

시간응답을 만족하는 인버터 이중루프 제어기 설계

이진목, 노세진, 손경민, 이재문, 최재호
충북대학교

Double loop Inverter Controller Design satisfied with Time Specification

Jinmok Lee, Sejin Noh, Kyoungmin Son, Jaemoon Lee, Jaeho Choi
Chungbuk National University

Abstract - Generally, inverter controller for UPS or renewable energy system have been used double loop PI controller, But it is hard to get controller gains for double loop controller because it is high order. Futhermore, to consider time specification is difficult too.

This paper presents the way how to make double PI loop controller for inverter satisfied with time specification using CRA method and verify efficiency of it using Matlab and Psim.

1. 서 론

UPS나 신재생에너지의 전력변환기에 적용되는 인버터는 일정한 전압과 주파수로 동작하는 VSI PWM 인버터이다. 이러한 인버터의 제어기는 내부루프의 전류제어기와 외부루프의 전압제어기의 2중 루프로 구성되며, PI제어기를 사용하여왔다^{[1][2]}. 그러나 이중루프제어기는 고차기 때문에 일반적인 설계기법인 극배치 기법으로 설계하는 방법은 어렵다^{[3][4]}. 특히 사용자가 원하는 시간응답을 갖는 제어기를 설계하는 것은 더욱 어렵다. 본 논문에서는 특성비 지정법을 이용한 이중루프의 인버터 제어기법을 제안하고 시간응답을 만족하는 제어기를 설계한다^[5-7]. 설계한 제어기를 시간응답과 안정도 등을 분석하기 위해서 제어기의 내부루프와 외부루프의 루프전달함수를 해석적으로 얻는다. 그리고 시뮬레이션을 통하여 제어기의 성능을 검증한다.

2. 본 론

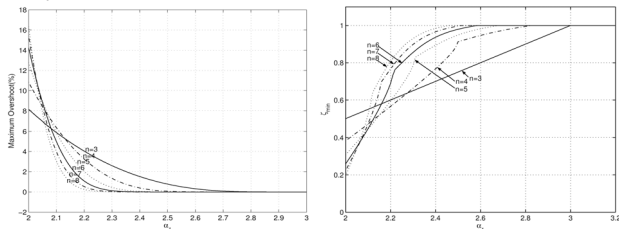
2.1 특성비 지정법

오버슈트, 정정시간과 같은 시간응답 조건을 만족하는 제어기를 설계하는 것은 저차에만 가능하였으나 특성비 지정법 (Characteristic ratio assignment: CRA)은 Butterworth 필터의 성질을 확장하여 제어기의 안정한 해와 시간응답을 만족하는 해를 고차의 제어기에서도 얻을 수 있다. 즉 저차에서만 가능하였던 극점과 영점을 고려하지 않고 제어기를 설계할 수 있다. 특성비 지정법 전달함수의 특성비를 지정하는 방법으로 선형 시스템에서 전달함수가 식 (1)와 같이 고려할 수 있다. 이때 특성비를 식 (2)와 같이 정의하고 시정수를 식 (3)과 같이 정의할 수 있다.

$$G(s) = \frac{n(s)}{p(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0} \quad (1)$$

$$\alpha_1 = \frac{a_1^2}{a_0 a_2}, \alpha_2 = \frac{a_2^2}{a_1 a_3}, \dots, \alpha_{n-1} = \frac{a_{n-1}^2}{a_{n-2} a_n} \quad (2)$$

$$\tau = \frac{a_1}{a_0} \quad (3)$$



(a) <그림 1> (a): α_1 과 최대 오버슈트의 관계, (b): α_1 과 최대 제동비와의 관계

α_i' 와 τ 를 나타낼 때 계수 a_i 는 식 (4), (5)와 같이 나타낼 수 있다. 이 때 a_0, τ 를 양의 값으로 정의 할 때 특성비 α_k 를 식 (6), (7)과

같다.

$$a_1 = a_0 \tau \quad (4)$$

$$a_i = \frac{a_0 \tau^i}{\alpha_{i-1} \alpha_{i-2} \alpha_{i-3} \dots \alpha_2^{i-2} \alpha_1^{i-1}}, \text{ for } i = 2, \dots, n \quad (5)$$

$$\alpha_1 > 2 \quad (6)$$

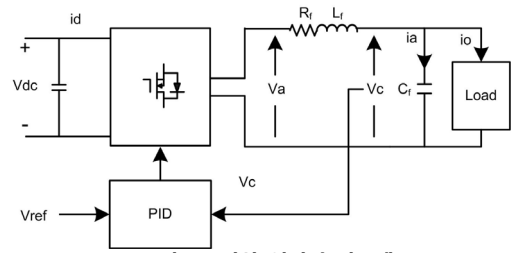
$$\alpha_k = \frac{\sin(k\pi/n) + \sin(\pi/n)}{2\sin(k\pi/n)} \cdot \alpha_1 = \Gamma_k \cdot \alpha \quad (7)$$

(단, $k = 2, \dots, n-1$)

특성비 지정법은 그림 1에서 보는 바와 같이 특성비와 오버슈트 그리고 제동비가 서로 유기적인 관계를 가지고 있음을 나타낸다. 즉 특성비를 이용하여 설계하고자 하는 시간응답을 만족하는 제동비와 오버슈트를 얻을 수 있다.

2.2 이중루프 인버터 제어기 설계

인버터의 시스템과 이중루프제어기의 블록다이아그램을 그림 2에서 나타내었다. 인버터는 인덕터 전류에서 출력전류를 제외한 전류가 커패시터에 흐르는 것으로 모델링되고 이러한 플랜트가 내부의 전류루프와 외부의 전압루프의 이중 PI제어기로 설계되었다. 강인한 제어기를 설계하기 위해서 내부루프와 외부루프의 루프전달함수를 해석적으로 나타내었다. 루프전달함수를 이용하여 주파수응답으로 제어기의 안정도를 해석하였다. 그림 2는 단상인버터 시스템을 나타낸다. 이를 제어블럭도로 나타내면 그림 3과 같다. 이러한 블록도로 부터 폐루프 전달함수를 얻기 위해서 인버터는 식 (8), (9)의 식으로 유도될 수 있다. 계산된 폐루프 전달함수는 주파수 응답의 분석을 통해서 제어기의 Tracking 성능을 알아보는 지표가 된다.



<그림 2> 단상 인버터 시스템

$$I_c = \frac{1}{L_f s + R} (V_a - V_c) - I_o \quad (8)$$

$$V_c = \frac{1}{C_f s} I_c \quad (9)$$

$$(V_c^* - V_c) \frac{K_{vi}}{s} - V_c (K_{vp}) = I_c^* \quad (10)$$

$$(I_c^* - I_c) \frac{K_{ii}}{s} - I_c (K_{ip}) = V_a \quad (11)$$

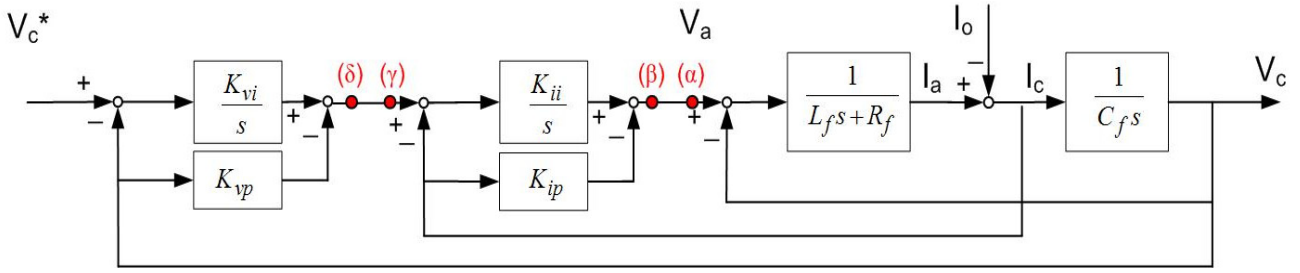
$$\left\{ (V_a - V_c) \left(\frac{1}{L_f s + R_f} \right) - I_o \right\} \frac{1}{s C_f} = V_c \quad (12)$$

$$s C_f V_c = I_c \quad (13)$$

식 (12)를 정리하면 식 (14)을 얻을 수 있으며 식 (13)과 식 (14)를 식 (9)에 대입하면 식 (15)을 얻을 수 있다.

$$V_a = V_c \{ (L_f s + R_f) s C_f + 1 \} + (L_f s + R_f) I_o \quad (14)$$

$$I_c \frac{K_{ii}}{s} = V_c (L_f C_f s^2 + (R_f C_f + C_f K_{ip}) s + C_f K_{ii} + 1) + (L_f s + R_f) I_o \quad (15)$$



〈그림 3〉 단상 인버터 시스템

식 (15)을 식 (10)에 대입하면 식 (16)를 얻을 수 있다.

$$V_c^* K_{vi} K_{ii} = V_c \left\{ L_f C_f s^4 + (R_f C_f + C_f K_{ip}) s^3 + (C_f k_{ii} + 1) s^2 \right. \\ \left. + K_{vp} K_{ii} s + k_{vi} K_{ii} \right\} + (L_f s^2 + R_f s) I_o \quad (16)$$

$$T_{cl} = \frac{K_{vi} K_{ii}}{L_f C_f s^4 + (R_f C_f + C_f K_{ip}) s^3 + (K_{ii} C_f + 1) s^2 + K_{vp} K_{ii} s + K_{ii} K_{vi}} \quad (17)$$

인버터의 내부루프 해석을 위한 루프전달함수를 얻기 위해서 그림의 α 과 β 사이를 전달함수로 나타내면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$(\alpha - V_c) \frac{1}{L_f s + R_f} - I_o = C_f s V_c \quad (18)$$

$$\left\{ V_c \left(\frac{K_{vi}}{s} + K_{vp} \right) - I_c \right\} \frac{K_{ii}}{s} - I_c K_{ip} = \beta \quad (19)$$

식 (18), (19)로부터 내부루프 전달함수를 얻을 수 있다.

$$T_{in}(s) = \frac{\beta}{\alpha} = \frac{-C_f K_{ip} s^3 - C_f K_{ii} s^2 + K_{vp} K_{ii} s + K_{vi} K_{ii}}{s^2 (L_f C_f s^2 + R_f C_f s + 1)} \quad (20)$$

인버터의 외부루프 해석을 위한 루프전달함수는 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\left\{ (\gamma - I_c) \frac{K_{ii}}{s} - I_c K_{ip} - V_c \right\} \frac{1}{s L_f + R_f} - I_o = I_c \quad (21)$$

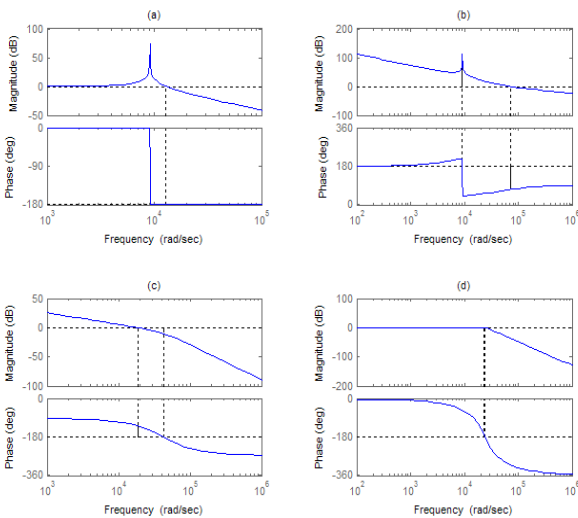
$$V_c \left(\frac{K_{vi}}{s} + K_{vp} \right) = \delta \quad (22)$$

식 (21), (22)로부터 외부루프 전달함수를 얻을 수 있다.

$$T_{out} = \frac{\delta}{\gamma} = \frac{K_{vi} K_{ii} s + K_{vi} K_{ii}}{s^2 L_f C_f s^2 + (R_f C_f + K_{ip} C_f) s (K_{ii} C_f + 1)} \quad (23)$$

2.2 시뮬레이션 결과

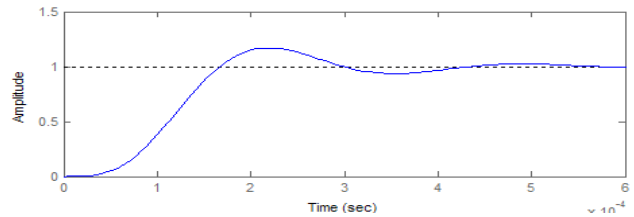
이중루프 제어기를 설계하기 위한 시간응답은 10% 미만의 오버슈트와 10ms 미만의 정정시간이다. 이러한 시간응답 설계조건을 만족하는 제안된 시스템과 제어기의 사양은 표 1과 같다.



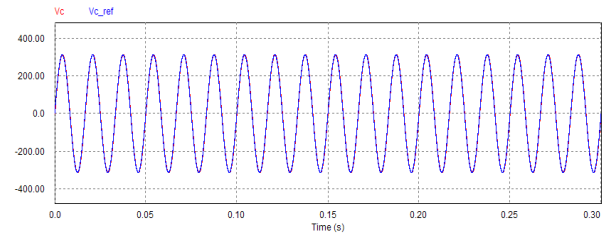
〈그림 4〉 보드선도 (a)플랜트, (b)내부루프, (c)외부루프, (d)폐루프

〈표 1〉 시스템 및 제어기 사양

인버터 플랜트 사양		설계된 제어기 값	
R	10mΩ	Kvp	0.4321
L	6mH	Kvi	432.1
C	2μF	Kip	474.28
		Kii	1.7353e+7



〈그림 5〉 시스템의 시간응답



〈그림 6〉 기준전압과 출력전압 파형

3. 결 론

본 논문에서는 이중루프제어기의 인버터 시스템을 사용자가 원하는 시간응답을 갖도록 설계하고 이를 페루프, 내부루프, 외부루프 전달함수를 수학적으로 전개하였다. 시간응답을 알아보기 위해서 계단응답을 살펴보고 설계한 제어기는 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

본 연구는 과학재단사업 R01-2006-000-10811-0의 지원을 받아 수행되었음

〈참 고 문 헌〉

- [1] M. Carpita, M. Mazzucchelli, S. Savio, and G. Sciuotto, "A New Control System for UPS Using Hysteresis Comparator," IEEE, 1987.
- [2] M. J. Ryan and R. D. Lorenz, "A high Performance Sine Wave Inverter Controller with Capacitor Current Feedback and "Back-EMF" Decoupling," in Conf. Rec. IEEE PESC'95, pp. 507-513, 1995.
- [3] G. F. Franklin, J. D. Powell, and A. Emami-Naeini, *Feedback control of dynamic systems*, Prentice hall, 2002
- [4] B. C. Kuo, *Automatic control system*, Prentice hall, 1990
- [5] Y.T. Woo, J.S. Kim and Y.C. Kim, "Digital Control of UPS Inverter with Time Response Specifications," *KIEE Trans. on Electrical Machinery and Energy Conversion Systems*, vol. 5-B, No. 2, pp. 196-203, 2005
- [6] Y.C. Kim, L.H. Keel, and S.P. Bhattacharyya, "Transient Response Control via Characteristic Ratio Assignment," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 48, no. 12, pp. 2238-2244, 2003.
- [7] S.Y. Han, T.S. Cho, Y.C. Kim, "Synthesis of transfer function resulting in non-overshooting," *Proc. CICS 03*, pp. 127-130, Chuncheon, Korea, Nov. 2003.