

병렬운전 UPS 시스템의 독립 부하 분담 특성

변영복\*, 구태근\*\*, 조기연\*, 김동희\*\*, 김철우\*\*\*, 아나니에프\*\*\*\*  
 \* 한국전기연구원, \*\*영남대학교, \*\*\*부산대학교, \*\*\*\*ARIR

Independent Load Sharing of UPS systems connected in parallel

Y. B. Byun\*, T. G. Koo\*\*, K. Y. Joe\*, D. H. Kim\*\*, C. U. Kim\*\*\*, Igor P. ANANIEV\*\*\*\*  
 \*KERI, \*\*Yeungnam Uni., \*\*\*Pusan Univ., Agrophysical Research Institute Russia\*\*\*\*

**Abstract** - This paper describes characteristics of independent load sharing of parallel UPS systems and proposes a method of control which does not require control interconnections at each UPS system and compensates for line impedance. Simulation results of a two-module UPS system with different power rating and line impedance have demonstrated the feasibility of the proposed control scheme in load sharing.

1. 서 론

무정전 전원장치(Uninterruptible Power System, 이하 UPS라 함)는 상용전원에서 발생 가능한 전원장애를 극복하여 부하에 양질의 안정된 교류전력을 공급하는 장치로서 컴퓨터의 보급확대와 더불어 그 수요가 급증하고 있다. UPS는 양질의 전원을 공급하는 것이 첫 번째 목표이기 때문에 지금까지는 주로 입력력 전압, 전류 파형의 개선에 연구개발의 초점을 맞추어 왔다. 그러나 최근 금융, 방송, 산업플랜트 등 신뢰성이 요구되는 시스템이 증가함에 따라 Redundancy 개념이 UPS 시스템에도 중요하게 되어 병렬운전 UPS의 도입이 확산되고 있다.

특히, 확장의 용이성, 보수성의 편리성, 고신뢰성 등의 장점으로 인하여 한 대의 대용량 UPS를 여러 대의 소용량 UPS로 대체한 분산 전원 시스템의 적용이 증가하고 있다[1-2]. 이러한 분산 전원 시스템의 기술적 문제는 병렬 인버터의 부하분담(Load Sharing) 제어이다. 전압원 인버터의 병렬운전은 UPS들의 특성 및 배선 임피던스의 차이, 센서 및 각 구성품들의 오차 등에 매우 민감하기 때문에 적절한 제어가 되지 않으면 부하분담이 되지 않는다. 병렬운전시 각 UPS의 주파수, 위상 그리고 전압진폭이 일치해야 하는 것은 매우 중요하며, 이들이 다를 경우, UPS상호간에 순환전류가 흐르게 되어, 각 UPS의 무효전력 부담이 증가하게 되고, 전원용량을 감소시키게 되기 때문이다. 특히 UPS 출력단에서 부하 부하단까지의 배선 임피던스의 차이가 부하분담 특성에 큰 영향을 미친다[3].

여러 문헌에서 인버터의 병렬운전에 관한 많은 논문이 발표되었으나 대부분이 인버터간에 정보를 수수하기 위한 연결선이 있는 방법으로 분산 전원 시스템에 적합한 제어방법이 아니며, 이를 해결하기 위한 제어 연결선이 없는 독립 운전 방식은 대부분 시뮬레이션에 의한 검증 단계이며 제어기법의 신뢰성이 검증되지 않고 있다.[1-4]

본 논문에서는 분산 전원 시스템에 적용할 수 있는 독립운전 방식의 병렬 UPS를 개발하기 위한 초기 연구 단계로서 인버터 출력전압의 전압과 주파수에 따른 부하 분담 특성을 분석하고, 시뮬레이션을 통하여 제어기법의 타당성을 모색하였다.

2. 병렬 UPS의 전력분담 특성 해석

병렬 UPS 각각의 출력전압의 크기와 주파수의 차이에 따른 부하분담 특성을 해석하기 위하여 그림1과 같이 두 대의 UPS가 병렬로 부하에 전력을 공급할 경우의 등가회로를 구성하였다.

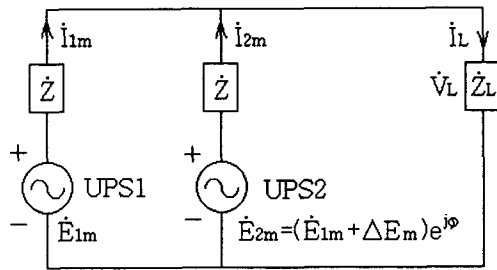


그림1. Load Sharing의 등가회로

여기에서, ΔEm은 두 UPS의 출력전압 간의 크기 차이이며, φ는 출력전압의 위상차를 나타낸다. Z는 내부 임피던스이며, ZL은 부하임피던스이다.

그림1에서 각 UPS의 출력전류( I1m, I2m), 부하전류( ILM), 그리고 부하전압( VLm)은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{1m} = \frac{E_{1m} - V_{Lm}}{Z}, \quad I_{2m} = \frac{E_{2m} - V_{Lm}}{Z}, \quad I_{Lm} = \frac{V_{Lm}}{Z_L}$$

$$V_{Lm} = E_{1m} \frac{Z \cdot Z_L}{Z + Z_L} + E_{2m} \frac{Z \cdot Z_L}{Z + Z_L}$$

$$= \frac{E_{1m} + E_{1m}e^{j\varphi} + \Delta E_m e^{j\varphi}}{2 + \frac{Z}{Z_L}} \quad (1)$$

식(1)에서 위상차(φ) << 1 이라면,

$E_{1m} + E_{1m}e^{j\varphi} = 2E_{1m} \cdot e^{j\frac{\varphi}{2}}$ 에 의하여, 부하전압( VLm)은 식(2)와 같이 나타낸다.

$$V_{Lm} = \frac{2E_{1m} \cdot e^{j\frac{\varphi}{2}} + \Delta E_m \cdot e^{j\varphi}}{2 + \frac{Z}{Z_L}} \quad (2)$$

UPS1의 출력전력(P1)은 식 (3)과 같이 되며,

$$\begin{aligned}
P_1 &= \dot{V}_{Lm} \cdot \dot{I}_{Lm} = \frac{\dot{V}_{Lm} (\dot{E}_{Lm} - \dot{V}_{Lm})}{Z} \\
&= \frac{2E_{Lm} \cdot e^{j\frac{\varphi}{2}} + \Delta E_m \cdot e^{j\varphi}}{Z \left(2 + \frac{Z}{Z_L}\right)^2} \cdot \left[ E_{Lm} \cdot \left(2 + \frac{Z}{Z_L} - 2 \cdot e^{j\frac{\varphi}{2}}\right) - \Delta E_m \cdot e^{j\varphi} \right] \quad (3)
\end{aligned}$$

UPS2의 출력전력(P2)은 식 (4)와 같이 전개된다.

$$\begin{aligned}
P_2 &= \dot{V}_{Lm} \cdot \dot{I}_{Lm} = \frac{\dot{V}_{Lm} (\dot{E}_{Lm} - \dot{V}_{Lm})}{Z} \\
&= \frac{2E_{Lm} \cdot e^{j\frac{\varphi}{2}} + \Delta E_m \cdot e^{j\varphi}}{Z \left(2 + \frac{Z}{Z_L}\right)^2} \cdot \left\{ E_{Lm} \cdot \left[ \left(2 + \frac{Z}{Z_L}\right) e^{j\varphi} - 2 e^{j\frac{\varphi}{2}} \right] + \left(1 + \frac{Z}{Z_L}\right) \Delta E_m \cdot e^{j\varphi} \right\} \quad (4)
\end{aligned}$$

부하의 출력전력(PL)은 식 (5)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
P_L &= \dot{V}_m \cdot \dot{I}_{Lm} = \frac{\dot{V}_{Lm}^2}{Z_L} \\
&= \frac{(2E_{Lm} \cdot e^{j\frac{\varphi}{2}} + \Delta E_m \cdot e^{j\varphi})^2}{Z_L \cdot \left(2 + \frac{Z}{Z_L}\right)^2} \quad (5)
\end{aligned}$$

식 (3)~(5)로 부터 병렬 UPS의 각 출력전압 간의 크기와 위상차에 의한 부하분담 특성을 다음과 같이 분석할 수 있다.

### 2.1 위상차와 전압차가 zero 일 경우

UPS1,2의 출력전압(P1,0,P2,0)과 부하전력(PL,0)은 식(3),(4),(5)에서  $\varphi$ 와  $\Delta E_m$ 을 각각 zero로 두면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{1,0} = P_{2,0} = \frac{E_{Lm}^2}{2 Z_L \left(1 + \frac{Z}{2 Z_L}\right)^2} \quad (6)$$

$$P_{L,0} = \frac{E_{Lm}^2}{Z_L \cdot \left(1 + \frac{Z}{2 Z_L}\right)^2} \quad (7)$$

식(6),(7)에서 알 수 있듯이, 위상차와 전압차가 없는 경우, 두 UPS의 출력전력은 동일하며, 부하전력은 두 UPS의 출력전력의 합과 같음을 알 수 있다.

### 2.2 전압차만 고려할 경우 ( $\Delta E_m \neq 0$ )

UPS1,2의 출력전압(P1,ΔEm, P2,ΔEm)과 부하전력(PL,ΔEm)은 식(3),(4),(5)에서  $\varphi = 0$ 로 두어 계산하면 다음과 같다.

$$P_{1,\Delta Em} = \frac{2E_{Lm}^2}{Z_L \cdot \left(2 + \frac{Z}{Z_L}\right)^2} \cdot \left[ 1 + \left(\frac{1}{2} - \frac{Z}{Z_L}\right) \cdot \frac{\Delta E_m}{E_{Lm}} \right] \quad (8)$$

$$P_{2,\Delta Em} = \frac{2E_{Lm}^2}{Z_L \cdot \left(2 + \frac{Z}{Z_L}\right)^2} \cdot \left[ 1 + \left(\frac{1}{2} + \frac{Z}{Z_L}\right) \cdot \frac{\Delta E_m}{E_{Lm}} \right] \quad (9)$$

$$P_{L,\Delta Em} = \frac{E_{Lm}^2 \left(1 + \frac{\Delta E_m}{E_{Lm}}\right)}{Z_L \cdot \left(1 + \frac{Z}{2 Z_L}\right)^2} \quad (10)$$

식(8),(9),(10)에서 각 UPS의 내부임피던스(Z)가 순수한 인덕턴스라고 가정하고, 각 UPS 및 부하전력이  $\Delta E_m = \varphi = 0$ 로 할 경우와 비교하면 그 전력차는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
\Delta P_{1,\Delta Em} &= P_{1,\Delta Em} - P_{1,0} = j \frac{E_{Lm} \cdot \Delta E_m}{2 \omega L} \\
\Delta P_{2,\Delta Em} &= P_{2,\Delta Em} - P_{2,0} = -j \frac{E_{Lm} \cdot \Delta E_m}{2 \omega L} \\
\Delta P_{L,\Delta Em} &= P_{L,\Delta Em} - P_{L,0} = \frac{E_{Lm} \cdot \Delta E_m}{Z_L} \quad (11)
\end{aligned}$$

식(11)에서 알 수 있듯이 각 UPS의 무효전력의 차는 전압차( $\Delta E_m$ )에 비례함을 알 수 있으며, 전압이 높은 시스템(UPS2)의 무효전력은 비례적으로 감소하고, 전압이 낮은 시스템(UPS1)의 무효전력은 비례적으로 증가함을 알 수 있다.

일반적으로  $Z \ll Z_L$  이므로 부하의 유효전력의 변화는 각 UPS의 무효전력의 차에 비해 아주 적은 값으로 나타난다.

### 2.3 위상차( $\varphi$ )을 고려할 경우( $\varphi \neq 0$ )

UPS1,2의 출력전압(P1,φ, P2,φ)과 부하전력(PL,φ)은 식(3),(4),(5)에서  $\Delta E_m = 0$ 로 두어 계산하면 다음과 같다.

$$P_{1,\varphi} = \frac{E_{Lm}^2}{2 Z_L \cdot \left(1 + \frac{Z}{2 Z_L}\right)^2} \cdot e^{j\frac{\varphi}{2}} \cdot \left( \frac{2 Z_L}{Z} + 1 - \frac{2 Z_L}{Z} e^{j\frac{\varphi}{2}} \right) \quad (12)$$

$$\begin{aligned}
P_{2,\varphi} &= \frac{E_{Lm}^2}{2 Z_L \cdot \left(1 + \frac{Z}{2 Z_L}\right)^2} \cdot \left[ \left(1 + \frac{2 Z_L}{Z}\right) \cdot e^{j\frac{\varphi}{2}} - \frac{2 Z_L}{Z} \cdot e^{j\varphi} \right] \quad (13)
\end{aligned}$$

$$P_{L,\varphi} = \frac{E_{Lm}^2}{Z_L \cdot \left(1 + \frac{Z}{2 Z_L}\right)^2} \cdot (1 + j\varphi) \quad (14)$$

식(12),(13),(14)에서 각 UPS의 내부임피던스(Z)가 순수한 인덕턴스라고 가정하고, 각 UPS 및 부하전력이  $\Delta E_m = \varphi = 0$ 로 할 경우와 비교하면 그 전력차는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
\Delta P_{1,\varphi} &= P_{1,\varphi} - P_{1,0} = -\frac{E_{Lm}^2}{2\omega L} \cdot \varphi \\
\Delta P_{2,\varphi} &= P_{2,\varphi} - P_{2,0} = \frac{E_{Lm}^2}{2\omega L} \cdot \varphi \\
\Delta P_{L,\varphi} &= P_{L,\varphi} - P_{L,0} = j \frac{E_{Lm}^2}{Z_L} \cdot \varphi \quad (15)
\end{aligned}$$

식(15)에서 각 UPS의 유효전력의 차가 위상차( $\varphi$ )에 비례함을 알 수 있으며, 위상이 빠른 시스템(UPS2)

의 유효전력은 위상차에 비례적으로 증가하고, 위상이 늦은 시스템(UPS1)의 유효전력은 비례적으로 감소함을 알 수 있다. 부하의 무효전력의 변화는  $Z \ll Z_L$  이므로 각 UPS의 유효전력의 차에 비해 아주 적은 값이다.

### 3. 전력분담의 시뮬레이션

상기의 부하분담특성을 이용하여, 본 연구에서는 식 (16), (17), (18)과 같이 인버터의 출력전력과 전력변화율에 의한 전력분담제어기를 제안하고, 그림 2와 같이 제어시스템을 구성하였다.

$$F_n = F_{n-1} - K_{p1} * \Delta P - K_{p2} * P \quad (16)$$

$$F_n = F_{n-1} + K_{p1} * (F_{ref} - F_n) \quad (17)$$

$$V_{ref} = K_{q1} * \Delta Q + K_{q2} * Q \quad (18)$$

여기에서  $F_n$ 과  $V_{ref}$ 는 전력분담을 위한 지령전압의 주파수 및 크기이다. 주파수는 유효전력(P) 및 변화율( $\Delta P$ )에 의해서, 전압의 크기는 무효전력(Q) 및 변화율( $\Delta Q$ )에 의해 제어되도록 하였다.

식 (16)은 샘플링 주기마다 제어되는 요소이며, 식 (17)은 Bypass전원주파수 및 지령주파수와 동기시키기 위하여 전원의 한 주기마다 제어되는 요소이다.

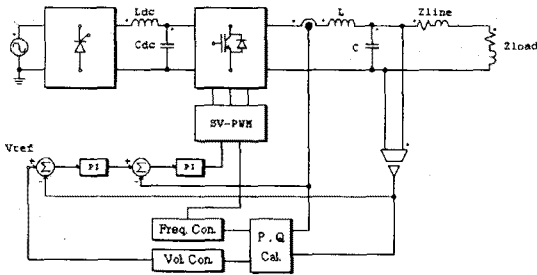
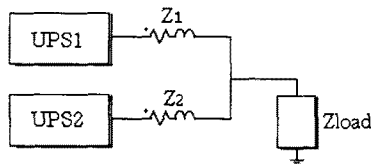


그림2. UPS 제어 시스템의 구성도

제안된 제어기법의 타당성을 검토하기 위하여 2 대의 UPS를 그림 3과 같이 선로임피던스( $Z_1, Z_2$ )를 다르게 구성하여 시뮬레이션을 하였다.



$$Z_1 = 0.4 + j0.072, \quad Z_2 = 0.3 + j0.036$$

그림3. 병렬UPS의 구성

그림 4에서 부하 투입 및 변동시에도 유효전력은 균등하게 분담되며, 무효전력의 분담은 선로 임피던스의 영향을 받을 수 있다. 그림 5는 부하변동시의 UPS 출력전류의 변화를 나타내고 있다. 그림 6에서는 각 UPS의 전력제어기 Gain들을 서로 다르게 설정함으로써 전력분담비를 제어할 수 있음을 보여준다.

### 4. 결 론

본 논문에서는 UPS병렬 운전시 인버터의 출력전압의

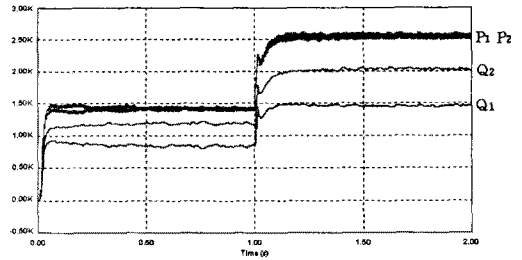


그림4. 부하변동시의 전력분담

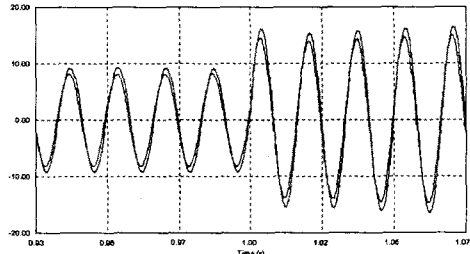


그림5 부하변동시 전류분담

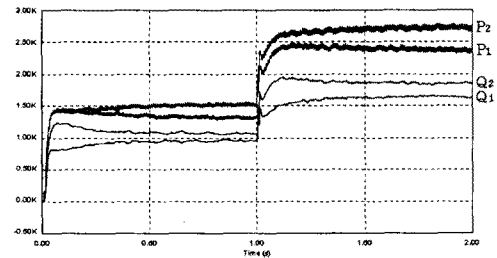


그림6. 전력제어기 Gain 제어에 따른 전력분담

크기와 주파수에 대한 부하분담 특성을 해석하였다. 또한, 독립운전 방식의 병렬UPS를 제어하기 위한 기법을 제시하고, 시뮬레이션을 통하여 검증하였다. 향후 과제는 무효전력의 균등분담 및 비선형 부하에 대한 제어기법 연구와 실험을 통한 신뢰성 검증이다.

### (참고 문헌)

- [1] A.Tuladhar 외 3인, "Control of Parallel Inverters in Distributed AC Power Systems with Consideration of the Line Impedance Effect", IEEE, pp321-328, '98
- [2] A.Tuladhar 외 3인, "Parallel Operation of Single Phase Inverter Modules With No Control Interconnections", IEEE, pp94-100, '97
- [3] Shoji-Nishikata 외 1인, "Steady-State Performance Analysis of a Parallel-Running AC Power System When Loaded with a Capacitor-Filtered Rectifier", T. IEE Japan, Vol.117-D, No 2, pp 255-256, '97
- [4] H.Oshima 외 2인, "Parallel Redundant UPS with Instantaneous PWM Control", INTELEC, pp436-442, '91
- [5] M.C.Chandorkar 외 3인, "Novel Architectures and Control for Distributed UPS Systems", APEC, pp683-689, '94