

スイッチングレギュレータ IC シリーズ

# 降圧コンバータ IC のインダクタ計算

No.12027JCY01

このアプリケーションノートは、降圧スイッチングレギュレータ IC 回路に必要なインダクタの選択と値の計算について説明します。

●降圧型コンバータ

Fig. 1 は降圧型コンバータの基本回路で、スイッチング素子 Q1 が ON している状態を示します。N-ch MOSFET Q1 が ON している時は、電流が入力  $V_{IN}$  からコイル L を通り出力平滑コンデンサ  $C_o$  を充電し、出力電流  $I_o$  が供給されます。このときコイル L に流れる電流が磁界を生み、電気エネルギーが磁気エネルギーへと変換され蓄積されます。

Fig. 2 はスイッチング素子 Q1 が OFF している状態を示します。Q1 が OFF するとフリーホイールダイオード  $D_1$  が ON し、L に蓄積されたエネルギーが出力側へ放出されます。

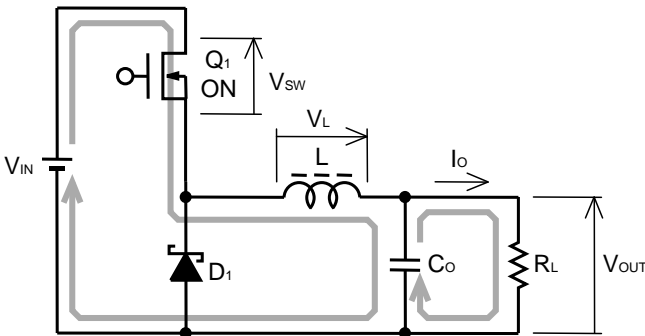


Fig.1 降圧型コンバータの基本回路  
スイッチング素子が ON の時

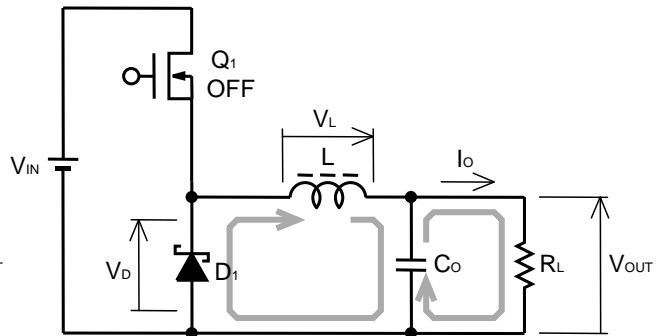


Fig.2 降圧コンバータの基本回路  
スイッチング素子が OFF の時

●インダクタの電流波形

Fig. 3 はインダクタに流れる電流波形です。IOUT はインダクタ電流の平均値です。スイッチング素子 Q1 が ON の時コイル L に流れる電流は、Q1 が ON している期間  $t_{ON}$  に、コイル L に加わる電圧  $V_{L(ON)}$  は Fig.1 より次式で表せます。

$$V_{L(ON)} = -(V_{IN} - V_{SW} - V_{OUT}) \quad (1)$$

$V_{IN}$  : 入力電圧 [V]  
 $V_{SW}$  : Q1 が ON 時の電圧降下 [V]  
 $V_{OUT}$  : 出力電圧 [V]

自己インダクタンスをもつコイル L の電圧  $V_L$  と電流  $I_L$  の関係は次式で表されます。

$$V_L = -L \frac{dI_L}{dt} \quad (2)$$

式(2)から一定の電圧をインダクタへ加えると、電圧と逆方向の電流が  $V/L$  の傾きで増加することが判ります。

$t_{ON}$  間にコイルに流れる電流変化量は、スイッチング素子 Q1 が ON する直前の電流を  $I_{LT}$ 、スイッチング素子 Q1 が OFF する直前の電流を  $I_{LP}$  とすると、式(1)と式(2)より次式で表されます。

$$I_{LP} - I_{LT} = -\frac{(V_{SW} - V_{IN} + V_{OUT}) \times t_{ON}}{L} \quad (3)$$

次にスイッチング素子 Q1 が OFF 時コイル L に流れる電流を求めます。

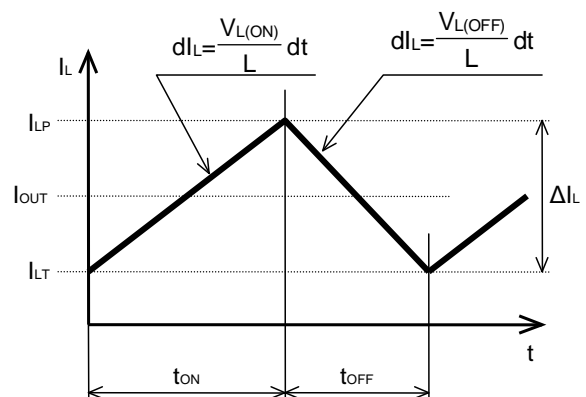


Fig.3 インダクタに流れる電流波形

Q1 が OFF 時にコイル L に加わる電圧  $V_{L(OFF)}$  は Fig. 2 より、次式で表せます。

$$V_{L(OFF)} = V_D + V_{OUT} \quad (4)$$

$V_D$  : D1 の順方向電圧降下 [V]

$V_{OUT}$  : 出力電圧 [V]

式(2)と(4)から、OFF 期間にコイル L に流れる電流変化量は、

$$I_{LP} - I_{LT} = \frac{(V_D + V_{OUT}) \times t_{OFF}}{L} \quad (5)$$

コイル L に流れる電流の電荷量は、出力電流の電荷量とほぼ等しいため次式が成り立ちます。

$$I_{LP} + I_{LT} = 2 \times I_{OUT} \quad (6)$$

式(3)と(6)から ON 期間の  $I_{LP}$  を求めると、

$$I_{LP} = I_{OUT} + \frac{(V_{IN} - V_{SW} - V_{OUT}) \times t_{ON}}{2 \times L} \quad (7)$$

式(5)と(6)から OFF 期間の  $I_{LP}$  を求めると次式が成り立ちます。

$$I_{LP} = I_{OUT} + \frac{(V_D + V_{OUT}) \times t_{OFF}}{2 \times L} \quad (8)$$

#### ●オンデューティ算出

オンデューティは、スイッチング発振周期  $T_{SW}$  に対してスイッチング素子が ON している時間  $t_{ON}$  の比率を示したもので次のように表せます。

$$D = \frac{t_{ON}}{T_{SW}} = \frac{t_{ON}}{t_{ON} + t_{OFF}} = t_{ON} \times f_{SW} = 1 - (t_{OFF} \times f_{SW}) \quad (9)$$

式(7)、(8)、(9)から D を求めると次式になります。

$$D = \frac{V_D + V_{OUT}}{V_{IN} - V_{SW} + V_D} \quad (10)$$

式(10)においてスイッチング素子の電圧降下  $V_{SW}$  やダイオードによる電圧降下を無視すれば、オンデューティは入力電圧と出力電圧の比で決まることが判ります。

$$D \cong \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} \quad (11)$$

#### ●コイル電流の最大値

式(9)と(10)から  $t_{ON}$  を求めると次式になります。

$$t_{ON} = \frac{D}{f_{SW}} = \frac{V_D + V_{OUT}}{(V_{IN} - V_{SW} + V_D) \times f_{SW}} \quad (12)$$

式(12)を式(7)に代入してコイル L に流れる電流の最大値  $I_{LP}$  を求めると次式になります。

$$I_{LP} = I_{OUT} + \frac{(V_{IN} - V_{SW} - V_{OUT}) \times (V_D + V_{OUT})}{(V_{IN} - V_{SW} + V_D) \times 2 \times L \times f_{SW}} \quad (13)$$

式(13)を式(6)に代入してコイル L に流れる電流の最小値  $I_{LT}$  を求めると次式になります。

$$I_{LT} = I_{OUT} - \frac{(V_{IN} - V_{SW} - V_{OUT}) \times (V_D + V_{OUT})}{(V_{IN} - V_{SW} + V_D) \times 2 \times L \times f_{SW}} \quad (14)$$

電流の変化分 ( $I_{LP} - I_{LT}$ ) は次式になります。

$$(I_{LP} - I_{LT}) = \frac{(V_{IN} - V_{SW} - V_{OUT}) \times (V_D + V_{OUT})}{(V_{IN} - V_{SW} + V_D) \times L \times f_{SW}} \quad (15)$$

式(13)及び式(15)より最大電流と電流変化分はLが大きく、スイッチング周波数が高いほど電流値が小さくなることが判ります。

### ●インダクタンス値の算出

コイルLに流れる電流の変化分 ( $I_{LP} - I_{LT}$ ) と出力電流  $I_{OUT}$  との比を電流リップル比  $r$  とします。

$$r = \frac{\Delta I_L}{I_{OUT}} = \frac{I_{LP} - I_{LT}}{I_{OUT}} \quad (16)$$

式(15)を式(16)に代入すると、

$$r = \frac{(V_{IN} - V_{SW} - V_{OUT}) \times (V_D + V_{OUT})}{(V_{IN} - V_{SW} + V_D) \times f_{SW} \times L \times I_{OUT}} \quad (17)$$

式(17)からLを求めると次式になります。

$$L = \frac{(V_{IN} - V_{SW} - V_{OUT}) \times (V_D + V_{OUT})}{(V_{IN} - V_{SW} + V_D) \times f_{SW} \times r \times I_{OUT}} \quad [H] \quad (18-1)$$

出力電圧  $V_{OUT}$  が高い場合は計算を簡略化できます。

$$L = \frac{(V_{IN} - V_{OUT}) \times V_{OUT}}{V_{IN} \times f_{SW} \times r \times I_{OUT}} \quad [H] \quad (18-2)$$

$r$  を小さくするにはインダクタンスを大きくして  $\Delta I_L$  を抑えれば良いのですが、インダクタが大きくなり実用的でなくなるため、降圧型コンバータでは通常 0.2~0.5 の範囲に設定します。

### ●コイルに流れる最大電流

コイルに流れる最大電流は次式で求められます。

$$I_{Lpeak} = I_{OUT} + \frac{r \times I_{OUT}}{2} \quad [A] \quad \text{または} \quad = I_{OUT} + \frac{V_{OUT} \times (V_{IN} - V_{OUT})}{2 \times V_{IN} \times f_{SW} \times L} \quad [A] \quad (19)$$

コイルに流れる電流は、出力電流 + リップル電流です。出力ショートなどの障害発生時、負荷過渡状態中、ソフトスタート機能がないICの場合にはパワーアップ時に、インダクタ電流が上記で計算された最大電流を超える場合があります。過渡状態では、コイル電流がICのスイッチ電流制限値まで増加する場合があります。そのため最も安全な方法は、最大コイル電流ではなくスイッチ電流制限値以上の飽和電流定格を持つインダクタを指定することです。

### ●コイルに流れる実効電流

三角波の実効値は次式で表されます。

$$I_{Lrms} = \sqrt{\frac{I_{LP}^2 + I_{LT}^2 + I_{LP} \times I_{LT}}{3}} \quad (20)$$

式(13)と式(14)を式(20)に代入すると次式ようになります。

$$I_{Lrms} = \sqrt{I_{OUT}^2 + \frac{1}{12} \times \left( \frac{(V_{IN} - V_{SW} - V_{OUT}) \times (V_D + V_{OUT})}{(V_{IN} - V_{SW} + V_D) \times L \times f_{SW}} \right)^2} \quad [A] \quad (21)$$

●コイルの選定例

始めに降圧型コンバータの動作条件を示します。

- 入力電圧： $V_{IN} = 12V$
- 出力電圧： $V_{OUT} = 3.3V$
- 出力電流： $I_{OUT} = 2A$
- 出力電流リップル比： $r = 0.3$
- スwitching素子  $Q_1$  が ON 時の電圧降下： $V_{sw} = 0.30$
- フリーホイールダイオードの順方向電圧降下： $V_D = 0.26$
- 同期整流の場合は、下側スitching素子  $Q_2$  が ON 時の電圧降下 (Fig. 4)
- スwitching周波数： $f_{sw} = 380kHz$

式(18-1)または(18-2)にパラメータを代入し、コイルのインダクタ値を求めます。

$$\text{式(18-1)より、} L = \frac{(12 - 0.30 - 3.3) \times (0.26 + 3.3)}{(12 - 0.30 + 0.26) \times 380000 \times 0.3 \times 2} = 10.663 \text{ } [\mu H]$$

$$\text{式(18-2)より、} L = \frac{(12 - 3.3) \times 3.3}{12 \times 380000 \times 0.3 \times 2} = 10.493 \text{ } [\mu H]$$

コイルに流れる最大電流は式(19)より、

$$I_{Lpeak} = I_{OUT} + \frac{r \times I_{OUT}}{2} = 2 + \frac{0.3 \times 2}{2} = 2.3 \text{ } [A]$$

コイルに流れる実効定格電流は式(21)より、

$$I_{Lrms} = \sqrt{2^2 + \frac{1}{12} \times \left( \frac{(12 - 0.30 - 3.3) \times (0.26 + 3.3)}{(12 - 0.30 + 0.26) \times 10.663 \times 10^{-6} \times 380000} \right)^2} = 2.008 \text{ } [A]$$

計算で求めた値を満足するコイルを選定します。この設計の場合、最も近い標準値として  $10\mu H$  を選択します。選択したインダクタ値が計算と異なる場合は、式(17)から電流リップル値  $r$  を計算し、その値を式(19)に代入して再度コイルに流れる最大電流を求めます。

$$r = \frac{(12 - 0.30 - 3.3) \times (0.26 + 3.3)}{(12 - 0.30 + 0.26) \times 380000 \times 10 \times 10^{-6} \times 2} = 0.329$$

$$I_{Lpeak} = 2 + \frac{0.329 \times 2}{2} = 2.33 \text{ } [A]$$

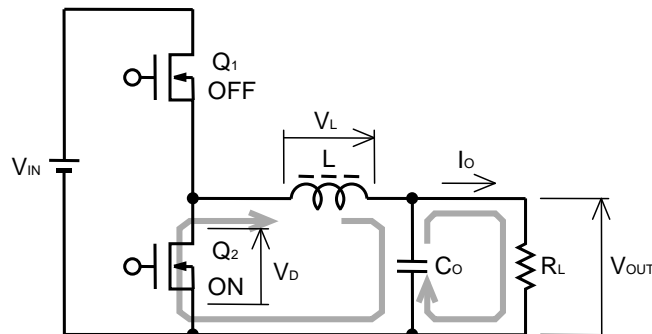


Fig. 4 同期整流型 降圧コンバータの基本回路  
上側スitching素子が OFF の時

## ご 注 意

本資料の一部または全部をロームの許可なく、転載・複写することを堅くお断りします。

本資料の記載内容は改良などのため予告なく変更することがあります。

本資料に記載されている内容は製品のご紹介資料です。ご使用にあたりましては、別途仕様書を必ずご請求のうえ、ご確認ください。

本資料に記載されております応用回路例やその定数などの情報につきましては、本製品の標準的な動作や使い方を説明するものです。したがって、量産設計をされる場合には、外部諸条件を考慮していただきますようお願いいたします。

本資料に記載されております情報は、正確を期すため慎重に作成したものです。万が一、当該情報の誤り・誤植に起因する損害がお客様に生じた場合においても、ロームはその責任を負うものではありません。

本資料に記載されております技術情報は、製品の代表的動作および応用回路例などを示したものであり、ロームまたは他社の知的財産権その他のあらゆる権利について明示的にも黙示的にも、その実施または利用を許諾するものではありません。上記技術情報の使用に起因して紛争が発生した場合、ロームはその責任を負うものではありません。

本資料に掲載されております製品は、一般的な電子機器（AV機器、OA機器、通信機器、家電製品、アミューズメント機器など）への使用を意図しています。

本資料に掲載されております製品は、「耐放射線設計」はなされていません。

ロームは常に品質・信頼性の向上に取り組んでおりますが、種々の要因で故障することもあり得ます。

ローム製品が故障した際、その影響により人身事故、火災損害等が起こらないようご使用機器でのディレーティング、冗長設計、延焼防止、フェイルセーフ等の安全確保をお願いします。定格を超えたご使用や使用上の注意書が守られていない場合、いかなる責任もロームは負うものではありません。

極めて高度な信頼性が要求され、その製品の故障や誤動作が直接人命を脅かしあるいは人体に危害を及ぼすおそれのある機器・装置・システム（医療機器、輸送機器、航空宇宙機、原子力制御、燃料制御、各種安全装置など）へのご使用を意図して設計・製造されたものではありません。上記特定用途に使用された場合、いかなる責任もロームは負うものではありません。上記特定用途への使用を検討される際は、事前にローム営業窓口までご相談願います。

本資料に記載されております製品および技術のうち「外国為替及び外国貿易法」に該当する製品または技術を輸出する場合、または国外に提供する場合には、同法に基づく許可が必要です。



ローム製品のご検討ありがとうございます。  
より詳しい資料やカタログなどご用意しておりますので、お問合せください。

## ROHM Customer Support System

<http://www.rohm.co.jp/contact/>