

주파수 응답을 이용한 전력변환장치 제어기 설계

이진목, 노세진, 손경민, 최재호
 충북대학교 전기전자컴퓨터 공학부

A Controller Design for Power Electronic Converter using Frequency-Response

Jinmok Lee, Sejin Noh, Kyungmin Son, Jaeho Choi

School of Electrical and Computer Engineering, Chungbuk National University

Abstract - This paper presents how to make controller using frequency-response in power electronics. First, To make controller, a frequency response of plant are showed and then a controller is made as the procedure. That way give the easy method to make controller for power electronic converter.

범으로 Bode 선도나 Nyquist 선도 등으로 나타낼 수 있다. Bode 선도는 주파수에 따른 크기와 위상의 변화를 직관적으로 한 눈에 알 수 있는 장점이 있다.

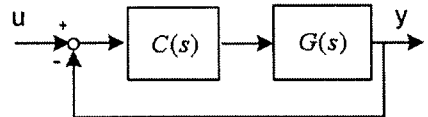


그림 1. 전체 시스템

1. 서 론

전력변환장치의 페루프 제어기 설계방법 중 현장에 서 가장 많이 사용하는 방법 중의 하나가 주파수 응답법에 의한 설계이다. 주파수 응답 법이 가장 많이 사용되는 이유는 플랜트 모델의 불확실성에도 불구하고 좋은 제어기를 설계할 수 있기 때문이다. 또한 주파수 응답법은 정현파 입력에 대해서 출력의 위상과 크기의 변화를 한 눈에 알 수 있는 장점이 있다^[1]. 그리고 주파수 응답의 일반적인 특성, 즉 극점과 영점의 추가가 주파수 응답에 미치는 영향은 이미 알고 있다^[2]. 주파수 응답법을 이용한 제어기 설계는 지금까지 밝혀진 영향을 근거로 하여 제어기를 쉽게 설계할 수 있다. 그럼에도 불구하고 주파수 응답을 이용하여 제어기를 설계하는 경우에 일반적으로 주파수 대역폭이 클수록 빠른 시간응답을 갖는다고 알려져 있으나 명확하게 주파수응답과 시간응답과의 관계 밝혀지지 않고 있어 과도상태를 고려한 제어기 설계는 매우 어려운 것이 현실이다. 또한 고차의 제어기를 설계하기가 매우 어렵다는 단점 또한 더 많은 연구가 진행되어야 하는 이유이다. 기존의 제어기 설계 중에서 DC/DC 컨버터의 저차제어기를 주파수 응답으로부터 설계한 경우가 있다^[3]. 본 논문에서는 DC/DC컨버터의 제어기를 설계하는 Mohan[3]을 바탕으로 단상 DC/AC 컨버터의 저차제어기를 안정도 여유를 고려하여 설계한다. 이는 단상 인버터의 주파수 응답만으로 제어기를 설계하는 좋은 예시가 되어 실제 제어기를 설계하는 현장에서 쉽게 접근할 수 있는 방법을 제시한다.

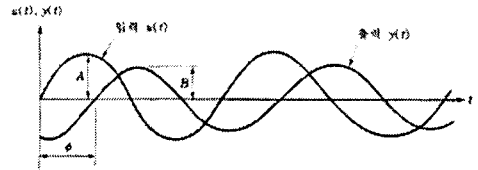


그림 2. 주파수 응답

2. 본 론

2.1 단상 인버터의 주파수 응답

단상 인버터의 저차제어기 설계를 위해서 주파수 응답 중 Bode 선도의 크기와 위상의 특성이 제어기와 플랜트의 위상과 크기의 합으로 나타남을 이용하여 제어기의 차수를 결정한다. 차수가 결정되면 영점 주파수와 극 주파수를 얻어 저차 제어기를 설계한다.

2.1.1 단상 인버터의 주파수 응답

주파수 응답은 그림 1과 같이 플랜트 $G(s)$ 와 제어기 $C(s)$ 의 페루프 시스템에 그림 2와 같이 주파수가 ω 인 정현파 신호를 입력으로 가할 때 출력되는 신호의 크기와 위상을 나타내는 것이다. 주파수 응답을 나타내는 방

제어기의 전달함수와 제어기 전달함수를 식 (1)과 식 (2)와 같이 나타내면 이로부터 안정도 판별을 위한 루프 전달함수를 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다. 루프 전달함수로부터 크기는 식 (4)와 같으며 이는 로그로 표현했을 경우 각각의 크기를 더한 값과 같다. 위상도 식 (5)와 마찬가지로 제어기의 위상과 플랜트의 위상을 더한 값으로 표현 할 수 있다.

$$C(j\omega) = |C(j\omega)|e^{j\psi_C(\omega)} = |C(j\omega)| \angle \psi_C(\omega) \quad (1)$$

$$G(j\omega) = |G(j\omega)|e^{j\psi_G(\omega)} = |G(j\omega)| \angle \psi_G(\omega) \quad (2)$$

$$T_{ol}(j\omega) = C(j\omega)G(j\omega) = |C(j\omega)||G(j\omega)| \angle (\psi_C(\omega) + \psi_G(\omega)) \quad (3)$$

$$M(\omega) = 20\log|T_{ol}(j\omega)| = 20\log|C(j\omega)||G(j\omega)| = 20\log|C(j\omega)| + 20\log|G(j\omega)| \quad (4)$$

$$\psi(\omega) = \psi_C(\omega) + \psi_G(\omega) \quad (5)$$

2.1.2 제어기의 설계

위에서 언급한 바와 같이 루프 전달함수의 주파수 응답은 제어기와 플랜트의 크기와 위상의 합으로 나타낼 수 있다. 이러한 특성을 바탕으로 플랜트의 주파수 응답으로부터 제어기 차수를 결정한다.

플랜트의 Bode 선도는 그림 (3)과 같다. 단상 인버터는 LPF의 특성을 가지고 있으며 공진 주파수에서 크기의 변화가 심한 것이 특징이다. 이러한 크기의 변화는 시간 응답에서 과도상태의 크기를 의미하며 크기변화가 클수

록 오버슈트가 커지고 정정시간이 길어진다^[4].
 제어를 설계하기 위해서 먼저 페루프의 빠른 응답을 위해 가능한 높은 루프 이득인 Crossover frequency: ω_c 를 결정한다.
 루프 전달함수의 위상각은 ω_c 에서 60의 위상 이득을 갖도록 설계하면 페루프 전달함수에서 진동 없이 빨리 정착한다. 그리고 위상각은 주파수가 ω_c 보다 작은 영역에서 -180° 보다 크도록 해야 한다^[3]. 일반적으로 강인 제어기설계에서 안정도 이득은 표 1과 같다^[5].

표 1. 이득 여유

Items	Margin
Gain margin	$\Delta G \geq 2(6dB)$
Phase margin	$30^\circ \leq \Delta \phi \leq 60^\circ$
Delay margin	$\Delta \tau = \frac{\Delta \phi}{\omega_{cr}} \geq T_s$
Modulus margin	$\Delta M \geq 0.5(-6dB)$

안정도 이득을 얻기 위해서 제어기의 차수를 식 (6)과 같이 3개의 극점과 2개의 영점을 갖도록 설계하였다. 일반적으로 영점이 추가되면 주파수 응답의 크기는 +20dB의 기울기로 상승하고 위상은 +90° 증가한다. 극점은 그 반대이다. 그러므로 플랜트의 위상 여유를 높이기 위해서 극점 주파수(ω_p)에서 증가하고 영점 주파수(ω_z)에서 감소하는 제어기를 설계할 수 있으며 ω_c 와의 관계는 식 (7)과 같으며 공진 주파수보다 크게 설정한다. 이와 같은 제어기의 주파수 응답은 그림 (4)와 같다.

$$G_c(s) = \frac{k_c(1+s/\omega_z)^3}{(1+s/\omega_p)^2} \quad (6)$$

$$\omega_c = \sqrt{\omega_z \omega_p} \quad (7)$$

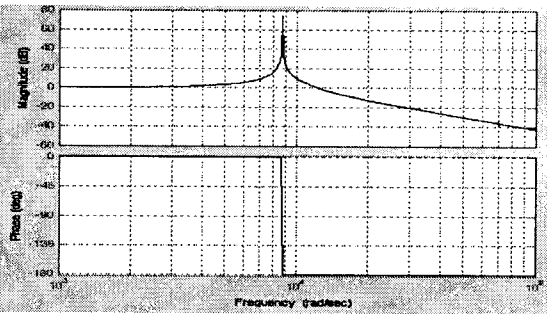


그림 3. 플랜트($G(s)$) Bode 선도

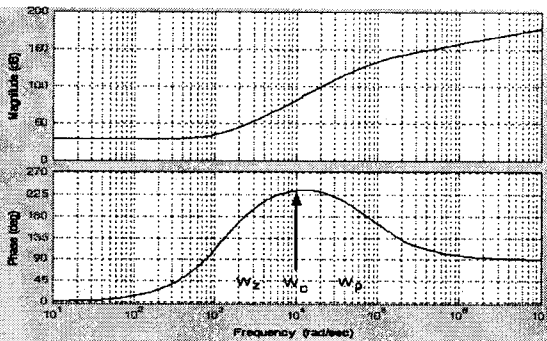


그림 4. 제어기($C(s)$) Bode 선도

$$\Phi_{boost} = -90^\circ + \Phi_{PM} - \angle G_{PS}(s)|_{f_c}$$

2.2 단상 인버터의 제어기 설계

단상 인버터의 제어기 설계를 위해서 사용한 플랜트의 사양은 표 2와 같다.

표 2. 인버터 사양

Parameter	Values
R	0.01 Ω
L	6mH
C	2.2 μ F

주파수 응답을 이용한 제어기 설계 순서는 다음과 같다.

- 1단계: Crossover Frequency 선택.
- 2단계: 위상상승폭 결정.
- 3단계: 제어기 이득 계산.

첫 단계로 공진주파수 보다 조금 큰 ω_c 를 결정한다. 공진주파수가 8.7[rad/s] 이므로 이보다 큰 10000[rad/s]를 선택한다. 다음 단계로 위상 상승폭 (Φ_{boost})을 결정한다. 루프전달함수에서의 위상여유는 식 (9)와 같이 나타낼 수 있으며 제어기에서 필요한 위상 상승폭은 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다. 이로부터 식 (11)을 얻을 수 있다. 플랜트의 주파수 응답인 그림 3으로부터 얻은 위상 크기 $\angle G(j\omega)|_{\omega_c} = -180^\circ$ 와 루프 전달함수의 주파수 응답 위상 이득이 $\Phi_{PM} = 60^\circ$ 가 되는 위상 상승폭은 $\Phi_{boost} = 150^\circ$ 이다.

마지막 단계로 제어기 이득을 식 (12)로부터 얻는다. ω_c 에서 플랜트의 주파수 응답 크기는 9.96dB=3.148이므로 식 (13)으로부터 $|C(s)|_{\omega_c} = 0.318$ 를 얻을 수 있다. 또 식 (14)-(17)로부터 $K_{boost} = 7.596$, $f_z = 209.525$, $f_p = 12566.87$, $k_c = 55.113$ 를 얻을 수 있다.

$$\angle T_{ol}(j\omega)|_{\omega_c} = \angle C(j\omega)|_{\omega_c} + \angle G(j\omega)|_{\omega_c} \quad (8)$$

$$\angle T_{ol}(j\omega)|_{\omega_c} = -180^\circ + \Phi_{PM} \quad (9)$$

$$\angle C(j\omega)|_{\omega_c} = -90^\circ + \Phi_{boost} \quad (10)$$

$$\Phi_{boost} = -90^\circ + \Phi_{PM} - \angle G(j\omega)|_{\omega_c} \quad (11)$$

$$|T_{ol}(j\omega)|_{\omega_c} = |C(j\omega)|_{\omega_c} \cdot |G_{PWM}(j\omega)|_{\omega_c} \cdot |G(j\omega)|_{\omega_c} \cdot k_{FB} = 1 \quad (12)$$

$$|C(j\omega)|_{\omega_c} = \frac{1}{|G_{PWM}(j\omega)| \cdot |G(j\omega)|_{\omega_c} \cdot k_{FB}} \quad (13)$$

$$K_{boost} = \sqrt{\frac{\omega_p}{\omega_z}} = \tan(45^\circ + \frac{\Phi_{boost}}{4}) \quad (14)$$

$$f_z = \frac{f_c}{K_{boost}} \quad (15)$$

$$f_p = K_{boost} f_c \quad (16)$$

$$k_c = |G_c(s)|_{f_c} \frac{\omega_z}{K_{boost}} \quad (17)$$

2.3 시뮬레이션 결과

플랜트 주파수 응답으로부터 제어기를 설계하는 방법에 대해서 언급한 대로 이를 Matlab으로 시뮬레이션 하였다. 그림 5에서 보는 바와 같이 플랜트($G(s)$)의 주파수 응답의 크기와 위상이 제어기($C(s)$)의 크기와 위상으로 인해 증가하여 루프 전달함수($Tol(s)$)의 주파의 크기와 위상이 변화되었음을 알 수 있다. 즉 안정도 여유를 가지는 제어기가 설계되었음을 보여준다. 그림 7은 설계한 제어기의 기준 입력과 출력전압을 보여주고 있다. 출력전압이 기준 입력을 정확하게 추종하는 것을 볼 수 있다.

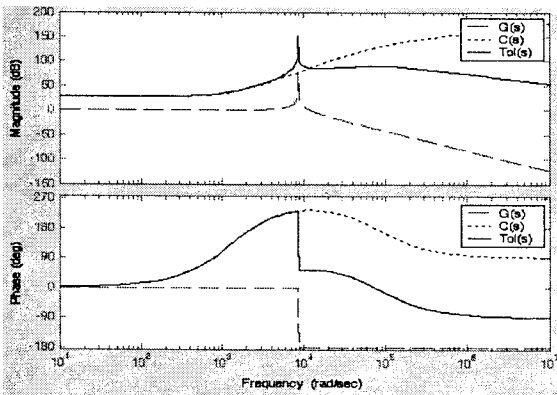


그림 5. 플랜트 전달함수:G(s), 제어기 전달함수:C(s), 루프전달함수:Tol(S)

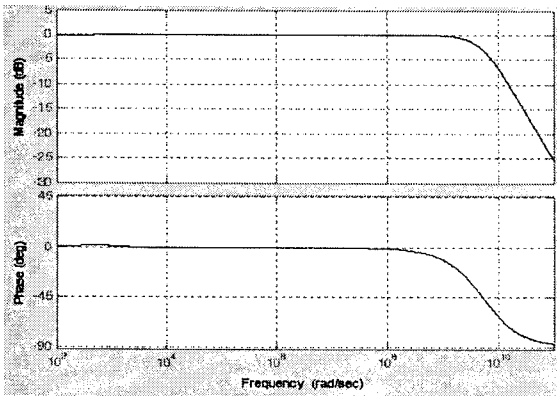


그림 6. 폐루프 전달함수의 주파수 응답

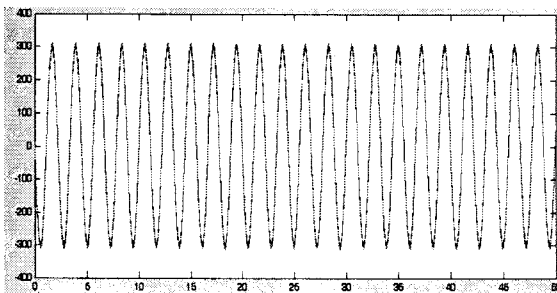


그림 7. 설계한 제어기의 기준 입력과 출력전압

3. 결 론

본 논문에서는 주파수 응답을 이용하여 단상 인버터 제어기를 설계하였다. 주파수 응답에 의한 제어기 설계 방법은 가장 많이 사용하는 방법 중의 하나로 제어기를 쉽게 설계할 수 있다. 주파수 응답을 이용한 제어기를 설계하기 위해서 플랜트의 주파수 응답을 분석하여 제어기의 차수를 결정하고 결정된 차수의 제어기를 설계하기 위해서 Crossover 주파수를 정의하고 이로부터 극점 주파수와 영점 주파수를 얻었으며 제어기 이득을 계산을 통해 얻을 수 있었다. 이렇게 설계된 제어기는 기준전압을 정확하게 추종하였다.

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 수행되었음

[참 고 문 헌]

- [1] G. F. Franklin, J. D. Powell and A. Emami-Naeini, *Feed back Control of Dynamic Systems*, pp
- [2] C. K. Alexander and M. N. O. Sadiku, *Fundamental of Electric Circuits. Second Edition*, pp 622-624, Mcgrawhill, 2004
- [3] N. Mohan, *First Course on Power Electronics*, pp 4-1 4-6, Mnpere, 2007
- [4] K. J. Astrom and T. Haggund, *Advanced PID Control*, p p 34-39, ISA, 2006
- [5] I. D. Landau and G. Zito, *Digital Control Systems Design, Identification and Implementation*, pp. 69-82, Springer, 2006