

온도에 따른 파라미터 변동을 고려한 정선 온도 추정 방법

양진규, 변성훈, 김정빈, 김영민
LS산전 전력전자연구소

Junction Temperature Estimation Method Considering Parameter Change in Accordance with Temperature

Jinkyu Yang, Sung Hoon Byun, Jeong Bin Kim, Young Min Kim
Power Electronics R&D Center, LS Industrial Systems Co., Ltd

ABSTRACT

인버터에 사용되는 전력용 반도체 소자의 정선 온도는 모듈의 보호 및 수명 예측에 중요한 영향을 미친다. 온도를 추정하기 위해 제조사에서 제공되는 데이터 시트로부터 파라미터를 찾아 입력하게 되는데, 온도, 전류 및 R_g 저항 등의 요인에 의해 이 파라미터가 변경된다. 본 논문은 온도 추정 과정에서 사용되는 파라미터에 온도에 따라 변동되는 성분을 선형화하여 추가하여 현재 온도에 맞는 파라미터를 계산해 낼 수 있는 방법에 관한 것으로, 데이터 시트로부터 미리 계산된 계수 값을 이용하여 수식적으로 온도 의존성을 반영할 수 있다. 이를 이용하여 부하 전류, 스위칭 주파수, DC Link 전압 등의 변동에 따라 정선 온도를 실시간으로 추정하였으며, iGBT의 상단에 온도 센서를 부착하여 추정 결과를 검증하였다. 본 방법을 통해 파라미터의 온도 의존성을 수식적으로 반영할 수 있으므로 파라미터를 저장하는 인버터의 데이터 저장 공간을 최소화 할 수 있다.

1. 서론

전력 변환 장치는 반도체 소자의 ON/OFF 스위칭을 이용하여 전력의 형태를 변화시킨다. 반도체 소자에 전류가 흐를 때나 ON/OFF 스위칭 동작 중 전력 손실이 발생하며 그 결과로 반도체의 접합부 온도가 상승한다. 손실이 커서 온도가 많이 상승하게 되면 전력 소자의 수명이 감소하며, 제한 온도 이상으로 증가하게 되면 소자의 파괴에 다다를 수 있다. 따라서 모듈을 사용할 때에는 모듈의 수명과 안전 사용 범위에 따라 접합부의 온도를 관리해야 한다.

전력 변환 장치 사용 중에 모듈의 온도를 직접 측정할 수 없기 때문에 일반적으로 모듈의 온도를 수식적으로 추정하는 방법을 주로 사용한다. 이는 전력 변환 장치의 전기적 파라미터로부터 모듈 제조사에서 제공하는 V_{CE}, V_F, E_{SW}, R_{th} 등을 이용하여 접합부의 가상 온도인 T_{vj}(Virtual Junction Temperature)를 수식적으로 추정하는 것이며, 모듈 제조사에서 이를 계산할 수 있는 시뮬레이션 프로그램을 제공한다. 하지만 모듈 제조사의 데이터가 비 선형적인 그래프 형태로 제공되고 각 파라미터가 온도에 따라 변화하기 때문에 온도 추정에 이를 모두 반영하지는 않는다. 또한 범용 드라이브 내에 위의 과정을 구현하기 위해서는 파라미터의 온도 변화를 모두 포함한 데이터를 내장해야 하므로 메모리 용량이 커져야 한다.

따라서 본 논문에서는 손실 계산과정에서 온도의 변화에

따라 변화하는 파라미터의 특성을 반영한 수식을 이용하여 손실을 계산하고, 이를 토대로 접합부의 온도를 추정할 수 있도록 하였다. 각 파라미터를 실제 동작 범위 내에서 선형화하고, 온도 변화에 따른 파라미터의 변화를 선형으로 근사화하여 수식에 반영하였다. 마지막으로 추정된 접합부의 온도를 실제 모듈 패키지 내부의 칩 위에 Thermo-couple를 접합하여 추정한 온도와 실제 온도를 비교함으로써 제안한 방법의 정확성을 검증하였다.

2. 접합부 온도 추정 수식

2.1 전력 손실 계산

접합부 온도의 상승은 손실 전력에 의해 발생되므로 손실 전력을 계산해야 한다. 손실 전력은 일반적으로 도통 손실과 스위칭 손실로 나눌 수 있으며 이를 수식 (1), (2)에 나타내었다. [1]

$$P_{C_IGBT} = V_{CEO} I_o \left(\frac{1}{2\pi} + \frac{m_a \cos \phi}{8} \right) + R_{CE} I_o^2 \left(\frac{1}{8} + \frac{m_a \cos \phi}{3\pi} \right) \quad (1)$$

$$P_{SW_IGBT} = (E_{on} \left[\frac{I_o}{\pi} \right] + E_{off} \left[\frac{I_o}{\pi} \right]) \cdot f_{SW} \quad (2)$$

위 수식에서 V_{CEO}는 턴 온 시의 threshold 전압, I_o는 전류의 피크 값, m_a는 modulation factor, φ₁는 전압과 전류의 위상차, R_{CE}는 전류에 따른 threshold 전압의 비율, E_{on}, E_{off}는 스위치가 ON, OFF 될 때의 스위칭 손실 에너지, f_{sw}는 스위칭 주파수를 의미한다. 위 수식에서, V_{CEO}, R_{CE}, E_{on}, E_{off}는 iGBT의 특성에 관한 값으로 일반적으로 제조사에서 제공한다.

그림 1에는 제조사에서 제공한 전류에 따른 threshold 전압의 특성을 나타냈으며, 접합부의 온도에 따라 threshold 전압이 변화하는 것을 확인할 수 있다. 이를 수식에 반영하기 위해 수식 (1)의 파라미터인 V_{CEO}, R_{CE}에 온도 의존 성분을 추가하면 식 (3), (4)와 같이 표현할 수 있다. [2]

$$V_{CEO} = (a_0 + a_1 T_j), \quad R_{CE} = (b_0 + b_1 T_j) \quad (3)$$

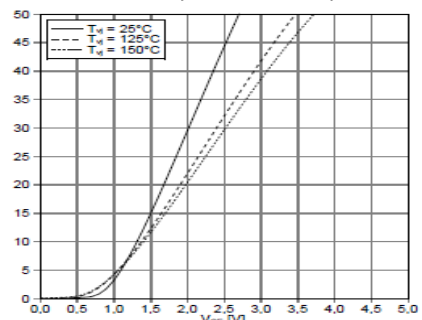


그림 1 도통 상태의 threshold 특성

$$a_0 = \frac{150 \cdot V_{CE0,25} - 25 \cdot V_{CE0,150}}{150 - 25}, \quad a_1 = \frac{V_{CE0,150} - V_{CE0,25}}{150 - 25} \quad (4)$$

$$b_0 = \frac{150 \cdot R_{CE,25} - 25 \cdot R_{CE,150}}{150 - 25}, \quad b_1 = \frac{R_{CE,150} - R_{CE,25}}{150 - 25}$$

그림 3에서 모듈의 실제 구동 범위를 기준으로 a_0 , a_1 , b_0 , b_1 을 구하여 식 (3)의 V_{CEO} , R_{CE} 를 구하고, 이를 식 (1)에 대입하면 온도 변화가 반영된 파라미터 값을 구할 수 있다. 스위칭 손실도 온도 의존성을 반영할 수 있는데 형태를 고려하여 3차 함수로 모델링을 하였으며, 이를 식 (5)에 나타내었다.

$$P_{SW_IGBT} = ((p_0 + p_1 T_j) \left(\frac{I_o}{\pi}\right)^3 + (q_0 + q_1 T_j) \left(\frac{I_o}{\pi}\right)^2 + (r_0 + r_1 T_j) \left(\frac{I_o}{\pi}\right) + (s_0 + s_1 T_j)) \cdot f_{SW} \quad (5)$$

추가로, R_g 저항, V_{dc} 의 온도 의존성을 위와 유사한 방법으로 반영할 수 있다.

2.2 접합부 온도 추정

접합부 온도는 추정된 손실과 제조사에서 제공하는 열 저항 값을 곱하여 계산한다. 온도에 따라 파라미터가 달라지므로, 특정 시간에서 추정 온도를 계산한 후 다음 주기에서는 변동된 파라미터로 다시 추정 온도를 계산해야 하며 이를 그림 2에 나타내었다. 이 과정을 반복하여 최종적으로 포화된 접합부 온도를 계산하게 된다.

3. 추정 및 실측 온도의 비교 시험

본 과정을 검증하기 위해 인피니언의 IGBT 모듈을 이용하여 인버터를 구동하였으며, 추정값과 비교하기 위해 그림 3과 같이 모듈의 상단에 Thermo-couple을 부착하여 실제 온도를 측정하였다. 대조군을 출력 전류 12A, 스위칭 주파수 6kHz, 입력 전압 400V, 출력 주파수 60Hz로 정하였으며, 각각을 변화시켜 가며 추정된 접합부 온도와 실제 측정된 온도와의 차이를 비교하였다. 히트 싱크의 영향에 따라 결과 차이 발생을 제거하기 위해 base plate의 케이스 온도를 실제 측정하여 이를 기준으로 하였으며, 주변 온도에 따른 변화도 비교하였다.

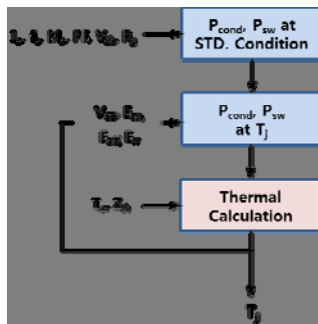


그림 2 접합부 온도 계산 과정

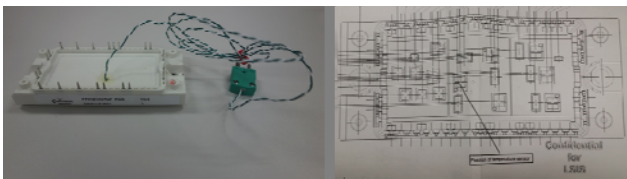


그림 3 Thermo couple 부착된 IGBT 모듈

표 1 비교 시험 결과

변동 조건	기준(Case)온도(°C)	추정 온도(°C)	실측 온도(°C)
12A	103.7	115.085	115.7
15A	100.6	116.09	115.4
18A	97	116.818	115.6
3kHz	105.9	115.155	115.8
6kHz	103.7	115.085	115.7
9kHz	101.5	115.057	115.2
12kHz	99.9	115.66	115.4
350V	104.3	115.167	115.4
400V	103.7	115.085	115.7
450V	103.3	115.081	115
30Hz	103.8	113.972	114.7
60Hz	103.7	115.085	115.7
낮은 주위 온도	70.5	81.09	79.5
높은 주위 온도	103.7	115.085	115.7

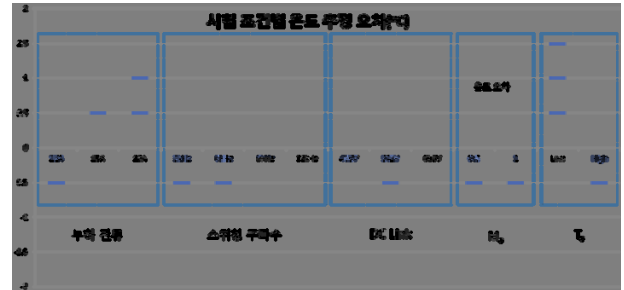


그림 4 시험 조건별 추정 온도 오차

표 1에는 시험 조건별 기준 온도, 추정 온도와 실제 측정된 온도를 나타내었으며, 각각에 대한 오차를 그림 4에 나타내었다. 이 결과로부터 수식적으로 추정한 온도와 실제 측정된 온도의 차이는 최대 1.6°C 이내로 대부분의 시험 조건 변동에서 실제 값과 유사하게 온도를 추정할 수 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 반도체 소자의 접합부 온도 추정을 위해 사용되는 파라미터의 온도 변화를 수식에 반영하였으며 이를 검증하기 위해 IGBT 칩 위에 thermo-couple을 부착하여 온도를 측정하였다. 다양한 조건에서의 시험 결과에서 추정한 온도와 실제 측정된 온도의 차이가 크지 않음을 확인하였으며 결과적으로 제안한 방법의 타당성을 검증하였다. 본 연구의 결과로 파라미터의 온도 변화를 수식에 반영할 수 있으므로, 각 온도에 따른 특성 그래프를 모두 가지고 있을 필요 없이 사전에 계산된 계수 값만으로 온도 추정 알고리즘을 구현할 수 있어 메모리 용량을 절감시킬 수 있다.

참고 문헌

[1] Arendt Wintrich, Ulrich Nicolai, Werner Tursky, Tobias Reimann, *Application Manual Power Semiconductors* SEMIKRON International GmbH, 2011.

[2] W. Rui, W. JiaLiang, H. Jian, C. Zhongyuan, W. Quanqing, J. Na, W. Chenghao, "A Power Loss Calculation Method of IGBT Three-Phase SPWM Converter," *Proceeding of ISDEA*, pp. 1180-1183, Hainan, 2012