

PLECS를 이용한 반도체 소자의 손실 모의

본 문서에서는 3 Level 인버터의 반도체 소자에 의한 손실을 구하기 위한 배경을 설명한 후, PLECS 시뮬레이션을 통해서 반도체 소자의 손실을 구하는 방법을 기술한다.

목차

I. 반도체 소자의 손실	2
II. PLECS를 이용한 손실 시뮬레이션	5
III. 시뮬레이션 구성 예시	6
IV. 시뮬레이션 - 스위치의 손실 정보 입력	8
V. 시뮬레이션 - 손실 계산	14

I. 반도체 소자의 손실

참고문헌

Ned Mohan, Tore M. Undeland, and William P. Robbins, "Overview of Power Semiconductor switches," in *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*, Hopoken, NJ: John Wiley & Sons, 2003.

전력반도체 스위치 중 BJT나 MOSFET, GTO, IGBT 등의 온·오프 제어가능 소자(controllable switches)를 다음 [그림 1]과 같이 포괄적으로 표현할 수 있다.

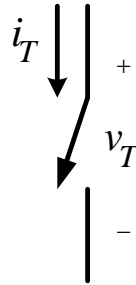


그림 1. 온·오프 제어가능 소자

이상적인 온·오프 제어가능 소자는 다음과 같은 특징을 갖는다.

- 1) 스위치가 꺼져있어 전류가 흐르지 않을 때, 임의의 큰 forward/reverse 전압을 견딜 수 있다.
- 2) 스위치가 켜진 경우, 임의의 큰 전류가 흐를 수 있고, 소자에 의한 전압 강하는 0이다.
- 3) 스위치의 온·오프 신호에 즉각적으로 반응하여 온·오프 상태가 바뀐다.
- 4) 스위치를 동작시키는 데에 무시할 만큼 작은 전력이 소모된다.

그러나 실제 소자의 경우 이러한 이상적인 특성을 보이지 않는다. 전류가 흐르지 않을 때, 견딜 수 있는 전압의 크기가 제한되며, 스위치가 켜진 경우 흐를 수 있는 전류의 양이 제한된다. 스위치 상태가 바뀔 때 일정 에너지를 소모하게 되며, 이 에너지가 과하게 발생하는 경우, 스위치가 손상될 수 있다.

반도체 소자의 전력 소모는 다음 [그림 2]와 같이 간단한 회로에서 알아볼 수 있다. Buck converter에 인덕턴스 부하가 연결된 형태로, 이와 유사한 회로를 많이 마주치게 된다. 본 과제에서 다루고 있는 3레벨 인버터 역시, 스위칭 상태 변화에 따라 아래와 유사한 회로가 구성된다. 인덕턴스가 매우 큰 경우, 인덕턴스 부하는 이상적 전류원이라 모의할 수 있다.

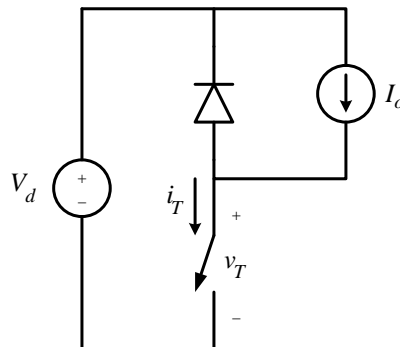


그림 2. Step-down dc-dc converter에 온·오프 제어가능 소자가 사용된 회로

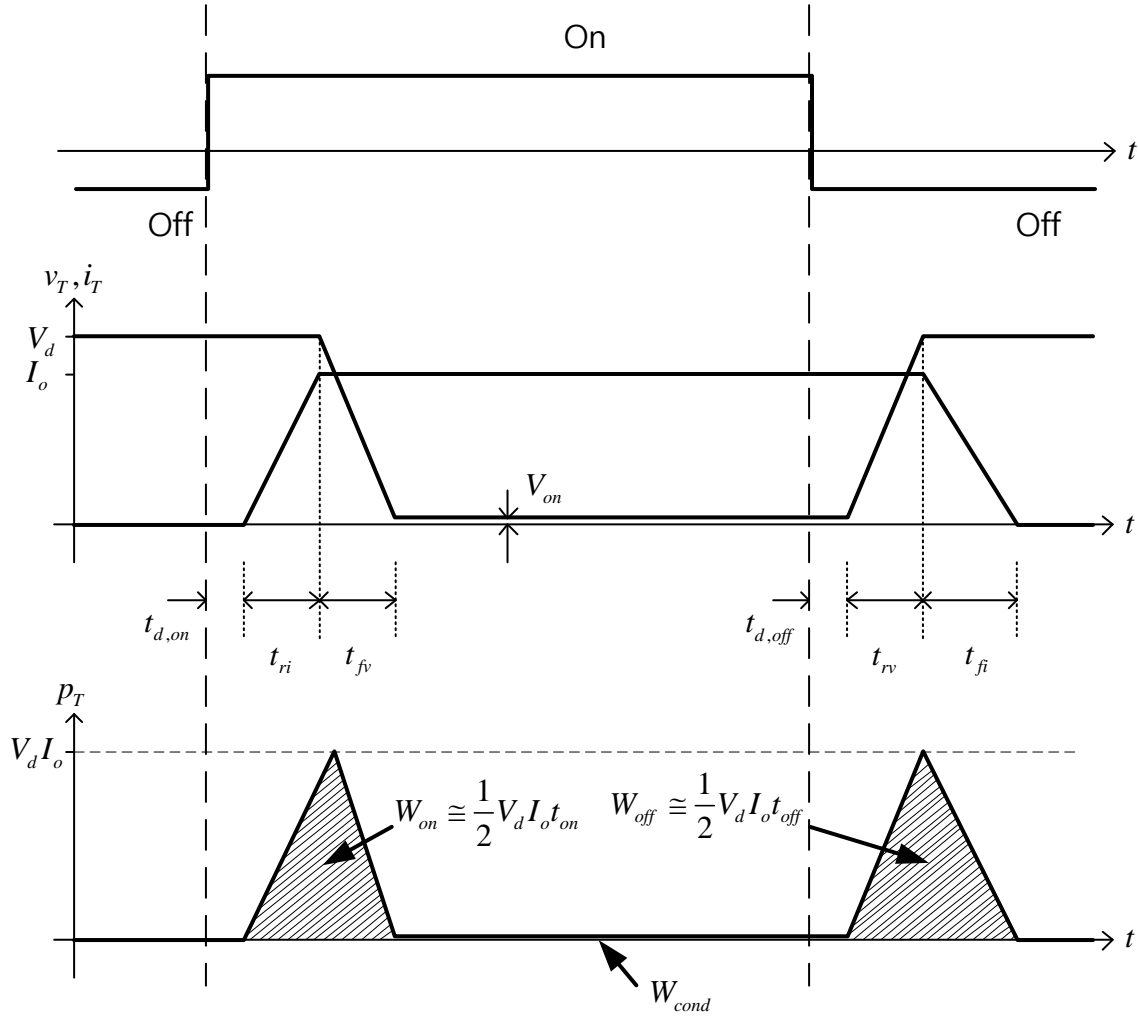


그림 3. 온-오프 제어가능 소자의 스위칭 변화에 따른 전압과 전류 파형

<OFF → ON>

- i) 스위치가 꺼져 있는 상태: 부하 전류가 모두 다이오드를 통해 흐르고 있음
- ii) 스위치를 켜 후 $t_{d,on} \sim t_{ri}$: 스위치의 게이트 입력단에 인가된 전압의 크기가 점점 커지게 된다. 이 전압이 충분히 커지면, 스위치에 흐르는 전류가 증가한다. 이로 인해 다이오드에 흐르던 전류가 점차 감소한다.
- iii) 전류가 모두 스위치로 옮겨간 후 t_{fv} : 다이오드의 전류가 감소하다 0에 이르면 다이오드가 꺼지게 된다. (실제로는 Reverse recovery 전류 있음) 이 후 다이오드 양단에 걸린 전압이 점차 증가하고, 스위치에 걸려있던 전압은 서서히 감소하게 된다.
- iv)

<ON → OFF>

- i) 스위치가 켜져 있는 상태: 부하의 전류가 모두 스위치를 통해 흐르고 있음
- ii) 스위치를 끄는 순간: 다이오드가 꺼진 상태이며, 스위치 양단의 전압이 점차 상승하며, 다이오드 양단의 전압은 점차 감소하게 된다.
- iii) 다이오드 양단의 전압이 0이 된 후: 다이오드가 켜지며, 다이오드에 흐르는 전류가 상승하며, 스위치에 흐르던 전류는 감소하게 된다.

V_T 와 i_T 는 각각 스위치 양단의 전압과 스위치에 흐르는 전류를 나타낸다. V_{on} 은 스위치가 켜져 있을 때 전압 강하(on-drop)를 의미한다. p_T 는 스위치에서 소모되는 순시 전력을 나타낸 것이다. $t_{d,on}$ 와 $t_{d,off}$ 는 게이팅 신호가 인가 된 후 실제 스위치가 켜지거나 꺼지기 시작하는 순간까지 걸리는 시간, t_{ri} , t_{rv} 는 각각 전류와 전압이 상승하는 시간, t_{fi} , t_{fv} 는 각각 전류와 전압이 하강하는 시간을 의미한다. 스위치가 켜지고 꺼지는데 걸리는 전체 시간을 t_{on} 과 t_{off} 로 나타내었으며 그 값은 다음과 같다.

$$t_{on} = t_{d,on} + t_{ri} + t_{fv}$$

$$t_{off} = t_{d,off} + t_{rv} + t_{fi}$$

W_{on} 과 W_{off} 는 각각 스위치가 켜지고 꺼질 때 소모하는 전력을 의미하며, W_{ond} 는 스위치의 on-drop과 흐르는 전류에 의해서 생기는 전력 손실을 의미한다. W_{ond} 를 도통 손실(conduction loss), W_{on} 과 W_{off} 를 스위칭 손실(switching loss)로 분류할 수 있다.

[그림 3]의 스위칭 파형은 일반적인 온-오프 제어가능 소자에 대한 것으로 각 반도체 소자의 특성에 따라 전압, 전류 파형의 특성이 조금씩 달라지게 된다. 다음 [그림 4]는 본 과제에서 다루고 있는 3레벨 인버터에서 사용할 전력반도체인 IGBT의 스위칭 상태 변화에 따른 전압과 전류 파형을 개략적으로 나타낸 것이다. (2011년 6월 30일 회의 자료 중)

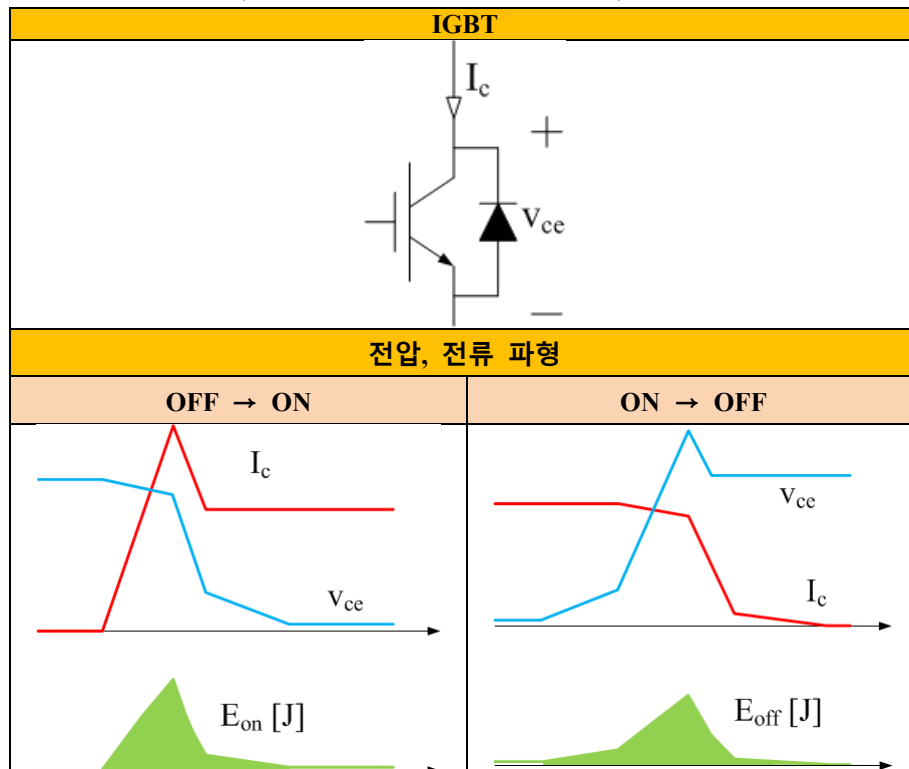


그림 4. IGBT의 스위칭 변화에 따른 전압과 전류 파형

손실과 관련하여 데이터 시트에서 제공되는 정보 중 $V_{CE,sat}$ (collector-emitter saturation voltage)와 E_{on} (turn-on energy loss per pulse), E_{off} (turn-off energy loss per pulse)로 정상 상태의 반도체 소자에 의한 전력 소모를 추정할 수 있다.

II. PLECS를 이용한 손실 시뮬레이션

반도체 소자의 전력 손실을 계산하기 위해서, PLECS 프로그램을 이용할 수 있다. PLECS에서는 IGBT with Diode, IGBT, Diode 등 여러 형태의 반도체 소자가 주어진다. 이러한 반도체 소자는 기본적으로 이상적으로 모의 하여 회로를 동작시킬 수 있다. 그러나 스위치의 Turn-on loss와 Turn-off loss 정보를 입력하여 스위칭에서 발생하는 손실을 모의할 수 있으며, Conduction loss 정보를 입력하여 도통 시 발생하는 손실을 모의할 수도 있다.

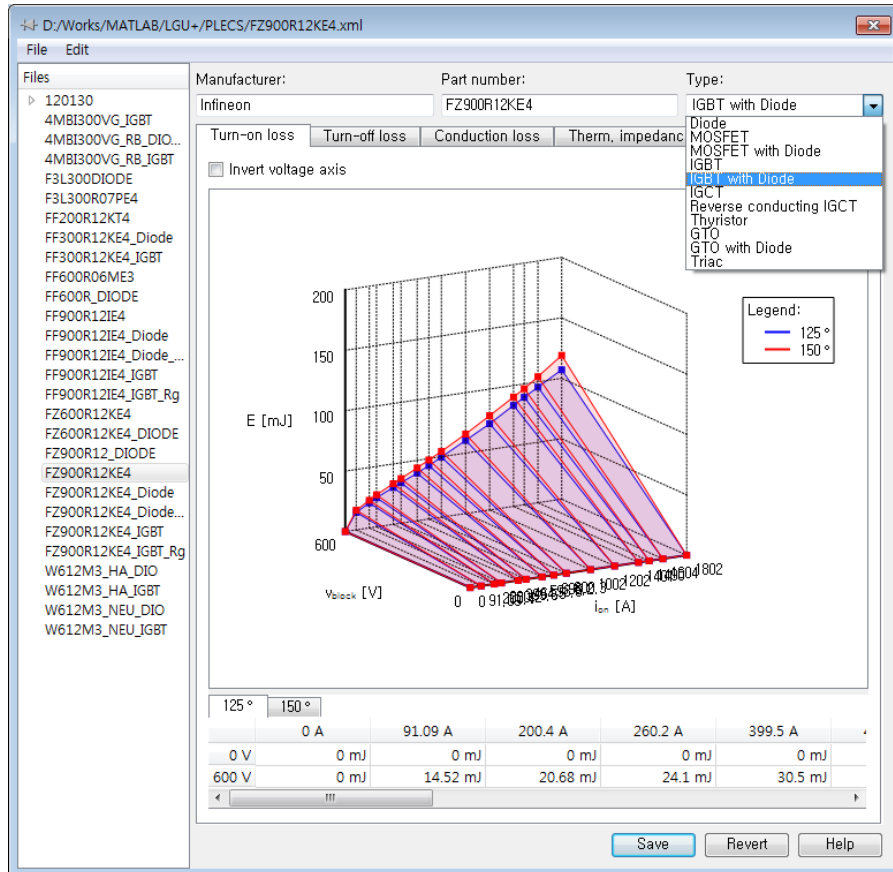


그림 5. PLECS에 입력한 IGBT의 손실 정보 예시

[그림 5]는 역병렬 다이오드가 연결된 IGBT에 손실 정보를 입력한 예시이다.

- Turn-on loss와 Turn-off loss 탭:** 스위치 데이터 시트에 전류에 따른 switching loss 정보가 제시되며, 이를 입력할 수 있다. 이 때 데이터 시트에서 제공된 정보는 게이트 저항이 최소인 경우로 제시될 수 있으며, 사용할 게이트 저항에 맞게 적절히 변환된 손실 정보를 입력하여 사용하여야 한다.
- Conduction loss 탭:** collector-emitter saturation 전압과 전류의 관계를 입력할 수 있다. IGBT with Diode인 경우에는 양의 전류가 흐르는 경우 IGBT의 특성을, 음의 전류가 흐르는 경우 Diode의 특성을 입력하여 사용할 수 있다.
- Therm. Impedance 탭:** 스위치의 온도 특성 역시 볼 수 있으며, 이는 데이터 시트에서 제공되는 thermal impedance를 입력하면 된다.

III. 시뮬레이션 구성 예시

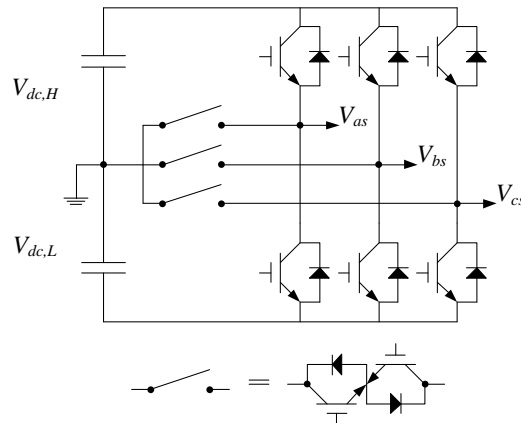


그림 6. 본 과제의 3레벨 인버터

[그림 6]과 같은 3 Level 인버터의 손실을 분석하기 위해 회로를 다음과 같이 두 가지 방식으로 구성할 수 있다. 하나의 스위치를 구성할 때, IGBT와 Diode를 분리하여 연결할 수도 있으며, IGBT with Diode를 이용해 하나의 스위치로 구성된 회로를 만들 수 있다. IGBT와 Diode를 분리하는 경우, 각 소자의 온도 특성인 thermal impedance를 각각 모의하여 온도 특성을 관측할 수 있다.

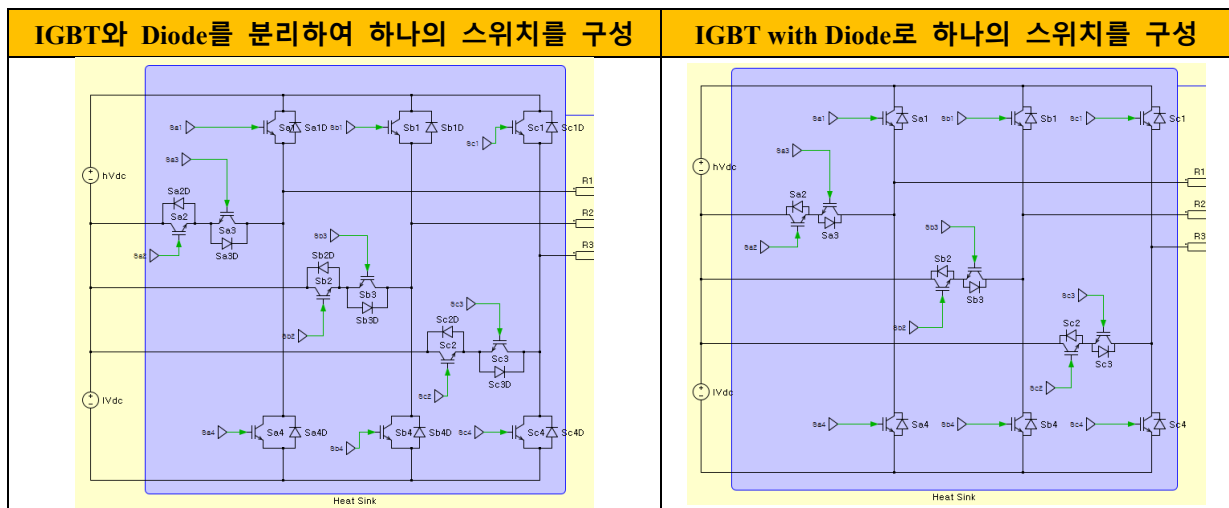


그림 7. 3레벨 인버터의 회로 구성 예시

PLECS Probe를 통해 스위치의 도통 손실과 스위칭 손실을 바로 측정하여 관측할 수 있다.

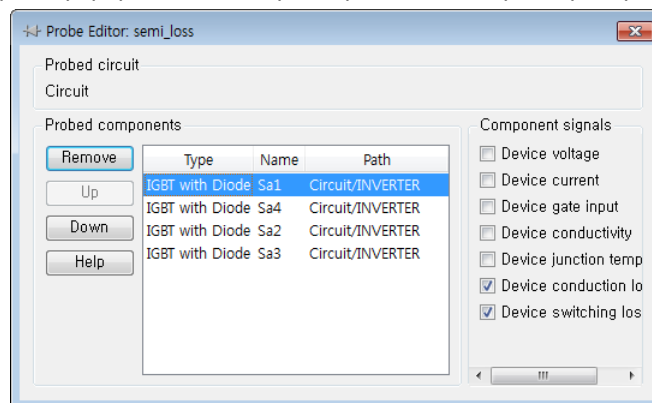


그림 8. PLECS Probe를 이용한 도통 손실과 스위칭 손실 관측

도통 손실은 스위치가 켜져 전류가 흐를 때 연속적으로 나타나며, 스위칭 손실은 스위칭 상태가 바뀔 때 Pulse 형태로 나타나게 된다.

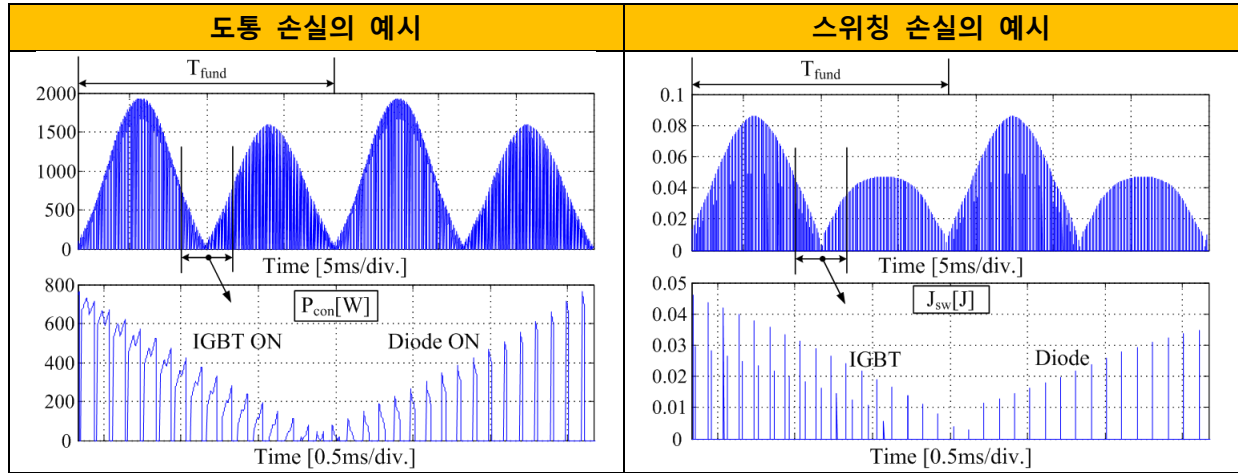


그림 9. 도통 손실과 스위칭 손실의 관측 예시

도통 손실과 스위칭 손실의 특성으로 인해 한 주기의 스위치 도통 손실과 스위칭 손실은 다음과 같이 구할 수 있다.

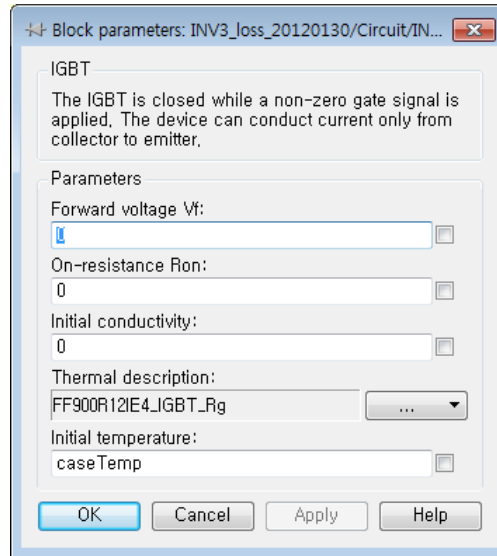
$$P_{con} = \frac{1}{T_{fund}} \int_t^{t+T_{fund}} P_{con} dt$$

$$P_{sw} = \frac{1}{T_{fund}} \sum J_{sw}$$

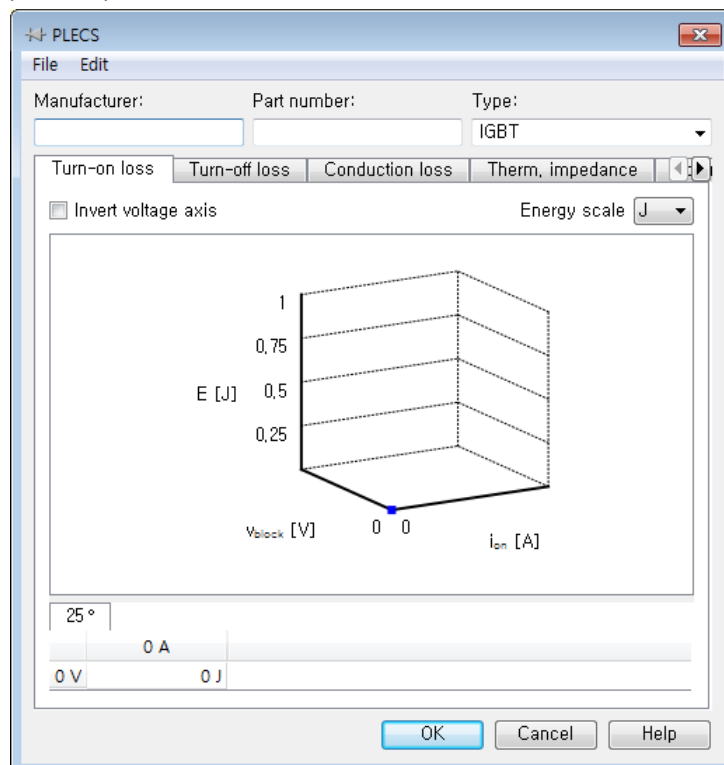
t 는 어느 한 시점이며, T_{fund} 는 기본파 전류의 한 주기를 의미한다. 도통 손실의 경우 스위치가 켜져 있을 때 연속적인 값으로 나타나므로 시간에 따른 전력 소모를 적분하여 평균을 취하여 계산한다. 스위칭 손실은 Pulse 형태로 나타나므로, 한 주기의 전력 소모의 합을 계산하고 평균을 취한다.

IV. 시뮬레이션 - 스위치의 손실 정보 입력

- File > PLECS Preferences > Thermal 탭: 입력할 스위치의 손실 정보가 저장될 경로를 지정한다. 저장된 파일의 확장자는 xml이 된다. 시뮬레이션 mdl 파일이 저장된 곳과 같은 경로로 지정할 수 있다.
- 스위치로 회로를 구성한 후, 해당 스위치에 손실 정보를 입력한다. 스위치를 선택하고 더블-클릭하면 다음과 같은 창이 형성되고, Thermal description의 오른쪽에 위치한 탭을 선택하여, New thermal description 메뉴를 선택한다.



- 아래와 같은 화면이 형성되며, 데이터 시트에서 해당하는 정보를 입력하면 되며, 관련된 데이터 시트의 자료는 아래의 표에 정리하였다. Manufacturer와 Part number는 임의로 적절하게 입력하면 된다.

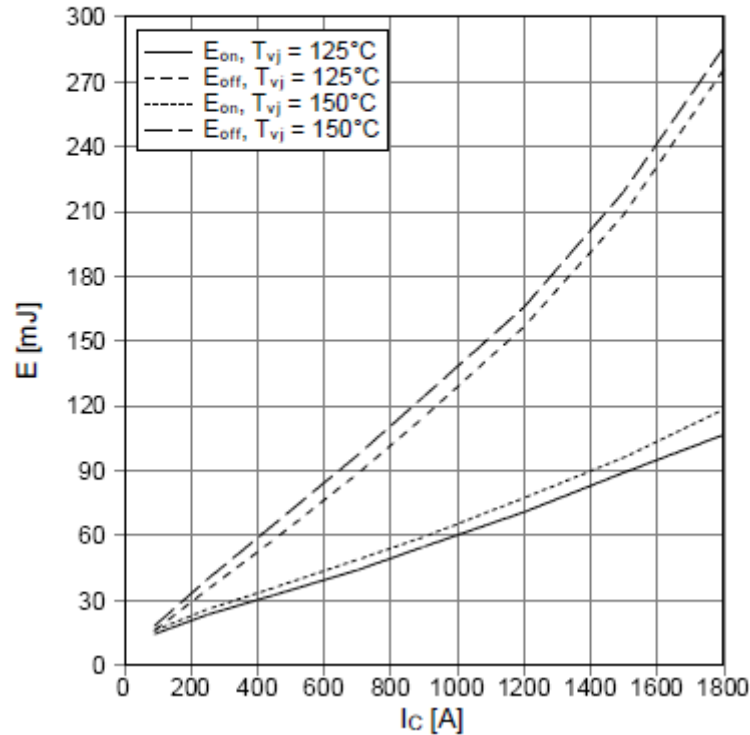


Turn-on, Turn-off loss의 데이터 시트 정보 예시

Schaltverluste IGBT-Wechselr. (typisch)
switching losses IGBT-Inverter (typical)

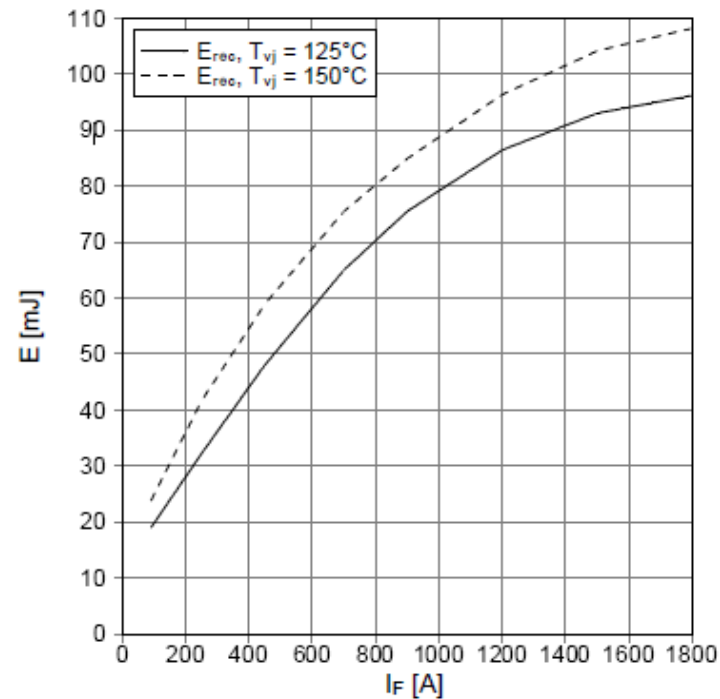
$E_{on} = f(I_c)$, $E_{off} = f(I_c)$

$V_{GE} = \pm 15 \text{ V}$, $R_{Gon} = 1.5 \Omega$, $R_{Goff} = 0.9 \Omega$, $V_{CE} = 600 \text{ V}$



- 1) 온도에 따라 Tab을 형성 – Tab을 우클릭 후 New temperature values...를 선택
- 2) 형성된 온도 Tab 내에서 주어진 전압을 추가 – 행에서 우클릭 후 New voltage values...를 선택. 위의 데이터 시트에서 보는 바와 같이 명확한 값이 주어짐.
- 3) 형성된 온도 Tab 내에서 전류 값을 추가 – 열에서 우클릭 후 New current values...를 선택. 데이터 시트에서 범위 내의 적절한 값을 선택한다. 개수는 많을 수록 제시된 그래프에 가까워진다.
- 4) 해당 전압과 전류, 온도에 해당하는 switching loss 값을 입력 – 단위에 주의한다. 데이터 시트에서 제공되는 값은 [mJ]인데, 프로그램에서 default는 [J]로 설정되어 있다.

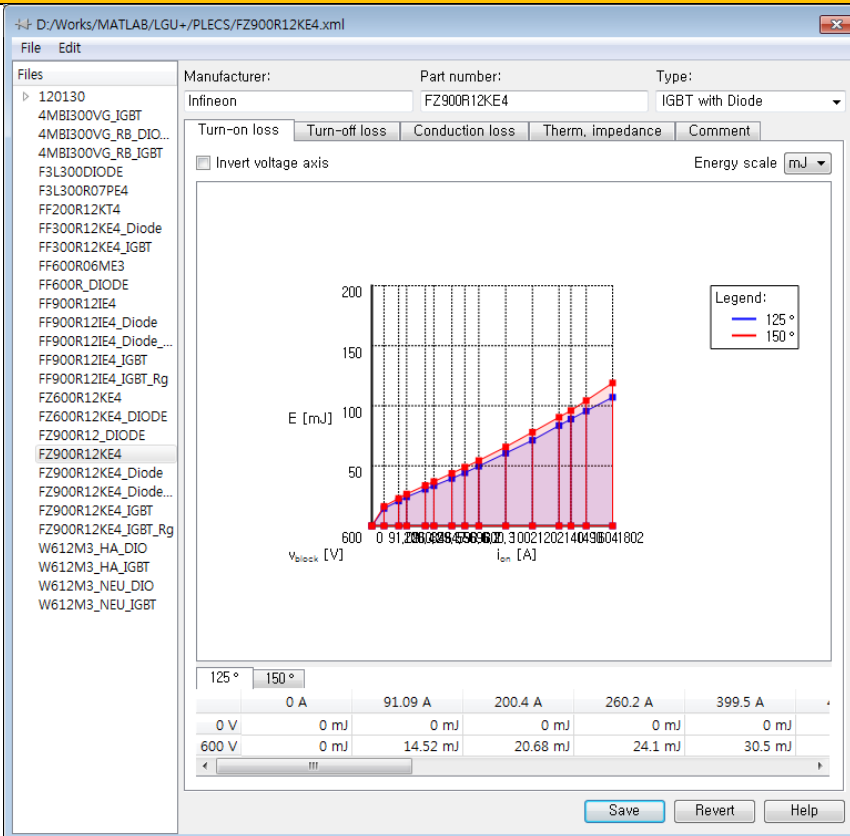
Schaltverluste Diode-Wechselr. (typisch)
switching losses diode-inverter (typical)
 $E_{rec} = f(I_F)$
 $R_{Gen} = 1.5 \Omega, V_{CE} = 600 V$



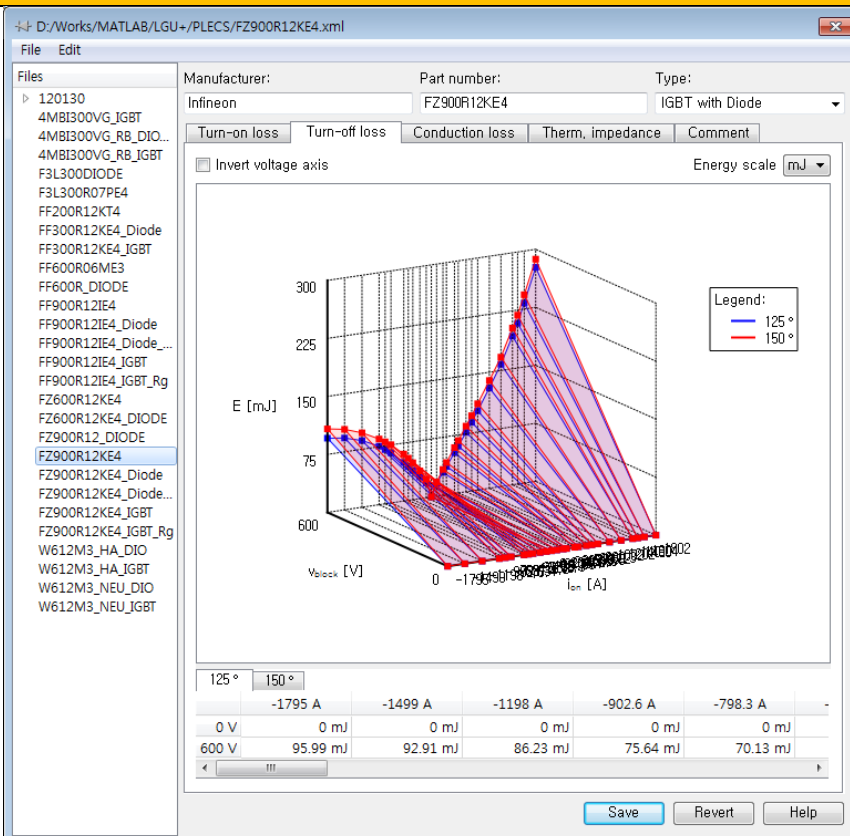
다이오드의 경우 Turn on 시 Loss를 상대적으로 무시할 수 있으므로 Turn off 시 Loss만을 고려한다.

IGBT with Diode에 사용하는 경우, 이 값을 Turn off loss에 입력하게 되는데, 음의 전류 값을 가질 때 에너지 손실을 가정하여 입력하면 된다.

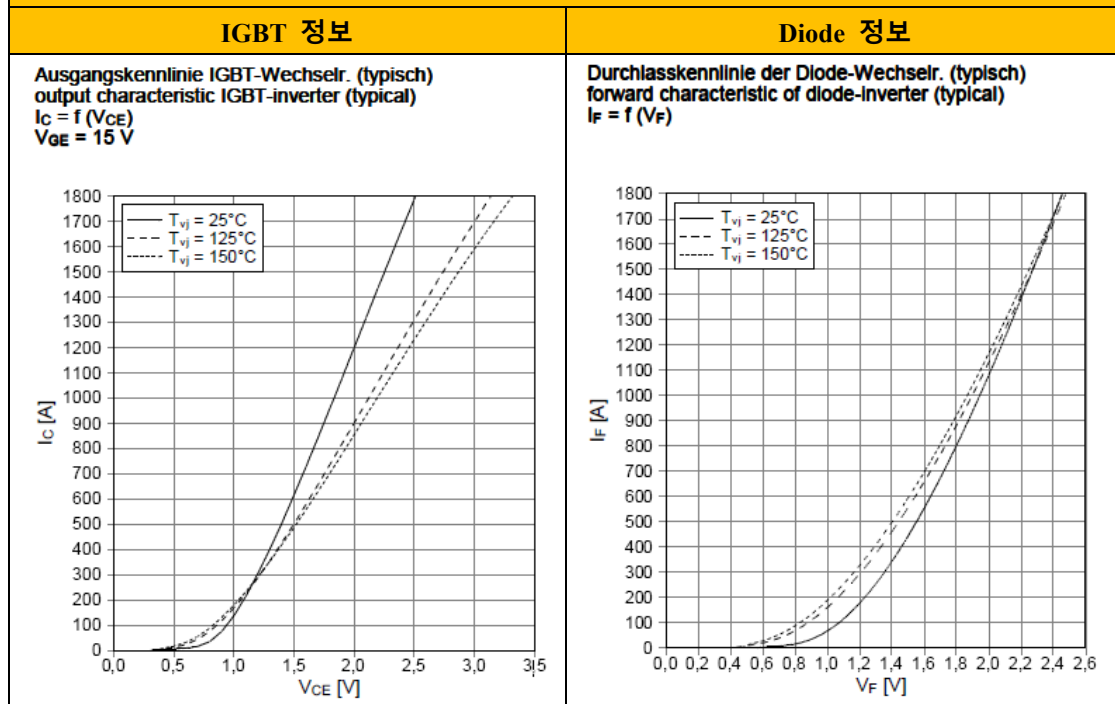
Turn-on loss의 PLECS 입력 정보 예시



Turn-off loss의 PLECS 입력 정보 예시 (IGBT with Diode)

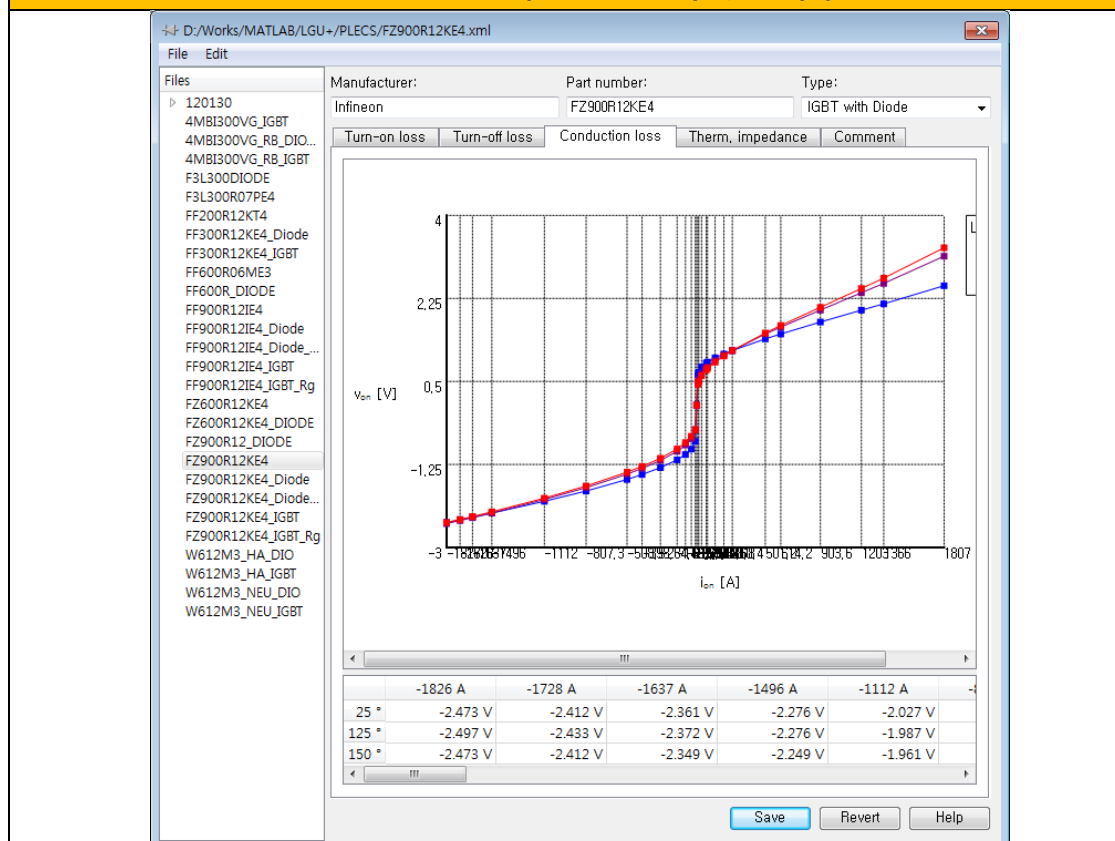


Conduction loss의 데이터 시트 정보 예시

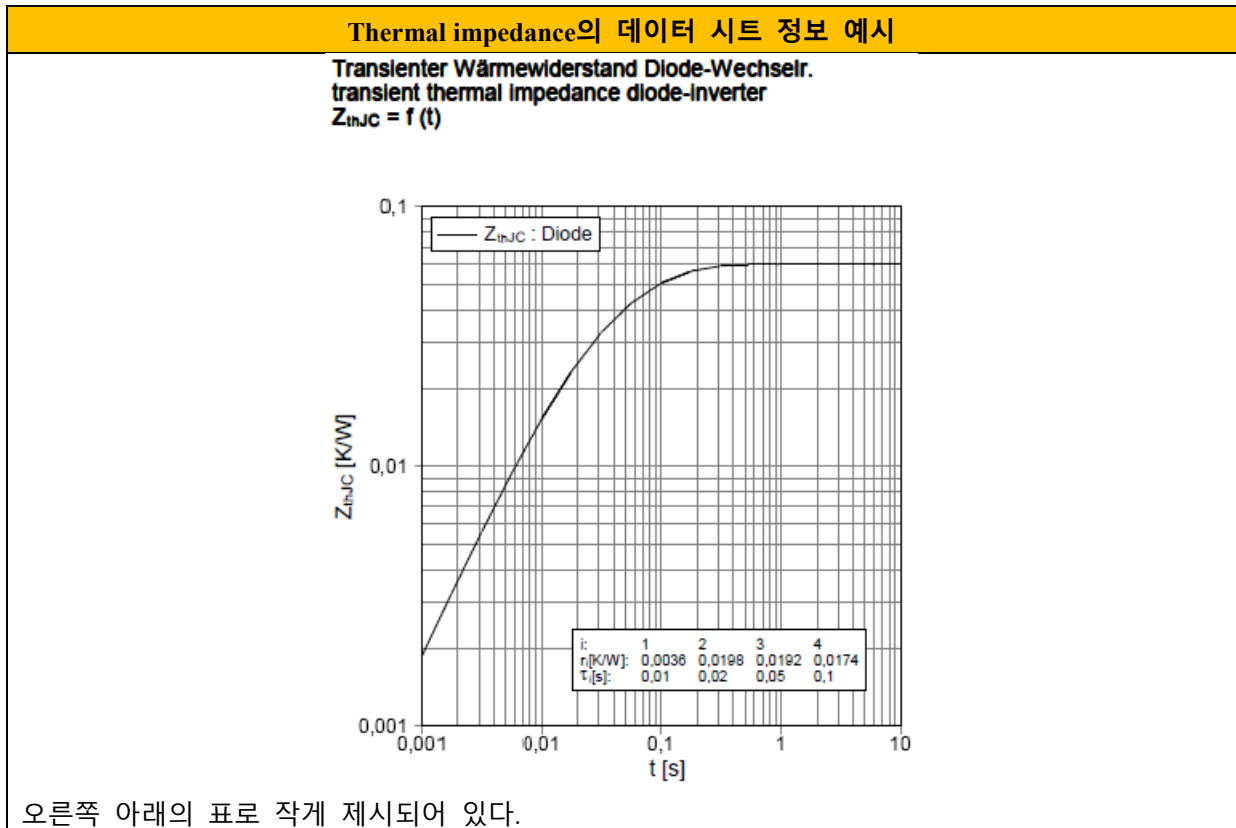


온도 T_{ab} 을 추가하고 원하는 전압-전류 정보를 입력할 수 있다. 방법은 앞에 설명한 것과 유사하다. 주의할 점은 주어진 그래프는 가로축이 전압, 세로축이 전압인데, 입력해야 하는 정보는 전류에 대한 전압 값이라는 것이다. IGBT with Diode에 입력시 IGBT는 양의 전류, Diode는 음의 전류를 기준으로 정보를 입력하면 된다.

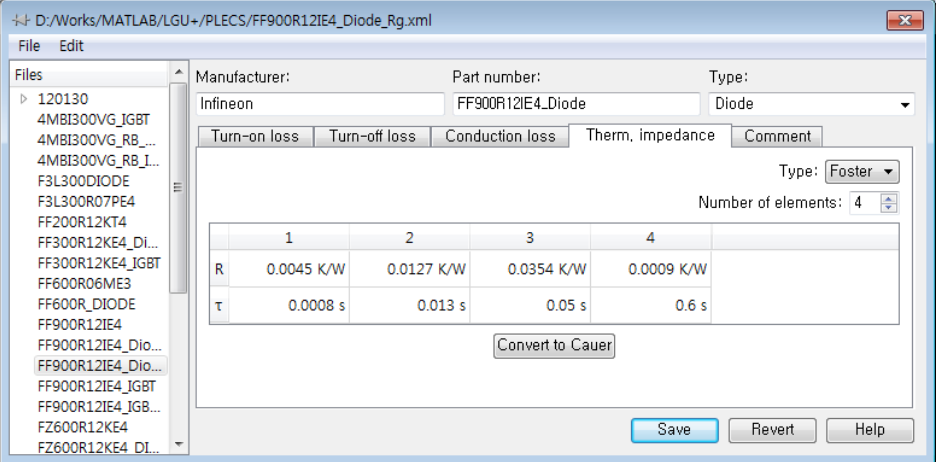
Conduction loss의 PLECS 입력 정보 예시



- 온도 탭을 추가하여 온도에 따른 변화 역시 입력할 수 있다.



Thermal impedance의 PLECS 입력 정보 예시



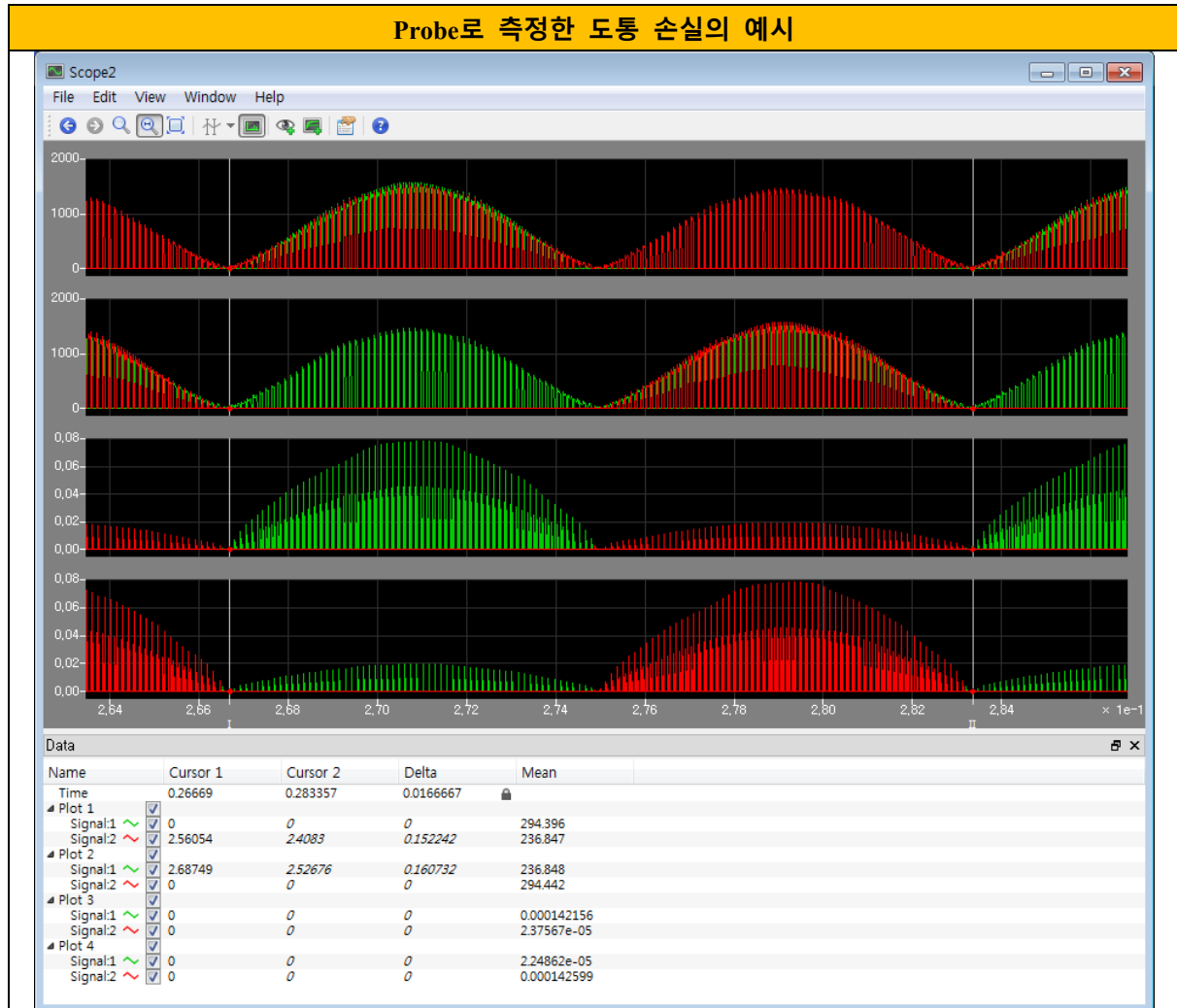
	1	2	3	4
R	0.0045 K/W	0.0127 K/W	0.0354 K/W	0.0009 K/W
τ	0.0008 s	0.013 s	0.05 s	0.6 s

제시된 정보를 입력할 때, Type에 유의하도록 한다.
Type에 대해서는 PLECS 매뉴얼에도 설명되어 있다.
역시 단위에 주의해서 입력하여야 한다.

- 입력한 정보는 Window > Thermal Library Browser 메뉴를 선택하여 확인할 수 있다.

V. 시뮬레이션 – 손실 계산

도통 손실의 경우, Probe에서 한 주기 동안 평균(mean)을 통해 얻을 수 있다.



스위칭 손실의 경우, MATLAB 상의 Work space로 읽어 들여 한 주기 동안의 값만 추출한 후, 그 값을 평균낼 수 있다.

MATLAB Code 예시

```

Top = 1/60; % operating period
Nend = length(t1); % last point of sw loss
tStart = simTime - Top; % starting time of loss calculation
Nstart = Nend; % start point of sw loss
while t1(Nstart) > tStart
    Nstart = Nstart - 1; % find start point of sw loss
end
SWsum=0; % initialization of switching loss
for m = Nstart:Nend
    SWsum = SWsum + Jh(m);
end
Lsw = SWsum/Top % averaging of switching loss for high IGBT
    
```