

スイッチングレギュレータ IC シリーズ

降圧コンバータの効率

スイッチングレギュレータは効率が良い電源として広く知られていますが、より良い効率を得るためには基本的な電力損失のメカニズムを知ることが役立ちます。このアプリケーションノートは、電力損失の要素と算出方法について説明し、スイッチング電源の仕様によって損失する部分の比重が変化する様子を見て行きます

同期整流型

Figure 1 は同期整流タイプ DC/DC コンバータの回路図です。Figure 2 はスイッチノードの電圧波形とインダクタ電流波形で、損失が発生する部分を縞模様で表しています。

電力損失は主に以下に示す 9 つの要因があります。

1. MOSFET のオン抵抗による伝導損失 P_{ON-H}, P_{ON-L}
2. MOSFET のスイッチング損失 P_{SW-H}, P_{SW-L}
3. ボディーダイオードの逆回復損失 P_{DIODE}
4. MOSFET の出力容量損失 P_{COSS}
5. デッドタイム損失 P_D
6. MOSFET のゲート電荷損失 P_G
7. IC の制御回路による動作損失 P_{IC}
8. インダクタの伝導損失 $P_{L(DCR)}$
9. コンデンサの損失 P_{CIN}, P_{COUT}

MOSFET の伝導損失

MOSFET の伝導損失は Figure 2 波形の A 区間と B 区間で計算されます。A 区間はハイサイド MOSFET がオン、ローサイド MOSFET がオフになり、出力電流とオン抵抗およびオンデューティサイクルから概算できます。B 区間はハイサイド MOSFET がオフ、ローサイド MOSFET がオンになり、出力電流とオン抵抗およびオフデューティサイクルから概算できます。

伝導損失 P_{ON-H} と P_{ON-L} は次式で求められます。

ハイサイド MOSFET

$$P_{ON-H} = I_{OUT}^2 \times R_{ON-H} \times \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} \quad [W] \quad (1)$$

ローサイド MOSFET

$$P_{ON-L} = I_{OUT}^2 \times R_{ON-L} \times \left(1 - \frac{V_{OUT}}{V_{IN}}\right) \quad [W] \quad (2)$$

I_{OUT} : 出力電流 [A]

R_{ON-H} : ハイサイド MOSFET オン抵抗 [Ω]

R_{ON-L} : ローサイド MOSFET オン抵抗 [Ω]

V_{IN} : 入力電圧 [V]

V_{OUT} : 出力電圧 [V]

式(1)および(2)は、電流値として出力電流を使用しています。これはインダクタの平均電流であり、Figure 2 下部の様に実際のランプ波形ではより多くの損失を作り出します。電流波形が、より尖っている(ピーク電流が大きい)場合は、電流の頂点と谷の差分電流の 2 乗を積分することで実効電流となり、より詳しく計算ができます。

伝導損失 P_{ON-H} と P_{ON-L} は次式で求められます。

ハイサイド MOSFET

$$P_{ON-H} = \left[I_{OUT}^2 + \frac{(I_P - I_V)^2}{12} \right] \times R_{ON-H} \times \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} \quad [W] \quad (3)$$

ローサイド MOSFET

$$P_{ON-L} = \left[I_{OUT}^2 + \frac{(I_P - I_V)^2}{12} \right] \times R_{ON-L} \times \left(1 - \frac{V_{OUT}}{V_{IN}}\right) \quad [W] \quad (4)$$

$$\Delta I_L = \frac{(V_{IN} - V_{OUT})}{f_{SW} \times L} \times \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} \quad [A]$$

$$I_P = I_{OUT} + \frac{\Delta I_L}{2} \quad [A]$$

$$I_V = I_{OUT} + \frac{\Delta I_L}{2} \quad [A]$$

I_{OUT} : 出力電流 [A]
 I_P : インダクタ電流のピーク [A]
 I_V : インダクタ電流の谷 [A]
 R_{ON-H} : ハイサイド MOSFET オン抵抗 [Ω]
 R_{ON-L} : ローサイド MOSFET オン抵抗 [Ω]
 V_{IN} : 入力電圧 [V]
 V_{OUT} : 出力電圧 [V]
 ΔI_L : インダクタのリップル電流 [A]
 f_{SW} : スイッチング周波数 [Hz]
 L : インダクタンス値 [H]

t_{r-L} : ローサイド MOSFET 立ち上がり時間 [sec]
 t_{f-L} : ローサイド MOSFET 立ち上がり時間 [sec]
 f_{SW} : スイッチング周波数 [Hz]

MOSFET のスイッチング損失

スイッチング損失は Figure 2 波形の C、D 区間と E、F 区間で計算されます。ハイサイド、ローサイド MOSFET が交互にオンオフする時、オン切り替えの遷移中に損失が発生します。2 つの三角形の面積を求める式が、立ち上がり、立ち下がり遷移中の電力損失の計算式に似ているため、この計算は単純な図形計算で近似できます。

スイッチング損失 P_{SW-H} は次式で求められます。

ハイサイド MOSFET

$$P_{SW-H} = \frac{1}{2} \times V_{IN} \times I_{OUT} \times (t_{r-H} + t_{f-H}) \times f_{SW} \quad [W] \quad (5)$$

V_{IN} : 入力電圧 [V]
 I_{OUT} : 出力電流 [A]
 t_{r-H} : ハイサイド MOSFET 立ち上がり時間 [sec]
 t_{f-H} : ハイサイド MOSFET 立ち下がり時間 [sec]
 f_{SW} : スイッチング周波数 [Hz]

ローサイド MOSFET は、ボディダイオードが通電している間のゲート電圧でターンオンし、次にゲート電圧で FET をターンオフすると、負荷電流はボディダイオードを通して同じ方向に流れ続けるため、ドレイン電圧はボディダイオードの順方向電圧と等しくなり低電圧にとどまります。そのためスイッチング損失 P_{SWL} は次式の様にごく僅かです。

ローサイド MOSFET

$$P_{SW-L} = \frac{1}{2} \times V_D \times I_{OUT} \times (t_{r-L} + t_{f-L}) \times f_{SW} \quad [W] \quad (6)$$

V_D : ローサイド MOSFET の
 ボディダイオード順方向電圧 [V]
 I_{OUT} : 出力電流 [A]

ボディダイオードの逆回復損失

ハイサイド MOSFET がオンした時、ローサイド MOSFET のボディダイオードが順方向から逆バイアス状態へ遷移する時にダイオードを回復させるため、ボディダイオード逆回復損失が生じます。この損失はダイオードの逆回復時間 t_{RR} で決まります。ダイオードの逆回復特性より損失は次式で求められます。

$$P_{DIODE} = \frac{1}{2} \times V_{IN} \times I_{RR} \times t_{RR} \times f_{SW} \quad [W] \quad (7)$$

V_{IN} : 入力電圧 [V]
 I_{RR} : ボディダイオード逆回復電流のピーク値 [A]
 t_{RR} : ボディダイオード逆回復時間
 f_{SW} : スイッチング周波数 [Hz]

MOSFET の出力容量損失

各スイッチングサイクルで、ハイサイドおよびローサイド MOSFET の出力容量 C_{OSS} を充電するため損失が生じます。この損失は次式で求められます。

$$P_{COSS} = \frac{1}{2} \times (C_{OSS-L} + C_{OSS-H}) \times V_{IN}^2 \times f_{SW} \quad [W] \quad (8)$$

$$C_{OSS-L} = C_{DS-L} + C_{GD-L} \quad [F]$$

$$C_{OSS-H} = C_{DS-H} + C_{GD-H} \quad [F]$$

C_{OSS-L} : ローサイド MOSFET 出力容量 [F]
 C_{DS-L} : ローサイド MOSFET ドレイン・ソース間容量 [F]
 C_{GD-L} : ローサイド MOSFET ゲート・ドレイン間容量 [F]
 C_{OSS-H} : ハイサイド MOSFET 出力容量 [F]
 C_{DS-H} : ハイサイド MOSFET ドレイン・ソース間容量 [F]
 C_{GD-H} : ハイサイド MOSFET ゲート・ドレイン間容量 [F]
 V_{IN} : 入力電圧 [V]
 f_{SW} : スイッチング周波数 [Hz]

デッドタイム損失

ハイサイドとローサイド MOSFET が同時にオンすると、VIN – GND 間が短絡し非常に大きな電流スパイクが発生します。これを防止するため両 MOSFET をオフにするデッドタイムを設けますが、インダクタ電流は連続して流れます。デッドタイム中はこのインダクタ電流はローサイド MOSFET のボディダイオードへ流れます。デッドタイム損失 P_D は Figure 2 波形の G 区間と H 区間で計算され、次式で求められます。

$$P_D = V_D \times I_{OUT} \times (t_{Dr} + t_{Df}) \times f_{SW} \quad [W] \quad (9)$$

V_D : ローサイド MOSFET の
ボディダイオード順方向電圧 [V]

I_{OUT} : 出力電流 [A]

t_{Dr} : 立ち上がり時デッドタイム [sec]

t_{Df} : 立ち下がり時デッドタイム [sec]

f_{SW} : スイッチング周波数 [Hz]

ゲート電荷損失

ゲート電荷損失は MOSFET のゲートの充電に起因する電力損失です。ハイサイドおよびローサイド MOSFET のゲート電荷量 (またはゲート容量) に依存し、ゲート電荷損失は次式で求められます。

$$P_G = (Q_{g-H} + Q_{g-L}) \times V_{gs} \times f_{SW} \quad [W] \quad (10)$$

または

$$P_G = (C_{GS-H} + C_{GS-L}) \times V_{gs}^2 \times f_{SW} \quad [W] \quad (11)$$

Q_{g-H} : ハイサイド MOSFET のゲート電荷量 [C]

Q_{g-L} : ローサイド MOSFET のゲート電荷量 [C]

C_{GS-H} : ハイサイド MOSFET のゲート容量 [F]

C_{GS-L} : ローサイド MOSFET のゲート容量 [F]

V_{gs} : ゲート駆動電圧 [V]

f_{SW} : スイッチング周波数 [Hz]

IC の動作損失

IC の制御回路による消費電力 P_{IC} は次式で求められます。

$$P_{IC} = V_{IN} \times I_{CC} \quad [W] \quad (12)$$

V_{IN} : 入力電圧 [V]

I_{CC} : IC の消費電流 [A]

インダクタの伝導損失

インダクタの電力損失は、抵抗による伝導損失と、磁気的特性によって決定されるコア損失があります。コア損失の計算は複雑なため、本書では取り扱いません。

伝導損失は、インダクタを形成する巻線の DC 抵抗(DCR)により生じます。DCR は線の長さが長いほど増加し、線の断面積が大きいほど減少します。インダクタ部品に当てはめると、DCR はインダクタンス値が大きいほど増加し、ケースサイズ大きいほど減少します。

インダクタの伝導損失は次式で概算することができます。インダクタは常に導通しているためデューティには影響されません。電力損失が電流の2乗に比例するため、出力電流が高い場合は損失が大きくなります。このためインダクタの選択は重要になります。

$$P_{L(DCR)} = I_{OUT}^2 \times DCR \quad [W] \quad (13)$$

I_{OUT} : 出力電流 [A]

DCR : インダクタの直流抵抗 [Ω]

この式は出力電流を使用しているため、インダクタの平均電流で計算しています。前述の MOSFET 伝導損失の計算と同様に、インダクタ電流をランプ波形で計算することでより詳しく計算できます。

$$P_{L(DCR)} = \left[I_{OUT}^2 + \frac{(I_P - I_V)^2}{12} \right] \times DCR \quad [W] \quad (14)$$

I_{OUT} : 出力電流 [A]

I_P : インダクタ電流のピーク [A]

I_V : インダクタ電流の谷 [A]

DCR : インダクタの直流抵抗 [Ω]

コンデンサの損失

コンデンサの損失は、直列抵抗、リーク、誘電損失など複数の損失が発生しますが、一般的な損失モデルは等価直列抵抗(ESR)に簡略化されています。コンデンサの電力損失は、コンデンサに流れる AC 電流の RMS 値の2乗と ESR の積により計算されます。

$$P_{CAP(ESR)} = I_{CAP(RMS)}^2 \times ESR \quad [W] \quad (15)$$

$I_{CAP(RMS)}$: コンデンサの RMS 電流 [A]

ESR : コンデンサの等価直列抵抗 [Ω]

入力コンデンサの RMS 電流は複雑ですが次式で概算できません。

$$I_{CIN(RMS)} = I_{OUT} \times \frac{\sqrt{(V_{IN} - V_{OUT}) \times V_{OUT}}}{V_{IN}} \quad [A] \quad (16)$$

V_{IN} : 入力電圧 [V]

V_{OUT} : 出力電圧 [V]

I_{OUT} : 出力電流 [A]

出力コンデンサの RMS 電流はインダクタのリプル電流の RMS 値で、次式で計算されます。

$$I_{COUT(RMS)} = \frac{\Delta I_L}{2\sqrt{3}} \quad [A] \quad (17)$$

ΔI_L : インダクタのリプル電流 [A]

$$\Delta I_L = \frac{(V_{IN} - V_{OUT})}{f_{SW} \times L} \times \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} \quad [A] \quad (18)$$

V_{IN} : 入力電圧 [V]

V_{OUT} : 出力電圧 [V]

f_{SW} : スイッチング周波数 [Hz]

L : インダクタンス値 [H]

式(16)と(17)の RMS 電流をそれぞれ式(15)へ代入し、入力コンデンサの損失 P_{CIN} と出力コンデンサの損失 P_{COUT} を計算します。

全電力損失

IC の電力損失 P は、これら全てを足した値になります。

$$P = P_{ON-H} + P_{ON-L} + P_{SW-H} + P_{SW-L} + P_{DIODE} + P_{COSS} + P_D + P_G + P_{IC} + P_{L(DCR)} + P_{CIN} + P_{COUT} \quad [W] \quad (19)$$

P_{ON-H} : ハイサイド MOSFET 伝導損失 [W]

P_{ON-L} : ローサイド MOSFET 伝導損失 [W]

P_{SW-H} : ハイサイド MOSFET スイッチング損失 [W]

P_{SW-L} : ローサイド MOSFET スイッチング損失 [W]

P_{DIODE} : ボディーダイオード逆回復損失 [W]

P_{COSS} : MOSFET 出力容量損失 [W]

P_D : デッドタイム損失 [W]

P_G : ゲート電荷損失 [W]

P_{IC} : IC の動作損失 [W]

$P_{L(DCR)}$: インダクタの伝導損失 [W]

P_{CIN} : 入力コンデンサの損失 [W]

P_{COUT} : 出力コンデンサの損失 [W]

効率

全電力損失が求まったので効率は次式で計算できます。

$$\eta = \frac{V_{OUT} \times I_{OUT}}{V_{OUT} \times I_{OUT} + P} \quad (20)$$

V_{OUT} : 出力電圧 [V]

I_{OUT} : 出力電流 [A]

P : 全電力損失 [W]

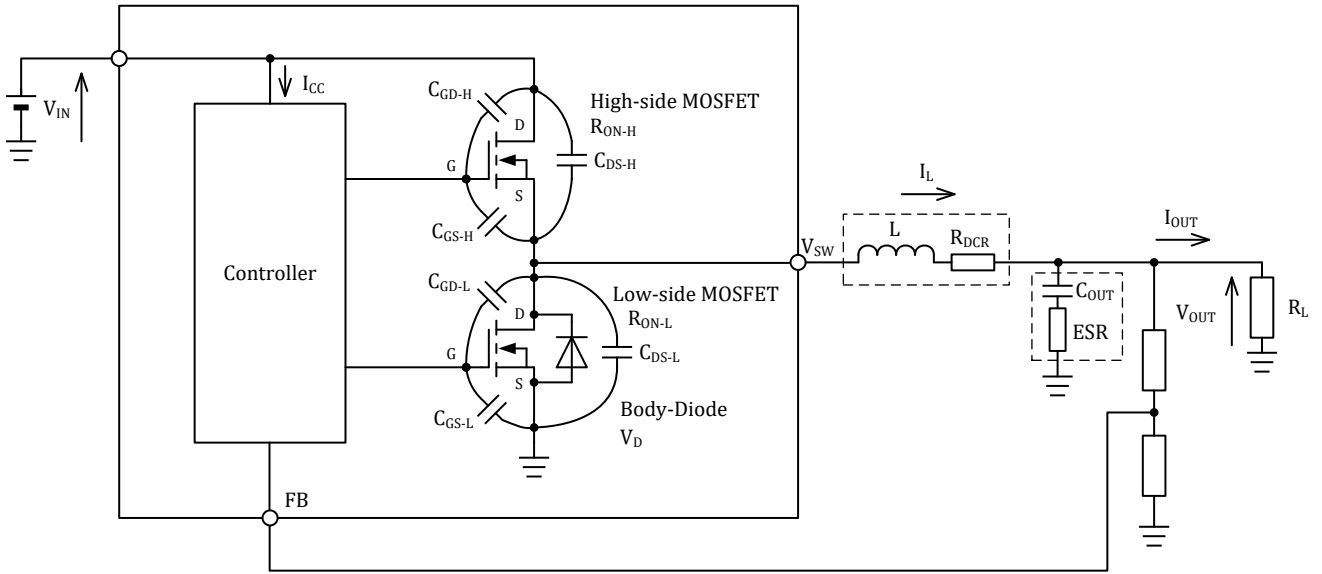


Figure 1. 同期整流タイプ DC/DC コンバータ回路図

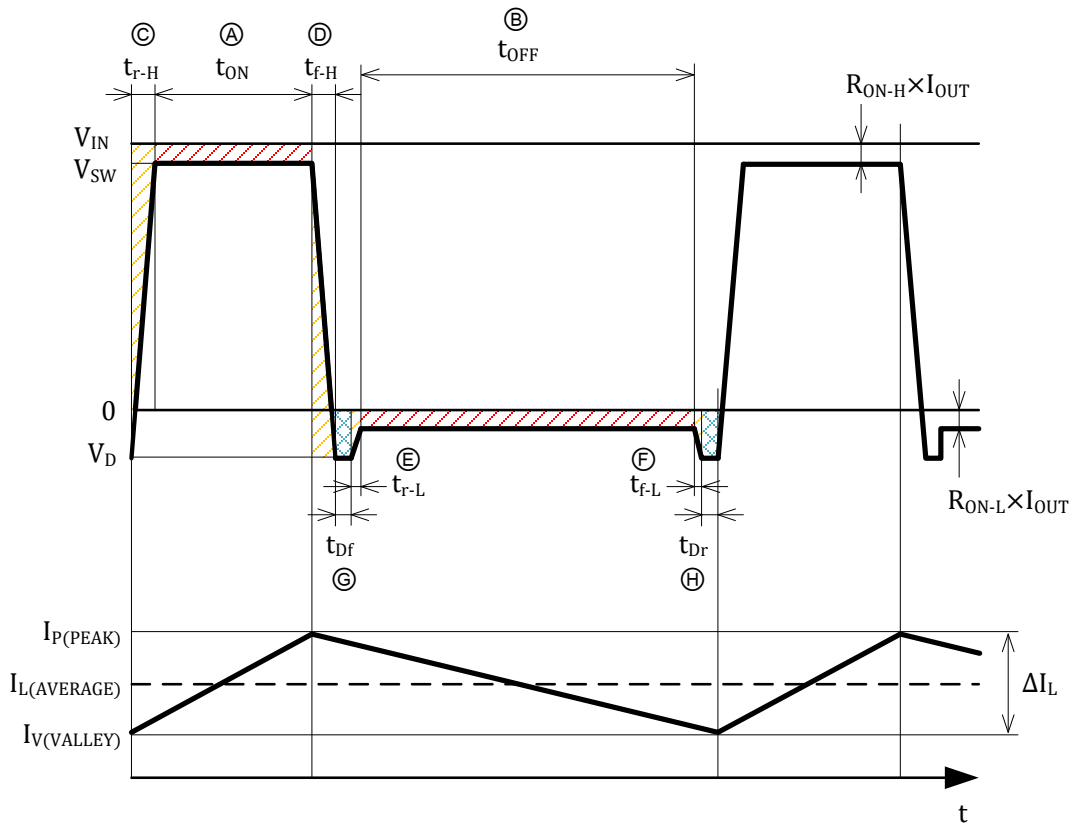


Figure 2. スイッチング波形と損失

計算例（同期整流型）

計算式	パラメータ	結果
<p>1. 伝導損失</p> $P_{ON-H} = \left[I_{OUT}^2 + \frac{(I_P - I_V)^2}{12} \right] \times R_{ON-H} \times \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} \quad [W]$ $P_{ON-L} = \left[I_{OUT}^2 + \frac{(I_P - I_V)^2}{12} \right] \times R_{ON-L} \times \left(1 - \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} \right) \quad [W]$ $\Delta I_L = \frac{(V_{IN} - V_{OUT})}{f_{SW} \times L} \times \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} \quad [A]$ $I_P = I_{OUT} + \frac{\Delta I_L}{2} \quad [A]$ $I_V = I_{OUT} - \frac{\Delta I_L}{2} \quad [A]$	<p>V_{IN} : 入力電圧 12 V</p> <p>V_{OUT} : 出力電圧 5.0 V</p> <p>I_{OUT} : 出力電流 3.0 A</p> <p>R_{ON-H} : ハイサイド MOSFET オン抵抗 100 mΩ</p> <p>R_{ON-L} : ローサイド MOSFET オン抵抗 70 mΩ</p> <p>L : インダクタ値 4.7 μH</p> <p>f_{SW} : スイッチング周波数 1.0 MHz</p> <p>t_{r-H} : ハイサイド MOSFET 立ち上がり時間 4 nsec</p> <p>t_{f-H} : ハイサイド MOSFET 立ち下がり時間 6 nsec</p> <p>t_{r-L} : ローサイド MOSFET 立ち上がり時間 2 nsec</p> <p>t_{f-L} : ローサイド MOSFET 立ち下がり時間 2 nsec</p>	<p>376 mW</p> <p>369 mW</p>
<p>2. スイッチング損失</p> $P_{SW-H} = \frac{1}{2} \times V_{IN} \times I_{OUT} \times (t_{r-H} + t_{f-H}) \times f_{SW} \quad [W]$ $P_{SW-L} = \frac{1}{2} \times V_D \times I_{OUT} \times (t_{r-L} + t_{f-L}) \times f_{SW} \quad [W]$	<p>V_D : ローサイド MOSFET のボディダイオード順方向電圧 0.5 V</p> <p>I_{RR} : ボディダイオード逆回復電流のピーク値 0.3 A</p> <p>t_{RR} : ボディダイオード逆回復時間 25 nsec</p>	<p>180 mW</p> <p>3 mW</p>
<p>3. ダイオード逆回復損失</p> $P_{DIODE} = \frac{1}{2} \times V_{IN} \times I_{RR} \times t_{RR} \times f_{SW} \quad [W]$	<p>C_{DS-H} : ハイサイド MOSFET ドレイン・ソース間容量 40 pF</p> <p>C_{GD-H} : ハイサイド MOSFET ゲート・ドレイン間容量 40 pF</p>	<p>45 mW</p>
<p>4. MOSFET 出力容量損失</p> $P_{COSS} = \frac{1}{2} \times (C_{OSS-L} + C_{OSS-H}) \times V_{IN}^2 \times f_{SW} \quad [W]$ $C_{OSS-L} = C_{DS-L} + C_{GD-L} \quad [F]$ $C_{OSS-H} = C_{DS-H} + C_{GD-H} \quad [F]$	<p>C_{DS-L} : ローサイド MOSFET ドレイン・ソース間容量 40 pF</p> <p>C_{GD-L} : ローサイド MOSFET ゲート・ドレイン間容量 40 pF</p> <p>t_{Dr} : 立ち上がり時デッドタイム 30 nsec</p> <p>t_{Df} : 立ち下がり時デッドタイム 30 nsec</p>	<p>11.5 mW</p>
<p>5. デッドタイム損失</p> $P_D = V_D \times I_{OUT} \times (t_{Dr} + t_{Df}) \times f_{SW} \quad [W]$	<p>Q_{g-H} : ハイサイド MOSFET のゲート電荷量 1 nC</p> <p>Q_{g-L} : ローサイド MOSFET のゲート電荷量 1 nC</p> <p>C_{GS-H} : ハイサイド MOSFET のゲート容量 200 pF</p>	<p>90 mW</p>
<p>6. ゲート電荷損失</p> $P_G = (Q_{g-H} + Q_{g-L}) \times V_{gs} \times f_{SW}$ <p>または</p> $P_G = (C_{GS-H} + C_{GS-L}) \times V_{gs}^2 \times f_{SW}$	<p>C_{GS-L} : ローサイド MOSFET のゲート容量 200 pF</p> <p>V_{gs} : ゲート駆動電圧 5.0V</p> <p>I_{CC} : IC の消費電流 1.0 mA</p> <p>DCR : インダクタの直流抵抗 80 mΩ</p>	<p>10 mW</p>
<p>7. IC の動作損失</p> $P_{IC} = V_{IN} \times I_{CC}$	<p>ESR_{CIN} : 入力コンデンサの等価直列抵抗 3 mΩ</p> <p>ESR_{COUT} : 出力コンデンサの等価直列抵抗 1 mΩ</p>	<p>12 mW</p>
<p>8. インダクタの伝導損失</p> $P_{L(DCR)} = \left[I_{OUT}^2 + \frac{(I_P - I_V)^2}{12} \right] \times DCR \quad [W]$		<p>723 mW</p>

計算例（同期整流型）つづき

計算式	パラメータ	結果
9. コンデンサの損失 $P_{CIN} = I_{CIN(RMS)}^2 \times ESR_{CIN} \quad [W]$ $I_{CIN(RMS)} = I_{OUT} \times \frac{\sqrt{(V_{IN} - V_{OUT}) \times V_{OUT}}}{V_{IN}} \quad [A]$ $P_{COUT} = I_{COUT(RMS)}^2 \times ESR_{COUT} \quad [W]$ $I_{COUT(RMS)} = \frac{\Delta I_L}{2\sqrt{3}} \quad [A]$		6.6 mW 0.5 mW
全電力損失 $P = P_{ON-H} + P_{ON-L} + P_{SW-H} + P_{SW-L} + P_{DIODE} + P_{COSS}$ $+ P_D + P_G + P_{IC} + P_{L(DCR)} + P_{CIN}$ $+ P_{COUT} \quad [W]$		1.83 W

非同期整流型

Figure 3 に非同期整流型の回路図を示します。Figure 1 の同期整流型と比較すると、ローサイドスイッチが MOSFET からダイオードへ変更されています。また、電力損失は主に下記に示す 10 個の要因がありますが、同期整流型と比較すると、ローサイド MOSFET のオン抵抗による伝導損失がダイオードのオン抵抗による伝導損失に、ローサイド MOSFET のスイッチング損失はなくなり、ローサイド MOSFET ボディーダイオードの逆回復損失がダイオードの逆回復損失に、MOSFET の出力容量損失とゲート電荷損失がハイサイドのみになります。

1. MOSFET のオン抵抗による伝導損失 P_{ON-H}
2. ダイオードのオン抵抗による伝導損失 P_{ON-D}
3. MOSFET のスイッチング損失 P_{SW-H}
4. ダイオードの逆回復損失 P_{DIODE}
5. MOSFET の出力容量損失 P_{COSS}
6. デッドタイム損失 P_D
7. MOSFET のゲート電荷損失 P_G
8. IC の制御回路による動作損失 P_{IC}
9. インダクタの伝導損失 $P_{L(DCR)}$
10. コンデンサの損失 P_{CIN}, P_{COUT}

同期整流型と異なる部分について計算を行います。

ダイオードの伝導損失

ダイオードの伝導損失はダイオードの順方向電圧によって決まり、MOSFET の伝導損失がオン抵抗によって決まるのに対して大きな値になります。ダイオードはハイサイド MOSFET がオフの時に

伝導するため損失は次式で概算できます。

$$P_{ON-D} = I_{OUT} \times V_F \times \left(1 - \frac{V_{OUT}}{V_{IN}}\right) \quad [W] \quad (21)$$

I_{OUT} : 出力電流 [A]

V_F : ダイオードの順方向電圧 [V]

V_{IN} : 入力電圧 [V]

V_{OUT} : 出力電圧 [V]

降圧コンバータの場合、降圧比が高いほど、すなわち出力電圧が低いほどダイオードオン時間が長くなるため、ダイオードの電力損失への関与が大きくなります。よって非同期整流型は同期整流型に比べて、出力電圧が低い場合は効率が悪くなる傾向にあります。

ダイオードの逆回復損失

ダイオードの逆回復損失は、同期整流型のローサイド MOSFET ボディーダイオードの場合と同じ計算になります。MOSFET がオンした時、ダイオードが順方向から逆バイアス状態へ遷移する時にダイオードを回復させるため、ダイオード逆回復損失が生じます。この損失はダイオードの逆回復時間 t_{RR} で決まります。ダイオードの逆回復特性より損失は次式で求められます。

$$P_{DIODE} = \frac{1}{2} \times V_{IN} \times I_{RR} \times t_{RR} \times f_{SW} \quad [W] \quad (22)$$

V_{IN} : 入力電圧 [V]
 I_{RR} : ダイオード逆回復電流のピーク値 [A]
 t_{RR} : ダイオード逆回復時間 [sec]
 f_{SW} : スイッチング周波数 [Hz]

MOSFET の出力容量損失

各スイッチングサイクルで、MOSFET の出力容量 C_{OSS} を充電するため損失が生じます。この損失は次式で概算できます。

$$P_{COSS} = \frac{1}{2} \times (C_{DS-H} + C_{GD-H}) \times V_{IN}^2 \times f_{SW} \quad [W] \quad (23)$$

C_{DS-H} : MOSFET ドレイン・ソース間容量 [F]
 C_{GD-H} : MOSFET ゲート・ドレイン間容量 [F]
 V_{IN} : 入力電圧 [V]
 f_{SW} : スイッチング周波数 [Hz]

ゲート電荷損失

ゲート電荷損失は MOSFET のゲートの充電に起因する電力損失です。MOSFET のゲート電荷量(またはゲート容量)に依存し、ゲート電荷損失は次式で求められます。

$$P_G = Q_{g-H} \times V_{gs} \times f_{SW} \quad [W] \quad (24)$$

または

$$P_G = C_{GS-H} \times V_{gs}^2 \times f_{SW} \quad [W] \quad (25)$$

Q_{g-H} : MOSFET のゲート電荷量 [C]
 C_{GS-H} : MOSFET のゲート容量 [F]
 V_{gs} : ゲート駆動電圧 [V]
 f_{SW} : スイッチング周波数 [Hz]

全電力損失

IC の電力損失 P は、これら全てを足した値になります。

$$P = P_{ON-H} + P_{ON-D} + P_{SW-H} + P_{DIODE} + P_{COSS} + P_D + P_G + P_{IC} + P_{L(DCR)} + P_{CIN} + P_{COUT} \quad [W] \quad (26)$$

P_{ON-H} : MOSFET 伝導損失 [W]
 P_{ON-D} : ダイオードのオン抵抗による伝導損失 [W]
 P_{SW-H} : MOSFET スイッチング損失 [W]
 P_{DIODE} : ダイオードの逆回復損失 [W]
 P_{COSS} : MOSFET の出力容量損失 [W]
 P_D : デッドタイム損失 [W]
 P_G : MOSFET のゲート電荷損失 [W]
 P_{IC} : IC の動作損失 [W]
 $P_{L(DCR)}$: インダクタの伝導損失 [W]
 P_{CIN} : 入力コンデンサの損失 [W]
 P_{COUT} : 出力コンデンサの損失 [W]

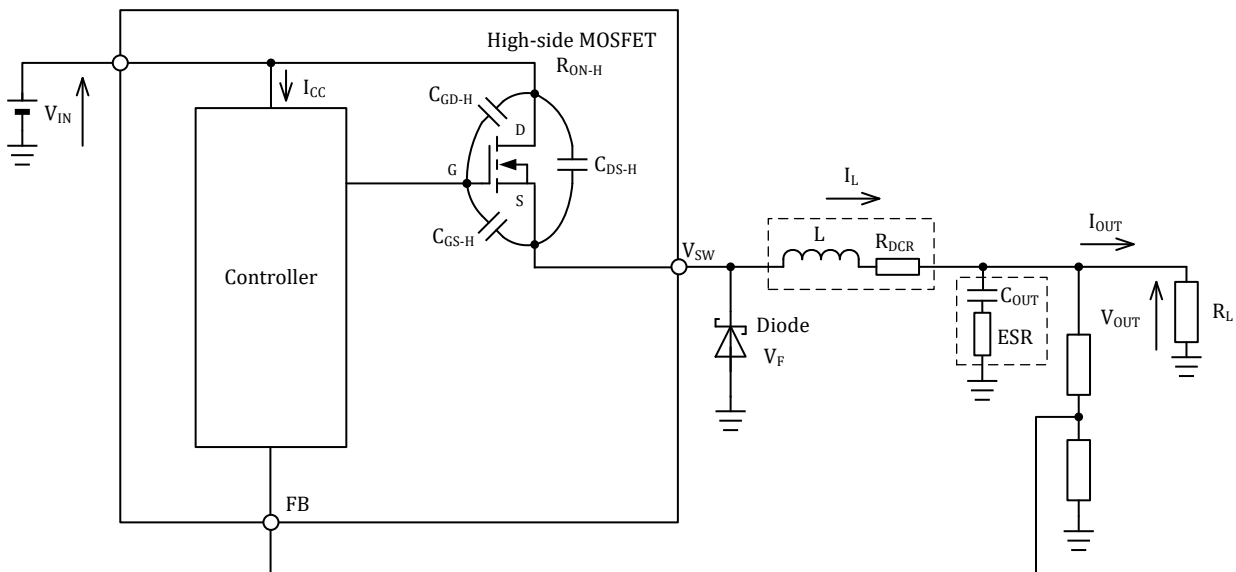


Figure 3. 非同期整流タイプ DC/DC コンバータ回路図

計算例（非同期整流型）

計算式	パラメータ	結果
<p>1. MOSFET の伝導損失</p> $P_{ON-H} = \left[I_{OUT}^2 + \frac{(I_P - I_V)^2}{12} \right] \times R_{ON-H} \times \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} \quad [W]$ $\Delta I_L = \frac{(V_{IN} - V_{OUT})}{f_{SW} \times L} \times \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} \quad [A]$ $I_P = I_{OUT} + \frac{\Delta I_L}{2} \quad [A]$ $I_V = I_{OUT} - \frac{\Delta I_L}{2} \quad [A]$	<p>V_{IN} : 入力電圧 12 V</p> <p>V_{OUT} : 出力電圧 5.0 V</p> <p>I_{OUT} : 出力電流 3.0 A</p> <p>R_{ON-H} : MOSFET オン抵抗 100 mΩ</p> <p>L : インダクタ値 4.7 μH</p> <p>f_{SW} : スイッチング周波数 1.0 MHz</p> <p>V_F : ダイオードの順方向電圧 0.5 V</p> <p>t_{r-H} : MOSFET 立ち上がり時間 4 nsec</p> <p>t_{f-H} : MOSFET 立ち下がり時間 6 nsec</p>	376 mW
<p>2. ダイオードの伝導損失</p> $P_{ON-D} = I_{OUT} \times V_F \times \left(1 - \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} \right) \quad [W]$	<p>I_{RR} : ダイオード逆回復電流のピーク値 0.3 A</p> <p>t_{RR} : ダイオード逆回復時間 25 nsec</p>	875 mW
<p>3. MOSFET のスイッチング損失</p> $P_{SW-H} = \frac{1}{2} \times V_{IN} \times I_{OUT} \times (t_{r-H} + t_{f-H}) \times f_{SW} \quad [W]$	<p>C_{DS-H} : MOSFET ドレイン・ソース間容量 40 pF</p> <p>C_{GD-H} : MOSFET ゲート・ドレイン間容量 40 pF</p> <p>t_{Dr} : 立ち上がり時デッドタイム 30 nsec</p> <p>t_{Df} : 立ち下がり時デッドタイム 30 nsec</p>	180 mW
<p>4. ダイオード逆回復損失</p> $P_{DIODE} = \frac{1}{2} \times V_{IN} \times I_{RR} \times t_{RR} \times f_{SW} \quad [W]$	<p>Q_{g-H} : MOSFET のゲート電荷量 1 nC</p> <p>C_{GS-H} : MOSFET のゲート容量 200 pF</p>	45 mW
<p>5. MOSFET 出力容量損失</p> $P_{COSS} = \frac{1}{2} \times (C_{DS-H} + C_{GD-H}) \times V_{IN}^2 \times f_{SW} \quad [W]$	<p>V_{gs} : ゲート駆動電圧 5.0V</p> <p>I_{CC} : IC の消費電流 1.0 mA</p> <p>DCR : インダクタの直流抵抗 80 mΩ</p>	5.8 mW
<p>6. デッドタイム損失</p> $P_D = V_F \times I_{OUT} \times (t_{Dr} + t_{Df}) \times f_{SW} \quad [W]$	<p>ESR_{CIN} : 入力コンデンサの等価直列抵抗 3 mΩ</p> <p>ESR_{COUT} : 出力コンデンサの等価直列抵抗 1 mΩ</p>	90 mW
<p>7. ゲート電荷損失</p> $P_G = Q_{g-H} \times V_{gs} \times f_{SW}$ <p>または</p> $P_G = C_{GS-H} \times V_{gs}^2 \times f_{SW}$		5 mW
<p>8. IC の動作損失</p> $P_{IC} = V_{IN} \times I_{CC}$		12 mW
<p>9. インダクタの伝導損失</p> $P_{L(DCR)} = \left[I_{OUT}^2 + \frac{(I_P - I_V)^2}{12} \right] \times DCR \quad [W]$		723 mW

計算例（非同期整流型）つづき

計算式	パラメータ	結果
10. コンデンサの損失 $P_{CIN} = I_{CIN(RMS)}^2 \times ESR_{CIN} \quad [W]$ $I_{CIN(RMS)} = I_{OUT} \times \frac{\sqrt{(V_{IN} - V_{OUT}) \times V_{OUT}}}{V_{IN}} \quad [A]$ $P_{COUT} = I_{COUT(RMS)}^2 \times ESR_{COUT} \quad [W]$ $I_{COUT(RMS)} = \frac{\Delta I_L}{2\sqrt{3}} \quad [A]$		6.6 mW 0.5 mW
全電力損失 $P = P_{ON-H} + P_{ON-D} + P_{SW-H} + P_{DIODE} + P_{COSS} + P_D + P_G + P_{IC} + P_{L(DCR)} + P_{CIN} + P_{COUT} \quad [W]$		2.32 W

損失の要素

スイッチング電源の仕様によって損失する部分の比重が変化する様子を見ていきます。

同期整流型で出力電流を可変した時の様子を Figure 4 に示します。高電流時は MOSFET の伝導損失とインダクタの伝導損失が大きな比重をしめます。これは、式(3)、(4)、(14)から判る様に電力損失が電流の 2 乗に比例するためです。オン抵抗が低い MOSFET を使用し、DCR が小さいインダクタを選択して損失を小さくします。伝導抵抗が低い部品は一般的にサイズが大きくなるため、損失とサイズのトレードオフになります。また MOSFET のサイズが大きくなると、次の話に出てくる寄生容量値も大きくなる傾向にあるため、ここでもトレードオフの関係があります。低電流時は MOSFET のスイッチング損失、MOSFET の出力容量損失、MOSFET のゲート電荷損失、IC の動作損失の比重が大きくなります。これら MOSFET に関わる損失は、式(5)、(8)、(10)、(11)より、主に寄生する容量値が影響しています。MOSFET のサイズを小さくすれば容量値が小さくなり損失も減りますが、一般的に電流能力が小さくなるため、出力電流値とのトレードオフになります。またこれらはスイッチング周波数に比例するため、低電流時はスイッチング周波数を低くして損失を小さくする方法が一般的に行われています。IC の動作損失は、制御回路の回路電流を最適化して小さくします。

同期整流型でスイッチング周波数を可変した時の様子を Figure 5 に示します。高速動作時は MOSFET のスイッチング損失、MOSFET ボディーダイオードの逆回復損失、MOSFET の出力容量損失、デッドタイム損失が増加します。これら MOSFET に関わ

る損失は、式(5)、(7)、(8)より、スイッチング周波数に比例して増加するため、寄生容量が小さく高速にスイッチング動作する素子を選択する必要があります。前述の様に MOSFET のサイズを小さくすれば容量値が小さくなり損失も減りますが、一般的に電流能力が小さくなるため、出力電流値とのトレードオフになります。デッドタイム損失を小さくするには、高速動作できる MOSFET と組み合わせて制御回路を高速動作し、デッドタイムを短くする設計が必要です。

同期整流型で出力電圧を可変した時の様子を Figure 6 に示します。これはスイッチングのデューティ比が変化している様子を表しています。判りやすい様に入力電圧を 10V にしていますので、出力電圧が 1V 時はデューティ比 10%、2V 時は 20% になります。デューティ比が低い時はローサイド MOSFET がオンしている時間が長いのでローサイド MOSFET の導電損失が大きくなり、デューティ比が高いときはハイサイド MOSFET のオン時間が長くなるためハイサイド MOSFET の導電損失が大きくなるのが見て取れます。

Figure 7 は Figure 6 を非同期型に変えた時の様子を示します。Figure 6 の同期型と比較すると、同期型のローサイド MOSFET に対応するダイオードの伝導損失が大きいことが判ります。デューティ比が高いときはハイサイド MOSFET のオン時間が長いので同期整流型と損失の差は小さいですが、デューティ比が低くなるにつれ、ダイオードのオン時間が長くなるため損失が大きくなるのが判ります。この損失を小さくするにはダイオードの順方向電圧が低い部品を選択する必要があります。

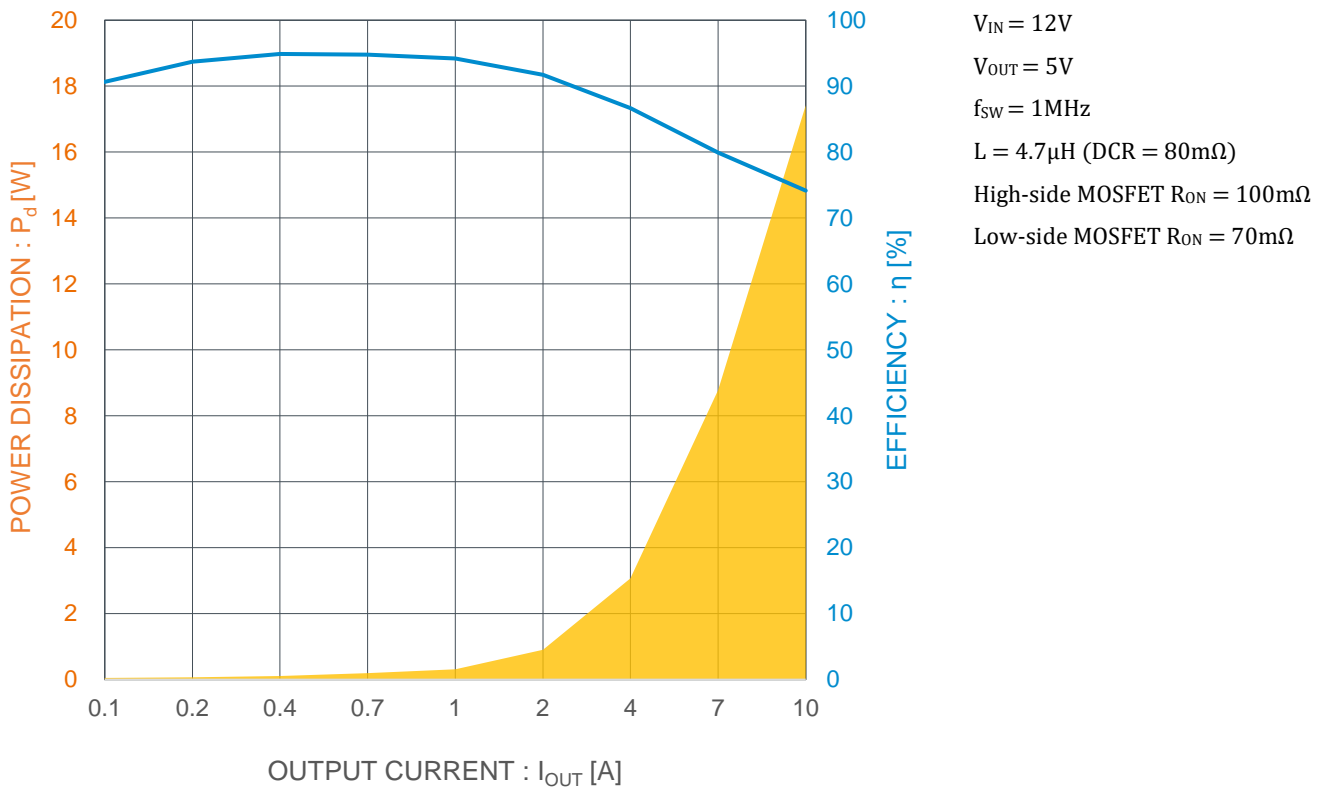
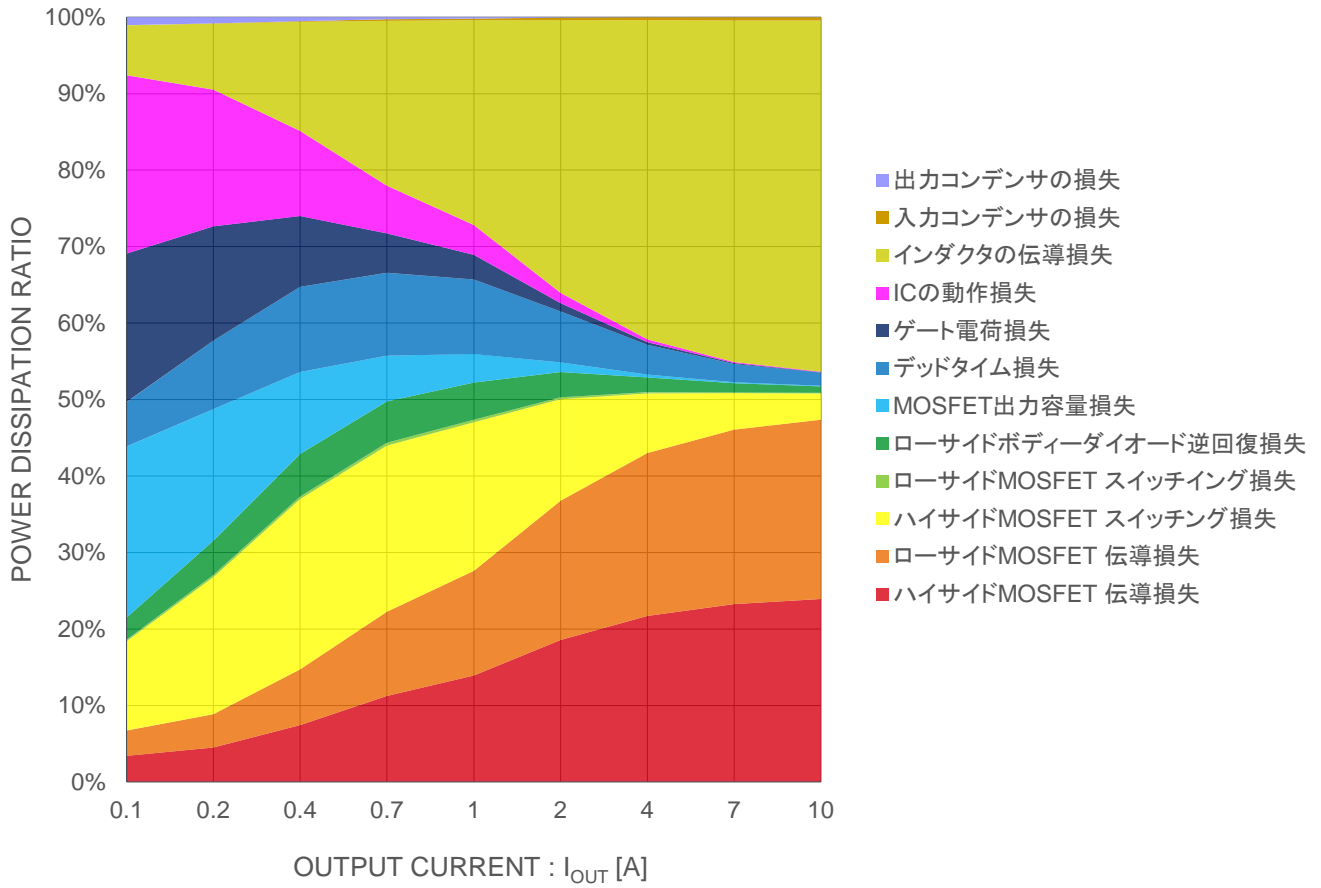


Figure 4 出力電流を可変したときの損失変化
(同期整流型)

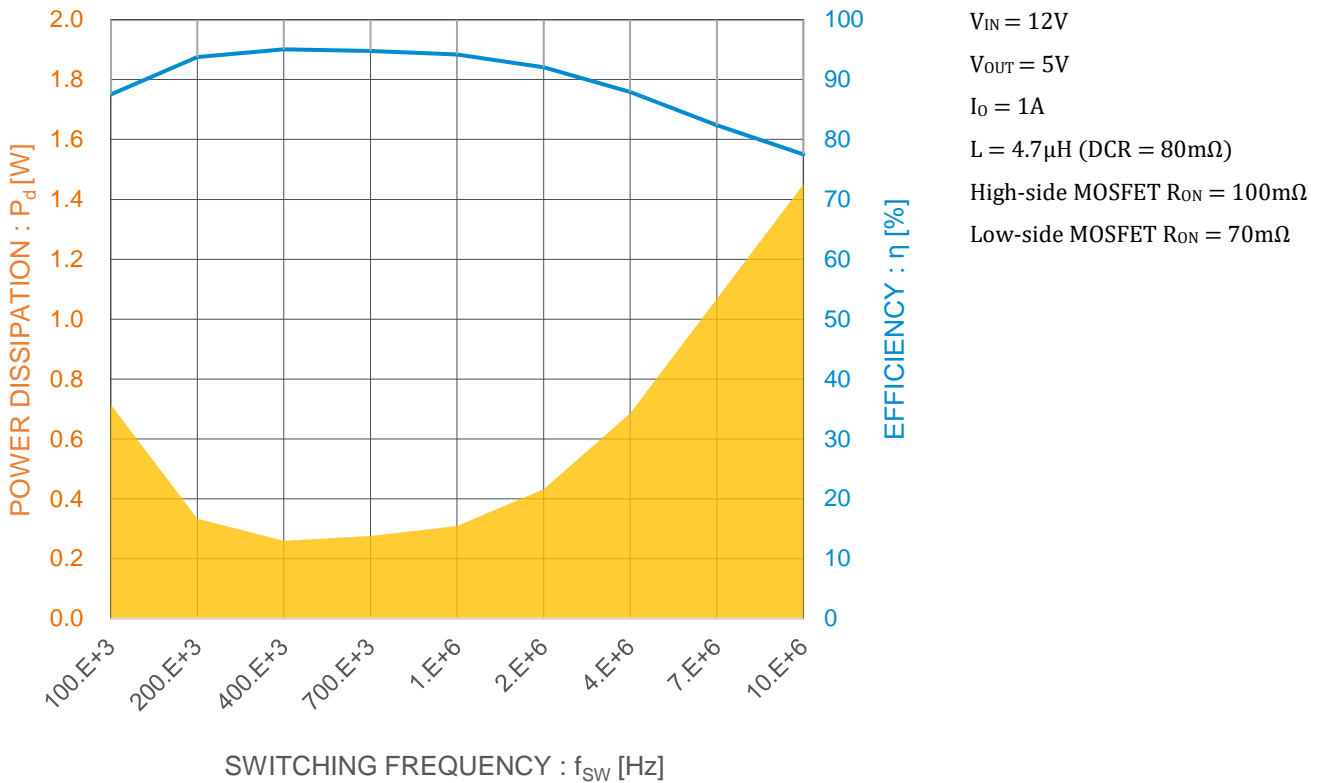
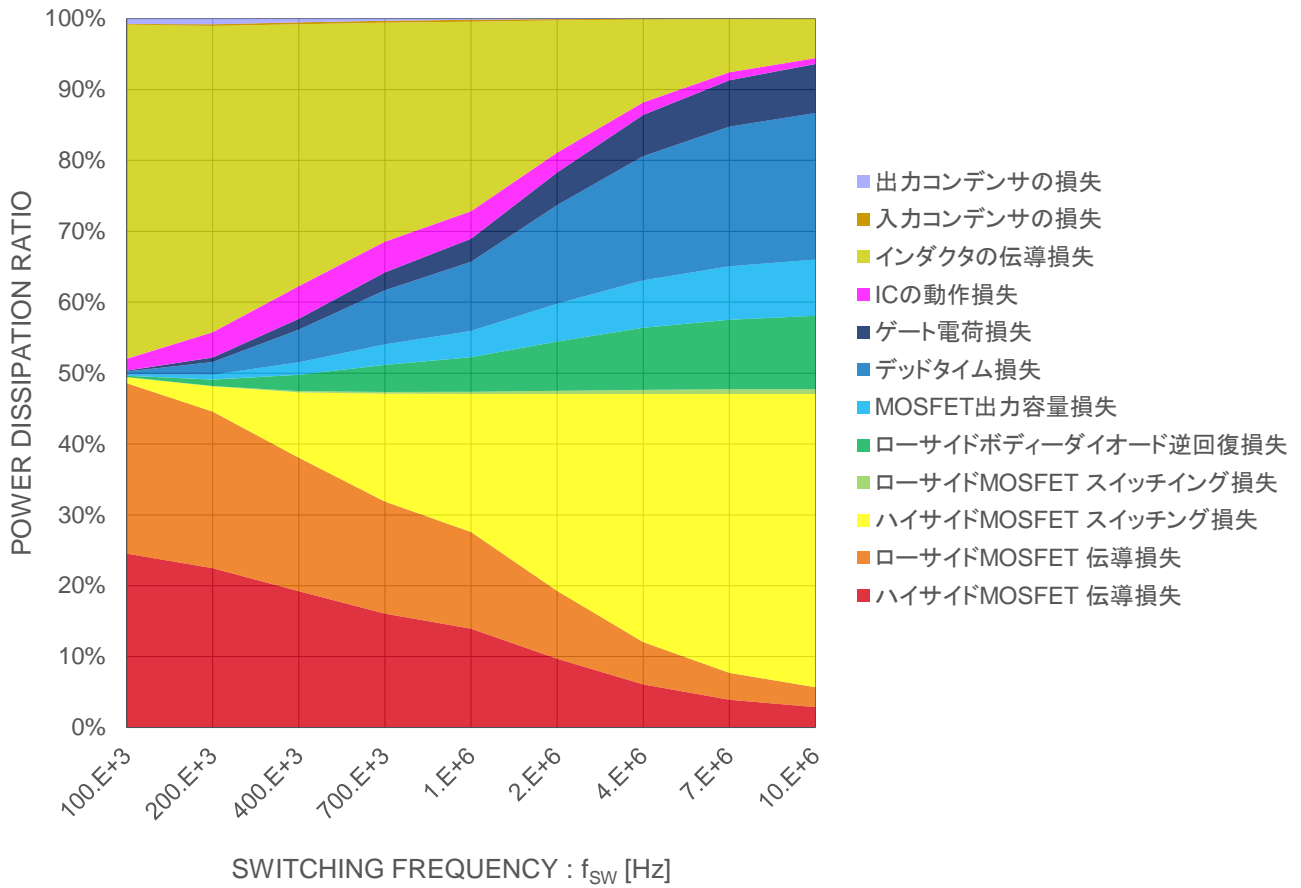


Figure 5 スイッチング周波数を可変したときの損失変化
(同期整流型)

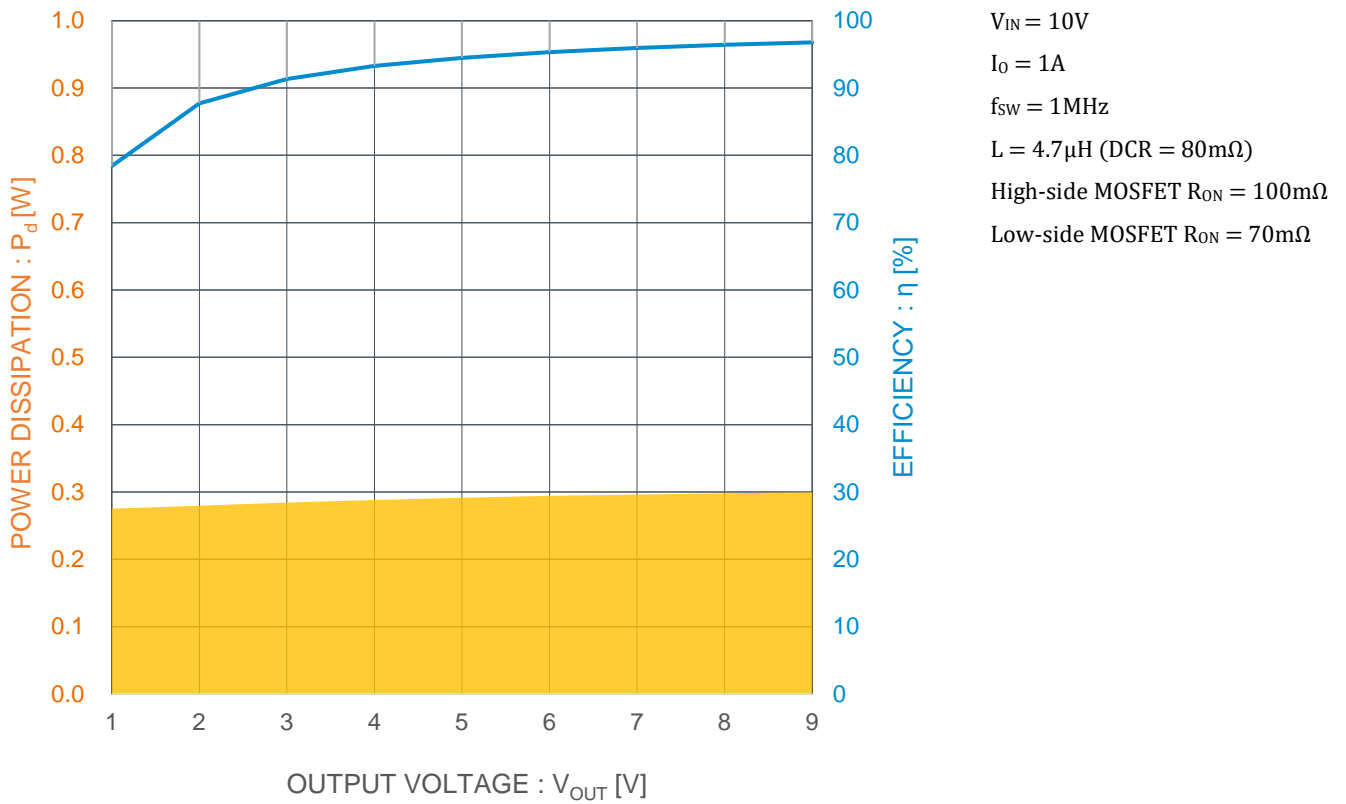
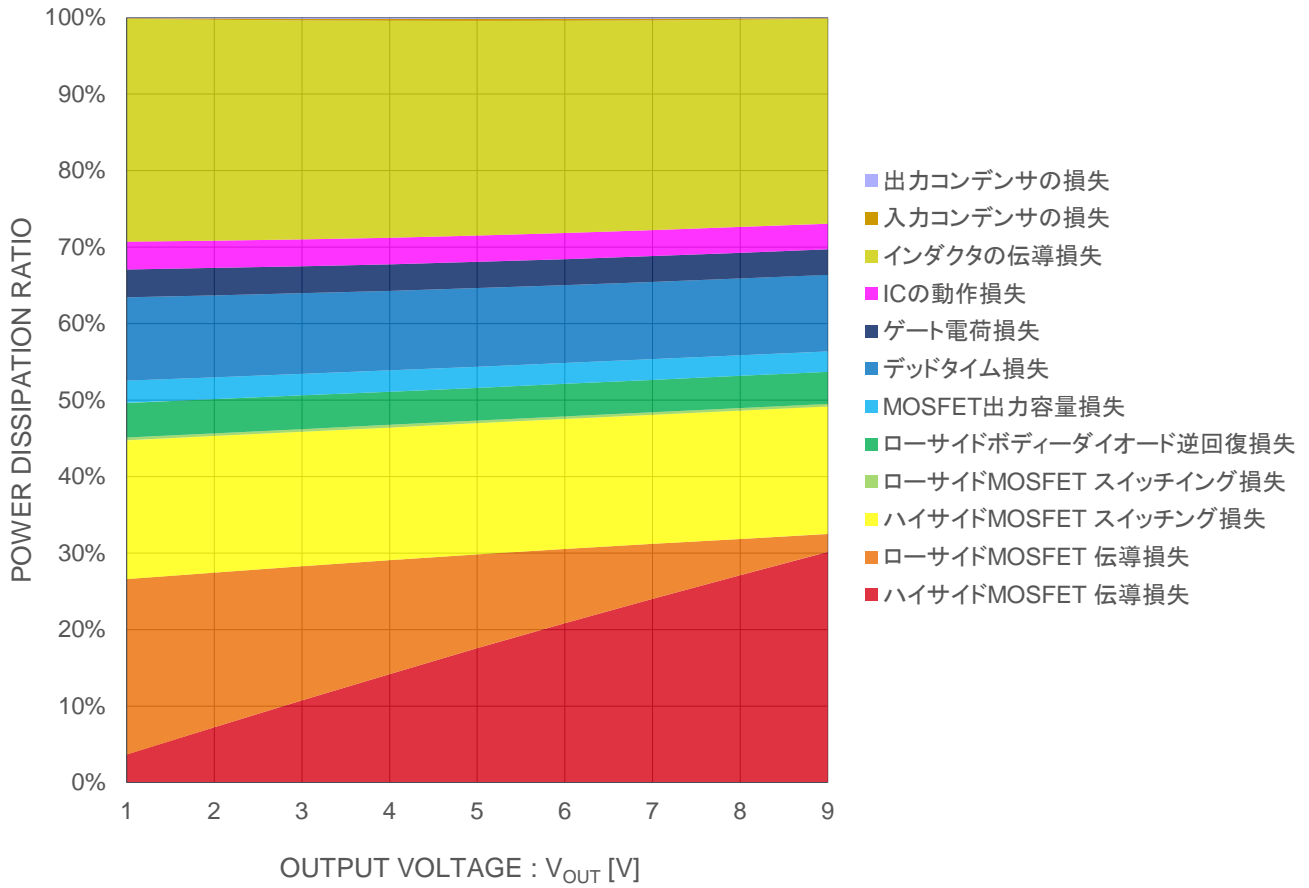


Figure 6 出力電圧を可変したときの損失変化
(同期整流型)

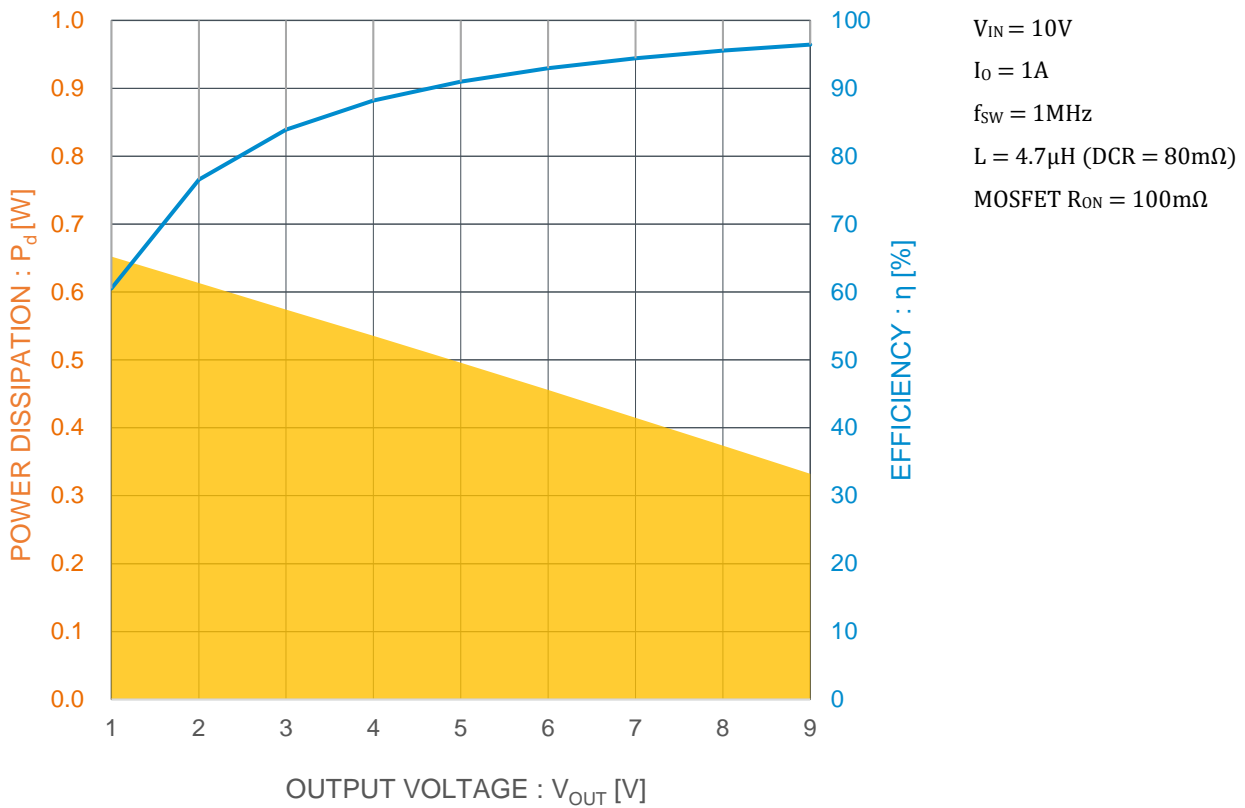
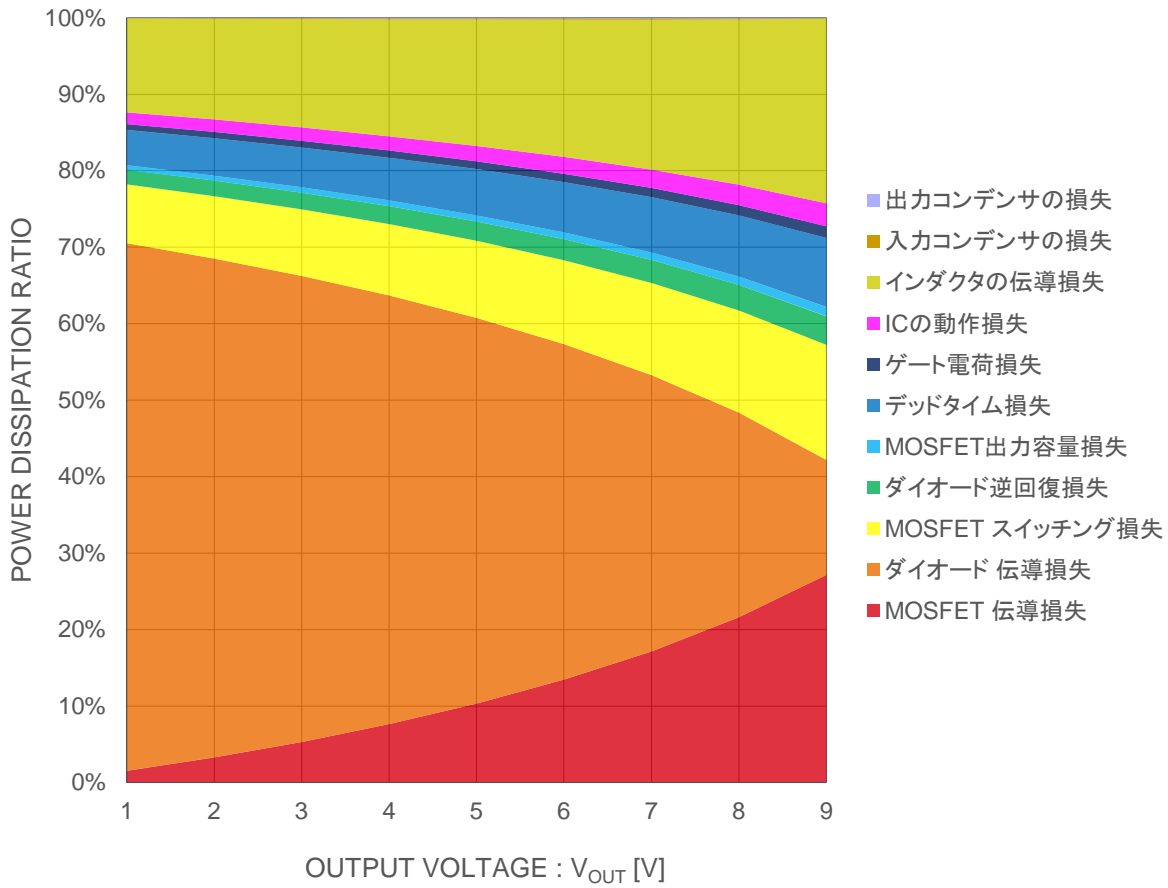


Figure 7 出力電圧を可変したときの損失変化
(非同期整流型)

ご 注 意

- 1) 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。
- 2) 本資料に記載されている内容は製品のご紹介資料です。ご使用に際しては、別途最新の仕様書を必ずご請求のうえ、ご確認ください。
- 3) 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、半導体製品は種々の要因で故障・誤作動する可能性があります。
万が一、本製品が故障・誤作動した場合であっても、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、バックアップ、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。
- 4) 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。
- 5) 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。
- 6) 本製品は、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）および本資料に明示した用途への使用を意図しています。
- 7) 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おられません。
- 8) 本製品を下記のような特に高い信頼性が要求される機器等に使用される際には、ロームへ必ずご連絡の上、承諾を得てください。
・輸送機器（車載、船舶、鉄道など）、幹線用通信機器、交通信号機器、防災・防犯装置、安全確保のための装置、医療機器、サーバー、太陽電池、送電システム
- 9) 本製品を極めて高い信頼性を要求される下記のような機器等には、使用しないでください。
・航空宇宙機器、原子力制御機器、海底中継機器
- 10) 本資料の記載に従わないために生じたいかなる事故、損害もロームはその責任を負うものではありません。
- 11) 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。
- 12) 本製品のご使用に際しては、RoHS 指令など適用される環境関連法令を遵守の上でご使用ください。お客様がかかる法令を順守しないことにより生じた損害に関して、ロームは一切の責任を負いません。本製品の RoHS 適合性などの詳細につきましては、セールス・オフィスまでお問合せください。
- 13) 本製品および本資料に記載の技術を輸出又は国外へ提供する際には、「外国為替及び外国貿易法」、「米国輸出管理規則」など適用される輸出関連法令を遵守し、それらの定めにしたがって必要な手続を行ってください。
- 14) 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。



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/>