

# DC-DC 컨버터 수명 최적화를 위한 MOSFET 온도 추정 알고리즘

이용경, 남은택, 공임보, 채수용  
포항공과대학교

## Temperature Estimation Algorithm of MOSFET to Optimize Life-time of DC-DC Converters

Yongkyeong Lee, Euntaek Nam, Imbo Kong, Suyong Chae  
Pohang University of Science and Technology

### ABSTRACT

전력변환장치의 수요가 증가함에 따라 신뢰성 확보 문제가 주목받고 있다. 전력변환장치의 신뢰성 확보를 위해 소자에 가해지는 평균온도와 온도 변화량을 정밀하게 추정해야 한다. 본 논문에서는 저주파수 측정정보를 활용하여 고주파 부하변동 조건에서 소자 케이스 온도를 정밀하게 추정하고 열 등가회로 모델을 통해 접합부에 가해지는 열 충격을 정량화하여 수명 예측 모델의 신뢰성을 향상시키는 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 MATLAB/Simulink 및 PLECS 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

### 1. 서론

최근, 탄소중립 이슈로 전력변환장치의 수요가 증가함에 따라 신뢰성 확보 및 수명 추정에 대한 문제가 주목받고 있으며 관련된 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>[1]</sup> 수명추정기법은 접합부 온도를 측정하고 레인플로 집계법(Rainflow Counting)으로 접합부에 가해지는 열 충격을 계산하고 수명추정 모델을 사용하여 수명을 추정한다. 이처럼 수명추정의 핵심은 접합부 온도를 정확히 측정하는 것이다. 이러한 기법은 열 등가회로 모델을 통해 비침투적(Non-invasive)기법과 침투적(invasive)기법으로 나뉘어지며 직접 측정방식은 소자에 손상을 야기하는 단점이 있다<sup>[2]</sup>. 기존의 연구에서 활용된 비침투적 기법은 감열성 전기 파라미터(Termosensitive Electrical Parameters) 사용하여 접합부 온도를 간접 측정하나 별도의 실험환경 구축이 필요하여 경제성 측면에서 단점이 있다. 기존의 연구에서는 열 충격을 정량화 하지 않고 온도만을 추정하였다<sup>[3]</sup>.

본 논문에서는 기존의 비 침투적 기법의 경제성 최소화를 목적으로 소자의 케이스 온도를 저주파로 측정하고 칼만필터를 통하여 오차를 보정 후 열 등가회로 모델을 통해 접합부에 가해지는 온도를 추정하는 기법을 제안한다. 나아가 레인플로 집계법을 사용하여 열 충격 파라미터를 정밀히 추정하고 수명추정모델의 정확성을 향상시키는 알고리즘을 제안한다.

### 2. 본론

#### 2.1 전력변환소자 열 모델링 기법

전력변환 소자의 열 모델은 열 저항과 열 용량으로 구성되어 있으며 이는 분석 목적에 따라 그림 1과 같이 카우어 모델

(Cauer model)과 포스터 모델(Foster model)로 나뉜다. 카우어 모델은 내부 소자의 칩(Chip), 다이(die), 솔더(solder) 등 각 층(Layer)의 온도를 분석하는 목적으로 사용되고 포스터 모델은 접합부와 케이스 온도 분석 시 사용되며 두 모델은 상호전환 가능하다<sup>[4]</sup>. 소자 제조사에서 카우어 모델의 파라미터는 제공하고 있으나, 포스터 모델로 변환하기 위해 열 임피던스 곡선에 대하여 커브피팅이 필요하다. 본 논문에서는 케이스 온도를 통해 접합부 온도를 추정하는 그림2의 과정을 사용한다.

열 모델은 전기 등가회로로 해석할 수 있다. 옴의 법칙에 근거하여 식(1)과 같이 케이스 온도를 통하여 접합부 온도를 추정할 수 있고 식(2)와 같이 열 망(Thermal network) 임피던스를 시간에 대하여 표현할 수 있다. 식(3)은 소자의 손실에 대한 식으로 스위칭 손실(Switching loss)과 도통 손실(Conduction loss)의 합으로 나타낸다.

$$T_j = T_c + Z_{th}(t)P_{loss} \quad (1)$$

$$\sum_{n=1}^i R_i(1 - e^{-t/R_i C_i}) \quad (2)$$

$$P_{loss} = 0.5 V_{in} I_{out} (t_r + t_{off}) + I_{rms}^2 R_{DS_{on}} \quad (3)$$

이때,  $T_j$ 는 소자 접합부 온도,  $T_c$ 는 케이스 온도,  $Z_{th}$ 는 임피던스를 의미하며,  $P_{loss}$ 는 소자의 손실을 의미하고  $t_r, t_{off}$ 는 각 스위칭 기간의 상승시간과 하강시간을 의미한다. 또한,  $R_{DS_{on}}$ 는 소자의 내부저항을 의미한다.

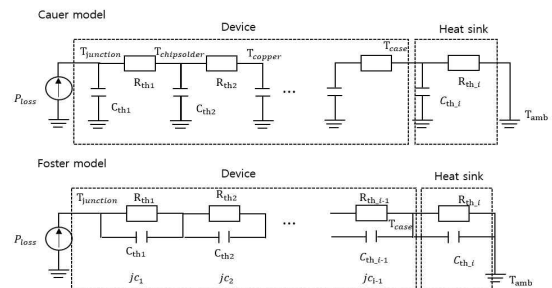


그림1. 등가회로 열 모델  
Fig. 1 Equivalent Circuit Thermal Model

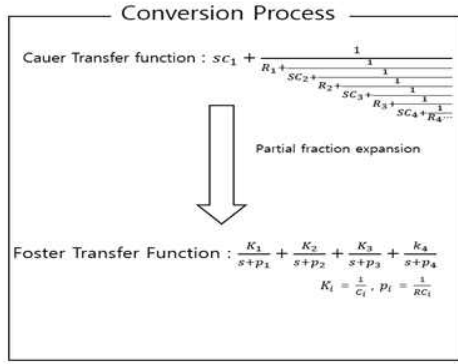


그림2. 등가회로 열 모델 변환 과정  
Fig. 2 Equivalent Circuit Thermal Model Conversion Process

## 2.2 칼만필터를 사용한 소자 온도 추정 기법

칼만필터는 상태공간모델을 기반으로 측정값의 부정확성을 최소화하고  $k$  번째 추정값과 측정값의 오차를 사용하여 예측단계와 수정단계를 재귀적으로 반복하여  $k+1$  단계의 상태변수 값을 추정한다. 본 논문에서 칼만필터는 저주파수 측정환경에서 케이스 온도의 부정확성을 최소화 하고 접합부 온도를 정밀하게 추정하기 위해 사용한다.

소자 케이스 온도는 아래의 식(4)와 같이 케이스에서 방열판에 해당하는 열 망 임피던스  $Z_{th\ case\ to\ heat\ sink}$  와 열 망의 온도차  $x$ 의 곱과 주변온도  $T_a$ 로 표현할 수 있다.

$$T_c = Z_{th\ case\ to\ heat\ sink} x_{case\ to\ heat\ sink} + T_a \quad (4)$$

포스터 모델에서 키르히호프의 전류법칙에 근거하여 미분방정식에 해당하는 식(5)를 도출할 수 있다.

$$P_{loss} = C_{th} \frac{dx}{dt} + Rx \quad (5)$$

이때,  $C_{th}$ 는 열 용량을 의미하며  $x$ 는 열 망의 온도차를 의미한다. 식(4)와 식(5)에 근거하여 식(6)과 같이 상태공간 방정식을 설계할 수 있다. 이때, 식(6)의 상태변수  $x$ 는 열 망의 온도차를 의미한다. 식(4)의 관계를 통해 C와 D를 설계하고 식(5)를 통해 A와 B를 설계한다. C는 출력 행렬(Output matrix)로 포스터 모델의 케이스에서 방열판 구간만 1로 표시한다. 설계한 상태공간 방정식을 오일러 방법에 근거하여 이산화하고 칼만필터를 설계하여 케이스 온도 측정에 사용한다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ T_c &= Cx + Du \end{aligned}$$

$$A = \begin{pmatrix} -\frac{1}{R_1 C_1} & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R_2 C_2} & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & 0 & -\frac{1}{R_3 C_3} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & -\frac{1}{R_i C_i} \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} \frac{1}{C_1} & 0 \\ \vdots & \vdots \\ \frac{1}{C_i} & 0 \end{pmatrix} \quad C = (0 \dots 0 \ 1 \dots 1) \quad D = (0 \ 1)$$

$$u = (P_{loss} \ T_a)^T \quad (6)$$

## 2.3 레인플로 집계법과 열 충격 정밀화 알고리즘

레인플로 집계법은 반도체 소자에 가해지는 피로 및 열 충격을 분석하고 소자의 수명을 추정하기 위해 사용한다. 그림3과 같이 열충격을 국소 최소값(Valley)과 국소 최대값(Peak)으로 이루어지도록 반 주기(Half Cycle)로 나눈다. 현 주기의 국소 최대값 또는 국소 최소값이 다음 주기보다 클 경우 알고리즘을 계속 진행하고 그렇지 않을 경우 다음 주기를 분석한다. 레인플로 집계법에 근거하여 도출된 충격 사이클 수와 크기를 아레니우스 코핀 만손 모델(Arrhenius-Coffin-Manson's lifetime model)을 통하여 피로수명주기를 추정한다<sup>[5]</sup>. 그러므로 열충격 분석이 정밀하게 이루어질수록 수명예측의 정밀도는 향상된다.

본 논문에서 제안하는 알고리즘은 수명 추정 정밀화를 위해 소자에 가해지는 열 충격을 정밀하게 측정하여 수명모델의 예측성을 향상시키는 기법을 제안한다. 그림4와 같이 소자의 케이스 온도를 칼만필터를 적용하여 정밀하게 측정하고 열 등가회로 모델을 통해 접합부 온도를 추정한다. 그리고 레인플로 집계법을 통해 수명추정모델에 필요한 열충격 주기와 주기평균 온도를 정량화한다.

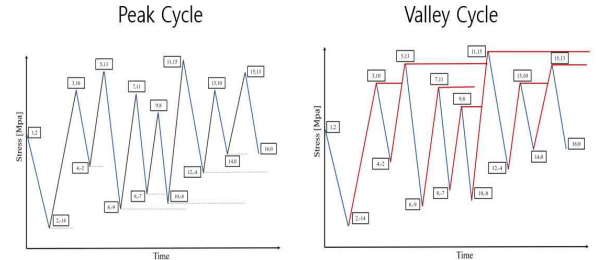


그림3. 피로해석을 위한 레인플로 집계법  
Fig. 3 Rainflow counting for fatigue analysis

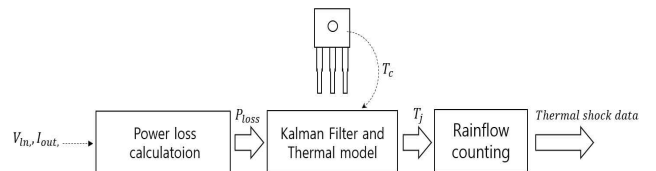


그림4. 제안하는 열 충격 정밀화 알고리즘  
Fig. 4 Proposed thermal shock precision algorithm

## 2.4 DC-DC 컨버터를 통한 알고리즘 실험 결과

제안하는 열 충격 정밀화 알고리즘을 검증하기 위해 그림5와 같이 실험 환경을 구성하였다. PLECS 시뮬레이션의 케이스 온도를 설계된 정밀추정 알고리즘과 연동하였으며 PLECS 시뮬레이션을 사용하여 100 kHz의 스위칭 주파수로 구동하는 벡

컨버터를 설계하였다. 그리고 부하변동 조건을 고려하기 위해 진폭이 10인 60Hz의 섭동전류를 부하에 연결하였고 저주파수 측정환경을 구현하기 위해 칼만필터의 샘플 시간은 1ms로 설정하였다. 설계한 회로와 소자의 파라미터는 표1과 같다.

그림6는 벅 컨버터의 하이사이드 모스펫(High-side MOSEFT)의 케이스 온도 추정 결과이다. 저주파수 측정환경에서 PLECS 시뮬레이션의 고주파수 모스펫 케이스 온도를 정밀하게 추정하고 있음을 확인할 수 있다. 또한 그림7에서 내부 알고리즘의 열 등가회로를 통해 계산된 접합부 온도가 PLECS 시뮬레이션의 접합부 온도값을 추정하고 있음을 확인할 수 있다. 그림 8은 제안된 열 충격 정밀화 알고리즘을 통해 얻은 열 충격 주기와 주기 평균값의 히스토그램과 PLECS 시뮬레이션의 레인플로 집계법을 통해 얻은 결과를 비교한 그림이다. 열 충격 주기 평균 오차는 1도 이내, 열 충격 주기범위는 2도 이내임을 확인할 수 있다.

표 1 설계된 벅 컨버터의 파라미터  
Table 1 Parameter of designed buck converter

|           |                             |                     |          |
|-----------|-----------------------------|---------------------|----------|
| $V_{in}$  | 200[V]                      | Switching frequency | 100[kHz] |
| $I_{out}$ | $10\sin(120\pi t) + 15$ [A] | $C_{out}$           | 470[uF]  |
| Duty      | 0.25                        | $L_{out}$           | 1[mH]    |

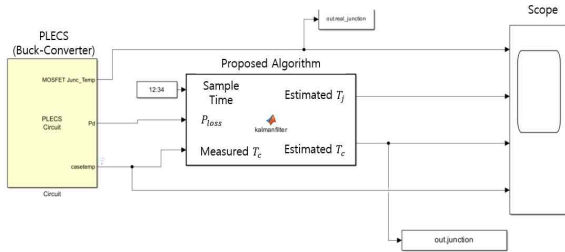


그림5. 제안하는 알고리즘의 실험 환경  
Fig. 5 Experimental set up for proposed algorithm

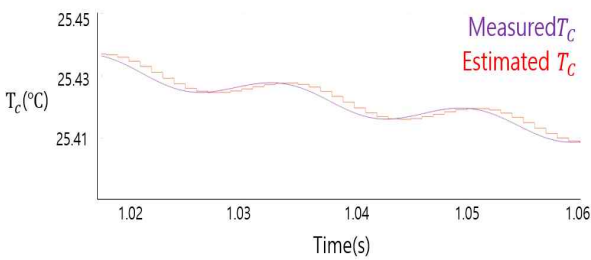


그림6. 케이스 온도 추정 결과  
Fig. 6 Case Temperature estimation result

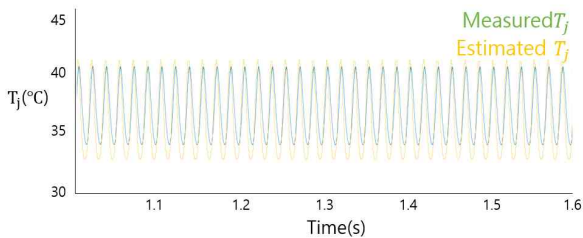


그림7. 접합부 온도 추정 결과  
Fig. 7 Junction temperature estimation result

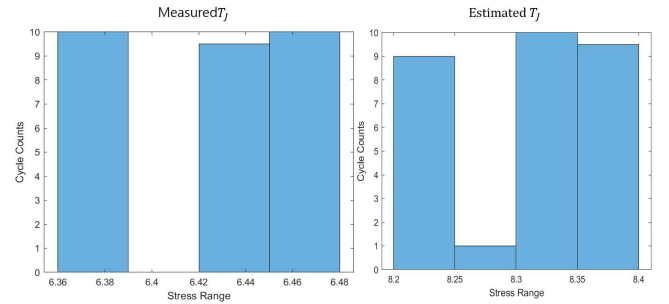


그림8. 레인플로 집계법 알고리즘 결과  
Fig. 8 Rainflow Counting Algorithm result

### 3. 결론

본 논문은 칼만필터를 통해 저주파수 측정 환경에서 고주파수의 케이스 온도를 정밀 추정 하고 접합부 온도를 추정하여 수명추정에 필요한 정보인 열 충격을 정밀화 하는 알고리즘을 제안하였다. 제안하는 방법은 써모커플 및 저주파수의 데이터 수집장치에서 적용 가능하여 기존의 방법보다 경제적인 온도추정 및 수명추정을 구현할 수 있음이 기대된다.

본 연구는 한국에너지기술연구원의 기본사업(C3-2426)을 재원으로 수행한 연구개발과제의 결과입니다.

### 참 고 문 헌

- [1] D. Velazco, G. Clerc, E. Boutleux, F. Wallart and L. Chédot, "IGBT Lifetime Estimation in a Modular Multilevel Converter for bidirectional point-to-point HVDC application," 2020 22nd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'20 ECCE Europe), Lyon, France, 2020.
- [2] K. Zhang and F. Iannuzzo, "Measuring Temperature Swing with Optical Fibers during Power Cycling of Power Components," 2022 IEEE 13th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), Kiel, Germany, 2022.
- [3] M. A. Eleffendi and C. M. Johnson, "Application of Kalman Filter to Estimate Junction Temperature in IGBT Power Modules," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 31, no. 2, pp. 1576-1587, Feb. 2016
- [4] K. Ma, N. He, M. Liserre and F. Blaabjerg, "Frequency-Domain Thermal Modeling and Characterization of Power Semiconductor Devices," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 31, no. 10, pp. 7183-7193, Oct. 2016.
- [5] L. R. GopiReddy, L. M. Tolbert, B. Ozpineci and J. O. P. Pinto, "Rainflow Algorithm-Based Lifetime Estimation of Power Semiconductors in Utility Applications," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 51, no. 4, pp. 3368-3375, July-Aug. 2015.