

인버터 시스템에서 전력반도체 소자의 온도 상승을 고려한 모델 예측 제어

이윤진*, 최혜원*, 이교범*
아주대학교

Model Predictive Control to Reduce the Junction Temperature of Power Devices in an Inverter System

Yun-Jin Lee*, Hye-Won Choi*, and Kyo-Beum Lee*
Ajou University*

ABSTRACT

본 논문에서 인버터 시스템을 구성하는 전력반도체 소자의 온도 상승을 고려한 모델 예측 제어를 제안한다. 전력반도체 소자의 온도는 인버터의 스위칭 및 도통 동작에 따른 손실 전력에 의해 상승한다. 손실 전력과 온도 상승의 관계는 Foster RC network 모델을 이용하여 정립한다. 모델 예측 제어를 활용하여 인가되는 전압 벡터에 따른 다음 주기의 손실 전력을 예측한다. 출력 전류와 예측하는 손실 전력으로 구성된 비용함수를 최소화하는 전압 벡터를 선택하여 온도 상승을 억제한다. 열적 회로 해석을 통해 전력반도체 소자의 감소된 손실 전력에 따른 온도 상승의 저감을 분석한다. 온도 상승을 고려한 모델 예측 제어의 타당성을 시뮬레이션 결과를 통해 검증한다.

1. 서론

인버터 시스템을 구성하는 전력반도체 소자는 스위칭 동작의 특성에 따라 손실 전력이 결정된다. 전력반도체 소자로 구성되는 전력변환 장치의 효율을 저하시키는 원인은 스위칭 및 도통 동작에 따른 손실 전력이다^[1]. 인버터 시스템에서 발생한 전력 손실은 전력반도체 소자의 접합부 온도 상승을 야기한다. 이는 인버터 시스템의 효율을 감소시키므로 효율 향상을 위해 전력 손실에 따른 온도의 상승을 저감해야 한다^[2].

모델 예측 제어는 마이크로프로세서의 기술 발전에 따라 다양한 인버터 시스템에 적용되고 있다^[3]. 모델 예측 제어는 부하단의 모델링을 통해 다음 제어 주기의 예측 전류와 지령 전류로 구성된 비용함수의 크기가 최소값이 되도록 전압 벡터를 인가한다^[4]. 이는 실제 전류가 지령 전류를 가장 가깝게 추종할 수 있도록 전압 벡터를 인가하므로 빠른 속응성을 가진다^[5]. 모델 예측 제어의 비용함수는 다양한 요소의 제어항으로 구성할 수 있다. 전력반도체 소자를 구성하는 인버터 시스템에서 다양한 모델 예측 제어를 통해 손실 전력에 따른 온도 상승을 저감한다.

본 논문에서 전력 손실을 고려하는 비용함수로 구성된 모델 예측 제어를 제안한다. 전력변환 장치를 구성하는 전력반도체 소자의 손실을 분석하고, 스위칭 및 도통 동작에 따른 전력 손실을 통하여 발생하는 온도를 모델링한다. 모델 예측 제어의 전력 손실을 고려하지 않은 비용함수와 전력 손실을 고려한 비용함수를 비교하여 전력 손실에 따른 온도 저감의 성능을 확인한다. 전력반도체 소자의 온도 상승을 억제하는 모델 예측 제어의 타당성을 시뮬레이션 결과를 통해 검증한다.

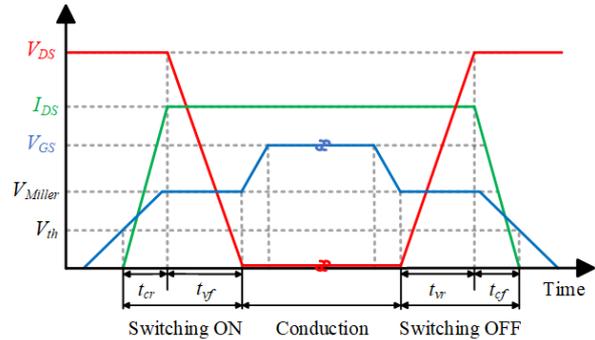


그림1 전력반도체 소자의 스위칭 및 도통 동작에 따른 파형
Fig.1 Waveforms of power semiconductor device switching and conduction operations

2. 전력 반도체 소자의 손실 분석 및 온도 모델링

그림 1은 전력반도체 소자의 스위칭 및 도통 동작의 파형을 나타낸다. 전력 손실은 스위칭 동작할 때 발생하는 스위칭 손실 P_{sw} 와 도통 동작할 때 발생하는 도통 손실 P_{cond} 로 분류된다. 식 (1)은 I_{DS} 가 $R_{DS,on}$ 을 통해 흐를 경우 P_{cond} 를 나타낸다.

$$P_{cond} = I_{DS}^2 \cdot R_{DS,on} \cdot S(k) \cdot S(k-1) \quad (1)$$

스위칭 손실 P_{sw} 은 온 손실 P_{on} 과 오프 손실 P_{off} 로 표현한다. 스위치가 온 되는 구간의 경우 I_{DS} 의 상승 구간 t_{cr} 에서 손실 전력과 V_{DS} 의 하강 구간 t_{vf} 에서 손실 전력을 더하여 P_{on} 을 표현한다. 스위치가 오프 되는 구간에 대한 손실 전력 P_{off} 은 온 되는 구간과 동일한 방법으로 표현한다. 식 (2)와 (3)은 각각 P_{on} 과 P_{off} 를 나타낸다.

$$P_{on} = \frac{1}{2} \cdot V_{DS} \cdot I_{DS} \cdot (t_{cr} + t_{vf}) \cdot f_{sw} \cdot [S(k) - S(k-1)] \quad (2)$$

$$P_{off} = \frac{1}{2} \cdot V_{DS} \cdot I_{DS} \cdot (t_{cf} + t_{vr}) \cdot f_{sw} \cdot [S(k) - S(k-1)] \quad (3)$$

전력반도체 소자에서 P_{cond} 가 생성될 경우 P_{sw} 가 발생하지 않으며, 그 반대의 경우도 동일하다. 한 주기 내의 전력 손실 P_{loss} 은 식 (4)와 같이 P_{cond} 와 P_{sw} 의 합으로 나타낸다.

$$P_{loss} = P_{cond} + P_{sw} \quad (4)$$

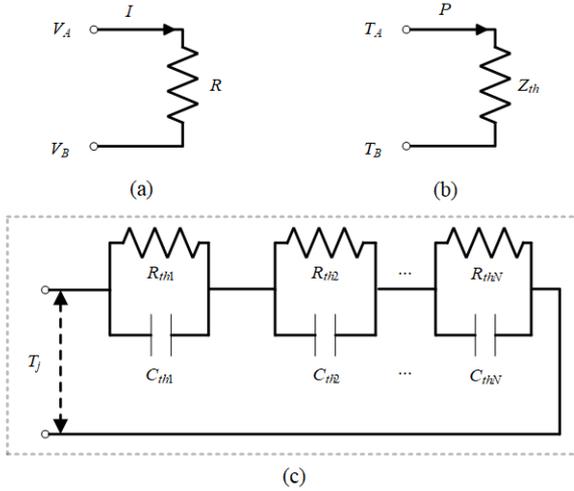


그림2 전기적 및 열적 등가 회로 비교 (a) 전기적 회로, (b) 열적 회로, (c) 포스터 RC 네트워크 모델

Fig.2 Comparison of electrical and thermal equivalent circuits (a) Electrical circuit, (b) Thermal circuit, (c) Foster RC network model

그림 2는 전력반도체 소자의 온도를 모델링하기 위한 전기적 및 열적 등가 회로와 Foster RC network 모델을 나타낸다. 그림 2(a)의 전기적 등가 회로에서 저항 R 에 흐르는 전류와 양 끝단의 전압 차이는 식 (5)와 같다. 전기적 등가 회로의 해석과 동일한 방법으로 그림 2(b)의 열 임피던스 Z_{th} 에서 발생하는 전력과 양 끝단의 온도 차이는 식 (6)과 같다.

$$V_A - V_B = I \cdot R \quad (5)$$

$$T_A - T_B = P \cdot Z_{th} \quad (6)$$

그림 2(c)는 열 형태로 방출되는 전력반도체 소자의 전력 손실을 모델링하기 위하여 Foster RC network 모델을 나타낸다. R_{th} 는 온도 변화의 크기를 결정하며, 각 층의 열 관성 효과를 반영하기 위해 열 용량 C_{th} 를 이용한다. 물질의 특성을 반영하는 C_{thn} 과 R_{thn} ($n=1, 2, 3, \dots, N$)로 구성된 하나의 층에 전력이 전달되며, 각 층의 합으로 접합 온도를 표현한다. Foster RC network에서 각 층의 열 전도도를 모델링하기 위하여 식 (7)과 같이 주파수 영역으로 변환한다.

$$Z_{th}(s) = \frac{1}{sC_{th} + \frac{1}{R_{th}}} \quad (7)$$

식 (8)은 Foster RC network를 이용하여 열 임피던스 Z_{th} 와 발생한 전력 손실 P_{loss} 로 표현된다. 식 (8)을 라플라스 역변환 과정을 통해 다시 정리하면 식 (9)와 같이 접합부의 온도를 구할 수 있다. 여기서 T_s 는 샘플링 주기이다.

$$T_j = \sum_{n=1}^N P_{loss} \cdot Z_{thn} = \sum_{n=1}^N \frac{P_{loss}}{s} \cdot \frac{1}{sC_{thn} + \frac{1}{R_{thn}}} \quad (8)$$

$$T_j = \sum_{n=1}^N P_{loss} \cdot R_{thn} \left(1 - e^{-\frac{T_s}{R_{thn} C_{thn}}} \right) \quad (9)$$

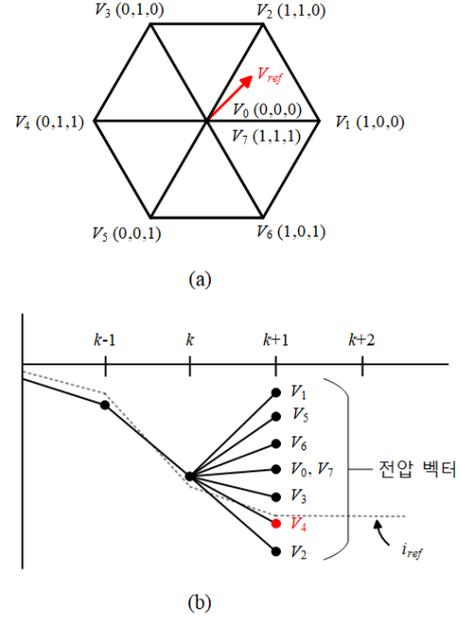


그림3 모델 예측 제어의 동작 원리 (a) 전압 벡터도, (b) 비용함수를 최소화 하는 전압 벡터 선정 원리

Fig.3 Principle of model predictive control (a) Voltage vector diagram, (b) Principle of selecting voltage vector that minimize the cost function

3. 온도 상승을 고려한 모델 예측 제어

그림 3은 모델 예측 제어를 위한 전압 벡터도와 비용함수를 최소화 하는 전압 벡터를 나타낸다. 모델 예측 제어는 다음 제어 주기의 실제 출력이 지령 값에 가장 가깝게 추종하여 비용함수의 크기가 최소가 되도록 전압 벡터를 결정하는 방법이다. 그림 3(b)에서 $k+1$ 번째 지령 전류와 $k+1$ 번째 실제 전류의 차이가 최소가 되게 하려면 빨간색으로 표시한 V_4 가 선택된다. 전동기 구동용 인버터 시스템의 부하 모델링은 식 (10)과 같이 정지 좌표계의 고정자 전압 방정식으로 표현된다. 고정자 권선의 전류 변화량은 다음 제어 주기의 전류와 현재 제어 주기의 전류를 비교하여 식 (11)과 같다.

$$\begin{cases} v_{ds}^s = L_d \frac{di_{ds}^s}{dt} + R_s i_{ds}^s - \omega_n L_q i_{qs}^s + \omega_n \phi_s \sin \theta \\ v_{qs}^s = L_q \frac{di_{qs}^s}{dt} + R_s i_{qs}^s + \omega_n L_d i_{ds}^s - \omega_n \phi_s \cos \theta \end{cases} \quad (10)$$

$$\frac{di_{dqs}^s}{dt} = \frac{i_{dqs}^s(k+1) - i_{dqs}^s(k)}{T_s} \quad (11)$$

식 (12)는 식 (10)과 식 (11)을 통하여 이산 시간 모델로 다음 제어 주기의 실제 전류를 표현한다. 다음 제어 주기의 실제 전류와 지령 전류의 오차를 비교하여 비용함수를 나타내면 식 (13)과 같다.

$$\begin{cases} i_{ds}^s(k+1) = i_{ds}^s(k) + \frac{T_s}{L_d} v_{ds}^s(k) - \frac{R_s}{L_d} i_{ds}^s(k) + \frac{\omega_n L_q}{L_d} i_{qs}^s(k) + \frac{\omega_n \phi_s}{L_d} \sin \theta \\ i_{qs}^s(k+1) = i_{qs}^s(k) + \frac{T_s}{L_q} v_{qs}^s(k) - \frac{R_s}{L_q} i_{qs}^s(k) - \frac{\omega_n L_d}{L_q} i_{ds}^s(k) - \frac{\omega_n \phi_s}{L_q} \cos \theta \end{cases} \quad (12)$$

$$g_{cost} = |i_{ds}^* - i_{ds}(k+1)| + |i_{qs}^* - i_{qs}(k+1)| \quad (13)$$

표 1 시뮬레이션 파라미터

Table 1 Simulation parameters

정격 출력	11 [kW]	DC 전압	600 [V]
회전 속도	1200 [rpm]	고정자 저항	0.349 [Ω]
극 수	6	d축 인덕턴스	13.17 [mH]
제어 주기	100 [μ s]	q축 인덕턴스	15.6 [mH]

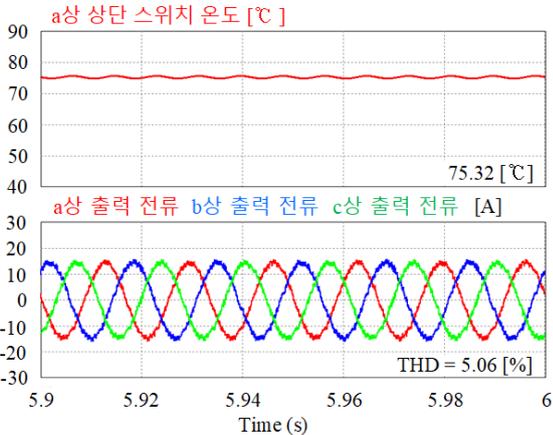
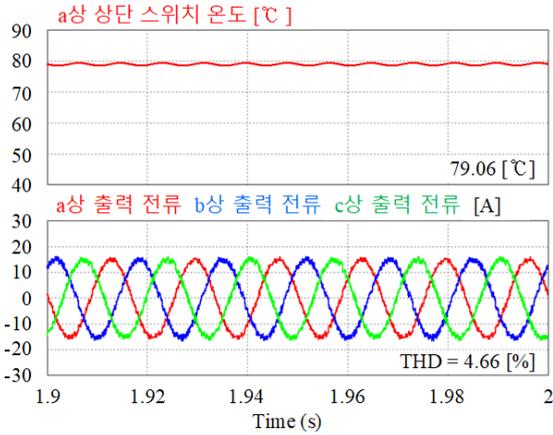


그림4 시뮬레이션 결과 (a) 기존 모델 예측 제어, (b) 제안하는 모델 예측 제어

Fig.4 Simulation results (a) Conventional model predictive control, (b) Proposed model predictive control

앞서 기술한 전류 제어를 위한 모델 예측 제어의 비용함수에 손실을 고려하면 인버터 시스템에서 전력반도체 소자의 온도 상승을 고려한 모델 예측제어의 구현이 가능하다. 다음 제어 주기의 전력 손실은 식 (14)와 같이 표현되고 비용 함수 $g_{cost,2}$ 는 식 (15)와 같다. λ_c 와 λ_p 는 전류 제어 가중치와 손실 저감의 가중치이다.

$$P_{loss}(k+1) = P_{on}(k+1) + P_{off}(k+1) + P_{cond}(k+1) \quad (14)$$

$$g_{cost,2} = \lambda_c \cdot \left(\left| i_{ds}^* - i_{ds}(k+1) \right| + \left| i_{qs}^* - i_{qs}(k+1) \right| \right) + \lambda_p \cdot \left(\left| 0 - P_{loss}(k+1) \right| \right) \quad (15)$$

4. 시뮬레이션

전력 손실을 고려한 비용함수를 통하여 접합부 온도 상승을 억제하는 모델 예측 제어의 성능 및 타당성을 검증하기 위해 PSIM으로 시뮬레이션을 진행하였다. 전동기 구동용 인버터 시스템의 시뮬레이션 파라미터는 표 1과 같다. 그림 4는 모델 예측 제어를 통하여 전력반도체 소자의 접합부 온도의 변화를 나타낸다. 그림 4(a)는 전류 제어 비용함수만으로 구성되며 λ_p 가 0으로 손실이 고려되지 않은 비용함수의 접합 온도가 79.06 [°C]이다. 그림 4(b)는 λ_p 가 0.13으로 손실이 고려된 비용함수의 접합 온도가 75.32 [°C]이다. 반면에 THD는 4.66 [%]에서 5.06 [%]로 증가하였다. 이는 0.4 [%] 정도의 THD 상승을 감당할 수 있는 시스템이라면 4 [°C] 정도의 온도 저감 효과는 의미있다고 판단된다.

5. 결론

본 논문에서 인버터 시스템을 구성하는 전력반도체 소자의 온도 상승을 고려한 모델 예측 제어를 제안하였다. 전력반도체 소자의 스위칭 동작에 따른 전력 손실에 의하여 접합부의 온도가 상승한다. 모델 예측 제어의 전력 손실을 고려한 비용함수를 통하여 전력반도체 소자의 접합부 온도 상승을 억제하였다. Foster RC network 모델을 통하여 전력 손실에 의한 접합부의 온도 상승을 변환하였다. 전력 손실을 고려하는 비용함수로 구성된 모델 예측 제어의 타당성을 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

참고 문헌

- [1] X. Huang, Z. Liu, F. C. Lee, and Q. Li, "Characterization and Enhancement of High-Voltage Cascode GaN Devices," *IEEE Trans. Electron Devices.*, vol. 62, no. 2, pp. 270–277, Feb. 2015.
- [2] L. Wang, J. He, T. Han, and T. Zhao, "Finite Control Set Model Predictive Control with Secondary Problem Formulation for Power Loss and Thermal Stress Reductions," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 56, no. 4, pp. 4028–4039, Jul./Aug. 2020.
- [3] S. Vazquez, J. Rodriguez, M. Rivera, L. G. Franquelo, and M. Norambuena, "Model Predictive Control for Power Converters and Drives: Advances and Trends," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 64, no. 2, pp. 935–947, Feb. 2017.
- [4] P. Wang, X. Yuan, and C. Zhang, "An Improved Model Free Predictive Current Control for PMSM with Current Prediction Error Variations," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 54537–54548, 2022.
- [5] M.-H. Nguyen, S.-S. Kwak, and S.-S. Choi, "Model Predictive Control Algorithm for Prolonging Lifetime of Three-Phase Voltage Source Converters," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 72781–72802, 2023.