

# 전력 손실 평균화 기법에 의한 3상 전압형 인버터의 소손 모드에 관한 연구

조 수 익  
서일대학

## Failure Mode of 3 Phase VSI by using Average Method of Power Loss

Su Eog Cho  
Seoil College

### ABSTRACT

본 논문에서는 저가의 3상 전압형 인버터를 개발하기 위하여, 시스템에 최적화된 전력 변환 장치로 설계하고 이 때 산업 사회에서 요구하는 수명을 만족하기 위해 실시간으로 전력 손실을 감시하여 전력 반도체의 수명을 보장하고, 소손 시 분석을 용이하게 하기 위하여 소손 모드를 패턴 화 하였다. 전력반도체 열 손실의 이상 유무를 평균 전류 혹은 평균 손실을 이용하여 계산된 온도 상승 기율기와 방열판에서 실측된 온도 상승 기율기와 비교하여 일정 범위 내에 존재함을 확인함으로써 그 가능성을 실험을 통하여 확인하였다.

### 1. 서론

최근까지 드라이브내의 전력 반도체의 열적 스트레스에 대한 실질적인 연구는 거의 진행되지 않았다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 오프 라인으로 추정되어지거나 열 측정 기구에 의해서 측정되어졌다. 전력 반도체의 열적 스트레스는 소손의 원인이 되기 때문에 드라이브 설계 시에, 약조건의 열적 스트레스를 감소하기 위해 그동안 많은 노력이 있었다. 전력 변환 장치가 가속하고 감속 그리고 다양한 부하 조건에서 다양한 열적 스트레스가 전력 반도체에 인가될 수 있다. 전력 변환 장치 설계 시에 전력 반도체의 열적 스트레스를 구동 조건에 최적화하면 전력 반도체의 수명을 보장할 수 있다. 비록, 전력 반도체는 오프라인의 시뮬레이션과 계산으로 모델링되었지만 드라이브의 구동 알고리즘에 포괄적으로 포함되어 열적 스트레스를 최적화할 수 있다. 이러한 시도는 드라이브가 높은 열적 스트레스를 받는 경우 스트레스를 감소하는 방향으로 구동하여 드라이브의 신뢰성 구축에 도움이 되었다. 전력 반도체 메이커가 제공하는 구동회수 대비 소손 가능성 자료는 전력 반도체의 수명 예측에 도움이 되었다<sup>[1~2]</sup>

### 2. 전력 변환 장치의 고장 모드 분석

전력 반도체의 수명을 보장하기 위해서, 전력 변환 장치의 주위 온도를 측정할 수 있는 곳과 방열판위의 지정된 위치에 온도 센서를 2곳 부착하여 방열판의 온도 변화를 관측함으로써 전력 반도체가 시뮬레이션 된 최적의 상태로 운행되는 것을 실시간으로 감시하여 최적화된 수명을 보장 하였다. 또한, 방열판 팬(Fan)의 고장 모드를 분석할 수 있게 하기 위하여 방열판 시정수를 주기로 하여 전류 혹은 전력 손실을 평균하여 방열판

의 지정된 위치에서의 온도 상승의 변화량을 감시하여 방열판 팬의 전원 저하 및 소손 유무를 판단 할 수 있게 하여 전력 변환 장치의 신뢰성을 높였다.

### 2.1 실험 장치의 구성

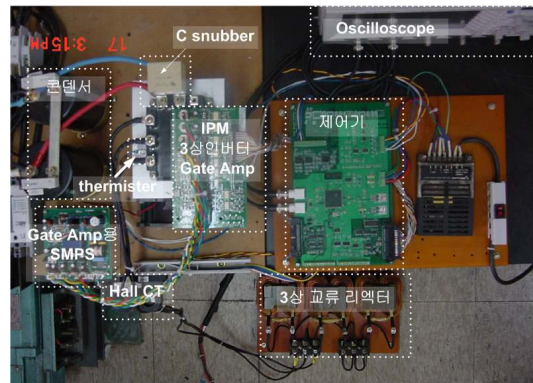


그림 1 전력 변환 장치의 구성  
Fig. 1 Configuration of power conversion system

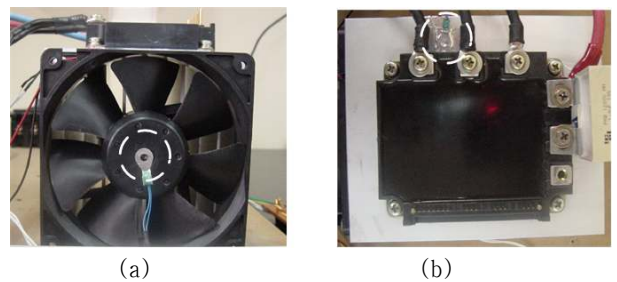


그림 2 온도측정 위한 실제 구성  
(a) 외부온도 측정, (b) 방열판 온도 측정  
Fig. 2. Actual configuration of temperature measurement  
(a) For the measurement of surrounding temperature  
(b) For the measurement of heat-sink temperature

### 2.2 온도 검출 회로의 구성

그림 2의 전력 변환 장치 주위의 온도(a) 와 전력 반도체가 취부 되는 방열판(b)의 온도를 검출하여 주위 온도에 대한 방열판의 온도 상승을 써멀 메니지먼트 (Thermal management) 제어기가 인식하여 전력 반도체의 열손실의 이상 유무를 판단

하고 이상이 발생 하였을 경우 고장 모드를 해석하기 위해 온도 검출 회로가 컨트롤러 보드에 추가 되었다.

### 2.3 전력 반도체(IGBT) 정선 온도 관측기

전력 반도체의 전력 손실 및 정선 과 방열판 사이의 온도 상승치는 전류 제어 주기에서 계산되어 정해진 수명의 온도상승을 초과하는지 감시하여 전력 반도체의 수명을 보장 한다. 그리고 방열판 시정수의 주기로 전류 혹은 전력 손실을 평균하여 방열판 의 지정된 위치에서의 온도 상승의 변화량을 감시하여 전력 반도체의 열 손실 과 비교하여 전력 반도체의 열화 및 케이스 와 방열판의 열 저항 변화 그리고 방열판 팬의 전원 저하 및 소손 유무를 판단 할 수 있게 한다.

시험 조건은 엘리베이터가 연속으로 표 1의 조건으로 구동 하였을 때의 전류 프로파일을 3상 교류 리액터에 인가하여, 방열판의 온도 와 전력 변환 장치 주위 온도를 비교하여 온도 상승 데이터를 구하였다.

표 1 시험 구동 조건

Table 1 Condition of test operation

스위칭 주파수[kHz]	8
이동 거리[m]	10
부하 조건[%]	100, 82.5, 75, 62.5, 50
엘리베이터 방향	상승
가속도[m/s <sup>2</sup> ]	0.8
가가속도[m/s <sup>3</sup> ]	1.4

엘리베이터 부하별로 100%, 87.5%, 75%, 62.5%, 50%에 대해 방열판 시정수 1tau, 275[sec] 동안의 평균 전류 및 평균 손실로 방열판의 온도상승을 계산하고 실측한 방열판의 온도 상승치 와 비교하였다. 비교한 결과는 그림 3 에서 부하별로 실측한 온도 상승 및 기울기로 표시하였고, 표 2 에는 계산치 와 실측치를 비교하였다. 실측치보다 계산치가 최대 8.45%더 계산되었다. 부하별 구간을 5개구간에서 10개구간으로 증가하여 록업 테이블을 작성하면 차이가 최대 4% 이내로 줄어들 것으로 추정된다.

그림 4에는 전력 반도체의 정선 온도 관측기가 정선의 온도 상승치를 40[ms] 주기로 관측하여 최고치의 온도 상승 데이터( $\Delta T_{max}$ )로 갱신한다. 고객이 요구하는 수명에 해당하는 정선 과 방열판 사이의 온도 상승치( $\Delta T_{ref}$ )보다 계산한 온도 상승치( $\Delta T_{max}$ )가 크면 전력 반도체의 수명에 영향을 주므로 과부하 에러로 선정 후 전력 변환 장치를 정지하여 수명을 보장한다.

전류에 의한 방열판의 온도 상승 과 전류 프로파일에 의한 방열판의 온도 상승 데이터가 일치한다는 것을 실험에 의하여 검증하였다.

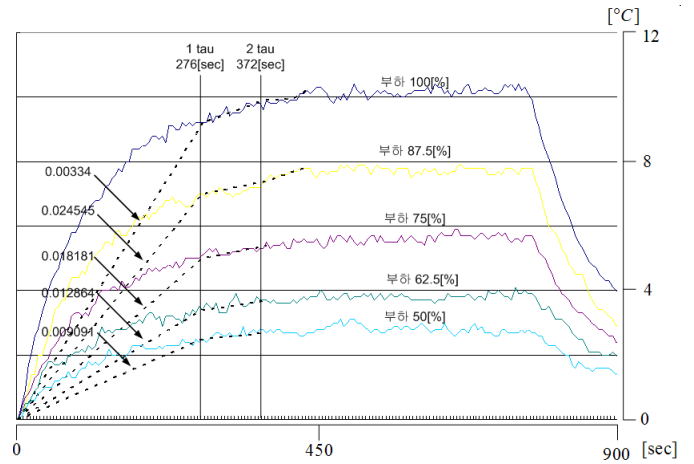


그림 3 부하별 온도 상승치 및 기울기

Fig. 3 Temperature rise and slope by each load type

표 2 평균 손실별 계산 기울기 와 실측 기울기 비교

Table 2 Comparison of slope between measured value and calculated value by each average power loss

부하 조건[%]	평균 손실 [w]	계산 기울기	실측 기울기	오차율
100.0	216.4100	0.0335	0.0335	0.0000
87.5	170.0900	0.0263	0.0242	-8.4527
75.0	131.9900	0.0188	0.0182	-3.4824
62.5	100.8900	0.0139	0.0129	-8.0311
50.0	73.9000	0.0094	0.0091	-3.6479

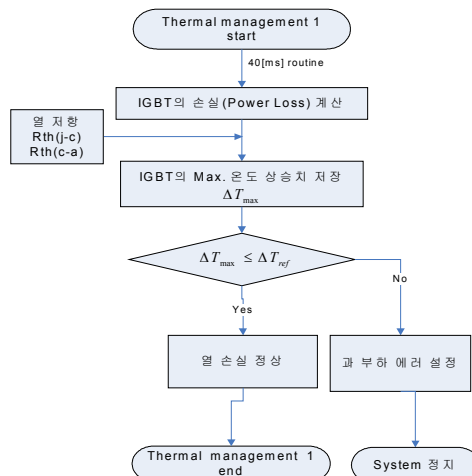


그림 4 써멀 매니지먼트 I 순서도

Fig. 4 Flow chart for thermal management I

그 검증을 기반으로 그림 5는 평균 손실로 계산한 방열판의 온도 상승 데이터 와 실측한 방열판의 온도 상승 데이터가 일정치 이상 다른 경우 소손 모드 1,2,3로 분류하여 전력 변환 장치의 보수성을 용이하게 하고 소손 모드 1,2,3의 원인으로 열화 되는 것을 방지하기 위하여 실시간으로 방열판의 시정수에 해당하는 시간의 주기로 평균 손실을 계산한다. 이미 작성된 평균 손실 대 방열판

온도 상승의 기울기의 룩업 테이블(look-up table)에서 계산된 평균 손실에 해당하는 기울기의 색인을 선정 한 후 색인된 평균 손실 값 대 계산된 평균 손실 값의 비로 곱하여 히트 싱크의 온도 상승 기울기 데이터를 계산한다. 계산된 히트 싱크의 온도 상승분의 기울기 ( $\frac{\Delta T}{\Delta t}(L, 7X[\%])$ )의 1.15배 보다 측정된 온도 상승분의 기울기( $\frac{\Delta T}{\Delta t}(L, 7X[\%])_{mea}$ )가 더 큰 경우는 측정된 온도 상승분의 기울기가 계산한 온도 상승분의 기울기 보다 130[%]를 초과하면 소손 모드 2로써 팬의 열화 및 소손의 경우이다. 측정된 온도 상승분의 기울기가 계산한 온도 상승분의 기울기의 115[%] 와 130[%] 사이에 있으면 소손 모드 1로써 팬의 구동 전압이 저하된 경우이다. 소손 모드 1 및 2는 측정 값이 계산 값 보다 많은 경우로써 방열판의 열 저항이 증가한 경우이다. 최초 최적화 설계시보다 팬의 대류(Convection) 능력이 저하된 경우로써 팬의 구동 전압이 저하된 경우와 소손된 경우로 나누어 볼 수 있다. 반대의 경우 측정값이 계산 값 보다 많은 경우로써 방열판의 열 저항이 증가한 경우이다. 최초 최적화 설계시보다 팬의 대류(Convection) 능력이 저하된 경우로써 팬의 구동 전압이 저하된 경우와 소손된 경우로 나누어 볼 수 있다. 반대의 경우 측정값이 계산 값 보다 작은 경우로 소손 모드 3로 볼 수 있다. 원인으로서는 열적 스트레스에 의한 전력 반도체의 정션 패키지 간의 열 저항이 증가된 경우로써 전력 반도체의 열화 혹은 수명이 다한 경우로 볼 수 있다. 그리고 전력 반도체의 케이스와 방열판의 열 저항이 증가한 경우로 전력 반도체를 방열판에 취부 시 정해진 토오크로 체결을 하지 않은 경우와 도포된 컴파운드(그리스)의 특성 및 두께가 일정치 않은 경우이다. 평균전류 혹은 평균손실에 의해 계산된 방열판 온도상승의 기울기는 전력반도체의 열화 및 Fan의 열화, 전력 반도체의 방열판 접촉 상태 등을 실시간으로 감시하여 최적화된 IGBT(전력 반도체)의 수명을 보장하였다.

### 3. 결론

최적화된 손실을 실시간으로 검증하기위하여, 다양한 부하별로 전류를 인가하여, 계산한 방열판의 온도 상승 값과 실측된 방열판의 온도 상승 값이 비례 관계를 가지고 있는 것을 검증하였으며, 특히 방열판 과 전력 변환 장치 주변의 온도를 정확하게 DSP가 인식 할 수 있도록 제어기 보드에 온도 검출 회로를 추가하였다. 평균 손실 및 평균 전류에 의하여 계산된 방열판 온도 상승치와 온도 검출회로에 의한 온도 상승치가 최대 8[%] 이내의 오차 범위에 있다는 것을 실험을 통하여 검증하였다. 평균 전류 혹은 평균 손실에 의해 계산한 방열판의 온도 상승 기울기와 실측한 온도 상승 기울기를 비교하여, 전력 반도체 열 손실의 제한 범위를 판단하고, 제한 범위를 초과하였을 경우 열 소손 모드를 판단함으로써 전력 변환 장치의 열적 신뢰성을 향상 시킬 수 있음을 확인하였다.

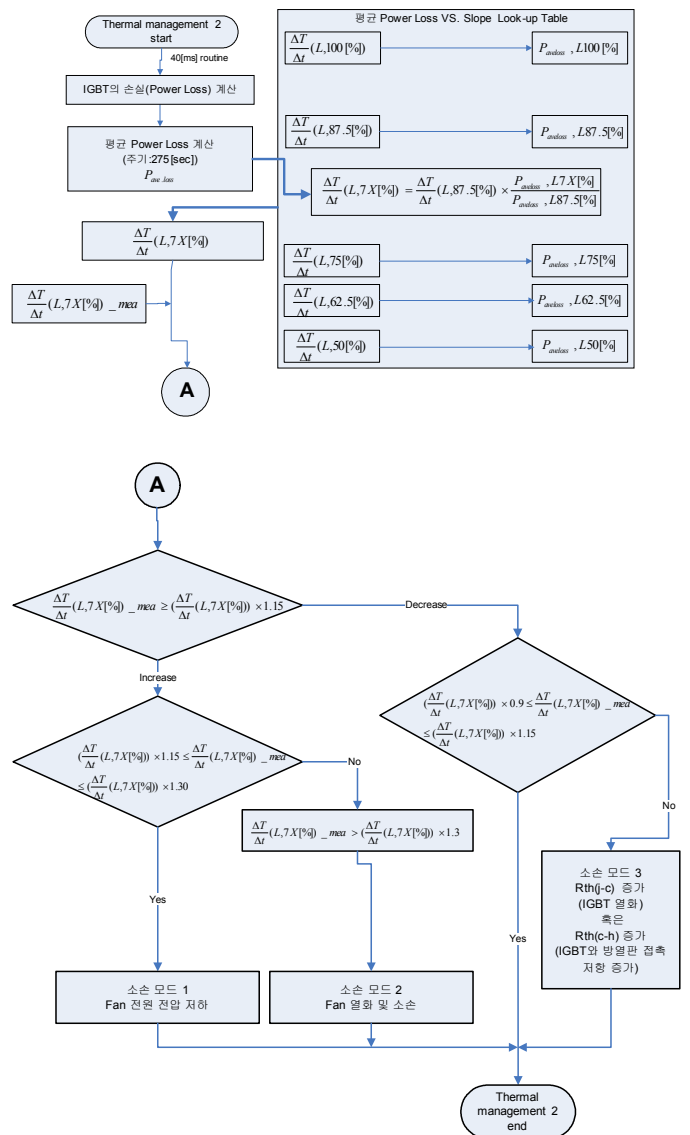


그림 5 써멀 매니지먼트 II 순서도  
Fig. 5 Flow chart for thermal management II

이러한 연구 결과는 전력 변환 장치를 시스템에 최적화하여 저가의 인버터 장치를 산업 사회에 공급 가능 하게 하고, 실시간 방열판 온도 상승 관측에 의하여 최적화한 수명을 보장하게 하고 소손 발생 시 분석을 용이하게 할 것으로 사료된다.

### 참고 문헌

- [1] M.Ciappa, F.Carbognani, W.Fichtner, "Lifetime modeling of Thermo-mechanics-Related Failure Mechanisms in High Power IGBT Modules for Traction Applications," Proc. ISPSD '03, Power Semiconductor Devices and ICs, 15th April 2003, pp.295-298.
- [2] Mauro Ciappa and Wolfgang Fichtner, "Lifetime Prediction of IGBT Modules for Traction Applications," Proc. IEEE International Reliability Physics Symposium, San Jose, 2000, pp. 210-216.