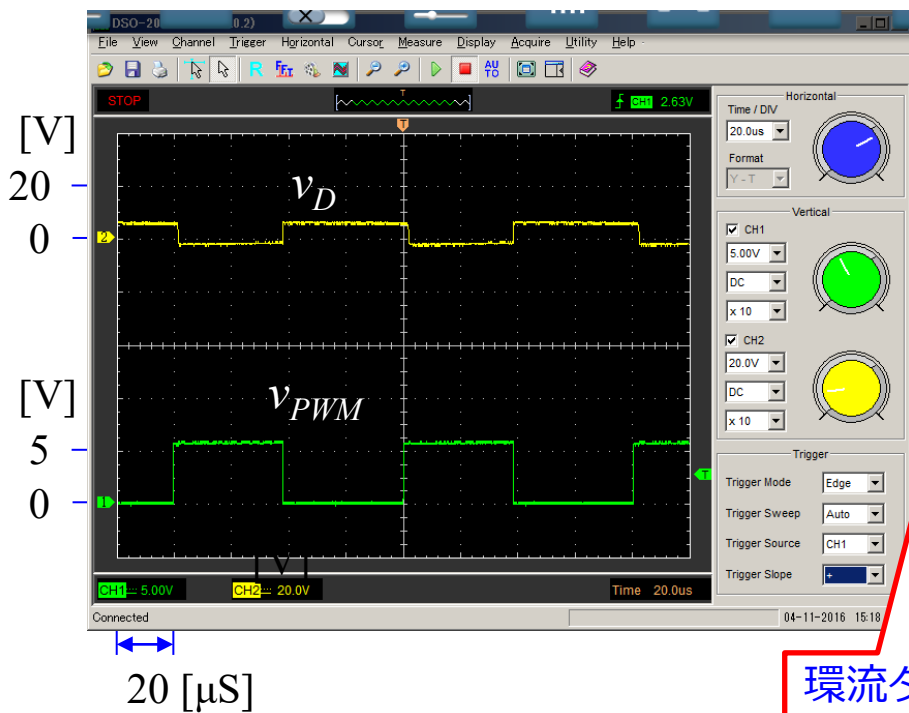
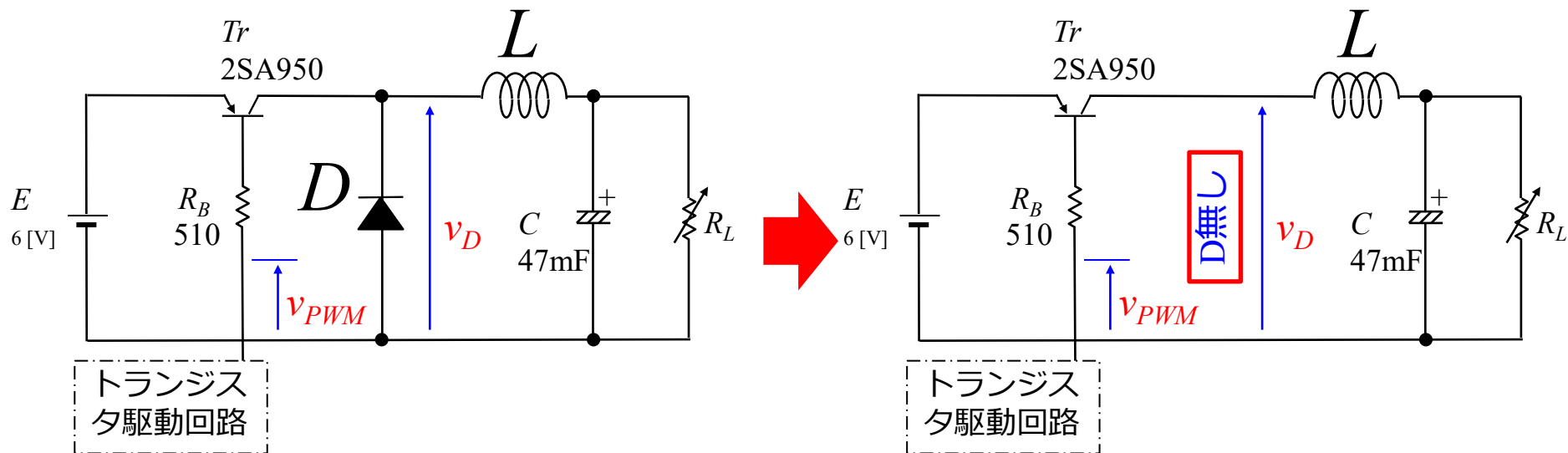
$$\Delta I = I_2 - I_1 = \frac{V_o}{L} T_{SW} (1 - \delta)$$

両式の右辺は等しいので

$$\frac{V_E - V_o}{L} \delta T_{SW} = \frac{V_o}{L} T_{SW} (1 - \delta)$$

$$V_o = \delta V_E \quad (4.26)$$

STEP4 レポート課題(2) **解答** 環流ダイオード D を取り外すと $v_{PWM} \approx 6[V]$ (Tr オフ)となった瞬間にダイオード両端電圧 v_D が絶対値の大きな負の値となる。この理由を述べよ。



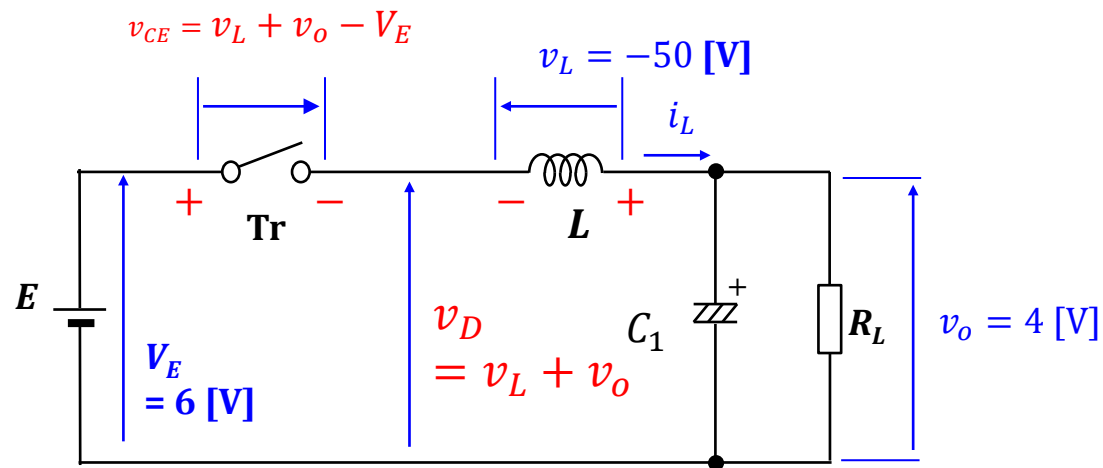
環流ダイオードを取り外す

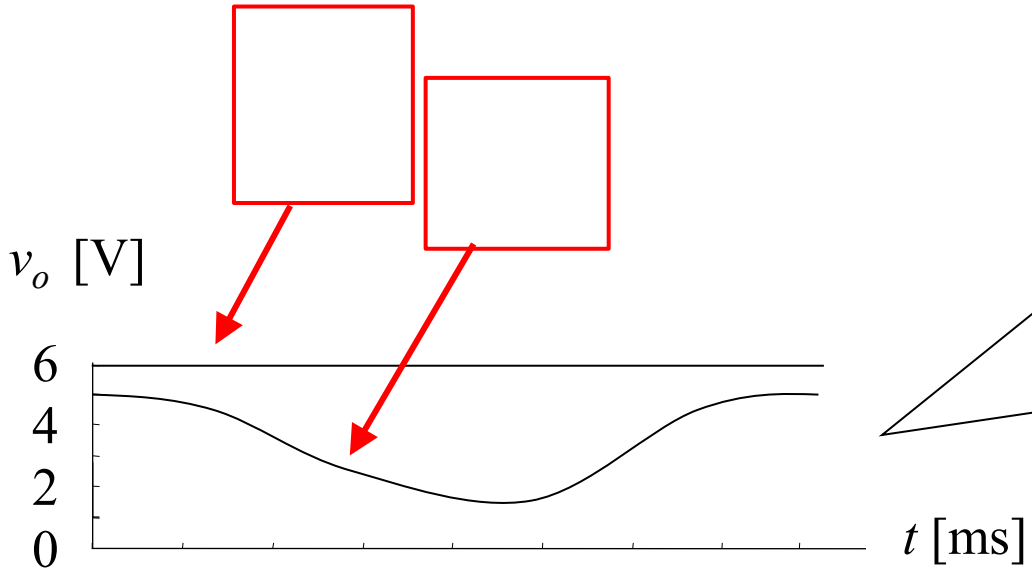
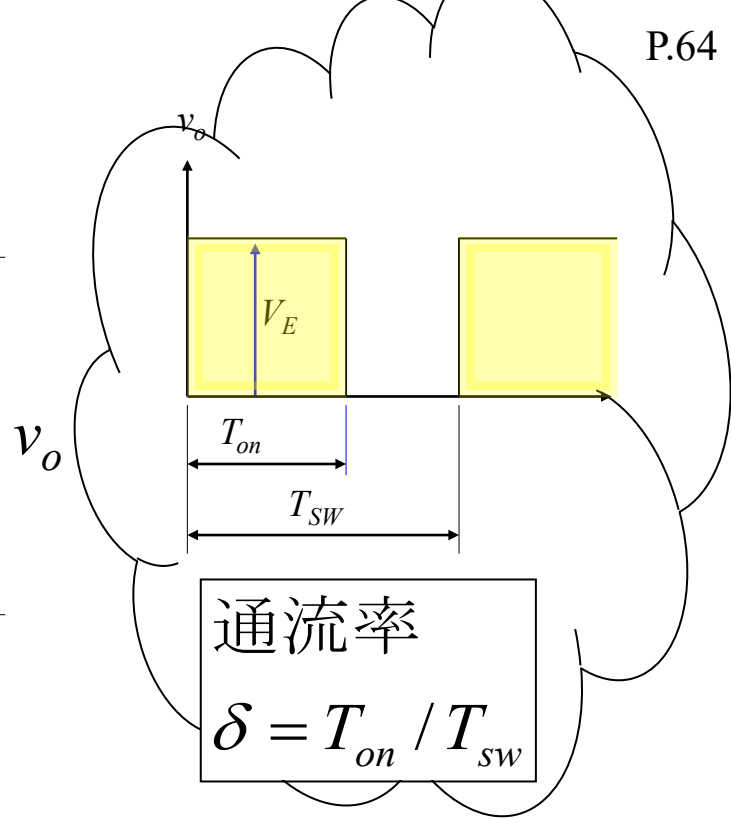
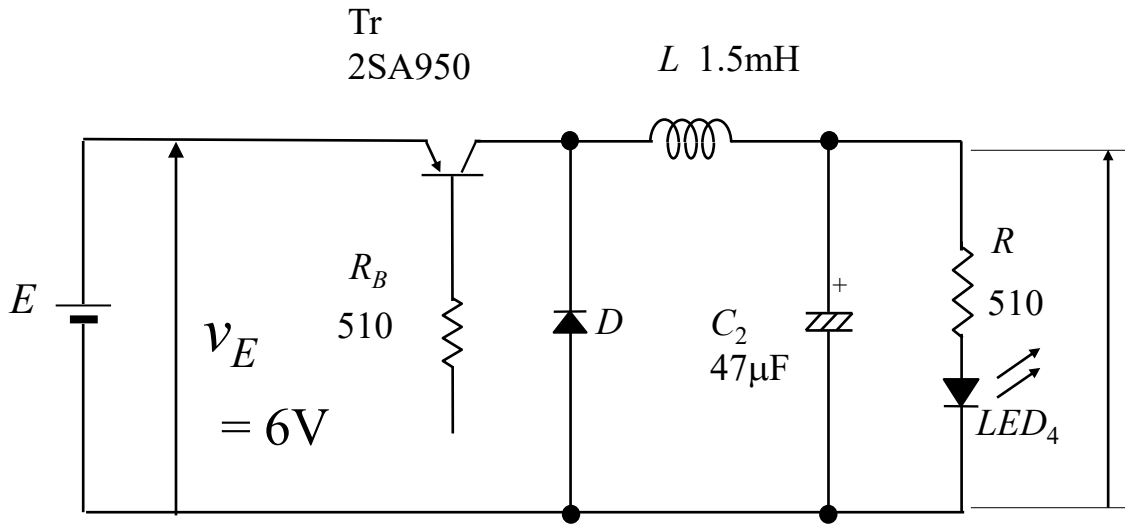
$$v_L = \frac{di_L}{dt} < 0$$

If $v_L = -50$ [V] and $v_o = 4$ [V], then

$$v_D = v_L + v_o = -50 + 4 = -46$$
 [V]

$$v_{CE} = v_L + v_o - V_E = -50 + 4 + 6 = -51$$
 [V].

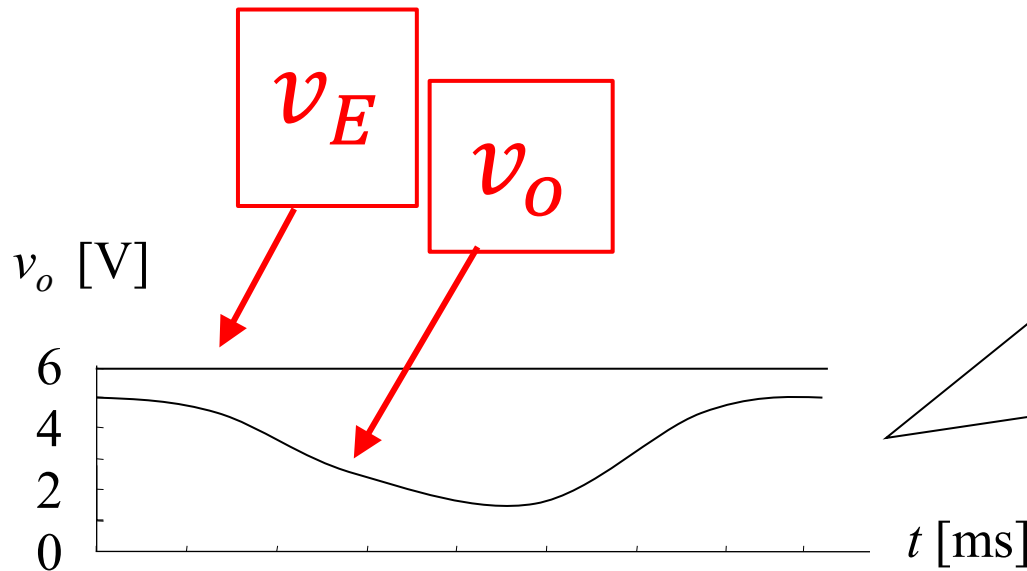
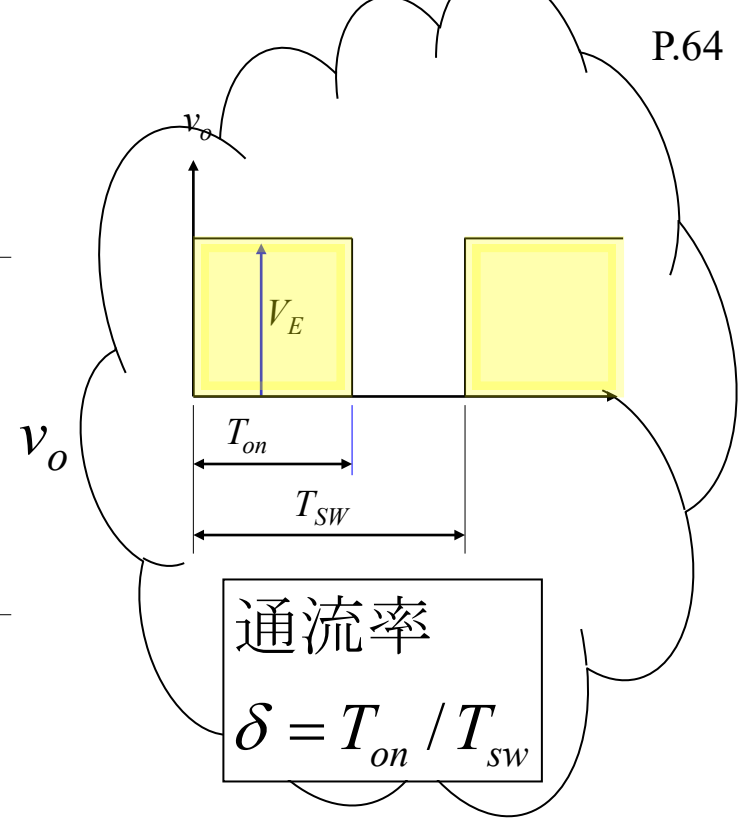
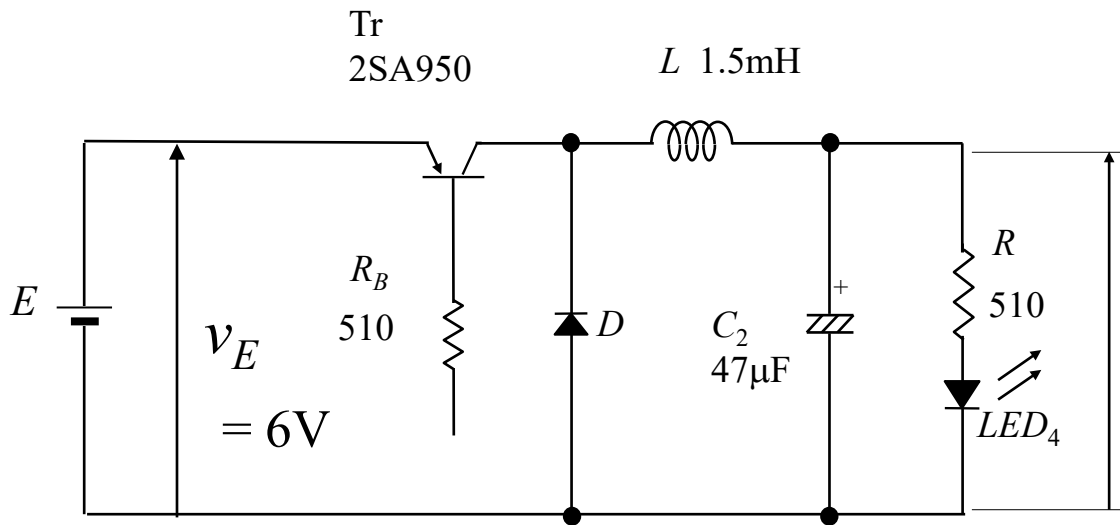




$$V_o = \delta V_E \quad (4.26)$$

$$0 \leq \delta \leq 1$$

電源電圧より高い
電圧を出せない

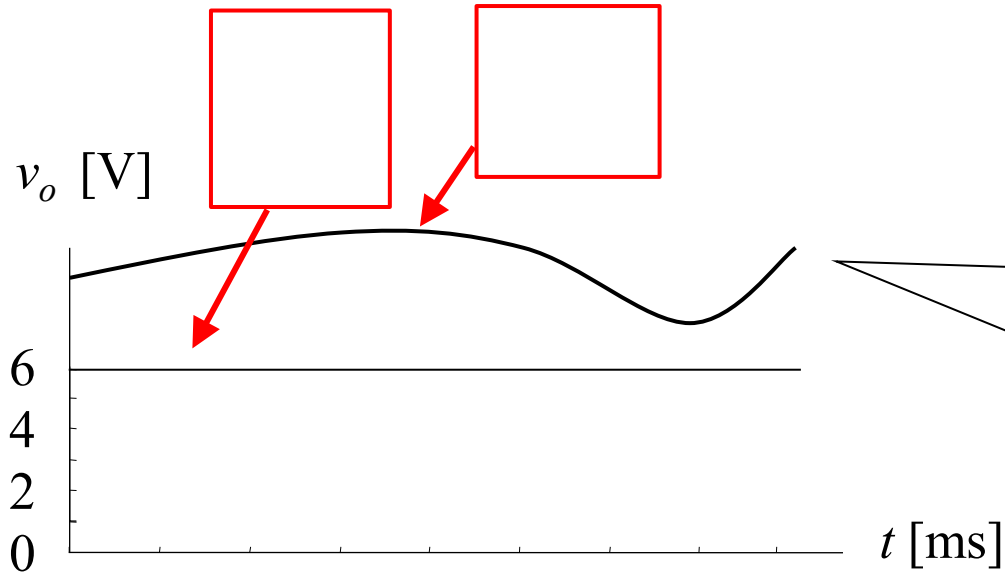
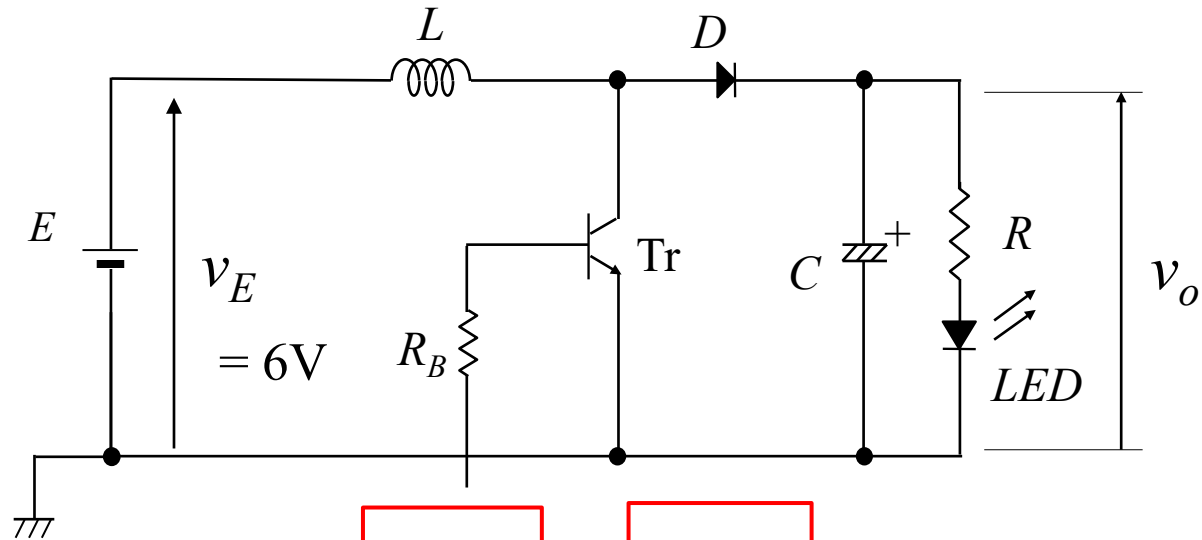


$$V_o = \delta V_E \quad (4.26)$$

$$0 \leq \delta \leq 1$$

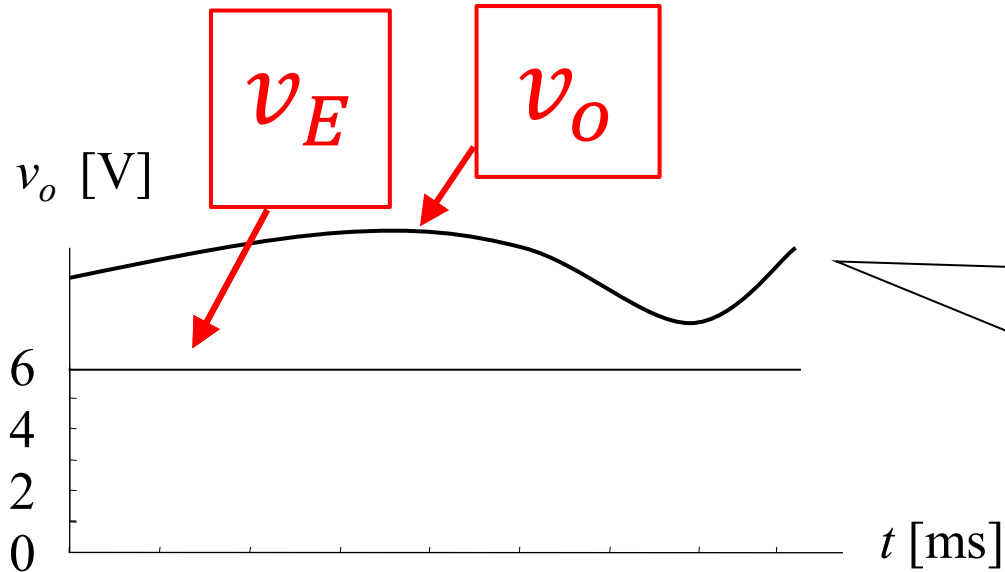
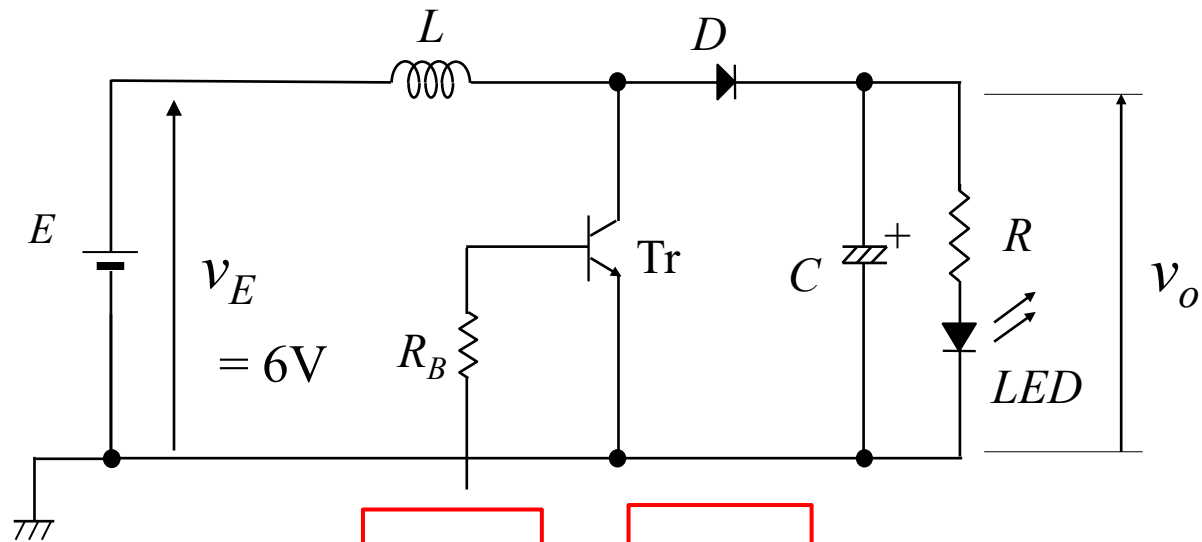
電源電圧より高い
電圧を出せない

昇圧チョッパ回路



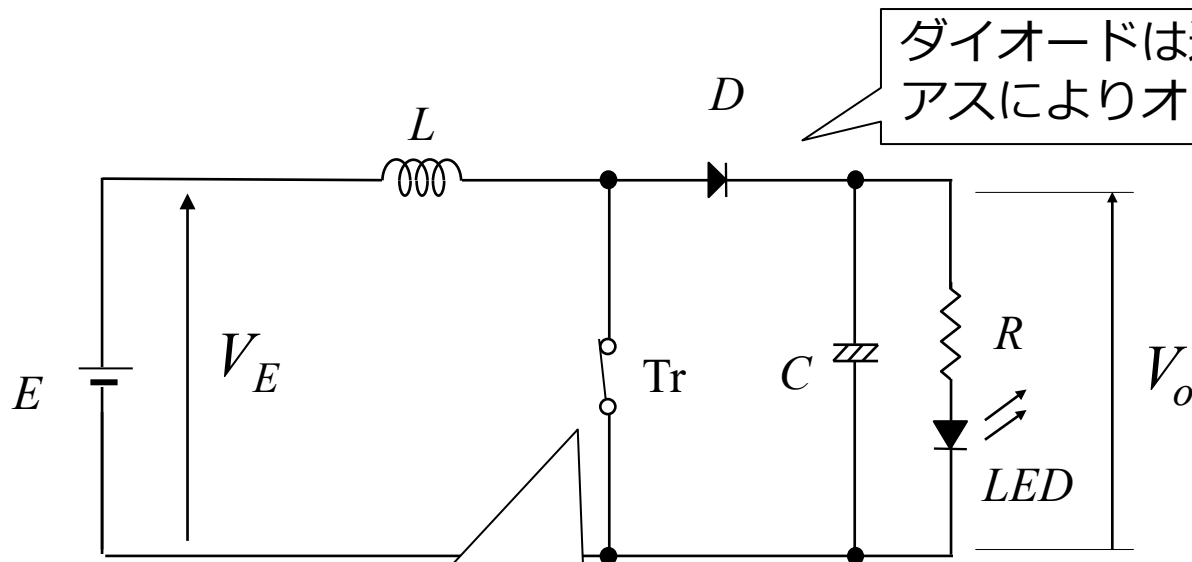
電源電圧より高い電圧を出せる

昇圧チョッパ回路



電源電圧より高い電圧を出せる

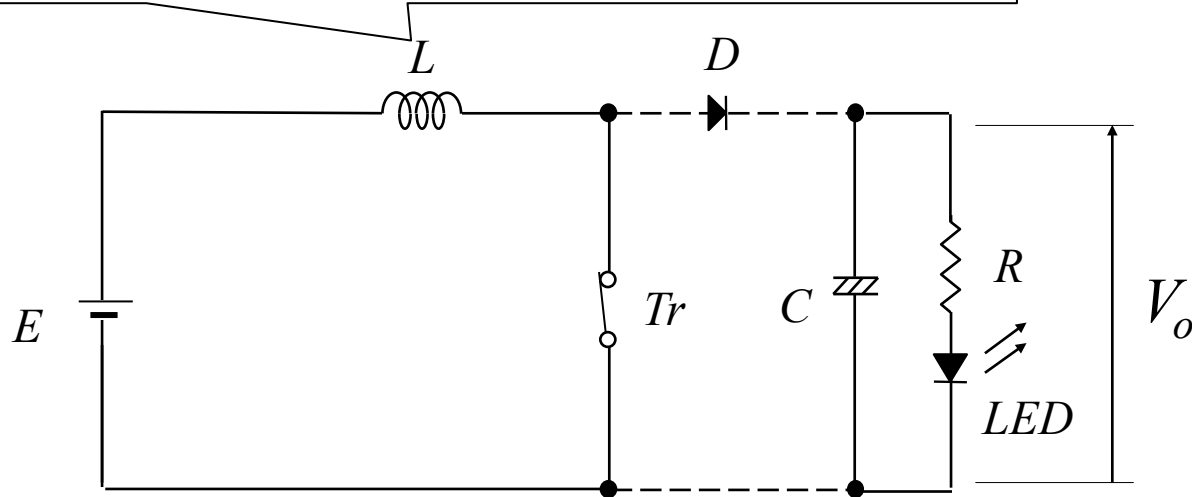
昇圧チョッパ回路の動作原理



ダイオードは逆バイアスによりオフ

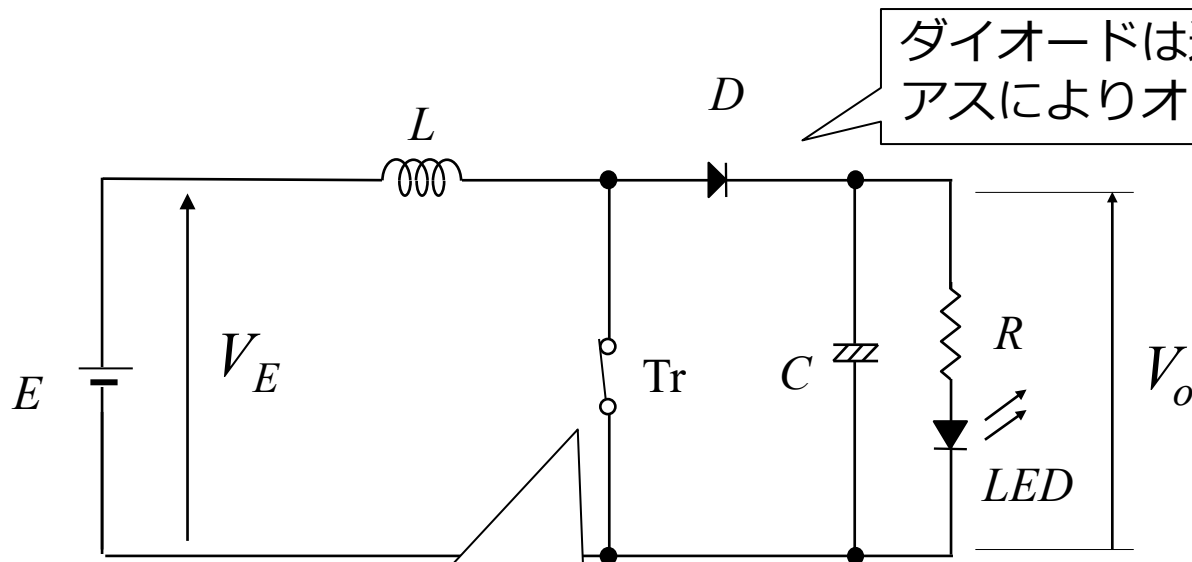
トランジスタがオンのとき

コイルに電磁エネルギー($Li^2/2$)が蓄積される。



とする。
Trがオンもしくは
オフのままでは電
源Eからコンデン
サCへは電流を流
せない。

昇圧チョッパ回路の動作原理



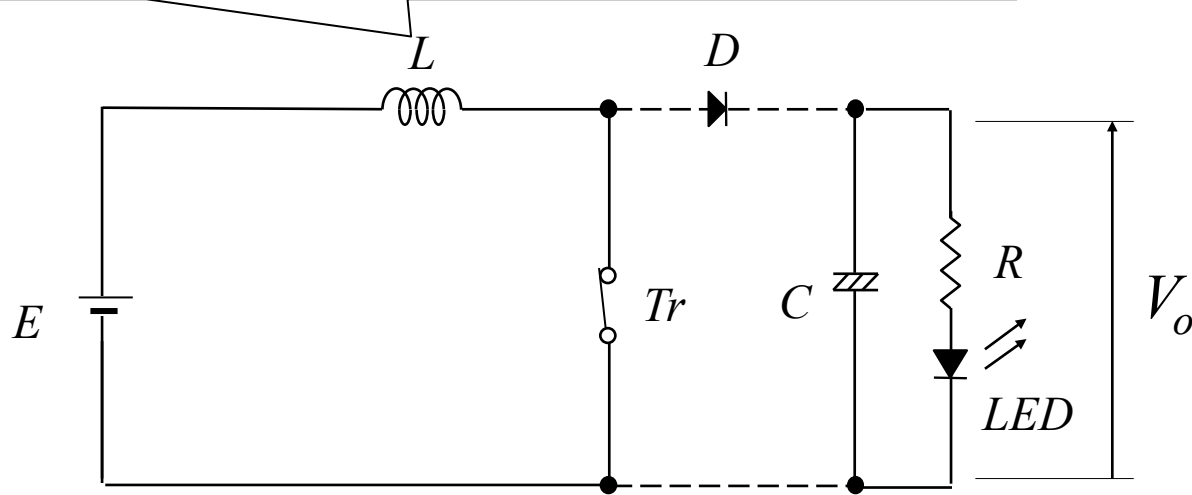
ダイオードは逆バイアスによりオフ

トランジスタがオンのとき

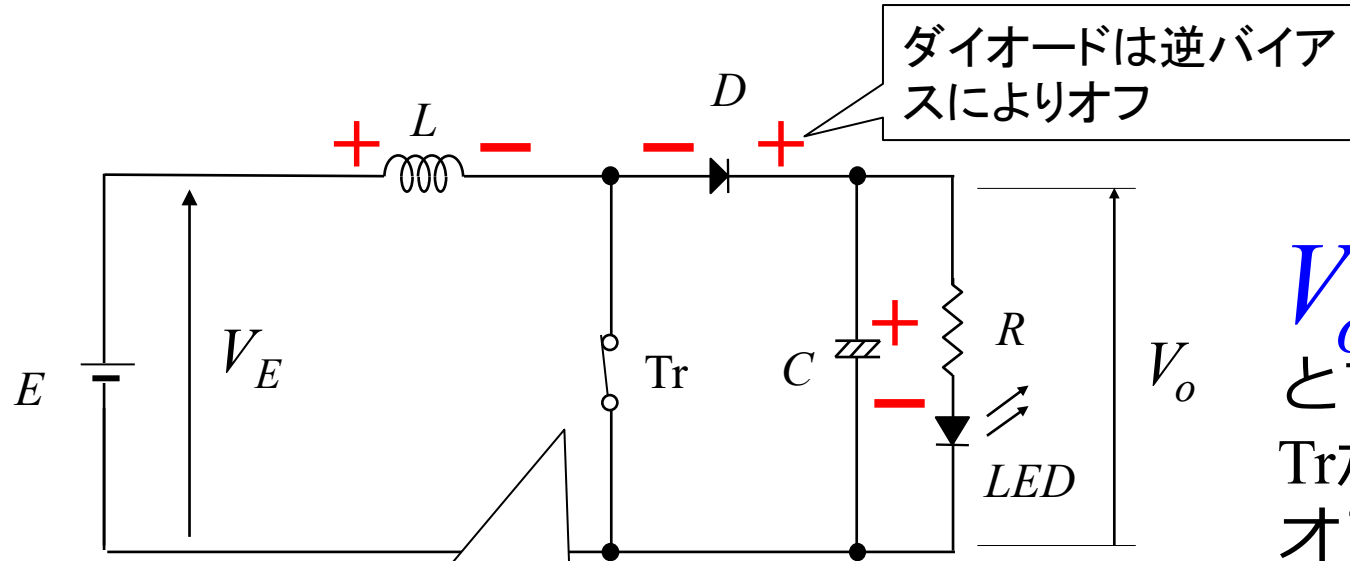
コイルに電磁エネルギー($Li^2/2$)が蓄積される。

$$V_o > V_E > 0$$

とする。
Trがオンもしくは
オフのままでは電
源Eからコンデン
サCへは電流を流
せない。

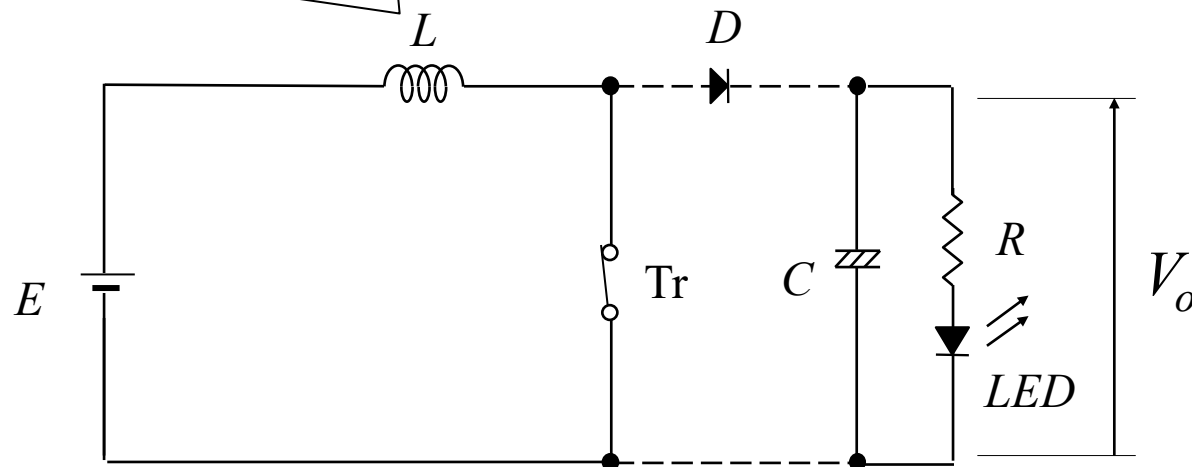


昇圧チョッパ回路の動作原理

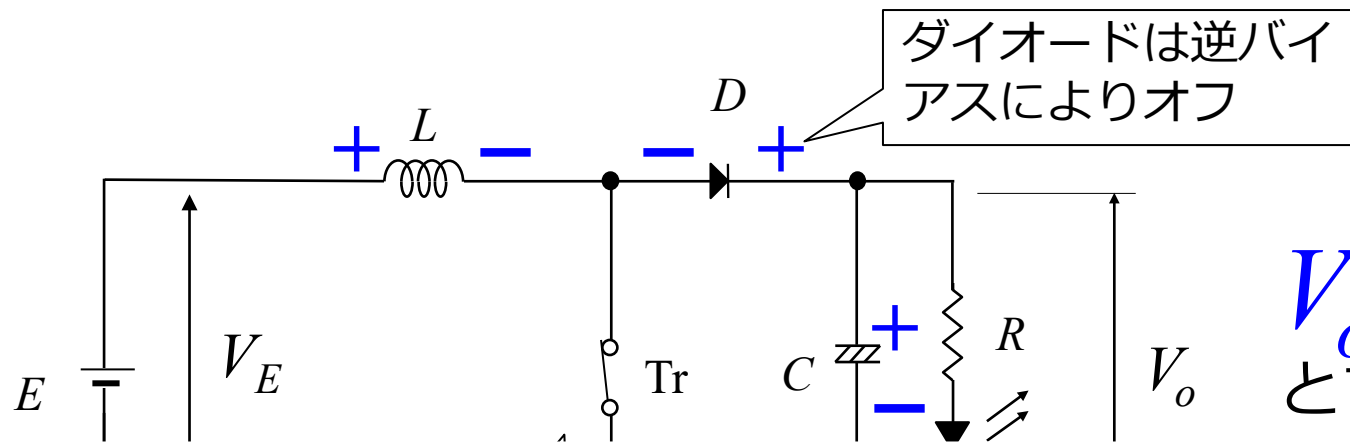


トランジスタがオンのとき

コイルに電磁エネルギー($Li^2/2$)が蓄積される.



昇圧チョッパ回路の動作原理

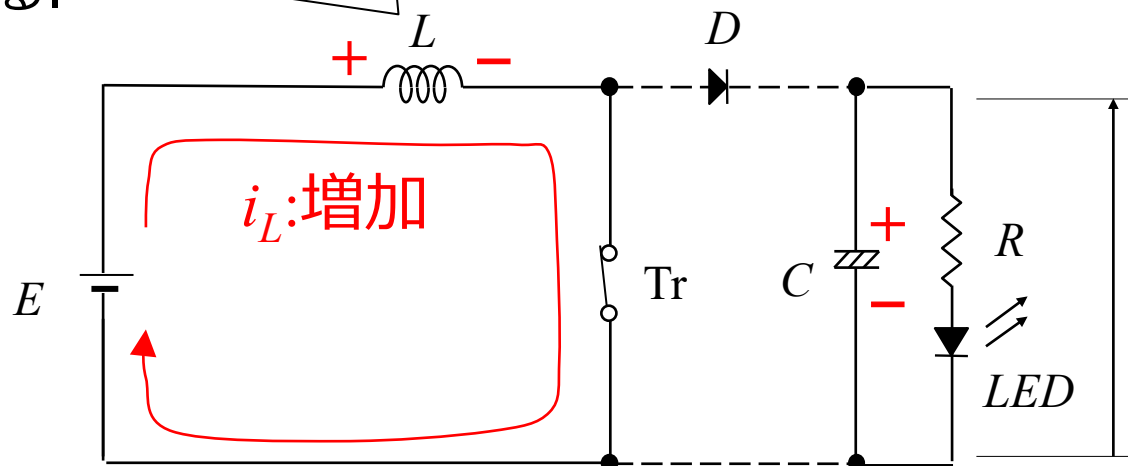


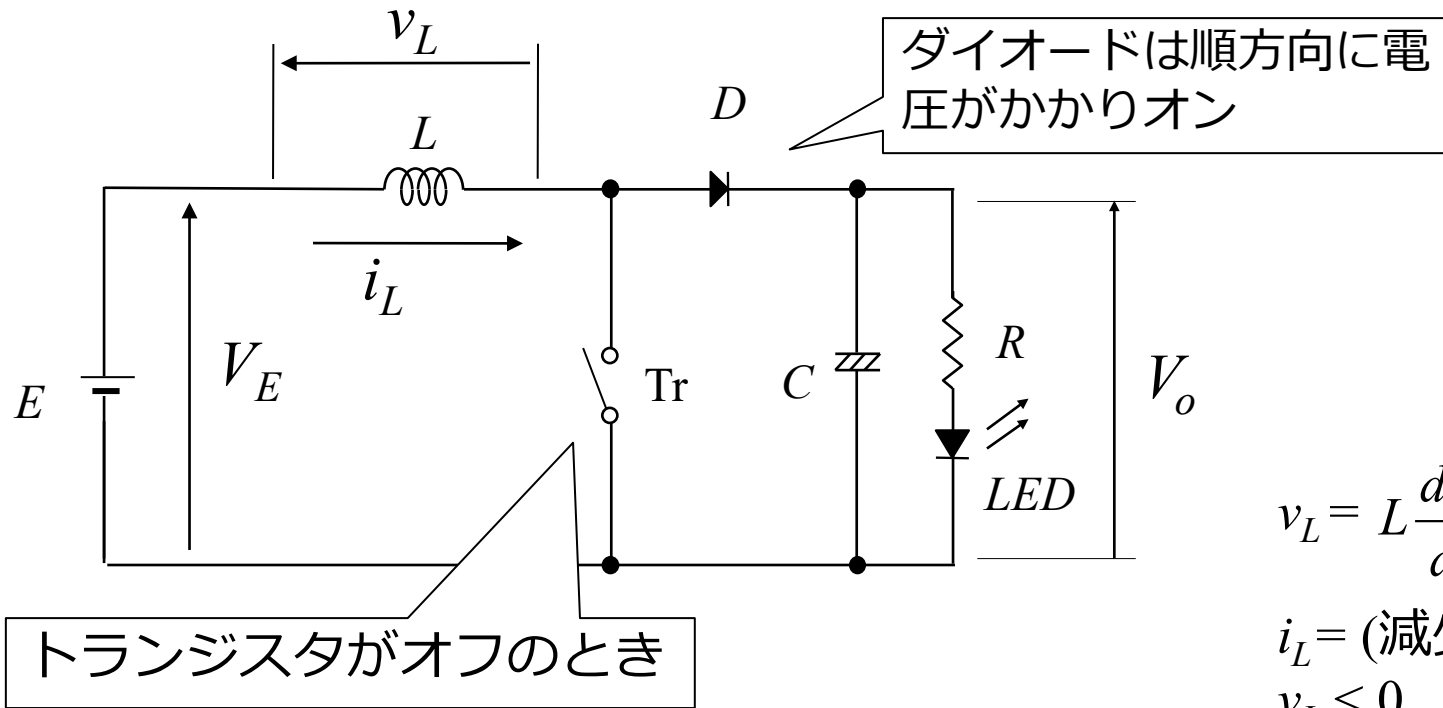
$$V_o > V_E > 0$$

とする.

Trがオンもしくは
オフのままでは電
源Eからコンデン
サCへは電流を流
せない.

コイルに電磁エネルギー($Li^2/2$)が蓄積され
る.

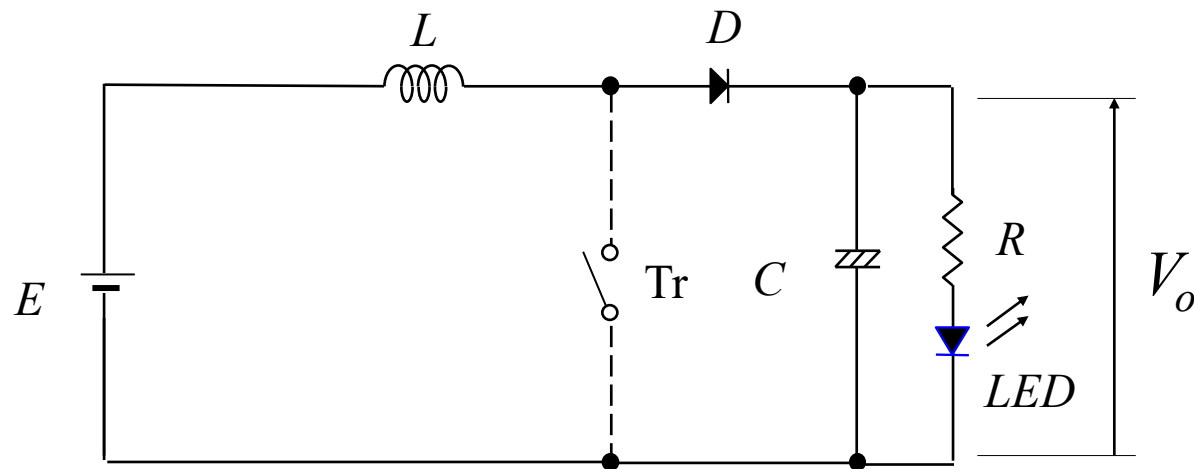




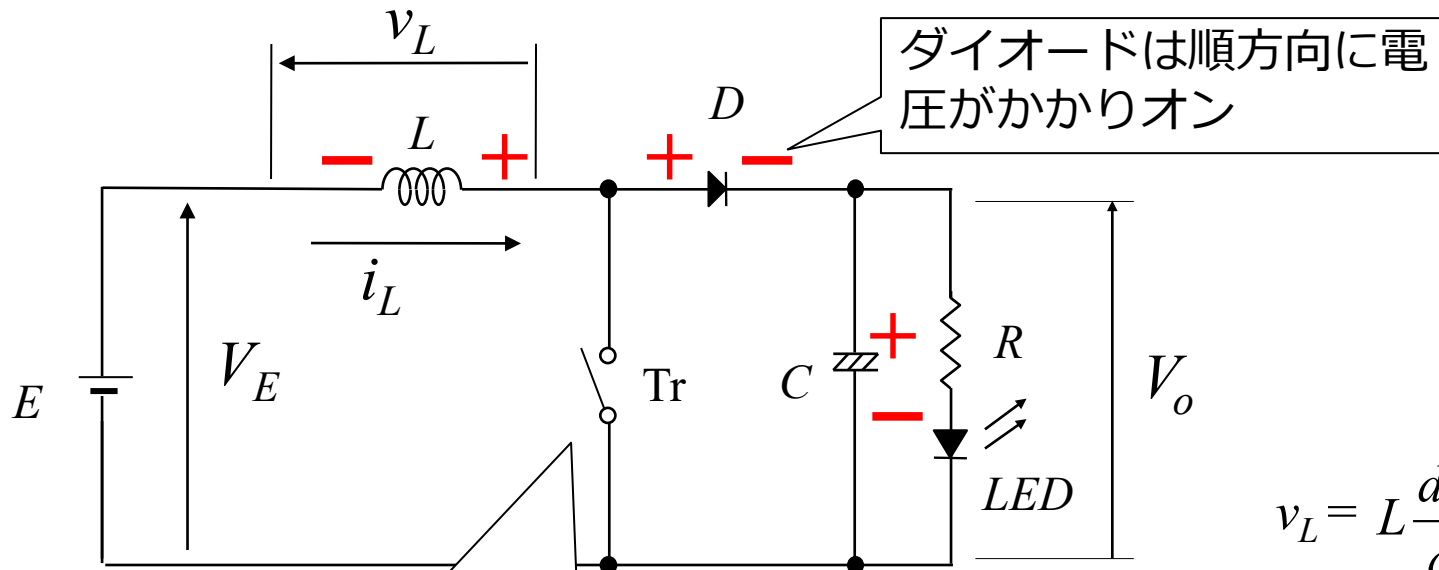
$$v_L = L \frac{di_L}{dt}$$

$i_L = (\text{減少})$ であれば
 $v_L < 0$.

コイルの電磁エネルギー ($Li^2/2$) が放出される。



このとき
 $V_E - v_L > V_o$ となる。



ダイオードは順方向に電圧がかかりオン

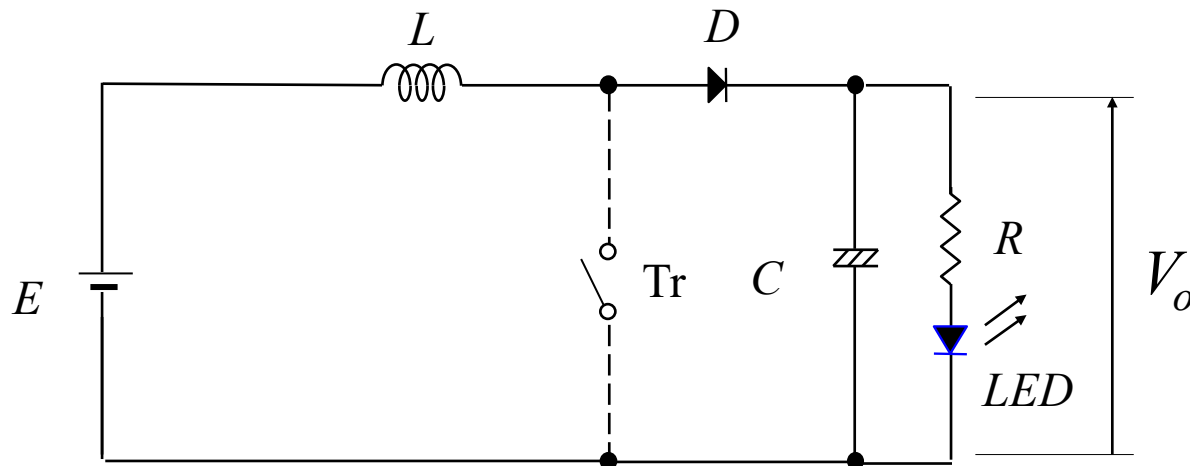
トランジスタがオフのとき

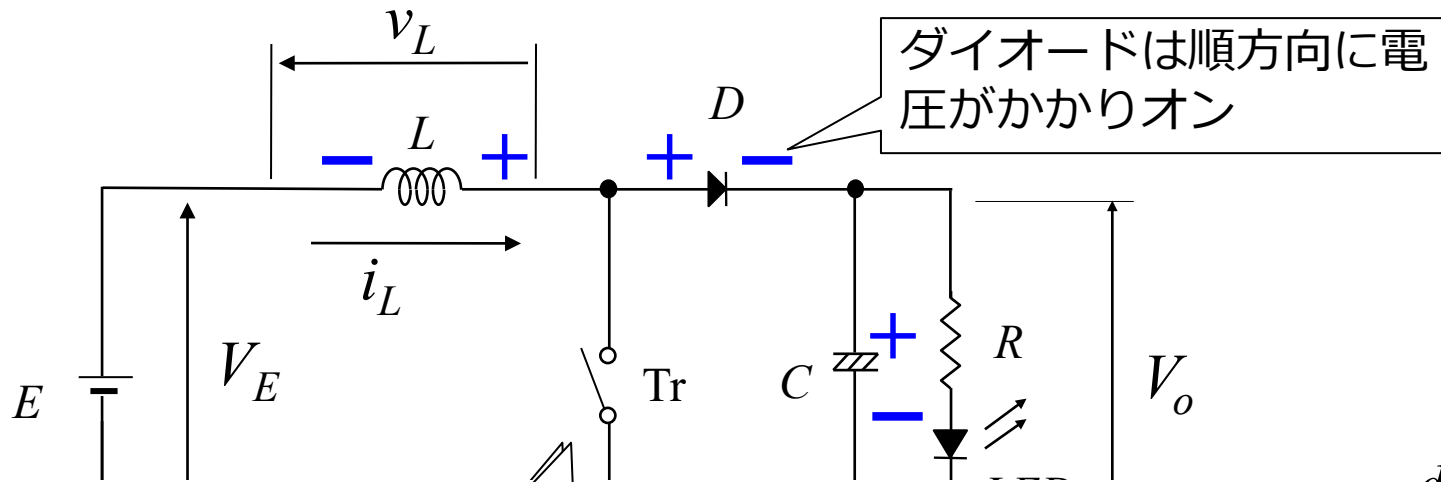
$$v_L = L \frac{di_L}{dt}$$

$i_L = (\text{減少})$ であれば $v_L < 0$.

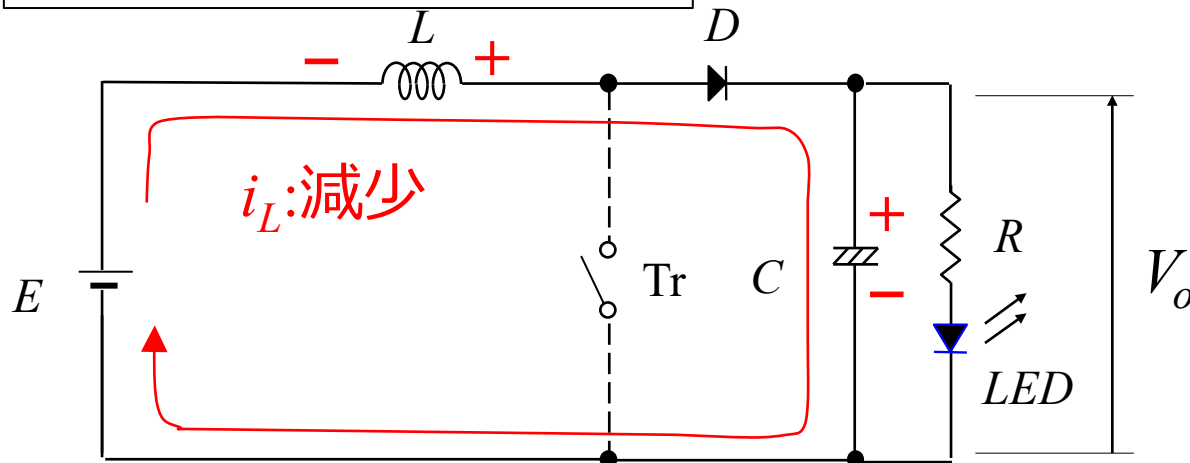
コイルの電磁エネルギー ($Li^2/2$) が放出される。

このとき $V_E - v_L > V_o$ となる。





トランジスタがオフのとき



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

$i_L = (\text{減少})$ であれば
 $v_L < 0$.

PWM (Pulse Width Modulation, パルス幅変調) 制御法

$$\begin{aligned}
 v_{com} \geq v_{tri} \text{ のときトランジスタ} & \quad \text{オン} \\
 v_{com} < v_{tri} \text{ のときトランジスタ} & \quad \text{オフ}
 \end{aligned}
 \tag{5.3}$$

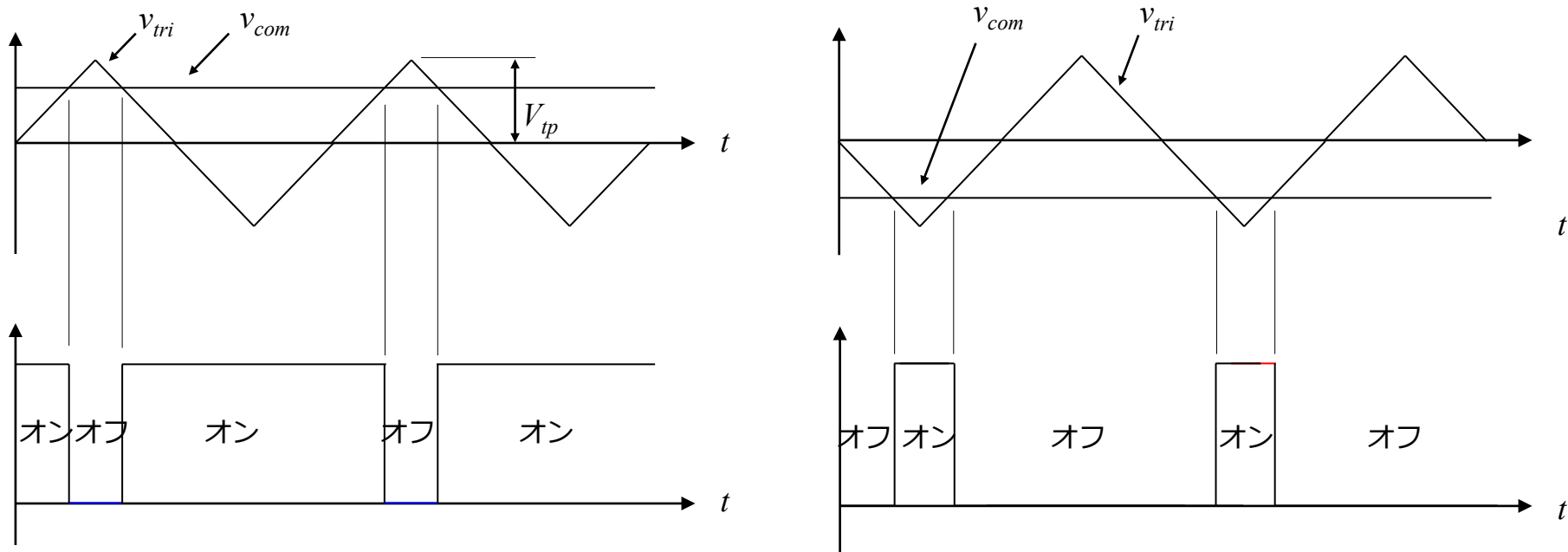
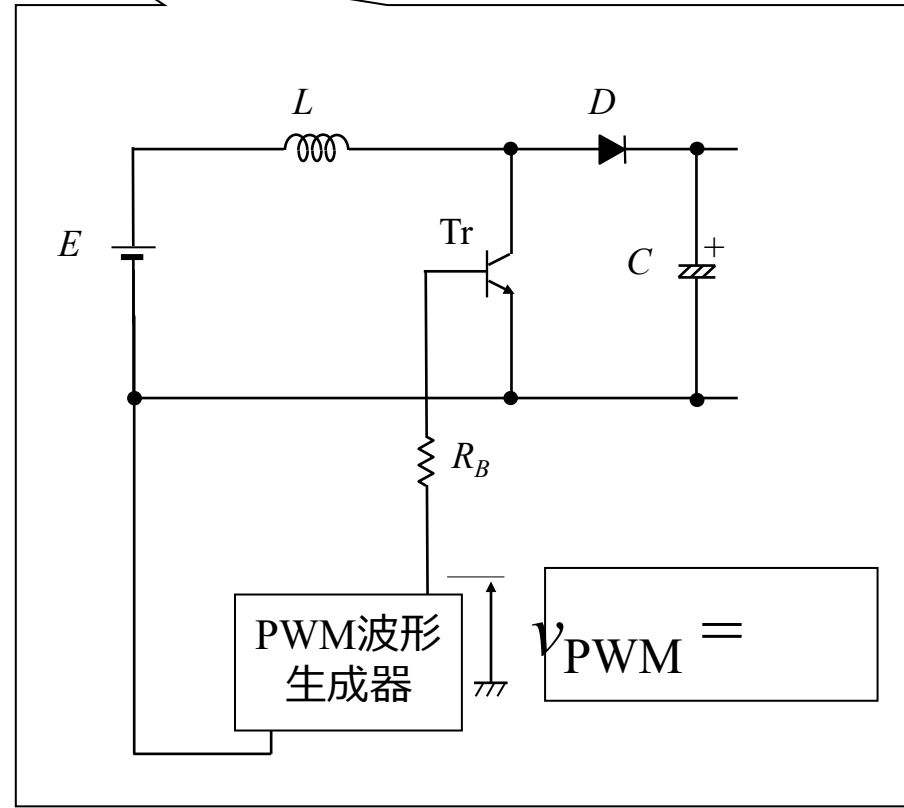
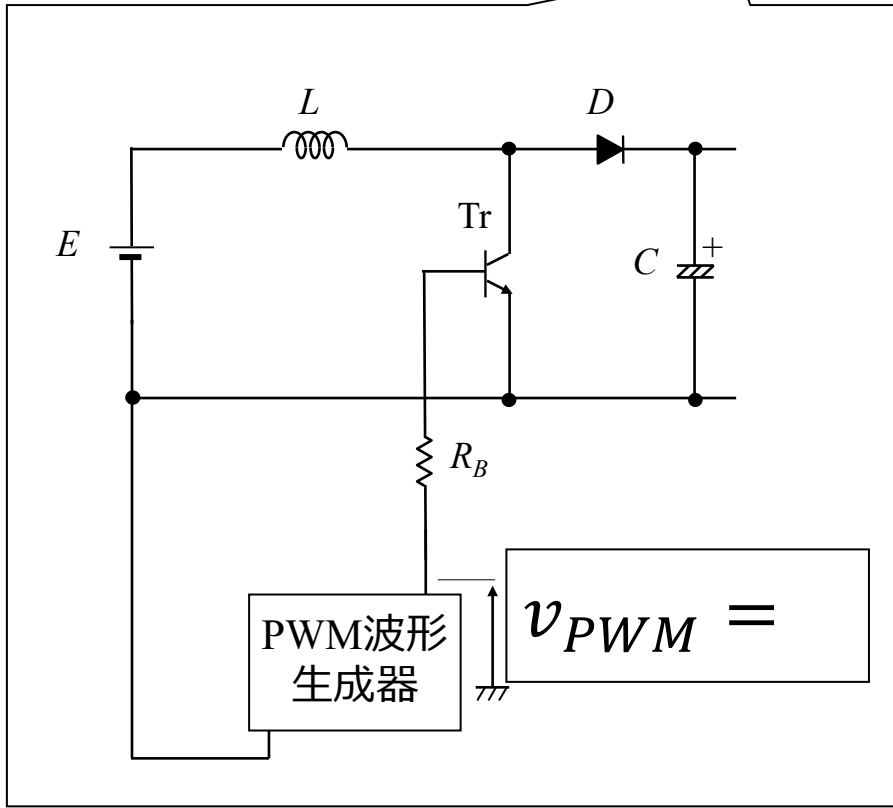
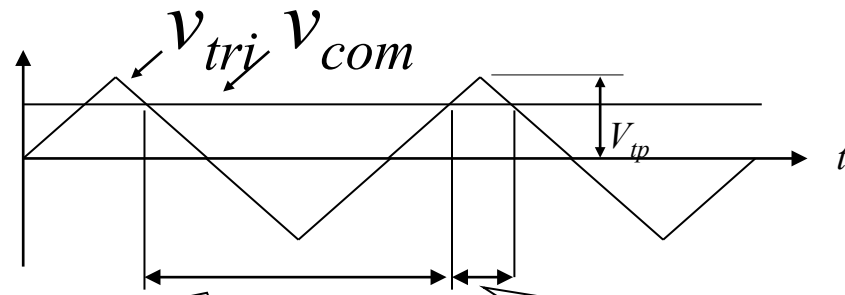


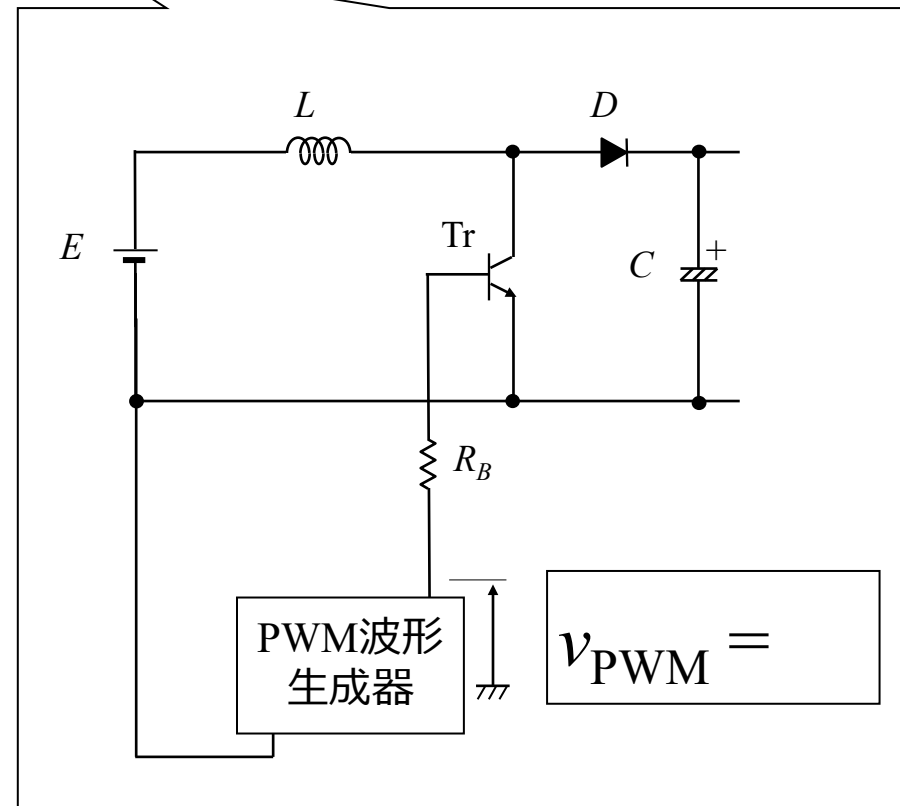
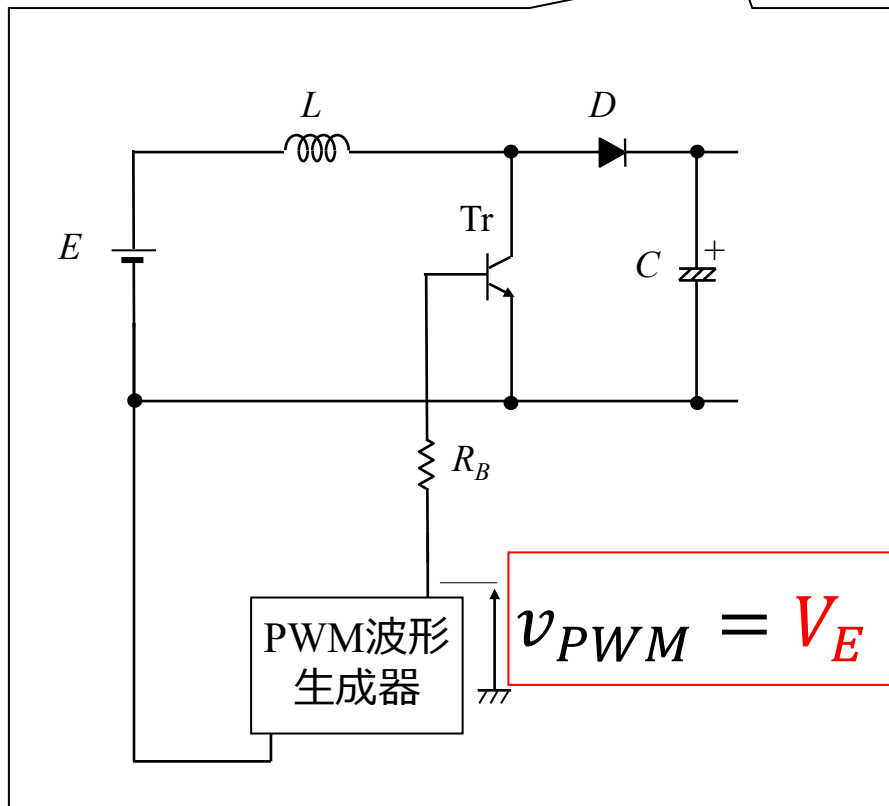
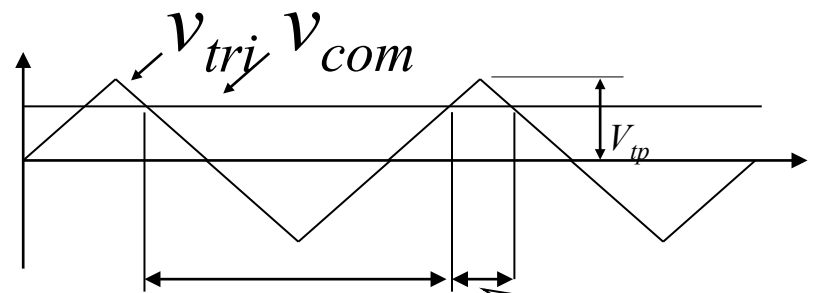
図4.23 PWM制御法



(a) $v_{PWM} =$, Tr オン

(b) $v_{PWM} =$, Tr オフ

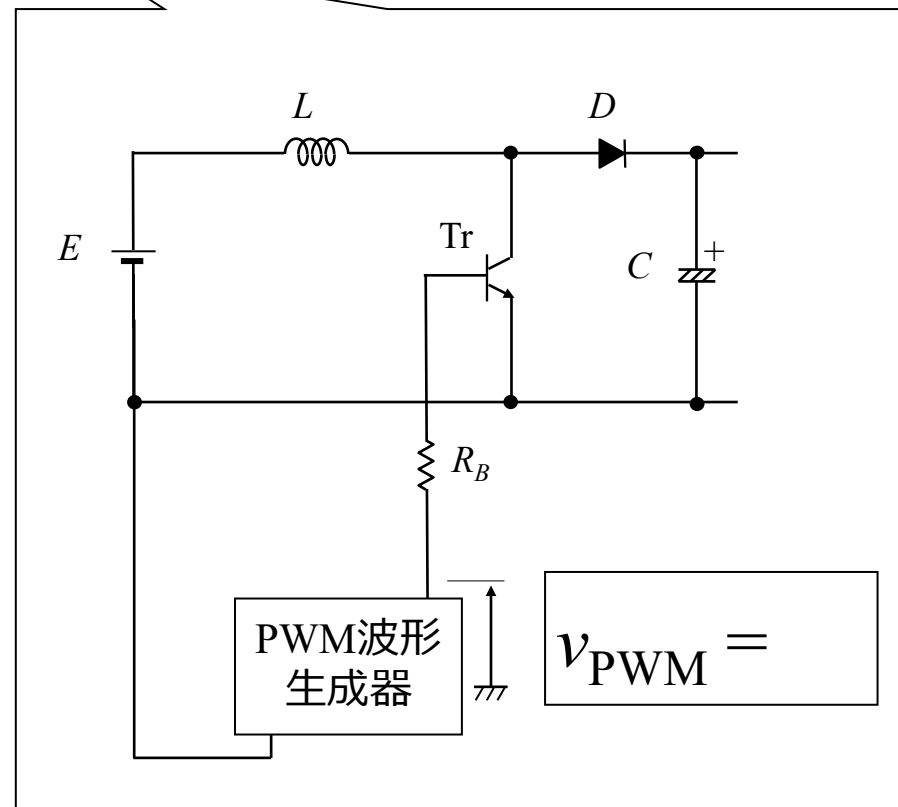
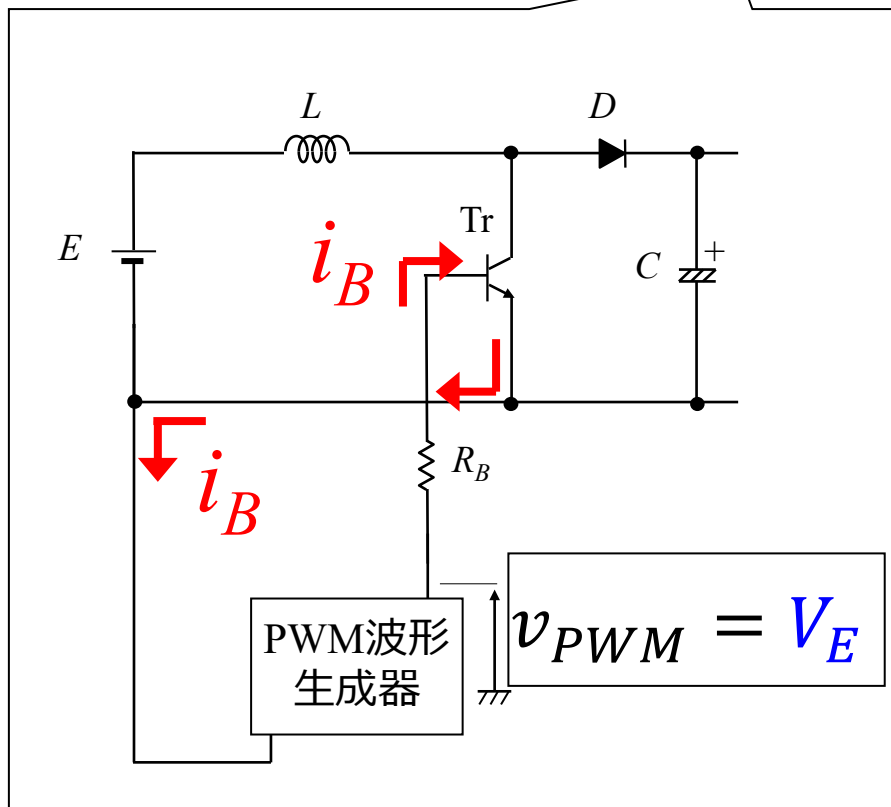
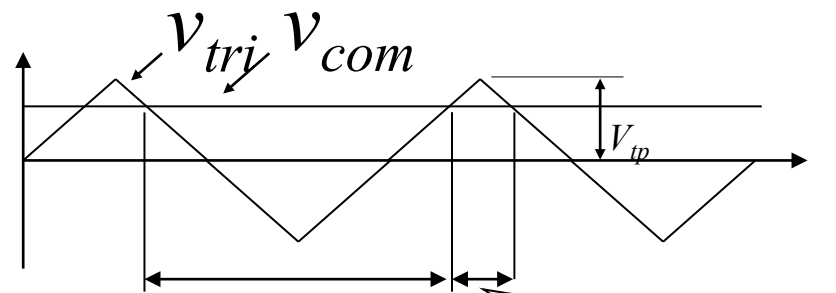
昇圧チョッパ回路のトランジスタのベース電流経路



(a) $v_{PWM} = V_E$, Tr オン

(b) $v_{PWM} = 0$, Tr オフ

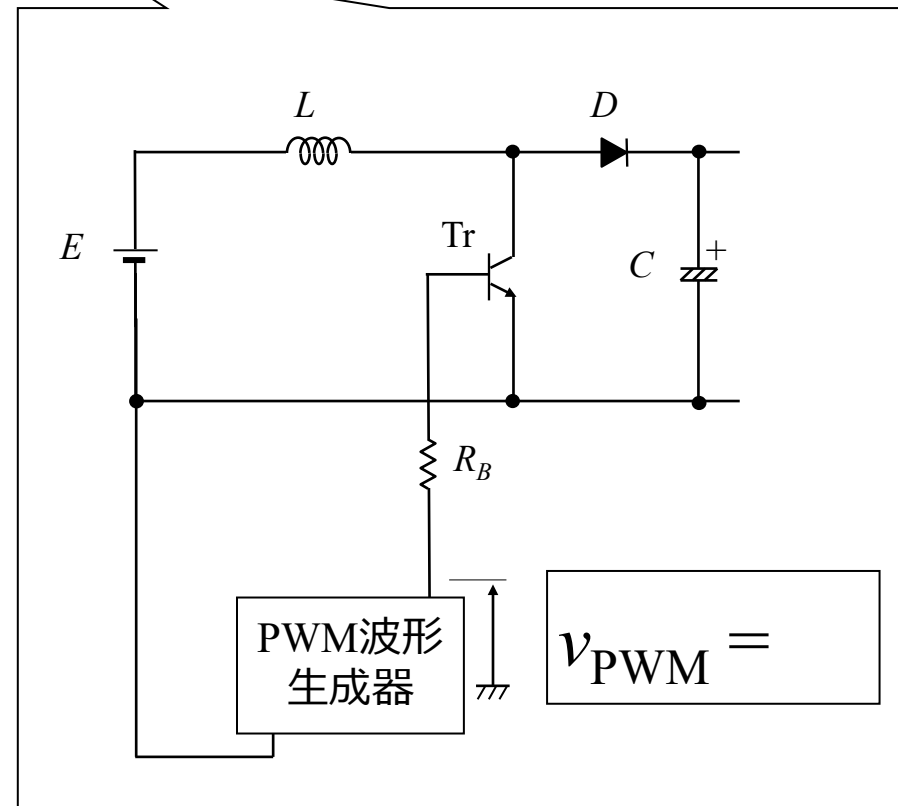
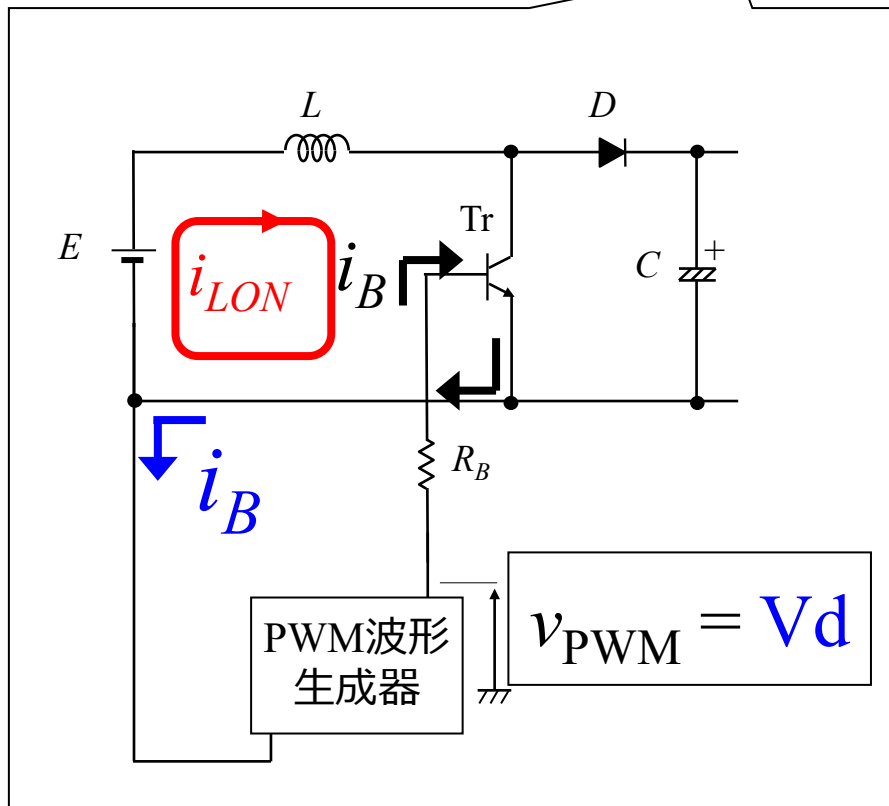
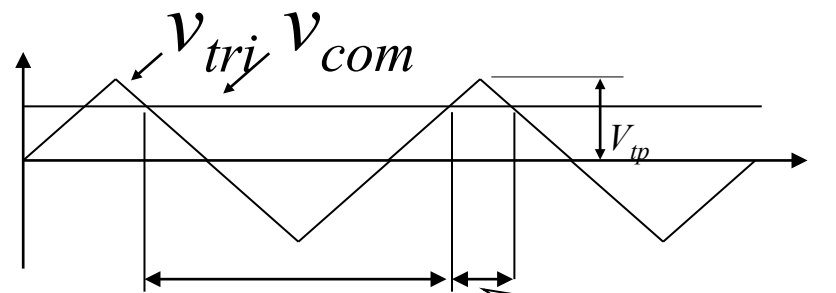
昇圧チョッパ回路のトランジスタのベース電流経路



(a) $v_{PWM} = V_E$, Tr オン

(b) $v_{PWM} = 0$, Tr オフ

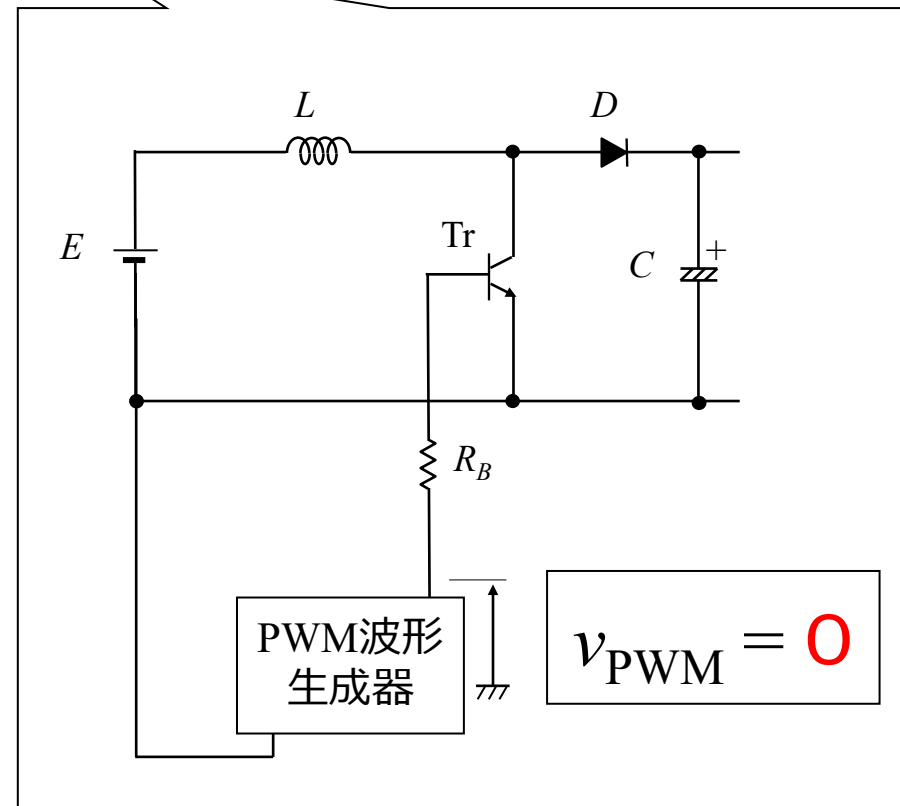
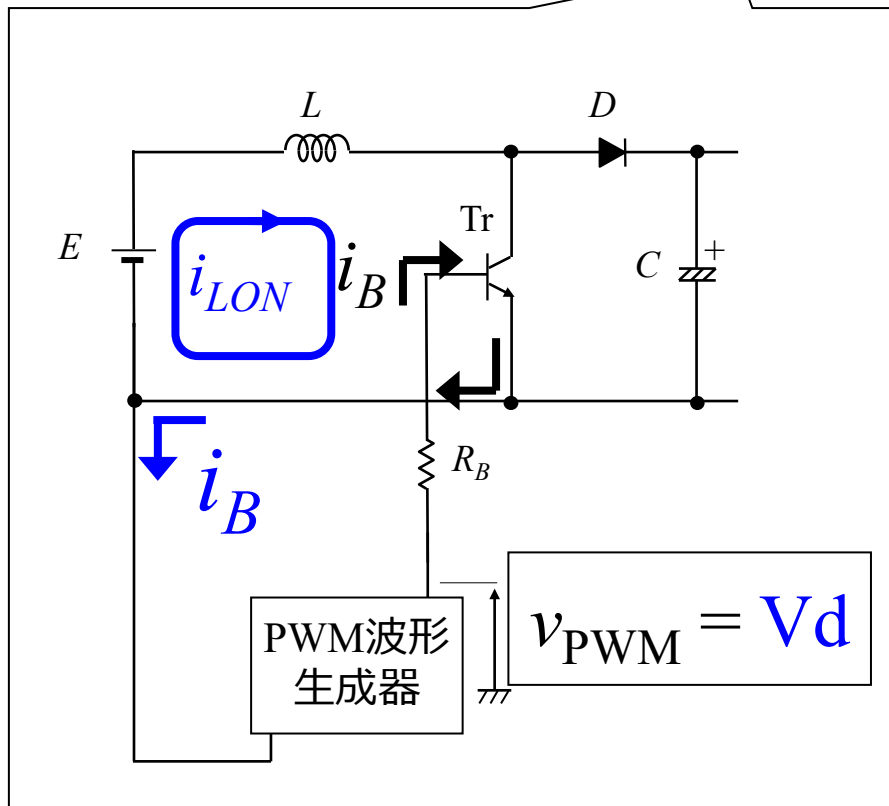
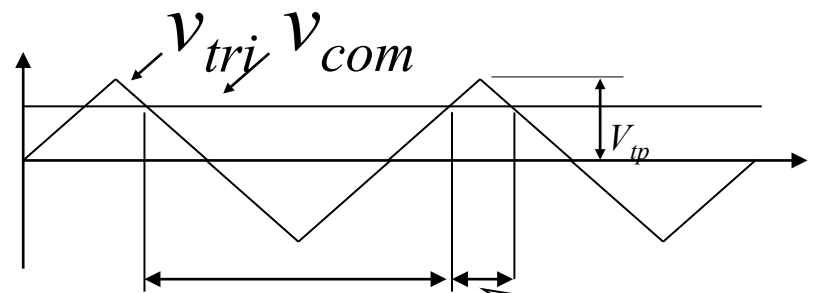
昇圧チョッパ回路のトランジスタのベース電流経路



(a) $v_{PWM} = Vd$, Tr オン

(b) $v_{PWM} = 0$, Tr オフ

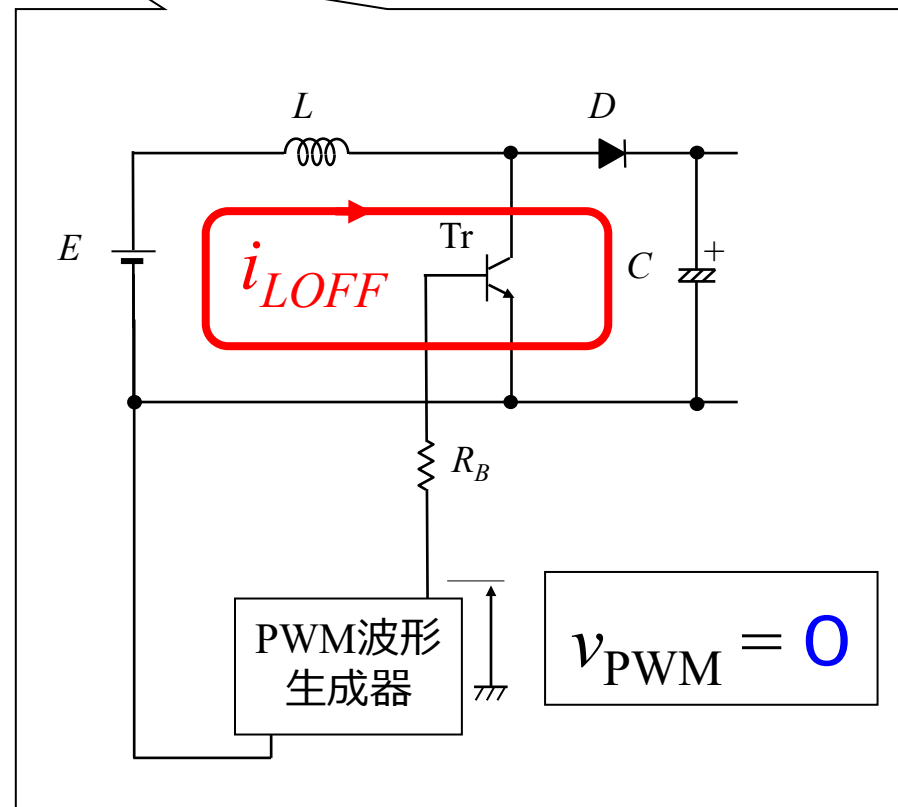
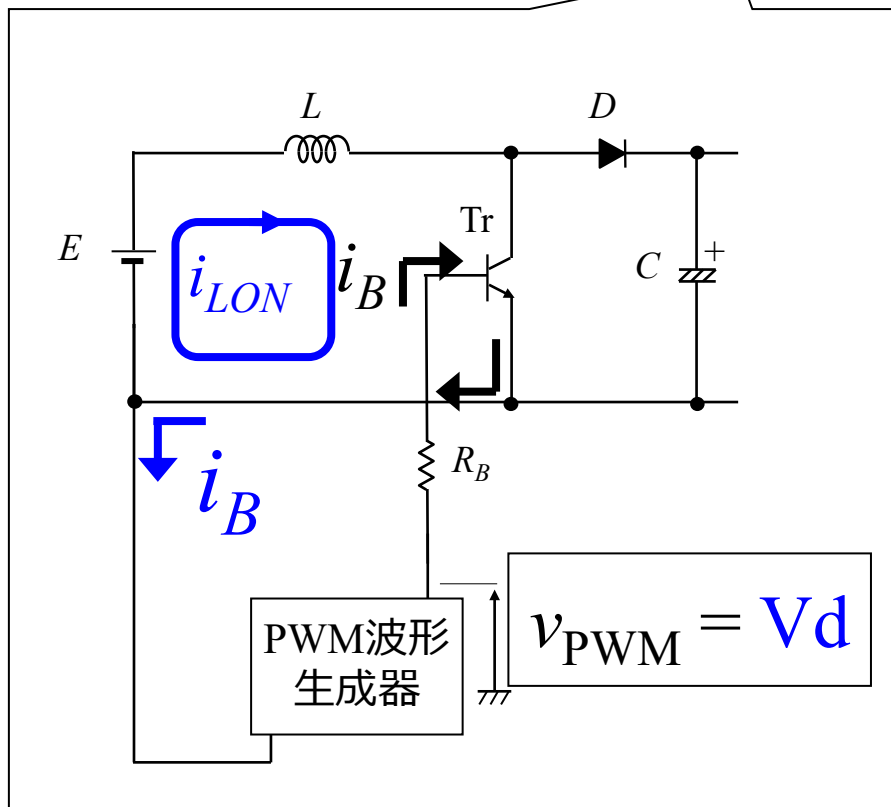
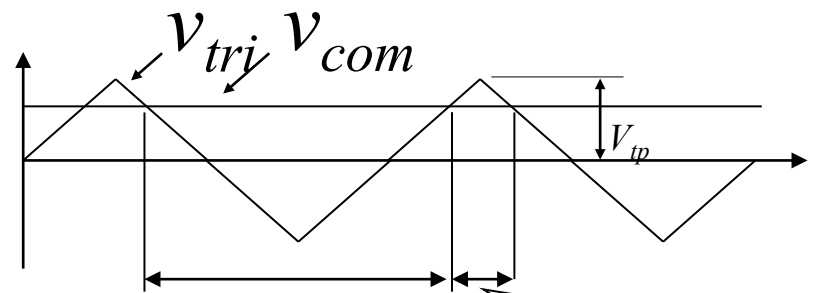
昇圧チョッパ回路のトランジスタのベース電流経路



(a) $v_{PWM} = Vd$, Tr オン

(b) $v_{PWM} = 0$, Tr オフ

昇圧チョッパ回路のトランジスタのベース電流経路



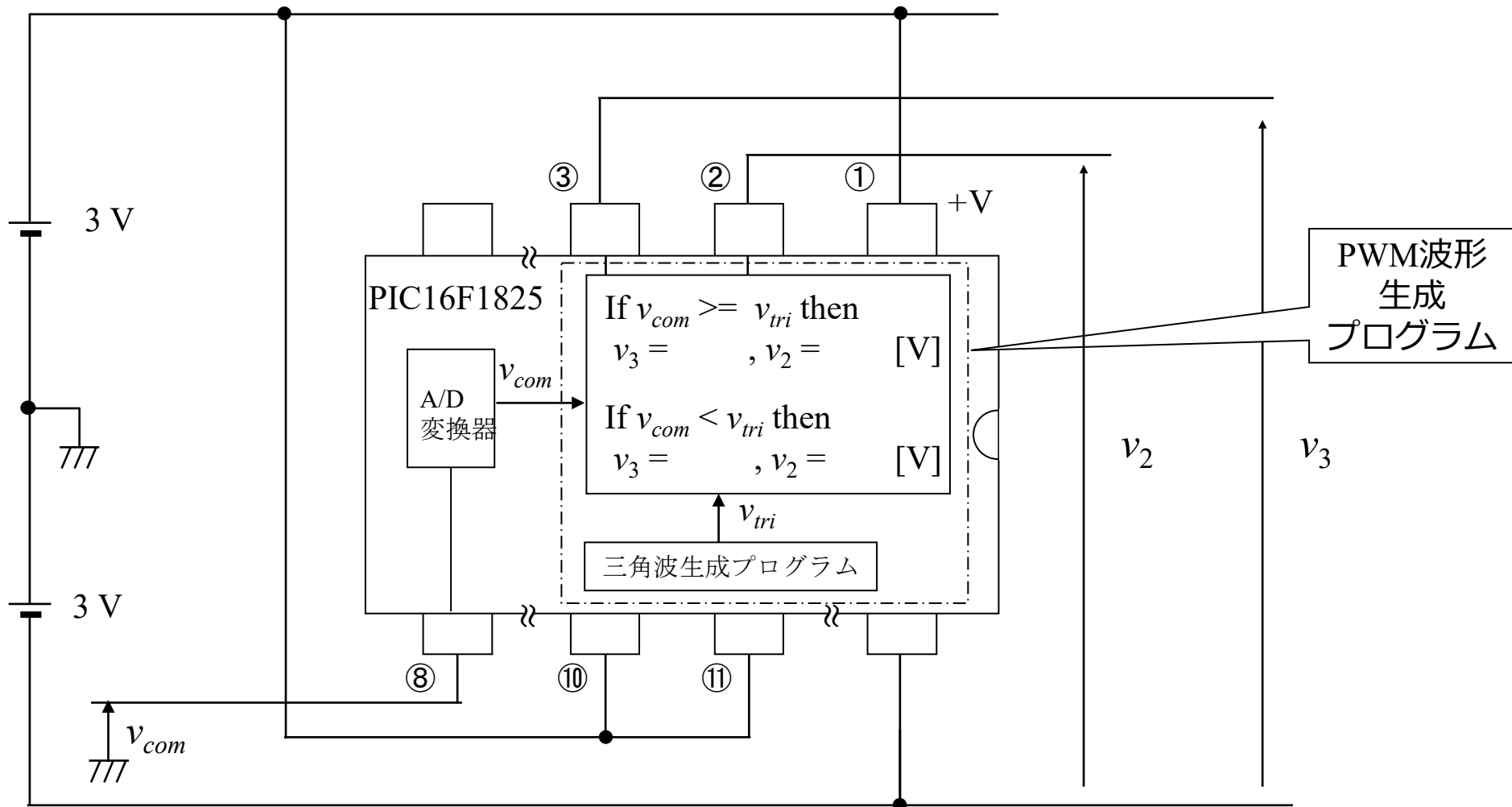
(a) $v_{PWM} = Vd$, Tr オン

(b) $v_{PWM} = 0$, Tr オフ

昇圧チョッパ回路のトランジスタのベース電流経路

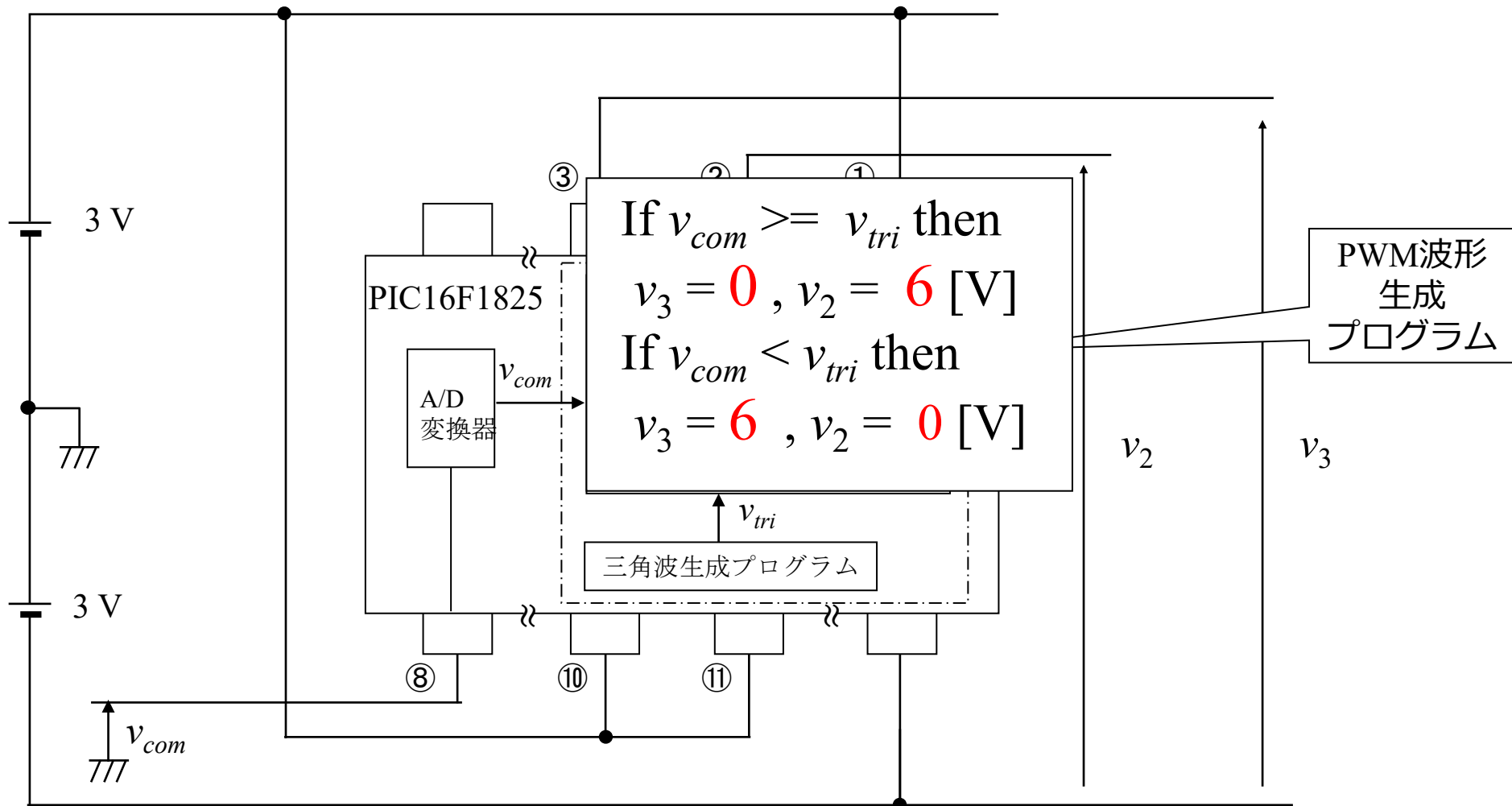
マイコンの中身

(図は ⑩⑪ = 11 : $f_{\text{PWM}} = 32\text{kHz}$)

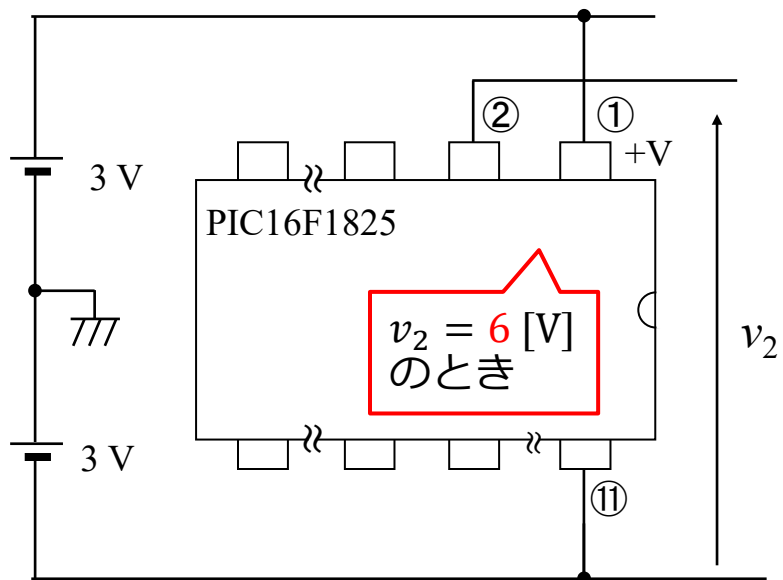


マイコンの中身

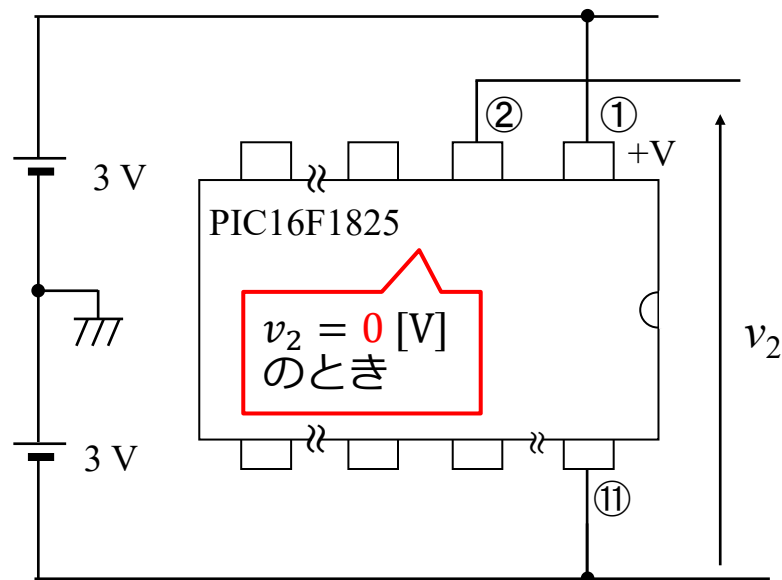
(図は ⑩⑪ = 11 : $f_{\text{PWM}} = 32\text{kHz}$)



マイコンの中身 (続き)

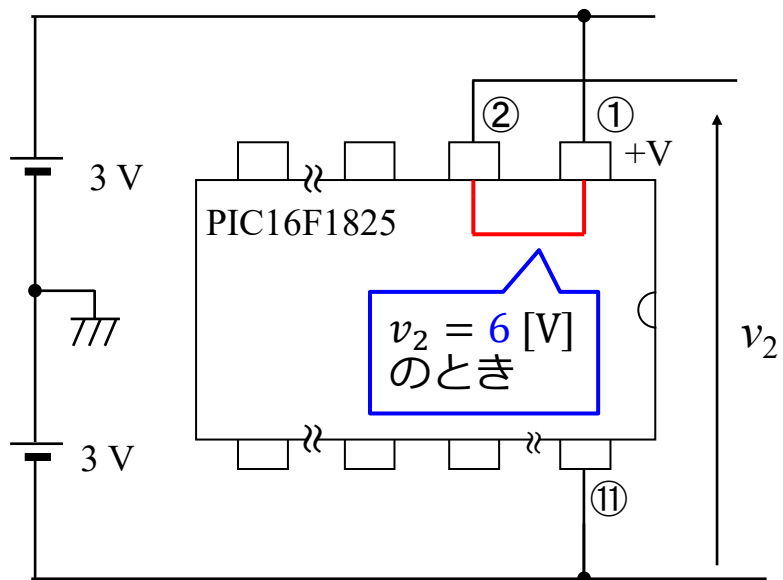


(a) $v_2 = 6 [V]$ のときの内部接続

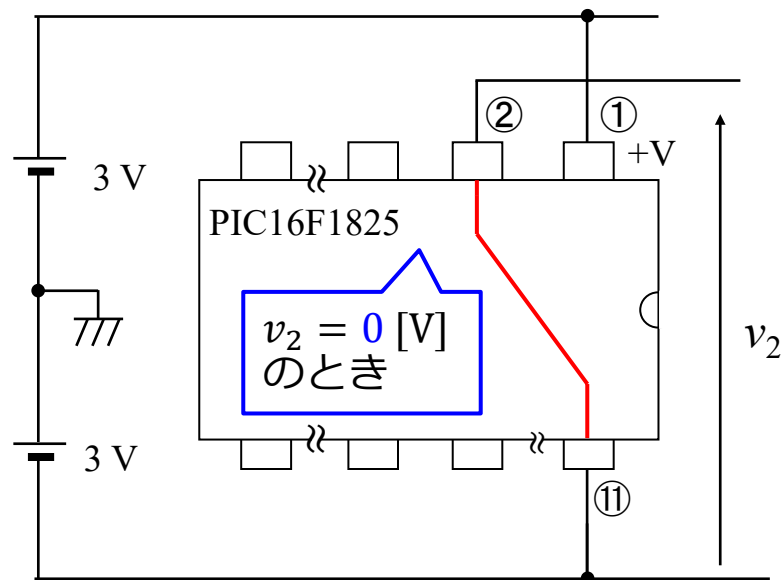


(b) $v_2 = 0 [V]$ のときの内部接続

マイコンの中身 (続き)

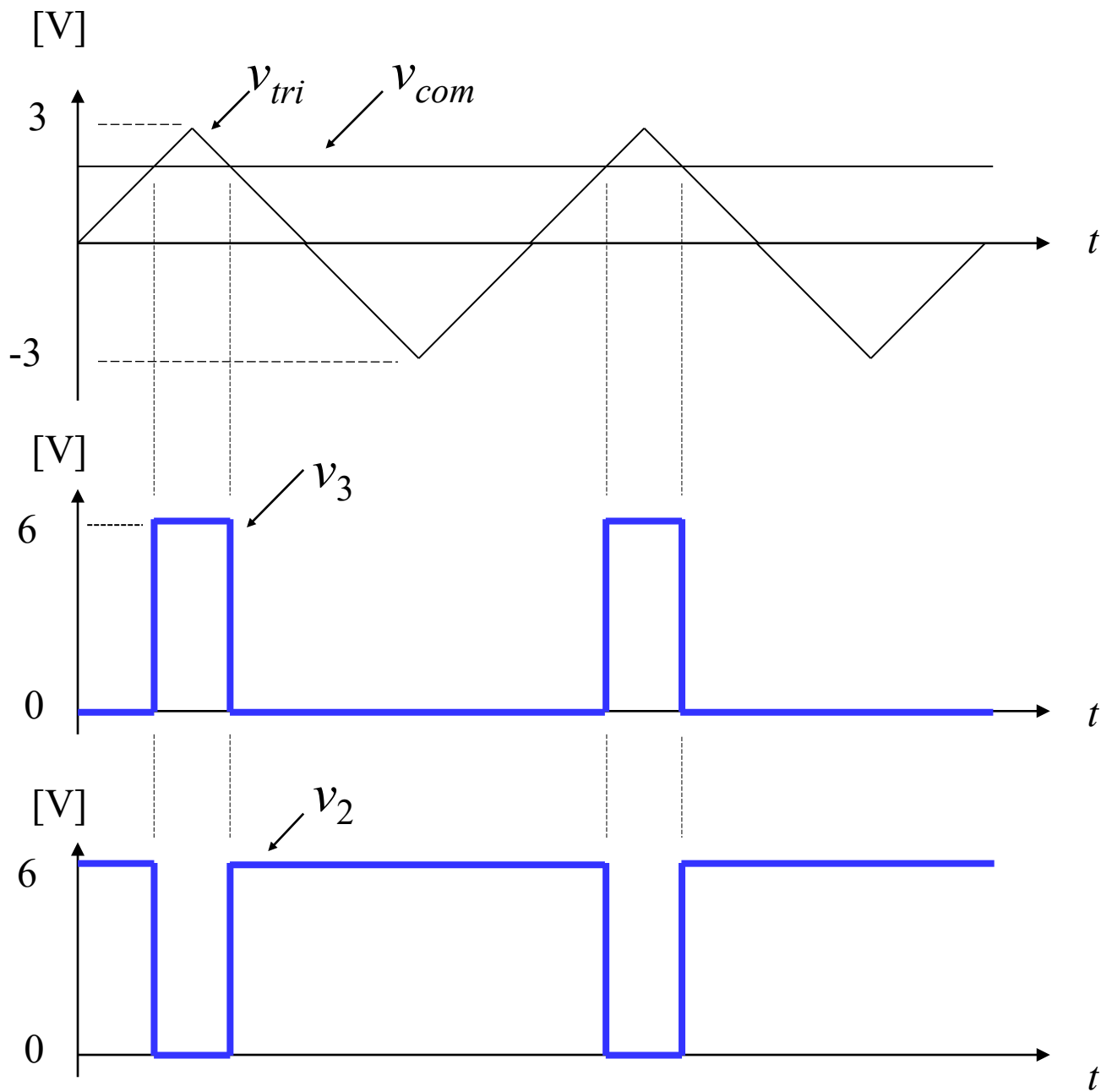


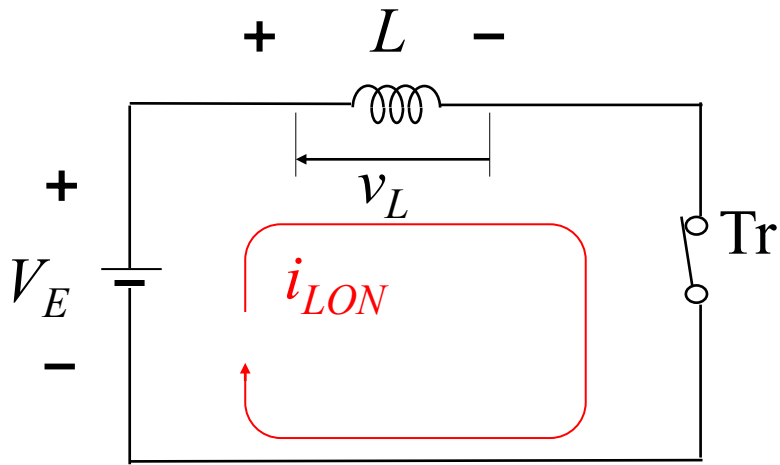
(a) $v_2 = 6$ [V] のときの内部接続



(b) $v_2 = 0$ [V] のときの内部接続

③, ②の出力電圧



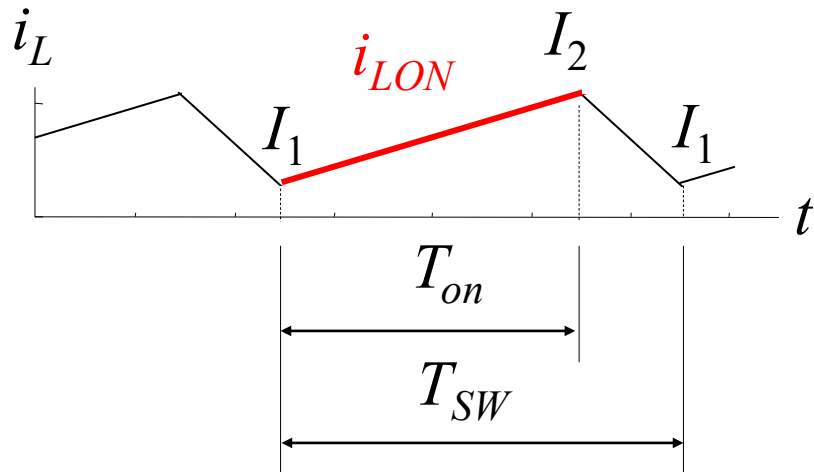


(a) Tr ON

$$v_L = V_E$$

$$v_L = L \frac{di_{LON}}{dt}$$

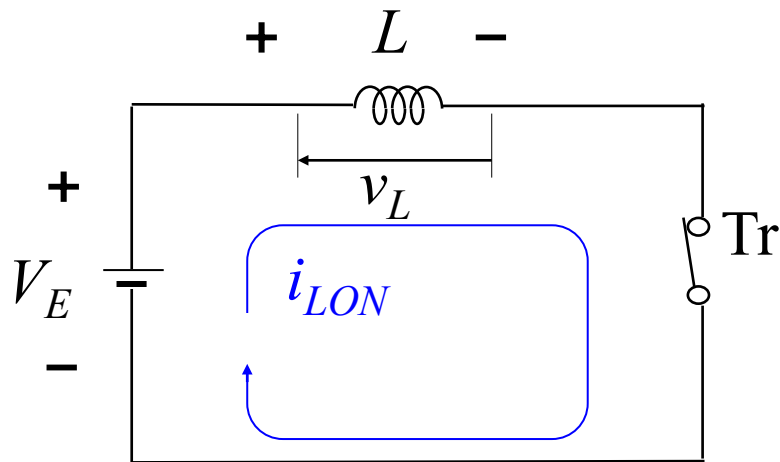
$$i_{LON} = \int_0^t \frac{V_L}{L} dt + I_1$$



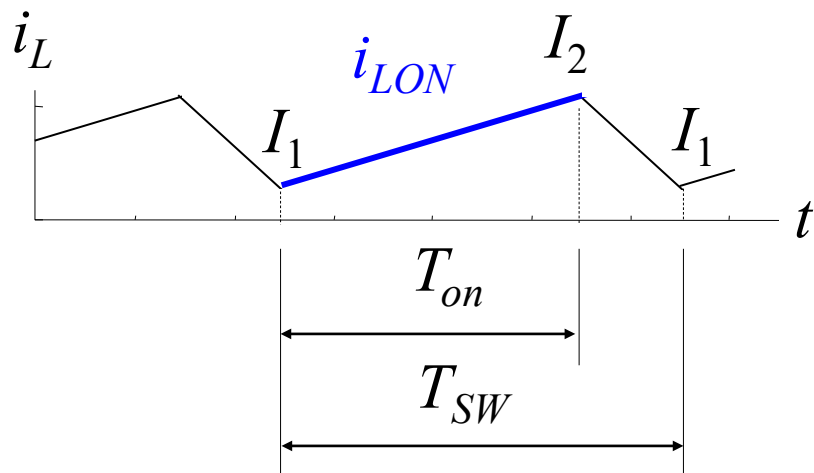
$$=$$

$$I_2 =$$

図5.7 インダクタを流れる電流

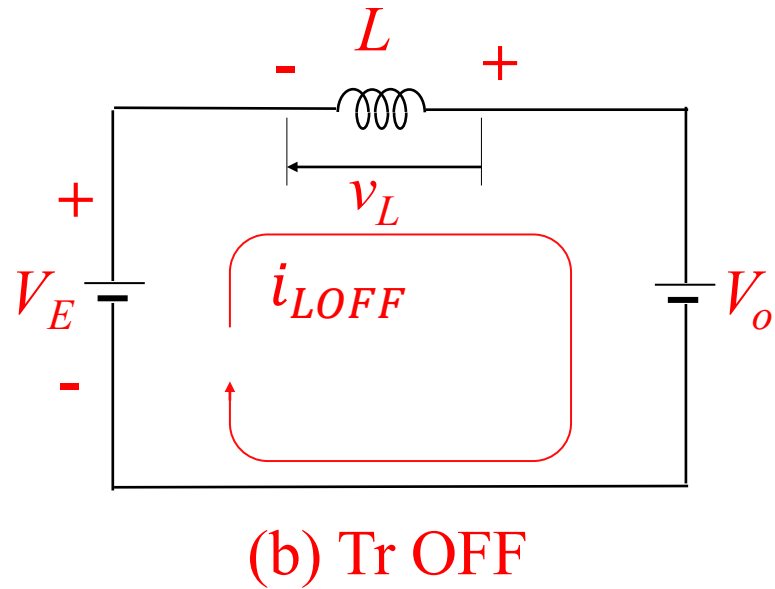


(a) Tr ON



$$\begin{aligned}
 v_L &= V_E \\
 v_L &= L \frac{di_{LON}}{dt} \\
 i_{LON} &= \int_0^t \frac{V_L}{L} dt + I_1 \\
 &= \frac{V_L}{L} t + I_1 \\
 I_2 &= \frac{V_L}{L} T_{on} + I_1 \\
 &= \frac{V_L}{L} \delta T_{SW} + I_1
 \end{aligned}$$

図5.7 インダクタを流れる電流

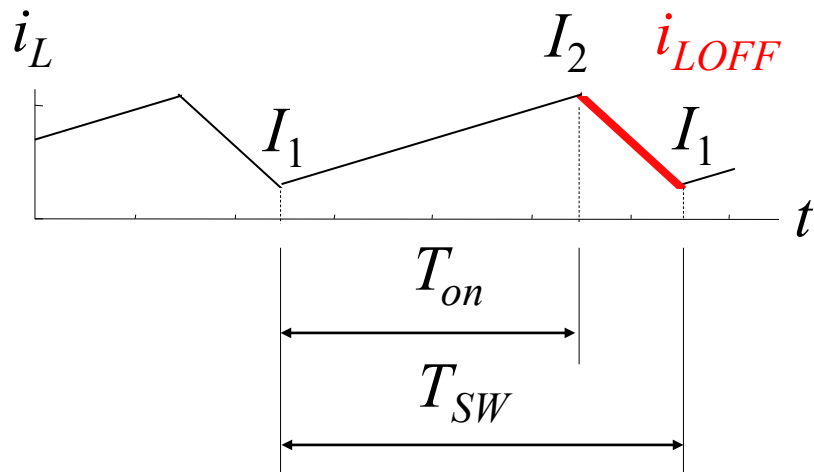


$$v_L = V_E - V_O$$

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

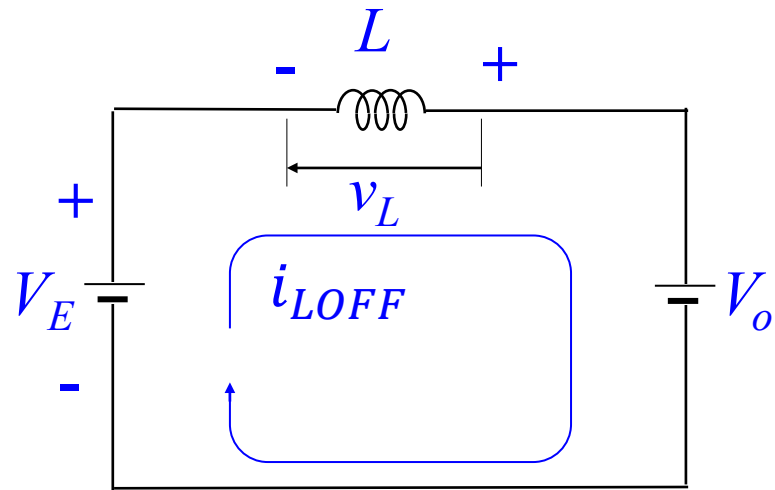
$$i_{LOFF} = \int_{T_{on}}^t \frac{V_E - V_O}{L} dt + I_2$$

$$=$$



$$I_1 =$$

図5.7 インダクタを流れる電流



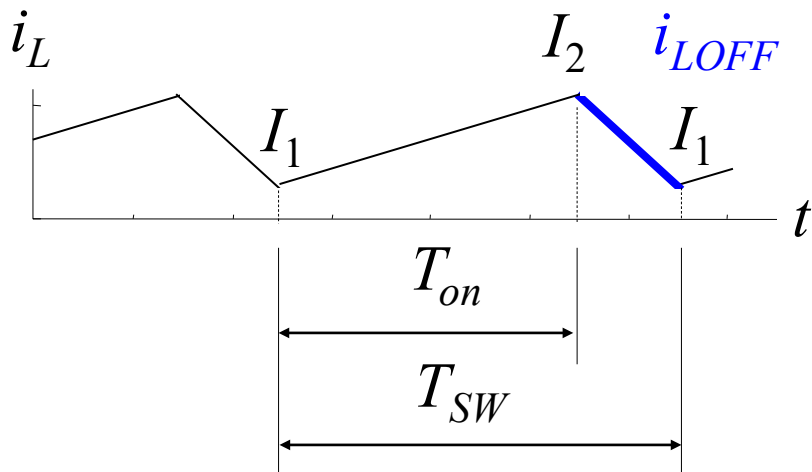
(b) Tr OFF

$$v_L = V_E - V_O$$

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

$$i_{LOFF} = \int_{T_{on}}^t \frac{V_E - V_O}{L} dt + I_2$$

$$= \frac{V_E - V_O}{L} (t - T_{on}) + I_2$$

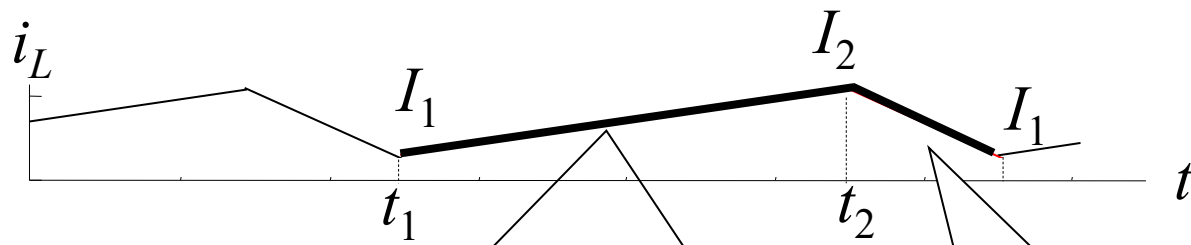


$$I_1$$

$$= \frac{V_E - V_O}{L} (T_{SW} - T_{on}) + I_2$$

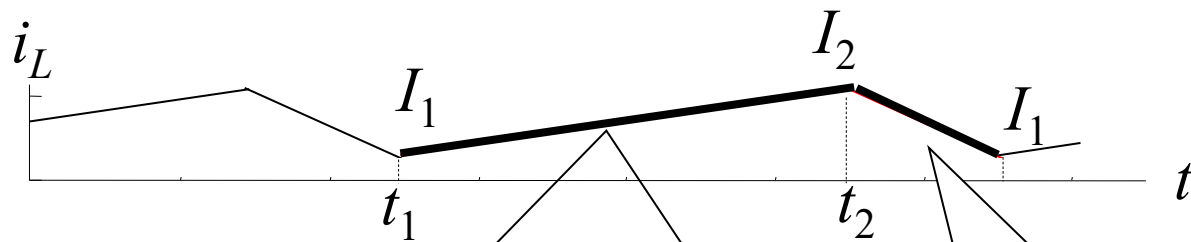
$$= \frac{V_E - V_O}{L} T_{SW} (1 - \delta) + I_2$$

図5.7 インダクタを流れる電流



$$\Delta I_L = I_2 - I_1 = \frac{V_E}{L} \delta T_{SW} \quad (5.6)$$

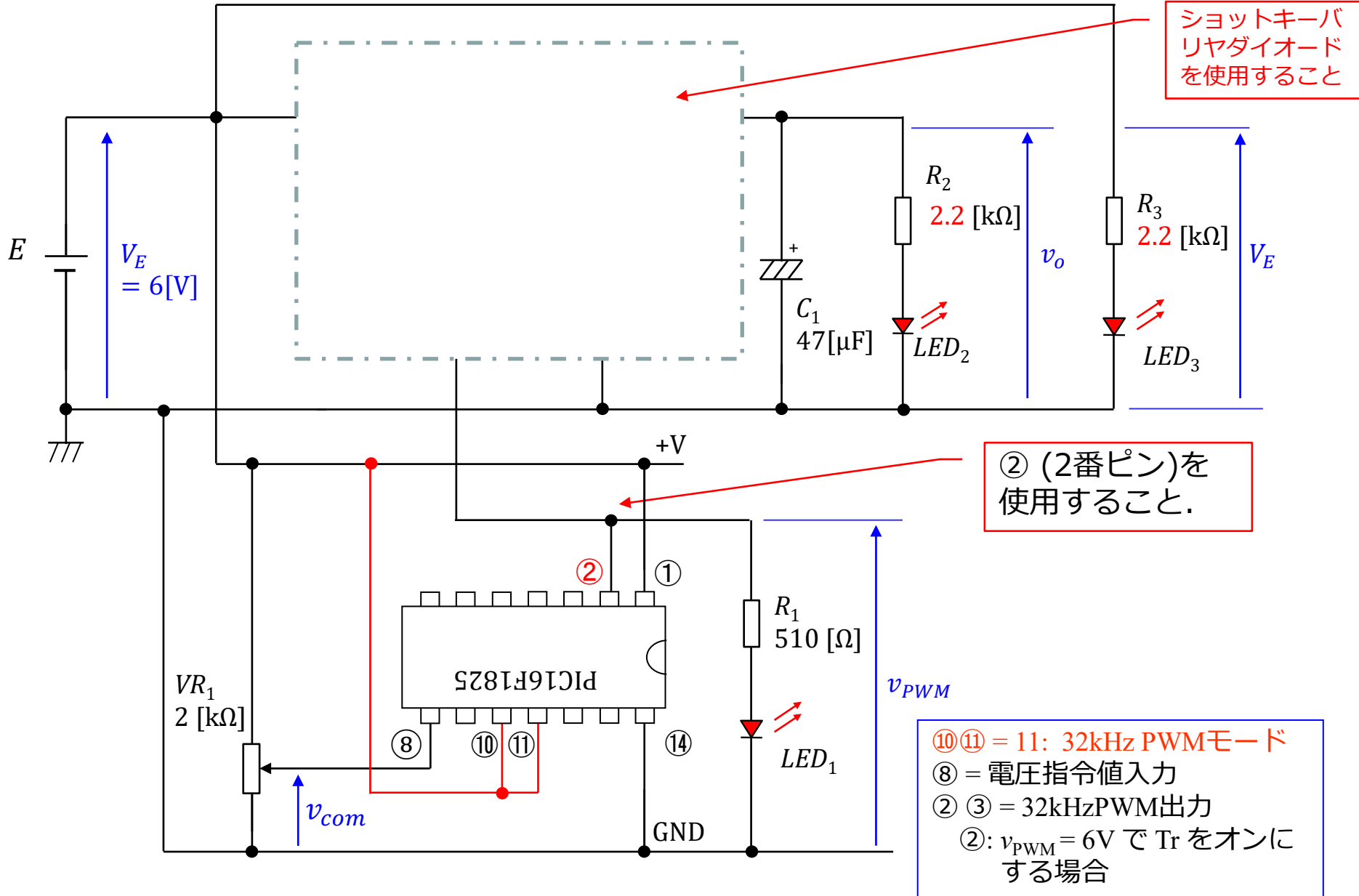
$$\Delta I_L = I_2 - I_1 = -\frac{V_E - V_o}{L} T_{SW} (1 - \delta) \quad (5.7)$$



$$\Delta I_L = I_2 - I_1 = \frac{V_E}{L} \delta T_{SW} \quad (5.6)$$

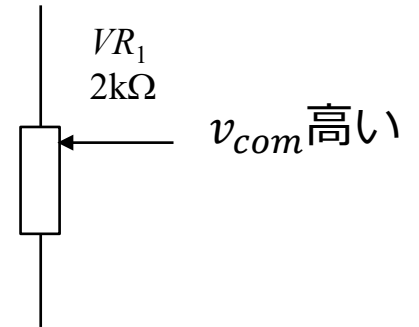
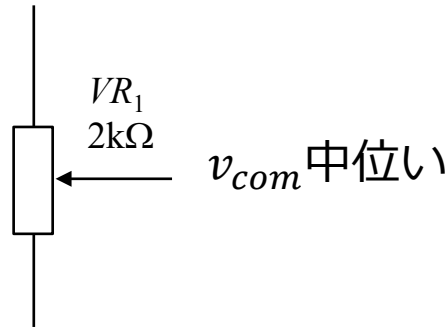
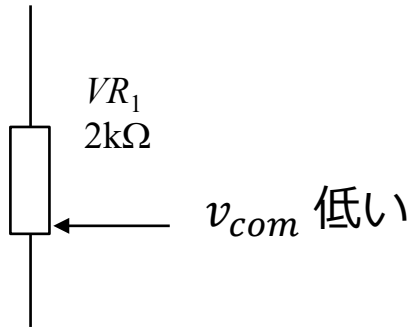
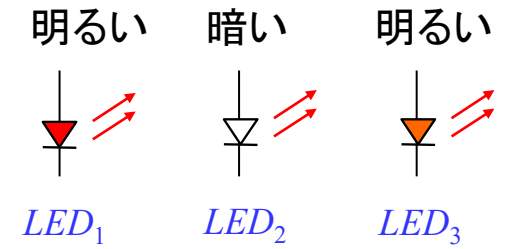
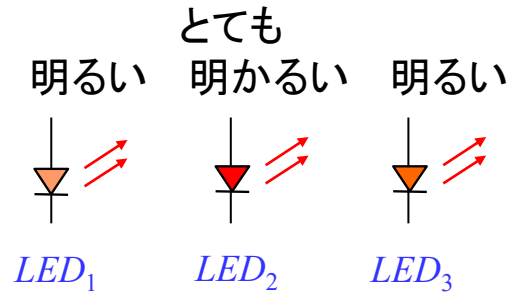
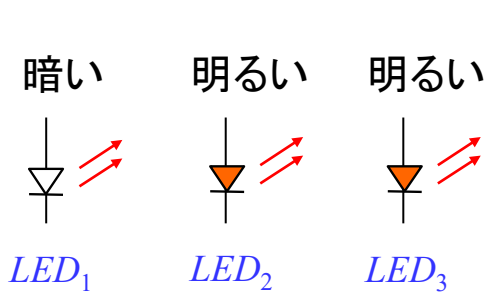
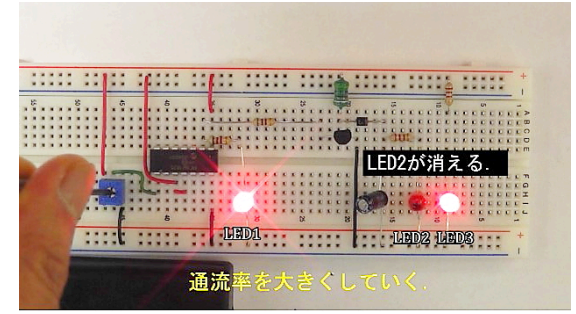
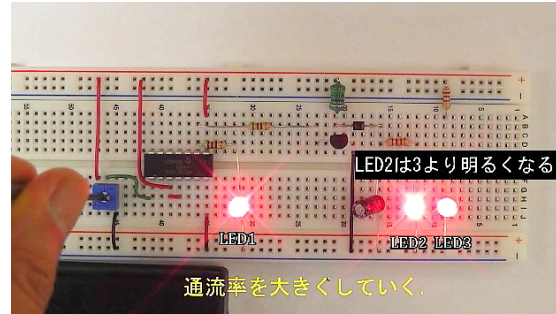
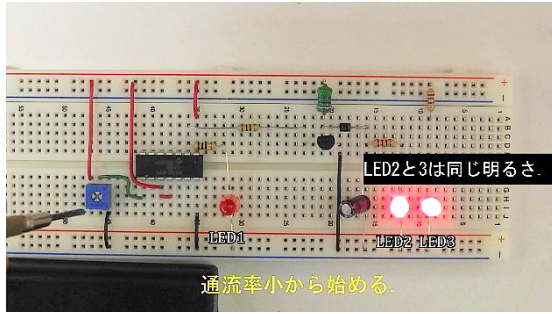
$$V_o = \frac{1}{1 - \delta} V_E \quad 0 \leq \delta < 1 \quad (5.8)$$

製作課題 STEP5 出力電圧 $v_o > 6$ [V]であるチョッパ回路を設計・製作せよ。
 チョッパ回路の動作を観察し，その動作の起きる理由をTAに説明せよ。



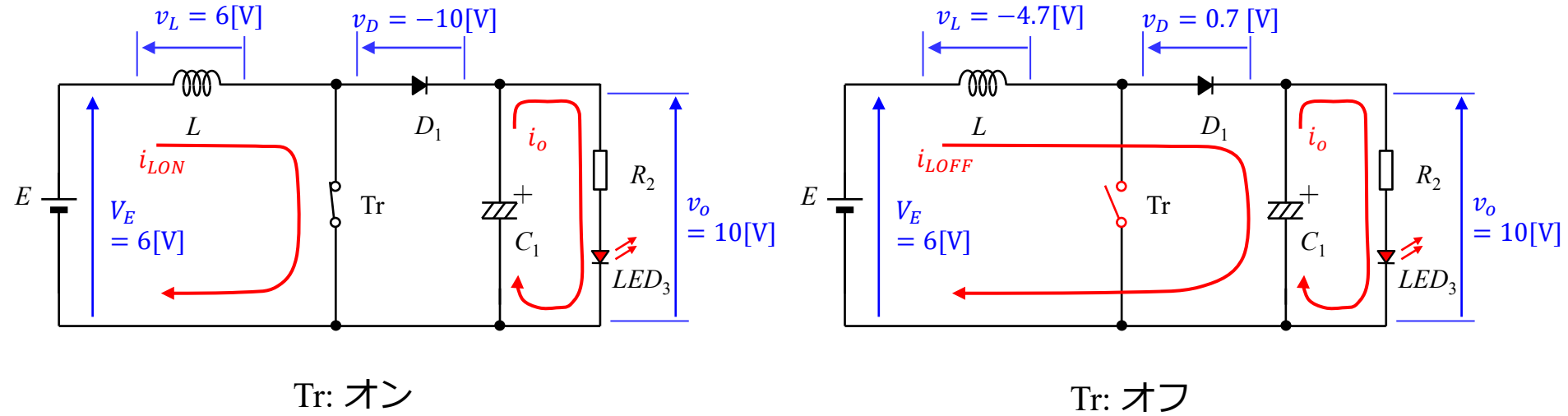
ビデオ

http://mybook-pub-site.sakura.ne.jp/Power_Electronics_Note/Exercise5/Exercise5.mp4



レポート課題 step5 (1)

(a)昇圧チョッパ回路においてトランジスタTrオン時とオフ時のエネルギーの流れを図示せよ.



レポート課題 step5 (2)

昇圧チョッパ回路において通流率 $\delta=2/3$ のときの指令電圧 v_{com} , トランジスタ駆動電圧 v_{PWM} , ダイオード両端電圧 v_D , コイル両端電圧 v_L , コイル電流 i_L , ダイオード電流 i_D , 出力電流 i_o の各波形を求めよ. ただし, 電源電圧 $V_E = 6$ [V], 三角波電圧のピーク値 $V_{tp} = 3$ [v], 出力抵抗 $R = 20$ [Ω], コイルのインダクタンス $L_a = 400$ [μ H], スイッチング周期 $T_{sw} = 50$ [μ s] (スイッチング周波数 $f_{sw} = 20$ [kHz]) とする. ただし, コンデンサ C_2 の静電容量は出力電圧が直流であると見なせるに十分な大きさであり, 回路内の損失は無視できるものとする.

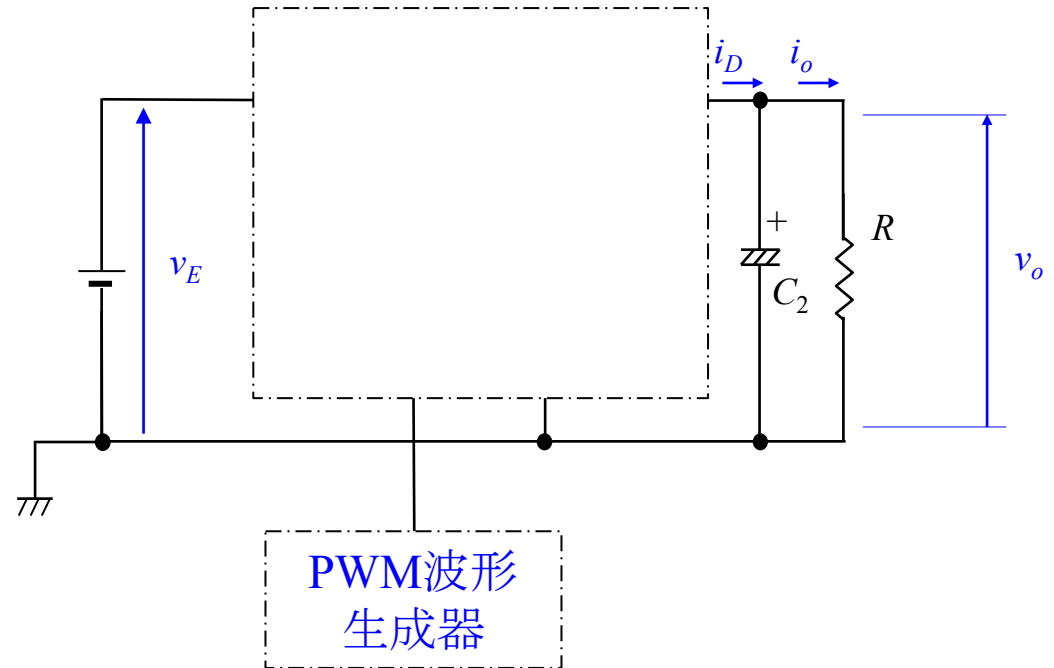
ヒント

テキストの図5.3, 図5.5,
p. 69, 70の各式参照

v_o を求める. $\rightarrow i_o$ を求める.
 $\rightarrow \bar{i}_L$ を求める.

また, (5.6)式から ΔI を求める.

図5.5を参考に v_{com} , v_{PWM} , v_{tri} , v_L ,
 i_L , v_o , i_o の波形を描く. v_D , i_D の
波形はがんばって考えて描く.



レポート課題 STEP5(3)

昇圧チョッパ回路において, Trオン時とオフ時のベース電流 i_B の経路をマイコン内も含めて示せ.