

# 저항성 수하제어를 이용한 단상 UPS 인버터의 5-병렬운전

지준근\*, 품섬낭\*, 구대관\*\*  
 Soonchunhyang Univ.\*, (주)브이씨텍\*\*

## 5-parallel operation of single-phase UPS inverters using resistive droop control

Jun Keun Ji\*, Samnang Kuong\*, Dae Kwan Ku\*\*  
 Soonchunhyang Univ.\*, VCTech\*\*

### ABSTRACT

본 논문에서는 저항성 수하제어 방식과 단일루프 강인 전압 제어기를 적용하여 단상 UPS 인버터의 비통신선 방식 5 병렬 운전 결과를 기술한다. 단일 루프 강인 전압 제어기를 이용해 단상 3kVA UPS 인버터 5대로 병렬운전 환경을 구축하였고, 저항성 주파수 전압 강하 방식의 수하 제어를 이용하여 저항 부하와 선형 부하에 대한 전력분담 특성을 PSIM 시뮬레이션을 통하여 확인하였다.

### 1. 서 론

최근 전원 환경에 민감한 데이터 센터, 공장 같은 중요 부하에 대한 안정적인 전원을 공급하기 위해 무정전전원장치(Uninterruptible Power Supply ; UPS)가 널리 쓰이고 있다. 특히, 부하의 증가에 따라 UPS의 병렬운전이 필요하게 되었고 이에 더해 UPS로 구성된 전력망의 고장 시에도 부하에 대한 지속적인 전원 공급과 손쉬운 UPS 증설을 위해 리던던시(Redundancy) 개념이 주로 이용되고 있다.

병렬 UPS 인버터 시스템의 제어법은 크게 통신선 방식과 비통신선 방식으로 구분할 수 있다. 비통신선 방식은 교류 발전기의 수하제어(Droop Control)를 UPS 병렬운전에 적용한 것으로서 각개 UPS 인버터의 출력전압 및 출력전류 정보를 이용하기 때문에 설치 지역 문제가 사라져 더 높은 신뢰성과 확장성을 가진다<sup>[1]</sup>.

본 논문에서는 단일 루프 강인 전압 제어기를 이용한 단상 UPS 인버터의 5 병렬 시험 결과에 대하여 기술한다. 우선 인버터의 강인 전압 제어기 설계법과 저항성 수하제어를 간략히 소개하고, 저항 부하 및 선형 부하에 대한 5 병렬 시뮬레이션 결과를 보인다.

### 2. 단상 UPS 인버터의 강인 전압 제어기

본 논문에서 사용한 단상 UPS 인버터의 전압 제어에는 단일 루프 강인 전압 제어기를 이용하였다<sup>[2]</sup>. 우선 인버터의 부하 변동에 대한 강인한 성능을 달성하기 위해 정격출력, 역률을 이용하여 그림 1과 같은 부하 어드미턴스 불확실성의 영역을 설정하였다. 다음으로 MATLAB의 Robust Control Toolbox를 이용하여  $\mu$  합성 방법으로써 강인 전압 제어기를 설계하였다. 설계된 전압 제어기의 전달함수는 식 (1)과 같다.

$$\frac{2.57 \times 10^7 s^3 - 1.016 \times 10^9 s^2 + 1.649 \times 10^{14} s + 3.142 \times 10^{14}}{s^4 + 3.95 \times 10^5 s^3 + 7.771 \times 10^{10} s^2 + 6.432 \times 10^{11} s + 1.104 \times 10^{16}} \quad (1)$$

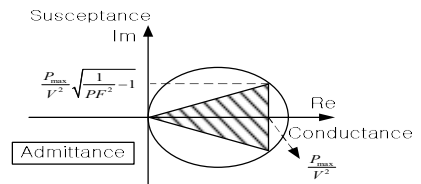


그림 1 부하 어드미턴스의 불확실성 영역

### 3. 저항성 수하제어 병렬운전 알고리즘

그림 2는 본 논문의 5 병렬운전에 사용된 저항성 수하제어의 전체 구조이다.

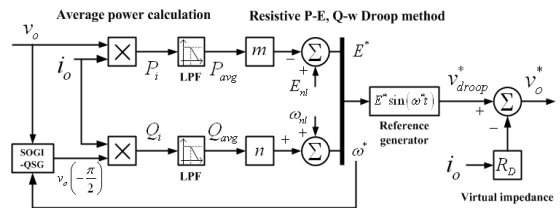


그림 2 저항성 수하제어기의 블록 다이어그램

수하제어에는 인버터가 출력하는 평균 유효전력값이 필요하다. 따라서 출력전압과 출력전류를 측정하여 순시 유효전력을 계산한 다음에 2차 저역통과필터를 적용해 평균전력값을 구한다. 다음으로 평균전력값을 이용하여  $P-E, Q-\omega$  수하 특성을 가지는 저항성 수하(Resistive Droop)제어를 수행한다. 저항성 수하제어는 인버터의 출력 임피던스를 저항으로 가정한 수하제어로서  $P-\omega, Q-E$ 의 유도성 수하(Inductive Droop)제어보다 시스템의 댐핑이 더 가능하고, 인버터 간의 출력전압 위상차가 유효전력 분담에 영향을 적게 준다<sup>[3]</sup>.

수하제어의 결과로서 인버터 출력전압 지령의 크기와 각주파수를 얻는다. 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$E^* = E_{nl} - mP_{avg}, \omega^* = \omega_{nl} + nQ_{avg} \quad (1)$$

$$v_{droop}^* = E^* \sin(\omega^* t) \quad (2)$$

식 (1)의  $m, n$ 은 각각 유효전력, 무효전력 수하계수이며, 식 (2)의  $v_{droop}^*$ 는 수하제어기에서 생성된 전압 지령이다.

마지막으로 전압 지령에 대해 그림 2에서와 같이 가상 임피던스를 적용한다. 앞서 기술한대로 인버터의 출력 임피던스를 저항으로 가정한 저항성 수하제어를 이용하기 때문에 가상 임피던스에는 저항 성분만을 이용한다. 따라서 수정된 전압 지령은 다음식과 같다.

$$v_o^* = v_{droop}^* - R_D i_o \quad (3)$$

$v_o^*$ 는 실제 출력전압 지령이며,  $R_D$ 는 가상저항,  $i_o$ 는 인버터의 출력전류이다.

#### 4. 시뮬레이션 결과

저항성 수하제어기의 성능 평가를 위해 단상 정격 3kVA UPS로 5 병렬 시스템을 구축하여 시뮬레이션을 수행하였다. 표 1과 2는 각각 사용된 5 병렬 UPS 인버터 시스템 파라미터와 부하조건이다.

표 1 단상 5-병렬 UPS 인버터 시뮬레이션의 시스템 파라미터

항목	사양
Inverter topology	Half Bridge Inverter
Switching device & freq.	IGBT, 20[kHz]
Output LC filter	1.5[mH], 10[uF]
Inverter controller	Mu controller
$E_{nl}, \omega_{nl}$	311[V], 377[rad/sec]
$P-E$ Droop coefficient	$m = 5.0e-4$ [V/W]
$Q-\omega$ Droop coefficient	$n = 2.0e-4$ [rad/VAR]
Virtual impedance	$R_D = 1$ [Ohm]

표 2 단상 5병렬 UPS 인버터 시뮬레이션의 부하조건

항목	사양
Load	R 6[Ohm] (8.03[kW] at 220[Vrms])
	R L 5.5[Ohm]+6[mH] (8.13[kVA] at 220[Vrms])

5대의 UPS 인버터가 시뮬레이션 시작과 동시에 0.1초까지 무부하 상태에서 수하제어 모드로 운전 중 0.1초에 약 8kVA 저항부하 또는 R L 선형부하를 스텝으로 인가하여 0.7초까지 5 병렬 운전을 수행하고 Hot Swap 운전을 알아보기 위해 5번 인버터를 차단한다. 그 다음으로 1.0초까지 4병렬 운전을 수행하였다.

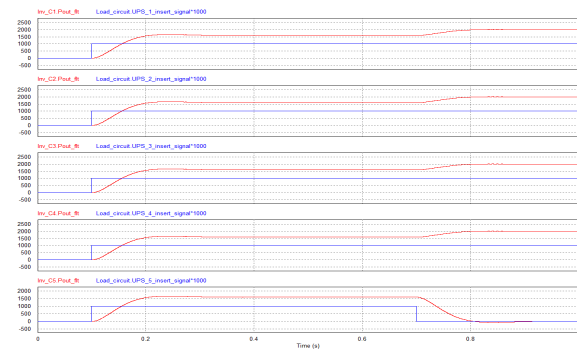


그림 3 5-병렬 저항부하 시뮬레이션 결과 - 평균 유효전력

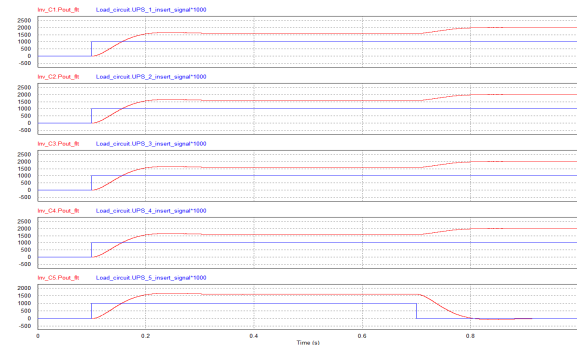


그림 4 5-병렬 저항부하 시뮬레이션 결과 - 평균 무효전력

그림 3과 4는 저항 부하에 대한 5 병렬운전시 평균 유효 전력 파형이다. 0.1초에 부하인가 상황과 0.7초에 5번 인버터가 차단된 후에도 우수한 성능으로 유효 전력 분담 제어가 수행되었으며, 우수한 과도응답 성능을 보여주었다.

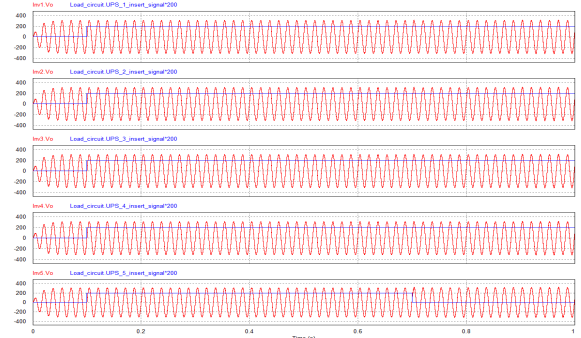


그림 5 5-병렬 선형부하 시뮬레이션 결과 - 출력전압

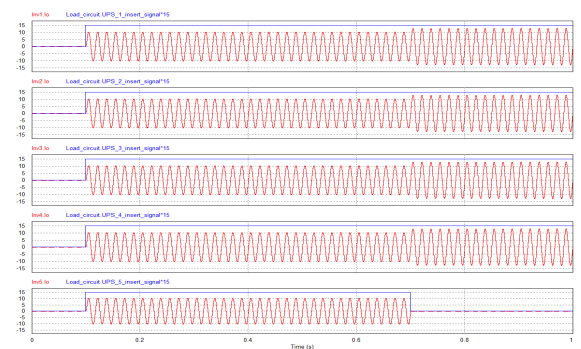


그림 6 5-병렬 선형부하 시뮬레이션 결과 - 출력전류

그림 5와 6은 선형 부하에 대한 5 병렬운전시 출력 전압과 전류 파형이다. 0.1초에 부하인가 상황과 0.7초에 5번 인버터가 차단된 후에도 우수한 성능으로 전압 제어와 동시에 전류 분담 제어가 수행되었으며, 우수한 과도응답 성능을 보여주었다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 단일 루프 강인 전압 제어기와 저항성 수하 제어를 이용한 단상 UPS 인버터의 5 병렬운전에 대하여 기술하고 시뮬레이션 결과를 보였다. 5 병렬운전에서는 저항 부하와 선형 부하에 대해서 우수한 전류 분담과 전력 분담 성능을 보여주었다.

#### 참고 문헌

- [1] J.M. Guerrero, L. Hang, J. Uceda, "Control of Distributed Uninterruptible Power Supply Systems", IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol. 55, No. 8, pp. 2845-2859, 2008.
- [2] 구대관, 지준근, 차귀수, 문준희, "단상 UPS 인버터의 강인한 전압제어기 설계", 전력전자학회 논문지, 제16권, 제4호, pp.309-314, 2011.
- [3] J.M. Guerrero, M.J. Atas, Luis Garcia de Vicuna, M. Castilla, J. Miret, "Decentralized Control for Parallel Operation of Distributed Generation Inverters Using Resistive Output Impedance", IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol. 54, No. 2, pp.994-1004, 2007.