

# 임의 파형 발생기를 위한 단일 루프 전압 제어기 설계

김현식, 지승준, 설승기  
서울대학교

## Design of the Single-loop Voltage Controller for Arbitrary Waveform Generator

Hyeon-Sik Kim, Seung-Jun Chee, Seung-Ki Sul  
Seoul National University

### ABSTRACT

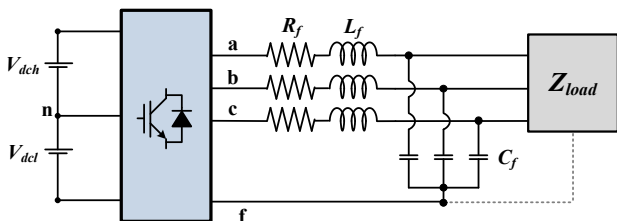
본 논문은 3상 4선식 인버터를 이용하여 임의의 전압 파형을 발생하기 위한 우수한 성능의 페루프 전압 제어기를 제안하고 제어 이득 설정 방법을 제시한다. 먼저, 임의 파형 발생기에 사용된 3상 4선식 인버터 및 LC 필터 회로 구조를 분석하고, 이를 기반으로 한 전압 제어기 구조를 제안한다. 제안된 전압 제어기는 페루프 형태의 PI 전압 제어기를 사용하고, 과도 특성 개선 및 부하 전류로 인한 전압 왜곡 방지를 위해 인버터 전류 및 부하 전류 정보를 전향 보상에 사용한다. 실험을 통해 전압 지령에 대한 응답 특성이 향상되는 것을 확인할 수 있다.

### 1. 서론

최근 계통 연계형 인버터에 대한 연구가 지속됨에 따라, 계통의 단락 사고를 모의하거나 고조파 성분을 포함한 전원을 모의할 수 있는 시스템이 필요로 하고 있다. 이에 따라, 원하는 전압 상황을 모의할 수 있는 임의파형발생기(Arbitrary Waveform Generator)의 필요성이 증대되고 있다.

이러한 임의파형발생기를 구현하기 위해서는 부하 변동과 무관하게 빠르게 전압 지령을 추종할 수 있는 전압 제어기를 필요로 한다. 전류 제어기를 하위 제어기로 전압 제어기를 상위 제어기로 하는 기존의 다단(cascaded) 전압-전류 제어기<sup>[1]</sup>의 경우, 전압 제어기의 제어 대역폭(bandwidth)이 하위 전류 제어기 제어 대역폭에 따라 제한되므로 동특성이 감소한다. 이를 개선하기 위해 기존에 제안된 전향 제어기<sup>[2]</sup>의 경우, 출력 전압을 폐환(feedback)하여 보상하는 제어 루프가 없으므로 인버터 비선형성(nonlinearity) 및 센서 측정 오차와 같은 다양한 입력 외란(disturbance)에 대해 취약하다.

이 논문에서는 그림 1과 같은 3상 4선식 인버터 및 LC 필터로 구성된 시스템에서 전압 제어기 대역폭을 최대화하기 위한 단일 루프 전압 제어기를 제안한다. 또한 과도 특성 개선 및 부하 전류로 인한 전압 왜곡 방지를 위해 부하 전류 정보를 추가하여 전향 보상에 사용한다.



3상 4선식 T-type 인버터

그림 1. 임의파형발생기 시스템 구성

### 2. 전력 회로 구성

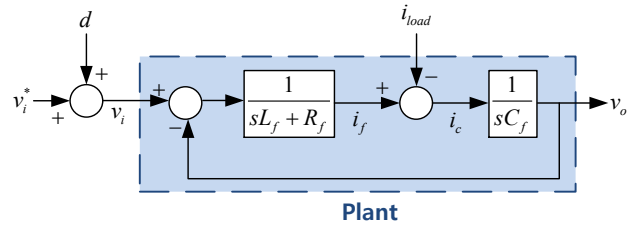


그림 2. 임의파형발생기의 전력회로에 대한 블록도

제안된 시스템은 그림 2와 같이 전력회로를 모델링할 수 있다. 입력 전압은  $v_i^*$ , 입력 외란은  $d$ , 부하 전류는  $i_{load}$ 로 나타낼 수 있다. 이러한 변수들의 영향은 식 (1)의 전달함수를 통해 확인할 수 있다.

$$v_o(s) = G_v(s) \cdot v_i^*(s) + G_{vd}(s) \cdot d(s) + G_{il}(s) \cdot i_{load}(s),$$

$$G_v(s) = \frac{1}{L_f C_f s^2 + R_f C_f s + 1}, G_{vd}(s) = \frac{1}{L_f C_f s^2 + R_f C_f s + 1},$$

$$G_{il}(s) = -\frac{L_f s + R_f}{L_f C_f s^2 + R_f C_f s + 1} \quad (1)$$

이를 통해 기존의 개루프(open-loop) 형태의 제어기<sup>[2]</sup>를 사용할 경우 입력 외란의 DC 성분이 그대로 출력에 나타나는 것을 알 수 있다. 입력 외란의 영향을 최소화하기 위해 이를 개선한 페루프(closed-loop) 형태의 전압 제어기가 필요하다.

### 3. 제어기 설계

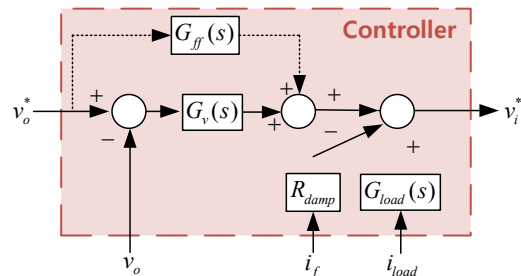


그림 3. 단일 루프 전압 제어기 구조

제안된 전압 제어기는 그림 3과 같이 출력 전압  $v_o$ 을 폐환 보상하고, 전류  $i_f$ ,  $i_{load}$ 를 전향 보상하도록 구성된다.

#### 3.1 부하 전압 제어기 이득 선정

$i_{load}=0$ ,  $G_{ff}(s)=0$ 로 가정하면, 기준 전압에 대한 응답은 식 (2)와 같다. 미분 제어기는 잡음(noise)에 민감하므로 전압 제어기  $G_v(s)$ 는 비례-적분(PI) 제어기

형태를 가지도록 한다.

$$\frac{v_o}{v_o^*} = \frac{sK_p + K_i}{L_f C_f s^3 + (R_f + R_{damp}) C_f s^2 + (1 + K_p) s + K_i} \quad (2)$$

식(3)과 같이 비감쇠자연주파수(undamped natural frequency)  $\omega_c$ , 감쇠계수  $\zeta_c$ 를 갖는 2차 응답형의 제어 성능을 가지고자 할 경우, 각 이득 크기는 식(4)와 같이 정해진다.

$$\frac{v_o}{v_o^*} = \frac{\omega_c^2}{s^2 + 2\zeta_c \omega_c s + \omega_c^2} \quad (3)$$

$$K_p = L_f C_f \omega_c^2, \quad K_i = \frac{\omega_c}{2\zeta_c} \quad (4)$$

$$R_{damp} = (2\zeta_c \omega_c L_f + \frac{1}{2\zeta_c \omega_c C_f}) - R_f$$

출력 LC 필터는 전압 제어 측면에서 시지연 요소로 동작하므로 이러한 시지연을 미리 보상하기 위하여 전향 보상기  $G_{ff}(s)$ 를 사용한다. 식(5)와 같은 제어 성능을 가지고자 할 경우  $G_{ff}(s)$ 는 식(6)처럼 비례-미분(PD)이득을 선정하여야 한다. 통상 전압 지령은 잡음을 포함하지 않으므로 미분 제어가 사용에 큰 문제가 없다.

$$\frac{v_o}{v_o^*} = \frac{2\zeta_c \omega_c s + \omega_c^2}{s^2 + 2\zeta_c \omega_c s + \omega_c^2} \quad (5)$$

$$G_{ff}(s) = 2 \frac{\zeta_c}{\omega_c} (K_p s + K_i) \quad (6)$$

### 3.2 부하 전류 외란 제거 이득 선정

부하 전류가 흐르게 되면 필터 인덕터 및 능동 댐핑 저항의 전압 강하로 인해 출력 전압이 왜곡되게 된다. 부하 전류에 의한 출력 전압 변동을 막기 위해 전향 보상기  $G_{load}(s)$ 를 사용한다. 이를 통해 식(7)의 부하 전류에 관한 전달함수가 0에 가깝도록 만들어줄 수 있다.

$$\frac{v_o}{i_{load}} = \frac{G_{load}(s) - (L_f s + (R_f + R_{damp}))}{L_f C_f s^2 + R_f C_f s + 1 + G_v(s)} \quad (7)$$

$$G_{load}(s) = L_f s + (R_f + R_{damp}) \quad (8)$$

제어기 이득은 식(8)과 같이 설정된다. 측정한 부하 전류를 바로 미분하게 되면 위에서 언급한 잡음 문제로 제어기가 불안정해질 수 있으므로, 대역 통과 필터(bandpass filter)를 사용하여 미분기를 대체하도록 한다.

## 4. 실험 결과

부하를 포함한 임의파형발생기는 그림 4과 같고, 각 제어기법이 추가됨에 따른 성능 변화를 동등하게 비교하기 위해 비감쇠 자연 주파수를 필터 차단 주파수  $\omega_c = 1/\sqrt{L_f C_f}$ 로, 감쇠 계수는  $\zeta_c = 1$ 으로 설정하였다. 3상 다이오드 부하에 대해 전압 지령이 60Hz, 100V일 때 성능을 비교한다. 스위칭 주파수는 20kHz, 데드타임은 2us로 설정하였다.

실험 결과, 기존 전향 제어기는 그림 5.(a)와 같이 인버터 비선형성으로 인해 출력 전압에 왜곡이 일어나는 것을 확인할 수 있다. 인버터 비선형성 보상을 추가로 사용하여도 전류가 0 부근을 지날 때, 출력 전압이 왜곡되는 것을 확인할 수 있다. 하지만 제안한 알고리즘의 경우, 그림 5.(c)와 같이 출력 전압 지령을 잘 따라가는 것을 확인할 수 있다.

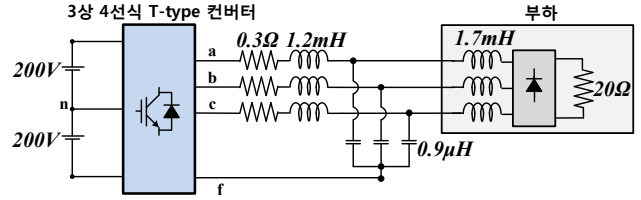
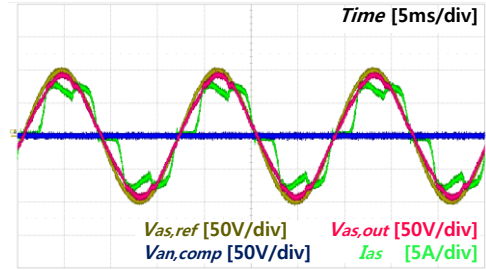
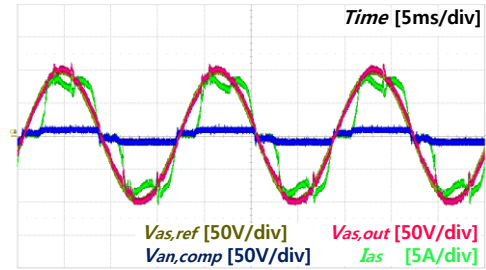


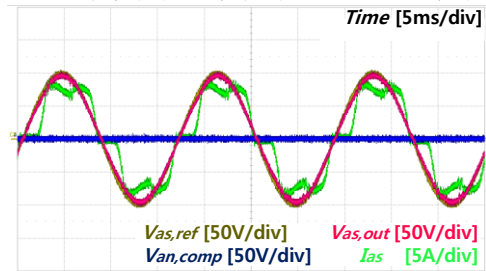
그림 4. 부하를 포함한 임의파형발생기 실험 구성



(a) 전향 제어 알고리즘만 사용



(b) 전향 제어기에 인버터 비선형 보상을 추가 적용



(c) 제안한 단일 루프 제어 알고리즘 적용

그림 5. 전압 제어 알고리즘에 따른 실험 결과

## 5. 결론

본 논문에서는 임의파형발생기를 위한 단일 루프 전압 제어기를 제안하였다. 또한 제어 대역폭을 최대화하기 위한 제어 이득 선정 방법을 제시하였다. 실험을 통해, 제안된 제어기가 입력 외란에 대해 강인하면서 기존 전향 제어기와 동일한 제어대역폭을 갖는 것을 확인하였다.

## 참고 문헌

- [1] M. J. Newman, D. N. Zmood, and D. G. Holmes, "A comparative analysis of multiloop voltage regulation strategies for single and three-phase UPS systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 18, no. 5, pp. 1176-1185, Sep. 2003.
- [2] H. Kim and S. K. Sul, "Compensation Voltage Control in Dynamic Voltage Restorers by Use of Feed Forward and State Feedback Scheme," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 20, no. 5, pp. 1169-1177, Sep. 2005.