

정지형 UPS의 병렬운전 제어

The Parallel Operation Control of Static UPSs

閔丙權*·元忠淵**

(Byoung-Gwon Min · Chung Yuen Won)

Abstract - The parallel operation system of multiple uninterruptible power supplies(UPSs) is used to increase power capacity of the system or to secure higher reliability at critical loads. In the parallel operation of the two UPSs, the load-sharing control to maintain the current balance between them is a key technique. Because a UPS has low output impedance and quick response characteristics, in case of an unbalanced load inverter output current changes very rapidly and thereby can instantaneously reach an overload condition. In this study, a high precise load-sharing controller is proposed and implemented for the parallel operation system of two UPSs with low impedance characteristics and this controller controls the frequency and the voltage to minimize the active power component and the reactive power component which are gotten from the current difference between two UPSs. And then a good performance of the proposed method is verified by experiments in the parallel operation system with two 40KVA UPSs.

Key Words : UPS, parallel operation, load-sharing control, current balance control

1. 서 론

UPS 병렬운전은 용량의 증대, 또는 부하단에 사용되는 부하의 중요도에 따라 UPS 출력 전원의 신뢰성을 증대시키기 위하여 사용된다. 이러한 UPS의 병렬운전시 가장 중요한 기술은 각 UPS의 전류분담 제어이다. 그러나 병렬운전시 시스템 고유의 문제점은 병렬운전 되고 있는 각 UPS의 임피던스가 서로 다른 점과, 항상 동기가 되어도 라인 임피던스 및 특성 차이로 전위차가 발생한다는 점이다[1, 2].

따라서 이러한 시스템을 병렬운전할 경우, 상기 문제점뿐만 아니라, 고주파화로 인한 출력임피던스의 저감과 순시치 PWM 제어의 고속 응답에 의한 등가 임피던스의 저하 때문에 병렬 UPS 사이에 발생하는 순환 전류가 많아지게 된다. 이로 인하여 각 UPS는 자신의 용량보다 적은 용량만을 부하측에 공급하게 되므로 전체적인 시스템의 효율을 감소시킬 뿐만 아니라, 시스템 고장의 원인이 된다. 이러한 문제점을 해결할 수 있는 가장 용이한 방법은 출력단의 임피던스를 크게 하는 것이다. 그러나 출력단 임피던스를 크게 할 경우 고주파화에 따른 장점이 없어지고, 변압기 내부에 필터를 내장하는 일체형 변압기를 구성하기가 어렵게 되어, 별도로 외부

에 출력필터를 부착하여야 하므로 가격이 상승하고 크기가 커지는 문제점이 발생된다[3][4].

본 연구에서는 출력임피던스를 크게 하지 않고도 출력임피던스가 낮은 UPS 시스템을 병렬운전할 때에 발생할 수 있는 상기의 문제점을 해결하기 위하여, 각 UPS 장치의 출력전류 편차로부터 구한 유효전력과 무효전력에 대응하여 출력위상과 출력전압을 보정하는 고정밀 제어를 구현하였으며, 제작한 40KVA UPS 시스템 2대로 실험하여 그 성능을 입증하였다.

2. 주회로 및 제어 회로 구성

2.1 주회로

그림 1은 2병렬운전 시스템의 주회로 구성도를 보여주고 있다. UPS1과 UPS2의 주전력회로와 내부 구성은 동일하고, 회로구성은 정류부, 인버터부, 필터부, 스테틱(Static) 스위치부 및 수동 바이패스(Bypass)부로 구성된다.

정류부는 AC를 DC로 변환하여 인버터부에 DC 전압을 공급하고 동시에 축전지를 충전시키는 순변환기로서, DC 출력전압의 정전압 제어기능이 있는 정류기이다. 본 정류기는 사이리스터를 이용한 위상각제어 정류기로서 DC 링크단의 DC 전압을 검출하여, 기준전압과 검출전압 사이의 오차를 없애도록 사이리스터의 점호각(α 각)을 제어하여 입력전압의 변동이나 부하의 변동에 관계 없이 항상 일정한 DC 전압을 유지

* 正 會 員 : 現代重工業 中央研究所 電力電子研究室

** 正 會 員 : 成均館大 電氣電子 및 컴퓨터工學部 教授 · 工博
 接受日字 : 1998年 10月 27日
 最終完了 : 1999年 6月 1日

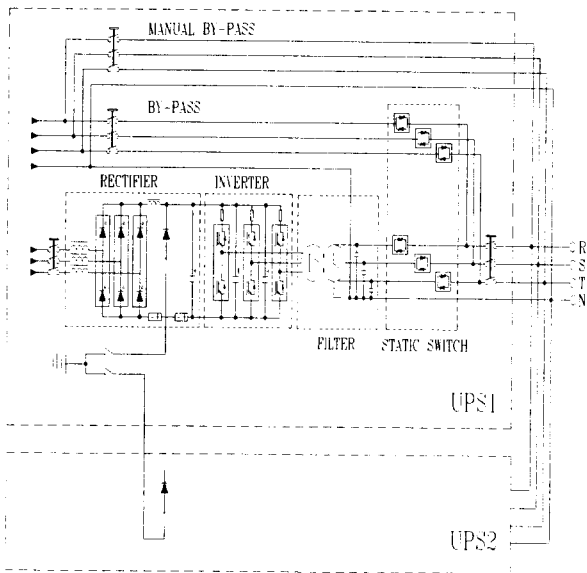


그림 1 주회로 구성도
Fig. 1 Block diagram of the main power circuit

할 수 있도록 제어된다. DC 전압을 구하는 식은 다음과 같다.

$$V_{dc} = 1.35 V_L \cos \alpha \quad (1)$$

여기서 V_{dc} 는 정류기의 DC 출력전압, V_L 은 선간전압, α 는 점호각이다

외부에 연결되어 있는 축전지는 상용전원의 정전시, 또는 정류기 고장시 DC 전원을 인버터부에 공급하는 역할을 하며, 미리 정해진 시간만큼 부하측에 전력을 계속 공급함으로써 출력의 무정전화가 가능하도록 한다.

인버터부는 DC를 AC로 변환하여 정전압, 정주파수를 갖는 양질의 교류출력을 부하측에 공급하는 부분으로서 IGBT에 의한 고속 스위칭과 PWM방식으로 제어된다.

필터부는 인버터부에서 발생된 PWM 파형을 필터링하여 고조파를 제거함으로써 파형의 왜곡(Distortion)이 없는 정현파를 발생시키는 부분으로서, 인버터 변압기의 누설 인덕턴스와 AC 콘덴서에 의해 저역통과 LC 필터를 구성한다.

스태틱 스위치는 UPS의 출력 또는 바이패스와 부하의 접속이나 분리를 위하여 사용되는 전력용 교류 스위치로 인버터 스태틱 스위치와 바이패스 스태틱 스위치로 구성된다. 본 시스템에서는 자연 소호식 사이리스터 스위치를 사용하여 고속 스위칭 동작을 함으로써 인버터 출력과 바이패스 출력의 상호 절환시 순간 정전이 발생하지 않도록 하였다.

수동 바이패스부는 시스템을 입력전원으로부터 완전히 분리시키는 역할을 하며 시스템 고장시 UPS를 유지 보수할 경우에 사용되며 보수 바이패스(Maintenance Bypass)라고도 한다[5].

UPS 병렬운전 시스템의 구성으로는 각 UPS에 축전지가

공통으로 연결되어 있는 공통 축전지 시스템과 각 UPS에 별도의 축전지를 설치하는 개별 축전지 시스템이 있다. 본 연구에서는 공통 축전지 시스템으로 회로를 구성하였다. 공통 축전지 시스템은 병렬운전시 직류 라인이 공통이기 때문에 내부에서 직류 단락이 발생하면 전체 시스템에 영향을 주게 되므로, 신뢰성 향상을 도모하기 위하여 DC 링크단과 축전지 사이에 다이오드를 삽입하였다. 이 다이오드는 직류 단락 발생시 DC 링크단과 축전지 사이를 분리시키는 역할을 한다.

2.2 제어회로

그림 2는 UPS 2대를 병렬로 운전할 때의 1상분 등가회로를 나타낸다. 두 UPS가 단독으로 동작할 때 인버터에서 발생하는 출력전압 V_{i1} 및 V_{i2} 는 다음과 같다.

$$V_{i1} = L_{S1} \frac{di_1}{dt} + V_o \quad (2)$$

$$V_{i2} = L_{S2} \frac{di_2}{dt} + V_o \quad (3)$$

$$i_{C1} = C_1 \frac{dV_o}{dt} \quad (4)$$

$$i_{C2} = C_2 \frac{dV_o}{dt} \quad (5)$$

여기서

V_{i1}, V_{i2} : 각각 UPS1 및 UPS2의 인버터 출력전압

L_{S1}, L_{S2} : 각각 UPS1 및 UPS2 변압기의 누설 인덕턴스

C_1, C_2 : 각각 UPS1 및 UPS2의 AC 콘덴서

i_1, i_2 : 각각 UPS1 및 UPS2의 인버터 출력전류

i_{C1}, i_{C2} : 각각 UPS1 및 UPS2의 AC 콘덴서에 흐르는 전류

V_o : 부하에 인가되는 전압

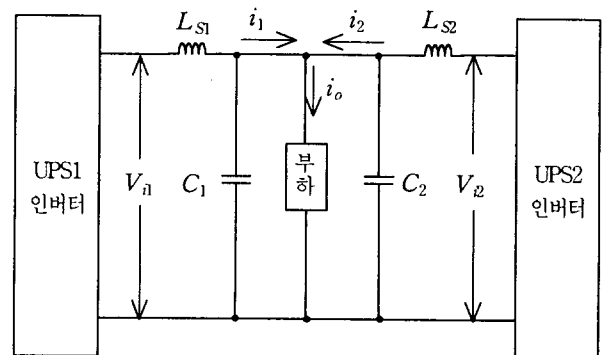


그림 2 1상분 등가회로도
Fig. 2 Per-phase equivalent circuit

인버터를 구성하는 회로에 동일한 게이트 펄스를 인가하더라도 각 UPS의 인버터 출력단에 연결된 L_{S1} 과 L_{S2} 및 C_1 과 C_2 의 값들이 완전히 동일하지 않기 때문에 식 (2), (3)의

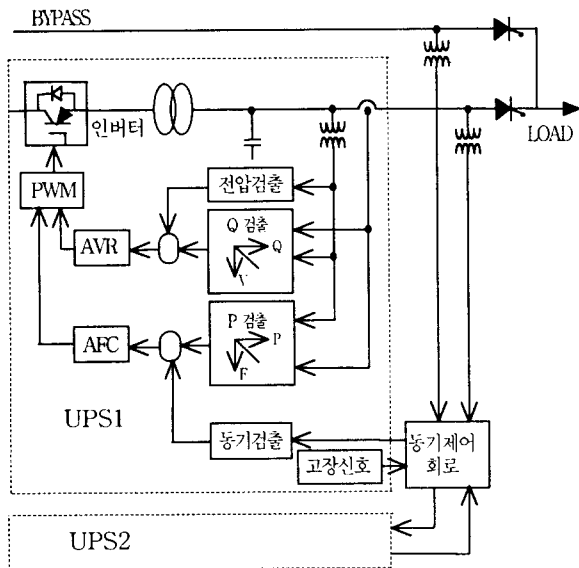
V_{n1} 과 V_{n2} 는 값이 서로 다르게 되어 두 인버터 사이에는 필연적으로 순환 전류가 흐르게 된다. 따라서 UPS 병렬운전의 최대 관점은 인버터에 흐르는 순환전류를 최소화하는 것이다. 순환전류는 자기 자신에서 공급되는 전류가 부하에 공급되지 않고 다른 인버터에 공급되는 것을 의미하므로, 이를 최소화하기 위해서 각 인버터에서 발생하는 전압 및 전류를 크기가 같고 위상이 동일하게 제어하면 각 인버터에서 공급하는 전력은 부하로 균등하게 공급하게 되어 순환 전류가 없게 된다[6]. 이것을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$i_1 = i_2 = \frac{i_o}{2} \quad (6)$$

$$i_{cr} = \frac{1}{2}(i_1 - i_2) \quad (7)$$

여기서 i_o 는 부하전류이고 i_{cr} 은 순환전류를 나타낸다.

(6)식을 만족하기 위한 방법으로서는 전력분담편차제어, 주파수와 전압강하에 의한 제어, 출력모선을 이용한 제어방법[3] 등이 있으나, 본 연구에서는 회로구성이 간단하고 신뢰성 확보가 용이한 인버터 출력단의 전압위상과 진폭을 조정하는 전력분담편차제어 방법을 사용하였다.



AVR : Automatic Voltage Regulator
AFC : Automatic Frequency Converter

그림 3 시스템 제어 블록도
Fig. 3 System control block diagram

그림 3은 본 연구에서 구현한 시스템의 제어 블록도를 나타낸다. 인버터부의 제어는, 한 상의 전압만을 검출하여 제어하는 평균치 제어방식을 사용하지 않고, 두개의 교류 출력 선간 전압을 검출하여 이 전압과 기준 값을 순시 비교하여 편차가 영이 되도록 하는 PWM 방식에 의한 각상제어를 하여 부하의 불평형이 발생하여도 상간의 전압이 동일하게 제어되도록 하였다.

시스템의 병렬제어는 출력단에서 검출된 전류와 자기 자신의 전류 편차를 유효전력 P와 무효전력 Q로 검출회로를 통하여 분리하고, P로 검출된 전류는 빠른 응답을 위해서 인버터의 출력주파수를 변화시키고, Q로 검출된 전류는 인버터의 전압진폭을 제어하도록 하였다.

그림 3에서 AVR은 무효전력분을 보상하기 위한 전압의 크기를 제어하기 위하여 기준전압의 크기를 제어하는 부분이며, AFC는 기준 주파수를 제어하는 부분이다.

그림 4는 그림 3의 P 검출부와 주위 부분을 자세히 나타낸 것으로서 유효전력 편차 ΔP 를 검출하는 블록도를 나타낸다. 이 그림에서 UPS1의 전류 I_a 와 전압 V_a 는 유효전력 검출기에 대한 입력이며, 인버터에 대한 유효전력 P_a 는 다음과 같은 관계식에 의해서 구해진다.

$$P_a = V_a I_a \cos \theta_a \quad (8)$$

여기서 θ_a 는 V_a 과 I_a 사이의 위상차

마찬가지로 UPS2에 대해서도 전류 I_b , V_b 는 유효전력 검출기에 대한 입력이며 유효전력 P_b 는 다음과 같은 관계식에 의해서 구해진다

$$P_b = V_b I_b \cos \theta_b \quad (9)$$

여기서 θ_b 는 V_b 와 I_b 사이의 위상차

P_a , P_b 는 감산회로에 의해 ΔP_a , ΔP_b 를 생성한다. 여기서 $P_a > P_b$ 일 때는 ΔP_a 가 정(+)이 되고 ΔP_b 는 부(-)로 된다. 그리고 $P_a < P_b$ 일 때는 ΔP_a 가 부(-)가 되고 ΔP_b 는 정(+)으로 된다.

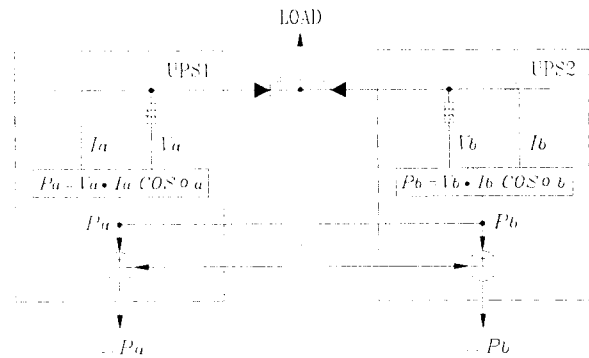


그림 4 유효전력 편차 검출 블록도

Fig. 4 Block diagram for detection of the active power difference

한편 $P_a = P_b$ 일 때는 $\Delta P_a = \Delta P_b = 0$ 이 된다. 무효전력 Q에 대해서도 동일한 방법으로 제어된다. 따라서 $P_a = P_b$, $Q_a = Q_b$ 가 되도록 제어하여 $\Delta P_a = \Delta P_b = 0$, $\Delta Q_a = \Delta Q_b = 0$

이 되도록 함으로써 양호한 전류분담 특성을 얻을 수 있다.

그림 4의 사이리스터는 각각 UPS1, 2의 스테틱 스위치를 나타낸다.

UPS 병렬운전에서 중요한 부분중의 하나는 상용전원과 인버터간의 동기 및 인버터와 인버터 사이의 위상동기 부분이다[7]. 특히 인버터 상호간에 위상차가 발생할 경우에는 동일한 크기를 갖는 전원도 위상 차이에 의한 순환전류가 발생하게 된다. 본 연구에서는 별도의 동기회로를 구성하여 시스템의 동기화를 실현하였다. 그림 5는 동기화 회로의 블록도를 보여준다.

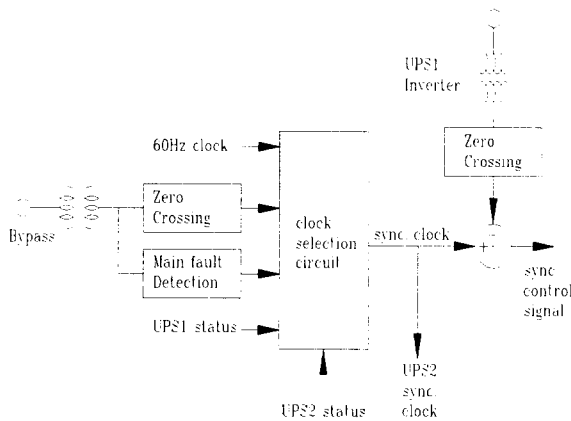


그림 5 동기화 회로 블록도

Fig. 5 Block diagram of the synchronization circuit

동기화회로의 동작원리는 다음과 같다. 즉 병렬운전 시스템이 정상적으로 동작할 때는 UPS1과 UPS2가 모두 상용전원의 주파수를 추종한다. 그러나 만약 정전이 되면 UPS1의 주파수가 주(Master Frequency)가 되고 UPS2의 주파수가 종(Slave Frequency)이 되어 UPS2는 UPS1의 주파수를 추종하도록 동작하고, UPS1이 고장시에는 UPS2가 자체 클럭으로 동작한다.

또한 시스템의 상태를 점검하여, 한 시스템에 고장이 발생하였을 경우에도, 다른 정상적인 시스템은 고장이 발생한 시스템으로부터 간섭을 받지 않도록 보호하기 위하여 빠르게 분리되어야 하며, 고장이 발생한 시스템으로 과도한 순환 전류가 흐르는 것을 방지하여야 한다. 구성된 시스템에서는 전압, 전류감지에 의한 고장감지 및 시스템의 상태를 감지하며, 다른 시스템과 고장 정보를 상호 교환하여 고장난 시스템이 부하단과 분리되도록 설계하였다.

3. 실험 결과

본 연구에서는 설계된 시스템 및 제어기를 시험하기 위하여 3상 40KVA UPS 두 대를 제작하였으며, 설계 및 제작된 시스템의 파라미터는 표 1과 같다.

UPS의 입력/출력 전압은 3상 220Vac/208Vac, 직류전압은 243Vdc, 인버터부 출력변압기의 임피던스 전압강하는 스위칭

주파수를 고려하여 4.5%로 하였으며, 시스템의 부하단에 전부하(Full Load) 용량의 저항부하와 R-L부하를 인가하여 실험하였다.

표 2는 저항부하의 경우 부하율 변화에 따른 UPS1, UPS2의 R상 전류와 전류 편차를 보여주고 있고, 그림 6은 이것을 그래프로 표시한 것이다. 표와 그림에서 알 수 있는 바와 같이 각 UPS에 대한 전류 분담 특성이 우수함을 알 수 있다.

그림 7(a)는 100%의 저항부하시 부하단 출력전압 파형이며 7(b)는 R-L(저항-인덕턴스) 100% 부하시의 출력전압 파형이다. 그림 8(a)는 100% 저항부하시 출력전압의 THD 값을 보여주고 있고, 8(b)는 R-L 100% 부하시의 THD 값을 보여주고 있다. 저항부하와 R-L부하시 모두 출력전압의 파형이 우수하고, THD 값은 저항부하시 0.92%, R-L부하시 1.75%로 특성이 우수함을 알 수 있다. 그림 9는 UPS1으로 동작중 UPS2가 투입되었을 때의 부하단의 전압(a) 및 전류파형(b), UPS1의 전류파형(c), UPS2의 전류파형(d)이다. 그림에서 알 수 있듯이 동일한 전류 분담이 이루어지고 있다. 그림 10은 UPS1과 UPS2가 정상적으로 동작하고 있을 때 UPS2에 고장이 발생하였을 경우의 전압 및 전류 파형을 나타낸다.

표 1 시스템 파라미터

Table 1 System parameter

NO	항 목	설계요건
1	정격 용량	40kVA
2	입력 전압	220Vac
3	출력 전압	208Vac
4	DC 전압	243Vdc
5	변압기 %임피던스 전압강하	4.5%
6	필터 콘덴서	470 μF
7	인버터부 스위칭 주파수	7.2kHz
8	인버터 효율	90% 이상
9	부하 전류	110A
10	부하 역률	0.8

표 2 저항부하시 UPS1, UPS2의 R상 전류 및 편차

Table 2 Load current and current deviation between UPS1 and UPS2 at resistive loads

부하율	UPS1 전류	UPS2 전류	전류 편차
25%	11.8A	11.4A	0.4A
50%	21.7A	21.4A	0.3A
75%	34.0A	33.1A	0.9A
100%	44.0A	42.6A	1.4A

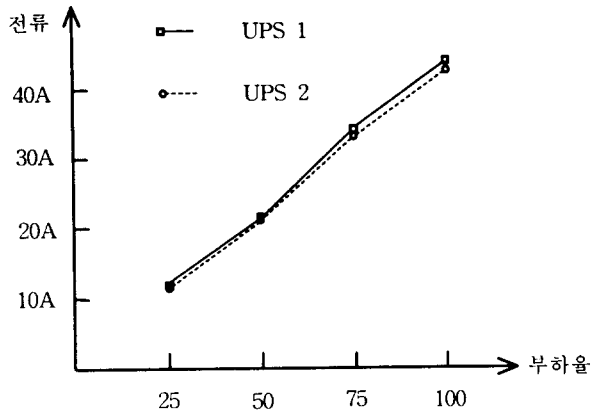
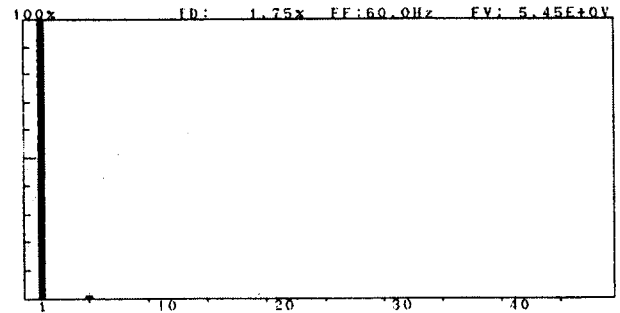
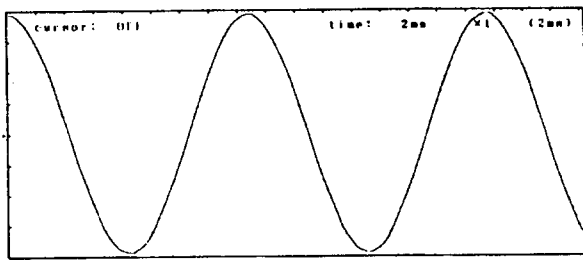


그림 6 UPS1과 UPS2의 부하율에 따른 부하전류
Fig. 6 Load current of UPS1 and UPS2 to load rate

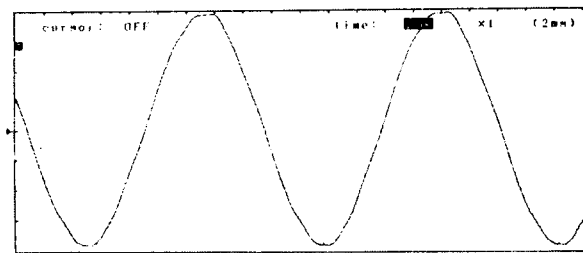


(b) R-L 100% 부하
(b) R-L 100% load

그림 8 부하단 출력전압 THD
Fig. 8 THD of load output voltage

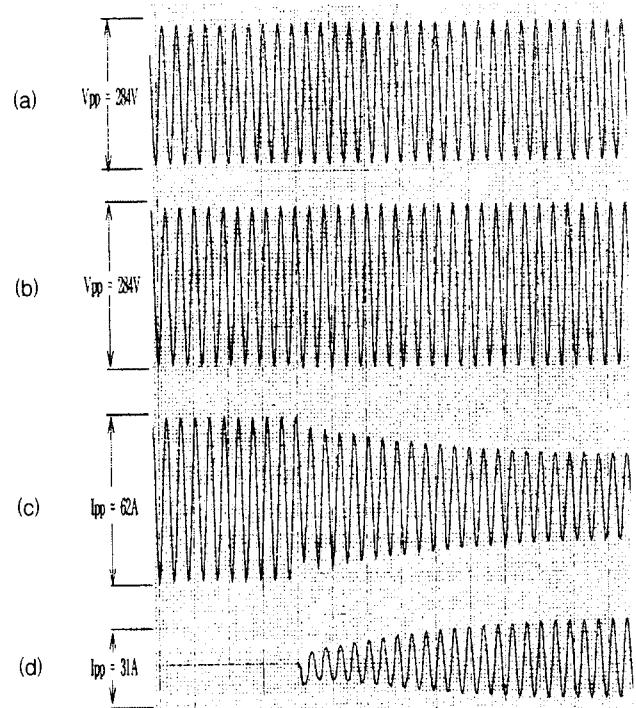


(a) 100% 저항 부하시 출력전압
(a) Output voltage at 100% resistor load



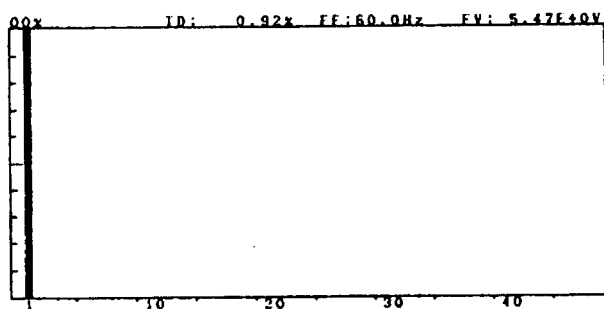
(b) R-L 100% 부하시 출력전압
(b) Output voltage at 100% R-L load

그림 7 부하단 출력전압 파형
Fig. 7 Waveform of the load output voltage

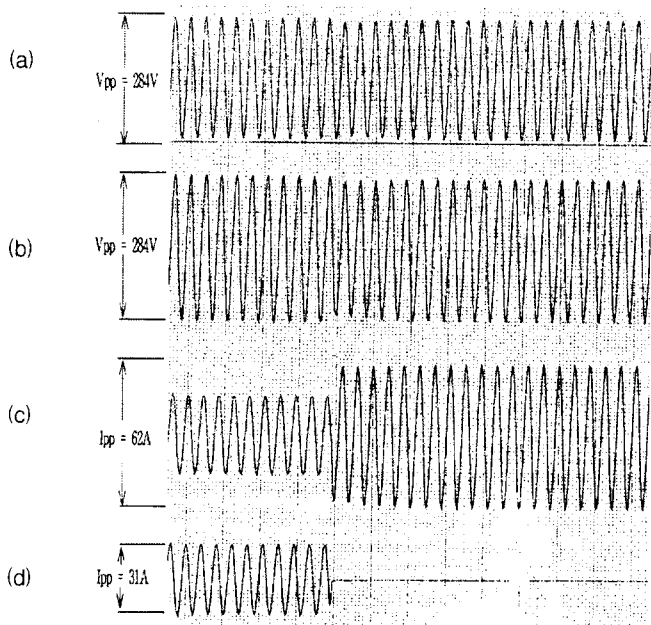


(a) 부하 전압 (b) 부하 전류
(a) Load voltage (b) Load current
(c) UPS1 전류 (d) UPS2 전류
(c) UPS1 current (d) UPS2 current

그림 9 UPS1로 동작중 UPS2 투입시 전압 및 전류 파형
Fig. 9 Waveforms of voltage and current at putting in the UPS2 while the UPS1 is operating.



(a) 100% 저항부하
(a) 100% resistive load



(a) 부하 전압 (a) Load voltage
 (b) 부하 전류 (b) Load current
 (c) UPS1 전류 (c) UPS1 current
 (d) UPS2 전류 (d) UPS2 current

그림 10 UPS1, UPS2 동작중 UPS2 고장시 전압 및 전류 파형
 Fig. 10 Waveforms of voltage and current at breaking down of the UPS2 while the UPS1 and UPS2 are operating

4. 결 론

본 논문에서는 출력임피던스가 낮은 UPS 시스템을 병렬운전하기 위하여 전류분담제어 방법으로서 전력분담편차제어 방법에 의하여 제어를 설계하였고, 실제로 40KVA UPS 2대를 제작하여 실험함으로써 그 성능의 우수함을 입증하였다. 본 연구를 통한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 제안된 제어기로 두 대의 UPS를 병렬운전하였을 때 전류분담 특성이 우수하다.
- 2) 우수한 전류 분담 특성에 따라 출력전압의 THD 특성이 매우 양호하다.
- 3) 구성된 제어기에 의한 시스템은 빠른 응답과 외란에 대해 강인한 제어특성을 보인다.

참 고 문 헌

[1] T. Sukegawa et al., "A Multiple PWM GTO Line-side Converter for Unity Power Factor and Reduced Harmonics", IEEE/IAS Annual Meeting Conf., pp. 279~284, 1991.

[2] M. Homb et al., "Quick Response and Low-Distortion Current Control for Multiple Inverter-fed Induction Motor Drives", Conf. Rec., EPE'91 Firenze, pp. 1-043~1-047, 1991.

[3] Takao Kawabata et al., "Parallel Operation of Voltage Source Inverters", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 24, No. 2, pp. 281~287, 1988.

[4] Joachim Holtz et al., "Multi-Inverter UPS system with Redundant Load Sharing Control", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 37, No. 6, pp. 506~513, 1990.

[5] 민병권 외, "발전소용 무정전전원장치(UPS) 개발", 대한전기학회 하계학술대회 논문집(F), pp. 2085~2087, 1997. 7

[6] Joachim Holtz et al., "A High-Power Multitransistor-Inverter Uninterruptible Power Supply system", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 37, No. 6, pp. 506~513, 1990.

[7] Takao Kawabata et al., "Parallel Processing Inverter System", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 6, No. 3, pp. 442~450, 1991.

[8] Ned Mohan et al., Power Electronics : Converters, Applications, and Designs, John Wiley & Sons, 1989.

저 자 소 개



민 병 권 (閔 丙 權)

1980년 부산대 전기공학과(전자공학 전공) 졸업. 1985년 연세대 산업대학원 전자공학과 졸업(석사). 1997년 성균관대 대학원 전기공학과 박사과정 수료. 1999년 8월 졸업 예정. 1979. 12~1997. 6 금성통신(현 LG전자). 1997. 6~현재 현대중공업 중앙연구소 전력전자연구실 책임연구원.

Tel : 0331-289-5150.

E-mail : minbg@hhi.co.kr



원 충 언 (元 忠 淵)

1978년 성균관대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1991년~1992년 미국 테네시 주립대학 전기공학과 객원교수. 현재 성균관대 전기전자 및 컴퓨터공학부 교수.

Tel : (0331) 290-7115

E-mail : won@yurim.skku.ac.kr