

인버터 출력 임피던스 기반 인덕터 전류 피드백의 능동 댐핑을 이용한 비례-공진 제어기 설계에 관한 연구

김동욱, 김범준, 김성훈, 박정민, 원충연*
성균관대학교

A Study on Design of PR Controller using Active Damping with Inductor Current Feedback based on Inverter Output Impedance

Dong-Wook Kim, Bum-Jun Kim, Sung-Hoon Kim, Jung-Min Park, Chung-Yuen Won
Sungkyunkwan University

ABSTRACT

본 논문은 단상 풀 브리지 인버터의 인덕터 전류를 이용한 능동 댐핑을 적용한 비례-공진 제어기의 이득값 선정 방법을 제안한다. 제어기를 포함한 전체 인버터 회로의 시스템을 수식적으로 모델링 하여 비례이득과 적분이득 간의 상관관계를 정리한 후, 얻어낸 이득값이 유효한지 검증하기 위해 PSIM과 MATLAB을 통해 검증하였다.

1. 서론

풀 브리지 단상 인버터를 제어하기 위해 비례-공진 제어기를 사용하게 되면 AC 지령을 통한 제어를 수행하므로 제어기 구성이 간단해지는 장점이 있다. 하지만, 비례-공진 제어기의 특성상 폐루프의 공진 주파수에서 매우 큰 이득으로 인해 인버터의 출력이 불안정해진다는 단점이 있다^[1].

이러한 비례-공진 제어기의 단점을 보완하기 위해 능동 댐핑을 적용^[2]하여 기본 주파수(60Hz)에서는 지령 신호를 추종하며, 공진 주파수에서 비교적 낮은 이득을 가지는 제어기의 이득값을 전체 폐루프 시스템의 수학적인 모델링을 통해 설계하는 방법을 제안한다.

2. 능동댐핑을 이용한 제어기 모델링

2.1 비례-공진 제어기

이상적인 비례-공진 제어기의 경우에는 실제 사용 시 매우 높은 이득으로 인해 적용이 어렵다는 단점이 있다. 그러므로, 비이상적인 비례-공진 제어기를 선정하여, 기본 주파수에서 비교적 낮은 이득을 가지도록 구성하며 이는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$G_{PR}(s) = k_p + \frac{k_i \omega_c (s + \omega_c)}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_n^2} \quad (1)$$

2.2 능동댐핑

능동댐핑은 제어기를 통해 가상의 직렬 저항이 추가된 것과 같은 효과를 보여주며, 시스템 전달함수에 감쇠항이 추가되어 보드 선도의 공진주파수에서 발생하는 첨두공진치를 줄이거나 없앨 수 있다.

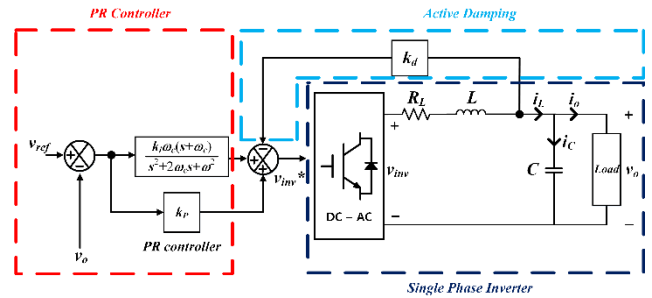


그림 1 능동 댐핑이 적용된 비례-공진 제어기를 통해 제어되는 단상 인버터의 회로도

Fig. 1 Schematic diagram of single-phase inverter controlled by PR controller with active damping

2.3 제안하는 제어기의 설계 방법

그림 1은 제어기 구성을 포함한 전체 인버터 회로이며, 다음의 식들을 통해 제어기 및 인버터의 수학적인 모델링이 가능하다.

$$V_{inv}^*(s) = G_{PR}(s) \cdot \{V_{ref}(s) - V_o(s)\} - k_d \cdot I_L(s) \quad (2)$$

$$V_{inv}(s) = (LCs^2 + R_L Cs + 1) \cdot V_o(s) + (Ls + R_L) \cdot I_o(s) \quad (3)$$

여기서, 제어기의 출력과 인버터의 입력을 동일하다고 가정할 수 있는데, 이 경우 식(4)와 같이 전체 폐루프 전달함수로 수식의 정리가 가능해진다. 이때, $G_o(s)$ 는 전압전달비를 의미하며 $Z_o(s)$ 는 임피던스를 의미한다.

$$V_o(s) = G_o(s) \cdot V_{ref}(s) + Z_o(s) \cdot I_o(s) \quad (4)$$

$$G_o(s) = \frac{k_p s^2 + (2k_p + k_i) \omega_c s + k_p \omega_n^2 + k_i \omega_c^2}{d_4 s^4 + d_3 s^3 + d_2 s^2 + d_1 s + d_0} \quad (5)$$

$$Z_o(s) = \frac{Ls^3 + (2\omega_c L + R_L + k_d) s^2 + \{2\omega_c (R_L + k_d) + \omega_n^2 L\} s + \omega_n^2 (R_L + k_d)}{d_4 s^4 + d_3 s^3 + d_2 s^2 + d_1 s + d_0} \quad (6)$$

$$d_4 = LC \quad (7)$$

$$d_3 = (2\omega_c L + R_L + k_d) C \quad (8)$$

$$d_2 = \omega^2 LC + 2\omega_c (R_L + k_d) C + k_p \quad (9)$$

$$d_1 = \omega^2 C (R_L + k_d) + (2k_p + k_i + 2)\omega_c \quad (10)$$

$$d_0 = (k_p + 1)\omega^2 + k_i \omega_c^2 \quad (11)$$

식 (4) ~ (6)을 이용하는 경우 제어기의 비례이득 k_p 와 적분이득 k_i 를 조절하여 원하는 $G_o(j\omega_n)$, $Z_o(j\omega_n)$ 의 크기를 수식적으로 계산이 가능하다. 인버터 제어기 설계시 99% 이상의 전압이득을 기반으로 설계를 하였으며, 능동 댐핑을 이용한 출력 전압의 공진 성분 저감을 위한 제어기의 설계를 하기 위해 $s = j\omega_n$ 를 $Z_o(s)$ 에 대입하는 경우 다음의 식과 같이 정리된다.

$$|Z_o(j\omega_n)| = \frac{\sqrt{4\omega_n^2 L^2 + 4\omega_n^2 \omega_c^2 (R_i + k_d)^2}}{\sqrt{\{-2\omega_n^2 \omega_c C (R_i + k_d) + \omega_n^2 + k_i \omega_c^2\}^2 + \omega_n^2 \omega_c^2 (2k_p + k_i + 2 - \omega_n^2 LC)^2}} \quad (12)$$

식(12)를 바탕으로 하여 제어기 설계를 위해 비례이득과 적분이득에 따른 $|Z_o(j\omega_n)|$ 의 분포는 그림 2를 통해 확인할 수 있으며, 이를 기반으로 하여 적절한 임피던스를 선정하여 다음 과정에서 정확한 비례이득과 적분이득의 선정이 가능하다.

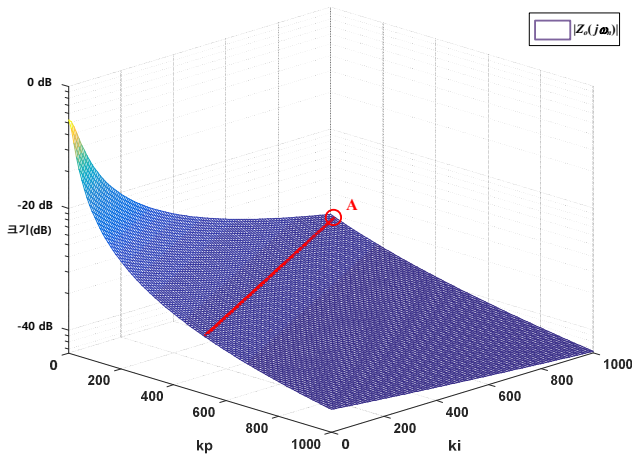


그림 2 k_p, k_i 값에 따른 $|Z_o(j\omega_n)|$ 의 곡선
Fig 2 The curves of $|Z_o(j\omega_n)|$ according to k_p, k_i

그림 2에서 선정된 $|Z_o(j\omega_n)|$ 를 통해 식 (12)를 k_p 에 대한 수식으로 정리하면

$$k_p = \frac{\omega_n LC^2}{2} - \frac{k_i}{2} - 1 - \frac{\sqrt{N_Z}}{2\omega_n \omega_c \cdot |Z_o(j\omega_n)|} \quad (13)$$

$$N_Z = 4\omega_n^2 \omega_c^2 (\omega_n^2 L^2 + k_d^2) + |Z_o(j\omega_n)| \cdot \left\{ -(2\omega_n^2 \omega_c k_d - \omega_c^2 k_i)^2 + \omega_n^2 (4\omega_n^2 \omega_c C k_d - 2\omega_c^2 k_i - \omega_n^2) \right\} \quad (14)$$

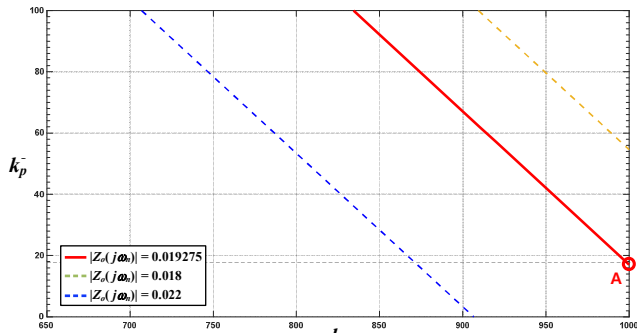
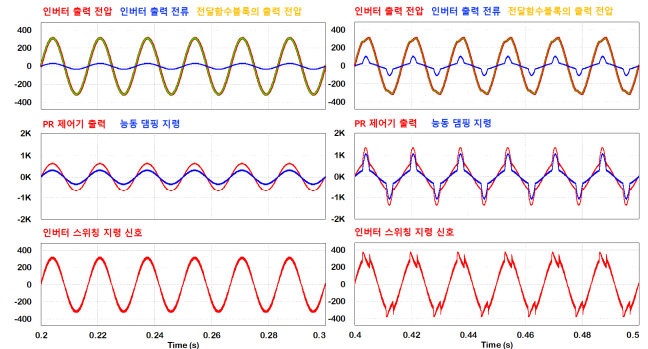


그림 3 선정된 $|Z_o(j\omega_n)|$ 에 따른 k_p, k_i 그래프
Fig 3 The curves of k_p, k_i according to $|Z_o(j\omega_n)|$

식 (13)을 통해 그림 3의 $|Z_o(j\omega_n)|$ 의 값에 따른 그래프를 얻어 낼 수 있으며, 그래프상의 이득 선정이 가능하다. 추가로, 비례이득이 높아짐에 따라 출력 전압의 THD가 상승하게 되며 적분이득이 1000을 넘어가게 되면 응답 속도가 느려진다. 이를 고려하여 $|Z_o(j\omega_n)| = 0.0193$ 일 때, 그래프상의 A지점인 $k_p = 17.6985$, $k_i = 1000$ 값을 선정하였다.

3. 시뮬레이션 결과



(a) 저항 부하에서의 동작 (b) 정류 부하가 추가된 경우의 동작

그림 4 시뮬레이션 결과
Fig 4 Simulation results

그림 4는 앞서 제안한 제어기 이득값을 기반으로 시뮬레이션을 진행한 것으로, 그림 4(a)를 통해 저항 부하에서 99.606%의 전압 추종 능력을 보여주는 것을 확인하였고, 그림 4(b)에서 정류 부하가 추가되는 경우에 THD는 4.66%임을 확인하였다. 이를 통해 출력 전압의 왜곡이 심하게 일어나는 경우에도 능동댐핑을 통해 비례-공진 제어기의 출력이 불안정해지는 것을 방지하고 있다는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 페루프 전달함수의 임피던스를 기반으로 하여 비례이득과 적분이득 사이의 상관관계를 찾아내고 이를 기반으로 한 이득값을 찾아내어 능동댐핑이 적용된 비례-공진 제어기의 설계 값을 찾아내는 것을 제안하였으며, MATLAB과 PSIM을 이용한 시뮬레이션을 통해 앞서 언급된 수식을 통해 얻어낸 이론상의 출력 값과 99.843% 정도의 동일함을 확인하였다.

이 논문은 2019년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2019R1A2C2007216)

참고 문헌

[1] M Castilla, J Miret, J Matas, LG de Vicuna and JM Guerrero, "Control design guidelines for single-phase grid connected photovoltaic inverters with damped resonant harmonic compensators" IEEE Trans. Ind. Electron. Vol. 56, pp. 4492-4501, 2009

[2] N Zhang, H Tang and C Yao, "A Systematic Method for Designing a PR Controller and Active Damping of the LCL Filter for Single-Phase Grid-Connected PV Inverters", Energies, Vol. 7, No. 6, pp. 3934-3954, 2014, June