

パワーデバイス

測定波形から電力損失を求める

このアプリケーションノートでは、SiC MOSFET を用いたスイッチング回路において、測定されたスイッチング波形から SiC MOSFET の電力損失を求める方法について記載しています。

スイッチング波形の測定

Figure 1 にスイッチング回路と波形をモニターするプローブを示します。MOSFET のドレインソース間電圧は差動電圧プローブを使用して測定します。またドレイン電流は電流プローブを使用します。

Figure 2 は各部の波形と、電力損失(斜線部分)を示します。 t_{on} はターンオン時間を t_{off} はターンオフ時間を表しており、この区間の V_{DS} と I_D が重なり合った部分でスイッチング損失が発生しています。この回路はインダクタンス負荷のため、ターンオン時は I_D が先に変化を開始し電流の変化が完了した後に V_{DS} が変化開始します。ターンオフ時はその逆で、 V_{DS} が先に変化を開始し電圧の変化が完了した後に I_D が変化開始します。次に T_{ON} は MOSFET のオン区間で、 I_D と MOSFET のオン抵抗による導通損失が発生しています。

最新のオシロスコープでは斜線部分を自動的に演算して電力損失を表示できるものがありますが、この機能がないものは測定波形から算出する必要があります。

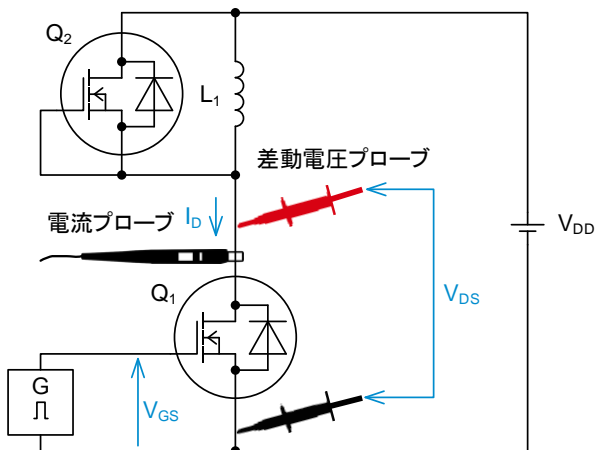


Figure 1. スwitchング回路と波形をモニターするプローブ

測定結果に誤差が生じます。サンプリングポイントを表示して波形が正確にトレースできているか確認が必要です。二つ目の注意点は、電圧プローブと電流プローブの間で遅延時間の特性が異なるため、測定波形にはこの遅延差による誤差が含まれることです。何も補正しないと電圧と電流間で時間軸方向にズレが生じ、Figure 2 の斜線部分の面積が不正確となります。実際より大きいまたは小さい損失となり、誤った結果が得られます。測定系の遅延差をなくすためスキュー補正(de-skew)を実施する必要があります。方法は測定器の取り扱いマニュアルや測定器メーカーの技術資料を参照してください。

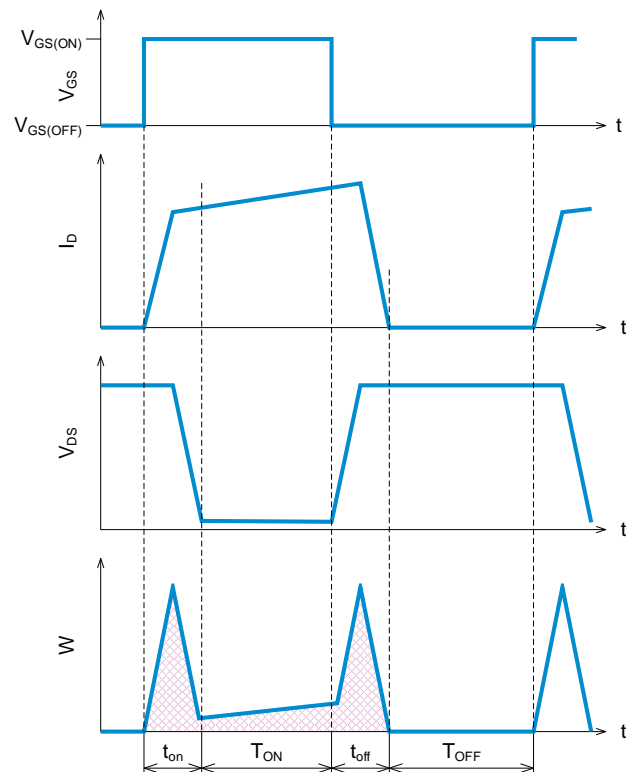


Figure 2. 各部の波形と電力損失(斜線部分)

測定時の注意点です。一つ目はオシロスコープのサンプリング数です。サンプリング数が少ないと波形の詳細な部分を取りこぼしてしまうため

波形を近似計算する

測定波形より、直線近似が可能な範囲で分割して電力損失を計算します。まず、ターンオンおよびターンオフ時間で消費する電力損失 P_{ton} , P_{toff} を算出します。電力損失は Table 1 の近似式で計算します。波形の形によって計算式が異なりますので、測定波形に近いものを選択します。

Figure 3 の波形の一例では、ターンオン時は波形を 2 分割し、前半部(t_{on1})は Table 1 のケース 2 を使用します。さらに条件として、 $I_{D1} = 0$ の式を使用します。そして後半部(t_{on2})はケース 3 の、 $V_{DS2} = 0$ の式を使用します。Figure 3 では $V_{DS2(on)}$ は MOSFET のオン抵抗と I_D によって電圧が発生しますが、 V_{DS} の High 電圧にくらべて十分小さい場合はゼロとして扱います。その結果、ターンオン時の電力損失は次式で近似計算できます。

$$P_{ton} \approx \frac{1}{2} V_{DS1(on)} I_{D2(on)} t_{on1} f + \frac{1}{6} V_{DS1(on)} (2 I_{D2(on)} + I_{D3(on)}) t_{on2} f \quad (1)$$

同様にターンオフ時も波形を 2 分割し、前半部(t_{off1})はケース 1 の、 $V_{DS1} = 0$ の式を使用します。そして後半部(t_{off2})はケース 8 の、 $I_{D2} = 0$ の式を使用します。Figure 3 では $V_{DS1(off)}$ は前述と同じ理由で電圧が発生しますが、 V_{DS} の High 電圧にくらべて十分小さい場合はゼロとして扱います。その結果、ターンオフ時の電力損失は次式で近似計算できます。

$$P_{toff} \approx \frac{1}{6} V_{DS2(off)} (I_{D1(off)} + 2 I_{D2(off)}) t_{off1} f + \frac{1}{2} V_{DS2(off)} I_{D2(off)} t_{off2} f \quad (2)$$

次に導通時に消費する電力損失を計算します。Figure 4 に導通損失を求める波形の一例を示します。 T_{ON} の区間で MOSFET が導通しているため V_{DS} は MOSFET のオン抵抗と I_D の積になります。オン抵抗の値はデータシートを参照します。電力損失は Table 2 から波形の形に近いものを選択し、近似式で計算します。

この例では Table 2 のケース 1 を使用します。導通損失は次式で計算できます。

$$P_{ON} \approx \frac{1}{3} R_{ON} (I_{D1(ON)}^2 + I_{D1(ON)} I_{D2(ON)} + I_{D2(ON)}^2) T_{ON} f \quad (3)$$

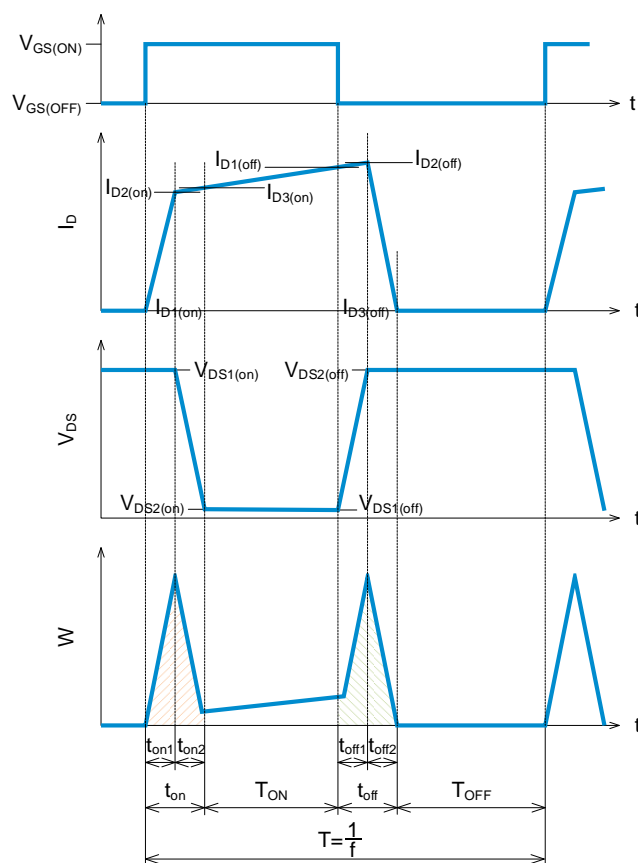


Figure 3. スイッチング損失波形の一例

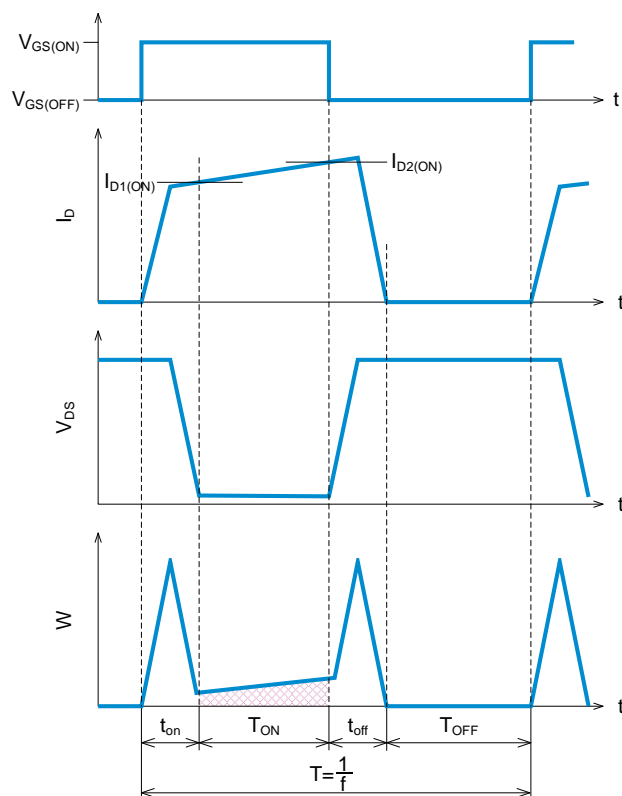


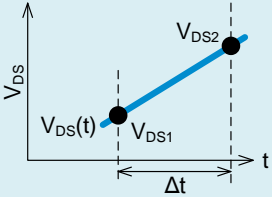
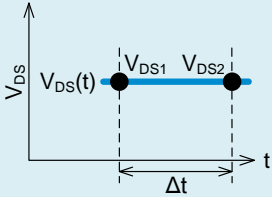
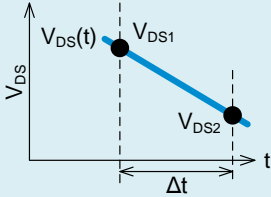
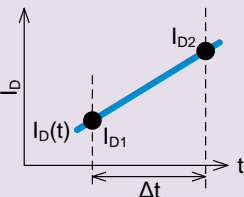
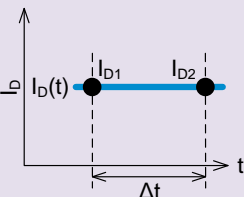
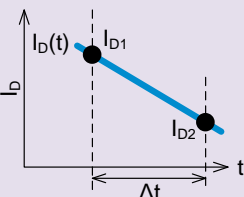
Figure 4. 導通損失波形の一例

次は MOSFET がオフ時の電力損失です。Figure 4 では T_{OFF} の区間になりますが、MOSFET がオフ時は I_D が十分小さいので電力損失はゼロとします。

MOSFET の電力損失はこれまでに算出した電力損失の総和です。

$$P_D = P_{ton} + P_{toff} + P_{ON} \quad [W] \quad (4)$$

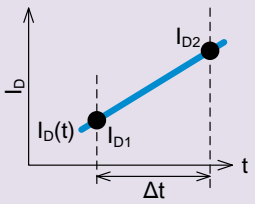
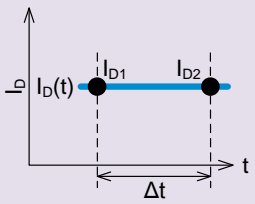
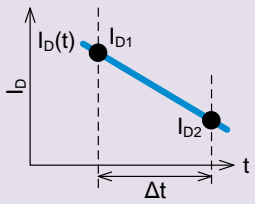
Table 1. 波形の形ごとの直線近似を用いたスイッチング損失計算式

		時間による V_{DS} の変化		
時間による I_D の変化		$V_{DS1} < V_{DS2}$	$V_{DS1} = V_{DS2}$	$V_{DS1} > V_{DS2}$
				
	ケース 1 (付録 A 参照)	ケース 2 (付録 B 参照)	ケース 3 (付録 C 参照)	
$I_{D1} < I_{D2}$	 <p>$P \approx$ 下記式(A)参照</p> <p>$V_{DS1} := 0,$ $P \approx \frac{1}{6} V_{DS2} (I_{D1} + 2 I_{D2}) \Delta t f$</p> <p>$I_{D1} := 0,$ $P \approx \frac{1}{6} (V_{DS1} + 2 V_{DS2}) I_{D2} \Delta t f$</p>	<p>$P \approx \frac{1}{2} V_{DS1} (I_{D1} + I_{D2}) \Delta t f \quad (C)$</p> <p>$I_{D1} := 0,$ $P \approx \frac{1}{2} V_{DS1} I_{D2} \Delta t f$</p>	<p>$P \approx$ 下記式(A)</p> <p>$I_{D1} := 0,$ $P \approx \frac{1}{6} (V_{DS1} + 2 V_{DS2}) I_{D2} \Delta t f$</p> <p>$V_{DS2} := 0,$ $P \approx \frac{1}{6} V_{DS1} (2 I_{D1} + I_{D2}) \Delta t f$</p> <p>$I_{D1} := 0, V_{DS2} := 0,$ $P \approx \frac{1}{6} V_{DS1} I_{D2} \Delta t f$</p>	
$I_{D1} = I_{D2}$	 <p>ケース 4 (付録 D 参照)</p> <p>$P \approx \frac{1}{2} (V_{DS1} + V_{DS2}) I_{D1} \Delta t f \quad (B)$</p> <p>$V_{DS1} := 0,$ $P \approx \frac{1}{2} V_{DS2} I_{D1} \Delta t f$</p>	<p>ケース 5 (付録 E 参照)</p> <p>$P = V_{DS1} I_{D1} \Delta t f \quad (D)$</p>	<p>ケース 6 (付録 F 参照)</p> <p>$P \approx \frac{1}{2} (V_{DS1} + V_{DS2}) I_{D1} \Delta t f \quad (B)$</p> <p>$V_{DS2} := 0,$ $P \approx \frac{1}{2} V_{DS1} I_{D1} \Delta t f$</p>	
$I_{D1} > I_{D2}$	 <p>ケース 7 (付録 G 参照)</p> <p>$P \approx$ 下記式(A)</p> <p>$I_{D2} := 0,$ $P \approx \frac{1}{6} (2 V_{DS1} + V_{DS2}) I_{D1} \Delta t f$</p> <p>$V_{DS1} := 0,$ $P \approx \frac{1}{6} V_{DS2} (I_{D1} + 2 I_{D2}) \Delta t f$</p> <p>$I_{D2} := 0, V_{DS1} := 0,$ $P \approx \frac{1}{6} V_{DS2} I_{D1} \Delta t f$</p>	<p>ケース 8 (付録 H 参照)</p> <p>$P \approx \frac{1}{2} V_{DS1} (I_{D1} + I_{D2}) \Delta t f \quad (C)$</p> <p>$I_{D2} := 0,$ $P \approx \frac{1}{2} V_{DS1} I_{D1} \Delta t f$</p>	<p>ケース 9 (付録 I 参照)</p> <p>$P \approx$ 下記式(A)</p> <p>$V_{DS2} := 0,$ $P \approx \frac{1}{6} V_{DS1} (2 I_{D1} + I_{D2}) \Delta t f$</p> <p>$I_{D2} := 0,$ $P \approx \frac{1}{6} (2 V_{DS1} + V_{DS2}) I_{D1} \Delta t f$</p>	

$$P \approx \left[\frac{1}{3} (V_{DS1} - V_{DS2}) (I_{D1} - I_{D2}) - \frac{1}{2} I_{D1} (V_{DS1} - V_{DS2}) - \frac{1}{2} V_{DS1} (I_{D1} - I_{D2}) + V_{DS1} I_{D1} \right] \Delta t f \quad (A)$$

ただし、 f : スwitchング周波数 [Hz]

Table 2. 波形の形ごとの直線近似を用いた導通損失計算式

時間による I_D の変化		
$I_{D1} < I_{D2}$ 	$I_{D1} = I_{D2}$ 	$I_{D1} > I_{D2}$ 
ケース 1 (付録 J 参照)	ケース 2 (付録 K 参照)	ケース 3 (付録 L 参照)
$P \approx \frac{1}{3} R_{ON} (I_{D1}^2 + I_{D1} I_{D2} + I_{D2}^2) \Delta t f \quad (E)$	$P = R_{ON} I_{D1}^2 \Delta t f \quad (F)$	$P \approx \frac{1}{3} R_{ON} (I_{D1}^2 + I_{D1} I_{D2} + I_{D2}^2) \Delta t f \quad (E)$

ただし、 R_{ON} : MOSFET のオン抵抗 [Ω]

f : スイッチング周波数 [Hz]

算出例

実測したスイッチング波形(Figure 5)から電力損失を算出します。ターンオン時、導通時、ターンオフ時の拡大波形をそれぞれ Figure 6、7、8 に載せています。

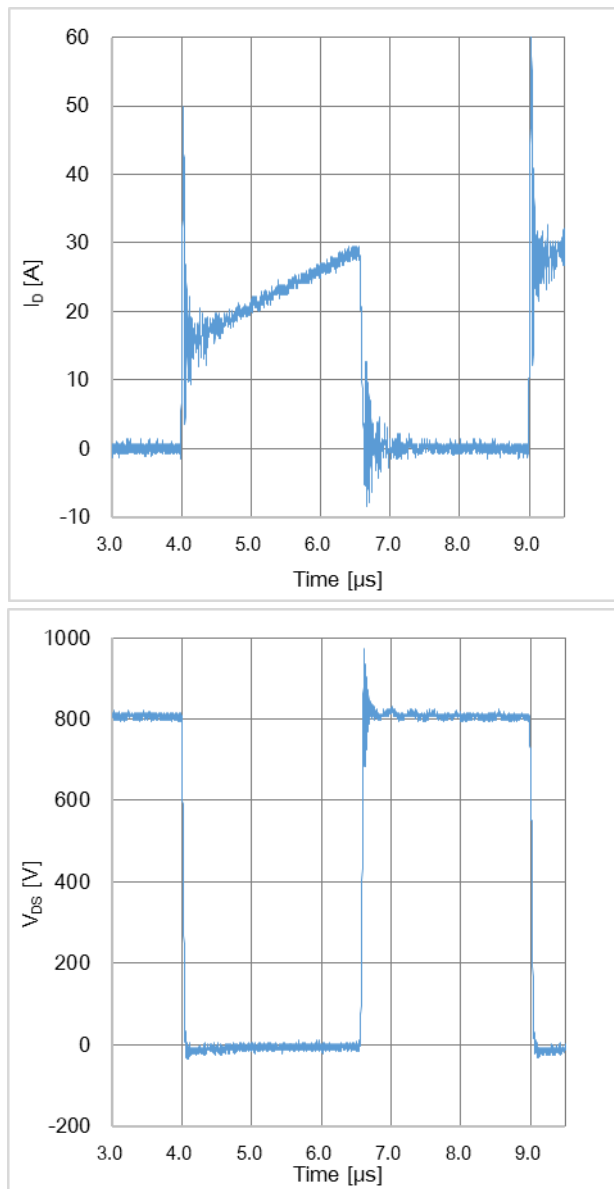


Figure 5. 電力損失の算出に使用するスイッチング波形
 □-△製 SiC MOSFET SCT3040KR
 スwitchング周波数 200kHz

Figure 6 はターンオン時の波形を拡大したものです。波形の途中で傾きが変わっているため、同じ傾きごとに区間を分割しますが、波形が複雑なため区間は主観的になります。区間ごとに開始電圧と電流、終了電圧と電流、時間を読み取ります。Table 1 の式(A)に値を代入して損失電力を求めます。

ターンオン時の計算例を次に示します。ここでは各区間を t1 から t5 という名前で分割しています。

$$P_{t1} = \left[\frac{1}{3}(V_{DS1} - V_{DS2})(I_{D1} - I_{D2}) - \frac{1}{2} I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2}) - \frac{1}{2} V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2}) + V_{DS1} I_{D1} \right] \Delta t f$$

$$= \left[\frac{1}{3}(800 - 800)(0 - 6.8) - \frac{1}{2} \times 0(800 - 800) - \frac{1}{2} \times 800(0 - 6.8) + 800 \times 0 \right] 7.8n \times 200k = 4.2 [W]$$

$$P_{t2} = \left[\frac{1}{3}(800 - 710)(6.8 - 10.7) - \frac{1}{2} \times 6.8(800 - 710) - \frac{1}{2} \times 800(6.8 - 10.7) + 800 \times 6.8 \right] 4.2n \times 200k = 5.5 [W]$$

$$P_{t3} = \left[\frac{1}{3}(710 - 389)(10.7 - 49.5) - \frac{1}{2} \times 10.7(710 - 389) - \frac{1}{2} \times 710(10.7 - 49.5) + 710 \times 10.7 \right] 24.9 \times 200k = 77.2 [W]$$

$$P_{t4} = \left[\frac{1}{3}(389 - 83)(49.5 - 31.6) - \frac{1}{2} \times 49.5(389 - 83) - \frac{1}{2} \times 389(49.5 - 31.6) + 389 \times 49.5 \right] 13n \times 200k = 26.1 [W]$$

$$P_{t5} = \left[\frac{1}{3}(83 - 18)(31.6 - 8.7) - \frac{1}{2} \times 31.6(83 - 18) - \frac{1}{2} \times 83(31.6 - 8.7) + 83 \times 31.6 \right] 7.9n \times 200k = 1.8 [W]$$

$$P_{ton} = P_{t1} + P_{t2} + P_{t3} + P_{t4} + P_{t5}$$

$$= 4.2 + 5.5 + 77.2 + 26.1 + 1.8$$

$$= 114.8 [W]$$

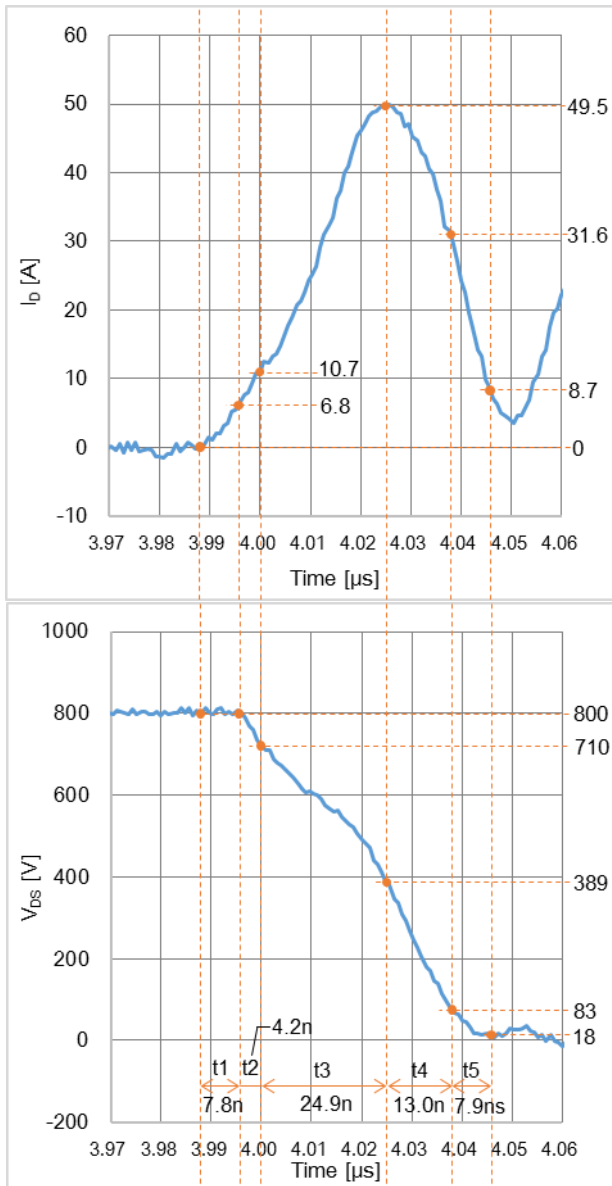


Figure 6. ターンオンの拡大波形と区間ごとの測定値

Figure 7 は導通時の拡大波形です。ここでは Table 2 の式(E)に値を代入して損失電力を求めます。MOSFET のオン抵抗はデータシートより最大値を使用します。

$$\begin{aligned}
 P_{ON} &= \frac{1}{3} R_{ON} (I_{D1}^2 + I_{D1} I_{D2} + I_{D2}^2) \Delta t f \\
 &= \frac{1}{3} \times 68m(15^2 + 15 \times 28.7 + 28.7^2) 2.49\mu \times 200k \\
 &= 16.7 [W]
 \end{aligned}$$

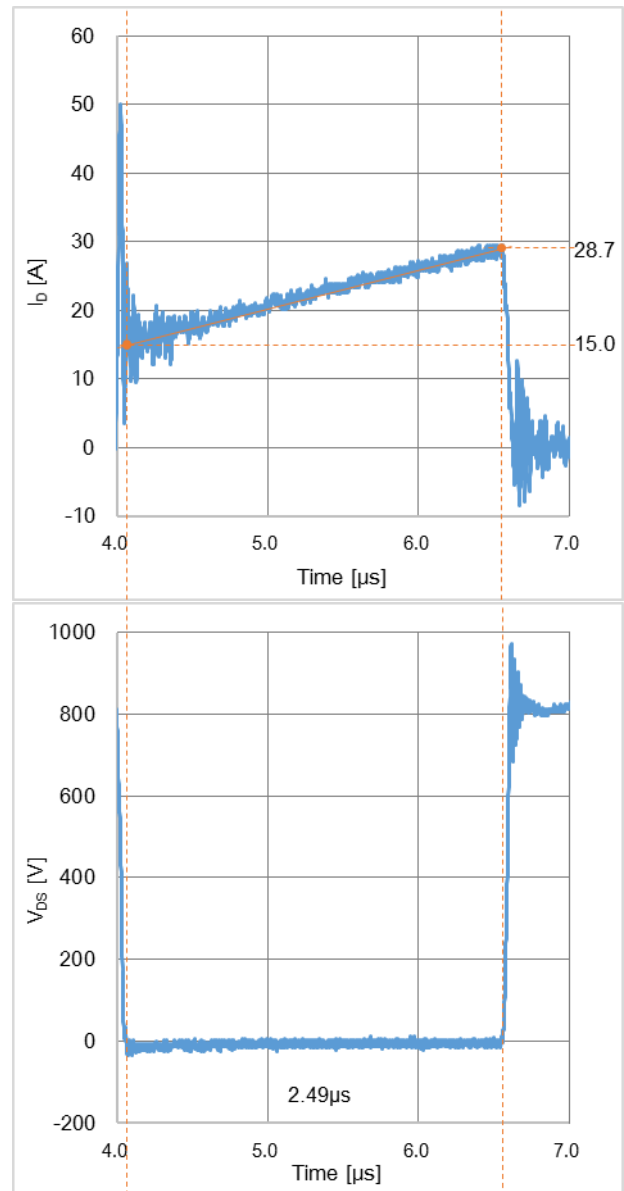


Figure 7. 導通時の拡大波形と測定値

Figure 8 はターンオフ時の波形を拡大したものです。これもターンオン時と同じ手順で算出します。

総電力損失は次式で求めることができます。

ターンオフ時の計算例を次に示します。ここでは各区間を t1 から t8 という名前で分割しています。

$$\begin{aligned}
 P &= P_{ton} + P_{ON} + P_{toff} \\
 &= 114.8 + 16.7 + 63.8 \\
 &= 195.3 [W]
 \end{aligned}$$

$$P_{t1} = 1.5 [W] \quad P_{t2} = 9.3 [W]$$

$$P_{t3} = 9.9 [W] \quad P_{t4} = 14.6 [W]$$

$$P_{t5} = 7.8 [W] \quad P_{t6} = 7.0 [W]$$

$$P_{t7} = 8.0 [W] \quad P_{t8} = 5.7 [W]$$

$$P_{toff} = 1.5 + 9.3 + 9.9 + 14.6 + 7.8 + 7 + 8 + 5.7 = 63.8 [W]$$

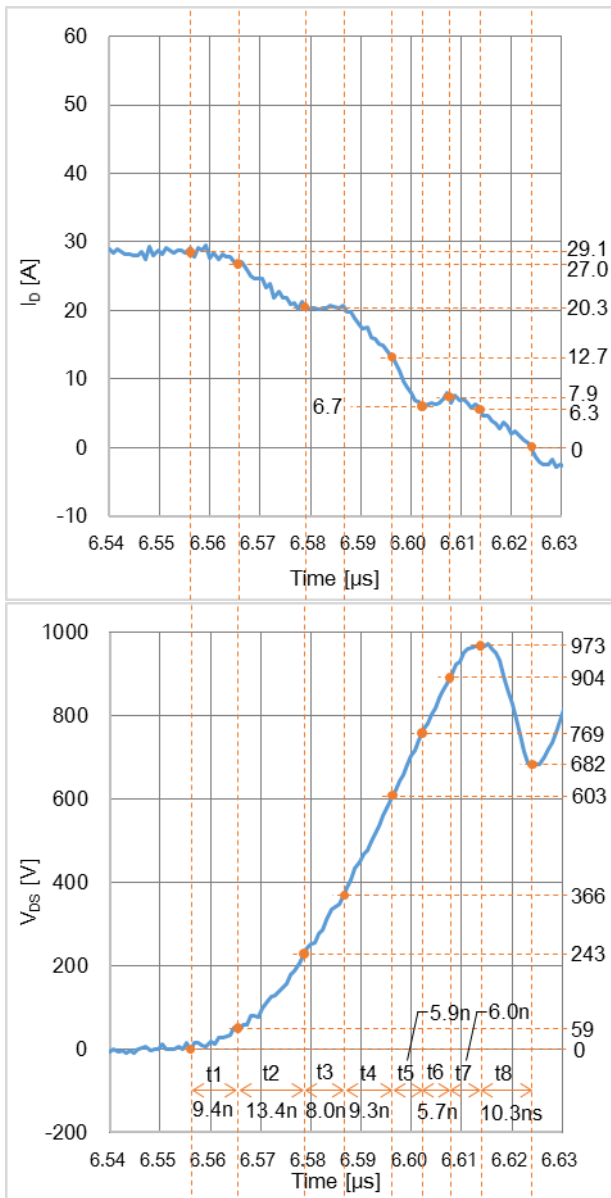


Figure 8. ターンオフの拡大波形と区間ごとの測定値

付録 A

スイッチング損失計算 (I_D 上昇、 V_{DS} 上昇波形時)

スイッチング波形のドレインソース間電圧 V_{DS} とドレイン電流 I_D から直線近似を用いてターンオン時およびターンオフ時の電力損失（スイッチング損失）を求めます。損失計算に用いる波形を Figure A-1 に示します。

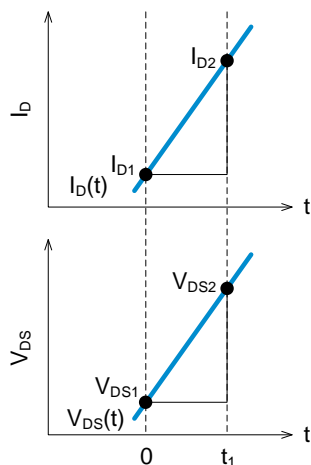


Figure A-1. 期間 0- t_1 の $I_D(t)$ と $V_{DS}(t)$

Figure A-1 で表す 0- t_1 の期間における電力損失 P は、一般的に式(A-1)に示す電流と電圧積の積分によって算出できます。

$$P = f \int_0^{t_1} I_D(t) V_{DS}(t) dt \quad (A-1)$$

ただし、 f : スwitching周波数 [Hz]

また、 $I_D(t)$ と $V_{DS}(t)$ は Figure A-1 の傾きより、式(A-2)(A-3)で表せます。

$$I_D(t) = I_{D1} + \frac{I_{D2} - I_{D1}}{t_1} t = I_{D1} - \frac{I_{D1} - I_{D2}}{t_1} t \quad (A-2)$$

$$V_{DS}(t) = V_{DS1} + \frac{V_{DS2} - V_{DS1}}{t_1} t = V_{DS1} - \frac{V_{DS1} - V_{DS2}}{t_1} t \quad (A-3)$$

(A-2)と(A-3)を(A-1)に代入します。

$$P = f \int_0^{t_1} \left(I_{D1} - \frac{I_{D1} - I_{D2}}{t_1} t \right) \left(V_{DS1} - \frac{V_{DS1} - V_{DS2}}{t_1} t \right) dt \quad (A-4)$$

$$= f \int_0^{t_1} \left(V_{DS1} I_{D1} - \frac{I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2}) + V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2})}{t_1} t + \frac{(V_{DS1} - V_{DS2})(I_{D1} - I_{D2})}{t_1^2} t^2 \right) dt \quad (A-5)$$

付録 A (つづき)

公式に従って積分します。

$$P = f \left[V_{DS1} I_{D1} t - \frac{1}{2} \frac{I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2}) + V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2})}{t_1} t^2 + \frac{1}{3} \frac{(V_{DS1} - V_{DS2})(I_{D1} - I_{D2})}{t_1^2} t^3 \right]_0^{t_1} \quad (A-6)$$

$$= f \left[V_{DS1} I_{D1} t_1 - \frac{1}{2} \frac{I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2}) + V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2})}{t_1} t_1^2 + \frac{1}{3} \frac{(V_{DS1} - V_{DS2})(I_{D1} - I_{D2})}{t_1^2} t_1^3 \right] \quad (A-7)$$

$$= f \left[V_{DS1} I_{D1} t_1 - \frac{1}{2} (I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2}) + V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2})) t_1 + \frac{1}{3} (V_{DS1} - V_{DS2})(I_{D1} - I_{D2}) t_1 \right] \quad (A-8)$$

$$= \left[\frac{1}{3} (V_{DS1} - V_{DS2})(I_{D1} - I_{D2}) - \frac{1}{2} I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2}) - \frac{1}{2} V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2}) + V_{DS1} I_{D1} \right] t_1 f \quad [W] \quad (A-9)$$

ただし、 f : スイッチング周波数 [Hz]

次にある条件下での電力損失を求めます。

$$\underline{V_{DS1} := 0} \quad (A-10)$$

(A-10)を(A-9)に代入します。

$$P = \left[\frac{1}{3} (0 - V_{DS2})(I_{D1} - I_{D2}) - \frac{1}{2} I_{D1}(0 - V_{DS2}) - \frac{1}{2} \times 0(I_{D1} - I_{D2}) + 0 \times I_{D1} \right] t_1 f \quad (A-11)$$

$$= \left[-\frac{1}{3} V_{DS2}(I_{D1} - I_{D2}) + \frac{1}{2} I_{D1} V_{DS2} \right] t_1 f \quad (A-12)$$

$$= \frac{1}{6} V_{DS2}(I_{D1} + 2 I_{D2}) t_1 f \quad [W] \quad (A-13)$$

$$\underline{I_{D1} := 0} \quad (A-14)$$

(A-14)を(A-9)に代入します。

$$P = \left[\frac{1}{3} (V_{DS1} - V_{DS2})(0 - I_{D2}) - \frac{1}{2} \times 0(V_{DS1} - V_{DS2}) - \frac{1}{2} V_{DS1}(0 - I_{D2}) + V_{DS1} \times 0 \right] t_1 f \quad (A-15)$$

$$= \left[\frac{1}{3} (V_{DS1} - V_{DS2})(-I_{D2}) + \frac{1}{2} V_{DS1} I_{D2} \right] t_1 f \quad (A-16)$$

$$= \frac{1}{6} (V_{DS1} + 2 V_{DS2}) I_{D2} t_1 f \quad [W] \quad (A-17)$$

付録 B

スイッチング損失計算 (I_D 上昇、 V_{DS} 一定波形時)

スイッチング波形のドレインソース間電圧 V_{DS} とドレイン電流 I_D から直線近似を用いてターンオン時およびターンオフ時の電力損失（スイッチング損失）を求めます。損失計算に用いる波形を Figure B-1 に示します。

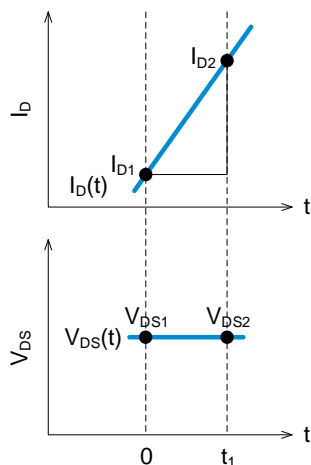


Figure B-1. 期間 $0-t_1$ の $I_D(t)$ と $V_{DS}(t)$

Figure B-1 で表す $0-t_1$ の期間における電力損失 P は、一般的に式(B-1)に示す電流と電圧積の積分によって算出できます。

$$P = f \int_0^{t_1} I_D(t) V_{DS}(t) dt \quad (B-1)$$

ただし、 f : スwitching周波数 [Hz]

また、 $I_D(t)$ と $V_{DS}(t)$ は Figure B-1 の傾きより、式(B-2)(B-3)で表せます。

$$I_D(t) = I_{D1} + \frac{I_{D2} - I_{D1}}{t_1} t = I_{D1} - \frac{I_{D1} - I_{D2}}{t_1} t \quad (B-2)$$

$$V_{DS}(t) = V_{DS1} \quad (B-3)$$

(B-2)と(B-3)を(B-1)に代入します。

$$P = f \int_0^{t_1} \left(I_{D1} - \frac{I_{D1} - I_{D2}}{t_1} t \right) (V_{DS1}) dt \quad (B-4)$$

$$= f \int_0^{t_1} \left(V_{DS1} I_{D1} - \frac{V_{DS1} (I_{D1} - I_{D2})}{t_1} t \right) dt \quad (B-5)$$

付録 B (つづき)

公式に従って積分します。

$$P = f \left[V_{DS1} I_{D1} t - \frac{1}{2} \frac{V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2})}{t_1} t^2 \right]_0^{t_1} \quad (B-6)$$

$$= f \left[V_{DS1} I_{D1} t_1 - \frac{1}{2} \frac{V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2})}{t_1} t_1^2 \right] \quad (B-7)$$

$$= f \left[V_{DS1} I_{D1} t_1 - \frac{1}{2} (V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2})) t_1 \right] \quad (B-8)$$

$$= \frac{1}{2} V_{DS1} (I_{D1} + I_{D2}) t_1 f \quad [W] \quad (B-9)$$

次にある条件下での電力損失を求めます。

$$\underline{I_{D1} := 0} \quad (B-10)$$

(B-10)を(B-9)に代入します。

$$\underline{P = \frac{1}{2} V_{DS1} I_{D2} t_1 f} \quad [W] \quad (B-11)$$

付録 C

スイッチング損失計算 (I_D 上昇、 V_{DS} 降下波形時)

スイッチング波形のドレインソース間電圧 V_{DS} とドレイン電流 I_D から直線近似を用いてターンオン時およびターンオフ時の電力損失（スイッチング損失）を求めます。損失計算に用いる波形を Figure C-1 に示します。

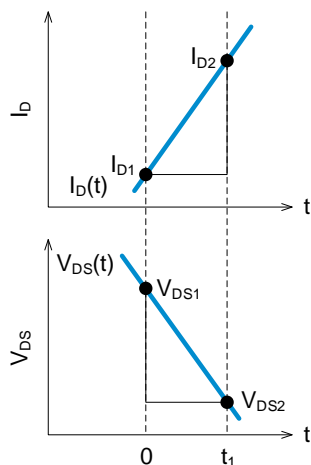


Figure C-1. 期間 $0-t_1$ の $I_D(t)$ と $V_{DS}(t)$

Figure C-1 で表す $0-t_1$ の期間における電力損失 P は、一般的に式(C-1)に示す電流と電圧積の積分によって算出できます。

$$P = f \int_0^{t_1} I_D(t) V_{DS}(t) dt \quad (C-1)$$

ただし、 f : スwitching周波数 [Hz]

また、 $I_D(t)$ と $V_{DS}(t)$ は Figure C-1 の傾きより、式(C-2)(C-3)で表せます。

$$I_D(t) = I_{D1} + \frac{I_{D2} - I_{D1}}{t_1} t = I_{D1} - \frac{I_{D1} - I_{D2}}{t_1} t \quad (C-2)$$

$$V_{DS}(t) = V_{DS1} - \frac{V_{DS1} - V_{DS2}}{t_1} t \quad (C-3)$$

(C-2)と(C-3)を(C-1)に代入します。

$$P = f \int_0^{t_1} \left(I_{D1} - \frac{I_{D1} - I_{D2}}{t_1} t \right) \left(V_{DS1} - \frac{V_{DS1} - V_{DS2}}{t_1} t \right) dt \quad (C-4)$$

$$= f \int_0^{t_1} \left(V_{DS1} I_{D1} - \frac{I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2}) + V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2})}{t_1} t + \frac{(V_{DS1} - V_{DS2})(I_{D1} - I_{D2})}{t_1^2} t^2 \right) dt \quad (C-5)$$

付録 C (つづき)

公式に従って積分します。

$$P = f \left[V_{DS1} I_{D1} t - \frac{1}{2} \frac{I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2}) + V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2})}{t_1} t^2 + \frac{1}{3} \frac{(V_{DS1} - V_{DS2})(I_{D1} - I_{D2})}{t_1^2} t^3 \right]_0^{t_1} \quad (C-6)$$

$$= f \left[V_{DS1} I_{D1} t_1 - \frac{1}{2} \frac{I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2}) + V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2})}{t_1} t_1^2 + \frac{1}{3} \frac{(V_{DS1} - V_{DS2})(I_{D1} - I_{D2})}{t_1^2} t_1^3 \right] \quad (C-7)$$

$$= f \left[V_{DS1} I_{D1} t_1 - \frac{1}{2} (I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2}) + V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2})) t_1 + \frac{1}{3} (V_{DS1} - V_{DS2})(I_{D1} - I_{D2}) t_1 \right] \quad (C-8)$$

$$= \left[\frac{1}{3} (V_{DS1} - V_{DS2})(I_{D1} - I_{D2}) - \frac{1}{2} I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2}) - \frac{1}{2} V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2}) + V_{DS1} I_{D1} \right] t_1 f \quad [W] \quad (C-9)$$

次にある条件下での電力損失を求めます。

$$\underline{I_{D1} := 0} \quad (C-10)$$

(C-10)を(C-9)に代入します。

$$P = \left[\frac{1}{3} (V_{DS1} - V_{DS2})(0 - I_{D2}) - \frac{1}{2} \times 0(V_{DS1} - V_{DS2}) - \frac{1}{2} V_{DS1}(0 - I_{D2}) + V_{DS1} \times 0 \right] t_1 f \quad (C-11)$$

$$= \left[\frac{1}{3} (V_{DS1} - V_{DS2})(-I_{D2}) + \frac{1}{2} V_{DS1} I_{D2} \right] t_1 f \quad (C-12)$$

$$= \frac{1}{6} (V_{DS1} + 2 V_{DS2}) I_{D2} t_1 f \quad [W] \quad (C-13)$$

$$\underline{V_{DS2} := 0} \quad (C-14)$$

(C-14)を(C-9)に代入します。

$$P = \left[\frac{1}{3} (V_{DS1} - 0)(I_{D1} - I_{D2}) - \frac{1}{2} I_{D1}(V_{DS1} - 0) - \frac{1}{2} V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2}) + V_{DS1} I_{D1} \right] t_1 f \quad (C-15)$$

$$= \left[\frac{1}{3} V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2}) - \frac{1}{2} I_{D1} V_{DS1} - \frac{1}{2} V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2}) + V_{DS1} I_{D1} \right] t_1 f \quad (C-16)$$

$$= \frac{1}{6} V_{DS1} (2 I_{D1} + I_{D2}) t_1 f \quad [W] \quad (C-17)$$

$$\underline{I_{D1} := 0, V_{DS2} := 0} \quad (C-18)$$

(C-18)を(C-9)に代入します。

$$P = \left[\frac{1}{3} (V_{DS1} - 0)(0 - I_{D2}) - \frac{1}{2} \times 0(V_{DS1} - 0) - \frac{1}{2} V_{DS1}(0 - I_{D2}) + V_{DS1} \times 0 \right] t_1 f \quad (C-19)$$

$$= \left[\frac{1}{3} V_{DS1}(-I_{D2}) - \frac{1}{2} V_{DS1}(-I_{D2}) \right] t_1 f \quad (C-20)$$

$$= \frac{1}{6} V_{DS1} I_{D2} t_1 f \quad [W] \quad (C-21)$$

付録 D

スイッチング損失計算 (I_D 一定、 V_{DS} 上昇波形時)

スイッチング波形のドレインソース間電圧 V_{DS} とドレイン電流 I_D から直線近似を用いてターンオン時およびターンオフ時の電力損失（スイッチング損失）を求めます。損失計算に用いる波形を Figure D-1 に示します。

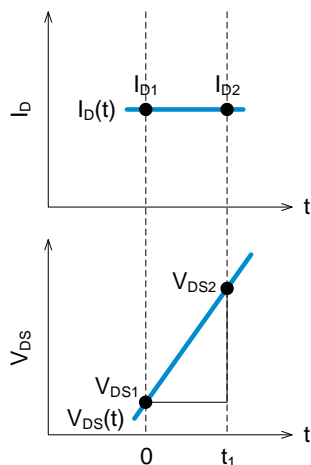


Figure D-1. 期間 0- t_1 の $I_D(t)$ と $V_{DS}(t)$

Figure D-1 で表す 0- t_1 の期間における電力損失 P は、一般的に式(D-1)に示す電流と電圧積の積分によって算出できます。

$$P = f \int_0^{t_1} I_D(t) V_{DS}(t) dt \quad (D-1)$$

ただし、 f : スwitching周波数 [Hz]

また、 $I_D(t)$ と $V_{DS}(t)$ は Figure D-1 の傾きより、式(D-2)(D-3)で表せます。

$$I_D(t) = I_{D1} \quad (D-2)$$

$$V_{DS}(t) = V_{DS1} + \frac{V_{DS2} - V_{DS1}}{t_1} t = V_{DS1} - \frac{V_{DS1} - V_{DS2}}{t_1} t \quad (D-3)$$

(D-2)と(D-3)を(D-1)に代入します。

$$P = f \int_0^{t_1} I_{D1} \left(V_{DS1} - \frac{V_{DS1} - V_{DS2}}{t_1} t \right) dt \quad (D-4)$$

$$= f \int_0^{t_1} \left(V_{DS1} I_{D1} - \frac{I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2})}{t_1} t \right) dt \quad (D-5)$$

付録 D (つづき)

公式に従って積分します。

$$P = f \left[V_{DS1} I_{D1} t - \frac{1}{2} \frac{I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2})}{t_1} t^2 \right]_0^{t_1} \quad (D-6)$$

$$= f \left[V_{DS1} I_{D1} t_1 - \frac{1}{2} \frac{I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2})}{t_1} t_1^2 \right] \quad (D-7)$$

$$= f \left[V_{DS1} I_{D1} t_1 - \frac{1}{2} (I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2})) t_1 \right] \quad (D-8)$$

$$= \frac{1}{2} (V_{DS1} + V_{DS2}) I_{D1} t_1 f \quad [W] \quad (D-9)$$

次にある条件下での電力損失を求めます。

$$\underline{V_{DS1} := 0} \quad (D-10)$$

(D-10)を(D-9)に代入します。

$$P = \frac{1}{2} (0 + V_{DS2}) I_{D1} t_1 f \quad (D-11)$$

$$= \frac{1}{2} V_{DS2} I_{D1} t_1 f \quad [W] \quad (D-12)$$

付録 E

スイッチング損失計算 (I_D 一定、 V_{DS} 一定)

スイッチング波形のドレインソース間電圧 V_{DS} とドレイン電流 I_D から直線近似を用いてターンオン時およびターンオフ時の電力損失（スイッチング損失）を求めます。損失計算に用いる波形を Figure E-1 に示します。

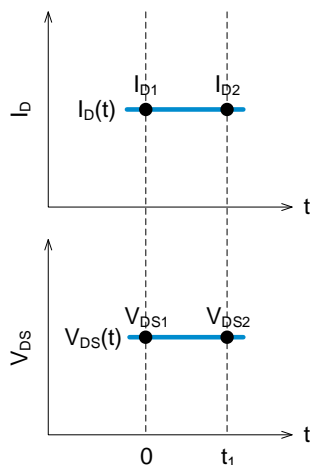


Figure E-1. 期間 0- t_1 の $I_D(t)$ と $V_{DS}(t)$

Figure E-1 で表す 0- t_1 の期間における電力損失 P は、一般的に式(E-1)に示す電流と電圧積の積分によって算出できます。

$$P = f \int_0^{t_1} I_D(t) V_{DS}(t) dt \quad (E-1)$$

ただし、 f : スwitching周波数 [Hz]

また、 $I_D(t)$ と $V_{DS}(t)$ は Figure E-1 の傾きより、式(E-2)(E-3)で表せます。

$$I_D(t) = I_{D1} \quad (E-2)$$

$$V_{DS}(t) = V_{DS1} \quad (E-3)$$

(E-2)と(E-3)を(E-1)に代入します。

$$P = f \int_0^{t_1} I_{D1} V_{DS1} dt \quad (E-4)$$

公式に従って積分します。

$$P = f [V_{DS1} I_{D1} t]_0^{t_1} \quad (E-5)$$

$$= V_{DS1} I_{D1} t_1 f \quad [W] \quad (E-6)$$

付録 F

スイッチング損失計算 (I_D 一定、 V_{DS} 降下波形時)

スイッチング波形のドレインソース間電圧 V_{DS} とドレイン電流 I_D から直線近似を用いてターンオン時およびターンオフ時の電力損失（スイッチング損失）を求めます。損失計算に用いる波形を Figure F-1 に示します。

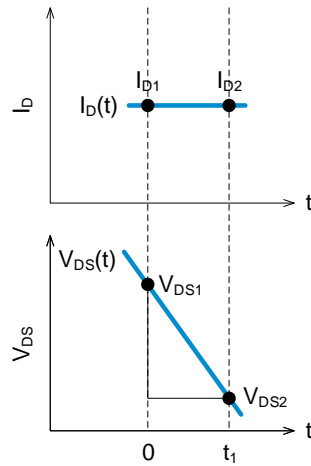


Figure F-1. 期間 0- t_1 の $I_D(t)$ と $V_{DS}(t)$

Figure F-1 で表す 0- t_1 の期間における電力損失 P は、一般的に式(F-1)に示す電流と電圧積の積分によって算出できます。

$$P = f \int_0^{t_1} I_D(t) V_{DS}(t) dt \quad (F-1)$$

ただし、 f : スwitching周波数 [Hz]

また、 $I_D(t)$ と $V_{DS}(t)$ は Figure F-1 の傾きより、式(F-2)(F-3)で表せます。

$$I_D(t) = I_{D1} \quad (F-2)$$

$$V_{DS}(t) = V_{DS1} - \frac{V_{DS1} - V_{DS2}}{t_1} t \quad (F-3)$$

(F-2)と(F-3)を(F-1)に代入します。

$$P = f \int_0^{t_1} I_{D1} \left(V_{DS1} - \frac{V_{DS1} - V_{DS2}}{t_1} t \right) dt \quad (F-4)$$

$$= f \int_0^{t_1} \left(V_{DS1} I_{D1} - \frac{I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2})}{t_1} t \right) dt \quad (F-5)$$

付録 F (つづき)

公式に従って積分します。

$$P = f \left[V_{DS1} I_{D1} t - \frac{1}{2} \frac{I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2})}{t_1} t^2 \right]_0^{t_1} \quad (F-6)$$

$$= f \left[V_{DS1} I_{D1} t_1 - \frac{1}{2} \frac{I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2})}{t_1} t_1^2 \right] \quad (F-7)$$

$$= f \left[V_{DS1} I_{D1} t_1 - \frac{1}{2} (I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2})) t_1 \right] \quad (F-8)$$

$$= \frac{1}{2} (V_{DS1} + V_{DS2}) I_{D1} t_1 f \quad [W] \quad (F-9)$$

次にある条件下での電力損失を求めます。

$$\underline{V_{DS2} := 0} \quad (F-10)$$

(F-10)を(F-9)に代入します。

$$P = \frac{1}{2} (V_{DS1} + 0) I_{D1} t_1 f \quad (F-11)$$

$$= \frac{1}{2} V_{DS1} I_{D1} t_1 f \quad [W] \quad (F-12)$$

付録 G

スイッチング損失計算 (I_D 降下、 V_{DS} 上昇波形時)

スイッチング波形のドレインソース間電圧 V_{DS} とドレイン電流 I_D から直線近似を用いてターンオン時およびターンオフ時の電力損失（スイッチング損失）を求めます。損失計算に用いる波形を Figure G-1 に示します。

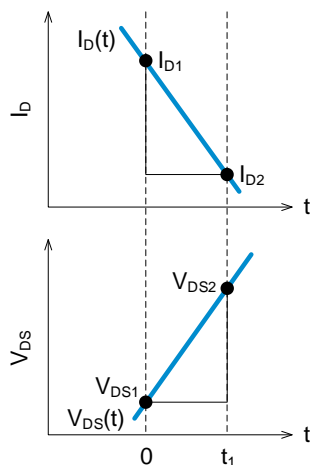


Figure G-1. 期間 $0-t_1$ の $I_D(t)$ と $V_{DS}(t)$

Figure G-1 で表す $0-t_1$ の期間における電力損失 P は、一般的に式(C-1)に示す電流と電圧積の積分によって算出できます。

$$P = f \int_0^{t_1} I_D(t) V_{DS}(t) dt \quad (G-1)$$

ただし、 f : スwitching周波数 [Hz]

また、 $I_D(t)$ と $V_{DS}(t)$ は Figure G-1 の傾きより、式(G-2)(G-3)で表せます。

$$I_D(t) = I_{D1} - \frac{I_{D1} - I_{D2}}{t_1} t \quad (G-2)$$

$$V_{DS}(t) = V_{DS1} + \frac{V_{DS2} - V_{DS1}}{t_1} t = V_{DS1} - \frac{V_{DS1} - V_{DS2}}{t_1} t \quad (G-3)$$

(G-2)と(G-3)を(G-1)に代入します。

$$P = f \int_0^{t_1} \left(I_{D1} - \frac{I_{D1} - I_{D2}}{t_1} t \right) \left(V_{DS1} - \frac{V_{DS1} - V_{DS2}}{t_1} t \right) dt \quad (G-4)$$

$$= f \int_0^{t_1} \left(V_{DS1} I_{D1} - \frac{I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2}) + V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2})}{t_1} t + \frac{(V_{DS1} - V_{DS2})(I_{D1} - I_{D2})}{t_1^2} t^2 \right) dt \quad (G-5)$$

付録 G (つづき)

公式に従って積分します。

$$P = f \left[V_{DS1} I_{D1} t - \frac{1}{2} \frac{I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2}) + V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2})}{t_1} t^2 + \frac{1}{3} \frac{(V_{DS1} - V_{DS2})(I_{D1} - I_{D2})}{t_1^2} t^3 \right]_0^{t_1} \quad (G-6)$$

$$= f \left[V_{DS1} I_{D1} t_1 - \frac{1}{2} \frac{I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2}) + V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2})}{t_1} t_1^2 + \frac{1}{3} \frac{(V_{DS1} - V_{DS2})(I_{D1} - I_{D2})}{t_1^2} t_1^3 \right] \quad (G-7)$$

$$= f \left[V_{DS1} I_{D1} t_1 - \frac{1}{2} (I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2}) + V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2})) t_1 + \frac{1}{3} (V_{DS1} - V_{DS2})(I_{D1} - I_{D2}) t_1 \right] \quad (G-8)$$

$$= \left[\frac{1}{3} (V_{DS1} - V_{DS2})(I_{D1} - I_{D2}) - \frac{1}{2} I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2}) - \frac{1}{2} V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2}) + V_{DS1} I_{D1} \right] t_1 f \quad [W] \quad (G-9)$$

次にある条件下での電力損失を求めます。

$$\underline{I_{D2} := 0} \quad (G-10)$$

(G-10)を(G-9)に代入します。

$$P = \left[\frac{1}{3} (V_{DS1} - V_{DS2})(I_{D1} - 0) - \frac{1}{2} I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2}) - \frac{1}{2} V_{DS1}(I_{D1} - 0) + V_{DS1} I_{D1} \right] t_1 f \quad (G-11)$$

$$= \left[\frac{1}{3} (V_{DS1} - V_{DS2}) I_{D1} - \frac{1}{2} I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2}) - \frac{1}{2} V_{DS1} I_{D1} + V_{DS1} I_{D1} \right] t_1 f \quad (G-12)$$

$$= \frac{1}{6} (2 V_{DS1} + V_{DS2}) I_{D1} t_1 f \quad [W] \quad (G-13)$$

$$\underline{V_{DS1} := 0} \quad (G-14)$$

(G-14)を(G-9)に代入します。

$$P = \left[\frac{1}{3} (0 - V_{DS2})(I_{D1} - I_{D2}) - \frac{1}{2} I_{D1}(0 - V_{DS2}) - \frac{1}{2} \times 0(I_{D1} - I_{D2}) + 0 \times I_{D1} \right] t_1 f \quad (G-15)$$

$$= \left[-\frac{1}{3} V_{DS2}(I_{D1} - I_{D2}) + \frac{1}{2} I_{D1} V_{DS2} \right] t_1 f \quad (G-16)$$

$$= \frac{1}{6} V_{DS2}(I_{D1} + 2 I_{D2}) t_1 f \quad [W] \quad (G-17)$$

$$\underline{I_{D2} := 0, V_{DS1} := 0} \quad (G-18)$$

(G-18)を(G-9)に代入します。

$$P = \left[\frac{1}{3} (0 - V_{DS2})(I_{D1} - 0) - \frac{1}{2} I_{D1}(0 - V_{DS2}) - \frac{1}{2} \times 0(I_{D1} - 0) + 0 \times I_{D1} \right] t_1 f \quad (G-19)$$

$$= \left(-\frac{1}{3} V_{DS2} I_{D1} + \frac{1}{2} I_{D1} V_{DS2} \right) t_1 f \quad (G-20)$$

$$= \frac{1}{6} V_{DS2} I_{D1} t_1 f \quad [W] \quad (G-21)$$

付録 H

スイッチング損失計算 (I_D 降下、 V_{DS} 一定波形時)

スイッチング波形のドレインソース間電圧 V_{DS} とドレイン電流 I_D から直線近似を用いてターンオン時およびターンオフ時の電力損失（スイッチング損失）を求めます。損失計算に用いる波形を Figure H-1 に示します。

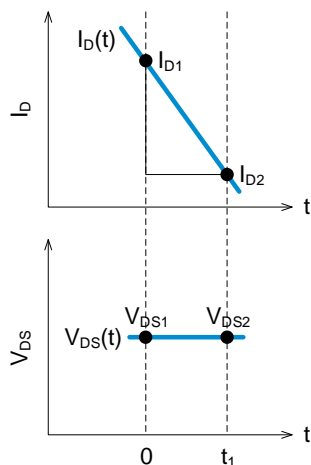


Figure H-1. 期間 $0-t_1$ の $I_D(t)$ と $V_{DS}(t)$

Figure H-1 で表す $0-t_1$ の期間における電力損失 P は、一般的に式(H-1)に示す電流と電圧積の積分によって算出できます。

$$P = f \int_0^{t_1} I_D(t) V_{DS}(t) dt \quad (H-1)$$

ただし、 f : スwitching周波数 [Hz]

また、 $I_D(t)$ と $V_{DS}(t)$ は Figure H-1 の傾きより、式(H-2)(H-3)で表せます。

$$I_D(t) = I_{D1} - \frac{I_{D1} - I_{D2}}{t_1} t \quad (H-2)$$

$$V_{DS}(t) = V_{DS1} \quad (H-3)$$

(H-2)と(H-3)を(H-1)に代入します。

$$P = f \int_0^{t_1} \left(I_{D1} - \frac{I_{D1} - I_{D2}}{t_1} t \right) (V_{DS1}) dt \quad (H-4)$$

$$= f \int_0^{t_1} \left(V_{DS1} I_{D1} - \frac{V_{DS1} (I_{D1} - I_{D2})}{t_1} t \right) dt \quad (H-5)$$

付録 H (つづき)

公式に従って積分します。

$$P = f \left[V_{DS1} I_{D1} t - \frac{1}{2} \frac{V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2})}{t_1} t^2 \right]_0^{t_1} \quad (H-6)$$

$$= f \left[V_{DS1} I_{D1} t_1 - \frac{1}{2} \frac{V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2})}{t_1} t_1^2 \right] \quad (H-7)$$

$$= f \left[V_{DS1} I_{D1} t_1 - \frac{1}{2} (V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2})) t_1 \right] \quad (H-8)$$

$$= \frac{1}{2} V_{DS1} (I_{D1} + I_{D2}) t_1 f \quad [W] \quad (H-9)$$

次にある条件下での電力損失を求めます。

$$\underline{I_{D2} := 0} \quad (H-10)$$

(H-10)を(H-9)に代入します。

$$\underline{P = \frac{1}{2} V_{DS1} I_{D1} t_1 f} \quad [W] \quad (H-11)$$

付録 I

スイッチング損失計算 (I_D 降下、 V_{DS} 降下波形時)

スイッチング波形のドレインソース間電圧 V_{DS} とドレイン電流 I_D から直線近似を用いてターンオン時およびターンオフ時の電力損失（スイッチング損失）を求めます。損失計算に用いる波形を Figure I-1 に示します。

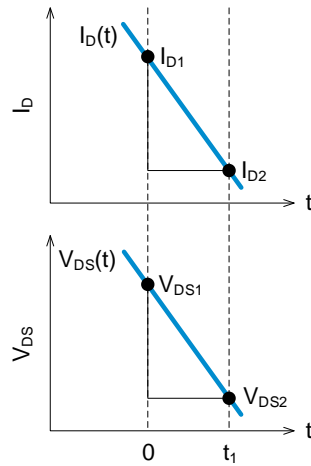


Figure I-1. 期間 $0-t_1$ の $I_D(t)$ と $V_{DS}(t)$

Figure I-1 で表す $0-t_1$ の期間における電力損失 P は、一般的に式(I-1)に示す電流と電圧積の積分によって算出できます。

$$P = f \int_0^{t_1} I_D(t) V_{DS}(t) dt \quad (I-1)$$

ただし、 f : スwitchング周波数 [Hz]

また、 $I_D(t)$ と $V_{DS}(t)$ は Figure I-1 の傾きより、式(I-2)(I-3)で表せます。

$$I_D(t) = I_{D1} - \frac{I_{D1} - I_{D2}}{t_1} t \quad (I-2)$$

$$V_{DS}(t) = V_{DS1} - \frac{V_{DS1} - V_{DS2}}{t_1} t \quad (I-3)$$

(I-2)と(I-3)を(I-1)に代入します。

$$P = f \int_0^{t_1} \left(I_{D1} - \frac{I_{D1} - I_{D2}}{t_1} t \right) \left(V_{DS1} - \frac{V_{DS1} - V_{DS2}}{t_1} t \right) dt \quad (I-4)$$

$$= f \int_0^{t_1} \left(V_{DS1} I_{D1} - \frac{I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2}) + V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2})}{t_1} t + \frac{(V_{DS1} - V_{DS2})(I_{D1} - I_{D2})}{t_1^2} t^2 \right) dt \quad (I-5)$$

付録 I (つづき)

公式に従って積分します。

$$P = f \left[V_{DS1} I_{D1} t - \frac{1}{2} \frac{I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2}) + V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2})}{t_1} t^2 + \frac{1}{3} \frac{(V_{DS1} - V_{DS2})(I_{D1} - I_{D2})}{t_1^2} t^3 \right]_0^{t_1} \quad (I-6)$$

$$= f \left[V_{DS1} I_{D1} t_1 - \frac{1}{2} \frac{I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2}) + V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2})}{t_1} t_1^2 + \frac{1}{3} \frac{(V_{DS1} - V_{DS2})(I_{D1} - I_{D2})}{t_1^2} t_1^3 \right] \quad (I-7)$$

$$= f \left[V_{DS1} I_{D1} t_1 - \frac{1}{2} (I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2}) + V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2})) t_1 + \frac{1}{3} (V_{DS1} - V_{DS2})(I_{D1} - I_{D2}) t_1 \right] \quad (I-8)$$

$$= \left[\frac{1}{3} (V_{DS1} - V_{DS2})(I_{D1} - I_{D2}) - \frac{1}{2} I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2}) - \frac{1}{2} V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2}) + V_{DS1} I_{D1} \right] t_1 f \quad [W] \quad (I-9)$$

次にある条件下での電力損失を求めます。

$$\underline{V_{DS2} := 0} \quad (I-10)$$

(I-10)を(I-9)に代入します。

$$P = \left[\frac{1}{3} (V_{DS1} - 0)(I_{D1} - I_{D2}) - \frac{1}{2} I_{D1}(V_{DS1} - 0) - \frac{1}{2} V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2}) + V_{DS1} I_{D1} \right] t_1 f \quad (I-11)$$

$$= \left[\frac{1}{3} V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2}) - \frac{1}{2} I_{D1} V_{DS1} - \frac{1}{2} V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2}) + V_{DS1} I_{D1} \right] t_1 f \quad (I-12)$$

$$= \underline{\underline{\frac{1}{6} V_{DS1}(2 I_{D1} + I_{D2}) t_1 f}} \quad [W] \quad (I-13)$$

$$\underline{I_{D2} := 0} \quad (I-14)$$

(I-14)を(I-9)に代入します。

$$P = \left[\frac{1}{3} (V_{DS1} - V_{DS2})(I_{D1} - 0) - \frac{1}{2} I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2}) - \frac{1}{2} V_{DS1}(I_{D1} - 0) + V_{DS1} I_{D1} \right] t_1 f \quad (I-15)$$

$$= \left[\frac{1}{3} (V_{DS1} - V_{DS2}) I_{D1} - \frac{1}{2} I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2}) - \frac{1}{2} V_{DS1} I_{D1} + V_{DS1} I_{D1} \right] t_1 f \quad (I-16)$$

$$= \underline{\underline{\frac{1}{6} (2 V_{DS1} + V_{DS2}) I_{D1} t_1 f}} \quad [W] \quad (I-17)$$

付録 J

導通時の電力損失計算 (I_D 上昇)

MOSFET のオン抵抗 R_{ON} とスイッチング波形のドレイン電流 I_D から直線近似を用いて導通時 ($0-t_1$) の電力損失を求めます。損失計算に用いる波形を Figure J-1 に示します。

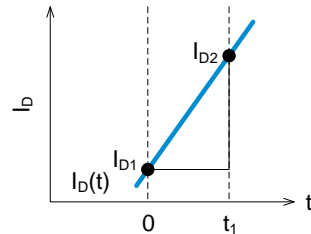


Figure J-1. 期間 $0-t_1$ の $I_D(t)$

Figure J-1 では $0-t_1$ の期間で、MOSFET が導通しているため V_{DS} は MOSFET のオン抵抗 R_{ON} と I_D の積になります。

$0-t_1$ の期間における電力損失 P は、一般的に式(J-1)に示す抵抗と電流の 2 乗積の積分によって算出できます。

$$P = f \int_0^{t_1} R_{ON} I_D(t)^2 dt \quad (J-1)$$

ただし、 R_{ON} : MOSFET のオン抵抗 [Ω]

f : スwitching 周波数 [Hz]

また、 $I_D(t)$ は Figure J-1 の傾きより、式(J-2)で表せます。

$$I_D(t) = I_{D1} + \frac{I_{D2} - I_{D1}}{t_1} t = I_{D1} - \frac{I_{D1} - I_{D2}}{t_1} t \quad (J-2)$$

(J-2)を(J-1)に代入します。

$$P = f \int_0^{t_1} R_{ON} \left(I_{D1} - \frac{I_{D1} - I_{D2}}{t_1} t \right)^2 dt \quad (J-3)$$

$$= f \int_0^{t_1} R_{ON} \left(I_{D1}^2 - 2 I_{D1} \frac{I_{D1} - I_{D2}}{t_1} t + \frac{(I_{D1} - I_{D2})^2}{t_1^2} t^2 \right) dt \quad (J-4)$$

公式に従って積分します。

$$P = f R_{ON} \left[I_{D1}^2 t - 2 I_{D1} \frac{I_{D1} - I_{D2}}{2 t_1} t^2 + \frac{(I_{D1} - I_{D2})^2}{3 t_1^2} t^3 \right]_0^{t_1} \quad (J-5)$$

$$= f R_{ON} \left(I_{D1}^2 t_1 - 2 I_{D1} \frac{I_{D1} - I_{D2}}{2 t_1} t_1^2 + \frac{(I_{D1} - I_{D2})^2}{3 t_1^2} t_1^3 \right) \quad (J-6)$$

$$= f R_{ON} \left(I_{D1}^2 t_1 - I_{D1} (I_{D1} - I_{D2}) t_1 + \frac{(I_{D1} - I_{D2})^2}{3} t_1 \right) \quad (J-7)$$

$$= f R_{ON} \left(I_{D1}^2 - I_{D1} (I_{D1} - I_{D2}) + \frac{(I_{D1} - I_{D2})^2}{3} \right) t_1 \quad (J-8)$$

付録 J (つづき)

$$P = f R_{ON} \left(I_{D1} I_{D2} + \frac{I_{D1}^2 - 2 I_{D1} I_{D2} + I_{D2}^2}{3} \right) t_1 \quad (J-9)$$

$$= f R_{ON} \left(\frac{I_{D1}^2 - 2 I_{D1} I_{D2} + I_{D2}^2 - 3 I_{D1}^2 + 3 I_{D1} I_{D2} + 3 I_{D1}^2}{3} \right) t_1 \quad (J-10)$$

$$= \frac{1}{3} R_{ON} (I_{D1}^2 + I_{D1} I_{D2} + I_{D2}^2) t_1 f \quad [W] \quad (J-11)$$

付録 K

導通時の電力損失計算 (I_D 一定)

MOSFET のオン抵抗 R_{ON} とスイッチング波形のドレイン電流 I_D から直線近似を用いて導通時 ($0-t_1$) の電力損失を求めます。損失計算に用いる波形を Figure K-1 に示します。

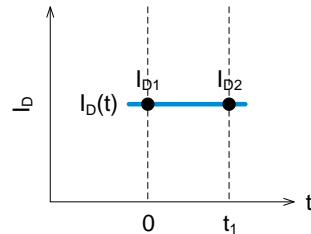


Figure K-1. 期間 $0-t_1$ の $I_D(t)$

Figure K-1 では $0-t_1$ の期間で、MOSFET が導通しているため V_{DS} は MOSFET のオン抵抗 R_{ON} と I_D の積になります。

$0-t_1$ の期間における電力損失 P は、一般的に式(K-1)に示す抵抗と電流の 2 乗積の積分によって算出できます。

$$P = f \int_0^{t_1} R_{ON} I_D(t)^2 dt \quad (K-1)$$

ただし、 R_{ON} : MOSFET のオン抵抗 [Ω]

f : スwitching 周波数 [Hz]

また、 $I_D(t)$ は Figure K-1 の傾きより、式(K-2)で表せます。

$$I_D(t) = I_{D1} \quad (K-2)$$

(K-2)を(K-1)に代入します。

$$P = f \int_0^{t_1} R_{ON} I_{D1}^2 dt \quad (K-3)$$

公式に従って積分します。

$$P = f [R_{ON} I_{D1}^2]_0^{t_1} \quad (K-4)$$

$$= R_{ON} I_{D1}^2 t_1 f \quad [W] \quad (K-5)$$

付録 L

導通時の電力損失計算 (I_D 降下)

MOSFET のオン抵抗 R_{ON} とスイッチング波形のドレイン電流 I_D から直線近似を用いて導通時 ($0-t_1$) の電力損失を求めます。損失計算に用いる波形を Figure L-1 に示します。

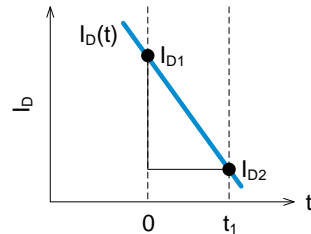


Figure L-1. 期間 $0-t_1$ の $I_D(t)$

Figure L-1 では $0-t_1$ の期間で、MOSFET が導通しているため V_{DS} は MOSFET のオン抵抗 R_{ON} と I_D の積になります。

$0-t_1$ の期間における電力損失 P は、一般的に式(L-1)に示す抵抗と電流の 2 乗積の積分によって算出できます。

$$P = f \int_0^{t_1} R_{ON} I_D(t)^2 dt \quad (L-1)$$

ただし、 R_{ON} : MOSFET のオン抵抗 [Ω]

f : スwitching 周波数 [Hz]

また、 $I_D(t)$ は Figure L-1 の傾きより、式(L-2)で表せます。

$$I_D(t) = I_{D1} - \frac{I_{D1} - I_{D2}}{t_1} t \quad (L-2)$$

(L-2)を(L-1)に代入します。

$$P = f \int_0^{t_1} R_{ON} \left(I_{D1} - \frac{I_{D1} - I_{D2}}{t_1} t \right)^2 dt \quad (L-3)$$

$$= f \int_0^{t_1} R_{ON} \left(I_{D1}^2 - 2 I_{D1} \frac{I_{D1} - I_{D2}}{t_1} t + \frac{(I_{D1} - I_{D2})^2}{t_1^2} t^2 \right) dt \quad (L-4)$$

公式に従って積分します。

$$P = f R_{ON} \left[I_{D1}^2 t - 2 I_{D1} \frac{I_{D1} - I_{D2}}{2 t_1} t^2 + \frac{(I_{D1} - I_{D2})^2}{3 t_1^2} t^3 \right]_0^{t_1} \quad (L-5)$$

$$= f R_{ON} \left(I_{D1}^2 t_1 - 2 I_{D1} \frac{I_{D1} - I_{D2}}{2 t_1} t_1^2 + \frac{(I_{D1} - I_{D2})^2}{3 t_1^2} t_1^3 \right) \quad (L-6)$$

$$= f R_{ON} \left(I_{D1}^2 t_1 - I_{D1} (I_{D1} - I_{D2}) t_1 + \frac{(I_{D1} - I_{D2})^2}{3} t_1 \right) \quad (L-7)$$

$$= f R_{ON} \left(I_{D1}^2 - I_{D1} (I_{D1} - I_{D2}) + \frac{(I_{D1} - I_{D2})^2}{3} \right) t_1 \quad (L-8)$$

付録 L (つづき)

$$P = f R_{ON} \left(I_{D1} I_{D2} + \frac{I_{D1}^2 - 2 I_{D1} I_{D2} + I_{D2}^2}{3} \right) t_1 \quad (L-9)$$

$$= f R_{ON} \left(\frac{I_{D1}^2 - 2 I_{D1} I_{D2} + I_{D2}^2 - 3 I_{D1}^2 + 3 I_{D1} I_{D2} + 3 I_{D1}^2}{3} \right) t_1 \quad (L-10)$$

$$= \frac{1}{3} R_{ON} (I_{D1}^2 + I_{D1} I_{D2} + I_{D2}^2) t_1 f \quad [W] \quad (L-11)$$