극 배치 기법을 기반으로 한 단상인버터의 제어기 설계

손경민, 이진목, 노세진, 최재호
충북대학교

Controller Design of Single-phase Inverter Based on Pole-assignment Method

Kyoungmin Son, Jinmok Lee, Sejin Noh, Jaeho Choi
School of Electrical & Computer Engineering Chungbuk University

ABSTRACT

This paper presents a PID controller and PI-PI dual loop controller for a single-phase inverter. The control parameters of conventional controllers are very difficult to make. But parameters of controllers based on pole-assignment are easy to make. Simulation results are presented for the system under R-L load, no load and change reference voltage.

1. 서론

본 논문에서는 PID 단일 루프 제어기를 이용한 단상인버터와 PI-PI이중루프 제어기를 이용한 단상인버터의 제어기 파라미터를 극 배치 방법으로 구하고, PSiM을 이용한 시뮬레이션 결과를 제시하였다.

PD제어기는 계통에 제동을 더해 주지만 정상상태응답에는 영향을 주지 못하고, PI제어기의 경우 상대적 안정도를 개선하고 동시에 정상상태오차를 개선하지만 상승시간이 증가한다. 하지만 PID 제어기의 경우 PD제어기와 PI제어기 각각의 최적의 특성을 이용할 수 있다[1].

PI-PI이중루프 제어기는 출력전압만을 피드백 하는 단일 루프 제어기에 비해 속도가 빠른 전류도 피드백을 받기 때문에 시스템의 전체적인 응답을 향상 시킬 수 있다[2].

PID 제어기와 PI-PI제어기의 각각의 파라미터 값은 극 배치 (Pole-assignment) 방식을 사용하여 구했고, 이를 단상 인버터에 적용시켜 PSiM을 이용한 시뮬레이션을 수행하였다.

2. 본론

2.1 단상 인버터

단상 인버터의 폐루프 제어기를 설계하기 위해 시스템의 상태방정식을 사용했다. 시스템의 DC전원은 일정하고 스위칭 소자는 이상적이라고 가정했다[3].

2.1.1 단상 인버터의 등가 회로]

그림1의 등가회로에서 R은 시스템의 등가 저항이고 L은 필터의 인덕터 C는 필터의 커패시터이다.

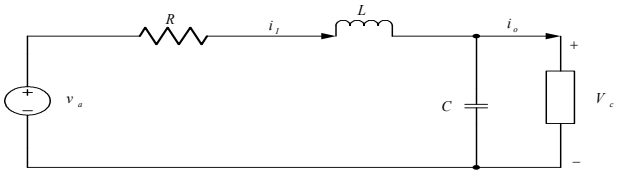

그림 1 단상인버터의 등가 회로
Fig. 1 Equivalent circuit of the inverter

그림1의 회로를 이용하여 단상인버터를 블록도로 표시하면 그림2와 같다.

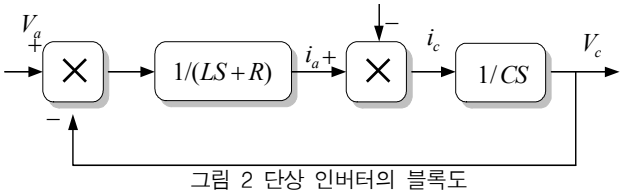

그림 2 단상 인버터의 블록도
Fig. 2 Block diagram of inverter

2.2 제어기 설계

2.2.1 PID 제어기

PID제어기는 선형제어기이며, 전달함수는 식(1)과 같이 표현된다[4].

$$G(s) = k_p + k_i \frac{1}{s} + k_d s \quad (1)$$

PID 제어기를 단상 인버터에 적용시키면 그림3과 같다.

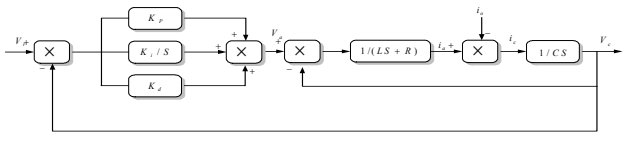

그림 3 PID제어기를 적용한 단상인버터의 블록도
Fig. 3 Block diagram of inverter adopted PID controller

그림3을 이용하여 시스템의 전달함수를 구하면 식(2)와 같다

$$\frac{V_c(s)}{V_r(s)} = \frac{k_d s^2 + k_p s + k_i}{LCs^3 + (RC + k_d)s^2 + (1 + k_p)s + k_i} \quad (2)$$

시스템의 특성방정식은 식(3)과 같다.

$$D(s) = LCs^3 + (RC + k_d)s^2 + (1 + k_p)s + k_i \quad (3)$$

특성방정식의 3개의 근은 시스템의 3개의 극이다. 이는 시스템의 정상상태응답과 안정도에 관련이 있다. 극배치 방법을 사용하여 시스템에 영향을 미치는 중요한 2개의 극을 식(4)와 같이 정의하고, 시스템에 큰 영향을 미치지 못하는 다른 하나의 극을 식(5)와 같이 설정한다.[2]

$$s_{1,2} = -\xi\omega \pm j\omega\sqrt{1-\xi^2} \quad (4)$$

$$s_3 = -m\xi\omega \quad (5)$$

식(4)와 식(5)를 이용하여 식(6)을 만들 수 있다.

$$D_r(s) = (s^2 + 2\xi\omega s + \omega^2)(s + m\xi\omega) \quad (6)$$

식(3)과 식(6)을 계수 비교하여 PID 제어기의 파라미터를 구할 수 있다. 여기서 ξ는 진동계수 ω는 필터의 공진 주파수이다. 각각의 계수를 비교하여 구한 PID 제어기 각각의 파라미터는 식(7)과 같다.

$$k_d = (2+m)\xi\omega LC - RC$$
$$k_p = (2m\xi^2 + 1)\omega^2 LC - 1$$
$$k_i = m\xi\omega^3 LC \quad (7)$$

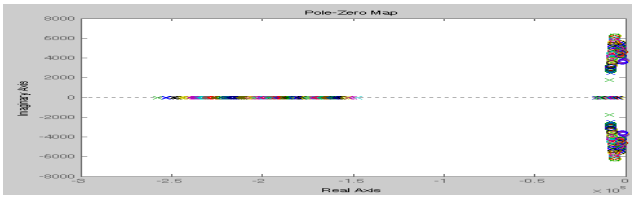

그림 4 m과 ξ의 변화에 따른 pole-zero map
Fig. 4 Pole-zero map depended on m and ξ

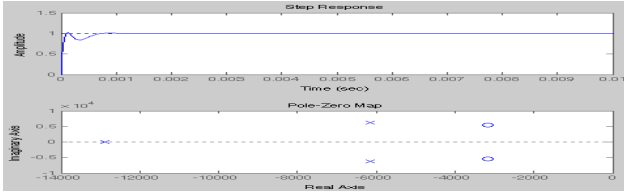

그림 5 단위 계단함수 응답과 pole-zero map
Fig. 5 Step response and assigned pole-zero map

표 1 PID 제어기를 적용한 단상 인버터의 시스템 상수
Table 2 Inverter system parameter adopted PID control

필터 인덕터	1.3 mH	m	2.1
필터 캐패시터	10 uF	ξ	0.7
저항	0.08 Ω	Kp	2.058
입력전압	DC 650 V	Ki	12893
레퍼런스 전압	312 V, 60 Hz	Kd	0.000326
Inductive 부하	12 Ω, 28.7 mH		

본 논문에서는 m을 0.1에서 30까지 변화 시키고 ξ를 0.7에서 0.99까지 변화시키면서 오버슈트 5% 이내, 정정시간 8ms 이내의 조건을 만족하는 파라미터를 제어기의 파라미터로 선정하고, 표 1에 나타내었다. 그림 4는 m과 ξ의 변화에 따른 극점과 영점의 위치이고, 그림 5는 선택한 극점과 영점의 위치를 나타내고 그에 따른 단위계단함수의 응답이다.

2.2.2 PI-PI 이중루프 제어기

PI제어기의 전달함수는 식(8)과 같다.

$$G_2(s) = k_p + \frac{k_i}{s} \quad (8)$$

전압과 전류 피드백을 위한 PI-PI 이중루프 제어기를 포함한 시스템의 전체 블록도를 그림 6과 같이 나타낼 수 있다.

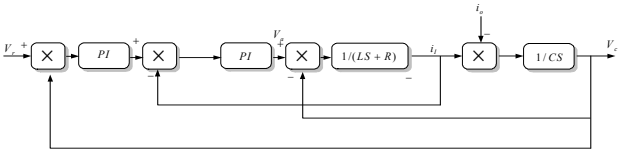

그림 6 PI-PI 이중루프를 적용한 단상인버터의 블록도
Fig. 6. Block diagram of inverter adopted dual loop PI controller

그림 6의 전달함수와 특성방정식은 식 (9)와 식 (10)과 같다.

$$\frac{V_c(s)}{V_r(s)} = \frac{k_{vp}k_{ip}s^2 + (k_{vi}k_{ip} + k_{vp}k_{ii})s + k_{vi}k_{ii}}{LCs^4 + (RC + k_{ip}C)s^3 + (1 + k_{ii}C + k_{vp}k_{ip})s^2 + (k_{vi}k_{ip} + k_{vp}k_{ii})s + k_{ii} + k_{vi}} \quad (9)$$

$$D(s) = LCs^4 + (RC + k_{ip}C)s^3 + (1 + k_{ii}C + k_{vp}k_{ip})s^2 + (k_{vi}k_{ip} + k_{vp}k_{ii})s + k_{ii} + k_{vi} \quad (10)$$

PID 제어기와 마찬가지로 특성방정식의 4개의 근은 시스템의 응답과 안정도에 관련이 있다. 식(4), 식(5)와 식(11)을 이용하여 식(12)를 만들 수 있다.

$$s_3 = -n\xi\omega \quad (11)$$

$$D_r(s) = (s^2 + 2\xi\omega s + \omega^2)(s + m\xi\omega)(s + n\xi\omega) \quad (12)$$

식(10)과 식(12)를 계수 비교하여 PI-PI 이중루프 제어기의 파라미터를 구할 수 있다. 각각의 계수를 비교하여 구한 PI-PI 제어기의 파라미터는 식(13)과 같다. 본 논문에서는 m을 0.1에서 30까지 변화 시키고 n=m으로, ξ를 0.7에서 0.99까지 변화시키면서 오버슈트 5% 이내, 정정시간 8ms 이내의 조건을 만족하는 파라미터를 선정하고, 표 2에 나타내었다. 그림7은 m과 n, ξ의 변화에 따른 극점과 영점의 위치이고, 그림8은 단위 계단 함수 응답과 전체 시스템의 극점과 영점이다.

$$k_{ip} = \frac{a_3}{C} - R \tag{13}$$

$$k_{vp} = \frac{a_2 - Ck_{ii} - 1}{k_{ip}}$$

$$k_{ii} = \frac{a_0}{k_{vi}}$$

$$Ck_{ii}^3 + (1-a_2)k_{ii}^2 + a_1 k_{ip} k_{ii} - k_{ip}^2 a_0 = 0$$

(단, 여기서 $a_0 \sim a_3$은 다음과 같다.)

$$a_0 = LCmn\xi^2\omega^4$$

$$a_1 = LC(m+n+2mn\xi^2)\xi\omega^3$$

$$a_2 = LC(1+(2m+2n+mn)\xi^2)\omega^2$$

$$a_3 = LC(m+n+2)\xi\omega$$

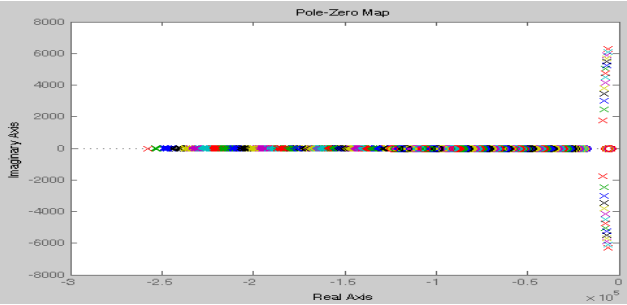

그림 7 m과 n, ξ의 변화에 따른 pole-zero map

Fig. 7 Pole-zero map depended on m and ξ

표 2 PI-PI 제어기를 적용한 단상 인버터의 시스템 상수

Table 2 Inverter system parameter adopted PI-PI control

필터 인덕터	1.3 mH	n	10
필터 캐패시터	10 uF	ξ	0.8
저항	0.08 Ω	Kvp	0.1444
입력전압	DC 650 V	Kvi	811.93
레퍼런스 전압	312 V, 60 Hz	Kip	200.59
Inductive 부하	12 Ω, 28.7 mH	Kii	6060000
m	10		

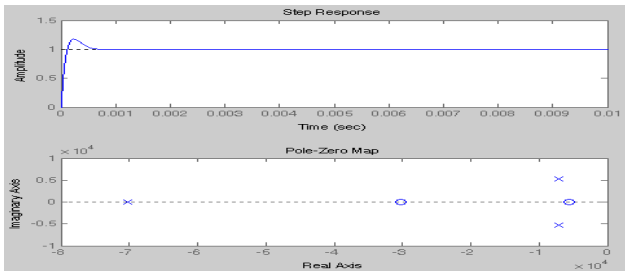

그림 8 단위 계단함수 응답과 pole-zero map

Fig. 8 Step response and assigned pole-zero map

3. 시뮬레이션

3.1 PID 제어기를 적용한 단상 인버터 시뮬레이션

시뮬레이션의 시스템 상수는 표 1과 같다. 그림 9는 R-L 부하의 레퍼런스 전압, 출력 전압과 전류 파형을 나타낸다.

그림 9에서 알 수 있듯이 약간의 리플은 있지만 레퍼런스 전압을 잘 추종 하고 있는 것을 확인 할 수 있다. 출력전류를 보면 부하의 인덕터로 인해 전압에 비해 위상이 뒤지게 되는 것을 확인 할 수 있다.

3.2 PI-PI 제어기를 적용한 단상 인버터 시뮬레이션

시뮬레이션의 시스템 상수는 표 2와 같다. 그림 10은 각각 PI-PI 이중루프 제어기를 적용한 인버터의 전압 레퍼런스와 R-L 부하시의 출력 전압 파형과 출력 전류 파형이다. 그림 10에서 확인 할 수 있듯이 PI-PI제어기를 적용한 시스템 역시 레퍼런스 전압을 잘 추종하는 것을 확인 할 수 있다.

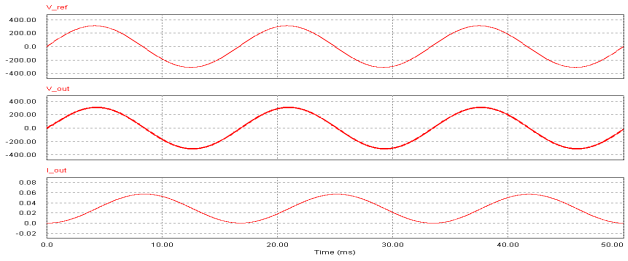

그림 9 레퍼런스 전압, 출력전압과 출력전류 파형

Fig. 9 Waveforms Reference voltage, output voltage and output current

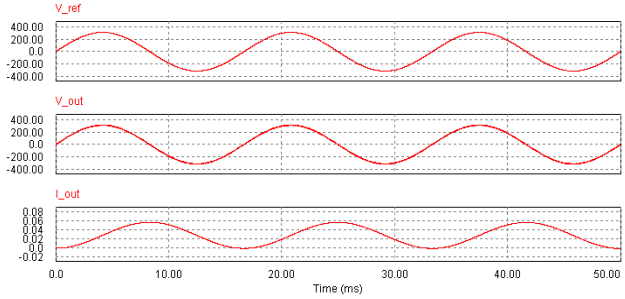

그림 10 레퍼런스 전압, 출력전압과 출력전류 파형

Fig. 10 Waveforms Reference voltage, output voltage and output current

4. 결론

본 논문에서는 단상인버터에 극 배치 방법을 사용한 PID제어기와 PI-PI 이중루프 제어기를 적용해 보았다. 먼저 극 배치 기법을 사용하여 제어기의 파라미터를 구하는 과정을 보이고 배치한 극점과 영점의 위치와 전체 시스템의 단위 계단 함수 응답을 확인해봤다. 시뮬레이션 결과를 보면 두 제어기 모두 레퍼런스 전압을 잘 추종하는 모습을 확인 할 수 있었다.

본 연구는 산업자원부와 한국산업기술재단의 지역혁신 인력양성사업으로 수행된 결과임.

참 고 문 헌

[1] B C. Kuo, *Automatic control system*, 8th Edition, john wiley & sons, inc., 2003.

[2] Yan Xiangwu, Gu Xiaobin, Zhang Bo and Zhang Lixia, "Analysis and design of a closed loop controller for single-phase high-frequency link inverter based on pole-assignment," ICEMS, pp 114-117, 2007.

[3] N.Mohan, T. M. Undeland and W. P. Robbins, *Power Electronics Converter, Applications and Design*, 2nd Edition, john wiley & sons, inc., pp 211-224, 1995.

[4] Karl J. Astrom, Tore Hagglund, *PID Controllers*, 2nd Edition, Instrument Society of America, 1995.