

다른 정격용량을 가진 3상 UPS 시스템의 병렬운전을 위한 주종제어 기법

李雨哲[†], 玄東石^{*}

A Master and Slave Control Strategy for Parallel Operation of Three-Phase UPS Systems with Different Ratings

Woo-Cheol Lee and Dong-Seok Hyun

요 약

본 논문에서는 전체 시스템의 용량 증대와 부하 중요도에 따른 신뢰성 향상을 위해 사용되는 UPS 병렬 운전시 발생하는 문제점을 해석하고, 이를 해결하기 위해 기존에 연구되어온 다양한 제어기법들을 조사하였다. 또한 기존의 연구방법에서 적용할 수 없었던 다른 정격의 병렬 운전 적용시 L, C 출력필터 에 의한 문제점을 해결하기 위해 주종 제어를 이용한 3상 UPS의 전류 분담 제어기법이 연구되었다. 제안된 제어 알고리즘의 타당성을 검증하기 위해 시뮬레이션 및 실험을 수행하였다.

ABSTRACT

A parallel operation of Uninterruptible Power Supply(UPS) systems is used to increase power capacity of the system or to secure higher reliability at critical loads. In the conventional parallel operation, the load-sharing control to maintain the current balance is the most important, since the load-sharing is very sensitive to discord between components of each module, amplitude/phase difference, line impedance, output LC filter, and so on. To solve these problems various control algorithms are researching. However, these methods cannot apply to the different ratings of UPS. In the case, master and slave control algorithm for parallel operation is adequate. However, if the UPS ratings are different, the value of passive filters L, C is different, and it affects the sharing of current. This paper presents general problems of conventional parallel operation systems, and control strategy for parallel operation with different ratings. The validity of the proposed control strategy is investigated through simulation and experiment in the parallel operation system with two 3-phase UPS systems.

Key Words : Uninterruptible Power Supply(UPS), Parallel Operation, Load-sharing Control

1. 서 론

최근 정보화, 산업화 사회로 발전함에 따라서 컴퓨터, 의료장비, 각종 데이터 처리 시스템(OA/FA system)과 같은 중요한 부하의 사용이 증가하고 있다. 그러나 이런 부하들은 전원 전압의 과 전압, 부족 전압, 고조파 그리고 일시적인 과도 현상에 큰 영향을 받아 시스템 전체가 정지하거나 오 동작을 하는 결과를 초래한다. 이에 대한 대책으로써 안정된 전력을 공

[†]교신저자 : 정회원, 한경대 전기공학과 교수

E-mail : woocheol@hnu.hankyong.ac.kr

^{*}정회원, 한양대 전기전자공학과 교수

접수일자 : 2003. 10. 8 1차 심사 : 2003. 12. 1

2차 심사 : 2004. 3. 5 3차 심사 : 2004. 3. 19

심사완료 : 2004. 4. 7

급하기 위해 UPS(무정전 전원장치)의 사용이 필수적이다^[1].

또한, UPS 사용시 전체 시스템의 용량증대와 신뢰성 향상을 위해 UPS의 병렬 운전을 고려하여야 한다^[2-13]. 즉, 큰 용량의 UPS를 단독으로 사용하는 것 보다 여러 대의 작은 용량의 병렬 구성이 용량의 확장성, 경제성, 안정성의 측면에서 훨씬 유리하다.

UPS 병렬 운전의 핵심은 부하부담을 위한 전류 균형을 유지하는 것이다. 그러나, 부하부담은 각 UPS모듈의 성분(출력전압의 크기, 위상, 주파수, 선로임피던스, 출력 LC필터 등)등에 매우 민감하게 영향을 받는다.

따라서 모든 UPS의 출력전압은 주파수, 위상, 크기에 있어서 엄격하게 동기 되어야 한다. 그렇지 못한 경우, 출력전류에 순환성분(순환 전류)이 포함하게 되는데, 이러한 순환성분은 시스템 전체의 용량을 감소시키고, 시스템을 구성하고 있는 반도체 소자들을 파괴시키는 결과를 초래하기도 한다^[4].

지금까지 연구된 병렬운전의 제어 알고리즘은 유/무효전력 제어방법, 전압/주파수 수하특성 이용, 순시변조제어 등 다양한 알고리즘이 연구되어왔다^[5-17].

그러나 이러한 방법에 있어서 스위치의 스위칭 순간마다 유/무효전력의 계산이 요구되어지고, 시스템의 확장에 있어서 서로 다른 정격의 UPS 병렬운전에 적용이 불가능하다. 본 논문에서는 병렬 운전시 발생하는 문제점과 이를 해결하기 위해서 기존에 연구되어온 다양한 제어기법들에 대해 조사하고, 주종(마스터/슬레이브)제어기법을 이용한 3상 UPS의 전류분담 제어 방법이 연구되었다.

시스템의 구성은 마스터와 슬레이브 UPS로 되어있고, 마스터 UPS는 CVCF(일정전압/일정주파수) 출력을 공급하고, 병렬운전을 위해 추가된 슬레이브 UPS는 부하전류로부터 얻은 전류 지령치를 추종하게 된다. 앞에서 언급했듯이 적당한 제어없이 슬레이브 역시 마스터처럼 전압제어를 수행하면 출력전압의 크기 및 위상차에 의해 순환전류가 발생한다. 그러나 슬레이브 UPS가 전류제어를 수행함으로써 순환전류의 문제점을 해결할 수 있다. 추가적으로, 출력전압을 담당하는 마스터 UPS 고장시, 슬레이브 UPS가 부하를 담당할 수 있는 범위 내에서 전류제어에서 전압제어로 모드를 변경하여 일정한 출력전압을 공급하게 된다. 따라서, 보다 높은 신뢰성이 보장된다. 또한, 본 논문에서는 서로 다른 정격의 병렬 운전시, 출력 LC 필터 값의 불일치로 인한 각 출력전류의 위상오차를 해결하기 위한 위상제어 알고리즘이 제안된다.

2. 병렬운전시 발생하는 문제점

병렬로 연결된 UPS의 출력 전압 사이의 크기와 위상 차에 따른 부하 분담 해석을 위하여, 상당 등가 회로를 그림 1에 나타내었다. UPS1과 UPS2의 출력 전압/전류를 각각 $\dot{V}_1, \dot{V}_2, \dot{I}_1, \dot{I}_2$ 로 정의 할 수 있다. 또, UPS의 출력 필터와 부하 임피던스를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{V}_1 = V_1 \angle \phi_1, \dot{V}_2 = V_2 \angle \phi_2, \dot{V}_o = V_o \angle 0 \quad (1)$$

$$\dot{Z}_1 = \dot{Z}_3 = R + j\omega L$$

$$\dot{Z}_2 = \dot{Z}_4 = \frac{1}{j\omega C} \quad (2)$$

$$\dot{Z}_o = R_o + j\omega L_o$$

UPS1, 2의 출력 전류는 다음과 같이 유도 된다^[8].

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{V}_1 - \dot{V}_2}{2(R + j\omega L)} + \frac{\dot{V}_o}{2} \left(\frac{1}{R_o + j\omega L_o} + 2j\omega C \right) \quad (3)$$

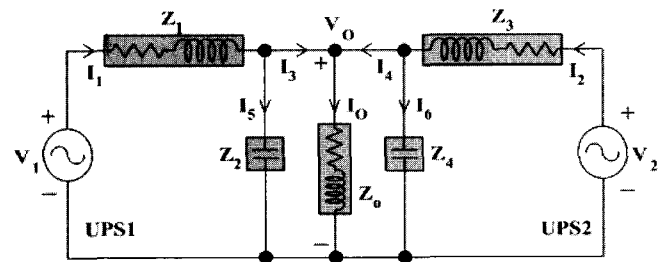


그림 1 단상 등가회로

Fig. 1 Per-phase equivalent circuit

$$\dot{I}_2 = \frac{-(\dot{V}_1 - \dot{V}_2)}{2(R + j\omega L)} + \frac{\dot{V}_o}{2} \left(\frac{1}{R_o + j\omega L_o} + 2j\omega C \right) \quad (4)$$

그리고, UPS1, 2의 출력 전압의 크기와 위상차를 각각 다음과 같이 정의한다.

$$\Delta V = V_1 - V_2 \quad (5)$$

$$\Delta \phi = \phi_1 - \phi_2 \quad (6)$$

부하에서 UPS1, 2의 출력 전류에 의한 피상 전력을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$S_1 = \dot{V}_o \dot{I}_1^* \quad (7)$$

$$S_2 = \dot{V}_o \dot{I}_2^* \quad (8)$$

$$\Delta S = S_1 - S_2 \quad (9)$$

순환 전류에 의한 복소 전력을 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta S = \frac{V_o \{ V_1 (\cos \phi_1 - j \sin \phi_1) - V_2 (\cos \phi_2 - j \sin \phi_2) \}}{R - j \omega L} \quad (10)$$

UPS 각각의 출력 전압을 비교하면 다음과 같이, 3가지의 경우를 살펴볼 수 있다.

2.1 출력전압의 크기와 위상이 같은 경우

$$(V_1 = V_2 = V \quad \& \quad \phi_1 = \phi_2 = \phi)$$

주어진 조건을 식(10)에 대입하면,

$$\Delta S = \frac{V_o \{ V (\cos \phi - j \sin \phi) - V (\cos \phi - j \sin \phi) \}}{R - j \omega L} = 0 \quad (11)$$

식 (11)와 같이, 전압의 크기와 위상이 같다면, 순환 전류에 의한 복소 전력은 나타나지 않는다.

2.2 출력 전압의 위상차에 의한 영향

$$(V_1 = V_2 = V \quad \& \quad \phi_1 \neq \phi_2)$$

주어진 조건을 식(10)에 대입하면,

$$\Delta S = \frac{V_o V \{ (\cos \phi_1 - j \sin \phi_1) - (\cos \phi_2 - j \sin \phi_2) \}}{R - j \omega L} \cong \Delta P \quad (12)$$

식 (12)에서처럼, 두 UPS간의 출력 전압의 위상 차이가 있으면, 순환 유효 전력이 발생하는 것을 알 수 있다.

그림 2는 위상차가 $\phi_2 - \phi_1 = 0 \sim 10^\circ$ 일 경우의 각 전류의 피크 값을 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 출력전압의 위상차가 증가함에 따라 UPS1의 전류(지상전류) I_1 은 점점 감소하고, UPS2의 전류(지상전류) I_2 는 점점 증가하는 것을 알 수 있다.

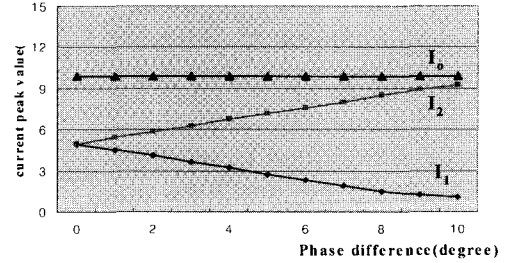


그림 2 위상차에 의한 각 전류의 피크 값
Fig. 2 Current peak values by phase difference

2.3 출력전압의 크기 차에 의한 영향

$$(V_1 \neq V_2 \quad \& \quad \phi_1 = \phi_2 = \phi)$$

주어진 조건을 식(10)에 대입하면,

$$\Delta S = \frac{V_o (V_1 - V_2) (\cos \phi - j \sin \phi)}{R - j \omega L} \cong \Delta Q \quad (13)$$

식 (13)와 같이 두 UPS간의 출력 전압의 크기가 다르다면, 순환 무효전력이 발생하는 것을 알 수 있다.

그림 3은 크기차가 $\frac{V_2 - V_1}{V_1} \times 100\% = 0 \sim 10\%$ 일 경우, 각 전류의 피크 값을 나타내고 있다. 그림에서와 같이 출력전압의 크기차가 증가함에 따라, UPS2의 전류 I_2 가 점점 증가하는 것을 알 수 있다.

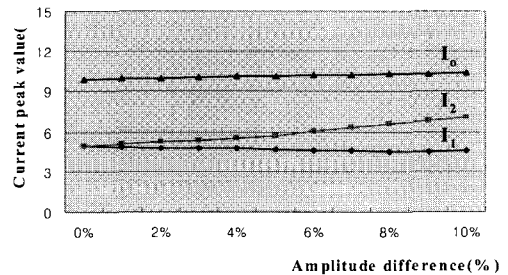


그림 3 크기차에 의한 각 전류의 피크 값
Fig. 3 Current peak values by amplitude difference

즉, UPS의 출력 임피던스 성분은 매우 작기 때문에 (수Ω 미만) 적은 양의 출력전압과 위상 차는 과도한 순환전류 성분을 발생시켜 시스템 전체의 효율성 저하와 안정성을 감소시킨다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 다양한 방법들이 연구되어 왔다^{[5] [7]}.

3. 주중제어 알고리즘

앞에서 언급한 방법들에 있어서는 스위치의 매 스위

칭 순간마다 유/무효 전력의 계산이 요구되고 시스템 확장에 있어서 다른 정격의 UPS 병렬운전에 적용할 수 없다는 단점이 있다^[9]. 본 논문에서는 다양한 제어 방법 중, 주종제어 방식(전압과 전류제어 방식)을 이용한 3상 UPS 병렬운전을 위한 제어 알고리즘을 제안하였다.

3.1 마스터 UPS

마스터 UPS는 출력에 CVCF(일정전압, 일정주파수)를 공급한다. 그림 4과 같이 마스터 UPS의 제어부는 전압 제어기와 전류 제어기로 구성되어 있고 각각의 기준 전류, 전압은 식 (14), (15)과 같다.

$$\begin{aligned}
 I_{1qe}^* &= I_{ldqe}^* + I_{cqe}^* + K_{PI}(V_{oqe}^* - V_{oqe}) + \omega CV_{ode}^* \\
 I_{1de}^* &= I_{ldde}^* + I_{cde}^* + K_{PI}(V_{ode}^* - V_{ode}) - \omega CV_{oqe}^*
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

여기서, I_{ld}^* : 예측된 부하전류, I_c^* : 커패시터 전류 지령치, K_{PI} : 전압제어기의 PI계인

$$\begin{aligned}
 V_{1qe}^* &= V_{oqe} + K_{PI}(I_{1qe}^* - I_{1qe}) + \omega LI_{1de}^* \\
 V_{1de}^* &= V_{ode} + K_{PI}(I_{1de}^* - I_{1de}) - \omega LI_{1qe}^*
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

3.2 슬레이브 UPS

서론에서 언급했듯이, 적당한 제어 없이 슬레이브 역시 마스터처럼 전압제어를 하면, 각 UPS 출력 전압의 크기와 위상차에 의해 순환 전류가 발생한다. 따라서 슬레이브 UPS는 전류 제어만을 수행한다. 슬레이브 UPS의 제어블럭도를 그림 5에 나타내었다. 슬레이브의 출력 기준 전류를 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$I_{2qe}^* = \frac{I_{ldqe}}{k} + \omega CV_{oqe}^*, \quad I_{2de}^* = \frac{I_{ldde}}{k} - \omega CV_{ode}^*
 \tag{16}$$

여기서, k : 부하분담 계수

식 (16)에서 계수 k 는 UPS의 용량을 결정한다. 가령 예를 들어, 두 대의 UPS를 병렬운전 한다고 하면, $k=2$ 이면 부하분담이 동일하게 이루어지고, $k=3$ 이면 부하분담이 2대1의 비율로 이루어진다. 따라서 서로 다른 정격의 UPS 병렬운전이 가능하다. 전류 제어기는 슬레이브 UPS의 전류 I_2 와 기준 전류 I_2^* 를 비교하고 이에 발생한 오차를 PI제어기로 보상한다. 보상된 값과 출력 전압을 더해서 슬레이브 UPS의 기준 전압 V_2^* 을 만들어 낸다.

$$\begin{aligned}
 V_{2qe}^* &= V_{oqe} + K_{PI}(I_{2qe}^* - I_{2qe}) + \omega LI_{2de}^* \\
 V_{2de}^* &= V_{ode} + K_{PI}(I_{2de}^* - I_{2de}) - \omega LI_{2qe}^*
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

3.3 주파수 응답

제안된 주종제어 방법의 주파수 해석을 위해서 간단한 회로를 그림 6에 표현하였다.

그림 6으로부터 다음의 회로방정식을 유도할 수 있다.

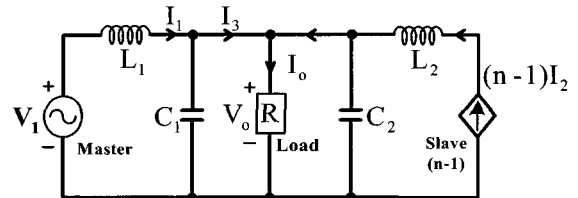


그림 6 주종 제어방법의 단상 등가회로
Fig. 6 Per-phase equivalent circuit of master/slave control method

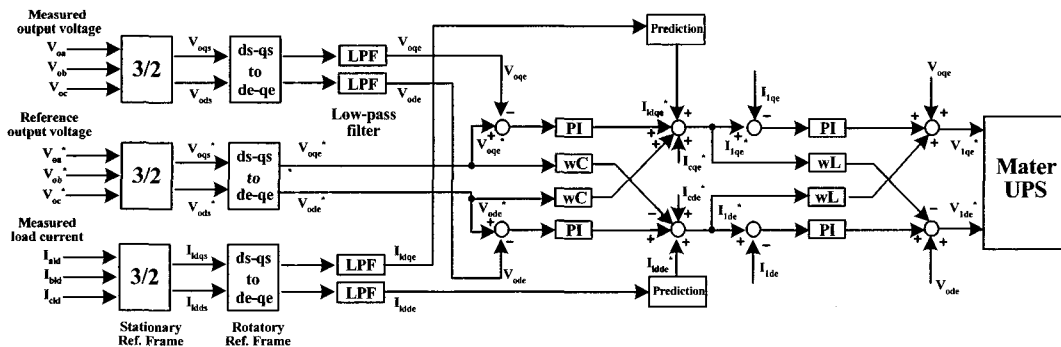


그림 4 마스터 UPS의 제어 블럭도
Fig. 4 The control block diagram of the master UPS

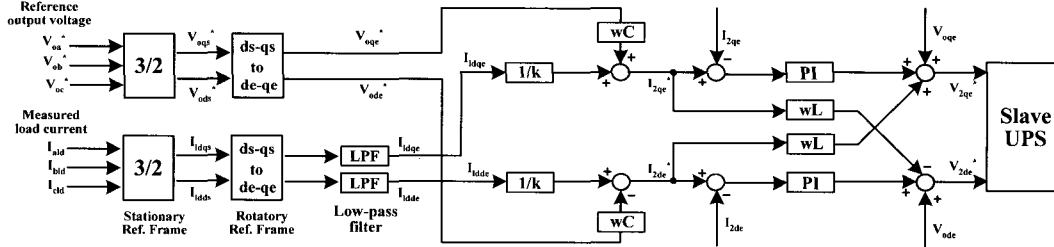


그림 5 슬레이브 UPS의 제어 블럭도
Fig. 5 The control block diagram of the slave UPS

$$V_1 = V_o + I_1 \cdot j\omega L_1 \quad (18)$$

$$I_3 = I_1 - V_o \cdot j\omega C_1 \quad (19)$$

$$I_3 + (n-1) \cdot I_2 = \frac{V_o}{R} + V_o \cdot j\omega C_2 \cdot (n-1) \quad (20)$$

그림에서 슬레이브 UPS는 전류원으로 표시하였는데, 이 전류제어기는 1차 자연시스템의 특성을 갖는다. 따라서 슬레이브 UPS의 출력전류는 일정한 시정수 τ 를 가진 1차 지연요소에 의해 전류 지연치를 추종하게 된다.

$$I_2 = I_o \cdot \frac{1}{1 + j\omega\tau} \quad (21)$$

출력전압 전달함수는 다음과 같다.

$$\frac{V_o}{V_1} = \frac{1}{s^3((m+1)L_1C_1\tau) + s^2(L_1C_1(mn - m + n) + \frac{L_1}{R}\tau) + s(\frac{L_1}{R} + \tau) + n} \quad (22)$$

전달함수를 이용하여 보드선도를 그림 7에 나타내었고, 사용된 파라미터 값을 표1에 나타내었다.

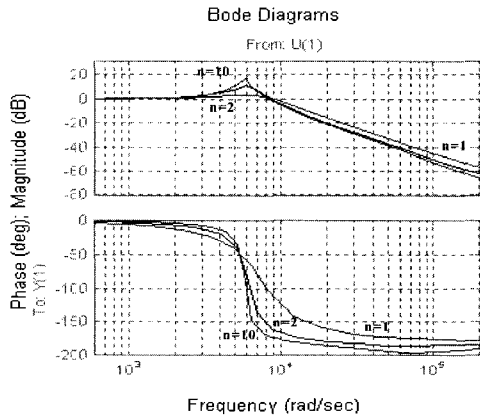


그림 7 전달함수의 보드선도
Fig. 7 Bode plot of the transfer function

보드선도에서 $n=1$ 인 경우는 병렬 운전 없이 단독운전을 나타내고, $n=2$ 인 경우는 2대, $n=10$ 인 경우는 10대의 병렬운전을 의미한다. 그림에서 알 수 있듯이 10대의 병렬운전을 하더라도 보드선도에서의 약간의 변화만이 있는 것을 알 수 있고, 위상여유 및 이득여유가 충분하다. 그러므로 여러 대의 UPS 병렬 운전시 시스템의 안정성에는 문제가 없음을 알 수 있다.

표 1 파라미터
Table 1 Parameters for bode plot

파라미터	값
R	20 [Ω]
L_1	2 [mH]
C_1	50 [μ F]
m	2
n	1, 2, 10
f	60 [Hz]
τ	26.5 [μ s]

4. 제안된 다른 정격의 병렬운전

일반적으로 서로 다른 정격의 UPS는 다른 크기의 출력 필터를 갖는다^[10]. 따라서 다른 정격의 병렬 운전 적용시 이런 필터 크기차에 의해 각 UPS의 출력전류의 위상차가 발생한다. 그림 8은 위상차가 증가함에 따라, 각각의 전류 실효 값을 나타내고 있다. 이에 비해 그림 2는 일반적인 같은 정격용량의 UPS 병렬 운전시, 출력전압의 위상차로 인한 각 UPS의 출력전류 값을 나타낸다. 그림 8에서 위상차가 증가함에 따라 슬레이브 전류 I_s 와 부하전류 I_o 는 일정한 반면, 마스터 전류 I_m 은 지속적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 슬레이브 전류 I_s 가 일정한 크기로 제어되고, 부

하전류 I_o 도 마스터가 일정한 출력전압을 공급하므로 일정한 값으로 유지된다. 그러나 마스터 전류 I_m 는 슬레이브 전류 I_s 와의 위상차이로 인해 지속적으로 증가한다. 다시 말해서, I_s 는 일정하고, 일정한 부하전류를 공급하기 위해서 I_m 는 증가 될 수밖에 없다.

그림 9는 각 전류의 위상관계를 페이지도로 나타낸 것이다. 그림에서 원은 I_s 의 궤적(항상 일정한 크기)을 의미한다. 그림으로부터 I_s 와 I_o 의 위상차가 줄어들수록 I_m 의 크기가 작아지고, 위상차가 커질 수록 I_m 의 크기가 증가하는 것을 알 수 있다.

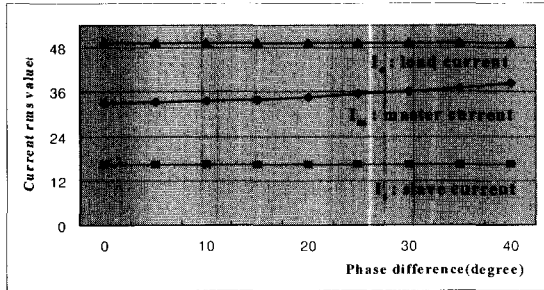


그림 8 위상차에 의한 각 전류의 실효 값
Fig. 8 Current RMS values by phase difference

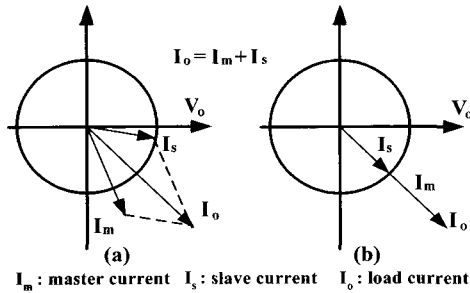


그림 9 각 전류의 위상관계
Fig. 9 The phasor diagram

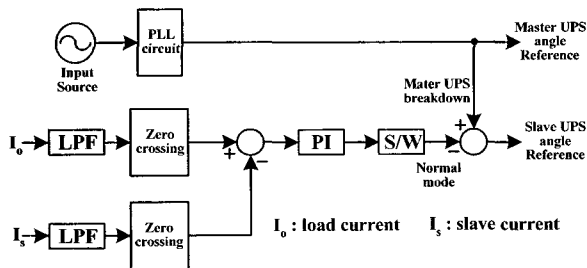


그림 10 위상동기를 위한 제어 블록도
Fig. 10 The control block diagram for phase synchronization

결론적으로 출력 전류의 위상차로 인한 I_m 의 증가는 시스템 전체의 효율성을 감소시키는 결과를 초래한다. 따라서, I_s 와 I_o 를 동기 시킴으로써 이러한 문제점을 해결할 수 있다. 그림 9(b)는 각 전류의 위상이 일치하는 것으로서 이상적인 부하분담 상태를 나타내고 있다.

그림 10는 위상동기를 위한 제안된 제어 블록도를 나타내고 있다. 마스터 UPS는 PLL 회로를 거쳐 입력 전압의 위상을 추종한다. 슬레이브 UPS의 경우 전류 제어만 수행하기 때문에 전류 지령치의 위상각을 제어하기가 수월하다. 즉, 부하전류 I_o 와 슬레이브 UPS 전류 I_s 를 저역 통과 필터(LPF)를 거쳐 Zero Crossing 검출회로로 위상을 검출 받고, 발생한 위상 오차를 PI 제어기로 보상하여 슬레이브 UPS의 전류가 부하전류를 추종하게 제어를 수행한다.

이 값은 전원 전압의 위상에 대하여 지상 또는 진상으로 슬레이브 UPS의 최종 위상 지령치를 생성한다.

이 경우 한 주기의 전류를 검출하여야 하므로 위상 지령치는 한 주기가 지연된 값이 입력된다. 그림에서 표현된 스위치(S/W)는 정상상태에서는 항상 온으로 동작하다가 마스터 UPS의 고장 발생시, 오프로 전환되면서 슬레이브 UPS는 입력 전압의 위상을 추종하게 된다.

5. 실험결과

본 논문에서 제안된 방법을 검증하기 위하여, TMS320C31 DSP 보드를 이용하여 실험을 수행하였다. 시스템 구성을 그림 11에 나타내었다. 실험에 사용된 파라미터 값은 표 2와 같다. L_1, C_1 은 UPS1의 필터 값이고, L_2, C_2 는 UPS2의 필터 값이며, 용량에 따라 필터 값도 다른 값을 사용하였다. UPS1의 $L_1=1.3mH, C_1=50\mu F$ 값과 UPS2의 $L_2=1.35mH, C_2=50\mu F$ 는 같은 용량의 UPS를 일대일로 부하 분담 시 사용한 값으로 L_1, L_2 값은 실측 상 약간의 차이를 보여준다. UPS1의 $L_1=0.6mH, C_1=100\mu F$ 값은 부하전류의 2대1 분담 시 사용한 필터 값으로 용량이 틀린 2대의 UPS를 병렬 운전시 서로 다른 필터 값에 의한 영향을 고려하기 위하여 사용된 값이다.

그림 12는 슬레이브 UPS를 투입하여 단독 운전에서 병렬 운전으로 전환시의 과도상태를 보여주고 있다. 슬레이브가 투입되기 전, 약간의 전류는 출력단 커패시터로 흐르는 전류이다. 슬레이브의 전류 지령치는 부하 전류의 1/2 즉, $k=2$ 로 설정하였고, 부하상태

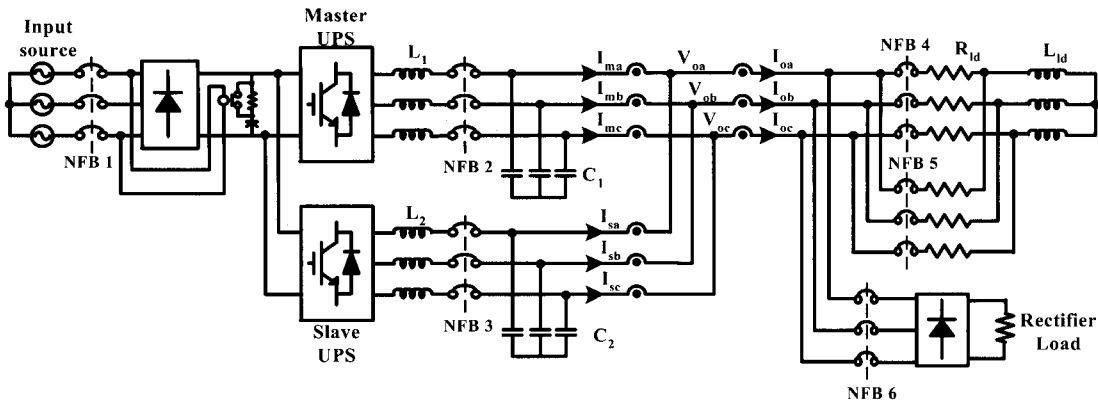


그림 11 시스템 구성
Fig. 11 The configuration of system

표 2 실험을 위한 시스템 파라미터
Table 2 System parameters for experiment

파라미터	값
DC-link 전압	320 [V]
출력 선간전압	110 [V] / 60 [Hz]
스위칭 주파수	8 [kHz]
L_1/L_2	1.3, 0.6 / 1.35 [mH]
C_1/C_2	50, 100 / 50 [μ F]
RL부하	10, 5 [Ω] / 11 [mH]
정류기 부하	21.5 [Ω]

는 RL부하와 정류기 부하가 함께 인가되어 있다. 실험 결과로부터 부하 분담이 1:1의 비율로 수행됨을 알 수 있다. 또한 비선형 부하에서도 우수한 전류분담 특성을 가지며, 슬레이브 UPS의 투입으로 인한 영향이 출력전압에 거의 없음을 알 수 있다.

그림 13은 병렬 운전 중에 부하를 가변 시켰을 때의 출력전압, 전류파형을 보여주고 있다. 부하조건은 RL 부하와 정류기부하가 인가된 상태에서 10[Ω]의 저항을 병렬로 연결하였다. 그림 13의 결과에서 볼 수 있듯이 부하를 증가시키도 그 증가한 만큼 부하분담이 수행됨을 알 수 있다. 이것을 통해 제안한 방법이 부하변동에 대해서도 우수한 과도응답 특성을 갖음을 알 수 있다.

그림 14는 병렬 운전중 출력전압을 제어하는 마스터의 고장이 발생하였을 때의 과도상태를 나타내고 있다. 마스터 UPS의 고장이후 약간의 전류는 출력단 커패시터로 흐르는 전류이다. 그림 14에서 볼 수 있듯이 마스터 UPS의 고장에도 불구하고, 슬레이브 UPS가 부하를 담당할 수 있는 범위 내에서 부하에 일정한

출력전압이 공급된다. 따라서 제안한 방법은 보다 높은 신뢰성이 보장된다.

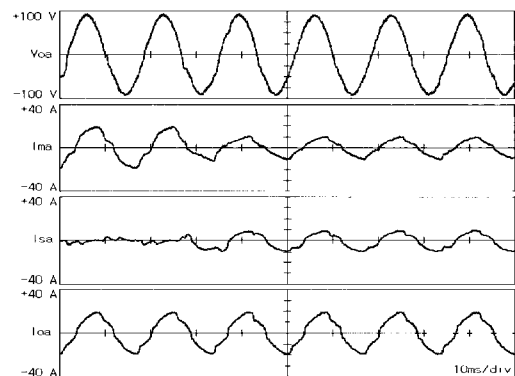


그림 12 마스터 동작중 슬레이브 투입시 실험결과 (k=2)
Fig. 12 Experimental results at putting in slave UPS (k=2)
(Voa : 출력전압, Ima : 마스터 출력전류, Isa : 슬레이브 출력전류, Ioa : 부하전류)

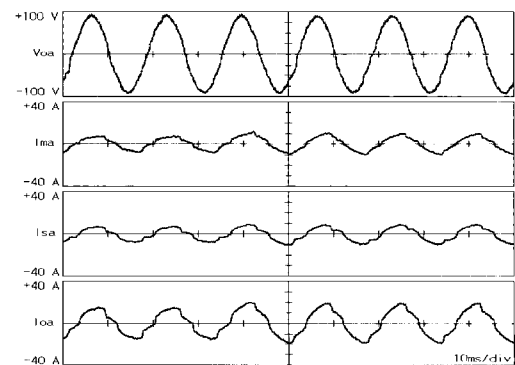


그림 13 부하변동에 대한 실험결과 (k=2)
Fig. 13 Experimental results for load variation (k=2)

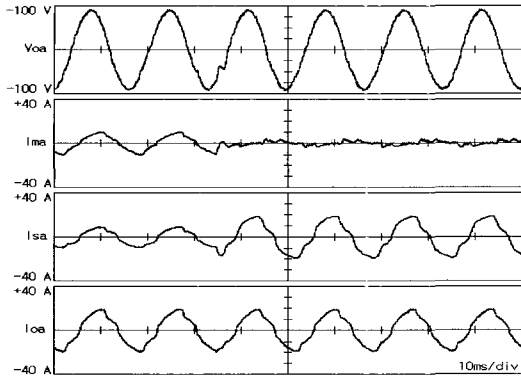


그림 14 병렬 운전중 마스터 고장시 실험결과 (k=2)
Fig. 14 Experimental results at malfunction of the master UPS

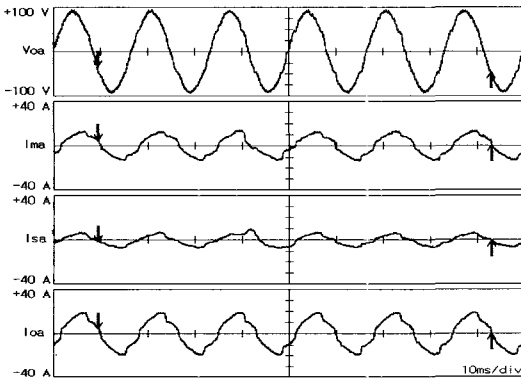


그림 15 위상동기화 과정(과도상태) (k=3)
Fig. 15 Experimental results for phase synchronization (k=3)

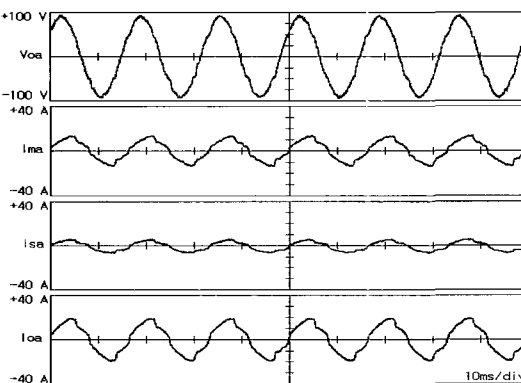


그림 16 다른 정격의 병렬운전(정상상태) (k=3)
Fig. 16 Experimental results for different rating (k=3)

그림 15는 정격용량이 다른 UPS의 병렬 운전시, 출력필터 값으로 인한 출력전류의 위상차를 보여주고 있으며, 제안된 위상제어 알고리즘을 사용하여 위상이 동기화 되는 과정을 보여주고 있다. 그림에서 앞부분

의 화살표에서는 마스터와 슬레이브의 전류의 위상이 일치하지 않는 반면, 뒷부분의 화살표에서는 위상이 일치하는 것을 알 수 있다.

그림 16은 용량이 다른 UPS 병렬운전의 정상상태를 보여주고 있다. 슬레이브의 전류 지령치는 부하 전류의 1/3 즉, $k=3$ 으로 설정하였다. 그림에서와 같이 2:1의 비율로 부하분담이 수행되고, 각 전류의 위상도 정확히 일치되는 것을 알 수 있다. 따라서 서로 다른 정격의 병렬운전이 가능하다.

6. 결론

시스템의 용량증대와 신뢰성 향상의 목적으로 사용되는 UPS 병렬 운전은 UPS사이의 제어변수나 파라미터 간의 불일치에 의해 과 전류 및 순환 전류가 발생한다. 이러한 전류는 시스템 내부의 소자를 손상시키고, 부하에 공급되어야 할 전류를 감소시켜, 원래의 목적인 용량증대와 신뢰성 향상에 위배된다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해서 주종제어를 이용하여 3상 UPS 시스템의 병렬 운전을 위한 제어 알고리즘을 제안하였다. 시스템은 CVCF(일정전압/일정주파수)를 공급하는 마스터 UPS와 병렬운전을 위해 추가되는 슬레이브 UPS로 구성된다. 또한, 마스터 UPS의 고장시, 정 정압 제어에 문제가 발생 할 수 있으나 정 전류 제어를 수행하는 슬레이브 UPS가 정 전압으로 제어기 모드를 전환함으로써, 계속해서 부하에 일정 전압을 공급할 수 있다. 또한 다른 용량의 병렬 운전 적용시 발생하는 문제점을 위상 보상 알고리즘을 통해 해결하였다. 본 논문에서 제안한 방법의 타당성을 검증하기 위하여 시뮬레이션 및 실험을 수행하였다.

향후 과제로는 부하 불평형 조건하의 부하 분담에 관한 연구가 필요하다고 사료된다.

참고 문헌

- [1] Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P. Robbins, "Power Electronics", *Converters, Applications, and Designs*, John Wiley & Sons, 1989.
- [2] D. Shanxu, M. Yu, X. Jian, K. Young and C. Jian, "Parallel operation control technique of voltage source inverters in UPS", *IEEE Int. Conference on Power Electronics and Drive Systems, PEDS '99*. Vol. 2, pp. 883~887, July. 1999.
- [3] A. Tuladhar, H. Jin, T. Uger, and K. Mauch, "Control of parallel inverters in distributed ac power systems

with consideration of the line impedance effect", *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1998. APEC '98. Conference Proceedings 1998, Thirteenth Annual*, Vol. 1, pp. 321~328, 1998.

- [4] T. G. Koo, Y. B. Byun, K. Y. Joe, J. I. Seo, D. H. Kim, and C. U. Kim, "Wireless parallel operation control of a two-module UPS system for equivalent load sharing", *Industrial Electronics Society, IECON'2000*, Vol. 4, pp. 2291~2296, 2000.
- [5] T. Kawabata and S. Higashino, "Parallel operation of voltage source inverters", *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, Vol. 24, No. 2, pp. 281~287, Mar./Apr. 1988.
- [6] A. Tuladhar, H. Jin, T. Unger and K. Mauch, "Parallel operation of single phase inverter modules with no control interconnections", *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC'97*, Vol. 1, pp. 94~100.
- [7] J. Holtz and K. H. Werner, "Multi-Inverter UPS system with redundant load sharing control", *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, Vol. 37, Issue. 6, pp. 506~513, Dec. 1990.
- [8] Sang-Hoon Lee, Woo-cheol Lee, Kyong-Hwan Kim, Dong-Seok Hyun, "The Parallel Operation Control Technique of UPS System", *The Korean Institute of Power Electronics, 2002 Power Electronics Autumn Conference*, pp. 158~162, Nov. 2002.
- [9] J. F. Chen and C. L. Chu, "Combination voltage controlled and current-controlled PWM inverter for UPS parallel operation", *Power Electronics, IEEE Transactions on*, Vol. 10 Issue.5, pp. 547~558, Sep. 1995.
- [10] J. S. Kim, S. H. Lee and J. H. Choi, "Output LC filter design for UPS inverter considering the response of system", *KIEE Transactions on*, Vol. 50B, No. 7, July. 2001.



현동석(玄東石)

1950년 4월 8일생. 1973년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1978년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1984년~1985년 미국 토레도대학 교환교수. 1988년~1989년 원연공과대학 교환교수. 현재 한양대 공대 전기전자공학과 교수. 당 학회 회장역임.

저 자 소 개



이우철(李雨哲)

1964년 3월 24일생. 1987년 한양대 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 졸업(석사). 2001년 동 대학원 졸업(공학박). 1988~1998년 효성중공업(주) 기술연구소 근무. 2002년~현재 한양대 전기공학과 조교수.