

# 인버터 열모델을 이용한 하이브리드 차량 성능 분석

남동진, 한대웅, 강구배, 민병순, 김호기  
현대자동차

## HEV Performance Analysis Using Inverter Thermal Model

Dong-Jin Nam, Dae-Woong Han, Gu-Bae Kang, Byung-Soon Min, Ho-Gi Kim  
Hyundai Motor Company

### Abstract

3상 인버터의 PWM 구동시 인버터 파워모듈의 IGBT와 Diode에서는 도통 손실 및 스위칭 손실이 발생하며 이러한 손실은 소자의 정선 온도를 증가시킨다. 하이브리드 차량(HEV)의 경우 다양한 주행 조건에서 IGBT와 Diode가 제한 온도를 초과하지 않도록 해야 한다. 본 연구에서는 순시 전압 및 전류에 대한 3상 PWM 인버터의 손실을 계산하고 열모델을 통해 소자의 온도를 파악함으로써 하이브리드 차량의 성능 예측에 활용하였다. 열모델은 파워모듈 각 상의 IGBT와 Diode 사이의 상호 열전달을 고려하였으며 시험 결과와 시뮬레이션 결과 비교를 통해 열모델의 타당성을 살펴보았다. 제안된 모델을 통해 다양한 주행 조건에서 하이브리드 차량의 성능 분석을 실시하였다.

### 1. 서론

하이브리드 차량의 교류모터를 구동하기 위해서 고전압 배터리의 직류전압을 교류로 변환하는 인버터(Inverter)가 사용된다. 인버터는 파워모듈(Power Module), 커패시터, 전류센서, 제어보드로 구성되어 있으며, 특히 IGBT와 Diode의 반도체 소자들로 구성된 파워모듈에서 PWM스위칭을 통해 직류에서 교류로 전력변환이 이루어진다. 이 과정에서 파워모듈을 통해 흐르는 전류는 파워모듈 내 스위칭 소자에서 손실(Power Loss)을 발생시켜 온도를 상승시킨다. 소자들의 정선(Junction)온도가 크게 상승할 경우 소자의 파괴를 일으켜 인버터 고장의 원인이 되므로 하이브리드 차량의 주행상태에 따라 스위칭 소자의 온도가 일정 온도 이상 상승하지 않도록 제한할 필요가 있다.

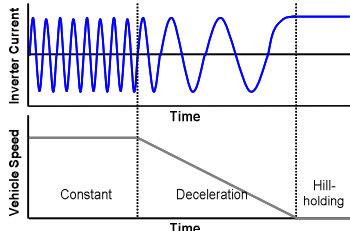


Fig.1. 차량 주행조건에 따른 인버터 전류

Fig.1은 하이브리드 차량의 속도와 인버터 출력전류 사이의 관계를 보여주는 것으로, 일정 토크 및 속도로 주행하는 차량이 경사로에 진입하여 등판 중 감속되어 정지하는 힐-홀딩 순간까지를 나타낸다. 이 경우 모터 감속에 따라 전류 주파수도 감소하여 힐-홀딩 상태에서는 일정 전류가 흐르는데 일반 주행 상태보다 전류 실효치가 커져 소자 온도가 제한 온도를 초과할 수 있음을 보여준다.

본 논문에서는 차량 운전조건에 따른 3상 전류를 전류

맵을 통해 추출한 후 IGBT와 Diode 손실모델을 이용하여 파워모듈 손실을 계산하였으며, 열저항과 열용량으로 이루어진 인버터 열모델을 통해서 파워모듈 스위칭 소자의 정선온도와 베이스플레이트(Baseplate) 온도를 예측하는 방법으로 하이브리드 차량의 성능을 분석하였다.

### 2. 인버터 손실 및 열모델

#### 2.1 파워모듈 손실 계산

파워모듈의 손실은 내부 반도체 소자 즉, IGBT 및 Diode에 흐르는 전류를 이용하여 계산할 수 있으며, 일반적으로 인버터 정상상태 운전에서는 전류의 한 주기에 대한 평균손실로 표현 할 수 있고 과도상태에서는 전류의 변화를 실질적으로 반영하기 위하여 순간손실을 적용한다.

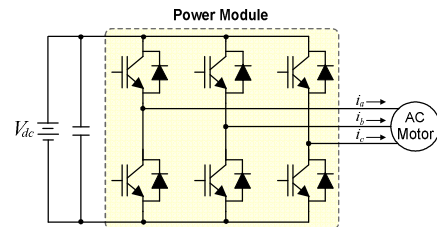


Fig.2 인버터시스템 구성도

Fig.2는 인버터 구성도를 나타내며 점선으로 표시된 부분은 파워모듈을 나타낸다. 전력변환 과정에서 소자에 전류가 흐르면서 발생하는 손실은 IGBT와 Diode에 대해 각각 도통 손실과 스위칭 손실로 구분된다.

본 연구에서는 각 소자별 손실 및 온도를 예측하기 위하여 실시간으로 계산된 인버터 3상전류를 이용하여 파워모듈 내부의 U, V, W 상 Top/Bottom의 IGBT와 Diode 총 12개의 소자에 대하여 각각 손실을 계산하였다.

$$P_{cond,IGBT}(t) = (V_{CE0} + r_i(t)) \cdot i(t) \cdot (1 + m \sin(\omega t + \phi)) \quad (\text{식 } 1)$$

$$P_{cond,Diode}(t) = (V_{T0} + r_T i(t)) \cdot i(t) \cdot (1 - m \sin(\omega t + \phi)) \quad (\text{식 } 2)$$

$$P_{sw,IGBT}(t) = f_{sw} (E_{ON,IGBT,nom} + E_{OFF,IGBT,nom}) \cdot \frac{i(t)}{i_{nom}} \cdot \frac{V_{DC}}{V_{nom}} \quad (\text{식 } 3)$$

$$P_{sw,Diode}(t) = f_{sw} \cdot E_{OFF,Diode,nom} \cdot \frac{i(t)}{i_{nom}} \cdot \frac{V_{DC}}{V_{nom}} \quad (\text{식 } 4)$$

계산에 필요한 변수들은 기본적으로 파워모듈 업체에서 제공하는 데이터시트를 참고하였으며 파워모듈 단품시험 결과를 통해 손실값을 비교하여 일부 변수를 수정한 후 시뮬레이션에 적용하였다. 여기서  $V_{T0}$ 는 Diode에 흐르는 전류가 0A일 때의  $V_T$ 값,  $r_T$ 는  $V_T$ 와 전류의 기울기를 나타내며,  $m$ 은 전압이용률,  $\phi$ 는 전류와 전압의 위상차이다.

## 2.2 IGBT 및 다이오드 열모델

IGBT와 Diode의 손실(발열량)과 각 소자 온도 변화의 관계를 나타내기 위하여 열저항과 열용량으로 열모델을 구성할 수 있다.

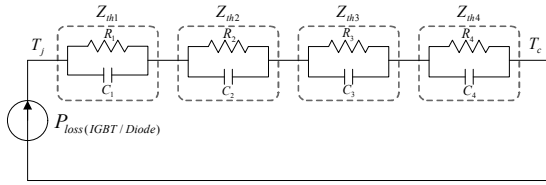


Fig.3 파워모듈 열모델

Fig.3과 같이 구성된 열모델에서의 썬덤임피던스는 식(5)와 같이 표현되며, 발열량과 썬덤임피던스를 이용하여 두 지점 사이의 온도변화는 식(6)과 같이 구할 수 있다.

$$Z_{thjc} = Z_{th1} + Z_{th2} + Z_{th3} + Z_{th4} \quad (식 5)$$

$$Z_{thjc} = \frac{T_j - T_c}{P_{loss(IGBT/Diode)}} \quad (식 6)$$

## 2.3 시뮬레이션

본 연구에서는 시간에 따라 정현파형으로 변하는 전류에 대하여 손실을 실시간으로 계산하고 열모델을 통해 파워모듈 소자의 온도 변화를 시뮬레이션한다. 전체 시뮬레이션 구성은 Matlab/Simulink를 이용하여 구현하였다.

### 2.3.1 시뮬레이션 구성

시뮬레이션은 Fig.4와 같이 크게 세 부분으로 구성된다. 차량운전조건, 즉 모터토크 및 속도를 이용하여 인버터 3상전류를 구하기 위한 전류맵, 3상전류 입력을 받아 파워모듈 각 소자에서 발생하는 손실을 구하는 손실모델, 그리고 소자들의 손실을 이용하여 베이스플레이트 및 각 소자의 정선온도를 구하는 열등가모델로 구성되어 있다.

전류맵으로부터 특정 운전조건에 해당하는 인버터 d축 및 q축 전류를 추출하여 인버터 상전류의 최대값을 구할 수 있으며 이 값을 이용하여 인버터 3상에 흐르는 순시전류를 계산한다. 이러한 3상전류는 파워모듈 내부의 12개 IGBT 및 Diode에 흐르게 되며 이 때 발생하는 손실은 식(1)~(4)를 이용하여 예측할 수 있다.

### 2.3.2 파워모듈 등가 열모델

파워모듈을 구성하는 내부 소자는 일정 온도 이상 상승하게 되면 소손되어 인버터 구동이 불가능하므로 주행 중 IGBT 및 Diode의 정선온도를 모니터링하여 각 소자들을 과온으로부터 보호해야 한다. 이를 위해 인버터 시스템에서는 파워모듈 내부의 베이스플레이트에 장착되어 있는 온도센서(NTC)의 측정온도를 통하여 소자들의 정선온도를 추정한다.

본 연구에서는 정선, 베이스플레이트 및 냉각수 사이의 열모델을 통해 소자들의 정선 온도와 파워모듈의 베이스플레이트 온도를 예측할 수 있도록 시뮬레이션 하였다.

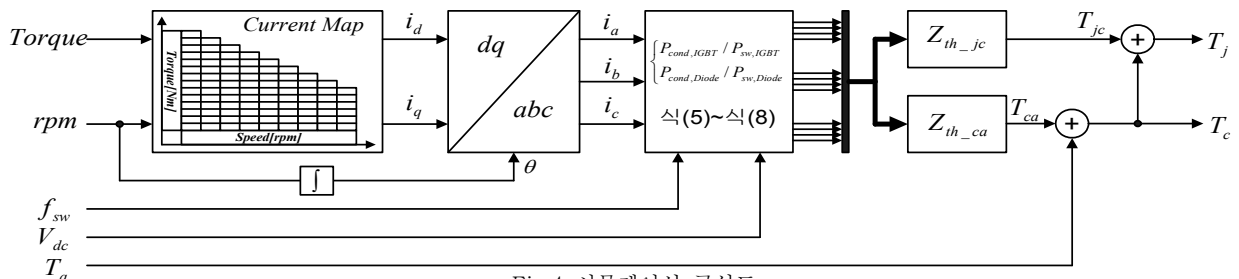


Fig.4 시뮬레이션 구성도

하이브리드 차량 운전 조건에 따라 파워모듈 각 소자들의 발열량이 다르고 소자들의 위치 분포에 따라 온도 상승 또한 상이하므로, 실질적인 열모델 파라미터를 추출하기 위해서는 각 소자에 흐르는 전류 및 발열량을 개별적으로 구하고, 각 소자들이 상호간 온도 상승에 미치는 영향을 열모델에 반영할 필요가 있다. 파워모듈 내의 12개의 발열소자에 의한 온도 변화를 계산하기 위해 열저항을 식(7)와 같이 12x12 행렬로 나타내어 각 소자의 정선온도를 예측하였다. 식(7) 행렬의 원소  $Z_{km}$ 은 m 소자의 발열량이 k 소자의 온도 상승시키는 열저항을 의미한다. 마찬가지로 베이스플레이트의 온도를 예측하기 위해 12개 소자와 베이스플레이트 사이의 열저항은 12x1 행렬을 사용하였다.

$$\begin{bmatrix} T_{j1} \\ T_{j2} \\ \vdots \\ T_{j6} \\ T_{d1} \\ \vdots \\ T_{d6} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{i1i1} & Z_{i1i2} & \cdots & \cdots & Z_{i1d6} \\ Z_{i2i1} & Z_{i2i2} & \cdots & \cdots & Z_{i2d6} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ Z_{i6i1} & Z_{i6i2} & \cdots & \cdots & Z_{i6d6} \\ Z_{d1i1} & Z_{d1i2} & \cdots & \cdots & Z_{d1d6} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ Z_{d6i1} & Z_{d6i2} & \cdots & \cdots & Z_{d6d6} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_{i1} \\ P_{i2} \\ \vdots \\ P_{i6} \\ P_{d1} \\ \vdots \\ P_{d6} \end{bmatrix} \quad (식 7)$$

식(7)의 행렬은 12개의 IGBT 및 Diode의 발열량, 열저항 및 온도상승의 관계를 행렬로 나타낸 것으로  $T_{j11} \sim T_{j16}$ 은 6개 IGBT의 정선온도를 의미하고  $T_{jd1} \sim T_{jd6}$ 은 6개 Diode의 정선온도를 나타낸다. 또한 한 소자의 온도 상승은 소자 자체의 발열에 의한 온도 상승(Self Heating Part)과 그 외 나머지 소자들의 발열에 의한 온도 상승(Thermal Interference Part)의 합으로 식(8)과 같이 표현할 수 있다.

$$T_{j1} = \underbrace{Z_{i1i1} P_{i1}}_{\text{Self Heating Part}} + \underbrace{Z_{i1i2} P_{i2} + \cdots + Z_{i1d6} P_{d6}}_{\text{Thermal Interference Part}} \quad (식 8)$$

식(8)의 자체 발열에 의한 온도 상승과 관련된 열저항 부분은 행렬식(7)의 원소  $Z_{km}$  중  $k=m$ 인 경우이며, 식(7)에서  $k \neq m$ 인 경우는 다른 소자 사이의 열저항을 나타낸다. 또한 식(7)의 행렬식에 대한 등가 열모델은 아래와 같다.

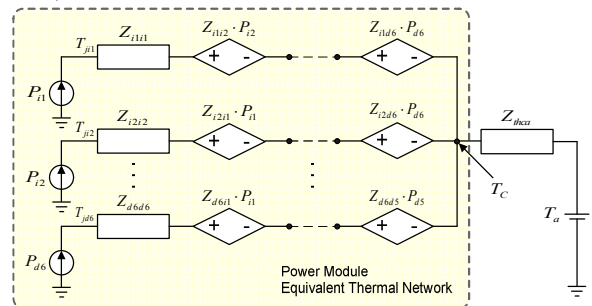


Fig.5 파워모듈 열모델 등가회로

Fig.5의 열모델을 구성하는 파라미터들은 파워모듈 데이터시트 및 시험 결과를 참고하여 추출하였다. 파워모듈

U 상의 IGBT 와 Diode 총 4 개의 소자에 온도센서를 장착하고 각 상에 DC 전류를 인가하는 시험을 실시하여 정선온도를 측정하였다. 전체 소자의 손실은 2.1 절의 손실식을 이용하였으며 4 개 소자의 온도 측정 시험결과로부터 식(7)의 열저항 행렬식을 얻었다. 4 개 소자의 온도 측정 결과로부터 전체 12 개 소자 사이의 열저항 관계를 얻기 위해 두 소자 사이의 열저항은 두 소자간 거리의 제곱에 반비례하는 것으로 가정하여 식(7)의 행렬식을 도출하였으며, 이를 이용한 시뮬레이션결과와 시험결과를 비교하여 타당성을 검토하였다.

Fig.6 은 인버터 U 상에 최대 전류가 흐르는 경우의 힐홀딩 조건을 모사한 파워모듈 단품시험 결과와 같은 조건으로 시뮬레이션을 실시한 결과이며, 4 개 소자 온도에 대한 시뮬레이션과 시험결과와의 정상상태 값이 1°C 오차 이내에서 일치함을 알 수 있다. 이 결과를 통해서 시뮬레이션에 적용한 열모델 파라미터가 타당함을 확인할 수 있다. Fig.6 의 초기 과도상태 구간에서는 시뮬레이션과 시험결과가 차이를 보이는데, 이는 소자의 온도 측정을 위해 장착한 온도센서가 온도상승 과정에 영향을 미쳐 IGBT 와 Diode 의 초기 과도상태에서의 열용량 및 시정수가 증가하여 정확한 과도상태 결과를 얻을 수 없었기 때문으로 보인다.

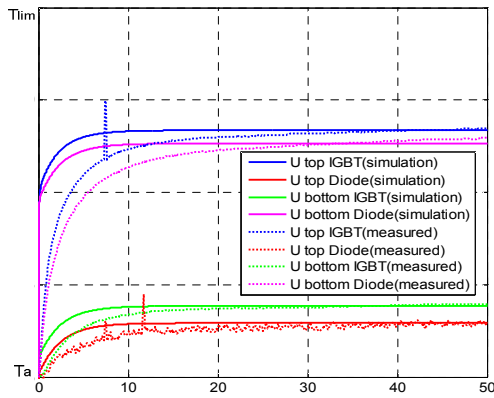


Fig.6 파워모듈 단품시험 및 시뮬레이션 비교

본 논문의 시뮬레이션에 사용한 열저항 행렬에서 자체 발열에 의한 열저항은 전체 열저항의 약 80%를 차지한다. 이렇게 열모델을 세분화함으로써 각 소자의 위치에 따른 온도 분포를 파악할 수 있으며, 특히 힐-홀딩과 같은 운전조건에서 특정소자에 전류가 집중되어 파워모듈 내부 온도 분포가 불균일한 경우 최고 온도인 소자의 온도를 예측하는 것이 가능하다.

### 2.4 시뮬레이션 결과

Fig.7 은 실제 차량 운행 사이클에 대하여 파워모듈의 베이스플레이트와 정선온도를 예측한 결과이다. Fig.7 (a) 와 (b) 는 차량 운행 중 측정된 차속과 모터 회전속도이며, Fig.7(c)는 모터토크이다. Fig.7(d)와 (e)는 각각 베이스플레이트 온도와 정선온도를 예측한 결과이다. 냉각수 온도( $T_a$ )는 초기에 베이스플레이트와 같은 온도에서 출발하여 주행 중 일정 온도까지 상승하는 것으로 가정하여 시뮬레이션 하였다. 베이스플레이트 온도는 차량 운행 중 파워모듈의 NTC 를 통해 측정이 가능하므로 Fig.8(d)에 측정된 데이터와 시뮬레이션 결과를 함께 비교하였으며, 최대온도의 경우 오차는 약 1°C 이다.

Fig.7(e)는 각 시간에서 12 개 소자의 온도 중 가장 높은 온도를 그래프로 나타낸 것이다. 최고 온도는 베이스플

레이트와 정선 온도 모두 주행 후 100 초 부근에서 나타났다. 이 때는 하이브리드 차량의 회생제동 상태에서 전체 주행시간 내에서 가장 큰 모터 토크가 발생하고, 인버터에는 최대 전류가 흐르게 되어 정선 및 베이스플레이트 온도 또한 최대가 된다. 정선의 최대 온도는 소자의 제한 온도를 초과하지 않는 것으로 나타났다.

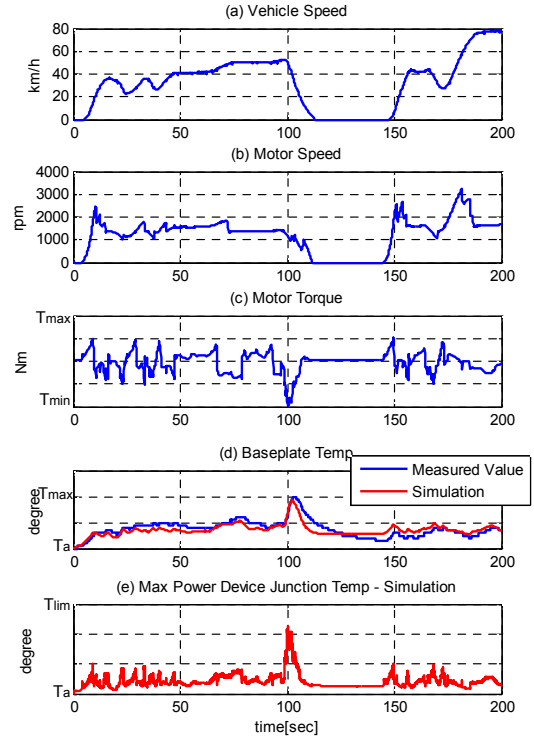


Fig.7 차량 주행시험 및 시뮬레이션 결과

## 3. 결론

본 연구에서는 인버터 열모델 시뮬레이션을 통해 차량 주행상태에 따른 인버터 내부 온도 변화를 예측함으로써 하이브리드 차량 임의의 주행 사이클에 대해 파워모듈 내의 반도체 소자(IGBT 및 Diode) 들이 제한온도 내에서 구동 가능한지를 알 수 있었다.

향후 수치해석(FEM)으로 열모델 파라미터를 추출할 경우 인버터 설계 단계에서 시험을 거치지 않고 인버터 온도 시뮬레이션이 가능하며, 또한 차량 주행 사이클에 따른 파워모듈 소자 및 베이스플레이트의 온도변화를 통해 인버터 파워모듈 수명예측에 활용할 수 있다.

## 참고문헌

[1] V. Blasko, R. Lukaszewski, and R. Sladky "On Line Thermal Model and Thermal Management Strategy of a Three Phase Voltage Source Inverter", in Conf. Record IEEE-IAS Annual Meeting, 1999, pp.1423-1431.  
 [2] D.A. Murdock, J.E. Ramos, and R.D. Lorenz, "Active Thermal Control of Power Electronics Module", in IEEE IAS'03 Conf. Record, 2003, pp.1511-1515.  
 [3] Z. Zhou, P.M. Holland, P. Iqig"Compact Thermal Model of a Three-Phase IGBT Inverter Power Module", Record IEEE-IAS Annual Meeting, 2004, pp.171-176.