

열 특성 파라미터 변동성을 고려한 병렬 DC-DC 컨버터의 MOSFET 온라인 접합부 온도 추정 알고리즘

이용경, 채수용
포항공과대학교

An Online Junction Temperature Estimation Algorithm for MOSFETs in Parallel DC-DC converters with Thermal Parameter Variations

Yongkyeong Lee, Suyong Chae
Pohang University of Science and Technology

ABSTRACT

본 논문은 병렬 DC-DC 컨버터의 외부 요인에 의해 변동하는 MOSFET의 열 특성 파라미터를 식별하고 접합부 온도를 온라인으로 추정하는 알고리즘을 제안한다. 기존 열 특성 전기적 파라미터를 이용한 접합부 온도 추정 기법과 달리, 별도의 회로가 필요하지 않으며, 열 파라미터를 온라인 상태에서 식별하여 외부 요인을 고려한 접합부 온도 추정이 가능하다. 제안하는 알고리즘은 PLECS 및 MATLAB/Simulink 시뮬레이션 결과를 통해 검증하였다.

1. 서론

DC-DC 컨버터에 대한 수요가 증가함에 따라, 기존의 효율 향상과 더불어 신뢰성 확보 문제가 주목받고 있다. 고속 스위칭 특성과 스위칭 손실 이점으로 널리 사용되는 MOSFET은 전력변환장치의 주요 고장 원인으로 보고되고 있으며^[1], 신뢰성 확보를 위해 MOSFET의 잔여수명(Remaining useful lifetime, RUL)을 정밀히 추정해야 한다. RUL은 접합부 온도로 추정할 수 있어, 접합부 온도는 신뢰성 확보의 핵심으로 여겨진다. MOSFET의 접합부 온도는 내부 칩의 온도로, 운용 중인 컨버터의 접합부 온도를 측정하기 위해 소자의 케이스를 제거해야 한다. 이러한 조건 등으로 현장 적용의 어려움이 존재하며, 접합부 온도를 추정하는 기법이 널리 사용되고 있다. 접합부 온도 추정 기법은 일반적으로, 접합부 온도와 함수적 관계를 갖는 열 특성 전기적 파라미터(Temperature-sensitive electrical parameters, TSEPs)를 사용하는 기법과 열 모델 기법을 사용하여 접합부 온도를 추정하는 기법이 사용된다^[2]. TSEPs는 파라미터 측정을 위한 부가적인 회로가 필요하지만, 열 모델 기법은 열 특성 파라미터인 열저항과 열용량으로 구성 되어있어, 간단한 회로 분석을 통해 접합부 온도를 추정할 수 있다. 하지만, 열 특성 파라미터는 운용 조건 및 노화 등의 외부 요인에 따라 변동하는 특성이 있으며^[3], 접합부 온도 추정 오차의 원인이 될 수 있다.

기존의 연구에서는 MOSFET 열 파라미터 식별을 위해 컨버터 부하에 전력공급이 중단되어야 한다^[3]. 본 논문에서 제안하는 알고리즘은 병렬 컨버터의 이중화(Redundancy) 특성으로 온라인에서 MOSFET의 열 파라미터를 식별할 수 있다. 그리고 식별된 열 파라미터와 칼만 필터를 이용하여 접합부 온도를 정밀히 추정할 수 있다. 제안하는 알고리즘은 병렬 460W급 병렬 DC-DC 벡 컨버터의 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

2. 본론

2.1 열 파라미터 식별 기법

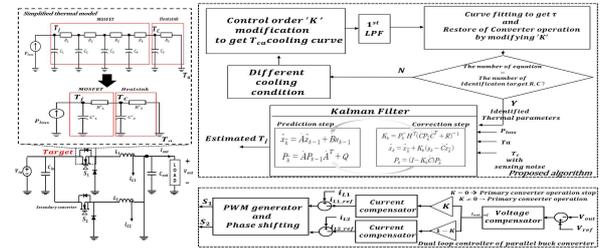


그림 1 병렬 DC-DC 벡 컨버터 대상 제안 알고리즘 구성도
Fig. 1 Block diagram of the proposed algorithm

열 모델은 열 특성 파라미터에 해당하는 열저항, 열용량, 그리고 MOSFET의 전력손실로 표현할 수 있으며, 온라인에서 연산량의 감소와 회로해석의 이점으로 그림 1과 같이 2차 네트워크로 구성된 열 모델로 간단히 표현할 수 있다^[3]. 무전원 열 모델의 시간에 대한 케이스 온도와 주변 온도의 차이를 나타내는 함수 $T_{ca}(t)$ 의 시상수는 열 파라미터와 관계가 있으며, 그 관계를 통해 열 파라미터를 식별할 수 있다. 무전원 열모델의 $T_{ca}(t)$ 는 아래의 미분방정식으로 표현할 수 있다^[3].

$$\frac{d^2 T_{ca}(t)}{dt^2} + k_1 \frac{dT_{ca}(t)}{dt} + k_0 T_{ca}(t) = 0 \quad (1)$$

$$k_1 = \frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_1 C_2} + \frac{1}{R_2 C_2} \quad (2)$$

$$k_0 = \frac{1}{R_1 C_1 R_2 C_2} \quad (3)$$

여기에서 $R_i', C_i' (i = 1, 2)$ 는 간단히 표현된 열 모델의 i 번째 네트워크에 해당하는 열저항과 열용량이다. 간단히 표현된 열 모델의 $T_{ca}(t)$ 의 무전원 응답 특성은 케이스 온도 측정 잡음을 제거하기 위해 사용한 저주파수 통과 필터의 계수 a_{LPP} 와 시상수 τ_{LPP} 를 고려하여 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$T_{ca}(t) = a_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} + a_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}} + a_{LPP} e^{-\frac{t}{\tau_{LPP}}} \quad (4)$$

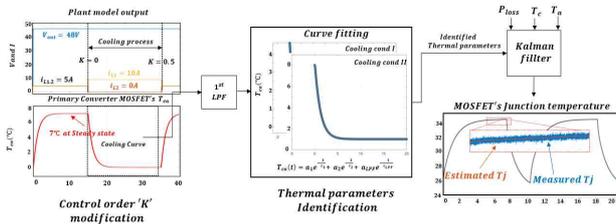


그림 2 시뮬레이션 결과
Fig. 2 Simulation results

표 1 병렬 벅 DC-DC 컨버터 파라미터 및 열 파라미터 식별 결과
Table 1 Parallel DC-DC buck converter parameters and Thermal parameters identification results

System Parameter	Thermal parameter	MOSFET				Heatsink			
		R_1 [J/W]	C_1 [K]	R_2 [J/W]	C_2 [K]	R_3 [J/W]	C_3 [K]	R_4 [J/W]	C_4 [K]
Vin	80V	Cooling condition I							
		Real value							
Vout	48V	1	0.1	2	0.2	Identified value			
		1.0034	0.0999	2	0.2001	Cooling condition II			
Iout	9.6A	Real value							
		1	0.1	3	0.3	Identified value			
Lout	1mH	1	0.0999	3	0.3001	Cooling condition I			
		1.0034	0.0999	3	0.3001	Cooling condition II			

$$k_1 = \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} \quad (5)$$

$$k_0 = \frac{1}{\tau_1 \tau_2} \quad (6)$$

여기에서, $T_{ca}(t)$ 를 구성하는 각 항의 계수 a_i ($i=1,2$)와 시상수 τ_i 는 식별 대상의 MOSFET을 포함하는 병렬 컨버터의 정지를 통해 냉각 곡선을 획득하고, 이를 Curve fitting 하여 얻을 수 있다. 그리고 식 (5),(6)의 연립 방정식의 해를 구하기 위해 방열판의 열 파라미터가 냉각 조건에 의해 변동하는 특성을 이용할 수 있다^[3]. 열 모델에서 방열판의 열저항은 아래와 같이 식별할 수 있다.

$$R_2 = \frac{T_c - T_a}{P_{loss}} \quad (7)$$

여기에서 R_2 는 방열판의 열저항, T_c 는 MOSFET 케이스 온도, T_a 는 주변 온도, P_{loss} 는 MOSFET의 전력손실이다. 식별 대상 열 파라미터와 시상수 및 열 파라미터 관계로 표현된 식의 개수를 일치시키기 위해 냉각 조건을 변경하여 관계식과 식별 대상 열 파라미터의 개수를 일치시켜 열 파라미터를 식별한다.

본 논문에서는 2차 네트워크로 간단히 표현된 열 모델의 식별 대상 파라미터와 관계식의 개수를 일치시키기 위해, 전체 병렬 컨버터 운전특성에 영향을 주지 않는 2번의 냉각 과정을 거쳐 열 파라미터를 식별한다.

2.2 칼만필터를 활용한 접합부 온도 추정 기법

칼만 필터는 센서의 측정 잡음과 모델 오차에 해당하는 공정 잡음을 고려하여 상태변수를 추정할 수 있는 알고리즘이다. 본 논문에서 제안하는 알고리즘은 냉각 곡선을 활용하여 식별된 열 파라미터로 칼만 필터를 설계하고 케이스 온도를 측정하여 접합부 온도를 추정할 수 있다.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (8)$$

$$y = Cx \quad (9)$$

$$A = \begin{pmatrix} -\frac{1}{R_1 C_1} & \frac{1}{R_1 C_1} \\ \frac{1}{R_1 C_2} & -\frac{1}{C_2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} \frac{1}{C_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_2 C_2} \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$C = (0 \ 1) \quad u = \begin{pmatrix} P_{loss} \\ T_a \end{pmatrix}$$

여기에서, 상태변수 x_i ($i=1,2$)는 온도 벡터로 열 모델의 노드 전압에 해당한다. 그림 1의 $\hat{A}, \hat{B}, \hat{C}$ 는 식 (10)의 A, B, C 를 오일러 방법으로 근거하여 이산화된 행렬이며, \hat{x}_k 는 k 번째에서 예측된 상태변수, \hat{x}_k 는 k 번째에서 추정된 상태변수, \hat{P}_k 는 k 번째에서 예측된 오차 공분산, P_k 는 k 번째에서 계산된 오차 공분산이다. 그리고 K_k 는 k 번째에서 계산된 칼만 이득, y_k 는 k 번째 측정값, Q 는 공정 잡음이며 R 은 측정 잡음에 해당한다. 그림 1과 같이 칼만 필터는 예측 단계와 보정 단계를 재귀적으로 반복하며, P_{loss} 와 케이스 온도 T_c , 주변 온도 T_a 를 이용하여 접합부 온도를 정밀 추정할 수 있다.

본 논문에서 제안하는 알고리즘은 냉각 곡선을 통해 식별된 열 파라미터와 칼만 필터를 이용하여 접합부 온도를 정밀히 추정할 수 있다.

2.3 시뮬레이션 결과

제안하는 알고리즘은 병렬 DC-DC 벅 컨버터의 MOSFET을 대상으로 MATLAB/Simulink 시뮬레이션을 이용하여 검증하였다. 그림 2와 같이 1번째 컨버터 운전 정지에 해당하는 지령을 제거의 기준값으로 설정한다. 그리고 저주파수 통과 필터로 측정 잡음을 제거한 $T_{ca}(t)$ 를 획득한다. 획득한 $T_{ca}(t)$ 를 Curve-fitting하여 열 파라미터를 식별하고 제어 지령으로 1번 컨버터의 운전을 복원한다. 그리고 식별된 열 파라미터 기반의 칼만 필터로 접합부 온도를 정밀 추정할 수 있다.

표1은 시뮬레이션 환경에서 설계된 병렬형 벅 컨버터의 파라미터와 식별된 열 파라미터와 시뮬레이션 환경에서 설정된 열 파라미터를 비교한 결과를 나타낸다. 그림 2는 냉각 조건 II의 식별된 열 파라미터를 기반으로 설계된 칼만 필터로 추정된 접합부 온도 추정 결과이다. 표1에서 열 파라미터 식별 오차는 1% 이내임을 확인할 수 있다. 그림 2에서 측정 잡음과 공정 잡음이 고려된 상황에서, 칼만 필터로 접합부 온도를 정밀 추정하고 있음을 확인할 수 있다.

3. 결론

본 논문에서는 병렬 DC-DC 컨버터의 이중화 특성을 이용하여 외부 요인에 의해 변동하는 열 파라미터를 온라인으로 식별하고 칼만 필터로 외부 잡음을 고려한 접합부 온도를 추정할 수 있는 기법을 제안하였다. 제안하는 알고리즘의 시뮬레이션 결과를 근거로 접합부 온도를 분석하여 MOSFET의 RUL을 정밀 추정할 수 있음이 기대된다.

이 논문은 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2023-00234707, 전력계통 안정화를 위한 연료전지 및 수전해 계통 연계 운영기술 개발)

참고 문헌

- [1] Ramez, MKP Mirzamed, and Ml Wasem Ahmad "Advances in Capacitor Health Monitoring Techniques for Power Converters: A Review" IEEE Access 11 (2023): 13350-13356
- [2] Gachowska, Tanya Kiriakova et al. "A real-time thermal model for monitoring of power semiconductor devices" IEEE Transactions on Industry Applications 51.4 (2015): 3361-3367
- [3] Zheng, Shui, et al. "Measurement of thermal parameters of SC MOSFET module by case temperature" IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics 8.1 (2019): 311-322