

애플리케이션 노트

AN1403

Revision:	KOR-01
발행일:	2022-11-11 (2014-08-19)
작성자:	Dr. Ulrich Nicolai, Curtis, Grady
결재자:	Dr. Arendt Wintrich, Kendrick

키워드: IGBT 모듈, 스위칭 에너지, 스위칭 손실, 기술(specification method)방법, 측정방법

SEMİKRON IGBT 모듈의 스위칭 손실 결정

1. 데이터시트 정보.....	1
2. 일반적인 스위칭 에너지 손실 기술 방법.....	2
2.1 시험 방법.....	2
2.2 IEC 60747에 대한 사양 팁.....	3
2.3 주요 파라미터-전류 I_c 공급전압 V_{cc} 및 칩온도 T_j	4
2.4 드라이버 출력단드라이버 출력단.....	5
3. 스위칭 손실 사양(specification)에 영향을 주는 추가 요소.....	6
3.1 부하조건.....	6
3.2 기생DC링크 인덕턴스 L_G	6
3.3 게이트 회로 인덕턴스 L_G	7
3.4 스위칭 에너지 손실 E_{on} 및 E_{off} 확인을 위한 적분 한계.....	8
3.5 스위치 선택 및 측정 결과 평가.....	9
4. SEMİKRON IGBT모듈의 스위치 손실 사양.....	9
4.1 IGBT 하프브리지 모듈에 대한 SEMİKRON 시험 방법.....	9
4.2 시험 조건.....	10
4.3 측정시 DC링크 인덕턴스 L_G	10
4.4 스위칭 에너지 손실 E_{on} 및 E_{off} 측정을 위한 적분 한계 선택.....	11
4.5 데이터시트 사양에 따른 측정 결과 해석.....	11
5. 요약.....	11

스위칭 주파수 및 동적 성능에 적합한 IGBT 모듈을 선택 시, 해당 애플리케이션과 관련된 스위칭 동작을 아는 것이 필수입니다. IGBT 모듈 데이터시트는 제조사가 선택한 특정 조건에서 스위칭 동작의 특징을 정리한 것입니다. 따라서 제조사마다 사용하는 조건이 다를 수 있습니다. 어떤 조건은 데이터시트에 명확히 언급되지 않을 수 있습니다. 그러므로 모듈 선택 시 데이터시트 사양과 조건을 상호 비교하고 실제 애플리케이션에서 스위칭 특성과 관련한 영향을 평가해야 합니다. 위와 관련한 지침을 제공하는 것이 이 애플리케이션 노트의 목적입니다. 아울러 새로운 SEMİKRON IGBT 모듈의 데이터시트에 추가하는 정보를 상세히 제공함으로써 고객이 비교를 통해 모듈 선택이 용이하도록 하였습니다.

1. 데이터 시트 정보

IGBT 모듈 데이터시트는 IGBT 및 환류다이오드의 스위칭 동작의 데이터 및 그래프 [1], [2]를 통해 기술하고 있습니다. 특정 구동 지점에서 스위칭 시간 및 스위칭 에너지 손실의 대표값은 "특성" 표에 명시되어 있습니다. 표 1의 SEMİKRON 데이터시트의 예시를 참조합니다.

IGBT 의 경우에는 턴온 지연시간 $t_{d(on)}$, 상승 시간 t_r , 턴오프 지연시간 $t_{d(off)}$, 강하 시간 t_f 및 턴온/턴오프 에너지 손실(energy dissipation) E_{on} 과 E_{off} 에 대해 정리하고 있습니다. 다이오드의 경우에는 피크 역전류 I_{RRM} 과 역회복전하(reverse recovery charge) Q_{rr} 를 턴오프 상태에서 역회복 시 손실되는 에너지 E_{rr} 과 함께 정리하고 있습니다. 아울러 SEMIKRON 의 새로운 IGBT 모듈 데이터시트에 추가하는 정보를 상세히 제공함으로써 고객이 비교를 통해 모듈 선택이 용이하도록 하였습니다.

표 1: 현재 SEMIKRON IGBT 모듈 데이터시트의 동적 특성

Characteristics					
Symbol	Conditions	min.	typ.	max.	Unit
IGBT					
$t_{d(on)}$	$V_{CC} = 600\text{ V}$		220		ns
t_r	$I_C = 300\text{ A}$		44		ns
E_{on}	$V_{GE} = \pm 15\text{ V}$		27		mJ
$t_{d(off)}$	$R_{G\ on} = 1.5\ \Omega$		520		ns
t_f	$R_{G\ off} = 1.5\ \Omega$		117		ns
E_{off}	$di/dt_{on} = 6100\text{ A}/\mu\text{s}$ $di/dt_{off} = 3000\text{ A}/\mu\text{s}$		39		mJ
Diode					
I_{RRM}	$I_F = 300\text{ A}$		345		A
Q_{rr}	$di/dt_{off} = 7300\text{ A}/\mu\text{s}$		54		μC
E_{rr}	$V_{GE} = \pm 15\text{ V}$ $V_{CC} = 600\text{ V}$		23		mJ

동적 특성을 규정하는 파라미터는 표 1 의 "conditions" 열에 정리되어 있습니다. 이러한 파라미터는 공급 전압 V_{CC} , 컬렉터 전류 I_C , 턴온/턴오프 게이트 전압 레벨 $V_{G(on)}$ 및 $V_{G(off)}$ 에 대한 V_{GE} , 그리고 턴온에 대한 외부 게이트 저항 R_{Gon} , 턴오프에 대한 R_{Goff} 입니다.

또한 일부 제조사들은 DC 링크의 표류 인덕턴스(stray inductance) L_G , 턴온 및 턴오프 시 컬렉터 전류 상승 및 강하 시간인 di/dt_{on} 과 di/dt_{off} , 그리고 IGBT 턴오프 시 컬렉터-이미터 전압 상승 시간 dv_{CE}/dt 도 명시하고 있습니다.

다이오드 스위칭 동작을 규정하는 파라미터는 턴오프 시 다이오드 전류(di/dt_{off})의 슬로프(slope)와 게이트 전압 레벨 V_{GE} ($V_{G(on)}$ 및 $V_{G(off)}$)입니다.

이 예시에서 E_{on} , E_{off} 및 E_{rr} 은 동일한 외부 게이트 저항으로 명시되어 있으나, E_{on} 과 E_{rr} 은 서로 다른 스위치(BOT/TOP) 사이의 전류(轉流)에 의해 측정되었습니다. 따라서 di/dt 는 정확하게 일치하지 않습니다.

또한, 이 데이터시트에는 예를 들어, E_{on} , E_{off} 및 E_{rr} 의 I_C 와 R_G 에 대한 의존도 등에 관한 그래프도 포함되어 있습니다.

2. 일반적인 스위칭 에너지 손실 기술 방법

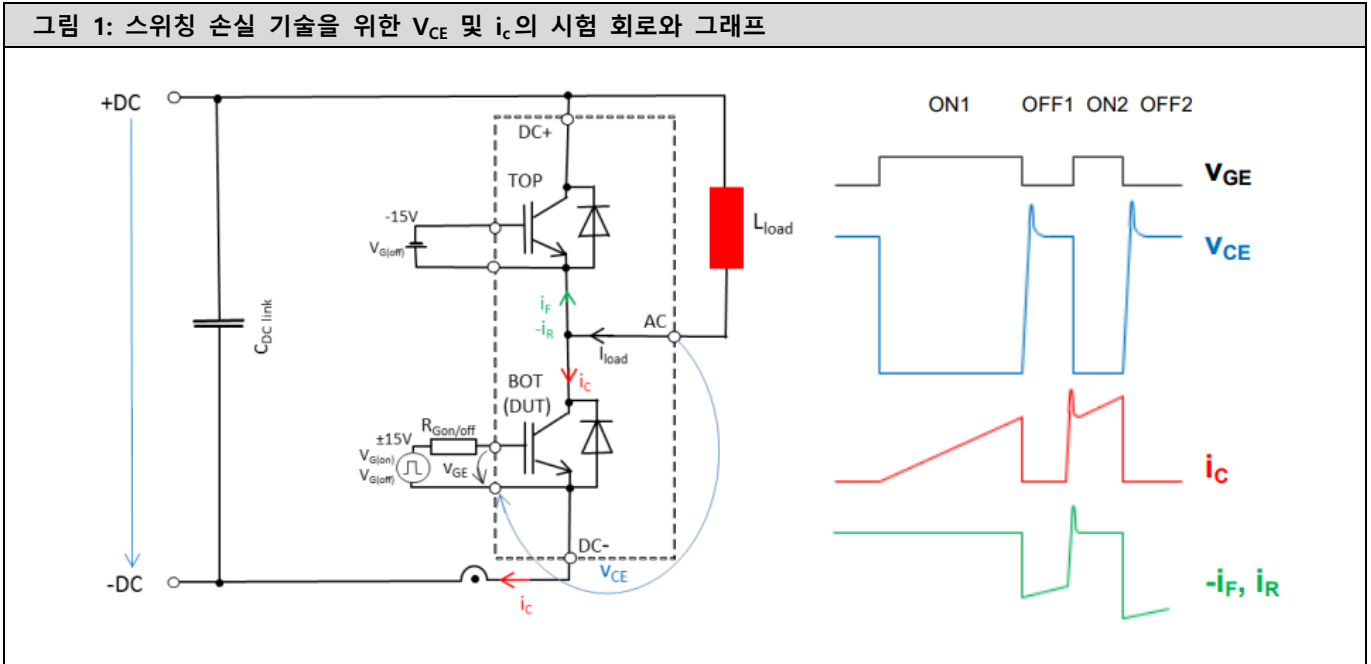
2.1. 시험 설정

IGBT 모듈의 스위칭 시간 및 에너지 손실 측정은 그림 1 과 같이 시험 회로의 유도 부하에 연결된 double pulse test 을 통해 실시됩니다.

IGBT(시험 중인 장치 - DUT)를 두 번 턴온 및 턴오프 하고, 첫번째 턴오프 OFF1 과 두번째 턴온 ON2 를 사용하여 동적 파라미터를 측정합니다. 첫번째 펄스 ON1 중에는 전류가 지정된 레벨 I_C 까지 증가합니다. 부하 인덕턴스 L_{load} 값이 프리휠링 구간과 OFF1 사이 동안 부하 전류가 일정하게 유지될 수 있을 정도로 충분히 커야 합니다.

그림 1 은 하부(BOT) IGBT 와 상부(TOP) 환류다이오드의 측정을 설명한 것입니다. 상부 IGBT 와 하부 환류다이오드의 측정을 위해서는 AC 와 -DC 사이에 부하 인덕턴스를 연결해야 합니다. 그리고 TOP IGBT 를 스위칭 하고 BOT IGBT 를 음의 전압 V_G 로 차단하여야 합니다.

그림 1: 스위칭 손실 기술을 위한 V_{CE} 및 i_c 의 시험 회로와 그래프



2.2. IEC 60747 관련 사양 팁

위의 측정 방법은 IEC 60747-9 표준의 6.3.11 및 6.3.17 "스위칭 에너지 손실의 측정 방법(Measuring methods for switching energy dissipations)"에 명시되어 있습니다. [3]

이 표준에 따라 턴온 에너지 손실 E_{on} 은 아래 식(1)과 같이 계산하여야 합니다.

$$E_{on} = \int_{t_1}^{t_2} p_v dt = \int_{t_1}^{t_2} v_{CE}(t) * i_c(t) dt \quad (1)$$

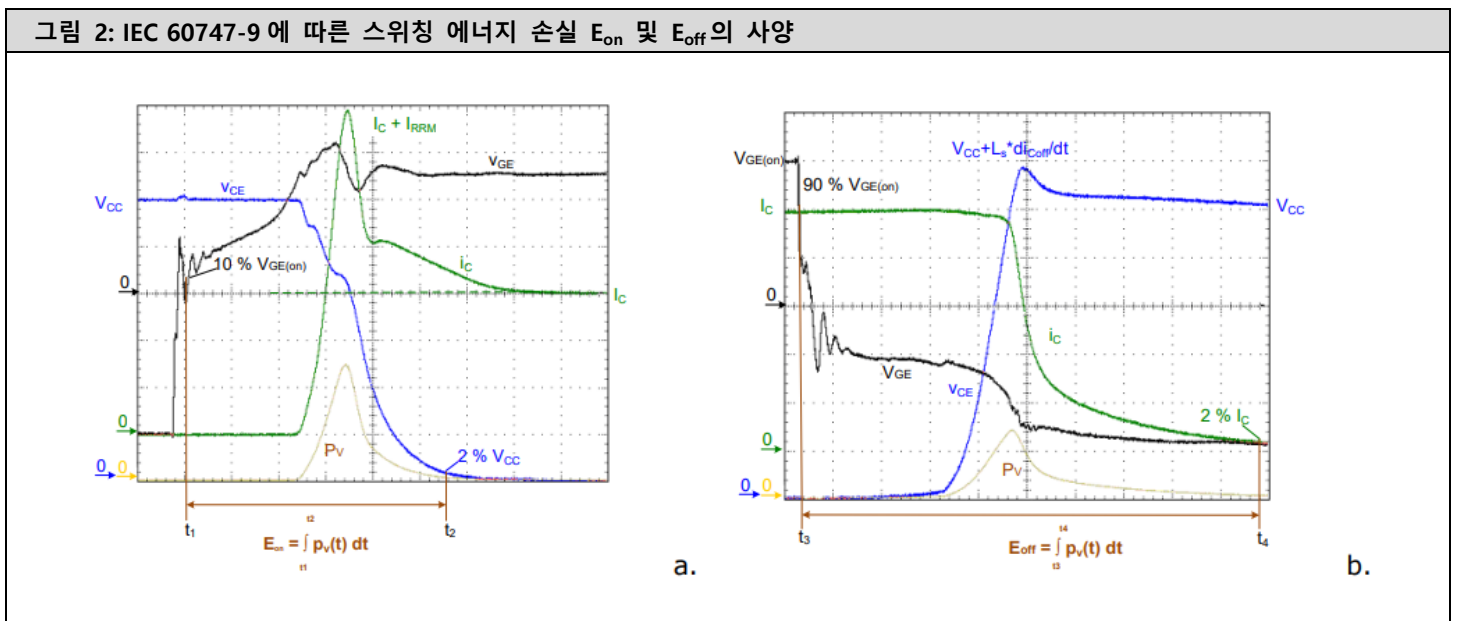
적분 한계는 t_1 ($V_{G(on)}$ 의 10%)과 t_2 (V_{CC} 의 2%) 사이. 그림 2a 참조.

턴오프 에너지 손실 E_{off} 는 아래 식(2)과 같이 계산하여야 합니다.

$$E_{off} = \int_{t_3}^{t_4} p_v dt = \int_{t_3}^{t_4} v_{CE}(t) * i_c(t) dt \quad (2)$$

적분 한계는 t_3 ($+V_{G(on)}$ 의 90%)과 t_4 (i_c 의 2%) 사이, 그림 2b 참조.

그림 2: IEC 60747-9 에 따른 스위칭 에너지 손실 E_{on} 및 E_{off} 의 사양



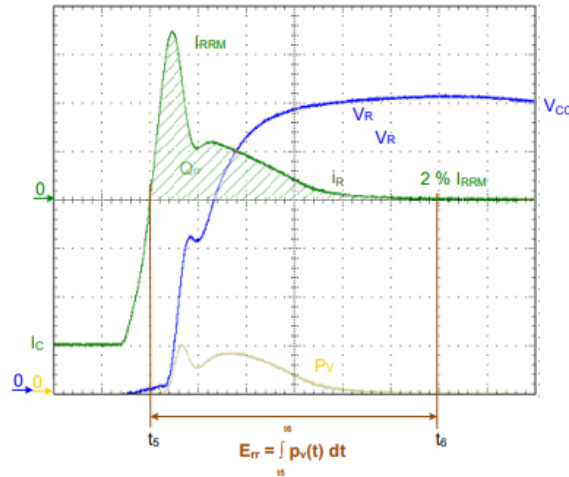
데이터시트에는 환류다이오드(freewheeling diode)의 턴오프 에너지 손실 Err 도 기술되어 있습니다.

IEC 60747-2 [5], 5.7 항 및 아래 그림 3 에 따라 E_{rr} 는 아래 식(3)을 이용하여 계산합니다.

$$E_{rr} = \int_{t_5}^{t_6} p_v dt = \int_{t_5}^{t_6} v_r(t) * i_r(t) dt \quad (3)$$

다이오드 역전류의 제로 크로싱에서 시작하여 다이오드의 감소하는 전류가 I_{RRM} 의 2%에 도달하기까지 t_5 와 t_6 사이의 적분으로 구할 수 있습니다.

그림 3: IEC 60747-2 에 따른 환류다이오드의 턴오프 에너지 손실 E_{rr} 의 사양



2.3. 주요 파라미터 전류 I_C , 공급전압 V_{CC} , 및 칩 온도 T_j

주요 시험 파라미터인 컬렉터 전류 I_C , 공급 전압 V_{CC} 및 칩 온도 T_j 는 스위칭 에너지 손실 E_{sw} 에 큰 영향을 미칩니다. 식(4)를 통해 전류 I , 칩 온도 T_j 및 공급 전압 V_{CC} 에 대한 IGBT 및 환류다이오드(FWD)의 스위칭 에너지 손실인 $E_{sw} = E_{on} + E_{off}$ 와 $E_{sw} = E_{rr}$ 이 갖는 의존성을 대략적으로 계산할 수 있습니다. 이는 공칭 시험 조건 I_{ref} , V_{CCref} , T_{jref} 및 E_{swref} 와는 다릅니다. 그림 4 는 칩 온도에 따른 스위칭 손실의 증가를 보여줍니다.

$$E_{sw} = E_{swref} \cdot \left(\frac{I}{I_{ref}}\right)^{K_i} \cdot \left(\frac{V_{CC}}{V_{CCref}}\right)^{K_v} \cdot \left(1 + TC_{sw}(T_j - T_{jref})\right) \quad (4)$$

K_i : 전류 의존성 지수(IGBT~1; FWD~0.5...0.6)

K_v : 전압 의존성 지수(IGBT~1.2...1.4; FWD~0.6)

TC_{sw} : 스위칭 손실의 온도 계수(IGBT~0.003; FWD ~0.005...0.006)

그림 4 는 300A/1200V IGBT4 모듈의 데이터시트에 자세히 정리되어 있습니다. 컬렉터 전류값 I_C 에 대한 스위칭 에너지 손실 E_{on} , E_{off} 및 E_{rr} 의 대표적 의존성을 그래프로 보여줍니다.

그림 4: 전류에 대한 IGBT4 모듈의 스위칭 에너지 손실의 대표적 의존성

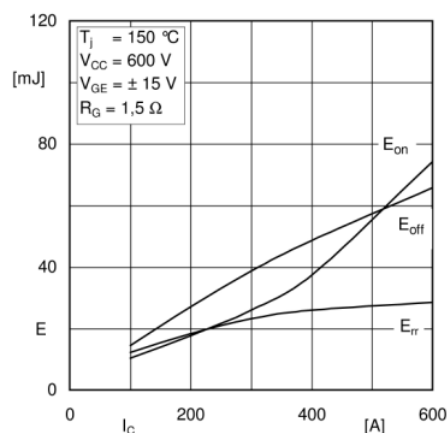
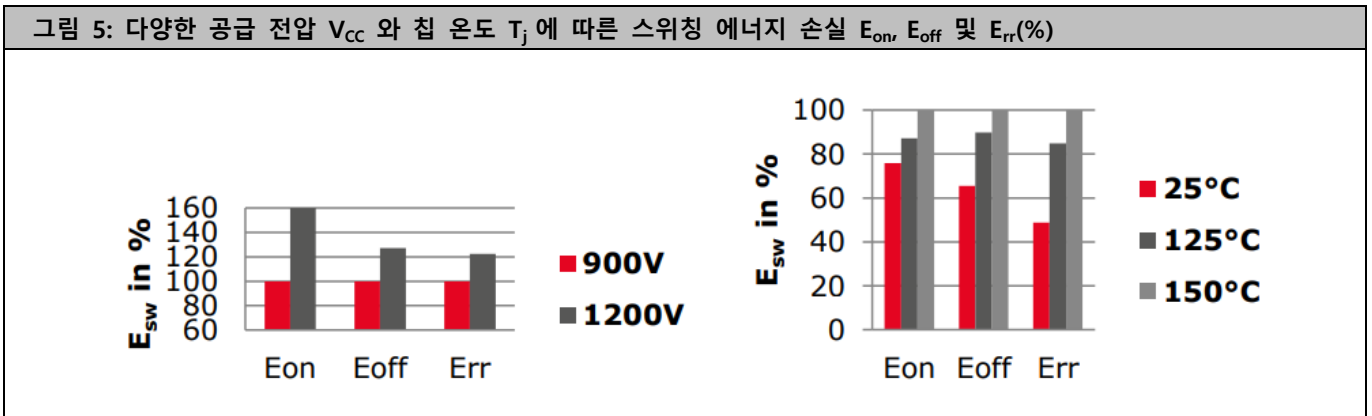


그림 5 는 다양한 공급 전압 V_{CC} 및 칩 온도 T_j 에서 600A/1700V IGBT4 모듈의 스위칭 에너지 손실 E_{on} , E_{off} 및 E_{rr} 를 비교하는 막대 그래프를 보여줍니다. 스위칭 손실 값은 백분율(%)로 표시됩니다. 100%는 데이터시트 값 $V_{CC}@ 900V$ 및 $T_j@150^{\circ}C$ 에 해당합니다.



2.4. 드라이버 출력단

드라이버 파라미터 역시 시험 방법에서 측정된 스위칭 손실에 영향을 미칩니다. 데이터시트의 파라미터는 게이트 저항 R_G 와 턴온 및 턴오프에 대한 게이트 전압 레벨, 즉 턴-온에 대한 $V_{G(on)}$ 와 턴오프에 대한 $V_{G(off)}$ 입니다. 파라미터 R_G 는 턴온(R_{Gon}) 및 턴오프(R_{Goff})에 대해 다를 수 있습니다.

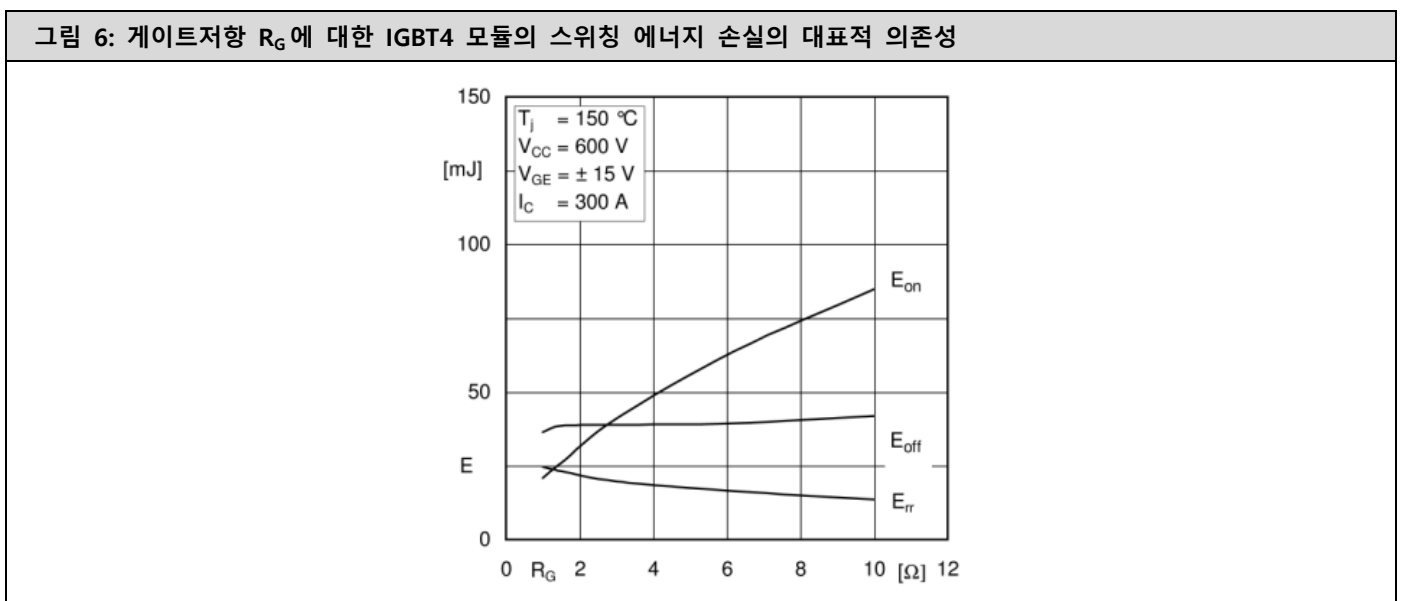
R_G 의 영향

그림 6 은 300A/1200V IGBT4 모듈의 데이터시트에 자세히 정리되어 있으며, 외부 게이트 저항 R_G 에 대한 스위칭 에너지 손실 E_{on} , E_{off} 및 E_{rr} 의 대표적 의존성을 보여주는 그래프입니다.

외부 게이트 저항이 증가하면 컬렉터 전류의 상승이 느려지므로(상승 시간 증가), 턴온 에너지 손실 E_{on} 은 R_G 와 함께 빠르게 증가합니다. 반대로, 특히 IGBT4 의 경우, 턴오프 에너지 손실 E_{off} 는 R_G 에 의존도가 작습니다.

IGBT 의 턴온이 빨라지면 환류다이오드 회로로 전류의 전류(傳流)가 발생합니다. 역회복 손실 E_{rr} 은 R_G 가 증가함에 따라 저감됩니다.

R_{Gon} 의 하한 값은 환류다이오드의 피크 역회복 전류와 허용 과전류의 과전압 V_R 에 의해 결정됩니다.



R_{Goff} 의 하한값은 (무엇보다도) 턴오프 과전압과 안전 구동 영역의 한계에 의해 결정됩니다. 데이터 비교를 위해, 많은 제조사들이 데이터시트에 di/dt 를 E_{on} 에 대한 파라미터로, dv_{CE}/dt 를 E_{off} 의 파라미터로 각각 기술합니다.

V_G의 효과:

게이트 전압 레벨 V_G(R_G가 같은 경우)가 높을수록 게이트 전하가 게이트 내부 혹은 외부로 빠르게 발생하며, IGBT 스위칭 시간과 스위칭 에너지 손실은 감소합니다. 허용가능 게이트 전압이 V_{GES} = ±20V로 제한되어 있고 엄격한 제한이 있습니다. 따라서 대다수의 제조사들이 1200V 및 1700V IGBT 모듈은 게이트 전압 V_{G(on)} = +15V 및 V_{G(off)} = -15V로, 600/650V 모듈은 +15V/-7.5V로 기술하고 있습니다.

예를 들어 IGBT 드라이버에 대한 특정 요구사항에 대한 정보는 [2]와 [6]에 포함되어 있습니다.

참고로, 다수의 시판 중인 드라이버 회로는 -15V보다 작은 -8V의 턴오프 전압으로 구동합니다. 저전력 드라이버는 종종 음의 턴오프 전압값이 아니라 V_{G(off)} = 0V로 구동합니다. 이에 대한 자세한 정보는 [7]에서 확인할 수 있습니다.

3. 스위칭 손실 사양에 영향을 주는 추가 요소

3.1. 부하 조건

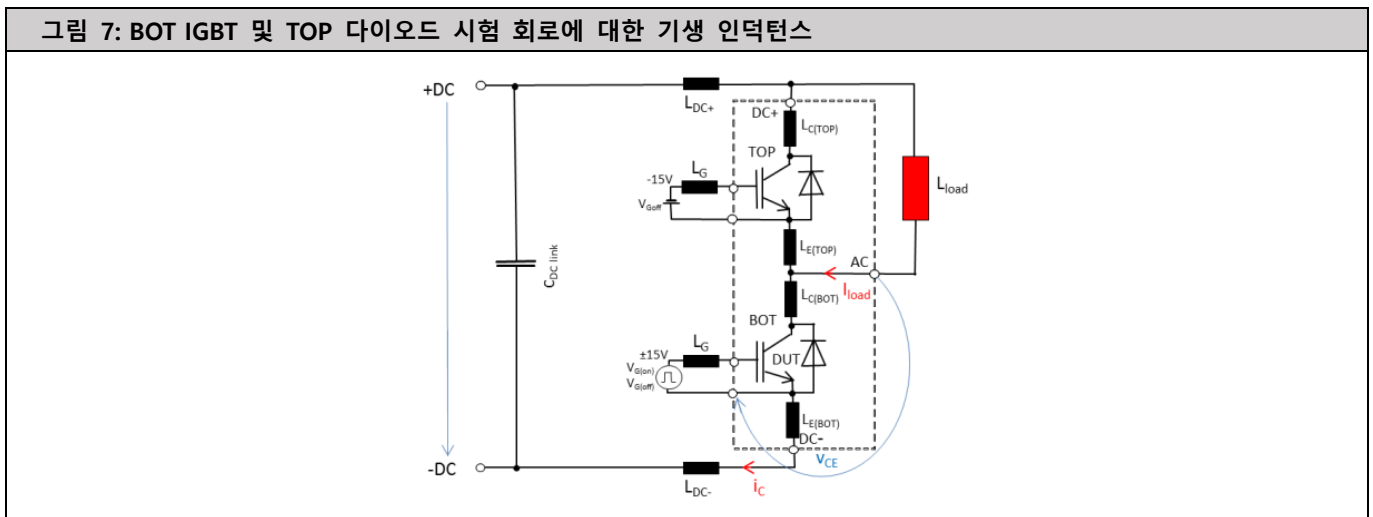
시험 설정에 따라 시험은 유도 부하를 통해 측정하였습니다. 컬렉터 전류는 컬렉터-이미터 전압이 하강할 때만 증가하기 때문에 저항성 부하에서는 손실이 적습니다. 반대로 커패시터 부하(예: 모터 케이블)의 스위칭 손실이 더 큰데 그 이유는 IGBT는 증가하는 컬렉터 전류와 커패시터 방전 전류를 전도해야 하기 때문입니다.

3.2. 기생 DC 링크 인덕턴스 L_σ

전류(轉流) 회로의 표류 인덕턴스는 스위칭 손실에 중요한 영향을 미칩니다. 그림 7과 같이 BOT IGBT와 TOP 다이오드에 대한 시험 방법에서, AC 출력단과 보조 이미터 단자(그림 7에서 파란선) 사이의 측정값 V_{CE}의 표류 인덕턴스 L_σ은 다음과 같다.

$$L_{\sigma} = L_{DC+} + L_{DC-} + L_{E(BOT)} \quad (5)$$

여기서 L_{DC+}과 L_{DC-}은 DC 버스의 표류 인덕턴스이고, L_{E(BOT)}은 BOT IGBT의 기생 이미터 인덕턴스입니다.



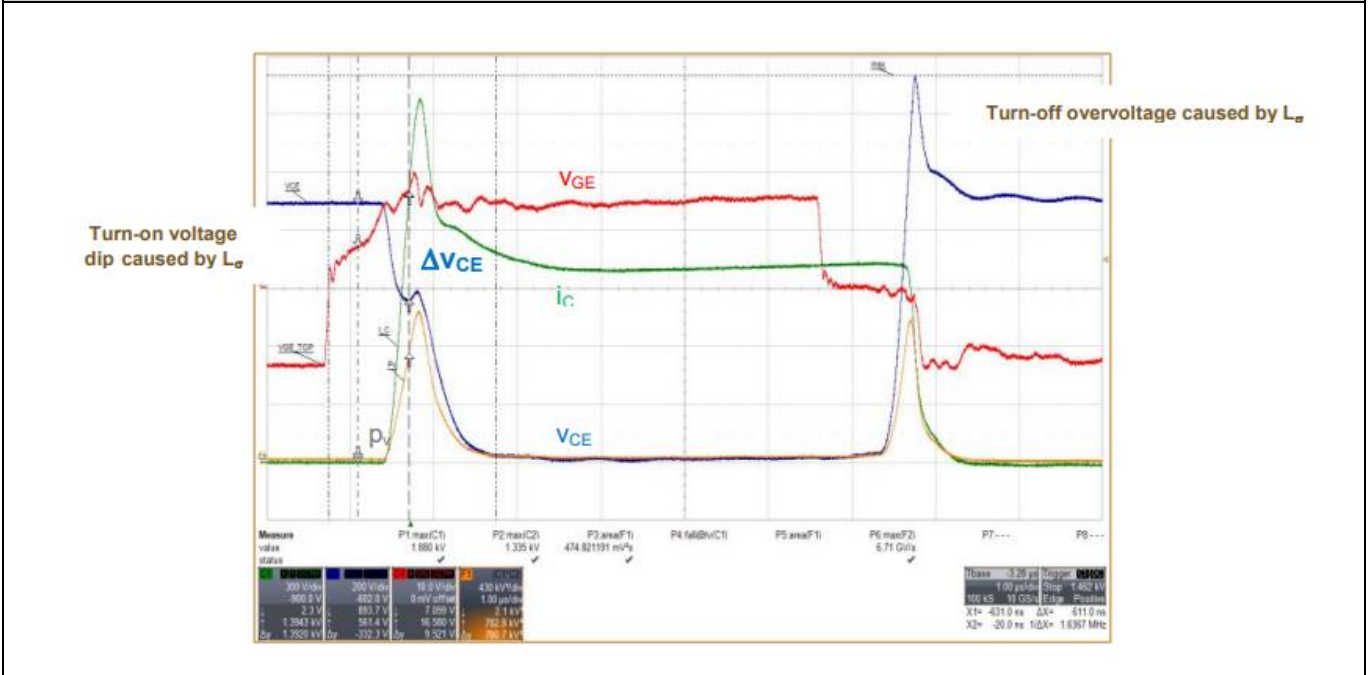
TOP 또는 BOT IGBT의 측정 여부에 따라, 하나의 이미터 경로의 기생 인덕턴스 L_E은 상단 IGBT에 대해서는 L_{E(TOP)} 또는 하단 IGBT에 대해서는 L_{E(BOT)}로 표시합니다.

이미터 본딩 와이어 및 단자의 인덕턴스 L_{E(TOP)} 또는 L_{E(BOT)}은 데이터시트에 인용된 모듈 표류 인덕턴스 L_{CE}의 중요한 부분입니다.

그림 8은 기생 DC 링크 인덕턴스가 전류(轉流) 프로세스에 미치는 영향을 보여준다. 이는 턴온 및 턴오프 과전압에서 전압 강하(voltage dip) V_{CE}를 나타낸다. L_σ은 IGBT 턴온 동안 아래 식을 이용하여 구할 수 있습니다.

$$L_{\sigma} = \Delta v_{CE} / di_c / dt \quad (6)$$

그림 8: DC 링크의 기생 인덕턴스로 인해 유발된 턴온 전압 강하 및 턴오프 과전압

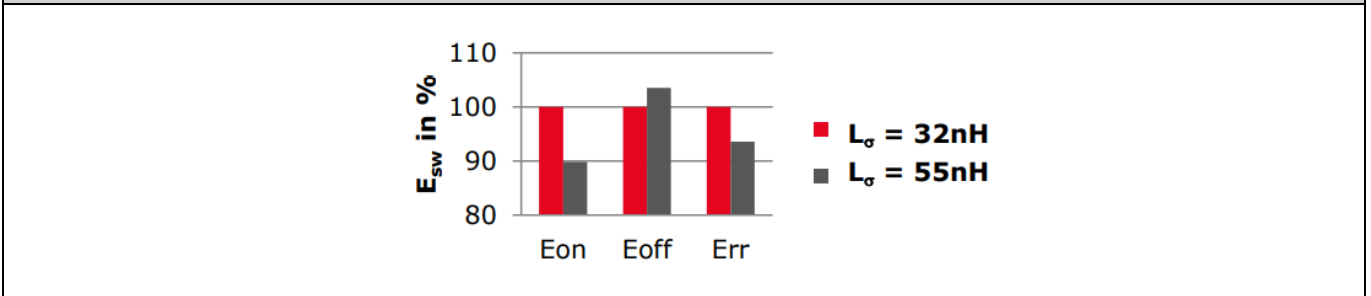


턴온 과정에서 L_{σ} 이 증가하면 컬렉터 전류가 증가하는 동안 V_{CE} 의 강하가 더욱 두드러진다. 따라서 에너지 손실 E_{on} 는 인덕턴스 L_{σ} 이 증가함에 따라 감소합니다.

턴오프 시에는 정반대의 효과가 나타납니다. 이때 L_{σ} 이 증가하면 스위칭 손실이 더 커집니다. 컬렉터-이미터 전압 오버슈트의 증가와 L_{σ} 의 증가에 따른 di/dt 의 감소가 그 이유입니다.

표준 IGBT 모듈에 대한 통상 L_{σ} 데이터시트 사양은 30nH~60nH 의 범위입니다. 그림 9 는 L_{σ} 값의 증가가 스위칭 에너지 손실에 미치는 영향을 나타낸 그림입니다.

그림 9: DC 링크 인덕턴스 L_{σ} 이 스위칭 에너지 손실 E_{on} , E_{off} 및 E_{rr} 에 미치는 영향

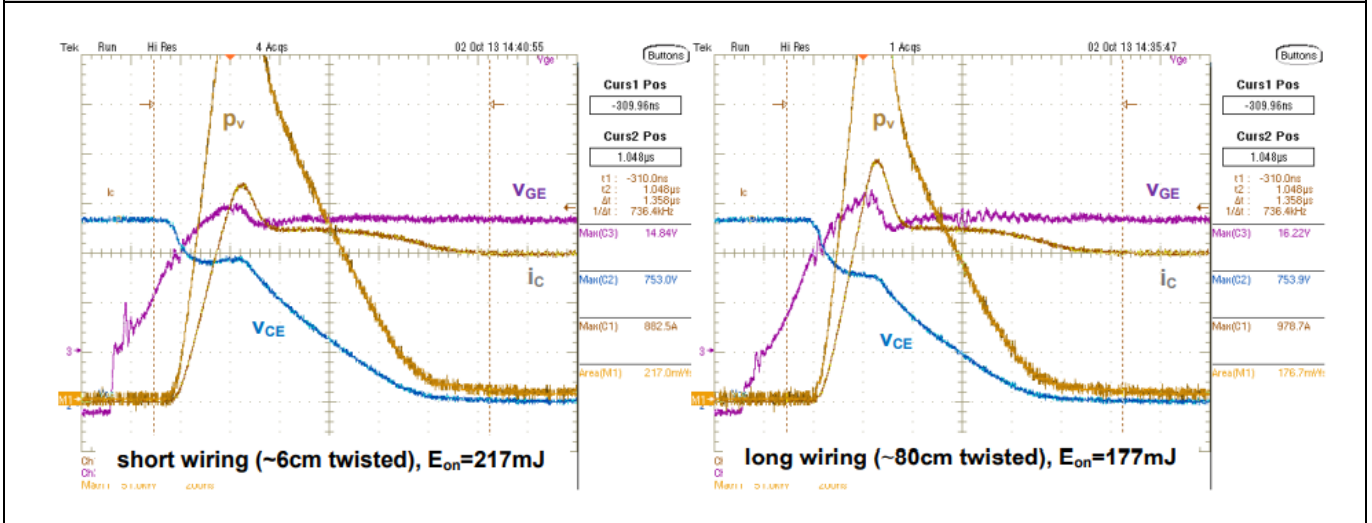


3.3. 게이트 회로 인덕턴스 L_G

게이트 회로의 기생 인덕턴스 L_G (그림 7 참조)도 IGBT 모듈의 스위칭 동작에 영향을 미칩니다. L_G 는 주로 게이트 케이블과 케이블 길이 및 드라이버 PCB 레이아웃에 따라 달라지게 됩니다.

이 인덕턴스의 효과는 " v_{GE} -플래토(plateau)" 기간이 시작될 때 추가 게이트 전하를 공급하는 전류 소스와 비교할 수 있습니다. 이것이 di_c/dt 의 슬로프를 증가시켜 결국 IGBT 의 더 낮은 E_{on} 을 갖습니다. 턴온이 빨라지면 환류다이오드 회로에서 컬렉터-이미터 경로로 향하는 전류의 전류(轉流)가 더 빨라지게 됩니다. 따라서 다이오드의 역회복 에너지 손실 E_{rr} 은 L_G 이 증가함에 따라 증가하게 됩니다. 그림 10 은 2 가지 서로 다른 게이트 케이블 와이어링의 턴온 동작의 비교를 한 것입니다. IGBT 턴오프 프로세스에서 스위칭 속도는 L_G 의 영향을 받지 않습니다. 하지만 L_G 값이 증가하면 지연시간 $t_{d(off)}$ 은 늘어나게 됩니다. 따라서 IEC 60747-9 에 따른 사양이 적용하면 E_{off} 는 증가합니다. 그러나, E_{off} 의 적분 간격이 $v_{CE} = 0.1 * V_{CC}$ 에서 시작하면 E_{off} 는 여전히 L_G 의 영향을 받지 않습니다(표와 비교. 예: 제조사 IN).

그림 10: 서로 다른 2 개의 게이트 회로 인덕턴스 L_G 를 갖는 1200V/450A IGBT4 모듈의 턴온 에너지 손실 E_{on}



또한, 긴 게이트 와이어링은 유도 효과를 추가됩니다. 이로 인해 v_{GE} 의 과전압, 게이트 전압 오실레이션(oscillation) 및 단락 시 피크 전류 상승이 발생하고 게이트 클램핑 조치의 효과가 떨어지게 됩니다.

따라서 결론적으로 턴온 에너지 손실이 약간 증가할 수는 있지만 각 애플리케이션 별로 게이트 리드 인덕턴스 L_G 를 최소화하는 것을 권장합니다.

일반적인 데이터시트에서는 L_G 에 대한 정보는 제공되지 않습니다.

3.4. 스위칭 에너지 손실 E_{on} 및 E_{off} 확인을 위한 적분 한계

2.2 항에 IEC 60747-9 의 적분 한계(integration limits)에 대한 사양을 제시했습니다. 그러나 현재 IGBT 모듈 제조사 대다수가 E_{on} 및 E_{off} 의 사양에 대해 다른 한계를 사용합니다. 표 2 는 이에 대한 몇 가지 예를 정리한 것입니다

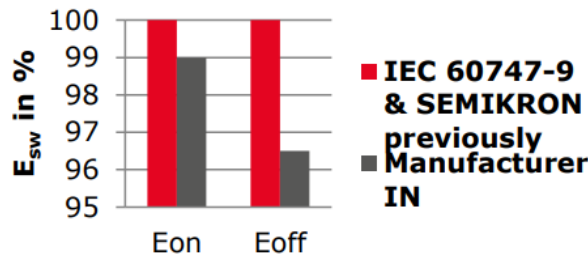
표 2: 통상적인 스위칭 에너지 손실 적분 한계

스위칭 에너지 손실	턴온: E_{on}		턴오프: E_{off}	
	t_1	t_2	t_3	t_4
IEC 60747-9	$v_{GE} = 0.1 * V_{G(on)}$	$v_{CE} = 0.02 * V_{CC}$	$v_{GE} = 0.9 * V_{G(on)}$	$i_C = 0.02 * I_C$
SEMİKRON 기준(prev.)	$v_{GE} = 0.1 * V_{G(on)}$	$v_{CE} = 0.02 * V_{CC}$	$v_{GE} = 0.9 * V_{G(on)}$	$i_C = 0.02 * I_C$
제조사 IN	$i_C = 0.1 * I_C$	$v_{CE} = 0.02 * V_{CC}$	$v_{CE} = 0.1 * V_{CC}$	$i_C = 0.02 * I_C$
제조사 MI	$i_C = 0.1 * I_C$	$v_{CE} = 0.1 * V_{CC}$	$v_{CE} = 0.1 * V_{CC}$	$i_C = 0.02 * I_C$
제조사 AB	$v_{GE} = 0.1 * V_{G(on)}$	$t_2 = t_1 + (10...20)\mu s^1$	$v_{GE} = 0.9 * V_{G(on)}$	$t_4 = t_3 + (10...20)\mu s^1$
제조사 IX	$i_C = 0.1 * I_C$	$v_{CE} = 0.1 * V_{CC}$	$v_{CE} = 0.1 * V_{CC}$	$i_C = 0.1 * I_C$

¹⁾ IGBT 모듈 전압 등급에 따라 다름.

v_{GE} 대신 턴온 및 턴오프 시 i_C 와 v_{CE} 에 대한 적분 한계를 참조하여 얻는 이점은 게이트-이미터 전압의 오실레이션과 턴온 및 턴오프 지연시간의 허용오차(tolerance)로 인한 결과의 독립성입니다. E_{on} 와 E_{off} 의 계산값이 IEC 60747-9 에 따라 결정된 값보다 약간 작습니다. 그림 11 은 2 가지 데이터시트 값을 비교한 것이다

그림 11: 다양한 적분 한계에서 E_{on} 및 E_{off} 의 데이터시트 값



3.5. 스위치 선택 및 측정 결과 평가

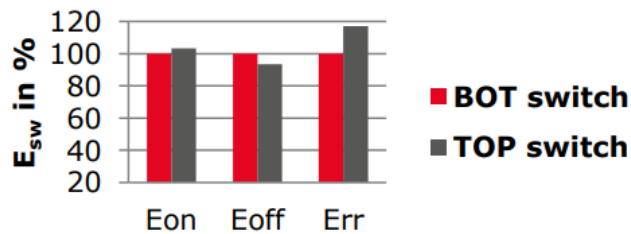
데이터시트의 모든 동적 특성 값은 대표 값입니다. 이 값들은 통계적 방법을 통한 BOT IGBT / 다이오드 및 TOP IGBT / 다이오드의 스위칭 손실 측정값을 기초로 IEC 60747-9 에 따라 결정됩니다.

이 표준은 (모듈이 아닌) 개별 반도체에 대한 사양을 명시하고 있기 때문에 모든 IGBT/다이오드 스위치를 측정해야 합니다. 6 개의 IGBT(각각 속성이 다른)가 풀 브리지 모듈로 있는 경우, 각각의 속성을 명시해야 합니다. 그러나 하나 이상의 스위치를 포함하는 모듈(3-레벨 모듈 제외)의 경우 데이터시트에서 하나의 값만 명시하는 것이 일반적입니다. 따라서 사용자가 어떤 스위치 값이 유효한지 재현할 수 없는 경우가 종종 있습니다.

약간 다른 내부 모듈 인덕턴스와 다른 전류(轉流) 경로로 인해 스위치 사이의 스위칭 에너지 손실에 미세한 차이가 발생합니다. 그림 12 에 이 같은 차이의 예를 제시하고 있습니다.

통계적 방법 선택은 제조사에 달려 있기 때문에 제조사는 측정값과 데이터시트 사양 비교할 때 적용할 안전 마진(safety margin)를 결정할 수 있습니다.

그림 12: IGBT 모듈의 TOP 및 BOT 스위치 사시의 스위칭 에너지 손실 차이



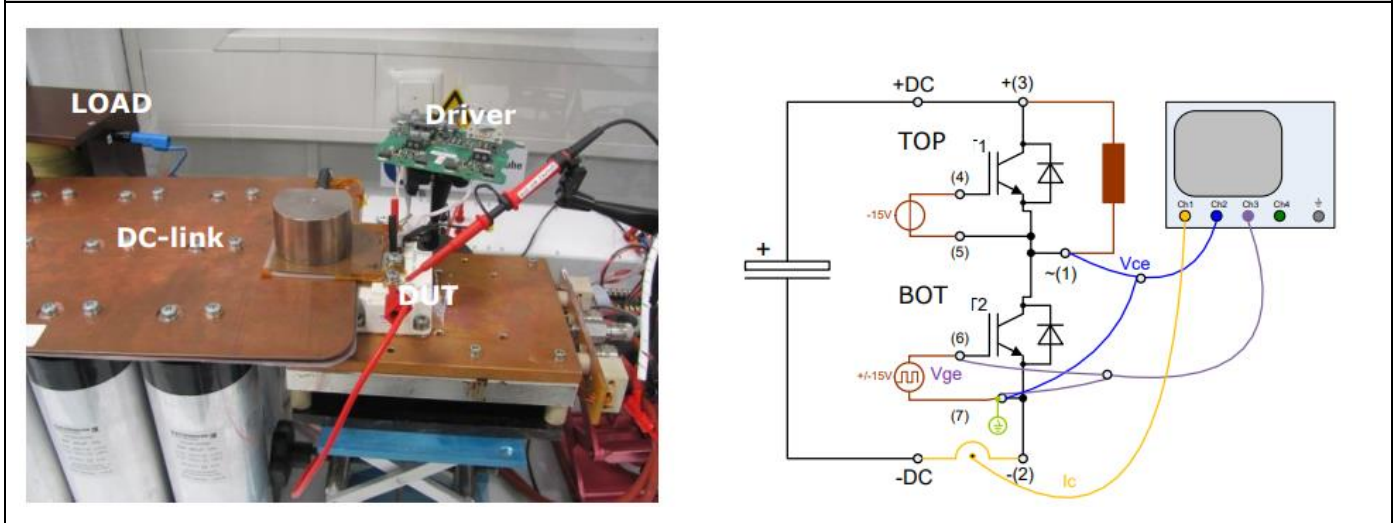
4. SEMIKRON 모듈의 스위칭 손실 사양

4.1. IGBT 하프브리지 모듈에 대한 SEMIKRON 시험 설정

그림 13 은 62mm IGBT 하프브리지 모듈 SEMITRANS 3 의 스위칭 동작을 지정하기 위한 테스트 설정을 보여줍니다.

IGBT 모듈을 온도를 제어할 수 있는 가열판(Heating plate)에 장착합니다. DC 단자는 일정한 공급 전압 V_{CC} 를 제공하기 위해 낮은 인덕턴스 "샌드위치" 타입 DC 버스 및 구현된 전류 센서(Pearson)를 통해 DC 버스 커패시터에 연결됩니다. 큰 부하 인덕턴스는 IGBT 모듈의 +DC 와 AC 단자 사이에 연결됩니다. 이 예시는 BOT IGBT 및 TOP 다이오드에 대한 시험 설정을 보여주는 것이며, 여기서 게이트와 보조 이미터 사이에 $V_{G(off)} = -15V$ 로 함으로써 TOP IGBT 는 차단합니다. 드라이버 회로를 10cm 길이의 트위스트 형 저 인덕턴스 와이어로 BOT IGBT(DUT)의 게이트와 보조 이미터에 연결하였습니다.

그림 13: 동적 IGBT 모듈 시험을 위한 SEMİKRON 시험 설정 및 BOT IGBT와 TOP 다이오드 측정을 위한 시험 회로



4.2. 시험조건

표 3 은 스위칭 손실을 결정하기 위해 SEMİKRON 이 사용하는 주요 시험 파라미터인 컬렉터 전류 I_C , 공급 전압 V_{CC} 및 칩 온도 T_j 를 비교한 것입니다.

표 3: I_C , V_{CC} 및 T_j 에 대한 IGBT 모듈용 SEMİKRON 시험 조건					
IGBT 모듈 그룹		I_C	V_{CC}		T_j
제품 분류	V_{CES}		기존	신제품 모듈의 경우	
SEMİTRANS, SEMİX,SKİM, MiniSKİİP, SEMİTOP	600/650V	I_{Cnom1}	300V	300V	25°C 및 $T_{j(max)} - 25K$
	1200V		600V	600V	
	1700V		1200V	900V (1200V) ²⁾	
SKİİP3, SKİİP4 IPM	1200V		600V 및 900V	600V 및 900V	
SKİİP3 IPM	1700V		900V 및 1200V	900V 및 1200V	
SKİİP4 IPM			900V 및 1300V	900V 및 1300V	

¹⁾ SEMİTOP 및 SKİİP3 타입별 I_C 시험 조건

³⁾ $V_{CC} =$ 요청 시 1200V

SEMİKRON 시험 파라미터는 기본적으로 대부분의 경쟁사의 IGBT 모듈 사양과 일치합니다. SEMİKRON 은 현재까지 V_{CC} 를 1200V 한 대부분의 경쟁 제품에 비해 300V 높은 1700V IGBT 모듈의 스위칭 동작에 대해서도 기술합니다.

경쟁 제품들과의 비교가능성 개선을 위해 SEMİKRON 은 1700V IGBT 신제품 모듈에 대한 데이터시트에 $V_{CC} = 900V$ 조건의 스위칭 시간 및 스위칭 손실에 대해 명시할 예정입니다.

SKİİP IPM 의 경우 다른 모듈에 비해 표류 인덕턴스(stray inductances)가 매우 낮아 더 높은 전압의 애플리케이션이 가능함에 따라 스위칭 손실 역시 더 높은 전압에서 측정합니다.

4.3. 측정시 DC 링크 인덕턴스 L_σ

3.2 항에서 다룬 바와 같이, 전류(轉流) 회로의 표류 인덕턴스 L_σ 이 증가하면 턴온 손실은 감소하고 턴오프 손실은 증가합니다.

현재까지 SEMİKRON 은 데이터시트에 L_σ 에 대해 명시하지 않지만 신제품 IGBT 모듈에 대해서는 이 파라미터를 명시할 예정입니다.

4.4. 스위칭 에너지 손실 E_{on} 및 E_{off} 측정을 위한 적분 한계 선택

대부분의 IGBT 모듈 제조사와 마찬가지로 SEMIKRON 은 IEC 60747-9 와 비교하여 앞으로 출시하는 IGBT 모듈의 데이터시트에 E_{on} 과 E_{off} 를 결정하기 위해 다른 적분 한계를 사용합니다(표 4 참조)

표 4: 신제품 IGBT 모듈에 대한 스위칭 에너지 손실의 적분 한계 변화			
상태	수식	기존	신제품
Turn-on	$E_{on} = \int_{t1}^{t2} v_{CE}(t) * i_C(t) dt$	$0.1 * V_{G(on)} \dots 0.02 * V_{CC}$	$0.1 * I_C \dots 0.02 * V_{CC}$
Turn-off	$E_{off} = \int_{t3}^{t4} v_{CE}(t) * i_C(t) dt$	$0.9 * V_{G(on)} \dots 0.02 * I_C$	$0.1 * V_{CC} \dots 0.02 * I_C$

턴온 시 I_C 및 턴오프 시 V_{CC} 의 10% 제한을 사용하면 스위칭 손실이 몇 퍼센트만 바뀌긴 하나 프로그래밍 가능한 설정을 통해 측정 장비를 사용할 수 있고 측정 결과의 재현성도 확보할 수 있습니다. 또한 경쟁사 제품의 데이터시트 사양과의 비교 호환성이 향상되었습니다(표 2 참조).

4.5. 데이터시트 사양에 따른 측정 결과 해석

SEMIKRON 은 일반적으로 IEC 60747-9 에 따라 스위칭 에너지 손실을 기술하기 위해 모든 IGBT 와 IGBT 모듈의 다이오드를 측정합니다.

기존 IGBT 모듈의 데이터 특성 기술을 위해 SEMIKRON 은 스위칭 손실이 가장 높은 스위치의 동적 데이터를 사용합니다. 하프브리지 모듈이 경우에는 이를 위해 대부분 BOT 스위치를 사용합니다. 배치 변동(batch fluctuation)과 측정 허용오차를 보상하기 위해 결과값에 10%의 안전 마진(safety margin)을 추가합니다.

새로 출시된 IGBT 모듈의 경우 SEMIKRON 은 다른 절차로 진행하였습니다. 과거에는 모듈의 모든 스위치를 측정하였습니다. 하지만 이제 더 많은(대표성이 강화된) 수의 모듈을 대상으로 스위칭 손실이 가장 큰 스위치를 측정합니다. 이러한 스위칭 에너지 손실의 평균값이 신형 SEMIKRON IGBT 모듈의 데이터시트 값이 될 것입니다.

5. 요약

과제는 데이터시트 정보를 기반으로 IGBT 모듈을 쉽게 비교하고 선택하는 것입니다. 이를 위해 스위칭 손실 관련 데이터시트의 사양 및 측정 조건의 영향을 설명하였습니다.

앞으로 경쟁 제품과의 비교가 더 용이하도록 하기 위해 SEMIKRON 은 신제품 모듈의 데이터시트에 몇 가지 측정 조건을 추가 혹은 변경할 예정입니다. 이 애플리케이션 노트는 이러한 변경 사항과 스위칭 손실 사양에 미치는 영향을 기술하고 있습니다.

기호 및 용어

문자 기호	용어
AC	IGBT 모듈의 AC 단자($E_{TOP_C_{BOT}}$)
BOT IGBT, 스위치	바닥 측 IGBT(-DC에 연결된 이미터), BOT 측 스위치 (IGBT + 다이오드)
C	컬렉터
C_{BOT} , C_{TOP}	바닥 측 IGBT의 컬렉터 단자, 최상단 측 IGBT의 컬렉터 단자
DC+, DC-	DC+ 단자(C_{TOP}), IGBT 모듈의 DC- 단자(E_{BOT})
+DC, -DC	+ 전위, DC 링크의 - 전위
di/dt	단위 시간 당 전류 변화
di/dt_{off} , di/dt_{on}	턴오프 시 단위 시간당 및 턴온 시 단위 시간당 전류의 변화
dv_{CE}/dt	단위 시간 당 컬렉터-이미터 전압의 변화
DUT	시험 중인 장치
E	이미터, 에너지 손실
E_{BOT} , E_{TOP}	바닥 측 IGBT의 이미터 단자, 최상단 측 IGBT 이미터 단자
E_{off} , E_{on}	턴오프 및 턴온 시(IGBT) 에너지 손실
E_{rr}	회복 시 에너지 손실(FWD)
E_{sw}	스위칭 프로세스에서 에너지 손실(IGBT 모듈)
E_{swref}	스위칭 프로세스에서 에너지 손실 참조값
f_{sw}	스위칭 주파수
FWD	환류다이오드
G	게이트
IGBT	절연 게이트 바이폴라 트랜지스터(Insulated Gate Bipolar Transistor)
I_C , i_C , I_{Cnom}	컬렉터 전류, 공칭 컬렉터 전류
i_F	다이오드 순방향 전류
I_{load}	부하 전류
i_R , I_{RRM}	다이오드 턴오프 시 역전류(Reverse current), FWD의 피크 역회복 전류
I_{ref}	IGBT 또는 FWD 전류의 참조값
K_i	스위칭 손실 계산의 전류 의존성 지수
K_v	스위칭 손실 계산의 전압 의존성 지수
L	인덕턴스

$L_{C(BOT)}, L_{C(TOP)}$	BOT IGBT의 컬렉터 인덕턴스, TOP IGBT의 컬렉터 인덕턴스,
L_{DC+}, L_{DC-}	+버스바의 표류 인덕턴스, -버스바의 표류 인덕턴스
$L_{E(BOT)}, L_{E(TOP)}$	BOT IGBT의 이미터 인덕턴스, TOP IGBT의 이미터 인덕턴스,
L_G	게이트 회로 인덕턴스
L_{load}	부하 인덕턴스
L_{σ}	DC 링크의 기생 인덕턴스
P_v, p_v	전력 손실
R_G	외부 게이트 저항기
R_{Goff}, R_{Gon}	턴오프 시 외부 게이트 저항기, 턴온 시 외부 게이트 저항기
t	시간
TC_{sw}	스위칭 손실의 온도 계수
$t_{d(off)}, t_{d(on)}$	턴오프 지연시간, 턴온 지연시간
t_f, t_r	하강 시간, 상승 시간
$T_j, T_{j(max)}, T_{jref}$	칩 온도, 칩 온도의 참조값
TOP IGBT, 스위치	TOP 측 IGBT(+DC에 연결된 컬렉터), 최상단 스위치 (IGBT + 다이오드)
ΔV_{CE}	컬렉터-이미터 전압의 변화
V_{CC}, V_{CCref}	공급 전압(supply voltage), 공급 전압의 참조값
V_{CE}, v_{CE}	컬렉터-이미터 전압
$V_G, V_{G(off)}, V_{G(on)}$	게이트 전압, 게이트 턴오프 전압, 게이트 턴온 전압(드라이버)
V_{GE}, v_{GE}	게이트-이미터 전압
V_{GES}	최대 허용가능 게이트-이미터 전압, (컬렉터-이미터 단락)
V_R	다이오드 턴오프 시 역전압

용어 및 기호에 대한 자세한 설명은 "애플리케이션 매뉴얼 전력 반도체"[2] 참고.

참고자료

- [1] www.SEMİKRON.com
- [2] A. Wintrich, U. Nicolai, W. Tursky, T. Reimann, "Application Manual Power Semiconductors", ISLE Verlag 2011, ISBN 978-3-938843-666
- [3] IEC 60747-9: Semiconductor devices – discrete devices, part 9: Insulated-gate bipolar transistors (IGBTs)
- [4] J. Lamp, "IGBT Peak Voltage Measurement and Snubber Capacitor Specification", Applikation Note AN-7006, SEMİKRON
- [5] IEC 60747-2: Semiconductor devices – discrete devices, part 2: Rectifier diodes
- [6] M. Hermwille, "IGBT Driver Calculation", Application Note AN-7004, SEMİKRON
- [7] N. Hofstoetter, "Limits and hints how to turn off IGBTs with unipolar supply", Application Note AN- 1401, SEMİKRON

변경 이력

SEMİKRON 은 추가 통지 없이 변경할 수 있는 권리를 가집니다.

면책조항

SEMİKRON 은 추가 통지 없이 신뢰성, 기능 또는 설계를 개선하기 위해 변경할 수 있는 권리를 가집니다. 이 문서에 제공된 정보는 정확하고 신뢰할 수 있는 것으로 간주됩니다. 그러나 이러한 정보의 정확성 또는 사용과 관련하여 어떠한 약속이나 보증도 제공하지 않으며 어떠한 책임도 지지 않습니다. SEMİKRON 은 이 문서에 기술된 제품이나 회로의 응용 또는 사용으로 인해 발생하는 어떠한 책임도 지지 않습니다. 아울러 이 기술 정보는 부품 특성에 대한 보증으로 간주되지 않을 수 있습니다. 배송, 성능 또는 적합성과 관련하여 일체의 명시적 혹은 암묵적 보증이나 보장도 하지 않습니다. 이 문서는 이전에 제공된 모든 정보를 대체 및 대신하며 추가 통지 없이 업데이트로 대체될 수 있습니다.

SEMİKRON 제품은 SEMİKRON 의 명시적인 서면 승인 없이 생명 유지 장치 및 시스템에 사용할 수 없습니다.

SEMİKRON-DANFOSS KOR

경기도 광명시 새빛공원로 67 광명역자이타워 A 동 1207~1212 호

• Tel: +82-2-6370-4799 • Fax: +49 911-65 59-262

sales.skkor@semikron-danfoss.com