

단상 전압 소스 인버터의 전력 품질 향상을 위한 전압 제어

곽봉우

한국생산기술연구원, 동력소재부품연구그룹

Voltage Control of Power Quality Improvement in Single-Phase Voltage Source Inverter

Bongwoo Kwak

Korea Institute of industrial Technology, Automotive Materials & Components R&D Group

ABSTRACT

ABSTRACT

무정전 전원 공급 장치(Uninterruptible power supply, UPS)에 사용되는 인버터에 대한 출력 전압의 높은 정밀도 및 우수한 총 고조파 왜곡(Total harmonic distortion T.H.D.v) 특성에 대한 요구사항이 높아지고 있다. 따라서, 본 논문에서는 단상 UPS용 인버터의 전력품질 향상을 위한 전압 제어를 분석하고, 실험 결과를 제시한다. 일반적인 UPS용 인버터의 경우 전압 소스 인버터(VSI)로 구현되며, 내부 전류 제어기는 PI 제어기가 사용되며, 외부 전압 루프의 전압 제어기의 경우 PR 제어기가 사용된다. 그러나, 비선형 부하 조건에서 3차, 5차, 7차 등 고차 성분에 대한 고조파 왜곡이 여전히 발생된다. 따라서, 본 논문에서는 고차 성분에 대한 공진 제어기가 추가된 전압 제어기를 설계하였으며, 모의실험을 통해서 검증하였다.

1. 서론

무정전 전원 공급장치(Uninterruptible power supply, USP)는 전자 장비 및 통신 장비 등 전원환경에 민감한 부하에 높은 신뢰성과 안정적인 전원공급을 위해 많이 사용된다. 이러한 어플리케이션에서는 안정적이고 우수한 품질의 AC 전압 파형이 중요하다. 선형 및 비선형 부하 조건에서도 부하 변동에 상관없이 일정 전압과 주파수의 AC 전원 공급과 파형에 왜곡이 없는 정현파를 공급할 수 있어야 한다.^[1]

현재 대부분의 단상 UPS 인버터는 AC 출력 전압을 제어하기 위해 내부 전류 제어와 외부 전압 제어기로 구성된 이중 루프 전압 제어를 사용한다. 내부 전류 제어기는 전체 제어 시스템의 과도 성능을 결정하는 중요한 요소이다.

이중 루프 제어기 기반의 UPS 단상 인버터는 그림 1에 나와있으며, V_{DC} 는 인버터의 DC입력 전압, L_f 는 필터 인덕턴스, C_f 는 필터 커패시턴스, R_L 는 부하 저항, V_{AC} 는 인버터의 AC 출력 전압 이다.

기존의 전압 제어기와 전류 제어기는 PI 제어기를 사용하였다. 하지만, 인버터는 부하 변동에 의한 영향을 많이 받고, 비선형 부하에 의해 출력 전압 파형의 왜곡이 발생하여 정현파를 유지하지 못하고, 과도상태에서 제어 응답이 낮아진다. 특히, 인버터의 경우 지령값이 정현파이기 때문에 정상상태에서 오차가 발생하게 된다. 이를 극복하기 위해 비례-공진 제어기를 외부 전압 제어 루프에 적용하여

정상상태 오차를 줄이는 연구가 나오고 있다.^[1-2]

본 논문에서는 단상 UPS의 비선형 부하에서 총 고조파 왜곡(Total harmonic distortion T.H.D.v)을 낮추기 위해 PR 전압 제어기에 다중 공진 제어기를 적용한 제어 기법을 구현하고 검증하였다. AC 출력 전압을 제어하기 위해 공진 주파수를 출력 전압의 지령치를 기본과 주파수로 설정하였다. 추가적으로 기본파의 3차, 5차 및 7차 고조파 보상을 위해 다중 공진 제어기를 적용하였다. 제안하는 제어기의 타당성을 검증하기 위해 PSIM 시뮬레이션을 통해 선형 및 비선형 부하를 적용하여 T.H.D.v 특성을 확인하였다.

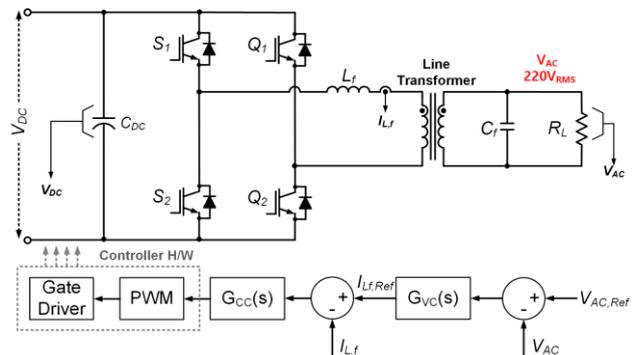


그림1 2중 루프 제어기 기반 UPS용 단상 인버터 시스템

Fig.1 Single-phase inverter for UPS system with dual loop controller

2. 전압 소스 인버터의 이중 루프 제어기 설계

2.1 내부 루프의 전류 제어기

내부 전류 제어기는 필터 인덕터의 전류를 제어하며 PI제어기가 적용된다. PI제어기가 적용된 폐루프 전달 함수는 식 (1)과 같이 정의된다.

$$M_{PI}(s) = \frac{I_{L,f}}{I_{L,f}^*} = \frac{G_{CC}(s)G_{id}(s)}{1 + G_{CC}(s)G_{id}(s)} \quad (1)$$

여기서, $G_{CC}(s) = K_p + K_i/s$, $G_{id}(s) = 1/L_f s + R_L$ 이다.

2.2 외부 루프의 전압 제어기

외부 루프의 전압 제어기에는 출력 전압의 응답 특성 및 정상상태 오차를 줄이기 위해서 PR 제어기가 사용된다. 공진주파수는 기본과 주파수로 설계되어 해당 주파수에서 이득을 키울 수 있다. 선형 부하의 경우 정상 상태에서 AC 전압 지령에 대한 에러를 줄이는데 좋은 성능을 기대할 수

있습니다. 식 (2)는 PR 제어기의 전달함수이다.

$$G_{PR}(s) = K_p + K_i \frac{2\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_n^2} \quad (2)$$

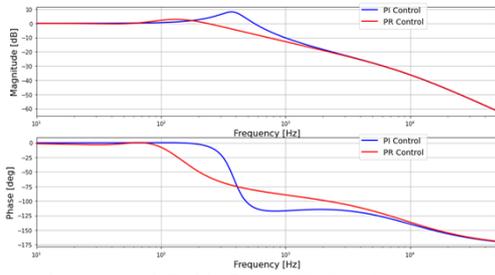


그림2 PI 및 PR 제어기의 주파수 응답 - 2중 루프 제어
Fig.2 Frequency response of PI and PR controllers - dual loop control

그림 2는 이중 루프 제어에서 PI 및 PR 전압 제어기가 사용되었을 때, 주파수 응답 특성을 보여준다. Phase margin이 PI제어보다 PR 제어기가 더 커지는 것을 알 수 있다. 하지만, 비선형 부하에서는 PR 제어기가 적용되어도 고조파 왜곡이 발생한다. 따라서, 3차 5차 및 7차 고조파를 억제하기 위해 해당 주파수에 대한 공진 제어기를 추가하였다. 그림 3은 홀수 고조파 억제를 위한 공진 제어기가 포함된 전체 제어 블록을 보여준다.

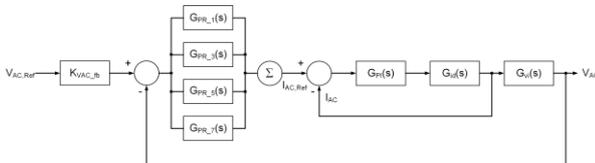


그림3 홀수 고조파 억제 기능이 있는 2중 루프 제어 블럭도
Fig.3 Dual loop control block diagram with odd harmonic distortion suppression

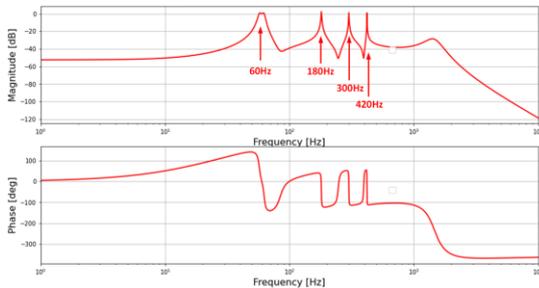


그림4 제안하는 2중 루프 제어기의 주파수 응답
Fig.4 Frequency response of the proposed double loop controller

그림4는 PR 제어기와 고조파 성분에 대한 공진 제어기가 적용된 시스템의 주파수 응답을 보여준다. 홀 수 주파수 대역에서 전압 제어기의 대역폭을 크게 증가시켜 정상 상태에서 정확한 제어를 달성하게 해준다.

3. 모의 시험 및 결론

제안하는 제어기의 타당성을 검증하기 위해 PSIM을 활용해서 모의실험을 수행하였다. 표 1은 단상 인버터 회로 파라미터 및 사양을 보여준다. 정격 출력조건은 3kW이다.

표 1 단상 인버터의 회로 파라미터 및 사양

Table 1 Circuit parameters and specifications of single-phase inverter

Parameters	Value
DC Voltage, V_{DC}	260V _{DC}
Output Voltage, V_{AC}	220V _{rms}
Filter Inductor, L_f	600 μ H
Filter Capacitance, C_f	20 μ F
Load Resistance, R_L	16 Ω
Transformer Turn ratio	33:46
Switching Frequency	20kHz

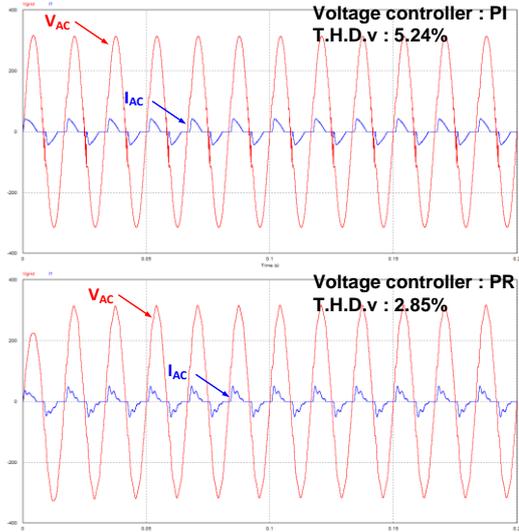


그림5 비선형 부하 조건에서의 모의실험 결과
Fig.5 Simulation results under non-linear load conditions,

그림5는 비선형 부하가 적용되었을 때 출력 3kW 부하 조건에서의 출력 전압 및 전류 파형을 보여준다. 비선형 부하 조건에서 PI 전압 제어기가 적용되었을 때 5.24%로 크게 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 반면, 고차 공진 제어기가 적용된 PR 전압 제어기가 적용되었을 때 T.H.D.v는 2.85%로 PI 제어기 대비 2.39% 감소되는 것을 확인 할 수 있다. 이는 전압 소스 인버터에 고차 공진 제어기를 포함하는 PR 제어기를 전압 제어기로 적용하면 전압 제어 성능 및 전력 품질을 향상시킬 수 있다.

이 논문은 한국생산기술연구원 기본사업 “차세대 모빌리티용 AI 융합 자가발전·충전 핵심 요소기술 개발(KITECH EH-23-0013)”의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참고 문헌

- [1] M. Parvez, M. F. M. Elias, N. A. Rahim, F. Blaabjerg, D. Abbott and S. F. Al-Sarawi, "Comparative Study of Discrete PI and PR Controls for Single-Phase UPS Inverter," in IEEE Access, vol. 8, pp. 45584-45595, 2020.
- [2] P. C. Loh, D. G. Holmes, "Analysis of multiloop control strategies for LC/CL/LCL-filtered voltage source and current-source inverters", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 41, No. 2, pp. 644-654, 2005.