

단일 루프 강인 전압 제어를 이용한 단상 UPS 인버터의 비통신선 방식 병렬 운전

구대관*, 지준근*, 차귀수*
순천향대학교*

A Wireless Parallel Operation of Single-phase UPS Inverter using Single-loop Robust Voltage Controller

Dae-Kwan Ku*, Jun-Keun Ji*, Guesoo Cha*
Soonchunhyang Univ*

ABSTRACT

단일 루프 강인 전압 제어를 이용한 단상 3kVA UPS 인버터의 비통신선 방식 병렬 운전 결과를 기술한다. 단상 UPS 인버터 2대로 병렬운전 실험 환경을 구축하였고, 주파수-전압 강하 방식의 수하 제어를 이용하여 저항 부하, 비선형 부하에 대한 전력분담을 실험을 통하여 확인하였다.

1. 서론

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 정보만을 이용하기 때문에 설치 지역 문제가 사라져 더 높은 신뢰성과 확장성을 가진다^[1].

현재 대부분의 UPS 인버터 전압 제어기는 이중루프제어로서 전압제어-전류제어 루프로 구성된다. 이 경우 전압 제어기만을 이용한다면 전류 센서를 줄여 재료비 감소가 가능하다. 하지만 단일 루프 전압 제어를 이용한 UPS 인버터의 수하제어에 관한 연구 결과가 알려지지 않았다.

본 논문에서는 단일 루프 강인 전압 제어를 이용한 단상 UPS 인버터의 병렬 운전에 대하여 기술한다. 우선 인버터의 강인 전압 제어기 설계법과 수하제어를 다루고 다음으로 저항 부하 및 비선형 부하에 대한 실험 결과를 보인다.

2. 단상 UPS 인버터 전압 제어기

본 논문의 단상 UPS 인버터의 전압 제어에는 단일 루프 강인 전압 제어를 이용한다^[2].

인버터의 부하변동에 대한 강인한 성능을 달성하기 위해 정격출력, 역률을 이용하여 그림 1과 같은 부하 어드미턴스 불확실성의 영역을 설정한다.

다음으로 MATLAB의 Robust Control Toolbox를 이용하여 μ -합성 방법으로 강인 전압 제어를 설계한다. 설계된 전압 제어기의 전달함수는 식 (1)과 같다.

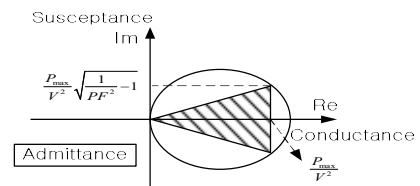


그림 1 부하 어드미턴스의 허용범위와 부하 불확실성

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

3. 병렬운전 알고리즘

그림 2는 수하제어기의 전체 구조이다.

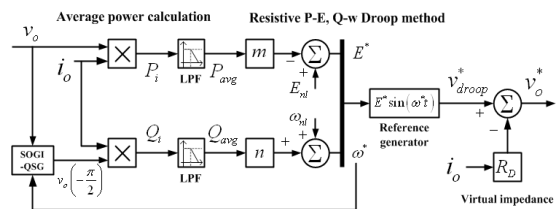


그림 2 수하제어기의 블록 다이어그램

수하제어에는 인버터가 출력하는 평균 유효전력값이 필요하다. 따라서 출력전압과 출력전류를 측정하여 순시 유효전력을 계산한 다음에 2차 저역통과필터를 적용하여 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 주는 것으로 알려져 있다^[3].

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

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

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

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

마지막으로 전압 지령에 대해 가상 임피던스를 적용한다. 앞

서 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. 실험 결과

설계된 수하제어기의 성능 평가를 위해 단상 정격 3kVA UPS로 2병렬 시스템을 구축하여 실험을 수행하였다. 표 1은 실험에 가용된 시스템의 파라미터이다. 두 대의 UPS에서 부하까지의 라인 임피던스는 같다고 가정하였다.

표 1 단상 2병렬 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_{nb}, ω_{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	$R_D = 1[Ohm]$

그림 3은 1번 UPS 인버터가 1.7kW 저항부하 상태에서의 단독 운전 중에 2번 인버터가 투입되어 시작된 2병렬운전 상황의 과도응답 파형이다. 약 400ms후에 정상상태로 도달함을 알 수 있다. 그림 4는 정상상태로 진입한 후 두 UPS 인버터의 출력전압과 출력전류를 나타낸다. 전압, 전류 모두 일치하는 것을 알 수 있다. 따라서 우수한 성능의 전력분담을 보여주고 있는 것을 알 수 있다.

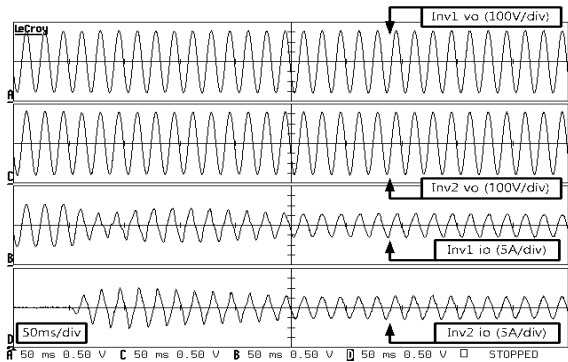


그림 3 저항부하 - 2병렬운전 과도응답 : 전압, 전류

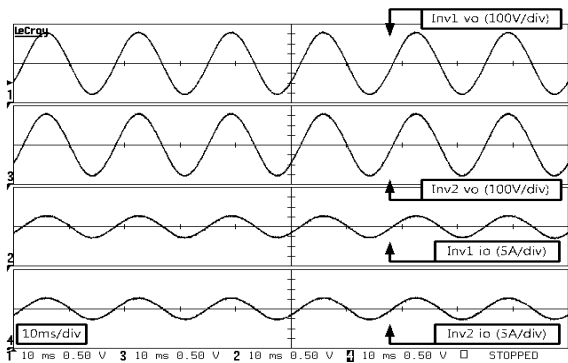


그림 4 저항부하 - 2병렬운전 정상상태 : 전압, 전류

그림 5는 비선형 부하(다이오드 전파 정류기)에 대한 2병렬 운전 상황의 과도응답 파형이다. 약 300ms후에 정상상태로 도달함을 알 수 있다. 그림 6은 정상상태로 진입한 후 두 UPS 인버터의 출력전압과 출력전류를 나타낸다. 전압, 전류 모두 일치하는 것을 알 수 있다. 따라서 설계된 수하제어기가 비선형 부하에 대해서도 우수한 성능의 전력분담을 보여주고 있는 것을 알 수 있다.

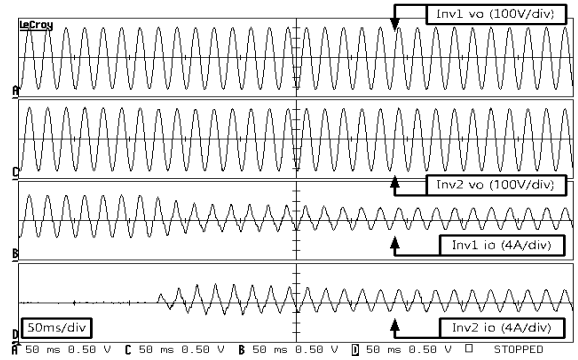


그림 5 비선형부하 - 2병렬운전 과도응답 : 전압, 전류

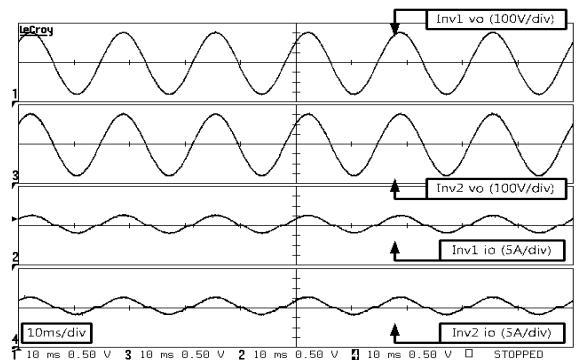


그림 6 비선형부하 - 2병렬운전 정상상태 : 전압, 전류

4. 결론

본 논문에서는 단일 루프 강인 전압 제어를 이용한 단상 UPS 인버터의 비통신선 방식의 병렬운전에 대하여 기술하고 2 병렬운전으로 실험결과를 보였다. 병렬운전 제어에는 저항성 수하제어를 이용하였으며 저항 부하 및 비선형 부하에 대해 우수한 전류 분담, 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.309-414, 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.