H29年度 群馬大学　電源講義資料

スイッチング電源の基礎講義

2017.6.05

客員教授　　小堀 康功

目　次

１．スイッチング電源の基礎

1-1　インダクタの動作

1-2　基本3方式の概要

1-3　スイッチング電源の解析

２．ｼﾐｭﾚｰｼｮﾝによる動作性能確認

2-1　降圧形電源の動作検討

2-2　性能改善検討

2-2　昇圧形電源の動作と特徴

３．スイッチング電源の詳細検討

3-1　状態平均化法と状態方程式

3-2　降圧形電源の解析

3-3　昇圧形電源の解析

3-4 昇降圧形電源の解析

3-5 電源の諸特性解析（定常特性）

４．実装回路の作成に向けての注意

4-1　降圧形電源の作製

4-2　動作チェック＆性能改善

1. スイッチング電源の基礎

1-1　インダクタンス(コイル)の動作

(1) インダクタンスの働き

● **ファラディーの法則より（復習）**

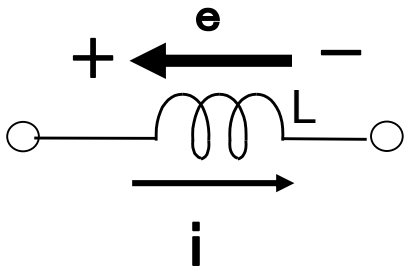
＊コイルの鎖交磁束φが時間的に変化すれば、
その変化を打ち消すような起電力ｅ　を生じる。

$$e = L \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad [V] \qquad (1\text{-}1)$$

＊コイル電流が変化すると、
その変化を打ち消すように起電力ｅが発生する

$$e = L \cdot \frac{di}{dt} \quad [V] \qquad (1\text{-}2)$$

符号：電圧の取り方に依存



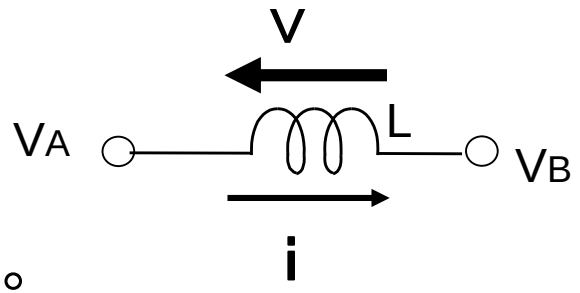
（２）インダクタンスの性質

＊電流連続の性質：

両端電圧が急激に変化しても、

コイル電流を維持するように流れる。

・コイル：電流連続 の法則



＊外部電圧によるコイル電流変化

$$V = (V_A - V_B) = L\frac{di}{dt} \qquad (1\text{-}3)$$

$$I(t) = I_0 + \frac{1}{L}\int V dt \qquad (1\text{-}4)$$

- 電流の変化方向と電圧
- V＞0 ならば、I は増加
- V＜0 ならば、I は減少

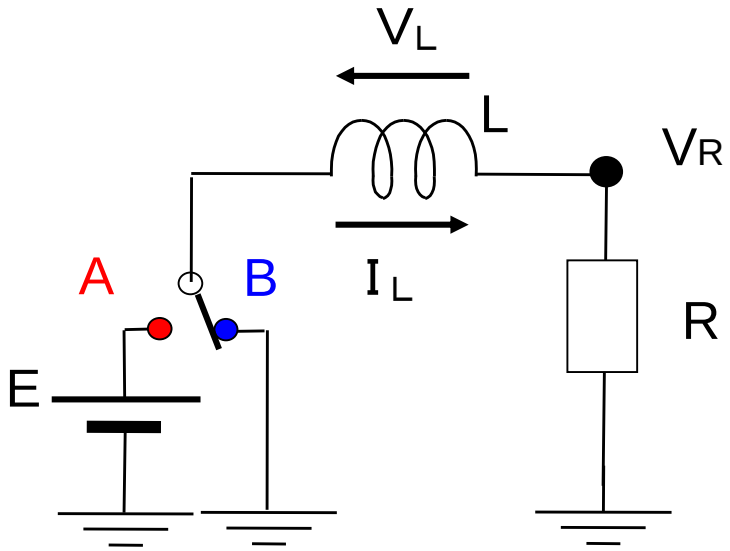
いずれ　反転する

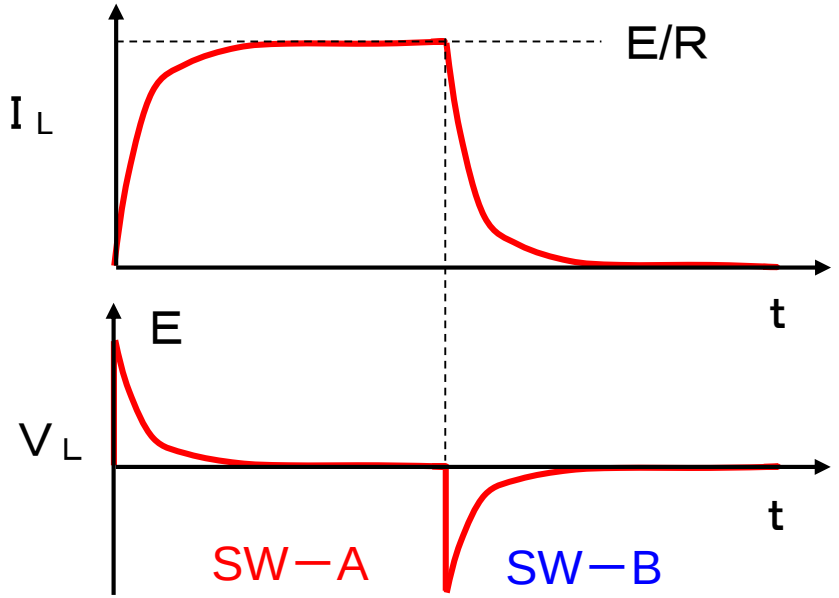
●ポイント：(1-3)より

$\Delta I = \Delta V / L$　：両端電位差に比例して流れる

ΔVの符号により、電流は増減方向に変化

(3)インダクタンスの電流と電圧の関係





SWを B ⇒ A ⇒ B と切換えると・・・
Lにエネルギーが蓄積し、放出される

蓄積：SW-A：$E - V_R(t) = L \cdot (di/dt) \Rightarrow \Delta I = (E - V_R) / L$ (1-6)

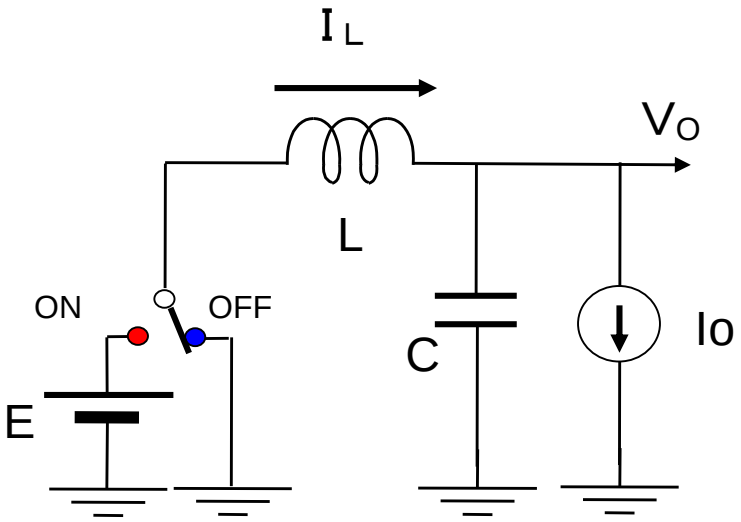
放出：SW-B：$0 - V_R(t) = L \cdot (di/dt) \Rightarrow \Delta I = -V_R / L$ (1-7)

(4)高速スイッチング時の動作

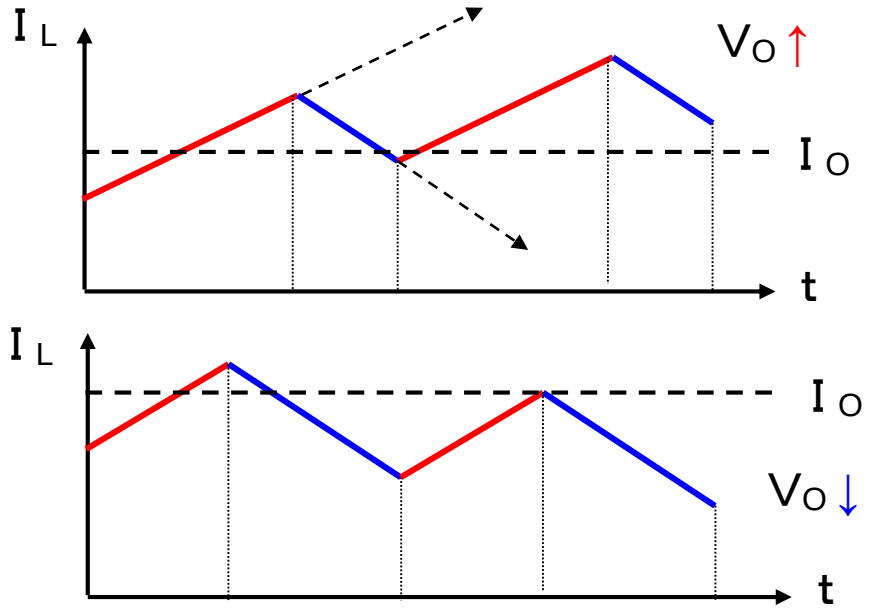
＊出力に容量 C（電池）をつけ、負荷を電流源 Io とする

＊高速でSWすると、電流は近似的に三角波状に変化

＊SWのON/OFF比率により、電流は増減 ⇒ 出力電圧Voも増減



降圧形電源の原理図



$(\triangle I_L/\triangle t)_{ON} = (E - Vo)/L$: 増加　(1−13)

$(\triangle I_L/\triangle t)_{OFF} = -Vo/L$: 減少　(1−14)

（5）昇降圧動作の原理

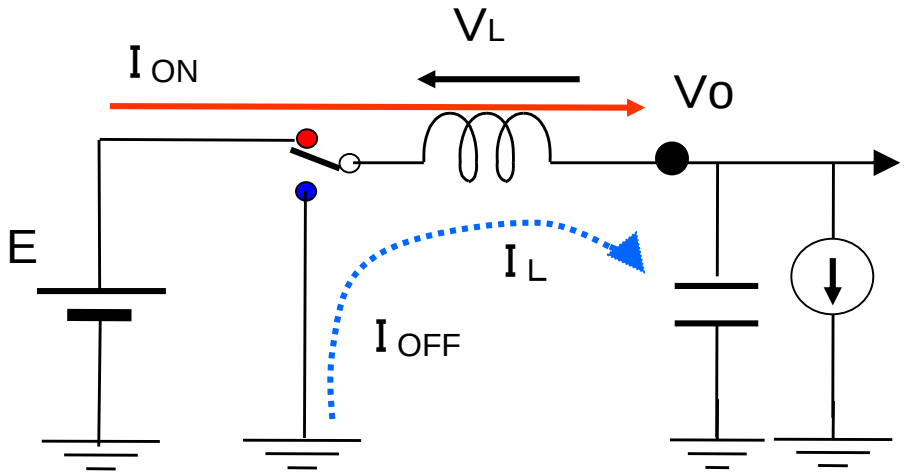
● 降圧動作（E＞Vo）

ON ：$V_L=(E-Vo)$、$di/dt=(E-Vo)/L$ ＞0

電源より、LとVo にエネルギ供給

OFF：$V_L=-Vo$、　$di/dt=-Vo/L$　＜0

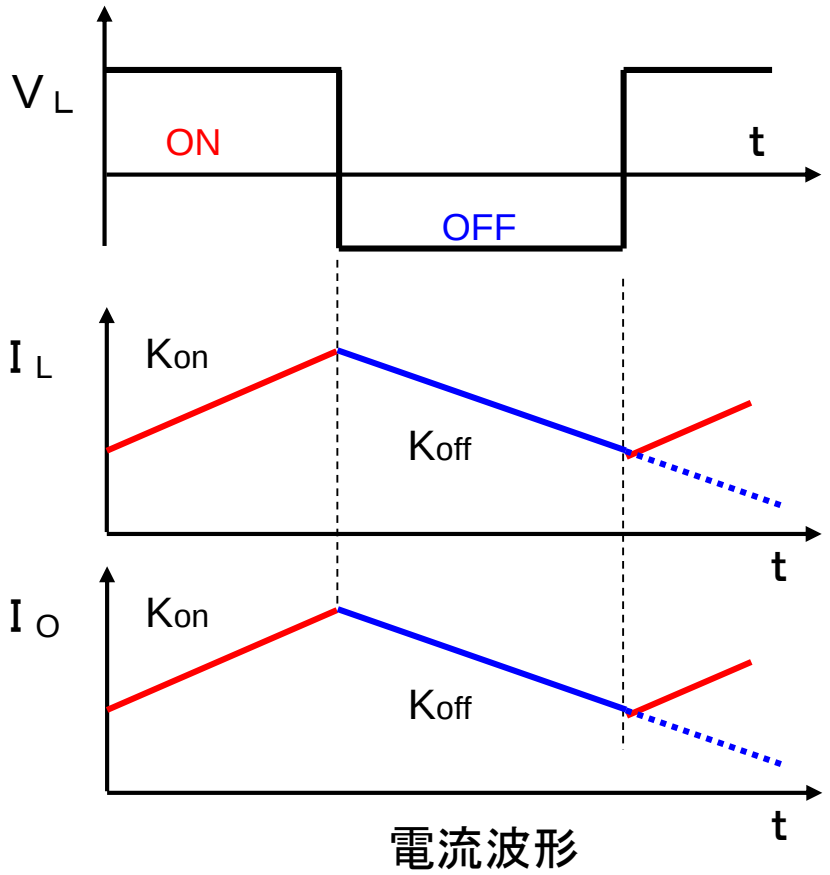
L よりエネルギをVoに放出（供給）



降圧動作の原理図

● コイル電圧が急変すると、
コイル電流の傾きが急変し、
電流I_L は連続的に変化

●出力平均電流 Io は、
コイル平均電流I_L と同じ



電流波形

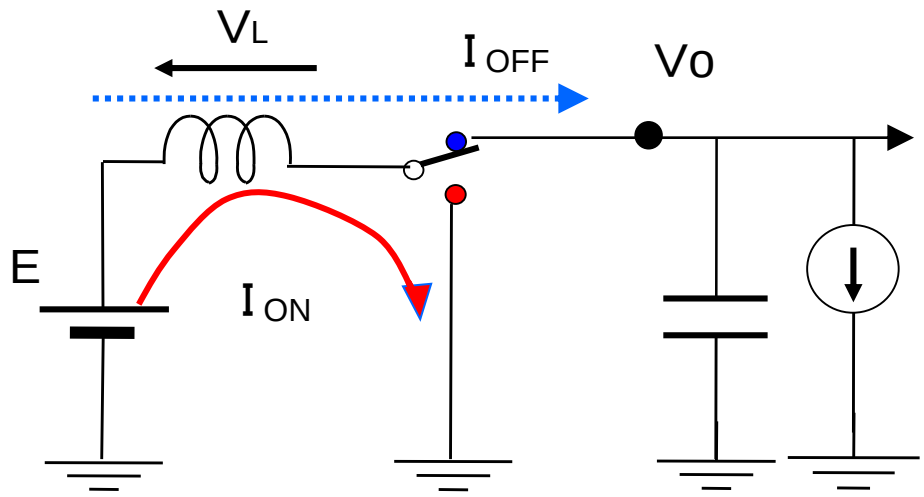
● 昇圧動作（E＜Vo）

ON　：V_L=E、　　di/dt=E/L　　＞0

電源より、L にエネルギ供給

OFF ：E=V_L+Vo、di/dt=－（Vo－E）/L　＜0

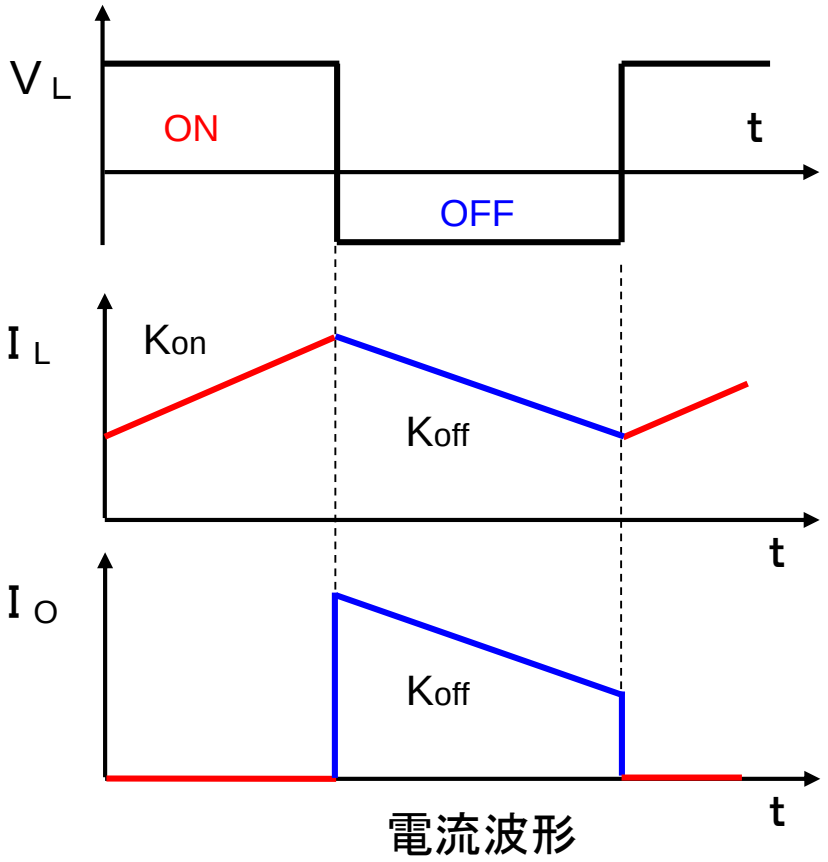
電源に上乗せして、L より、
Voにエネルギ供給



昇圧動作の原理図

● コイル電流I_L は連続的に変化

●出力電流 Io は、OFF 時のみ
コンデンサの電流リプル大きい



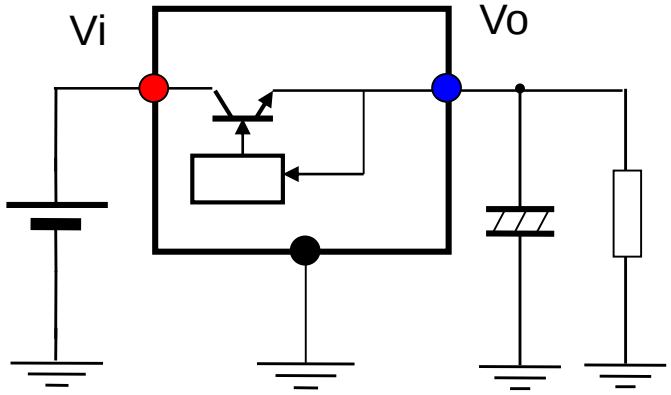
電流波形

1-2 基本3方式の概要

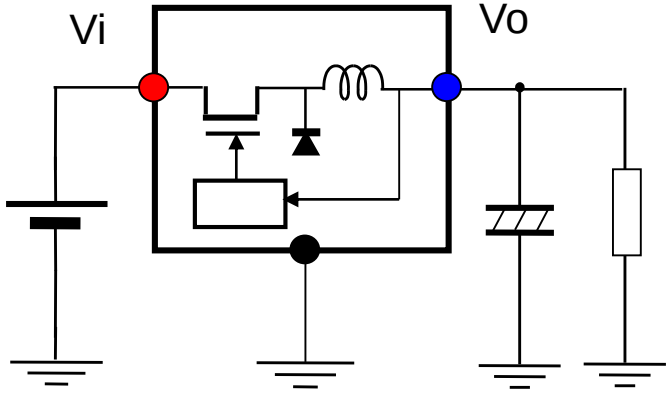
EMI:電磁妨害(Electro-Magnetic Interference)

(1)スイッチング電源の特徴 (シリーズ電源との比較)

＊電力損失が非常に少ない:高効率
＊発熱が少ない ⇒ 放熱板が小さい(不要)
＊出力電圧が任意(降圧、昇圧、負電圧)
▲インダクタ、半導体スイッチ、ダイオードが必要
▲出力電圧にリプル発生
▲スイッチングノイズが大きい (EMI発生:不要輻射、入力電流)



シリーズレギュレータの基本構成

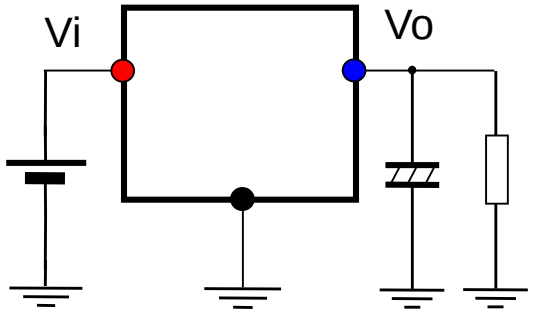


スイッチングレギュレータの基本構成

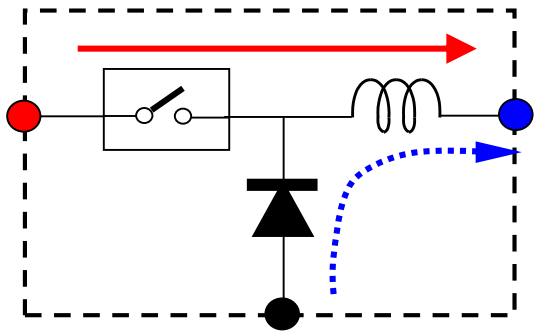
（2）基本3方式の構成

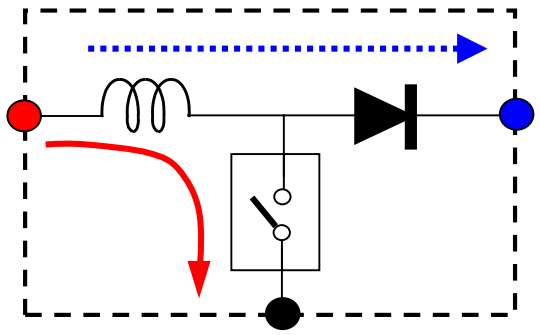
(a) 降圧形電源（ｽﾃｯﾌﾟﾀﾞｳﾝ、Buck Converter）：Vo＜Vi
(b) 昇圧形電源（ｽﾃｯﾌﾟｱｯﾌﾟ、Boost Converter）：Vo＞Vi
(c) 昇降圧形電源（Buck-Boost Converter）　：Vo ≧≦ Vi

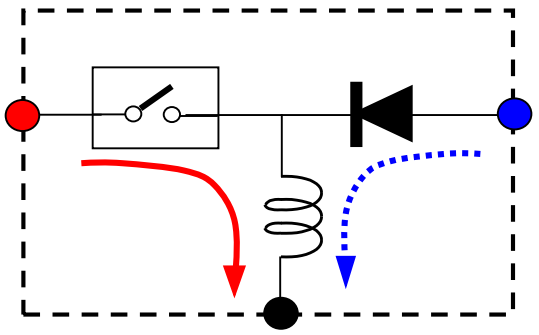
●SW、L、Di の組合わせ
●コイルの電流は連続的だが、
　　出力電流は、形式により異なる
●コイル：エネルギーの蓄積と放出



基本構成


(a) 降圧形


(b) 昇圧形


(c) 昇降圧形

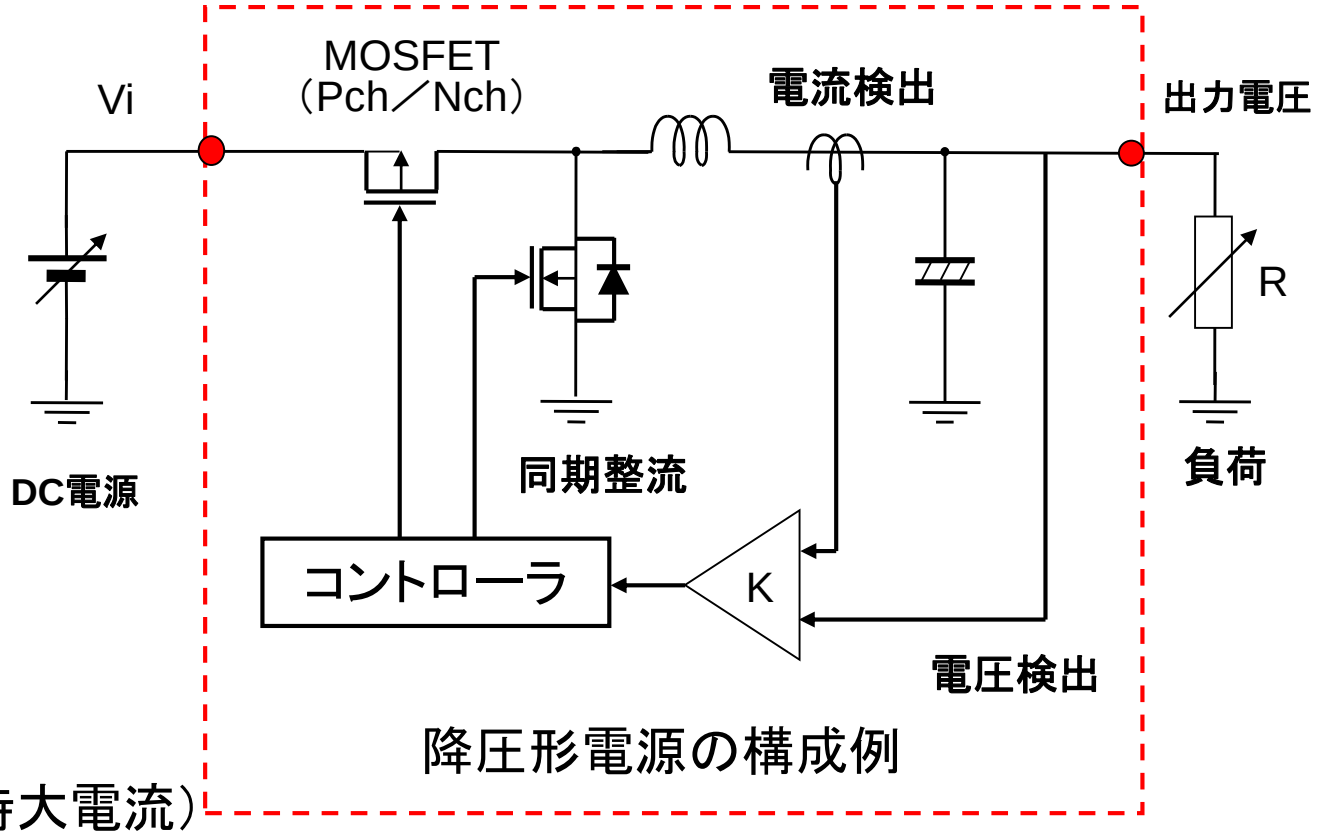
（3）スイッチング電源の具体的な性能・機能

【性能】

1）出力電圧・電流、入力電圧
2）出力電圧リップル
3）効率
4）ﾗｲﾝ/ﾛｰﾄﾞ・ﾚｷﾞｭﾚｰｼｮﾝ
5）負荷変動応答
6）EMI・ノイズ
7）制御安定性
8）・・・・・

【保護機能】

1）過電流（負荷短絡）
2）入力電圧
3）温度
4）ラッシュ・カレント（起動時大電流）
（対策：ソフトスタート）



降圧形電源の構成例

1-3 スイッチング電源の解析

(1) 降圧形電源

a)電流計算式(理想素子、ダイオード電圧無視)

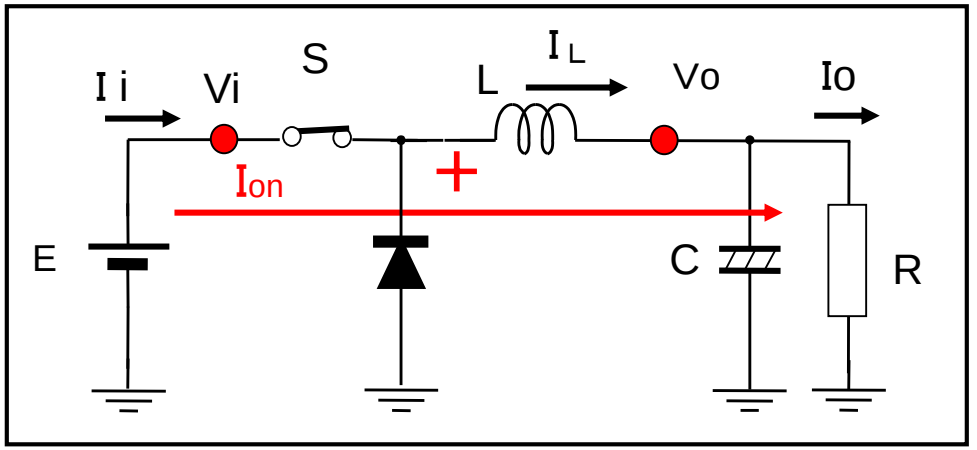
●SW ON時: ON電流

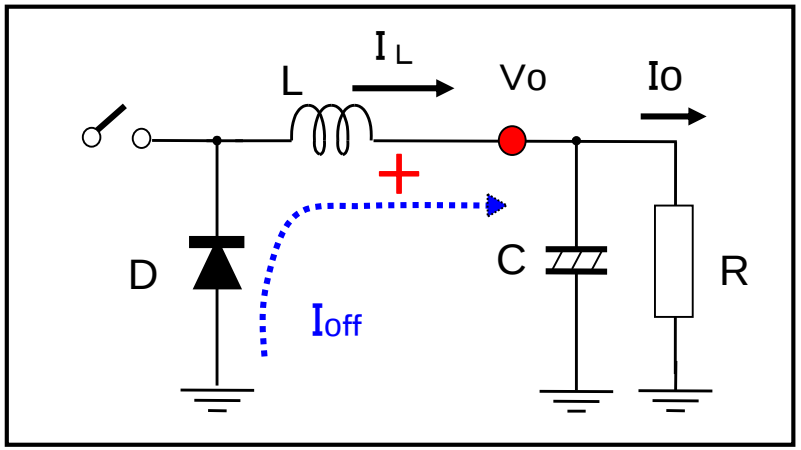
＊SW、Lを介して、Viより電流供給

＊$V_L = V_i - V_o = L \cdot (\Delta i_L / \Delta t)$

$$i_{Lon}(t) = t \cdot (V_i - V_o) / L + I_{LL} \quad (2\text{-}1)$$

$$= (V_i - V_o) \cdot T_{ON} / L + I_{LL}$$





●SW OFF時:OFF電流

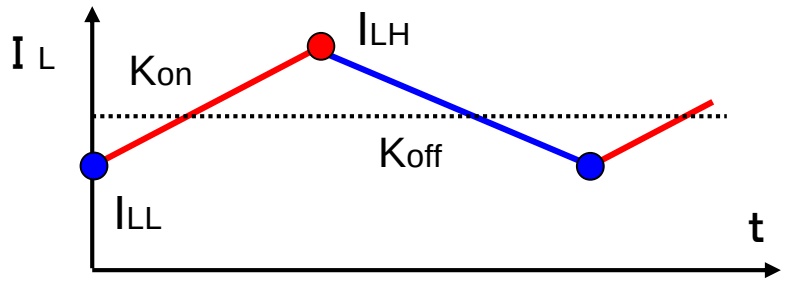
＊Lの電流は Dを介して負荷へ供給

＊$V_L = -V_o = L \cdot (\Delta i_L / \Delta t)$

$$i_{Loff}(t) = -t \cdot V_o / L + I_{LH} \quad (2\text{-}2)$$

$$= -V_o \cdot T_{OFF} / L + I_{LH}$$

ただし $V_D = 0$、I_{LH}:初期電流



b） 電圧変換式：定常状態　$I_{LL}' = I_{LL}$

＊電流関係式より

$i_{LL}(t) = i_{LH} - t \cdot Vo/L$　(2-3)

$= \{i_{LL} + T_{ON} \cdot (Vi - Vo)/L\} - T_{OFF} \cdot Vo/L$

一周期後でも i_{LL} は不変

∴ $T_{ON} \cdot (Vi - Vo)/L - T_{OFF} \cdot Vo/L = 0$

よって $T_{ON} \cdot Vi = (T_{ON} + T_{OFF}) \cdot Vo$

∴ $M = Vo / Vi = T_{ON} / (T_{ON} + T_{OFF})$

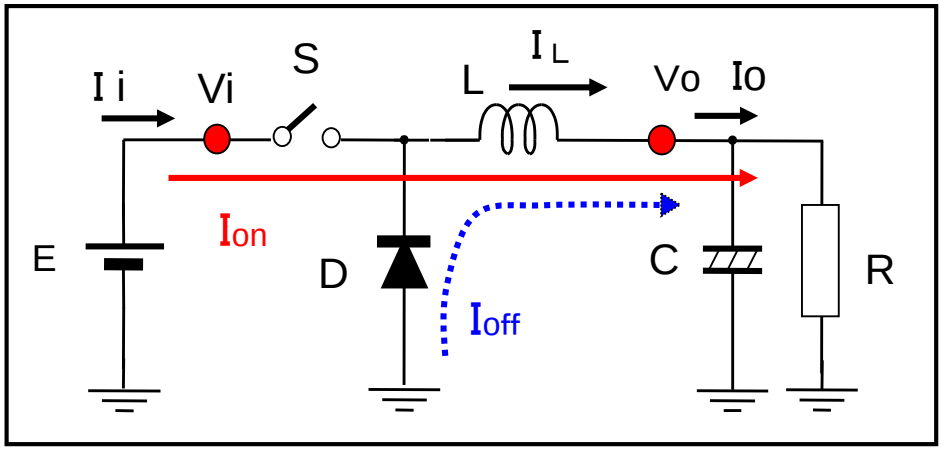
$= T_{ON} / T_S$ （＜1）　(2-4)

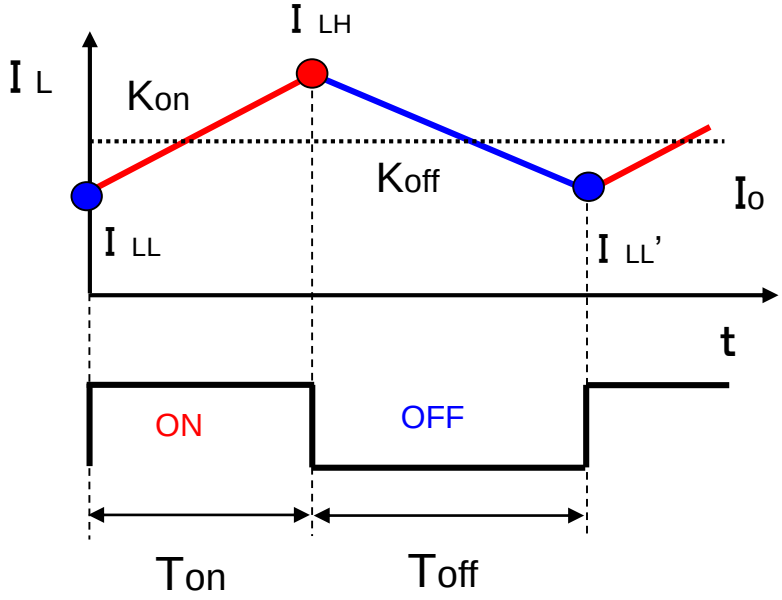
ただし $T_S = T_{ON} + T_{OFF}$

＊**電圧変換率：M＝D**（＜1）

（D：ONデューティ比：**時比率**）

＊コイル電流＝負荷電流 （ $I_L = Io$ ）





降圧形電源の動作波形

(2) 昇圧形電源

a) 電流計算式

●SW ON時： ON電流

＊コイルにエネルギー蓄積

＊$V_L = V_i = L \cdot (\Delta i_L / \Delta t)$

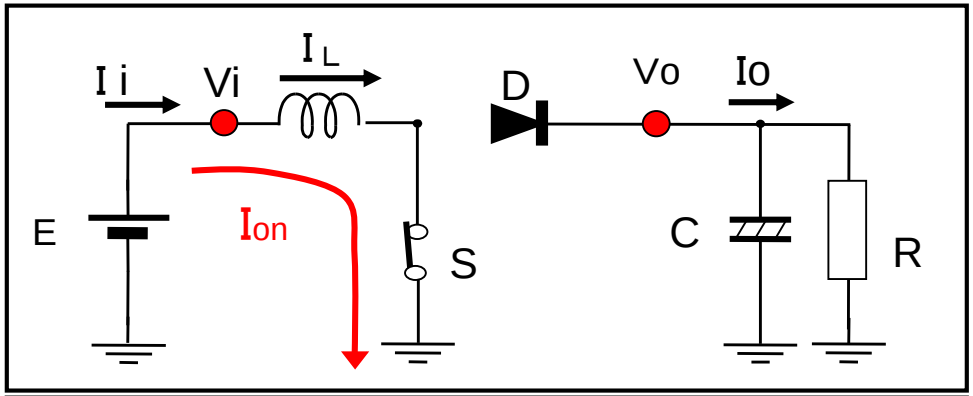
$$i_{LON}(t) = I_{LL} + t \cdot (V_i / L) \qquad (2\text{-}5)$$

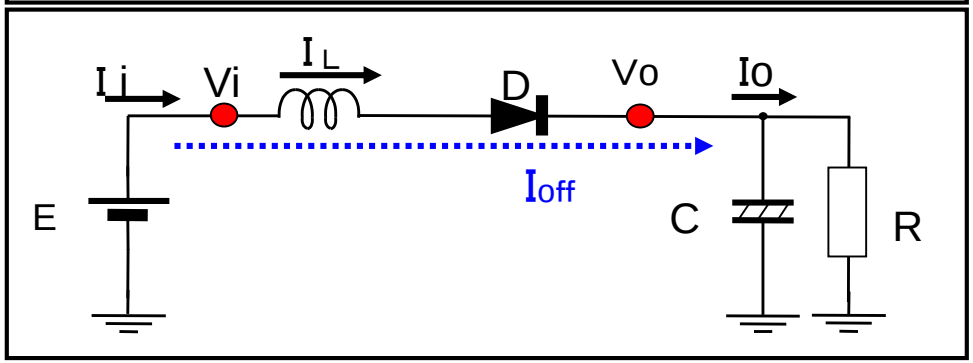
●SW OFF時：OFF電流

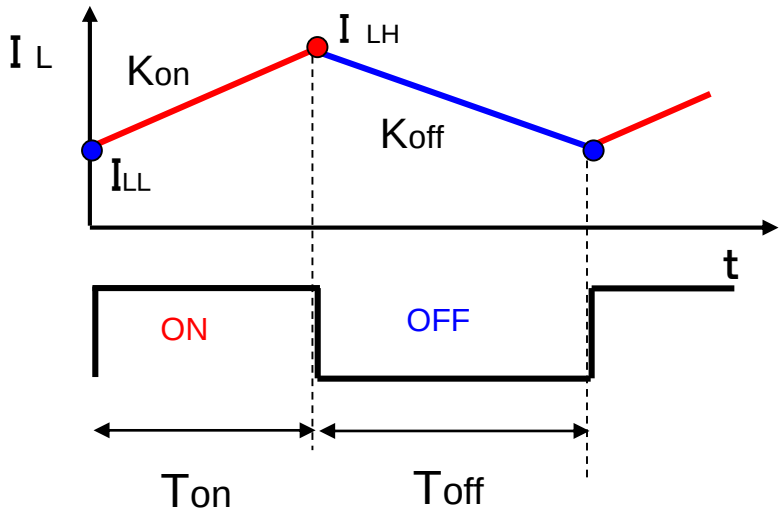
＊電源Eとコイルより、Di を介して
負荷へエネルギーを供給

＊$V_L = V_i - V_o$ （＜0）

$$i_{LOFF}(t) = I_{LH} - t \cdot (V_o - V_i) / L \qquad (2\text{-}6)$$







b） 電圧変換式：定常状態

＊電流関係式：降圧形と同様にして

$$i_{LL}'(t) = I_{LH} - t\cdot(Vo - Vi)/L \qquad (2\text{-}7)$$

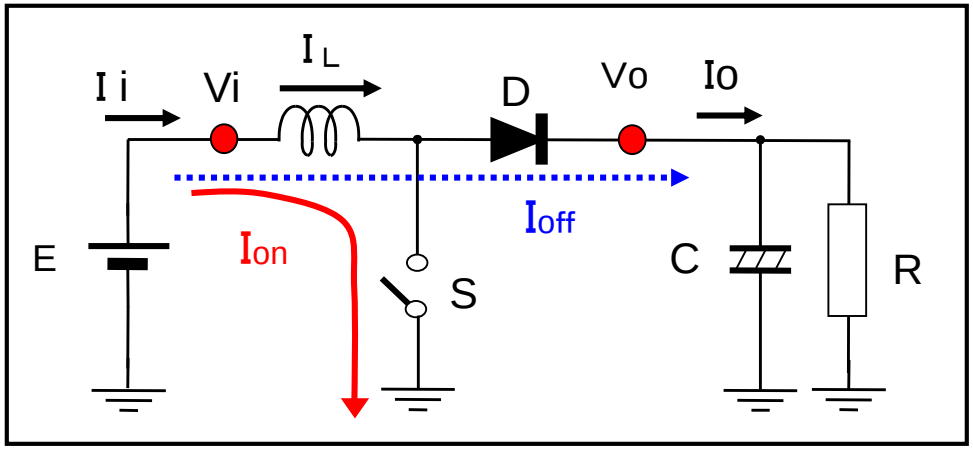
$$= \{I_{LL} + T_{ON}\cdot Vi/L\} - T_{OFF}\cdot(Vo - Vi)/L$$

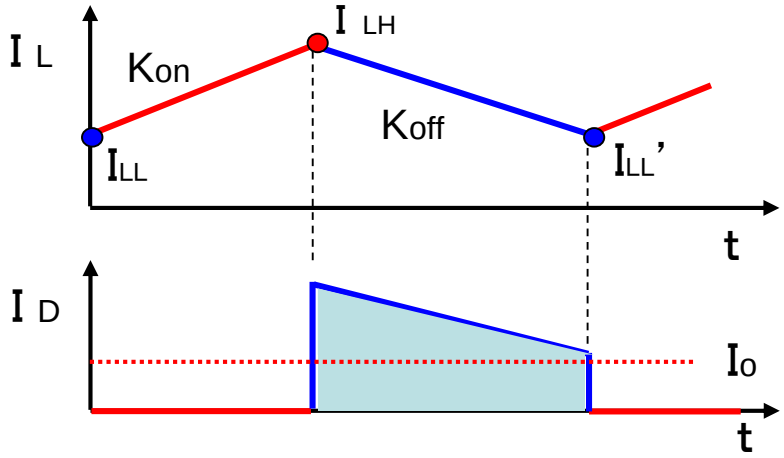
$$\therefore\ T_{ON}\cdot Vi/L - T_{OFF}\cdot(Vo - Vi)/L = 0$$

$$Vo/Vi = (T_{ON} + T_{OFF})/T_{OFF} = Ts/T_{OFF} \qquad (2\text{-}8)$$

＊**電圧変換率：M＝1／D’ （＞1）**

（ただし D‘＝1－D）





昇圧形電源の動作波形

負荷電流は　断続的に流れる

(3)昇降圧形電源

a)電流計算式

●SW　ON時：　ON電流

＊コイルにエネルギーを蓄積

＊$V_L=Vi$

$$i_{LON}(t)=I_{LL}+t\cdot V_i / L \qquad (2\text{-}9)$$

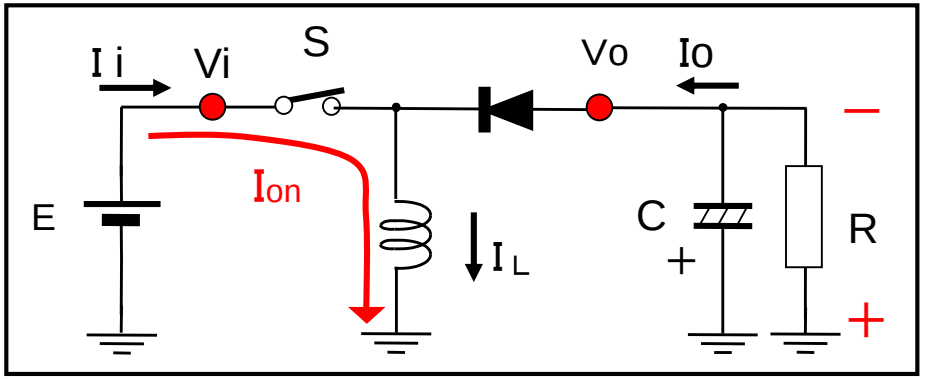
●SW　OFF時：OFF電流

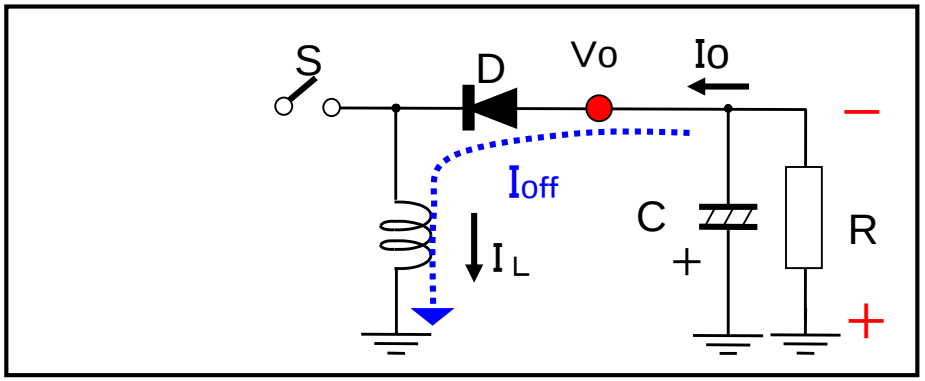
＊コイルのエネルギーを放出

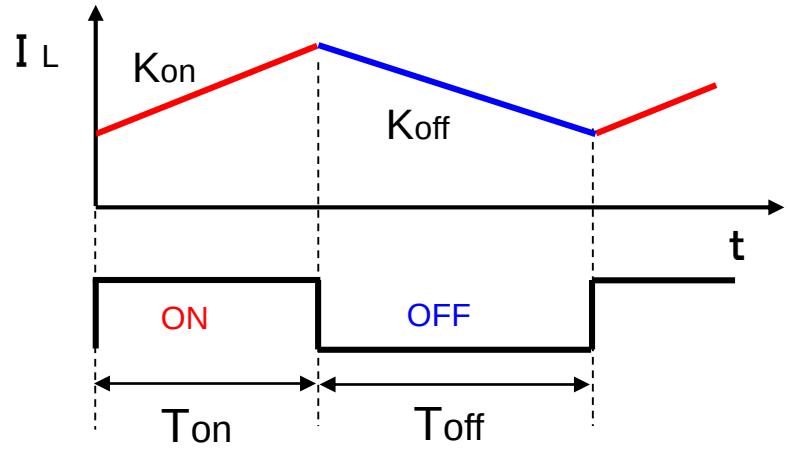
＊$V_L=Vo$　（＜0）

$$i_{LOFF}(t)=I_{LH}-t*Vo/L \qquad (2\text{-}10)$$

出力は　逆極性！







b) 電圧変換式：定常状態

＊ $i_{LOFF}(t) = I_{LH} - t \cdot Vo / L$ (2-11)

$= \{I_{LL} + T_{ON} \cdot V_i / L\} - T_{OFF} \cdot Vo/L$

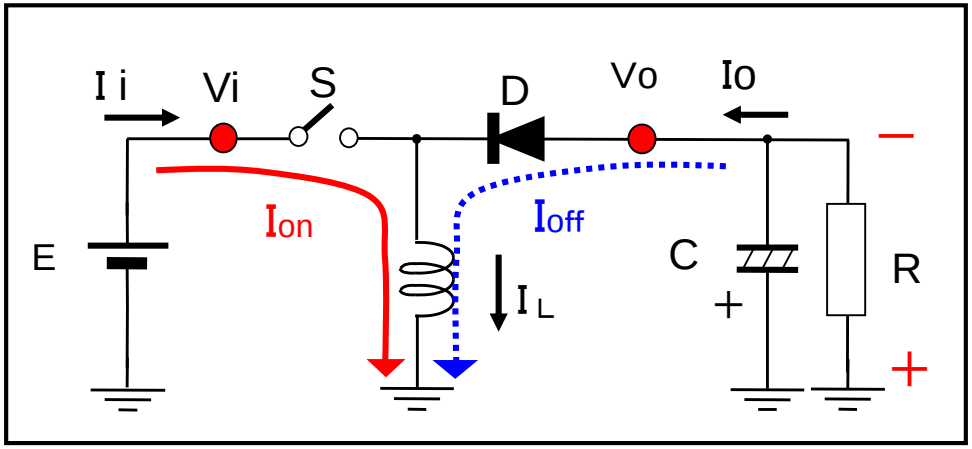
$\therefore\ T_{ON} \cdot Vi/L - T_{OFF} \cdot Vo/L = 0$

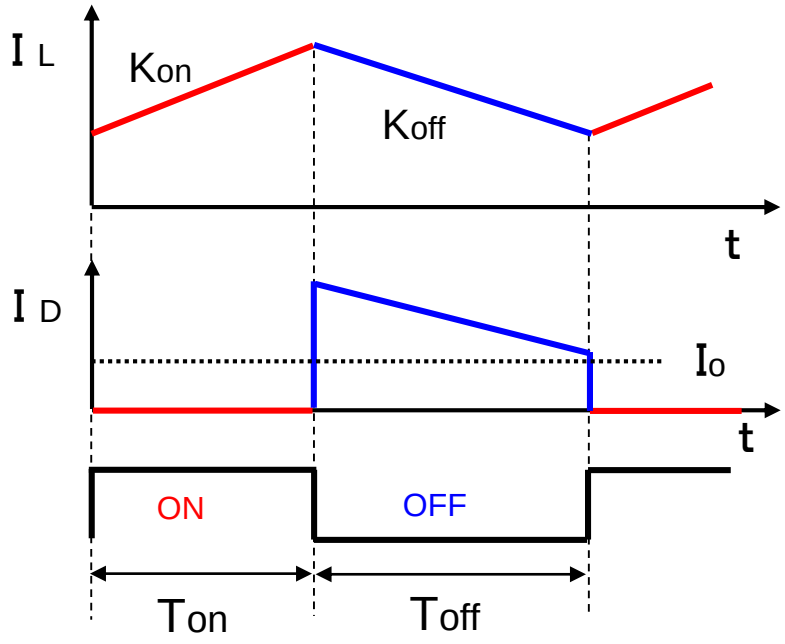
$Vo / Vi = T_{ON} / T_{OFF}$ （＜0） (2-12)

電圧変換率：M＝－D／D’

（変化幅：0～∞）

★動作は 昇圧型形と類似





負荷電流は　断続的に流れる

参考：インダクタンス、キャパシタンスとコイル、コンデンサの違い

●インダクタンス、キャパシタンス：基本電気要素

● コイル、コンデンサ：電気部品

⇒ 内部抵抗(ESR)・微小インダクタンス(ESL)や浮遊容量⊿Cを含む

＊ESR・ESL が増えると、効率・動作速度の低下

★シミュレーションと実装回路との違い

＊ESR：Equivalent Series Resistance（等価直列抵抗）

＊ESL: Equivalent Series Inductance

2. シミュレーションによる動作性能確認

2-1　降圧形電源の動作確認

（1）基本的な回路構成（パワーステージのみ）

＊使用ソフト：SIMetrix/SIMPLIS（個別ソフト）

＊回路は容易に動作するが、**性能確立は困難**

● 使用素子の注意

・スイッチ、ダイオードはパワー素子を指定（リスト有り）

・実際のＬ，Ｃは、種類がある（電流、耐圧、ＥＳＲ等）

　ｼﾐｭﾚｰｼｮﾝでは、ESRを直列に追加（無くても動作する）

・コンデンサの種類：

a)ｱﾙﾐ電解ｺﾝﾃﾞﾝｻ：極性，Ｃ＞100uF，耐圧＞100V，ESR≒数100mΩ

b)低ESRｺﾝﾃﾞﾝｻ　：極性，Ｃ≦ 47uF，耐圧＜100V，ESR≒数 10mΩ

C)ｾﾗﾐｯｸ･ｺﾝﾃﾞﾝｻ　：無極性，Ｃ≦ 47uF，耐圧＜ 50V，ESR≒数 mΩ

（2） 基本シミュレーション回路：パワーステージ部

●素子の設定・接続（GND接続が必要）

- SW：閾値、ON抵抗の設定確認（ON抵抗は使用MOSに合わせる）
- コイル、コンデンサ：ESRを設定、耐圧は無関係
- 負荷抵抗：出力電流値で概ね設定、電力は無関係
- PWM信号源を仮設置（周波数、デューティ、振幅）

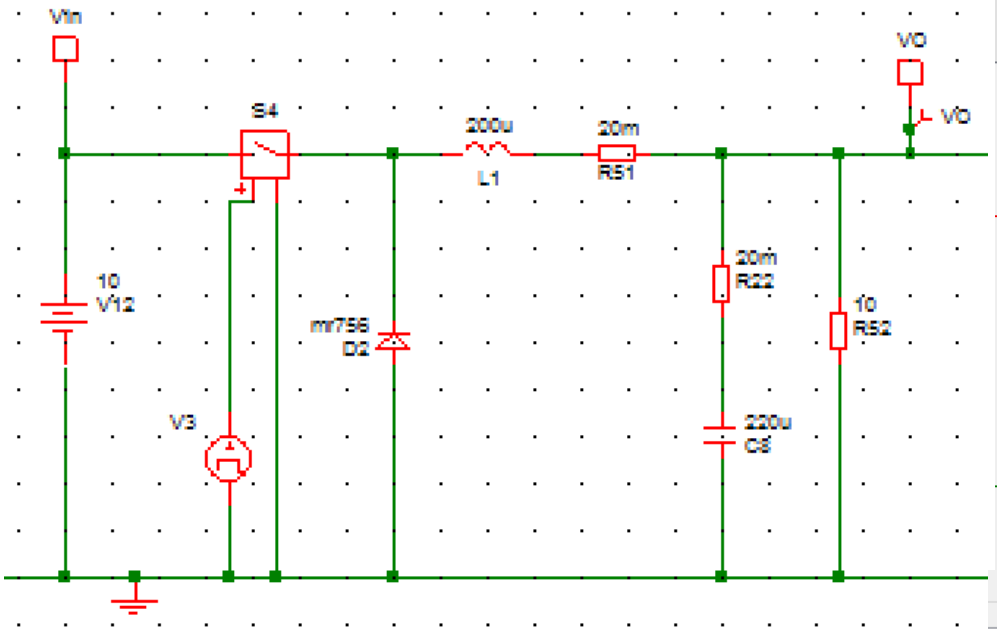
●動作確認

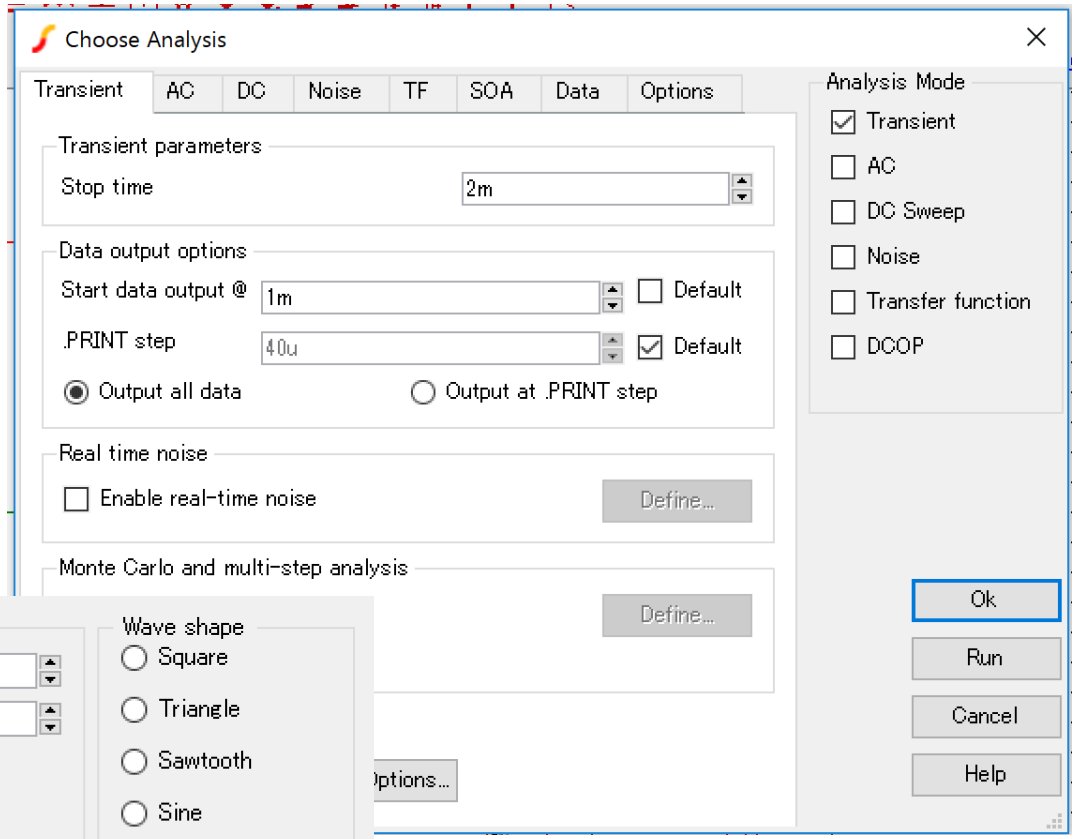
- まずは、パワーステージ部の動作を確認
- PWM信号源により、SWを動作させる
- シミュレーション時間：起動時は過渡応答なので削除（非表示）

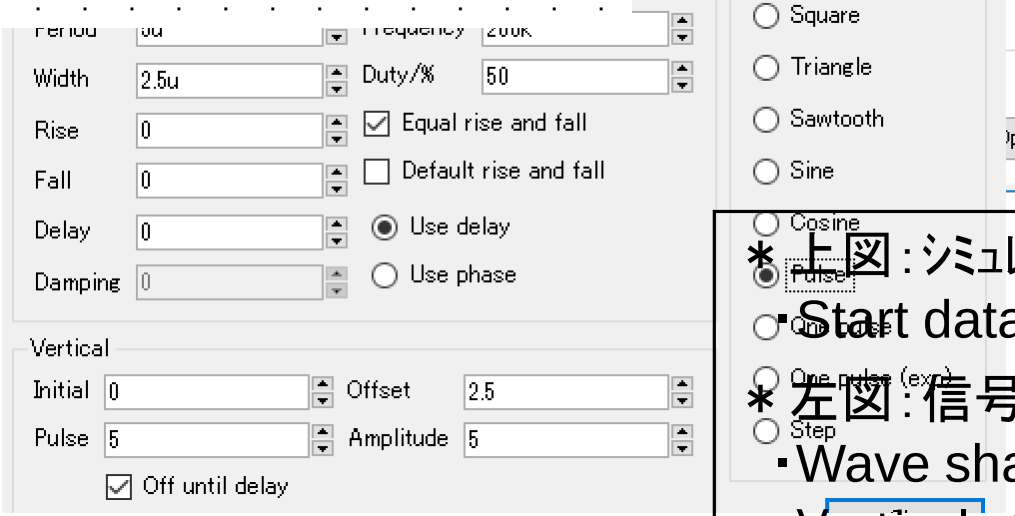
  T = 1ms～2ms（動作確認は短い時間でチェック）：数秒で動作完
- デューティDに対する出力電圧を確認：Rを小さくするとどうか？

  Vo≒D･Vi、 Io=Vo／R（例えば Io=1，5，10Aに可変）

●シミュレーション回路(1):パワーステージ







＊上図:シミュレーション条件の設定
- Start data output: 1ms (安定の後)

＊左図:信号源(クロック) の設定
- Wave shape=Pulse:デューティ可変
- Vertical= 0～5 V に設定

（3） シミュレーション回路：制御部

●諸特性の設定: Fck=200～500 kHz, Io=0.1～0.5 A, Vr=Vin/2

＊オペアンプ、コンパレータの設定・接続

・諸特性の設定：出力電圧範囲、GBP、スルーレート等

＊鋸歯状信号源：振幅 = 基本 0～Vin に設定（周波数＝Fck）

★全体の極性に注意：負帰還回路！

Vo≒0V のとき、特に注意

●動作確認：常に Vo, PWM をモニタ：まずは、Vo をチェック

＊Voが大きくVr からずれているとき：PWM、SW動作(Vd) のチェック

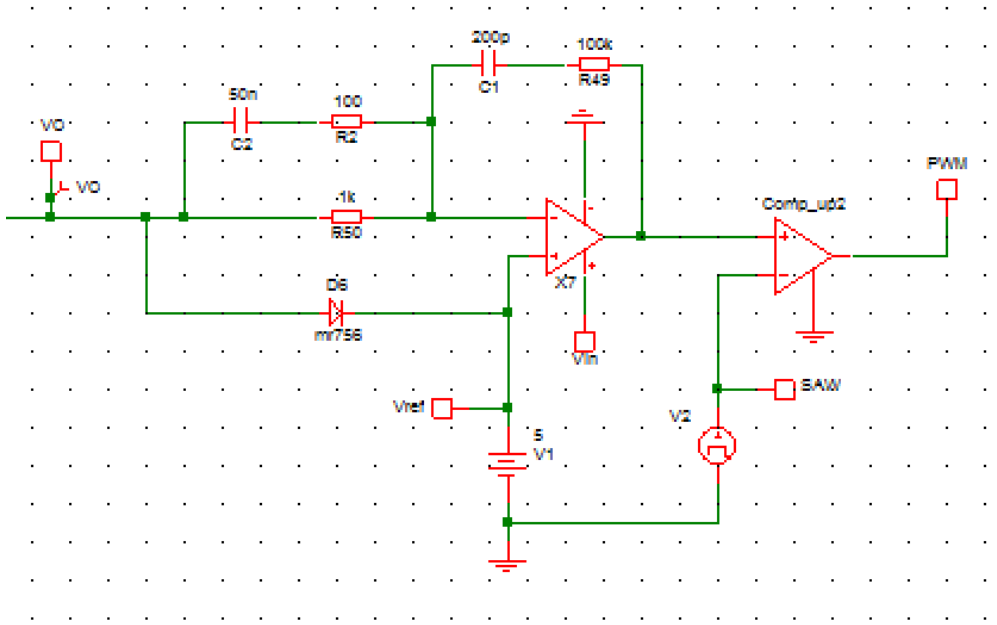
配線ミス、極性ミスのとき、PWM＝NG

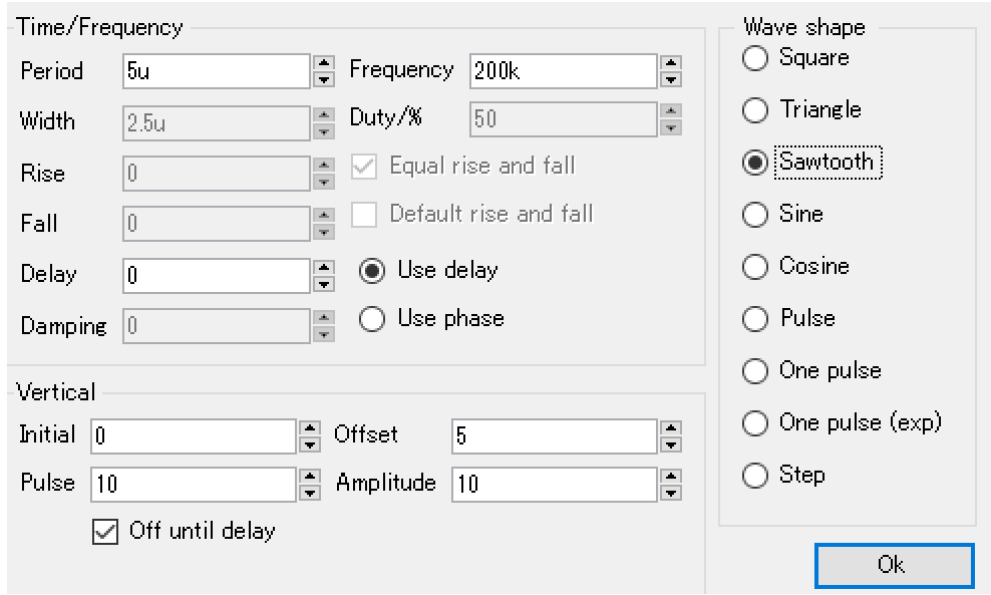
・Vo≒ 0V ： OPｱﾝﾌﾟ出力= H ⇒ PWM= H ⇒ SW:ON

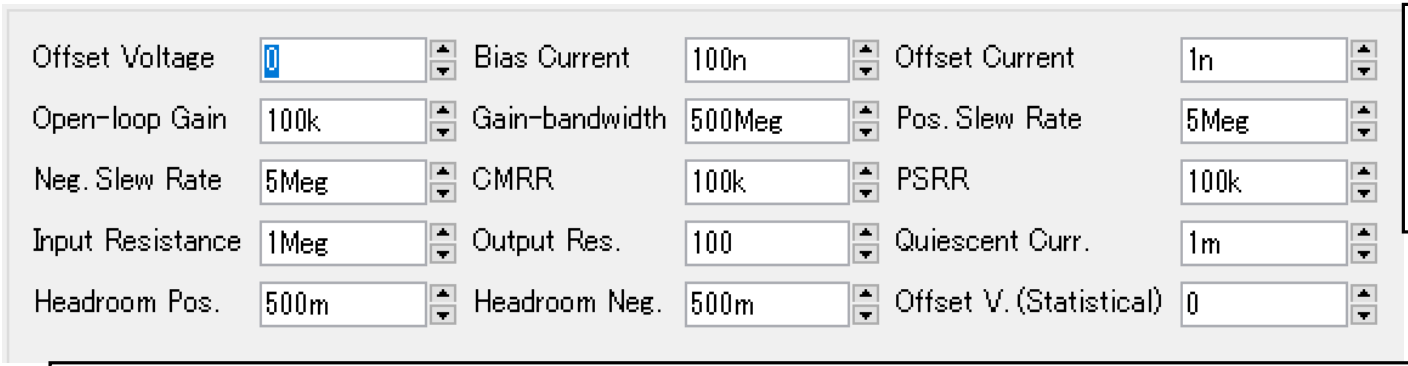
・Vo≒Vin ： OPｱﾝﾌﾟ出力= L ⇒ PWM= L ⇒ SW:OFF

＊以上のチェックで、Vo≒Vr となるはず！

●シミュレーション回路(2):制御回路







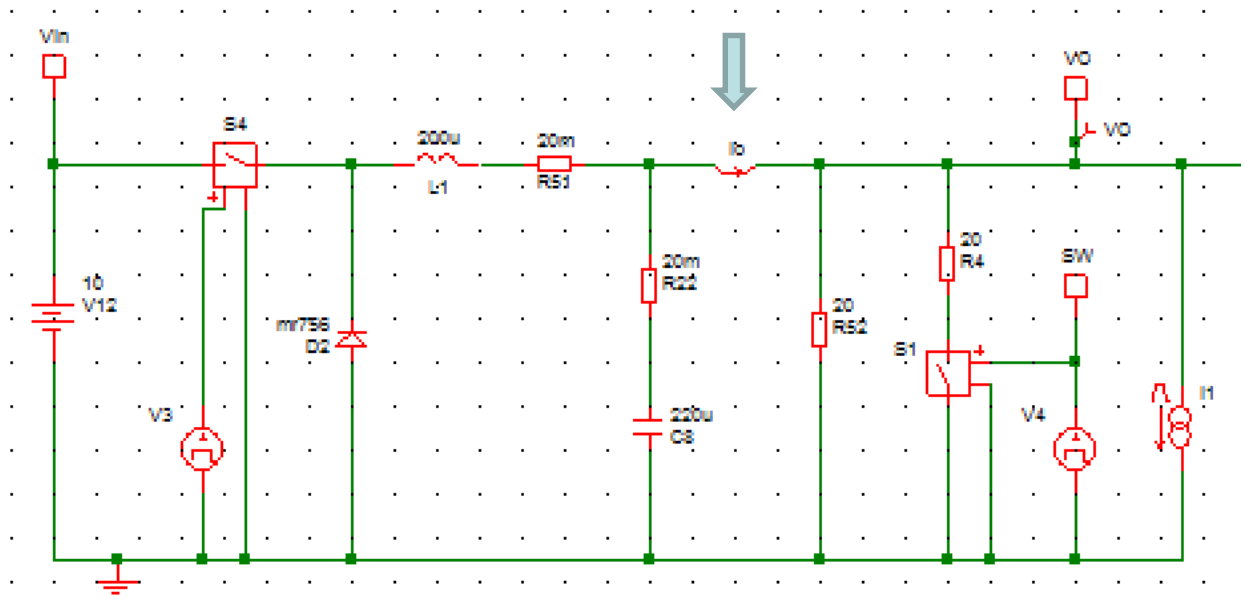
上図:信号源(SAW) の設定
・Wave shape=Sawtooth
・Vertical= 0～Vin に設定

上図:オペアンプの条件設定
・出力電圧:Headroom Pos./Neg; 電源ーGNDとの電位差
・高速応答が必要な場合は、Pos/Neg Slew Rate を高める

（3） シミュレーション回路：出力電圧リプル、過渡応答特性

- ●出力電圧リプルの確認: ⊿Vo＜10 mVpp
  - ＊リプル：クロック周期ごとのリプル
  - ＊不安定性：低い周波数の揺らぎ：数kHz（閉ループのピーク周波数）
- ●過渡応答特性の設定：電流変化量 ⊿I＝2･Io
  - ・抵抗のSW切換えが好ましいが、立上り特性di/dtの調整困難
    - ⇒ 電流源によるIo切換え：di/dt の調整容易
- ●過渡応答特性の設定と特性確認
  - ＊負荷電流の切換え信号：
    - ・発生タイミング：Voの安定後（2～3ms 後）：遅延設定を利用
    - ・発生時間：約1ms（収束性能に応じて調整）
  - ＊過渡応答特性：まずは ｱﾝﾀﾞｰｼｭｰﾄの大きさ・波形確認
    - ・10mV（～50mV）以下が望ましい。振動回数は 1～3回がベスト
    - ・ｵｰﾊﾞｰｼｭｰﾄの大きさは、負荷電流に依存

●シミュレーション回路(3):パワーステージ＋過渡応答特性回路



●電流プローブを設置

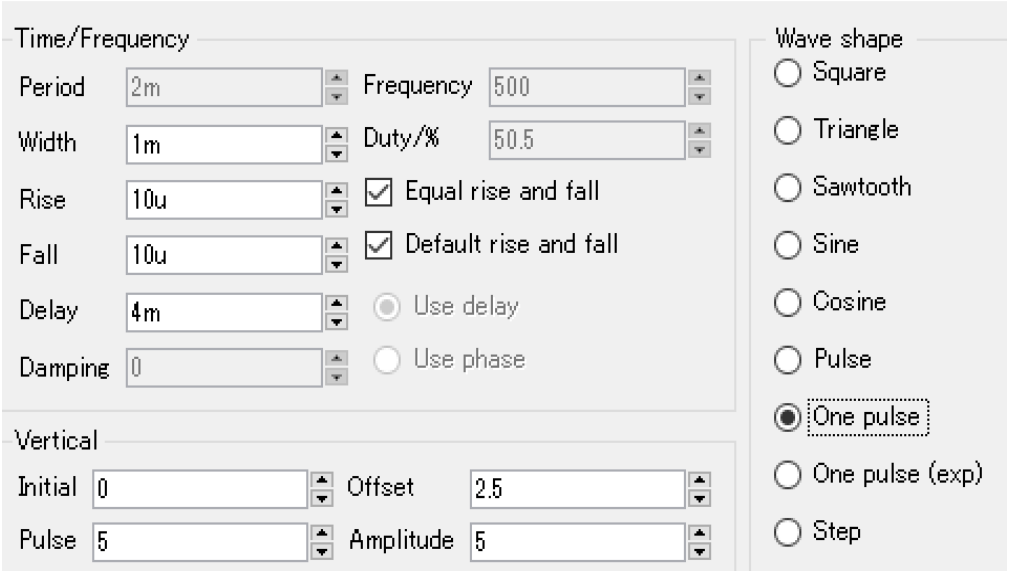
＊左下図:信号源(SW) の設定

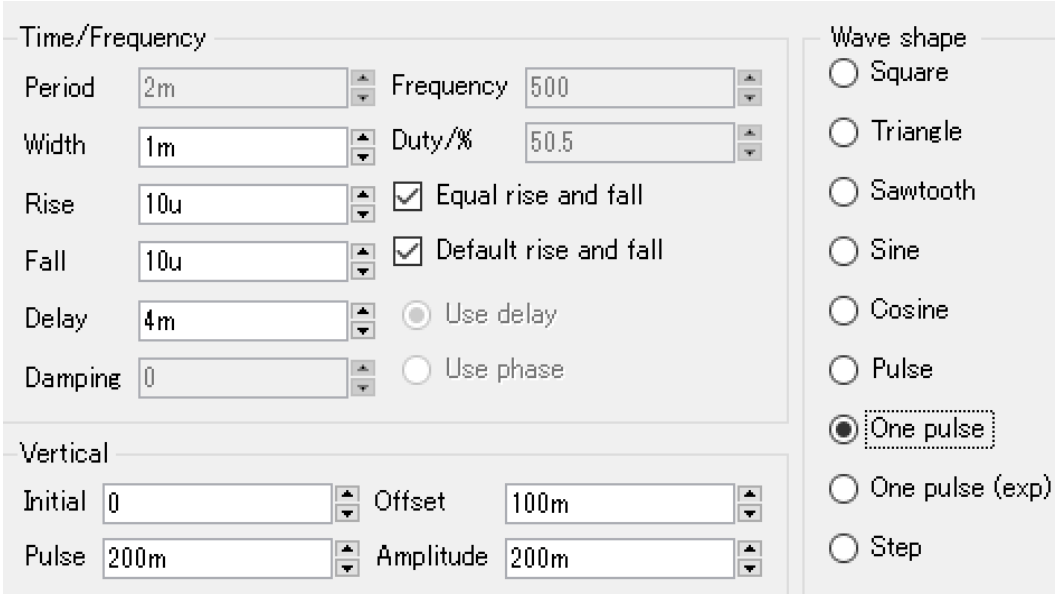
・Rise/Fall は影響しない

＊右下図:電流源の設置

・ 電流、Rise/Fall の設定可能

＊One pulse でDelay と幅を設定





2-2 性能改善検討

（1） 出力電圧オフセットの改善

●電圧オフセット：

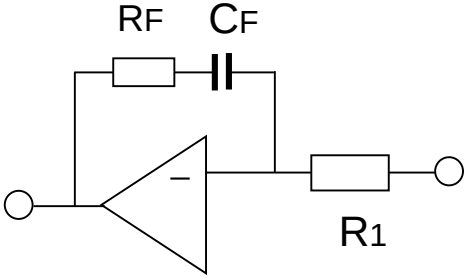
＊電圧オフセット：∝１／Go(s=0)：直流閉ループゲインに反比例

$$Vo=\frac{Go}{1+Go}V_F,\quad \Delta Vo=|Vo-V_F|=\frac{1}{1+Go}V_F$$

＊改善法：

1) 直流ゲインのUP：安定性の問題で限界有り

2) オペアンプの位相遅れ補償（右図）



・負帰還回路を変更し、DCゲインを 無限大

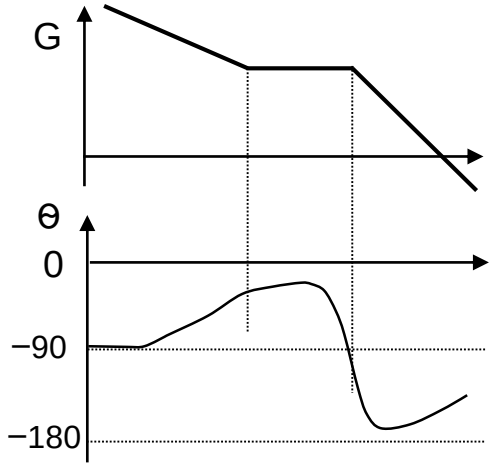
・極周波数の設定：$\omega=1/C_FR_F$

低くても安定性に問題ないが、

過渡応答を考えると、ピーク周波数に

より近づける（近すぎると不安定になる

（位相遅れが、ある程度戻るように設定）



(2)出力電圧リプルの改善（クロック周期の電圧リプル）

＊LCを大きく、Fを少し高くする ⇔ 応答特性は劣化

(3)過渡応答特性の改善

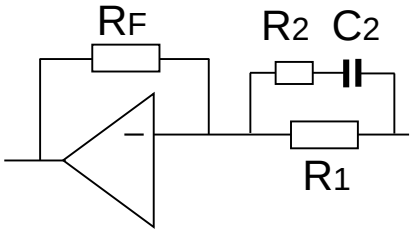
●ゲインによる調整

＊振動が無い場合：オペアンプのゲインUP（過制動の改善）

＊振動が続く場合：オペアンプのゲインDown（不安定性の改善）

⇒ある程度改善するが、振動周波数が低下

●位相進み補償による改善

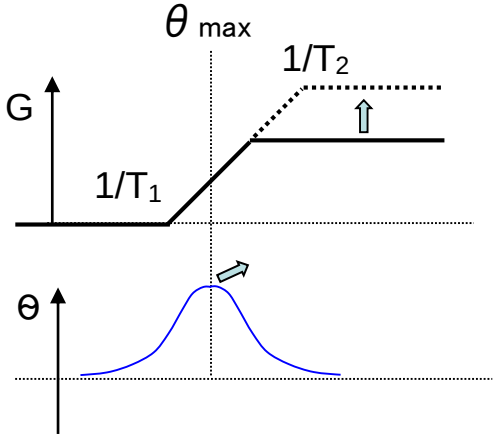


・応答特性より振動周波数Fp を計測

・右図のゼロ点周波数を以下のように調整

$F_2 = 1/T_2 = 1/2\pi C_2R_2 \fallingdotseq 10 \cdot Fp$

（180° 付近位相を進める）



＊設定周波数を間違えると、何の効果もない！

周波数を微調整すれば、最適化可能

＊実際は ループ特性を測定して設定

(4)一巡伝達関数(オープンループ)による特性改善

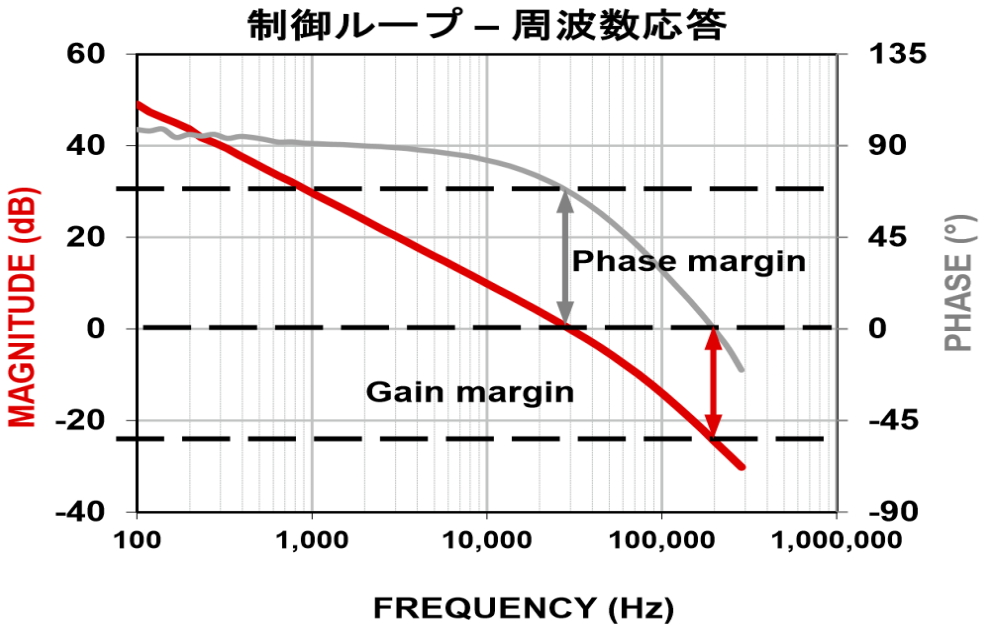
＊目標帯域の目安: F_{BW}＝ Fck/10

＊ゲイン特性:0dB通過点の傾きは、－20dB/dec

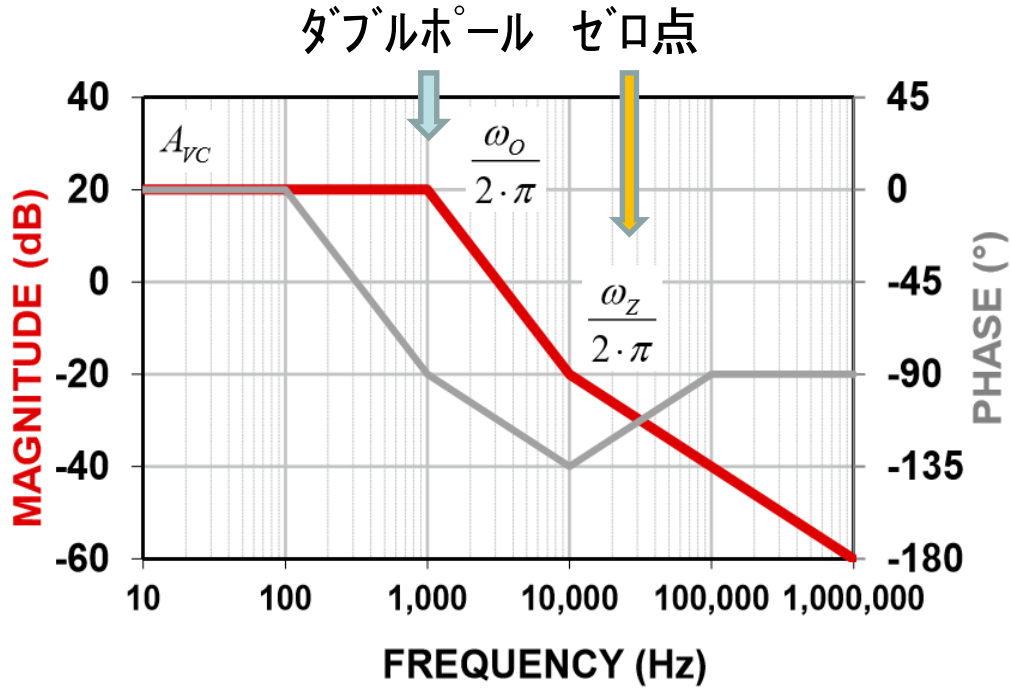
＊位相余有:P_m ≧ 45°、ゲイン余有:G_m ≧10～20 dB

・C_{out} のESRによるゼロ点(位相進み)により位相余裕有を確保

・最終的に、位相進み補償で調整



図A 位相余有とゲイン余有



図B 降圧形パワーステージ特性

★大電流化への調整（必要により挑戦）

（1）出力電流回路の設定

＊基本出力電流=1 A とし、出力電圧の安定後に下記電流源を起動

＊ステップ状の電流源(1 A)を数個 並列に設置（1ms毎に起動）

＊負荷電流の増大、負荷抵抗の低下 ⇒ Voの低下、振動気味

（2）不安定状態の改善法：

＊MOS、L、Cの変更 ⇒ MOSのON抵抗とL･CのESR低減

実装時は、MOS：大電流化、L：太線巻線、C:並列設置

2-3　昇圧形電源の動作と特徴

（1）基本的な回路構成（次ページ）

＊パワーステージ のみ降圧形と異なる

＊出力電流 Io=0.1A 程度、昇圧率 M= 2～3 程度

＊クロック周波数 Fck=500 kHz 程度の高め、C_{out} =1mF の大きめ

（2）動作確認

＊パワーステージ部の動作確認

・PWM信号源により、SWを動作させる（設定は降圧形と同等）

・デューティDに対する出力電圧を確認：Vo≒Vi／(1－D) ＞Vi

＊制御部の動作確認

・ Vo～PWM 間の動作は、降圧形と同様

・オペアンプの位相補償を調整して特性改善

3. スイッチング電源の詳細検討

3-1 状態平均化法と状態方程式

(A)状態方程式

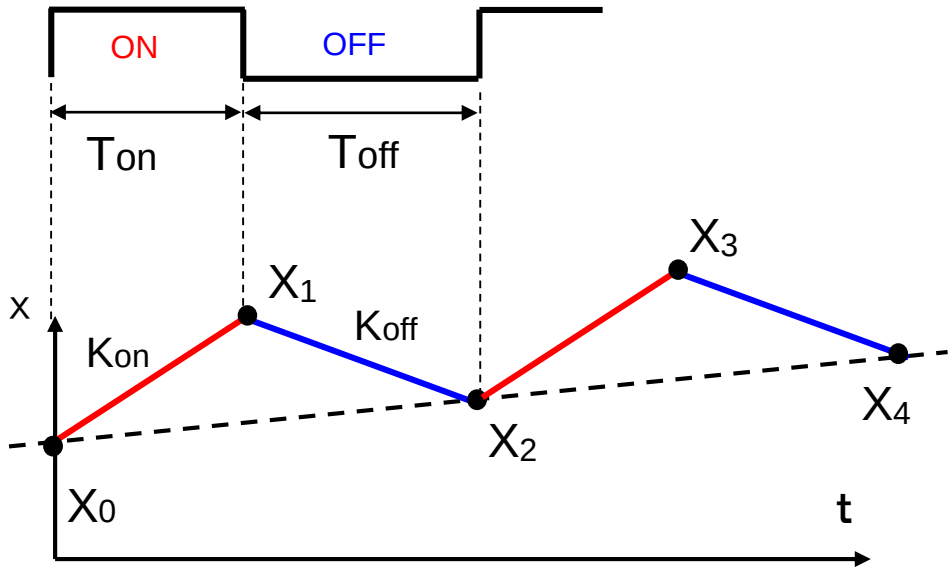
状態変数：$\boldsymbol{X}=\begin{pmatrix} i_L \\ V_c \end{pmatrix}$

[ON] $d\boldsymbol{X}/dt = \boldsymbol{A}_1 \cdot \boldsymbol{X}(t) + \boldsymbol{B}_1 \cdot Vi$ (2-21)

$y(t)=\boldsymbol{C}_1 \cdot X(t)$ (2-22)

[OFF] $d\boldsymbol{X}/dt = \boldsymbol{A}_2 \cdot \boldsymbol{X}(t) + \boldsymbol{B}_2 \cdot Vi$ (2-23)

$y(t)=\boldsymbol{C}_2 \cdot X(t)$ (2-24)



＊一周期の変化を解析：図のXを計算

$X_1=X_0+dX/dt \cdot T_{ON}=X_0+T_{ON}(\boldsymbol{A}_1 \cdot \boldsymbol{X}_0+\boldsymbol{B}_1 \cdot Vi)$

$=(\boldsymbol{I}+T_{ON} \cdot \boldsymbol{A}_1)X_0+T_{ON} \cdot \boldsymbol{B}_1 Vi$ (2-25)

$X_2=X_1+dX/dt \cdot T_{OFF}=X_1+T_{OFF} \cdot (\boldsymbol{A}_2 \cdot X_1+\boldsymbol{B}_2 \cdot Vi)$

$=(\boldsymbol{I}+T_{OFF} \cdot \boldsymbol{A}_2)X_1+T_{OFF} \cdot \boldsymbol{B}_2 \cdot Vi$ (2-26)

ただし

$\boldsymbol{A},\boldsymbol{B}$:状態パラメータ

$\boldsymbol{I}$:単位行列

＊ (2-25)を (2-26)に代入

$$X_2=(\boldsymbol{I}+T_{OFF}\cdot\boldsymbol{A}_2)\cdot\{(\boldsymbol{I}+T_{ON}\cdot\boldsymbol{A}_1)X_0+T_{ON}\cdot\boldsymbol{B}_1Vi\}+T_{OFF}\cdot\boldsymbol{B}_2\cdot Vi$$

$$\fallingdotseq(\boldsymbol{I}+T_{ON}\cdot\boldsymbol{A}_1+T_{OFF}\cdot\boldsymbol{A}_2)X_0+(T_{ON}\cdot\boldsymbol{B}_1+T_{OFF}\cdot\boldsymbol{B}_2)\cdot Vi \qquad (2\text{-}27)$$

ただし　$T_{ON}\cdot T_{OFF}\fallingdotseq 0$

よって、つぎの差分方程式を得る

$$(X_2-X_0)/T_s\fallingdotseq \underline{(D\cdot\boldsymbol{A}_1+\boldsymbol{D'}\cdot\boldsymbol{A}_2)}X_0+\underline{(D\cdot\boldsymbol{B}_1+D'\cdot\boldsymbol{B}_2)}\cdot Vi \qquad (2\text{-}28)$$

＊微分方程式に変形（１周期の変化）

状態方程式

$$d\boldsymbol{X}(t)/dt=\boldsymbol{A}\cdot\boldsymbol{X}(t)+\boldsymbol{B}\cdot Vi \qquad (2\text{-}29)$$

ただし　$A=D\cdot\boldsymbol{A}_1+D'\cdot\boldsymbol{A}_2$

$B=D\cdot\boldsymbol{B}_1+D'\cdot\boldsymbol{B}_2$

$D=T_{ON}/T_S$

$D'=T_{OFF}/T_S$

$=1-D$

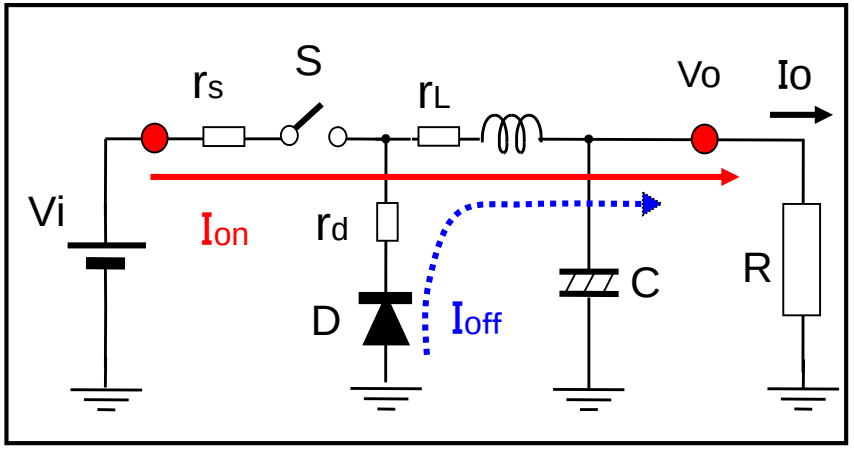
定常状態

$d\boldsymbol{X}(t)/dt=0$　より　$\boldsymbol{A}\cdot\boldsymbol{X}(t)+\boldsymbol{B}\cdot Vi=0$

$$\therefore\quad \boldsymbol{X}=-\boldsymbol{A}^{-1}\boldsymbol{B}V_i \qquad \boldsymbol{A}^{-1}：\text{逆行列} \qquad (2\text{-}30)$$

3-2 降圧形電源の解析

● SW ON/OFF で方程式を立てる



［状態Ⅰ：SW ON］　$V_C=V_o$、$V_D=0$ とする

入力側：電圧法則

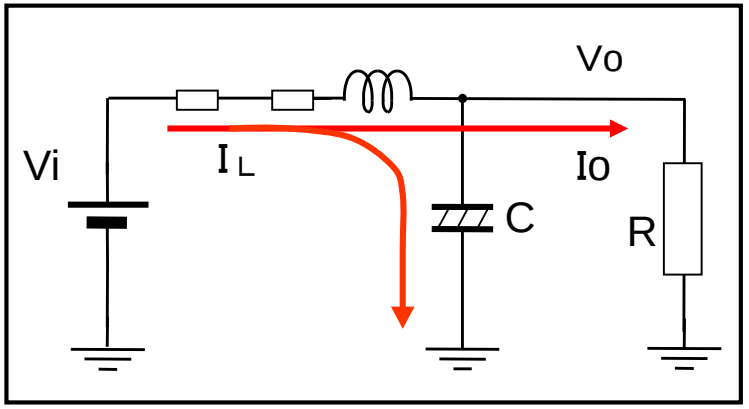
$$L\cdot di_L/dt=(V_i-V_o)-(r_s+r_L)\cdot i_L$$

$$\therefore\quad di_L/dt=-(r_s+r_L)/L\cdot i_L-V_o/L+V_i/L$$

出力側：電流法則　(2-31)

$$i_L-V_o/R=C\cdot dV_o/dt\quad(\text{Cの充電})$$

$$\therefore\quad dV_o/dt=i_L/C-V_o/CR \qquad (2\text{-}32)$$



よって

$$\begin{pmatrix} di_L/dt \\ dV_o/dt \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{r_L+r_s}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_L \\ v_o \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{pmatrix} V_i \qquad (2\text{-}33)$$

$\begin{pmatrix} di_L/dt \\ dV_o/dt \end{pmatrix} = dX/dt$

$\begin{pmatrix} -\frac{r_L+r_s}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{pmatrix} = A_1$

$\begin{pmatrix} i_L \\ v_o \end{pmatrix} = X$

$\begin{pmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{pmatrix} = B_1$

- r_s：SWのON抵抗
- r_d：DiのON抵抗
- r_L：コイルの内部抵抗

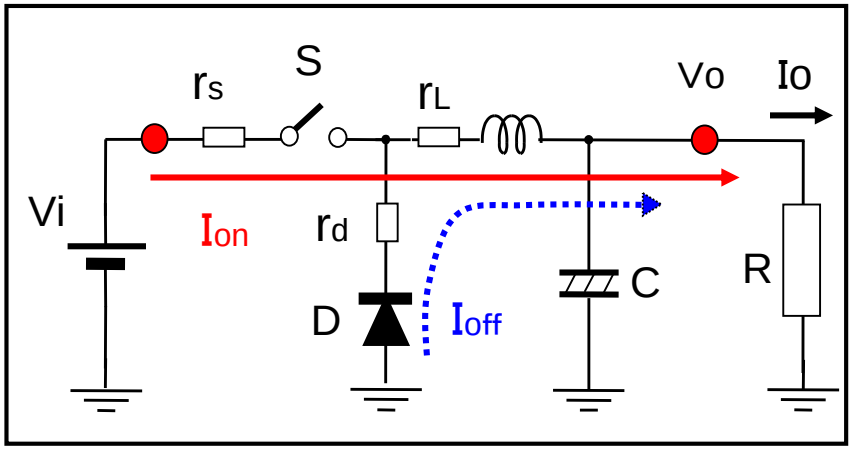
［状態Ⅱ：SW OFF］

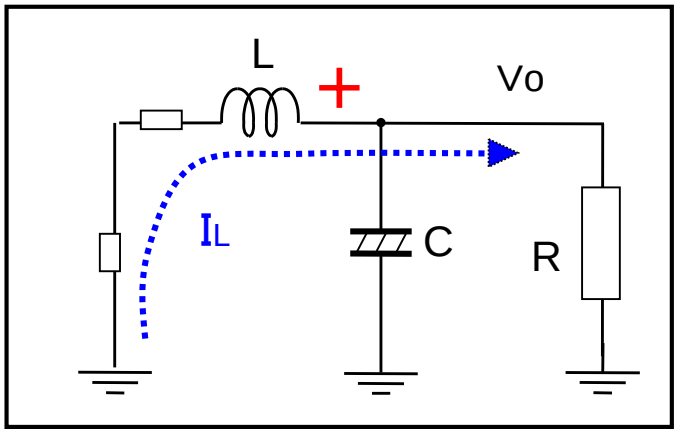
電圧：$-L\cdot di_L/dt = v_o+(r_d+r_L)\cdot i_L$

$\therefore \quad di_L/dt = -(r_d+r_L)/L\cdot i_L - v_o/L$ ・・・(2-34)

電流：$i_L - v_o/R = C\cdot dv_o/dt$

$\therefore \quad dv_o/dt = i_L/C - v_o/CR$ ・・・(2-35)





よって

$$\begin{pmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dv_o}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{r_L+r_d}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{CR} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_L \\ v_o \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} V_i \quad \cdots(2\text{-}36)$$

dX/dt ‖ A_2 ‖ X ‖ B_2

＊状態平均化方程式（降圧形電源）

$$dX/dt=(DA_1+D'A_2)X+(DB_1+D'B_2)V_i = \boldsymbol{A}\cdot X+\boldsymbol{B}\cdot V_i \qquad (2\text{-}37)$$

よって

$$\boldsymbol{A}=D\begin{pmatrix} -\frac{r_L+r_s}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{pmatrix}+D'\begin{pmatrix} -\frac{r_L+r_d}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{CR} \end{pmatrix}=\underline{\begin{pmatrix} -\frac{r}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{pmatrix}}$$

$$\boldsymbol{B}=D\begin{pmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{pmatrix}+D'\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}=\underline{\begin{pmatrix} \frac{D}{L} \\ 0 \end{pmatrix}}$$

ただし　$r = r_L+D\cdot r_s+D'\cdot r_d$

(2-38)

3-2 昇圧形電源の解析

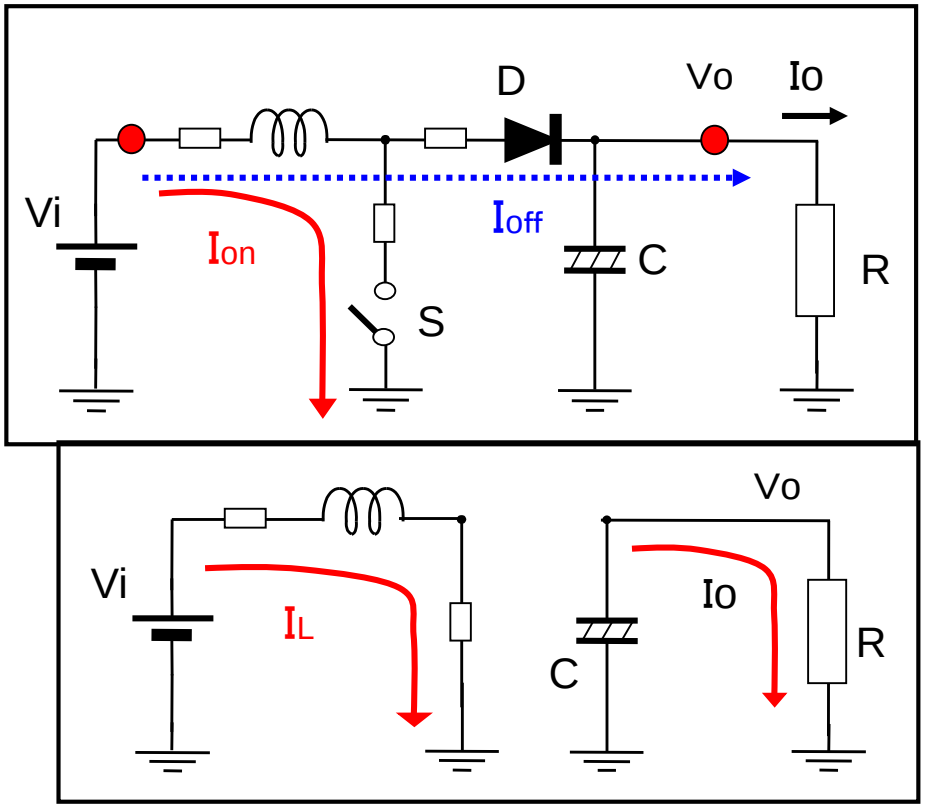
［状態Ⅰ：SW ON］

電圧：$L \cdot di_L/dt = Vi - (rs+r_L) \cdot i_L$

$$\therefore \quad di_L/dt = -(rs+r_L)/L \cdot i_L + Vi/L \qquad (2\text{-}39)$$

電流：$-C \cdot dVo/dt = Io = Vo/R$

$$\therefore \quad dVo/dt = -Vo/CR \qquad (2\text{-}40)$$



$$\begin{pmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dV_o}{dt} \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} -\frac{r_L+r_s}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{RC} \end{pmatrix}}_{A_1} \begin{pmatrix} i_L \\ v_o \end{pmatrix} + \underbrace{\begin{pmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{pmatrix}}_{B_1} V_i \qquad (2\text{-}41)$$

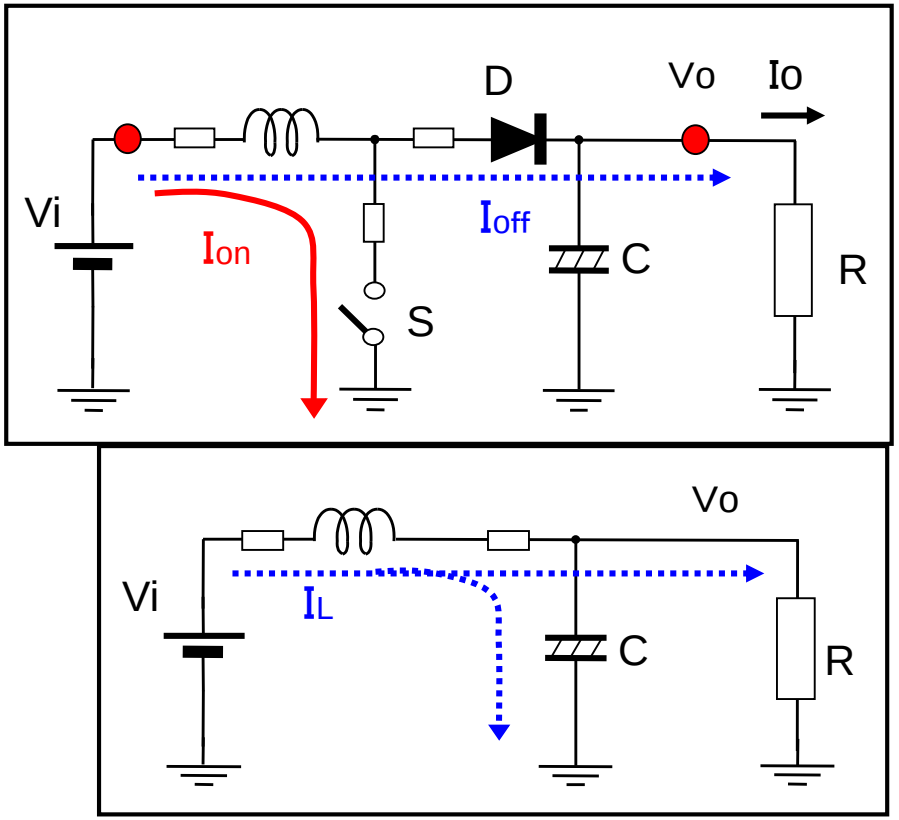
[状態Ⅱ：SW OFF]

電圧：$L \cdot di_L/dt = (Vi - Vo) - (r_d + r_L) \cdot i_L$

$\therefore\ di_L/dt = -(r_d + r_L)/L \cdot i_L + (Vi - Vo)/L$ (2-42)

電流：$i_L - Vo/R = C \cdot dV_o/dt$

$\therefore\ dV_o/dt = i_L/C - Vo/CR$ (2-43)



よって

$$\begin{pmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dV_o}{dt} \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} -\frac{r_L + r_d}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{pmatrix}}_{A_2} \begin{pmatrix} i_L \\ v_o \end{pmatrix} + \underbrace{\begin{pmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{pmatrix}}_{B_2} V_i \qquad (2\text{-}44)$$

＊状態平均化方程式（昇圧形電源）

２つのA、Bを、デューティに応じて　加算

$dX/dt=(DA_1+D'A_2)X+(DB_1+D'B_2)V_i = \boldsymbol{A}\cdot X+\boldsymbol{B}\cdot V_i$　より

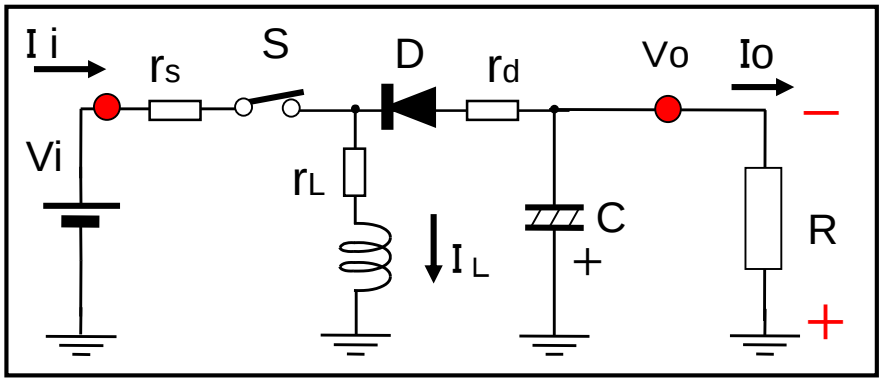
$$\boldsymbol{A}=D\begin{pmatrix}-\frac{r_L+r_s}{L} & 0\\ 0 & -\frac{1}{RC}\end{pmatrix}+D'\begin{pmatrix}-\frac{r_L+r_d}{L} & -\frac{1}{L}\\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC}\end{pmatrix}=\underline{\begin{pmatrix}-\frac{r}{L} & -\frac{D'}{L}\\ \frac{D'}{C} & -\frac{1}{RC}\end{pmatrix}}$$

ただし　$r=r_L+D\cdot r_s+D'\cdot r_d$

$$\boldsymbol{B}=D\begin{pmatrix}\frac{1}{L}\\ 0\end{pmatrix}+D'\begin{pmatrix}\frac{1}{L}\\ 0\end{pmatrix}=\underline{\begin{pmatrix}\frac{1}{L}\\ 0\end{pmatrix}}$$

(2-45)

3-3 昇降圧形電源の解析



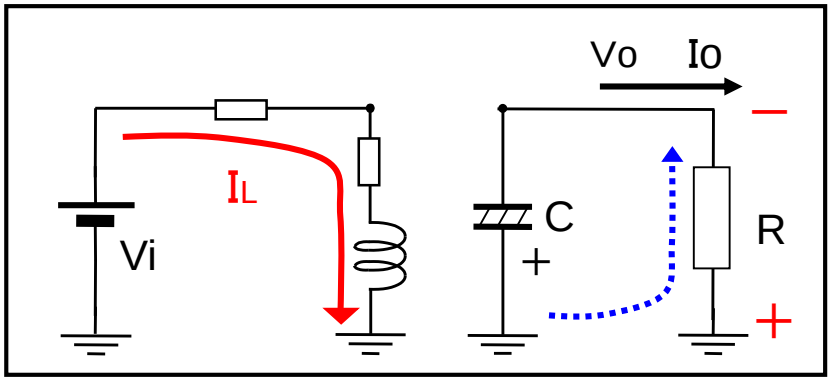
［状態Ⅰ：SW ON］

電圧: $L\cdot di_L/dt = V_i - (r_s+r_L)\cdot i_L$

$$\therefore \quad di_L/dt = -(r_s+r_L)/L\cdot i_L + V_i/L \qquad (2\text{-}45)$$

電流: $i_o = v_o/R = -C\cdot dV_o/dt$

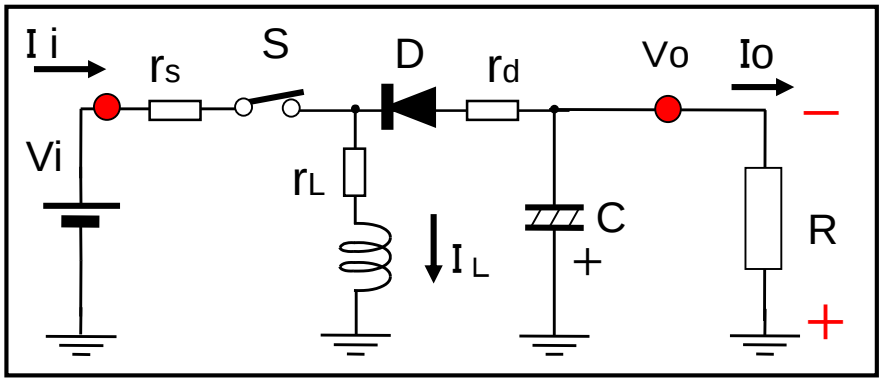
$$\therefore \quad dV_o/dt = -v_o/CR \qquad (2\text{-}46)$$



よって

$$\begin{pmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dv_o}{dt} \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} -\frac{r_L+r_s}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{RC} \end{pmatrix}}_{A_1} \begin{pmatrix} i_L \\ v_o \end{pmatrix} + \underbrace{\begin{pmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{pmatrix}}_{B_1} V_i \qquad (2\text{-}47)$$

[状態Ⅱ：SW OFF]

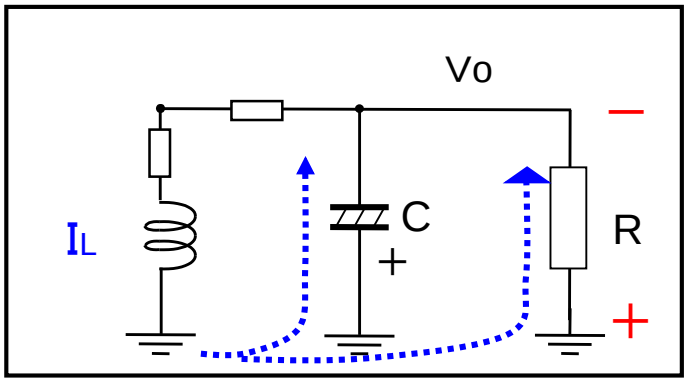


電圧：　$-L\cdot di_L/dt = V_o + (r_d + r_L)\cdot i_L$

$$\therefore \quad di_L/dt = -(r_d + r_L)/L \cdot i_L - V_o/L \qquad (2\text{-}48)$$

電流：　$i_L - V_o/R = C\cdot dV_o/dt$

$$\therefore \quad dV_o/dt = i_L/C - V_o/CR \qquad (2\text{-}49)$$



よって

$$\begin{pmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dv_o}{dt} \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} -\frac{r_L + r_d}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{pmatrix}}_{A_2} \begin{pmatrix} i_L \\ v_o \end{pmatrix} + \underbrace{\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}}_{B_2} V_i \qquad (2\text{-}50)$$

＊状態平均化方程式（昇降圧形電源）

$dX/dt=(DA_1+D'A_2)X+(DB_1+D'B_2)V_i = \boldsymbol{A}\cdot X+\boldsymbol{B}\cdot V_i$　より

$$\boldsymbol{A}=D\begin{pmatrix}-\frac{r_L+r_s}{L} & 0\\ 0 & -\frac{1}{RC}\end{pmatrix}+D'\begin{pmatrix}-\frac{r_L+r_d}{L} & -\frac{1}{L}\\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC}\end{pmatrix}=\underline{\begin{pmatrix}-\frac{r}{L} & -\frac{D'}{L}\\ \frac{D'}{C} & -\frac{1}{RC}\end{pmatrix}}$$

ただし　$r=r_L+D\cdot r_s+D'\cdot r_d$

$$\boldsymbol{B}=D\begin{pmatrix}\frac{1}{L}\\ 0\end{pmatrix}+D'\begin{pmatrix}0\\ 0\end{pmatrix}=\underline{\begin{pmatrix}\frac{D}{L}\\ 0\end{pmatrix}}$$

(2-51)

3-4 電源の諸特性解析(定常特性)

(1) 特性方程式:定常とは・・・ 状態変数・パラメータが不変

$$d\boldsymbol{X}/dt = \boldsymbol{A}\cdot\boldsymbol{X}+\boldsymbol{B}\cdot Vi = 0 \Rightarrow \therefore \boldsymbol{X} = -\boldsymbol{A}^{-1}\cdot\boldsymbol{B}\cdot Vi$$ (2-30)と同じ

【参考】逆行列の求め方(2×2):[余因子行列]/|行列式|

$$\boldsymbol{A}=\begin{pmatrix} a11 & a12 \\ a21 & a22 \end{pmatrix} \Rightarrow \boldsymbol{A}^{-1}=\frac{1}{\Delta}\begin{pmatrix} a22 & -a12 \\ -a21 & a11 \end{pmatrix} \quad B=\begin{pmatrix} b11 \\ 0 \end{pmatrix} \qquad (2\text{-}52)$$

＊行列式$\Delta = |\boldsymbol{A}| = a11\cdot a22 - a12\cdot a21$ (2-53)

●状態変数

$$X=\begin{pmatrix} i_L \\ V_c \end{pmatrix} = -\frac{1}{\Delta}\begin{pmatrix} a22 & -a12 \\ -a21 & a11 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} b11 \\ 0 \end{pmatrix} Vi = -\frac{Vi}{\Delta}\, b11 \begin{pmatrix} a22 \\ -a21 \end{pmatrix} \qquad (2\text{-}54)$$

●電圧変換率: $M=V_o/V_i = a21\cdot b11/\Delta$ (2-55)

（2）電圧変換率：M　　$M=V_o/V_i= a21\cdot b11 / \Delta$

● 降圧形

$$\mathbf{A}=\begin{pmatrix} -r/L & -1/L \\ 1/C & -1/RC \end{pmatrix} \quad \mathbf{A}^{-1}=\frac{1}{\Delta}\begin{pmatrix} -1/RC & 1/L \\ -1/C & -r/L \end{pmatrix} \quad B=\begin{pmatrix} D/L \\ 0 \end{pmatrix}$$

ただし　$\Delta=r/LCR+1/LC=(r+R)/LCR$

＊ $M=(1/C)\cdot(D/L)/\Delta=D/(1+r/R) = D/(1+Zo/R)$　　$Z_o=r$

(2-56)

● 昇圧形：

$$\mathbf{A}=\begin{pmatrix} -r/L & -D'/L \\ D'/C & -1/RC \end{pmatrix} \quad \mathbf{A}^{-1}=\frac{1}{\Delta}\begin{pmatrix} -1/RC & D'/L \\ -D'/C & -r/L \end{pmatrix} \quad B=\begin{pmatrix} 1/L \\ 0 \end{pmatrix}$$

ただし　$\Delta=r/LCR+D'^2/LC=(r+RD'^2)/LCR$

＊ $M=(D'/C)\cdot(1/L)\cdot\{LRC/(r+RD'^2)\}=(1/D')/(1+r/RD'^2)=\dfrac{1/D'}{1+Zo/R}$　　$Z_o=r/D'^2$

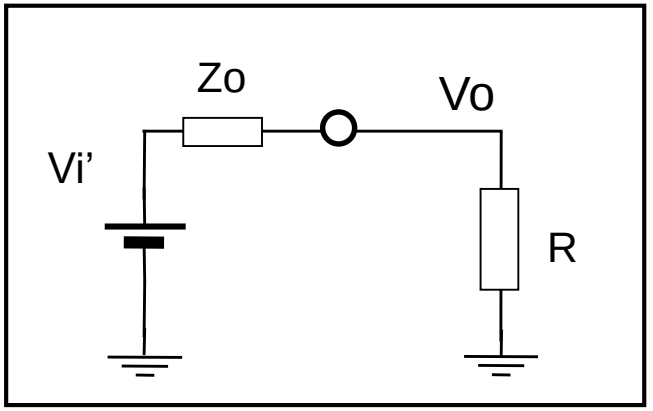
(2-57)

★ 電圧変換率Mの具体的意味（等価回路）

（2-56）より

$$M=\frac{Vo}{Vi}=\frac{D}{1+Zo/R}=\frac{R}{R+Zo}\cdot D$$

$$\therefore\quad Vo=\frac{R}{R+Zo}\cdot(D\cdot Vi)=\frac{R}{R+Zo}\cdot Vi'$$



● V’：等価電圧源、 Zo:等価内部抵抗、 R：負荷抵抗

● 各電源の等価内部抵抗

＊降圧型：　　$Z_o=r$

＊昇圧型=昇降圧型：　$Z_o=r/D'^2$

昇圧型では、「昇圧率Mの２乗」に比例して大きくなる（性能困難）

（3）各種リプル

1）出力電圧リプル率　：⊿Vo/Vo　・・・・定常リプル：電源性能

＊基本性能：小さくするのは容易だが、過渡応答特性とのバランス

2）コイル電流リプル　：⊿I_L　・・・・コイル損失（銅損、鉄損）、磁気飽和

＊$I_L = I_{LO} + \Delta I_L$　・・・　リプルが大きいと、導通損はどうなるか？

＊磁気飽和に注意：　ピーク電流増加で、L値が低下

⇒ 更に 電流増加（急激に電流が増加) ⇒ 発熱・炎上

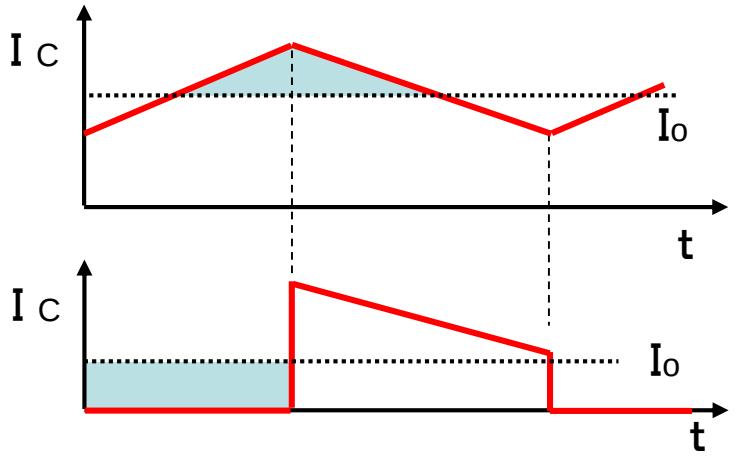
3）コンデンサ電流リプル：⊿Ic　・・・・内部抵抗損失ESR

＊ESRによる発熱　⇒　電解コンデンサでは、劣化・寿命短縮

化学的には、発熱によるガスの発生（爆発の危険性）

★ 出力電圧リプル率 : ⊿Vo/Vo

＊考え方1:コンデンサへのリプル電流
　　2:状態方程式を利用



● 降圧形:

Cへのチャージ電流:⊿Icの上側半分の積分

$$\Delta Vo = \frac{1}{C}\int \Delta ic\,dt = \frac{1}{C}\frac{1}{2}\frac{To}{2}\frac{\Delta ic}{2} = \frac{To\,\Delta ic}{8C} \qquad (2\text{-}69)$$

(2-67)より　$\Delta ic = (D'To/L)\{1+(rL+rd)/R\}Vo = (D'To/L)\{(R+r)/R\}Vo$

$$\therefore\ \Delta Vo/Vo = \frac{To}{8C}\frac{D'To}{L}\{(R+r)/R\} = \frac{D'To^2}{8LC} \qquad (2\text{-}70)$$

★ LC、F で充分小さくできる

● 昇圧形、昇降圧形:

＊基本式(2-40)(2-46)　dVo/dt=－Vo/CR（@TON）より　$|\Delta Vo/Vo| = \frac{D\cdot To}{CR}$

＊ Cへのチャージ電流（右上図）

$$\Delta Vo = \frac{1}{C}(Io\cdot DTo) = \frac{1}{C}\frac{Vo}{R}DTo \qquad \therefore |\Delta Vo/Vo| = \frac{D\cdot To}{CR} = \frac{D\cdot To\cdot Io}{CVo} \qquad (2\text{-}71)$$

4. 実装回路の作製に向けての注意

4-1　降圧形電源の作製（次ページ図）

（1）シミュレーションとの相違点・使用部品

＊性能の良し悪しは、GNDライン、部品の配置に依存（ﾊﾟﾙｽ性ﾉｲｽﾞ）
・回路作製前に、パワーステージ部のレイアウトを想定
パワー部のGNDラインは太く短く。制御部のGNDラインは分離。

＊入力端子-GND間の間近に、パスコン（電界C）100u～470uF を配置
・出力コンデンサを含め、電解コンデンサの極性注意！

＊理想スイッチを、P-MOSに置き換え：駆動回路が必要
最近は、同期駆動ICにより、N-MOS駆動が容易

＊MOS，Di には、パワー部品を使用（耐圧、電流容量に注意）
・高圧電源（入力50V以上）では、耐圧に注意

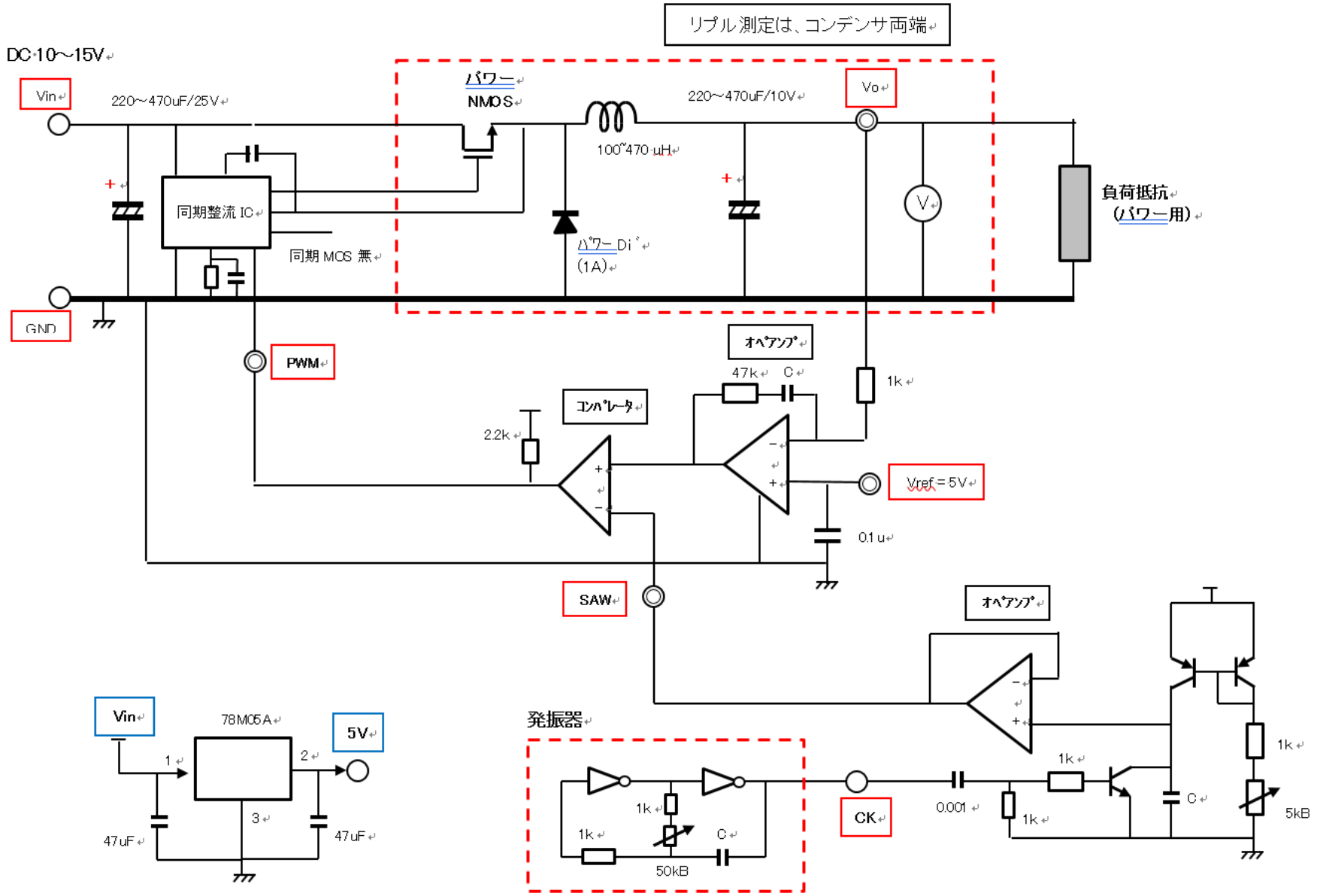
＊負荷抵抗＝パワー抵抗を使用。必ず「電力確認」：通常R=1/4 W

＊シミュレーションで指定したLCのESRは不要（部品に含まれている）

＊コンパレータ：出力形式（ｵｰﾌﾟﾝｺﾚｸﾀ）、入力ｲﾝﾋﾟｰﾀﾞﾝｽに注意

＊ICには必ず「ICソケット」を使用：IC交換が容易

●降圧形実装回路図（同期整流IC利用）



（2）回路作製と動作確認：シミュレーションのチェック順序と同じ

＊ブロック毎に作製し、動作チェックする方が好ましい

＊順序良く動作確認すること：パワーステージは要注意

⇒ 未チェックで動作させると、MOSを「破壊」することあり

★動作チェック用にテストポイントTPが必要：抵抗のリード線部でもOK

★回路の切断等による動作チェックが多数発生。ゆったり作る！

●回路作製時の基本的注意

＊回路作製時、ハンダコテ・工具は右側、線材・部品は左側

＊部品や切りくずは、ケース・金属皿に収納

＊基板周辺は常に「整理整頓清掃」：基板下に線材⇒ショート破壊

●動作チェック時の注意

＊電源投入前に、基板裏面のチェック⇒部品の足はカット済か？

＊基板裏面や周囲の「ハンダ・線材・部品は片付いているか？」

＊電源投入前に、チェック信号を確認しプローブを接続

＊オシロの設定はOKか？（ｽｷｬﾝ設定の位置・縦軸・時間軸等）

＊電源の場合、常に「出力電圧に電圧計を接続」

4-2 動作チェック＆性能改善

(1) 動作チェックの準備

＊PWM信号ラインをカットし、信号源の接続準備(GND間に抵抗接続)

・信号源の設定(周波数、デューティ50%、振幅:0-5 V)

・必ず、オシロで波形を確認(特に信号レベルに注意)

(2)パワーステージの動作チェック:負荷抵抗を接続

＊電源を投入してから、信号源を接続(ワニロクリップ使用)

＊電源投入時 Vo=0 V, 信号源接続で Vo=Vi/2 V

・NGの場合、下記の順序で確認:

MOSゲート信号⇒MOSドレイン波形⇒コイル電流

＊信号源のデューティをラフに変化 ⇒ Voも変化(Vo=D･Vi)

(3)オペアンプ･コンパレータの動作チェック

＊同様に、信号源Dを変化させ、VoがVr をL／Hに交差させる

⇒ ｵﾍﾟｱﾝﾌﾟ出力=H／L ⇒ ｺﾝﾊﾟﾚｰﾀ出力=H／L(D=大／小)に変化

(VoがVrより低下すると、PWMのDは大きくなる:負帰還の確認)

＊以上がOK ⇒ 信号源を外し、PWM信号を接続して確認

(4)出力電圧リプル⊿Vopp:最初は位相進みのCを削除

＊オペアンプのACゲインを確認:約30dB

＊ ⊿Vopp ≦ 10 mVpp に抑える : ACゲインを調整

＊位相遅れ補償:一般的に F=1kHz 強にCを設定(安定範囲)

(5)過渡応答特性の確認:負荷電流を2倍にON/OFF

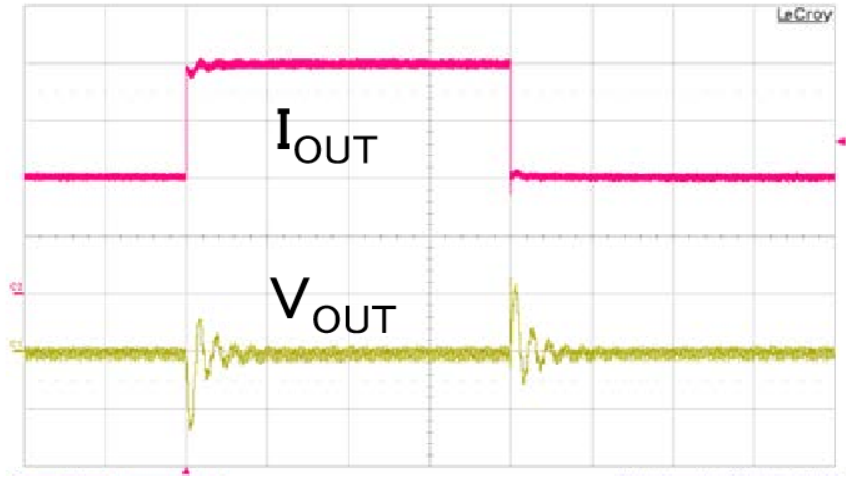
＊左図の場合:振動気味(位相余有が少ない)

・この程度の振動なら、位相進み補償で対処可能(右図)

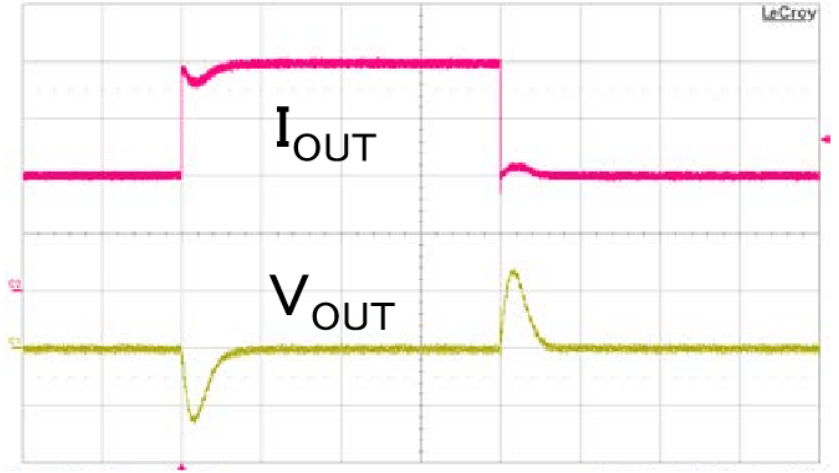
・振動周波数Frを読取り、Fcr=10･Frに設定。$R_2=R_1/10$ でOK

位相遅れ補償のC_F を再調整 (周波数を高める)

不良な過渡応答



良好な過渡応答



1）基本的な作製電源は、降圧形SW電源

2）必要に応じ、リプル制御、ソフトSW制御、LLC共振制御

3）新回路方式の確認には、シミュレーションで1月程度を要し、
　　実装確認には「動作確認に1月以上、性能測定に1月が必要」

4）実装回路乗数は、制御方式、制御周波数などに左右される

●最後に　技術者とは（修士学生に対する心構え）

1）回路が動作したと思ったときから、回路の詳細検討が始まる

2）本当に正しく動作しているか？　動作の詳細データを確認保存

3）動作の異常を発見したら、ここからが技術者！

4）まずは　誤動作の原因は何か？　まず、自分で考えて調べる！

5）原因を究明したら ⇒ 対策を自分で考え、先輩に相談する！

6）対策回路を考える ⇒ 自分の考えをまとめて、先輩と検討する！

以上