

# 단상 인버터 열처리 시스템의 제어기법

양시경, 후인 안 뚜언, 전태원, 이흥희  
울산대학교

## Control Methods of the Single-Phase Inverter Heat Treatment System

S.G.Yang, H.A.Tuan, T.W.Chun, H.H.Lee  
Ulsan University

### ABSTRACT

The methods for adjusting the output voltage as well as the heater temperature of a single phase inverter for the heat treatment are proposed. The output voltage of the single phase inverter is limited to 60 V for safety. The time constant of heater temperature is much higher than that of the output voltage. The stability may be deteriorated due to such large time constant difference. In order to ensure the stability, a hysteresis on/off control method for the heater temperature control is used. The performances for the proposed methods are verified with the experiments.

### 1. 서론

구조물 용접부분의 급격한 온도상승을 방지하기 위해 용접 전에 용접부위에 온도를 상승시킬 필요가 있다. 그리하여 산업 현장에서는 변압기를 사용한 전력제어기를 사용하여 60V 크기의 출력전압을 ON/OFF 제어를 통해 세라믹 히터의 온도를 제어하여 용접부위를 가열한다. 변압기를 사용한 전력제어기는 큰 중량으로 인해 작업 효율이 저하되고 입력전압에 따라 권선비가 다른 변압기를 사용하여야 한다는 단점이 있다.

본 논문에서는 변압기형 전력변압기의 문제점을 해결하기 위하여, 단상 PWM인버터를 사용한 열처리용 전력변환기를 개발하고 히터온도 및 인버터 출력전압을 동시에 안정적으로 제어하는 기법을 제시한다. 히터온도를 제어하기 위하여 PID제어기의 최적이득 설계등으로 히터온도의 응답특성을 향상시키는 기법이 제시되었다.<sup>[1]</sup> 그런데 열처리용 인버터시스템은 시정수가 상당히 큰 히터온도와 함께 상당히 낮은 시정수를 가지는 출력전압을 동시에 제어하여야하므로 히터온도의 응답특성보다는 히터온도 및 출력전압 제어 시스템의 안정성이 더 중요하다. 그리고 32 bit DSP를 사용한 실험을 통하여 히터온도와 인버터 출력전압제어 기법 성능을 검증한다.

### 2. 인버터를 사용한 히터온도 제어기법

#### 2.1 히터온도 및 인버터 출력전압 개루프 제어

그림 1은 히스테리시스 온/오프 제어방식의 히터온도 제어와 인버터 출력전압의 개루프 제어 블록도를 보인 것이다. 먼저 히터온도 히스테리시스 온/오프 제어방식은 다음과 같다.

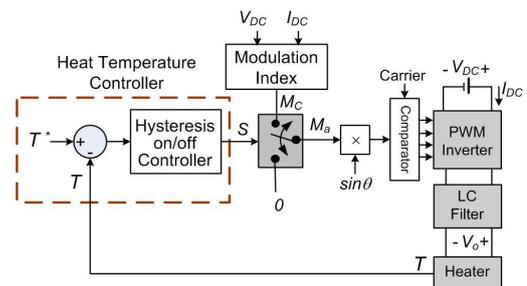


그림 1 히터온도 제어 및 인버터 출력전압의 펄스폭 제어 블록도

Fig. 1 Block diagram of heater temperature control with open-loop control of inverter output voltage

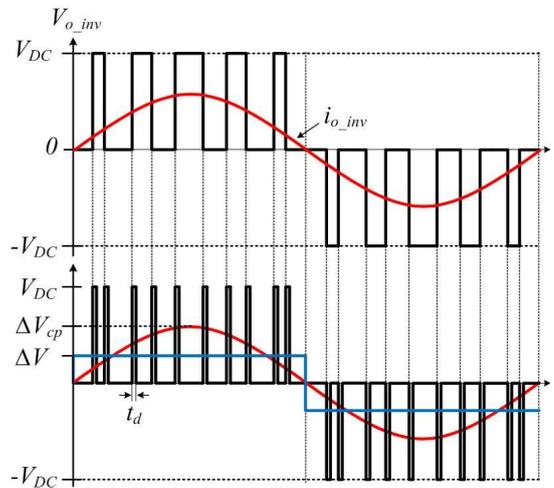


그림 2 열처리 시스템 인버터의 데드 타임에 의한 영향  
Fig. 2 Effects of dead-time of inverter for heater treatment

$$T < (T^* - \Delta T) \text{ 일 경우 } M_a = M_c$$

$$T \geq (T^* + \Delta T) \text{ 일 경우 } M_a = 0$$

여기서  $T^*$ 와  $T$ 는 각각 기준 히터온도와 히터온도이고,  $\Delta T$ 는 히스테리시스 온도 값이며  $M_a$ 는 변조계수이다. 히터온도가 기준온도에서 히스테리시스 온도를 뺀 온도보다 낮을 경우에는 PWM 인버터의 변조계수를 조정하여 인버터 출력전압 즉 히터 입력전압을 60 V로 인가하여 히터온도를 상승시킨다. 다음

은 히터온도가 기준온도에서 히스테리시스 온도를 더한 온도보다 높을 경우에는 PWM 인버터의 변조계수를 0으로 조정하여 인버터 출력전압 즉 히터 입력전압을 0 V로 인가함으로써 히터온도를 하강시킨다. 따라서 히터온도를 기준온도를 중심으로 히스테리시스 온도 범위 안에서 제어할 수 있다.

## 2.2 인버터 전압강하 보상기법

입력교류 전압 또는 커패시터 전압 크기에 관계없이 인버터 출력전압을 정확하게 60 V로 출력시키기 위하여 변조계수 계산 시 인버터 내 전압강하를 고려하여야 한다. 인버터 내 전압강하는 인버터 스위칭소자 즉 IGBT의 전압강하와 인버터의 압단락 방지를 위하여 상단 및 하단의 IGBT의 PWM신호에 데드시간을 첨가하며, 이 데드시간에 의한 전압강하로 구성된다.

먼저 IGBT의 전압강하는 IGBT 도통 시 IGBT의 포화전압  $V_{CE(sat)}$ 와 저항성분  $r_{ce}$ 로 인한 순방향 전압강하가 발생되며, 도통된 두 IGBT에 의한 전압강하  $V_F$ 는 다음 식과 같다.

$$V_F = 2(V_{CE(sat)} + r_{CE}I_C) \quad (1)$$

다음은 인버터 압단락방지를 위한 데드시간에 의해 전압강하가 발생되며, 인버터 출력 전류의 방향에 따라 데드시간에 의한 전압강하 분을 계산하여 인버터 출력전압에 이 전압강하 분을 추가하는 방법<sup>[2]</sup> 등이 발표되었다.

본 논문에서는 데드시간에 의한 전압강하 분을 계산하는 방법을 기반으로 열처리용 인버터시스템에서 데드시간에 의한 전압강하 값을 계산한다. 그림 2는 인버터 출력전압 및 전류파형과  $t_d$  데드시간에 의한 전압강하성분을 보인 것이다. 이 데드시간에 의한 전압강하분을 평균하면 크기가  $\Delta V$ 인 구형파가 되며 이 구형파에서 기본파의 피크치  $\Delta V_{CP}$  식은 다음과 같다.

$$\Delta V_{CP} = \frac{4}{\pi}(2f_s \cdot t_d \cdot V_{DC}) \quad (2)$$

인버터 출력전압을 60 V로 출력시키기 위하여 직류링크 전압과 함께 식(2)에서 표현된 IGBT 포화전압 전압강하와 식(3)의 데드시간 전압강하를 보상하여 계산된 변조계수 값  $M_C$  은 다음 식과 같다.

$$M_C = \frac{\sqrt{2} \times 60V + \Delta V_{CP}}{V_{DC} - V_F} \quad (3)$$

## 3. 실험결과

실험을 통하여 본 논문에서 제시한 열처리용 인버터제어 시스템의 히터온도 및 출력전압 제어에 대한 성능을 검증하였다. 그림 3은 출력전압 개루프제어 시 인버터 전압강하를 보상전과 보상후의 출력전압 및 변조지수를 보인 것이다. 보상 전에는 출력전압의 실효치가 56V로 오차가 있으며, 보상 후에는 변조신호(변조계수)가 증가함에 따라 출력전압의 실효치가 60 V가 됨으로 인버터 전압강하의 보상 효과를 확인할 수 있다.

그림 4는 출력전압 개루프제어 시 기준온도가 200 도이며 히스테리시스 온도가 2 도일 경우, 기준온도 및 히터온도와 출력전압 실험파형을 보인 것이다. 히터온도가 198 도에서 히터

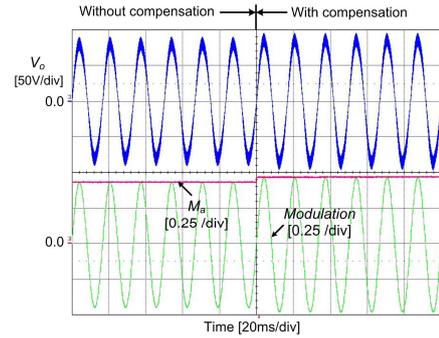


그림 3 개루프 출력전압 제어로 인한 전압강하 보상 효과  
Fig. 3 Effects of compensating for voltage drop with open-loop output voltage control

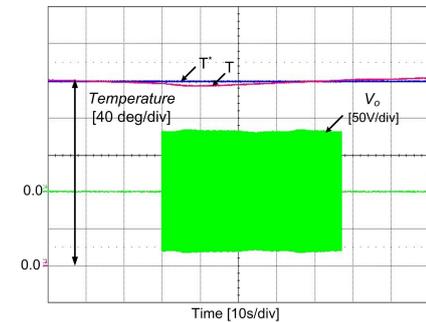


그림 4 히터온도와 개루프 출력전압 제어의 실험결과  
Fig. 4 Experimental result for heater temperature and open-loop output voltage controls

온도를 상승시키기 위하여 출력전압을 60 V로 인가되었다. 그리고 히터온도가 202 도에서 히터온도를 하강시키기 위하여 출력전압을 0 V가 인가됨을 알 수 있다. 여기서 세라믹히터 특성상 출력전압을 60 V로 인가함에도 불구하고 온도가 약 2 도 더 감소되다가 상승하였으며, 출력전압을 0 V로 인가함에도 불구하고 온도가 약 2도 더 증가되다가 감소됨을 알 수 있다.

## 4. 결론

본 논문에서는 단상 PWM 인버터를 사용한 열처리 시스템의 히터온도 및 출력전압 개루프 제어기법을 제시하였다. 히터온도는 히스테리시스 온/오프 제어기법과 인버터 전압강하를 보상하는 출력전압 개루프 제어기법으로서 출력전압 크기의 정밀도를 향상시켰다. 실험을 통하여 히터온도 및 인버터 출력전압의 제어성능의 우수성을 확인하였다.

## 참고 문헌

- [1] D. A. R. Wati and R. Hidayat, "Genetic algorithm based PID parameters optimization for air heater temperature control," International Conference on Robotics, Biomimetics, Intelligent Computational Systems, pp. 30-34, Nov. 2013.
- [2] Y. Murai, T. Watanabe, and H. Iwasaki, "Waveform distortion and correction circuit for PWM inverters with switching lag times," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA 23, No. 5, pp. 881-886, Sep. 1987.