# IGBT의 도통상태 전압강하를 이용한 접합부 온도의 실시간 추정

김용석 설승기
서울대학교 전기공학부

# On-Line Estimation of IGBT Junction Temperature Using On-State Voltage Drop

Yong-Seok, Kim Seung-Ki, Sul
School of Electrical Engineering Seoul National University

**Abstract** - 최근 전력용 반도체 소자로서 많이 사용되고 있는 IGBT를 이용한 시스템의 제작시 신뢰성의 향상을 위해 시스템 운전시 정확한 접합부 온도를 순시적으로 추정할 필요가 있다. 기존의 소자 온도 추정 방법들은 시스템 운전시의 순시적 추정이 아니라는 점과 정확한 접합부 온도가 아니라는 점이 문제가 된다. 본 논문에서는 시스템 운전시의 접합부 온도를 순시적으로 정확하게 추정할 수 있는 방법을 제시하여 경제적으로 시스템의 효율과 신뢰성을 높일 수 있도록 하였다.

## 1. 서 론

IGBT는 게이트 구동이 용이하고 적은 도통 손실로 고전압, 대전류의 고속 스위칭이 가능하다는 장점을 가지고 있기 때문에 이를 이용한 전력 제어기기가 많은 산업분야에 널리 사용되고 있다.

IGBT를 이용한 전력 제어기기의 제작시에 스위칭 소자의 발열 문제는 신중히 고려해야만 할 대상이다. 높은 신뢰성의 확보와 경제성, 그리고 시스템 효율의 극대화 측면에서 볼 때, 시스템의 제작 및 동작시에 정확한 IGBT 접합부 온도를 추정할 수 있다면 그 정보는 시스템의 신뢰성 뿐만 아니라 상당히 많은 부분에 유용하게 사용될 수 있다.

기존의 전력 제어기기에서는 방열판에 온도 센서를 부착하여 방열판의 온도를 추정한 뒤 이로부터 스위칭 소자의 접합부 온도를 추정해내는 방식이 널리 사용되어왔다. 그러나 방열판의 열역학적 모델링이 오차가 있거나 그 상수가 변화하는 경우 정확한 접합부 온도를 추정하는 것은 한계가 있고, 이로 말미암아 최적화되지 못한 비효율적이고 비경제적인 방열 설계가 이루어지게 된다. 특히 하나의 방열판에 여러개의 스위칭 소자를 동시에 부착하는 경우 각 소자의 국부적인 발열을 감지할 수 없기 때문에 특정 소자의 발열이 전체 시스템에 영향을 미치게 되는 것을 피할 수 없는 단점이 있다.

이러한 단점을 해결하기 위해 최근에 제시된 방법 중 Zeljko Arbanas가 제시한 방법[1]에 의하면 전류가 도통시 전압강하에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 부하전류가 영인 시점에서의 도통시 전압강하를 측정하였고 기준 온도에서의 측정값을 바탕으로 온도에 의한 도통시 전압강하 변화를 선형화하였는데, 도통시 전압강하는 온도의 함수 일 뿐 아니라 흐르는 전류의 함수이기도 하며 전류의 양이 적을 수록 선형화할 때의 기울기가 매우 작아지므로 측정시에 문제가 발생하며 또한 전류가 흐를 때의 온도 변화를 측정할 수 없는 단점이 있다.

이에 본 논문에서는 온도에 따라 도통상태에서의 전압강하가 변하는 IGBT의 특성을 이용하여 IGBT의 접합부 온도를 기존에 제시된 방법보다 정확하게 추정하며, 또한 시스템을 제작하기 이전에 소자의 특성 추정 차원에서 실시하는 온도 추정이 아닌, 시스템 동작 시에 변하는 IGBT의 접합부 온도 변화를 정확하게 추정하여 IGBT를 이용한 시스템의 제작,운전시 유용한 정보로 사용될 수 있도록 하였다.

## 2. IGBT의 온도 특성

IGBT는 소자 내부의 각 부분에서 전력손실에 의한 열을 발생하는 열역학적 구조를 가지고 있다. 그림 1에 이를 등가회로로 나타내었다.[3]

IGBT의 콜렉터-에미터간 도통상태 전압강하 $V_{ce(sat)}$를 그림 1을 바탕으로 전기적-열적으로 해석하여 보면 매우 복잡한 비선형 방정식이 되는데[2][3], 이것을 바탕으로 시뮬레이션을 하여보면 그림 2와 같은 관계를 갖는다.

그림 2에서, 도통상태 전압강하는 비선형적 관계를 가지지만 오차의 범위를 일정 수준으로 지정한

다면 복잡한 비선형 방정식은 (1)과 같이 근사화 될 수 있다.

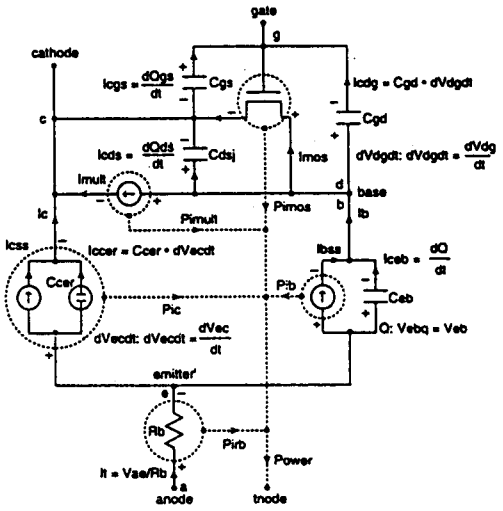



그림 1. IGBT의 전기적-열적 등가회로.

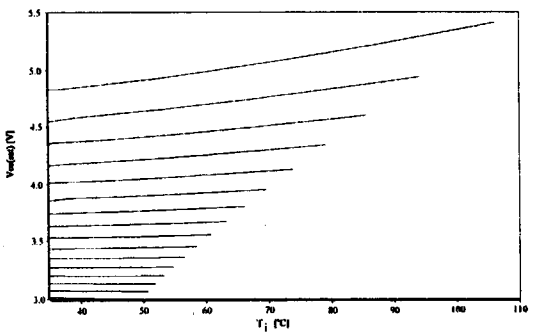



그림 2. $V_{ce(sat)}$의 비선형적 특성 곡선.

$$V_{ce(sat)}(T_j, I_c, V_{ge}) = V_{ceo} + \Delta V_{ceo}(T_j - T_{jo}) + I_c[r_o + \Delta r_o(T_j - T_{jo})] + a/\Delta V_{ge} \quad (1)$$

여기서 $T_j$ : 접합부 온도

$I_c$ : 콜렉터 전류

$V_{ge}$ : 게이트-에미터간 전압

(1)을 시뮬레이션하여 그림 3에 나타내었다.

(1)에서 $V_{ce(sat)}$는 콜렉터-에미터간을 흐르는 전류, 게이트-에미터간의 전압, IGBT 접합부의 온도에 대한 함수임을 알 수 있다. 만일 전류와 게이트-에미터간 전압을 일정하다고 놓는다면 (1)은 다음과 같이 온도 변화만의 함수가 된다.

$$V_{ce(sat)}(T_j, I_c, V_{ge}) = V_{ceo}' + \Delta V_{ceo}(T_j - T_{jo}) \quad (2)$$

일반적으로 게이트에 인가하는 전압은 정상상태

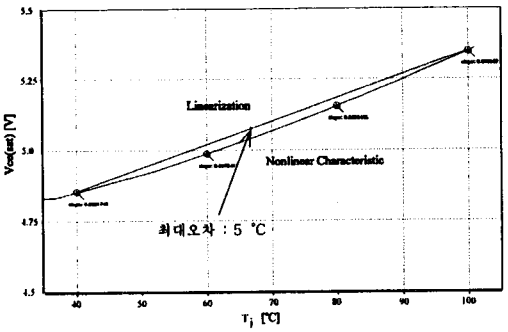



그림 3 선형화한 $V_{ce(sat)}$의 특성 곡선

에서 일정하므로 도통상태일 때 흐르는 전류를 제어기에서 측정하고 있다면 (2)에 의해 시스템의 운전 시에 $V_{ce(sat)}$를 측정하여 IGBT의 접합부 온도변화를 실시간으로 추정할 수 있다.

## 3. 시뮬레이션

전술한 내용을 바탕으로 Saber를 사용하여 전기적-열적 시뮬레이션을 하였다. 그림 4에 시뮬레이션 시스템의 구성을 나타내었다.

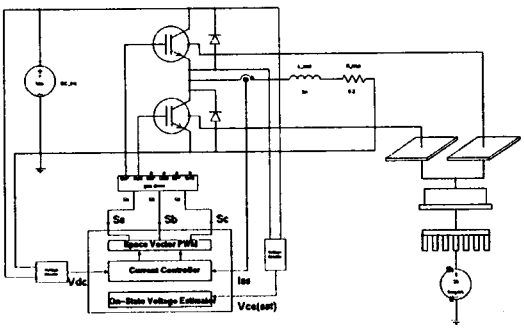



그림 4. 시뮬레이션 시스템의 구성.

시스템의 제어기는 디지탈 제어를 하도록 설계하였으며 부하로 흐르는 전류와 직류단 전압을 제어기로 궤환하여 IGBT로 흐르는 전류가 일정하도록 제어하였다. 또한 하나의 방열판에 소자들을 부착하였으며 온도를 조절할 수 있도록 하였다.

시뮬레이션 결과를 나타낸 그림 5는 5 kHz의 스위칭 주파수로 일정 전류제어를 할 때 IGBT의 콜렉터-에미터 양단 전압을 접합부 온도에 따라 나타낸 것이다. 시뮬레이션 결과 콜렉터로 흐르는 전류와 게이트-에미터간 전압을 알고 있다면 IGBT의 도통상태 전압강하를 이용하여 시스템 운전 시의 IGBT 접합부 온도를 추정할 수 있음을 알 수 있었다.

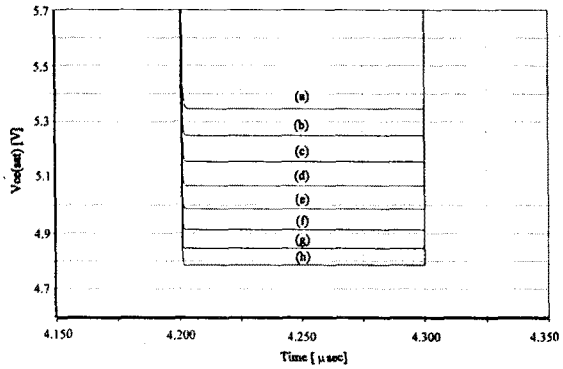


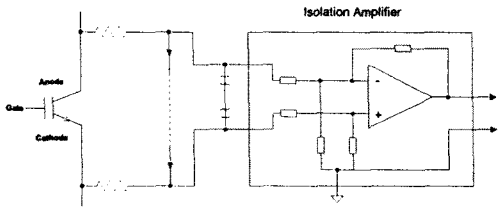

그림 5. 온도에 따른 $V_{ce(sat)}$.
(a)100°C (b)90°C (c)80°C (d)70°C (e)60°C (f)50°C
(g)40°C (h)30°C

## 4. 실험 결과

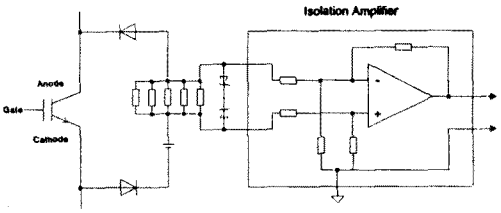
### 4.1 도통상태 전압의 측정

IGBT의 콜렉터와 에미터 양단간은 도통시에는 수 볼트 이하의 낮은 전압이 인가되는 반면, 역저지 상태일 때는 도통상태의 수십,수백배에 해당하는 고전압이 인가되므로 시스템의 운전시에 도통상태의 전압강하만을 측정하는 데는 많은 어려움이 있다. 역저지 상태일 때의 고전압을 효과적으로 차단하여 측정장치와 제어기에 영향을 미치지 않으면서 도통상태의 전압강하만을 정밀하게 측정하여 제어기로 전달하기 위하여 그림6과 같은 회로를 제안하였다.

그림 6(a)는 IGBT 양단에 걸리는 전압이 300V 이하일 때 사용되는 측정장치로서 IGBT가 역저지 상태 일때는 측정장치로 전류가 흐르므로 다이오드 양단간 저항을 수십 kΩ 정도로하여 전류를 제한하고 도통상태일 때에는 IGBT의 도통상태 전압강하가 다이오드의 전압강하보다 작도록하여 다이오드 양단에 IGBT의 도통상태 전압강하가 반영되도록 하였다. 그러나 IGBT 양단에 걸리는 전압이 300V를 넘어가게 되면 역저지 상태일 때 측정 장치로




(a)




(b)
그림 6. 도통상태 전압강하 측정회로.
(a)저압용(300V이하) (b)고압용(300V이상)

흐르는 전류가 커지는 문제점이 발생한다. 전류량을 줄이기 위해 저항값을 크게하면 Isolation-Amp.의 입력 저항에 영향을 미치므로 그림 6(b)와 같은 측정장치를 고압용으로 제안하였다. 고압용 측정장치는 IGBT가 역저지상태일 때 다이오드가 전압을 역저지하며 도통상태일 때는 측정장치의 직류 전원이 IGBT의 도통상태 전압강하를 이기고 전류가 흘러 저항 양단에 인가되는 전압을 측정하도록 하였다.

두 회로 모두 제어장치와의 절연을 위해 Isolation Amplifier를 사용하여 제어장치로 전압 정보를 전달하였다.

### 4.2 실험 시스템 구성

실험 시스템의 구성도와 사용된 IGBT의 사양을 각각 그림 7과 표1에 나타내었다.

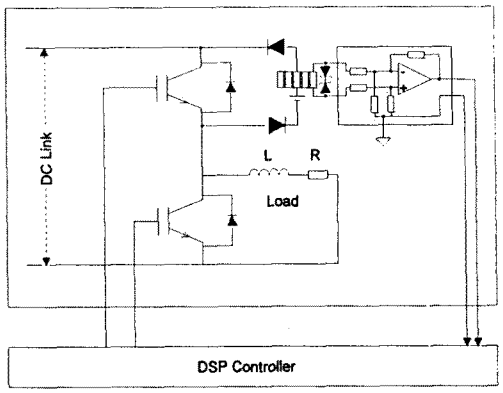



그림 7. 실험 시스템 구성도.

Semikron사의 SKiiP을 사용하여 2상한 쵸퍼를 구성하였으며 측정장치로부터 나오는 도통상태 전압강하 신호를 DSP320C31 제어장치로 전달하였다.

실험장치중 소자 부분을 항온기에 넣어 온도를 일정하게 한 후 일정한 부하 전류와 게이트 구동 전압을 유지하여 온도에 따른 IGBT의 도통상태 전

압강하를 측정하였다.

표 1. 실험에 사용한 IGBT 사양

| 형 명 | SKiiP402GB120 |
|---|---|
| 최 대 전 압 | 1200V |
| 최 대 전 류 | 400A |
| 도통상태전압 | 3.15V($I_c$=400A,$T_j$=25°C) |

스위칭 주파수는 5 kHz이며 부하로는 3mH의 인덕터와 0.272Ω의 저항을 사용하였다.

실험 결과를 바탕으로 선형화를 하였다. 오차의 범위는 최대 5 °C로서 기존의 방열판 부착방식의 오차인 10 °C보다 2배가 향상되었다. 또한 구간별로 선형화를 하게되면 오차의 최대치는 5 °C이하로 줄일 수가 있어 실시간으로 접합부 온도의 정확한 추정이 가능하였다.

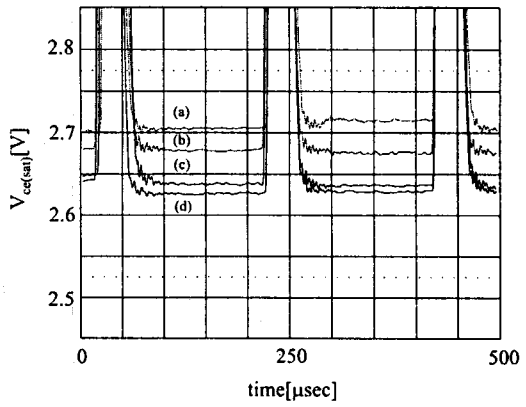



그림 8. 온도에 따른 $V_{ce(sat)}$의 변화.
(a) 72 °C (b) 59 °C(c) 50 °C (d) 39 °C
(부하전류 200A,게이팅 전압 15V)

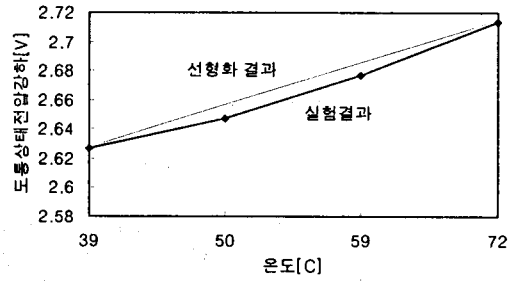



그림 9. 선형화 결과.

## 5. 결 론

본 논문에서는 IGBT의 도통상태 전압강하가 온도에 따라 변화하는 특성을 이용하여 시스템 운전시의 접합부 온도를 실시간으로 추정하는 방법을 제시하였다. 본 논문에서 제시한 온도 추정 방식은 반도체 소자 제작사가 제작과정에서 직접 온도 센서를 부착하는 방식이나 시스템 제작시에 방열판에 온도센서를 부착하는 방식과는 달리 이미 제작된 소자의 게이트 구동 회로에 간단하게 첨가 할 수 있는 장점이 있으며 기존의 방식에 비해 IGBT 접합부 온도 추정의 정밀도가 높고 시스템 운전시의 실시간 추정이 가능하므로 방열 설계를 최적화 할 수 있을 뿐만 아니라 하나의 방열판에 여러 소자를 부착하여 사용하더라도 각 소자의 발열 상황을 순시적으로 감시할 수 있어 한 소자의 국부적 발열이 전체 시스템의 동작에 영향을 미치는 것을 최소화 할 수 있는 장점이 있다. 이를 시뮬레이션과 실험을 통해 검증하였다.

## 참 고 문 헌

[1] Zeljko Arbanas, "High Power Density 1 MW Motor Inverter," IEMDC, ppWB1-2.1~2.2, 1997.

[2] A.R. Hefner,JR., "Analytical Modeling of De-vice-Circuit Interactions for the Power IGBT," IEEE Trans. on Industry Applications, Vol.26, No.6, pp995-1005, 1997.

[3] A.R. Hefner,JR., "A Dynamic Electro-Thermal Model for the IGBT," IEEE Trans. on Indust-ry Applications, Vol.30, No.2, pp394-405,1994.