

# 열 결합 효과를 고려한 전력반도체 모듈의 열 모델링 방법

황준성, 최의민  
서울과학기술대학교

## Thermal modeling of power module considering thermal coupling effect

Jun-Seong Hwang and Ui-Min Choi  
Seoul National University of Science and Technology

### ABSTRACT

전력반도체 모듈에는 여러 개의 반도체 소자가 배치되며 개별 소자들의 발열은 주위 다른 소자들의 집합 온도에 영향을 준다. 그러나 기존 Foster 모델 기반 전력반도체 소자의 열 모델링 방법에서는 이 영향들이 고려되지 않았다. 본 논문에서는 전력반도체 모듈 내 전력반도체 소자들 간의 열 결합 (thermal coupling)을 고려한 전력반도체 소자의 열 모델링 방법을 제안한다.

### 1. 서 론

인버터를 구성하는 소자 중에서 전력반도체 소자는 신뢰성이 취약한 소자 중 하나이며, 전력반도체의 신뢰성은 이의 집합 온도 변화와 밀접한 연관이 있다.[1] 따라서 이를 고려한 전력변환 장치의 적합한 설계를 위해서는 정확한 열 모델링 방법이 요구된다. 상용화된 전력반도체 모듈에는 대개 여러 개의 반도체 소자가 배치되며, 개별 소자들의 발열은 모듈 내에서 주변의 다른 소자들의 집합 온도에 서로 영향을 준다. 그러나 기존 Foster 모델 기반 전력반도체 소자의 열적 모델링은 소자 간의 열 결합은 고려되지 않았다. 본 연구에서는 3상 2-레벨 인버터의 전력반도체 모듈 내 전력반도체 소자들 간의 열 결합 (thermal coupling)을 고려하여, 전력반도체 소자의 개선된 열적 모델링 방법을 제안한다.

### 2. 본 문

#### 2.1 기존 Foster 모델 기반 열 모델링 방법

그림 1은 기존에 사용되는 열적 모델링 방법인 Foster 모델의 열적 회로이다. Foster 모델은 병렬로 연결된 RC 회로의 직렬로 구성된다. 3상 2-레벨 인버터의 전력반도체 모듈 내 전력반도체 소자로는 IGBT와 다이오드가 있는데, 이 소자들의 전력 손실  $P_{loss}$ 는 스위칭 손실과 도통 손실의 합이다.  $T_j$ 는 전력반도체 소자의 집합 온도이며,  $T_c$ 는 케이스의 온도,  $T_a$ 는 외부 대기 온도이다. Foster 모델에서 전력반도체 소자의 열적 임피던스는 다음과 같다.[2]

$$Z_{th(j-c)}(t) = \sum_{i=1}^n R_i (1 - e^{-t/\tau_i}), \text{ where } \tau_i = R_i C_i \quad (1)$$

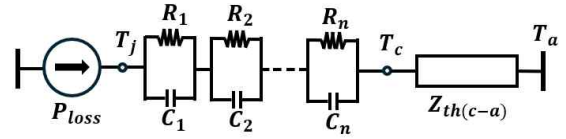


그림 1 전력반도체 소자의 열 모델  
Fig. 1 Thermal modeling of power device based on Foster model

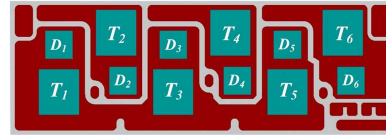


그림 2 전력반도체 모듈 내의 전력반도체 소자 배치도  
Fig 2 Device layout in power semiconductor module

(1)에서  $Z_{th(j-c)}$ 는 전력반도체 소자의 집합부와 케이스 사이의 열적 임피던스이며,  $\tau_i$ 는 RC 병렬 회로의  $i$ 번째 파라미터로 결정된다.

$$T_j(t) = P_{loss}(t) \cdot Z_{th(j-c)}(t) + P_{loss,module}(t) \cdot Z_{th(c-a)} + T_a \quad (2)$$

Foster 모델 기반 열적 모델링을 통해 얻은 전력반도체 소자의 집합 온도는 (2)와 같다. 이때  $P_{loss,module}$ 은 전력반도체 모듈의 전력 손실이며,  $Z_{th(c-a)}$ 는 케이스 외부 대기 온도 사이의 열적 임피던스이다.

#### 2.2 소자 간 열 결합 효과를 고려한 열 모델링 방법

그림 2는 전력반도체 모듈 내에서의 전력반도체 소자의 배치도이며, 모듈 내에서  $T$ 는 IGBT,  $D$ 는 다이오드를 나타낸다. 전력반도체 소자의 집합 온도는 이의 주변 전력반도체 소자의 전력 손실로 발생하는 발열 효과의 영향을 받는다. 그림 3은 전력반도체 소자  $Q$ 의 발열 효과를 고려한 전력반도체 소자  $P$ 의 Foster 모델 기반 열적 회로이며, 제안하는 열적 모델링 방법을 통해 얻은 전력반도체 소자  $P$ 의 집합 온도는 (3)과 같다.

$$T_{j-P}(t) = P_{loss}(t) \cdot Z_{th(j-c)}(t) + P_{loss,module}(t) \cdot Z_{th(c-a)} + T_a + P_{loss-Q}(t) \cdot Z_{th-coupling(P-Q)}(t) \quad (3)$$

$$Z_{th-coupling(P-Q)}(t) = \sum_{i=1}^n R_{i,th-coupling(P-Q)} (1 - e^{-t/\tau_{i,coupling(P-Q)}})$$

$$\tau_{i,coupling(P-Q)} = R_{i,coupling(P-Q)} C_{i,coupling(P-Q)}$$

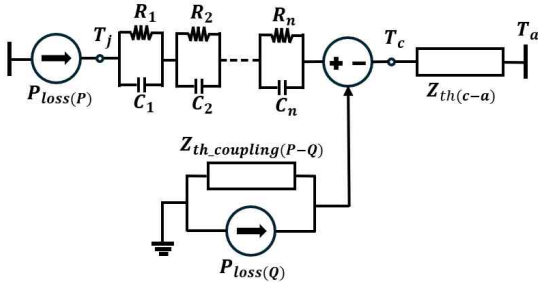


그림 3 열 결합 효과가 반영된 열 모델  
Fig 3 Thermal modeling considering thermal coupling effect

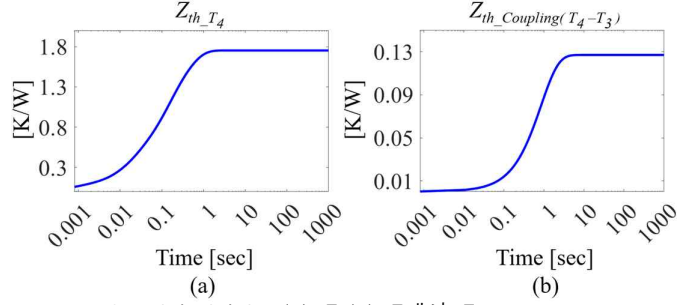


그림 4 열적 임피던스 (a)  $T_4$  (b)  $T_3$ 에서  $T_4$   
Fig 4 Thermal impedance (a)  $T_4$  (b) From  $T_3$  to  $T_4$

표 1 전력반도체  $T_4$ 의 열 임피던스  
Table 1 Transient thermal impedance of  $T_4$

$i$	1	2	3	4
$R_{th}$ [K/W]	0.7994	0.6248	0.2704	0.0573
$\tau$ [sec]	0.3645	0.0997	0.0151	0.0007

전력반도체 모듈 내 전력반도체 소자에 대한 열 결합 효과는 이를 발생시키는 주변 전력반도체 소자의 개수와 위치 및 이들의 발열 효과에 따라 그 정도가 다르다. 이러한 열 결합 효과는 Foster 모델 기반의 RC 병렬 회로로 열적 모델링이 되며, 다수의 전력반도체 소자에 의한 열 결합 효과는 중첩의 원리를 이용하여 제안하는 모델을 적용할 수 있다.

### 2.3 시뮬레이션 결과

3상 2-레벨 인버터의 전력반도체 모듈을 대상으로 기존의 모델링 방법과 제안하는 모델링 방법을 적용하여 전력반도체 소자  $T_4$ ,  $D_4$ 에 대한 접합 온도 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션의 파라미터는  $V_{DC} = 400$  V,  $I_{out} = 30$  A,  $f_{sw} = 10$  kHz,  $R_{Load} = 3$   $\Omega$ ,  $L_{Load} = 5$  mH,  $f_{out} = 60$  Hz이다.

전력반도체 소자  $T_4$ 에 대해 열적 모델링을 하면 이의 열적 임피던스는 Foster 모델 기반의 RC 병렬 회로 4개의 직렬 형태로 구성되며, 표1 과 같다.  $T_4$ 에 열 결합 효과로 접합 온도에 영향을 주는 전력반도체 소자는  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $T_5$ ,  $T_6$ 와  $D_2 \sim D_6$ 가 있다. 이들의 열 결합 효과를 고려한  $T_4$ ,  $D_4$ 의 접합 온도는 (3)과 같이 중첩의 원리를 적용하여 얻을 수 있다. 이들 중  $T_4$ 에 대한  $T_3$ 의 열 결합 효과를 열적 모델링하면, Foster 모델 기반의 단일 RC 병렬 회로가 된다.

그림 4는  $T_4$ 의 열적 임피던스  $Z_{th,T4}$ 와  $T_4$ 에 열 결합 효과를 미치는 전력반도체  $T_3$ 에 의한 열적 임피던스  $Z_{th,coupling(T4-T3)}$ 를 보여준다. 이때, 열 결합 효과는 단일 RC 병렬 회로로 열적 모델링이 되며, 이의 열적 임피던스 파라미터는  $R_{th,coupling(T4-T3)} = 0.1269$  K/W이고,  $\tau_{th,coupling(T4-T3)} = 0.8567$  sec이다.

그림 5는 열 결합 효과 고려 여부에 따른 전력반도체 소자  $T_4$ ,  $D_4$ 의 접합 온도를 보여준다. 열 결합 효과를 고려하지 않을 때  $T_4$ 의 접합 온도의 최댓값은 109.85  $^{\circ}$ C이며, 열 결합 효과를 반영했을 때 접합 온도의 최댓값은 122.34  $^{\circ}$ C으로 약 11% 증가한 것을 알 수 있다.  $D_4$ 의 경우 열 결합 효과를 반영했을 때 접합 온도는 최댓값은 81.29  $^{\circ}$ C에서 105.79  $^{\circ}$ C로 약 30% 증가하였다.

### 3. 결론

본 논문은 기존의 Foster 모델 기반의 열적 모델링 방법을

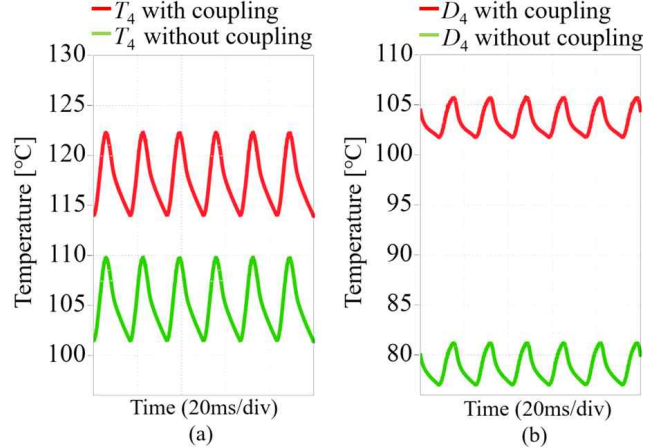


그림 5 접합 온도 (a)  $T_4$  (b)  $D_4$   
Fig 5 Junction temperature (a)  $T_4$  (b)  $D_4$

제시하고, 전력반도체 소자 간 열 결합 효과를 고려한 개선된 열 모델링 방법을 제안하였다. 전력반도체 모듈 내의 여러 개의 전력반도체 소자의 접합 온도는 주변 전력반도체 소자의 발열로 인해 영향을 받는다. 열 결합 효과를 고려한 열 모델링 방법을 적용하였을 때 기존의 열 모델링 방법과 비교하여 더 높은 접합 온도를 얻었다. 따라서 전력전자 시스템의 적합한 설계를 위한 정확한 열적 모델링을 위해서는 열 결합 효과를 고려하여야 한다.

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단-나노 및 소재기술개발사업과 교육부와 한국연구재단의 재원으로 지원을 받아 수행된 3단계 산학협력 선도 대학 육성사업(LINC 3.0)의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2024-00444649, No. 1345370639)

### 참고 문헌

[1] U. M. Choi, F. Blaabjerg and S. Jørgensen, "Study on Effect of Junction Temperature Swing Duration on Lifetime of Transfer Molded Power IGBT Modules," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 32, No. 8, pp. 6434-6443, Aug. 2017

[2] A. Volke, and M. Hornkamp, IGBT Modules : Technologies, Driver and Applications, 1st ed. Munich, Germany: Infineon Technologies AG, ch. 4, 2011