파워 디바이스

측정 파형에서 전력 손실 계산 방법

본 어플리케이션 노트에서는 SiC MOSFET 를 이용한 스위칭 회로에서 측정된 스위칭 파형으로부터 SiC MOSFET 의 전력 손실을 구하는 방법에 대해 설명하겠습니다.

스위칭 파형 측정

Figure 1 은 스위칭 회로와 파형을 모니터 하는 프로브를 나타냅니다. MOSFET 의 드레인-소스간 전압은 차동 전압 프로브를 사용하여 측정합니다. 또 드레인 전류는 전류 프로브를 사용합니다.

Figure 2 는 각 부의 파형과 전력 손실 (사선 부분)을 나타냅니다. t_{on} 은 턴 온 시간을, t_{off} 는 턴 오프 시간을 나타내고 있으며 이 구간의 V_{DS} 와 I_D 가 중첩된 부분에서 스위칭 손실이 발생하고 있습니다. 이 회로는 인덕턴스 부하 때문에 턴 온 시에는 I_D 가 먼저 변화를 시작하고 전류의 변화가 완료된 후에 V_{DS} 가 변화를 시작합니다. 턴 오프 시에는 그 반대로 V_{DS} 가 먼저 변화를 시작하고 전압 변화가 완료된 후에 I_D 가 변화를 시작합니다. 다음으로 t_{on} 은 MOSFET 의 온 구간에서 I_D 와 MOSFET 의 온 저항으로 인한 도통 손실이 발생하고 있습니다.

최신 오실로스코프에서는 사선 부분을 자동적으로 연산해서 전력 손실을 표시할 수 있는 것이 있습니다만, 이 기능이 없는 것은 측정 파형으로부터 산출할 필요가 있습니다.

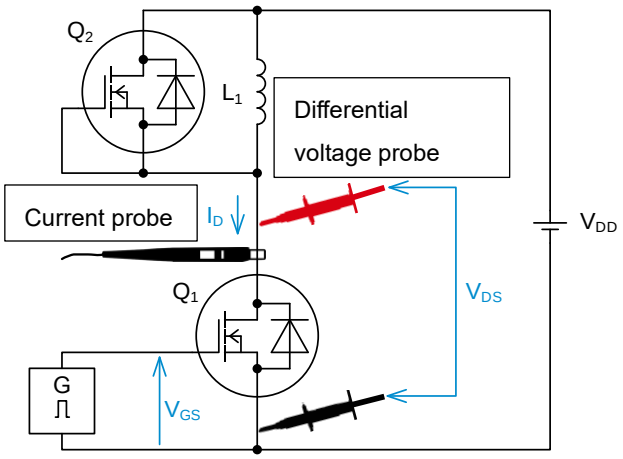


Figure 1. 스위칭 회로와 파형을 모니터하는 프로브

측정 시 주의점입니다. 첫 번째는 오실로스코프의 샘플링 수입니다. 샘플링 수가 적으면 파형의 상세한 부분을 취득하기 어렵기 때문에 측정 결과에 오차가 발생합니다. 샘플링 포인트를 표시해 파형이 정확히 트레이스 되어 있는지 확인이 필요합니다. 두 번째 주의 사항은 전압 프로브와 전류 프로브 사이에 지연 시간의 특성이 다르기 때문에 측정 파형에는 이 지연 차이에 의한 오차가 포함된다는 것입니다. 아무것도 보정하지 않으면 전압과 전류 간에 시간 축 방향에 차이가 생겨 Figure 2 의 사선 부분 면적이 부정확해집니다. 실제보다 크거나 작은 손실이 되어 잘못된 결과를 얻을 수 있습니다. 측정계의 지연 차이를 없애기 위해 스쿠류 보정 (de-skew)을 실시해야 합니다. 방법은 측정기 취급 매뉴얼이나 측정기 제조사의 기술 자료를 참조하여 주십시오.

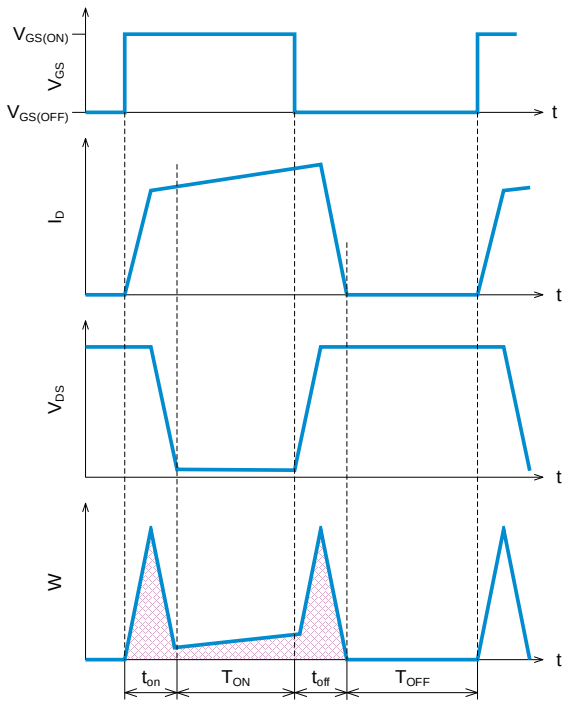


Figure 2. 각 부의 파형과 전력 손실 (사선 부분)

© 2020 ROHM Co., Ltd.

파형의 근사값 계산

측정 파형에서 직선의 근사값이 가능한 범위에서 분할하여 전력 손실을 계산합니다. 우선 턴 온 및 턴 오프 시간에 소비하는 전력 손실 P_{ton}, P_{toff} 를 산출합니다. 전력 손실은 Table 1 의 근사식으로 계산합니다. 파형의 형태에 따라 계산식이 달라지기 때문에 측정 파형과 가까운 것을 선택합니다.

Figure 3 의 파형 중 한 예로는 턴 온 시에는 파형을 2 분할하고, 전반부 (t_{on1})는 Table 1 의 케이스 2 를 사용합니다. 추가 조건으로서 I_{D1}:=0 의 식을 사용합니다. 그리고 후반부 (t_{on2})는 케이스 3 의 V_{DS2}:=0 의 식을 사용합니다. Figure 3 에서는 $V_{DS2(on)}$은 MOSFET 의 온 저항과 I_D 에 의해서 전압이 발생하지만 V_{DS} 의 High 전압에 비해 충분히 작을 경우는 0 으로 취급합니다. 그 결과 턴 온 시의 전력 손실은 다음 식의 근사값으로 계산할 수 있습니다.

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

마찬가지로 턴 오프 시에도 파형을 2 분할하고 전반부 (t_{off1})는 케이스 1 의 V_{DS1}:=0 의 식을 사용합니다. 그리고 후반부 (t_{off2})는 케이스 8 의, I_{D2}:=0 의 식을 사용합니다. Figure 3 에서는 $V_{DS1(off)}$는 앞서 설명한 것과 같은 이유로 전압이 발생하지만 V_{DS} 의 High 전압에 비해 충분히 작을 경우는 0 으로 취급합니다. 그 결과, 턴 오프 시의 전력 손실은 다음 식의 근사값으로 계산할 수 있습니다.

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

다음으로 도통 시에 소비되는 전력 손실을 계산합니다. Figure 4 에 도통 손실을 구하는 파형의 일례를 나타냅니다. T_{ON} 구간에서 MOSFET 가 도통하고 있기 때문에 V_{DS} 는 MOSFET 의 온 저항과 I_D 의 곱이 됩니다. 온 저항 값은 데이터시트를 참조합니다. 전력 손실은 Table 2 에서 파형 모양에 가까운 것을 선택하여 근사식으로 계산합니다.

이 예에서는 Table 2 의 케이스 1 을 사용합니다. 도통 손실은 다음 식으로 계산할 수 있습니다.

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

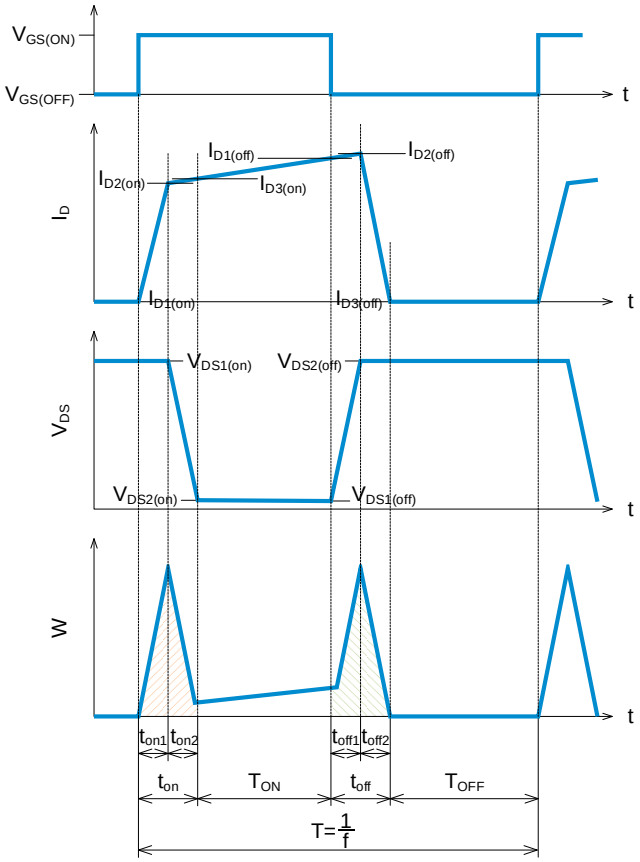


Figure 3. 스위칭 손실 파형의 예

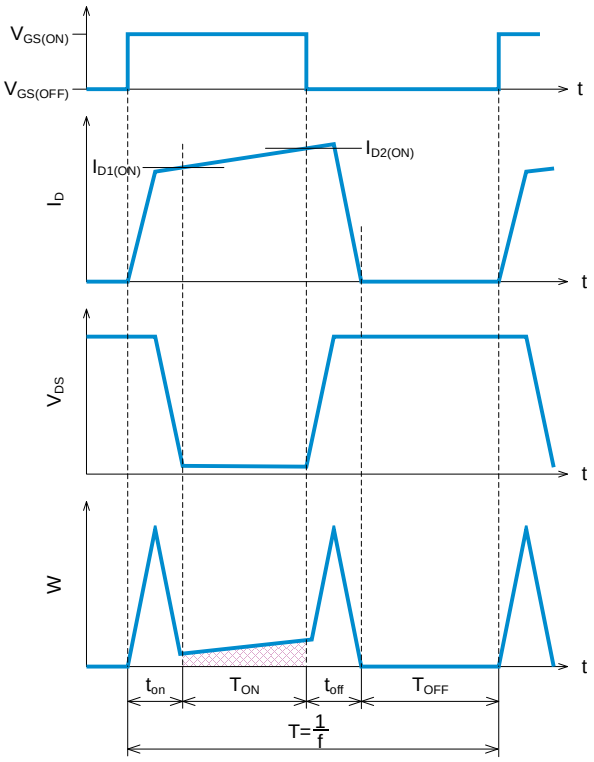


Figure 4. 도통 손실 파형의 예

© 2020 ROHM Co., Ltd.

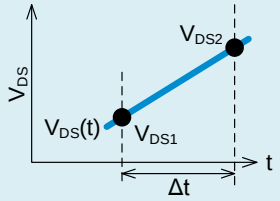
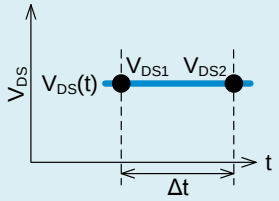
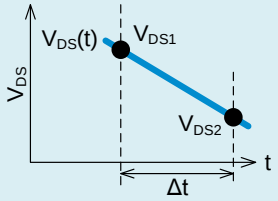
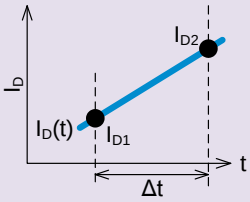
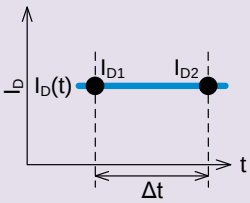
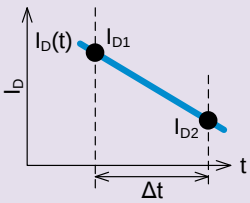
다음은 MOSFET 이 오프 시에 전력 손실입니다. Figure 4 에서는 T_{OFF} 의 구간입니다만, MOSFET 이 오프 시에는 I_D 가 충분히 작기 때문에 전력 손실은 0 으로 합니다.

MOSFET 의 전력 손실은 지금까지 산출한 전력 손실의 총합입니다.

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

© 2020 ROHM Co., Ltd.

Table 1. 파형 형태별 직선 근사값을 이용한 스위칭 손실 계산식

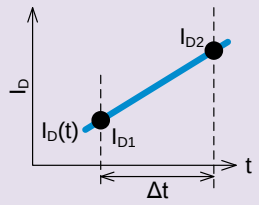
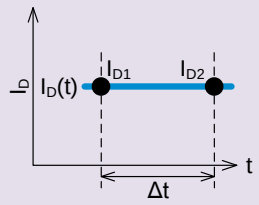
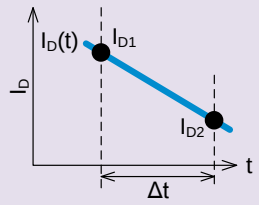
	시간에 따른 V_{DS} 변화		
	$V_{DS1}<V_{DS2}$ 	$V_{DS1}=V_{DS2}$ 	$V_{DS1}>V_{DS2}$ 
시간에 따른 I_D 변화			
$I_{D1}<I_{D2}$ 	케이스 1 (부록 A 참조) $P \approx$ 하기 식 (A) 참조 $V_{DS1} := 0,$ $P \approx \frac{1}{6} V_{DS2} (I_{D1} + 2 I_{D2}) \Delta t f$ $I_{D1} := 0,$ $P \approx \frac{1}{6} (V_{DS1} + 2 V_{DS2}) I_{D2} \Delta t f$	케이스 2 (부록 B 참조) $P \approx \frac{1}{2} V_{DS1} (I_{D1} + I_{D2}) \Delta t f \quad (C)$ $I_{D1} := 0,$ $P \approx \frac{1}{2} V_{DS1} I_{D2} \Delta t f$	케이스 3 (부록 C 참조) $P \approx$ 하기 식 (A) $I_{D1} := 0,$ $P \approx \frac{1}{6} (V_{DS1} + 2 V_{DS2}) I_{D2} \Delta t f$ $V_{DS2} := 0,$ $P \approx \frac{1}{6} V_{DS1} (2 I_{D1} + I_{D2}) \Delta t f$ $I_{D1} := 0, V_{DS2} := 0,$ $P \approx \frac{1}{6} V_{DS1} I_{D2} \Delta t f$
$I_{D1}=I_{D2}$ 	케이스 4 (부록 D 참조) $P \approx \frac{1}{2} (V_{DS1} + V_{DS2}) I_{D1} \Delta t f \quad (B)$ $V_{DS1} := 0,$ $P \approx \frac{1}{2} V_{DS2} I_{D1} \Delta t f$	케이스 5 (부록 E 참조) $P = V_{DS1} I_{D1} \Delta t f \quad (D)$	케이스 6 (부록 F 참조) $P \approx \frac{1}{2} (V_{DS1} + V_{DS2}) I_{D1} \Delta t f \quad (B)$ $V_{DS2} := 0,$ $P \approx \frac{1}{2} V_{DS1} I_{D1} \Delta t f$
$I_{D1}>I_{D2}$ 	케이스 7 (부록 G 참조) $P \approx$ 하기 식 (A) $I_{D2} := 0,$ $P \approx \frac{1}{6} (2 V_{DS1} + V_{DS2}) I_{D1} \Delta t f$ $V_{DS1} := 0,$ $P \approx \frac{1}{6} V_{DS2} (I_{D1} + 2 I_{D2}) \Delta t f$ $I_{D2} := 0, V_{DS1} := 0,$ $P \approx \frac{1}{6} V_{DS2} I_{D1} \Delta t f$	케이스 8 (부록 H 참조) $P \approx \frac{1}{2} V_{DS1} (I_{D1} + I_{D2}) \Delta t f \quad (C)$ $I_{D2} := 0,$ $P \approx \frac{1}{2} V_{DS1} I_{D1} \Delta t f$	케이스 9 (부록 I 참조) $P \approx$ 하기 식 (A) $V_{DS2} := 0,$ $P \approx \frac{1}{6} V_{DS1} (2 I_{D1} + I_{D2}) \Delta t f$ $I_{D2} := 0,$ $P \approx \frac{1}{6} (2 V_{DS1} + V_{DS2}) I_{D1} \Delta t f$

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

단, f: 스위칭 주파수 [Hz]

© 2020 ROHM Co., Ltd.

Table 2. 파형 형태별 직선 근사값을 이용한 도통 손실 계산식

시간에 따른 I_D 변화		
$I_{D1}<I_{D2}$ 	$I_{D1}=I_{D2}$ 	$I_{D1}>I_{D2}$ 
케이스 1 (부록 J 참조)	케이스 2 (부록 K 참조)	케이스 3 (부록 L 참조)
$P \approx \frac{1}{3} R_{ON} (I_{D1}^2 + I_{D1} I_{D2} + I_{D2}^2)\, \Delta t\, f$ (E)	$P = R_{ON}\, I_{D1}^2\, \Delta t\, f$ (F)	$P \approx \frac{1}{3} R_{ON} (I_{D1}^2 + I_{D1} I_{D2} + I_{D2}^2)\, \Delta t\, f$ (E)

단, R_{ON}: MOSFET 의 온 저항 [Ω]

f: 스위칭 주파수 [Hz]

산출 예

실측한 스위칭 파형 (Figure 5)으로 전력 손실을 산출합니다. 턴 온 시, 도통 시, 턴 오프 시의 확대 파형이 각각 Figure 6, 7, 8 에 실려 있습니다.

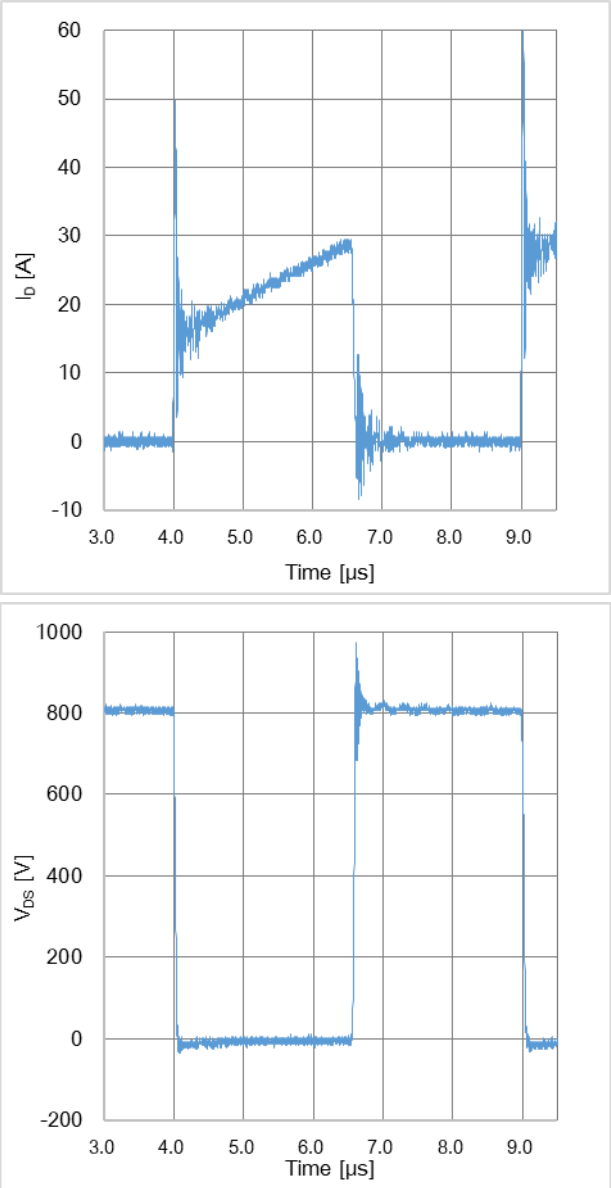


Figure 5. 전력 손실 산출에 사용하는 스위칭 파형
로옴 제품 SiC MOSFET SCT3040KR
스위칭 주파수 200kHz

Figure 6 은 턴 온 시 파형을 확대한 것입니다. 파형의 도중에 기울기가 변화하기 때문에, 같은 기울기 마다 구간을 분할합니다만, 파형이 복잡하기 때문에 구간은 주관적이 됩니다. 구간별로 시작 전압과 전류, 종료 전압과 전류, 시간을 읽어냅니다. Table 1 의 식 (A)에 값을 대입하여 손실 전력을 구합니다.

턴 온 시의 계산 예는 다음과 같습니다. 여기에서 각 구간을 t1 에서 t5 라는 이름으로 분할하고 있습니다.

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

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

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

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

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

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

$$P_{ton} = P_{t1} + P_{t2} + P_{t3} + P_{t4} + P_{t5}$$
$$= 4.2 + 5.5 + 77.2 + 26.1 + 1.8$$
$$= 114.8\ [W]$$

© 2020 ROHM Co., Ltd.

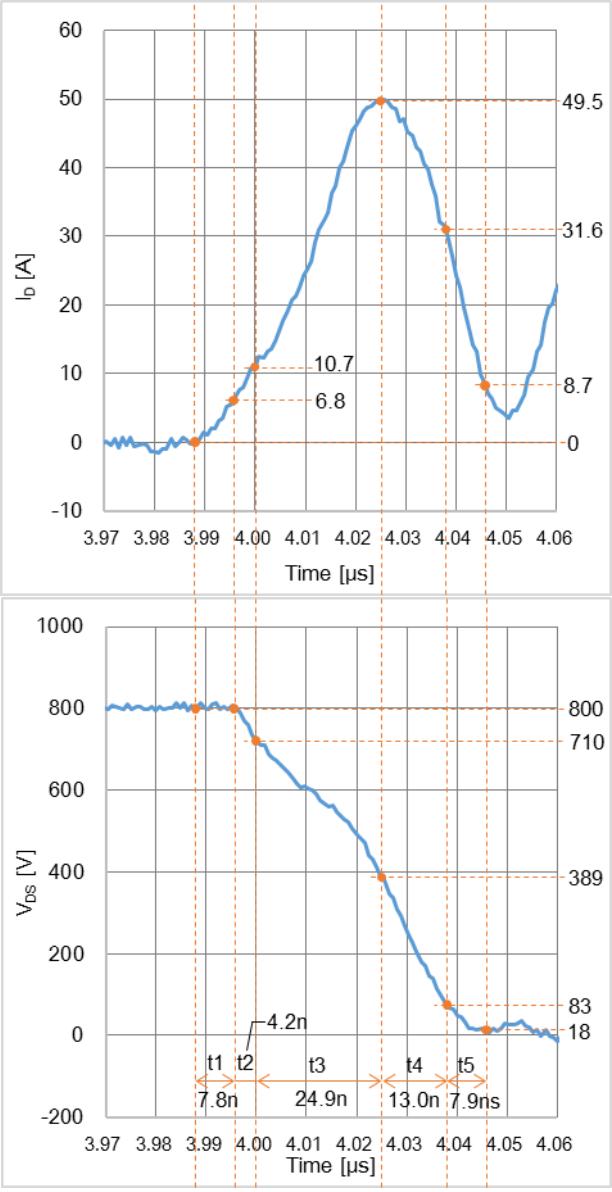


Figure 6. 턴 온의 확대 파형과 구간별 측정값

Figure 7 은 도통 시의 확대 파형입니다. 여기에서는 Table 2 의 식 (E)에 값을 대입하여 손실 전력을 구합니다. MOSFET 의 온 저항은 데이터시트의 최대치를 사용합니다.

$$P_{ON} = \frac{1}{3} R_{ON} (I_{D1}{}^2 + I_{D1}\, I_{D2} + I_{D2}{}^2)\, \Delta t\, f$$

$$= \frac{1}{3} \times 68m(15^2 + 15 \times 28.7 + 28.7^2) 2.49\mu \times 200k$$

$$= 16.7\ [W]$$

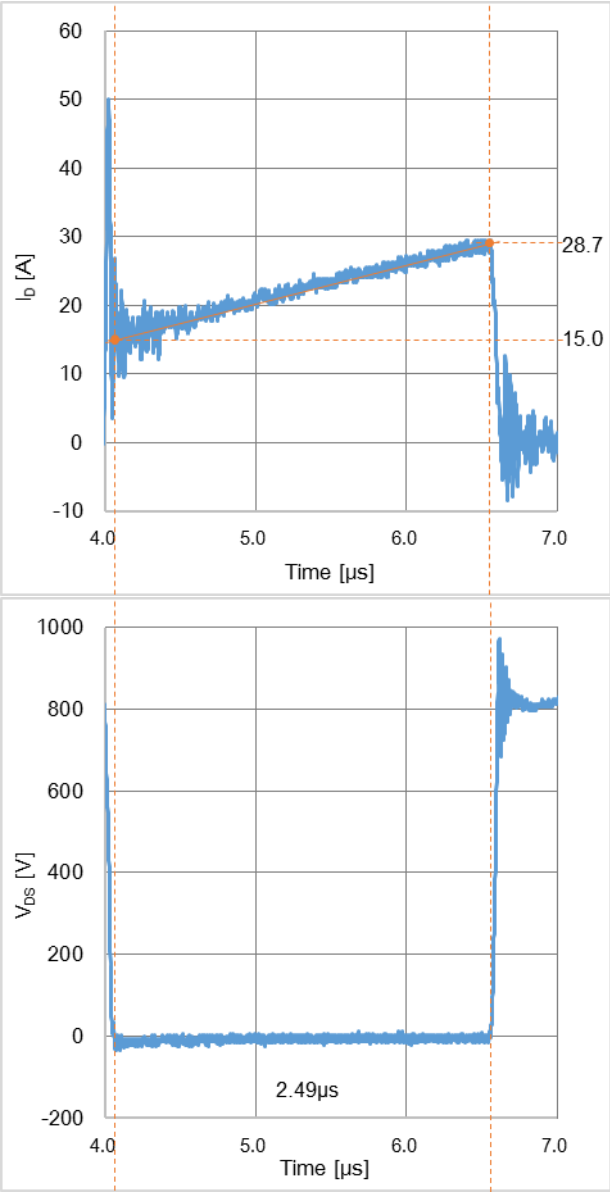


Figure 7. 도통 시의 확대 파형과 측정값

Figure 8 은 턴 오프 시 파형을 확대한 것입니다. 이것도 턴 온 시와 같은 순서로 산출합니다.

턴 오프 시의 계산 예는 다음과 같습니다. 여기에서는 각 구간을 t1 에서 t8 이라는 이름으로 분할하고 있습니다.

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

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

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

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

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

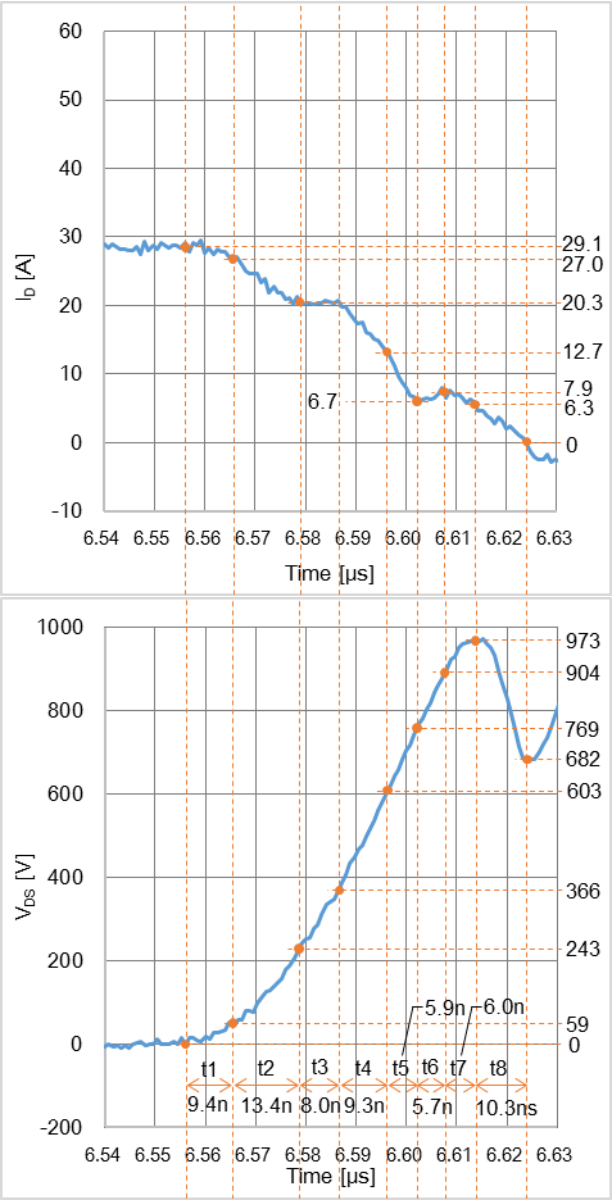


Figure 8. 턴 오프 확대 파형과 구간별 측정값

총 전력 손실은 다음 식으로 구할 수 있습니다.

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

© 2020 ROHM Co., Ltd.

부록 A

스위칭 손실 계산 (I_D 상승, V_{DS} 상승 파형 시)

스위칭 파형의 드레인-소스간 전압 V_{DS}와 드레인 전류 I_D에서 직선 근사값을 이용하여 턴 온 시 및 턴 오프 시의 전력 손실 (스위칭 손실)을 구합니다. 손실 계산에 이용하는 파형을 Figure A-1 에 나타냅니다.

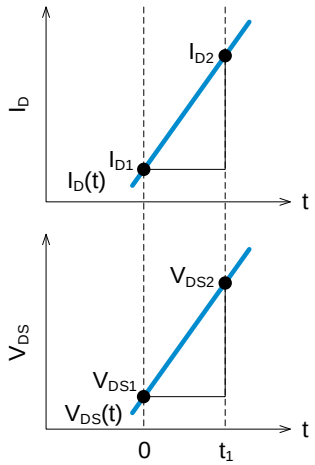


Figure A-1. 구간 0-t_1의 $I_D(t)$와 $V_{DS}(t)$

Figure A-1 로 나타내는 0-t_1의 구간에 전력 손실 P 는 일반적으로 식 (A-1)에 나타난 전류와 전압 곱의 적분에 의해 산출할 수 있습니다.

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

단, f: 스위칭 주파수 [Hz]

또, $I_D(t)$와 $V_{DS}(t)$는 Figure A-1 의 기울기에 의해 식 (A-2) (A-3)으로 나타낼 수 있습니다.

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

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

(A-2)와 (A-3)을 (A-1)에 대입합니다.

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

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

© 2020 ROHM Co., Ltd.

부록 A (이어서)

공식에 따라 적분합니다.

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

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

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

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

단, f: 스위칭 주파수 [Hz]

다음에 있는 조건 하에서 전력 손실을 구합니다.

$$V_{DS1} \coloneqq 0 \qquad (A-10)$$

(A-10)을 (A-9)에 대입합니다.

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

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

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

$$I_{D1} \coloneqq 0 \qquad (A-14)$$

(A-14)를 (A-9)에 대입합니다.

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

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

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

© 2020 ROHM Co., Ltd.

부록 B

스위칭 손실 계산 (I_D 상승, V_{DS} 일정 파형 시)

스위칭 파형의 드레인-소스간 전압 V_{DS}와 드레인 전류 I_D에서 직선 근사를 이용해 턴 온 시 및 턴 오프 시의 전력 손실 (스위칭 손실)을 구합니다. 손실 계산에 이용하는 파형을 Figure B-1 에 나타냅니다.

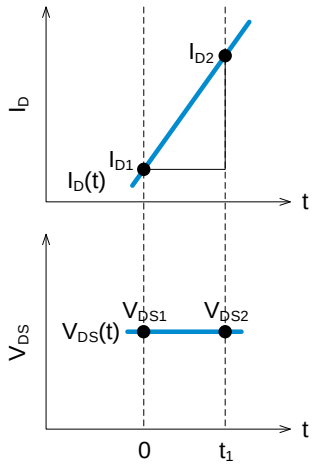


Figure B-1. 구간 0-t_1 의 $I_D(t)$와 $V_{DS}(t)$

Figure B-1 로 나타내는 0-t_1 의 구간에 전력 손실 P 는 일반적으로 식 (B-1)에 나타난 전류와 전압 곱의 적분에 의해 산출할 수 있습니다.

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

단, f: 스위칭 주파수 [Hz]

또, $I_D(t)$와 $V_{DS}(t)$는 Figure B-1 의 기울기에서, 식 (B-2) (B-3)으로 나타낼 수 있습니다.

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

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

(B-2)와 (B-3)을 (B-1)에 대입합니다.

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

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

© 2020 ROHM Co., Ltd.

부록 B (이어서)

공식에 따라 적분합니다.

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

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

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

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

다음 조건에서의 전력 손실을 구합니다.

$$I_{D1} \coloneqq 0 \qquad (B-10)$$

(B-10)을 (B-9)에 대입합니다.

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

© 2020 ROHM Co., Ltd.

부록 C

스위칭 손실 계산 (I_D 상승, V_{DS} 강하 파형 시)

스위칭 파형의 드레인-소스간 전압 V_{DS}와 드레인 전류 I_D에서 직선 근사를 이용해 턴 온 시 및 턴 오프 시의 전력 손실 (스위칭 손실)을 구합니다. 손실 계산에 이용하는 파형을 Figure C-1 에 나타냅니다.

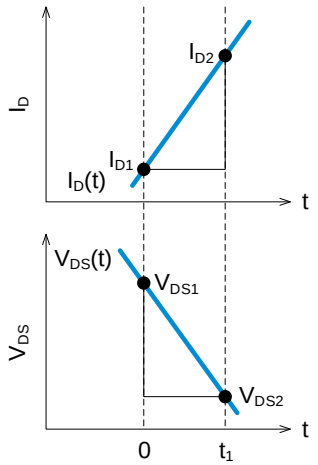


Figure C-1. 구간 0-t_1 의 $I_D(t)$와 $V_{DS}(t)$

Figure C-1 로 나타내는 0-t_1 의 구간에 전력 손실 P 는 일반적으로 식 (C-1)에 나타난 전류와 전압 곱의 적분에 의해 산출할 수 있습니다.

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

단, f: 스위칭 주파수 [Hz]

또, $I_D(t)$와 $V_{DS}(t)$는 Figure C-1 의 기울기에서, 식 (C-2) (C-3)으로 나타낼 수 있습니다.

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

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

(C-2)와 (C-3)을 (C-1)에 대입합니다.

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

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

© 2020 ROHM Co., Ltd.

부록 C (이어서)

공식에 따라 적분합니다.

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

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

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

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

다음 조건에서의 전력 손실을 구합니다.

$$I_{D1} \coloneqq 0 \qquad (C-10)$$

(C-10)을 (C-9)에 대입합니다.

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

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

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

$$V_{DS2} \coloneqq 0 \qquad (C-14)$$

(C-14)를 (C-9)에 대입합니다.

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

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

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

$$I_{D1} \coloneqq 0,\ V_{DS2} \coloneqq 0 \qquad (C-18)$$

(C-18)을 (C-9)에 대입합니다.

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

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

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

© 2020 ROHM Co., Ltd.

부록 D

스위칭 손실 계산 (I_D 일정, V_{DS} 상승 파형 시)

스위칭 파형의 드레인-소스간 전압 V_{DS}와 드레인 전류 I_D에서 직선 근사를 이용해 턴 온 시 및 턴 오프 시의 전력 손실 (스위칭 손실)을 구합니다. 손실 계산에 이용하는 파형을 Figure D-1 에 나타냅니다.

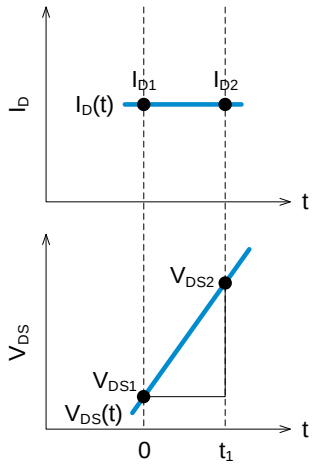


Figure D-1. 구간 0-t_1 의 $I_D(t)$와 $V_{DS}(t)$

Figure D-1 로 나타내는 0-t_1 의 구간에 전력 손실 P 는 일반적으로 식 (D-1)에 나타난 전류와 전압 곱의 적분에 의해 산출할 수 있습니다.

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

단, f: 스위칭 주파수 [Hz]

또, $I_D(t)$와 $V_{DS}(t)$는 Figure D-1 의 기울기에서 식 (D-2) (D-3)으로 나타낼 수 있습니다.

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

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

(D-2)와 (D-3)을 (D-1)에 대입합니다.

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

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

© 2020 ROHM Co., Ltd.

부록 D (이어서)

공식에 따라 적분합니다.

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

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

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

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

다음 조건에 의해 전력 손실을 구합니다.

$$V_{DS1} \coloneqq 0 \qquad (D-10)$$

(D-10)을 (D-9)에 대입합니다.

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

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

© 2020 ROHM Co., Ltd.

부록 E

스위칭 손실 계산 (I_D 일정, V_{DS} 일정)

스위칭 파형의 드레인-소스간 전압 V_{DS}와 드레인 전류 I_D에서 직선 근사를 이용해 턴 온 시 및 턴 오프 시의 전력 손실 (스위칭 손실)을 구합니다. 손실 계산에 이용하는 파형을 Figure E-1 에 나타냅니다.

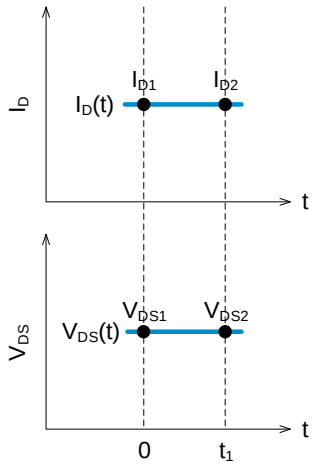


Figure E-1. 구간 0-t_1 의 $I_D(t)$와 $V_{DS}(t)$

Figure E-1 로 나타내는 0-t_1 의 구간에 전력 손실 P 는 일반적으로 식 (E-1)에 나타난 전류와 전압 곱의 적분에 의해 산출할 수 있습니다.

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

단, f: 스위칭 주파수 [Hz]

또, $I_D(t)$와 $V_{DS}(t)$는 Figure E-1 의 기울기에 의해, 식 (E-2) (E-3)으로 나타냅니다.

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

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

(E-2)와 (E-3)을 (E-1)에 대입합니다.

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

공식에 따라 적분합니다.

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

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

부록 F

스위칭 손실 계산 (I_D 일정, V_{DS} 강하 파형 시)

스위칭 파형의 드레인-소스간 전압 V_{DS}와 드레인 전류 I_D에서 직선 근사를 이용해 턴 온 시 및 턴 오프 시의 전력 손실 (스위칭 손실)을 구합니다. 손실 계산에 이용하는 파형을 Figure F-1 에 나타냅니다.

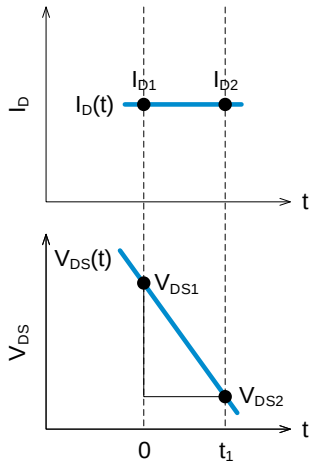


Figure F-1. 구간 0-t_1 의 $I_D(t)$와 $V_{DS}(t)$

Figure F-1 로 나타내는 0-t_1 의 구간에 대한 전력 손실 P 는 일반적으로 식 (F-1)에 나타난 전류와 전압 곱의 적분에 의해 산출할 수 있습니다.

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

단, f: 스위칭 주파수 [Hz]

또, $I_D(t)$와 $V_{DS}(t)$는 Figure F-1 의 기울기에 의해, 식 (F-2) (F-3)으로 나타낼 수 있습니다.

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

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

(F-2)와 (F-3)을 (F-1)에 대입합니다.

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

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

© 2020 ROHM Co., Ltd.

부록 F (이어서)

공식에 따라 적분합니다.

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

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

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

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

다음 조건에서의 전력 손실을 구합니다.

$$V_{DS2} \coloneqq 0 \qquad (\mathrm{F}-10)$$

(F−10)을 (F−9)에 대입합니다.

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

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

© 2020 ROHM Co., Ltd.

부록 G

스위칭 손실 계산 (I_D 강하, V_{DS} 상승 파형 시)

스위칭 파형의 드레인-소스간 전압 V_{DS}와 드레인 전류 I_D에서 직선 근사를 이용해 턴 온 시 및 턴 오프 시의 전력 손실 (스위칭 손실)을 구합니다. 손실 계산에 이용하는 파형을 Figure G-1 에 나타냅니다.

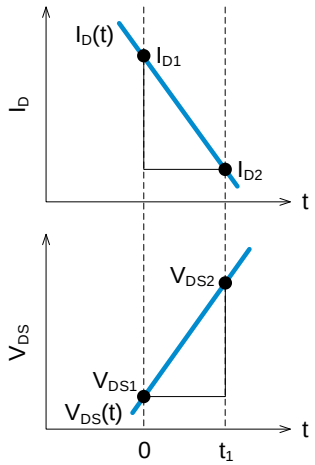


Figure G-1. 구간 0-t_1 의 $I_D(t)$와 $V_{DS}(t)$

Figure G-1 로 나타내는 0-t_1 의 구간에 전력 손실 P 는 일반적으로 식 (C-1)에 나타난 전류와 전압 곱의 적분에 의해 산출할 수 있습니다.

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

단, f: 스위칭 주파수 [Hz]

또, $I_D(t)$와 $V_{DS}(t)$는 Figure G-1 의 기울기에 의해 식 (G-2) (G-3)으로 나타낼 수 있습니다.

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

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

(G-2)와 (G-3)을 (G-1)에 대입합니다.

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

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

© 2020 ROHM Co., Ltd.

부록 G (이어서)

공식에 따라 적분합니다.

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

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

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

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

다음 조건에서의 전력 손실을 구합니다.

$$I_{D2} \coloneqq 0 \qquad (G-10)$$

(G-10)을 (G-9)에 대입합니다.

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

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

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

$$V_{DS1} \coloneqq 0 \qquad (G-14)$$

(G-14)를 (G-9)에 대입합니다.

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

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

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

$$I_{D2} \coloneqq 0,\ V_{DS1} \coloneqq 0 \qquad (G-18)$$

(G-18)을 (G-9)에 대입합니다.

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

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

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

© 2020 ROHM Co., Ltd.

부록 H

스위칭 손실 계산 (I_D 강하, V_{DS} 일정 파형 시)

스위칭 파형의 드레인-소스간 전압 V_{DS}와 드레인 전류 I_D에서 직선 근사를 이용해 턴 온 시 및 턴 오프 시의 전력 손실 (스위칭 손실)을 구합니다. 손실 계산에 이용하는 파형을 Figure H-1 에 나타냅니다.

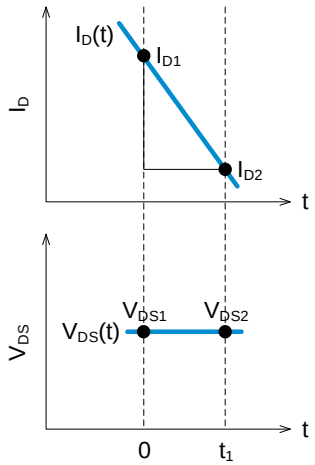


Figure H-1. 구간 0-t_1 의 $I_D(t)$와 $V_{DS}(t)$

Figure H-1 로 나타내는 0-t_1 의 구간에 전력 손실 P 는 일반적으로 식 (H-1)에 나타난 전류와 전압 곱의 적분에 의해 산출할 수 있습니다.

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

단, f: 스위칭 주파수 [Hz]

또, $I_D(t)$와 $V_{DS}(t)$는 Figure H-1 의 기울기에 의해, 식 (H-2) (H-3)으로 나타낼 수 있습니다.

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

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

(H-2)와 (H-3)을 (H-1)에 대입합니다.

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

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

© 2020 ROHM Co., Ltd.

부록 H (이어서)

공식에 따라 적분합니다.

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

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

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

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

다음 조건에서의 전력 손실을 구합니다.

$$I_{D2} \coloneqq 0 \qquad (H-10)$$

(H-10)을 (H-9)에 대입합니다.

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

© 2020 ROHM Co., Ltd.

부록 I

스위칭 손실 계산 (I_D 강하, V_{DS} 강하 파형 시)

스위칭 파형의 드레인-소스간 전압 V_{DS}와 드레인 전류 I_D에서 직선 근사를 이용해 턴 온 시 및 턴 오프 시의 전력 손실 (스위칭 손실)을 구합니다. 손실 계산에 이용하는 파형을 Figure I-1 에 나타냅니다.

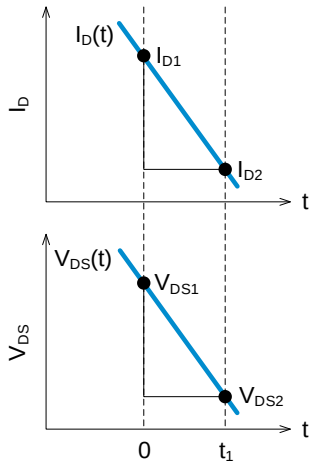


Figure I-1. 구간 0-t_1 의 $I_D(t)$와 $V_{DS}(t)$

Figure I-1 로 나타내는 0-t_1 의 구간에 전력 손실 P 는 일반적으로 식 (I-1)에 나타난 전류와 전압 곱의 적분에 의해 산출할 수 있습니다.

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

단, f: 스위칭 주파수 [Hz]

또, $I_D(t)$와 $V_{DS}(t)$는 Figure I-1 의 기울기에 의해, 식 (I-2) (I-3)으로 나타낼 수 있습니다.

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

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

(I-2)와 (I-3)을 (I-1)에 대입합니다.

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

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

© 2020 ROHM Co., Ltd.

부록 I (이어서)

공식에 따라 적분합니다.

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

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

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

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

다음 조건에서의 전력 손실을 구합니다.

$$V_{DS2} \coloneqq 0 \qquad (I-10)$$

(I-10)을 (I-9)에 대입합니다.

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

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

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

$$I_{D2} \coloneqq 0 \qquad (\mathrm{I}-14)$$

(I-14)를 (I-9)에 대입합니다.

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

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

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

© 2020 ROHM Co., Ltd.

부록 J

도통 시의 전력 손실 계산 (I_D 상승)

MOSFET 의 온 저항 R_{ON}과 스위칭 파형의 드레인 전류 I_D에서 직선 근사를 이용하여 도통 시 (0–t_1) 전력 손실을 구합니다. 손실 계산에 이용하는 파형을 Figure J-1 에 나타냅니다.

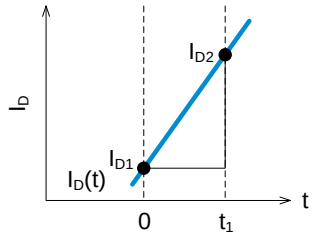


Figure J-1. 구간 0–t_1 의 $I_D(t)$

Figure J-1 에서는 0–t_1 의 구간으로 MOSFET 이 도통하고 있어 V_{DS}는 MOSFET 의 온 저항 R_{ON}과 I_D의 곱이 됩니다.

0–t_1 의 기간 동안의 전력 손실 P 는 일반적으로 식 (J-1)에 나타난 저항과 전류의 2 승 적분에 의해 산출할 수 있습니다.

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

단, R_{ON}: MOSFET 의 온 저항 [Ω]
f: 스위칭 주파수 [Hz]

또, $I_D(t)$는 Figure J-1 의 기울기에 의해, 식 (J-2)로 나타낼 수 있습니다.

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

(J-2)를 (J-1)에 대입합니다.

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

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

공식에 따라 적분합니다.

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

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

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

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

© 2020 ROHM Co., Ltd.

부록 J (이어서)

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

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

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

© 2020 ROHM Co., Ltd.

부록 K

도통 시 전력 손실 계산 (I_D 일정)

MOSFET 의 온 저항 R_{ON}과 스위칭 파형의 드레인 전류 I_D에서 직선 근사를 이용하여 도통 시 (0–t_1) 전력 손실을 구합니다. 손실 계산에 이용하는 파형을 Figure K-1 에 나타냅니다.

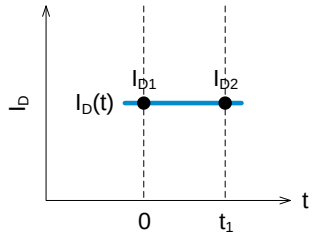


Figure K-1. 구간 0–t_1 의 $I_D(t)$

Figure K-1 에서는 0–t_1 의 구간으로 MOSFET 이 도통하기 때문에 V_{DS}는 MOSFET 의 온 저항 R_{ON}과 I_D의 곱이 됩니다.

0–t_1 의 기간 동안의 전력 손실 P 는 일반적으로 식 (K-1)에 나타난 저항과 전류의 2 승 적분에 의해 산출할 수 있습니다.

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

단, R_{ON}: MOSFET 의 온 저항 [Ω]
f: 스위칭 주파수 [Hz]

또, $I_D(t)$는 Figure K-1 의 기울기에 의해, 식 (K-2)로 나타낼 수 있습니다.

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

(K-2)를 (K-1)에 대입합니다.

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

공식에 따라 적분합니다.

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

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

© 2020 ROHM Co., Ltd.

부록 L

도통 시의 전력 손실 계산 (I_D 강하)

MOSFET 의 온 저항 R_{ON}과 스위칭 파형의 드레인 전류 I_D에서 직선 근사를 이용하여 도통 시 (0–t_1) 전력 손실을 구합니다. 손실 계산에 이용하는 파형을 Figure L–1 에 나타냅니다.

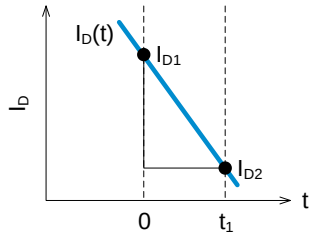


Figure L–1. 구간 0–t_1 의 $I_D(t)$

Figure L–1 에서는 0–t_1 의 구간으로 MOSFET 이 도통하기 때문에 V_{DS}는 MOSFET 의 온 저항 R_{ON}과 I_D의 곱이 됩니다.

0–t_1 의 기간 동안의 전력 손실 P 는 일반적으로 식 (L–1)에 나타난 저항과 전류의 2 승 적분에 의해 산출할 수 있습니다.

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

단, R_{ON}: MOSFET 이 온 저항 [Ω]
f: 스위칭 주파수 [Hz]

또, $I_D(t)$는 Figure L–1 의 기울기에 의해, 식 (L–2)로 나타낼 수 있습니다.

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

(L–2)를 (L–1)에 대입합니다.

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

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

공식에 따라 적분합니다.

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

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

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

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

© 2020 ROHM Co., Ltd.

부록 L (이어서)

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

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

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

© 2020 ROHM Co., Ltd.

Notes

1) The information contained herein is subject to change without notice.

2) Before you use our Products, please contact our sales representative and verify the latest specifications :

3) Although ROHM is continuously working to improve product reliability and quality, semiconductors can break down and malfunction due to various factors.
Therefore, in order to prevent personal injury or fire arising from failure, please take safety measures such as complying with the derating characteristics, implementing redundant and fire prevention designs, and utilizing backups and fail-safe procedures. ROHM shall have no responsibility for any damages arising out of the use of our Poducts beyond the rating specified by ROHM.

4) Examples of application circuits, circuit constants and any other information contained herein are provided only to illustrate the standard usage and operations of the Products. The peripheral conditions must be taken into account when designing circuits for mass production.

5) The technical information specified herein is intended only to show the typical functions of and examples of application circuits for the Products. ROHM does not grant you, explicitly or implicitly, any license to use or exercise intellectual property or other rights held by ROHM or any other parties. ROHM shall have no responsibility whatsoever for any dispute arising out of the use of such technical information.

6) The Products specified in this document are not designed to be radiation tolerant.

7) For use of our Products in applications requiring a high degree of reliability (as exemplified below), please contact and consult with a ROHM representative : transportation equipment (i.e. cars, ships, trains), primary communication equipment, traffic lights, fire/crime prevention, safety equipment, medical systems, servers, solar cells, and power transmission systems.

8) Do not use our Products in applications requiring extremely high reliability, such as aerospace equipment, nuclear power control systems, and submarine repeaters.

9) ROHM shall have no responsibility for any damages or injury arising from non-compliance with the recommended usage conditions and specifications contained herein.

10) ROHM has used reasonable care to ensure the accuracy of the information contained in this document. However, ROHM does not warrants that such information is error-free, and ROHM shall have no responsibility for any damages arising from any inaccuracy or misprint of such information.

11) Please use the Products in accordance with any applicable environmental laws and regulations, such as the RoHS Directive. For more details, including RoHS compatibility, please contact a ROHM sales office. ROHM shall have no responsibility for any damages or losses resulting non-compliance with any applicable laws or regulations.

12) When providing our Products and technologies contained in this document to other countries, you must abide by the procedures and provisions stipulated in all applicable export laws and regulations, including without limitation the US Export Administration Regulations and the Foreign Exchange and Foreign Trade Act.

13) This document, in part or in whole, may not be reprinted or reproduced without prior consent of ROHM.

Thank you for your accessing to ROHM product informations.
More detail product informations and catalogs are available, please contact us.

ROHM Customer Support System

https://www.rohm.co.kr/contactus/

© 2016 ROHM Co., Ltd. All rights reserved.