

영상변류기 동작 방식을 이용한 2개의 컨버터 병렬 운전

論 文
49B-4-6

Parallel Operation of Two Converters using Zero Current Transformer Method

孫承燦* · 成世鎭**
(Seung-Chan Sohn · Se-Jin Seong)

Abstract - In the conventional method, two CT's have been used to share the load current equally with two converters. A new simple method to find out the current difference between two converters using only one CT as a ZCT is suggested. Two experimental prototype converters were designed and implemented for the evaluation of the load current sharing. The results of experiment show that the newly proposed ZCT method using only one CT could make a good load current sharing than the conventional method required two CT when operating two converters in parallel.

Key Words : converter, CT, current sharing, parallel operation, ZCT

1. 서론

반도체 산업의 발전에 따라 컴퓨터 성능이 향상되고, 이에 따라 금융, 통신, 프로세스 산업 분야 등에 컴퓨터 시스템 적용이 늘어나고 있다. 이런 컴퓨터 시스템용 전원 공급장치는 높은 신뢰성과 전체 시스템의 소형화를 위하여 고밀도를 요구하는 대전력 시스템이다. 이런 대전력 시스템에 전원을 안정하게 공급하기 위해서는 신뢰성이 높고 큰 용량의 직류 전원이 필요하게 된다. 그런데 1개의 시스템 전원만을 사용할 경우는 손실에 의한 발열 때문에 소자 자체의 junction 온도가 올라 신뢰성이 저하되고, 또 1개의 반도체 소자가 전력을 공급할 수 있는 전원 용량의 한계가 있다. 따라서 전원 용량을 키우기 위해서는 1개의 power source보다는 다수의 모듈화된 전원 source를 병렬 운전하는 것이 더 효율적이다. 컨버터를 병렬 운전하는 경우 각 컨버터의 전류를 균등하게 분배해야 하는 것이 중요하다. 부하 전류 분배를 위한 여러 가지 방법으로 droop method [1, 3, 4, 5, 10], active current sharing method 방법이 제안되어 있다. active current sharing method에는 average current method [2, 7, 8, 9, 10], peak current method [1, 2, 6, 10, 11], dedicated master method [1, 2] 등 부하 전류 분배를 위한 여러 가지 방법이 지금까지 제안되어 있다. 기존 병렬운전을 위한 방법과 제안한 방법의 특징은 표 1과 같다.

병렬 운전으로 전체 시스템의 신뢰성이 향상될 수 있다. 특히 군용 장비의 경우는 신뢰성이 매우 중요한 파라미터이다. 만약 1개의 컨버터에서 fault가 발생해도 다른 컨버터로

fault tolerant 기능을 할 수 있어 전체적으로 장비 동작 신뢰성을 높일 수 있게 된다. 지금까지 제안된 능동 부하 전류 분배 제어 방법들은 2개의 컨버터를 병렬 운전하기 위하여 모두 2개의 CT(current transformer)가 필요하였다.

표 1 기존 방법과 제안한 병렬 운전 방법의 특징
Table 1 Characteristics of conventional method and proposed parallel operation method

항 목	특 정	
기 존 방 법	Droop method	컨버터의 상호간 제어신호가 없어 구조가 간단 컨버터간 부하전류 분담성능이 떨어짐 정밀을 요하는 곳에 부적합
	Average current method	전류 분담 제어 신호가 1가닥으로 간단 비교적 안정하고 정밀한 전류 분담 가능 병렬 연결 컨버터 수량에 따라 특성이 변함
	Peak current method	전류 분담 제어 신호가 1가닥으로 간단 Fault tolerant 특성이 양호 확장 및 변경이 용이 과도 상태시의 전류 분담 특성이 나쁨 전류 분담 제어 실패 가능성
	Dedicated master method	출력 전압 안정에 유리 고장시 분담이 이루어지지 않아 신뢰도가 낮음
	전류차 검출	2개의 전류 센서(CT) 필요(능동 제어시)
제 안 방 법	Zero current method	정밀한 부하 전류 분담 제어가 가능 센서간의 특성 차이에 영향을 받지 않음 컨버터의 고장 탐지곤란
	전류차 검출	1개의 전류 센서만으로도 가능

* 正 會 員 : 忠南大 電氣工學科 博士科程 修了

** 正 會 員 : 忠南大 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 1999年 10月 11日

最終完了 : 2000年 3月 13日

그러나 본 논문에서는 그림 1과 같이 시스템 특성상 장비 동작 신뢰성 향상을 위하여 2개(N+1)의 컨버터로 시스템(부하)에 전원을 공급하는 능동 부하 전류 분배 제어의 경우 기존 방식으로는 2개의 CT가 필요하던 것을, 1개의 CT만으로 ZCT(zero current transformer) 방식으로 동작시켜 병렬 운전하는 방안을 제안하였다[12].

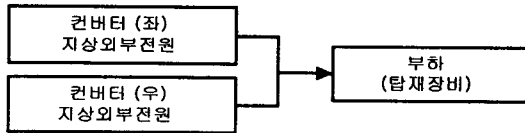


그림 1 신뢰성 향상을 위한 병렬 운전 시스템 구성
Fig. 1 System configuration of parallel operation for reliability improvement

2. 전류차 검출 회로 구성

기존에 2개의 컨버터를 병렬 운전하기 위한 구성은 두 컨버터가 공급하는 전류차를 구하기 위해서 그림 2(a)와 같이 2개의 CT를 컨버터에 각각 사용하였으나 본 논문에서는 그림 2(b)와 같이 1개의 CT만으로 병렬 운전하는 방안을 제안하였다. 기존 방식은 각각의 CT로 각 컨버터의 전류 I_a , I_b 를 측정하고, 이 전류로부터 평균 전류(I_{avg}) $I_{avg} = 0.5 * (I_a + I_b)$ 를 구한다. 각 컨버터가 부하로 공급하고 있는 전류 I_a , I_b 와 I_{avg} 와의 차이(error)를 구하여 이를 각 컨버터에 제환시켜 부하 전류 분배를 제어하는 방법을 사용하여 왔다.

제안하는 방법은 두 컨버터가 공급하는 전류차를 측정하기 위하여 그림 2(b)와 같이 각각의 컨버터 plus(+) 쪽 공급 라인을 1개의 CT에 반대 방향으로 통과(관통)시켜 hall CT를 ZCT처럼 동작시킨다. 즉 두 컨버터가 부하로 공급하는 전류에 의한 자속은 서로 상쇄되고 두 컨버터의 전류차에 비례하는 출력 전압을 얻을 수 있다. 이렇게 구성하면 CT가 ZCT처럼 동작하기 때문에, 두 컨버터가 부하로 공급하는 전류차 $i_e (= I_a - I_b)$ 를 그림 2(a)와 같이 1개의 CT만으로 간단하게 얻을 수 있게 된다.

3. 컨버터 설계 및 모델링

새로이 제안된 ZCT 방식을 이용한 컨버터의 병렬 운전 성능 확인을 위하여 그림 3과 같이 실험용 파워드 컨버터를 설계, 제작하였다. 설계된 컨버터의 주요 파라미터는 다음과 같다.

- $V_i = 28 [V]$ 컨버터 직류입력전압
- $V_o = 5 [V]$ 컨버터 직류출력전압
- $I_o = 5 [A]$ 컨버터 최대출력전류
- $L = 75 [\mu H]$ 필터 인덕턴스
- $C = 2200 [\mu F]$ 필터 캐패시턴스
- $f_{sw} = 40 [Khz]$ 스위칭 주파수
- $V_r = 2.5 [V]$ 기준전압

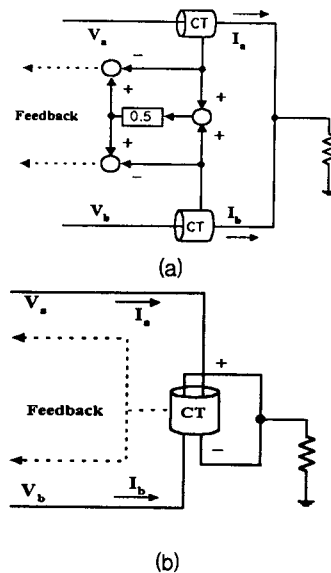


그림 2 전류차 검출 회로 방식 비교 (a)기존방법 (b)제안한 방법

Fig. 2 Comparison of the current difference sensing methods (a) conventional sensing method (b) proposed sensing method.

그림 3의 컨버터 블록도로부터 컨버터의 개루프 전달함수 $T_{sol}(s)$ 를 구하면 식 (1)과 같다.

$$T_{sol}(s) = n V_i K_m K_d A(s) \tag{1}$$

- 여기서 $n =$ 변압기 턴수 비율 0.7
- $K_m =$ 모듈레이터 이득 1/3
- $K_d =$ 컨버터 출력 전압 분압비 0.5
- $A(s) =$ 제어증폭기 전달함수

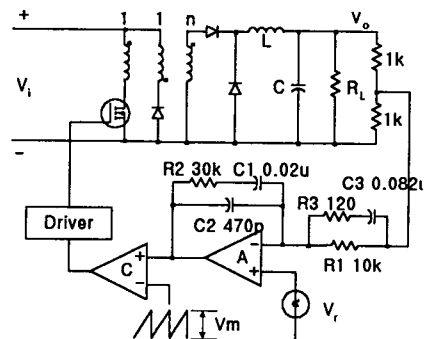


그림 3 병렬 운전을 위해 설계 제작한 파워드 컨버터 블록도
Fig. 3 Designed and implemented forward converter block diagram for parallel operation

설계된 파워드 컨버터의 제어증폭기는 과도 응답 향상과 부하 레귤레이션(Regulation)을 위하여 원점에 극점이 있고, 2개의 극점과, 2개의 영점을 갖도록 제어기를 설계하였다. [13, 14, 15, 16, 17, 18]병렬 운전시 두 컨버터의 전류 오차 제환을 갖는 컨버터 블록도는 그림 4와 같다. 각 컨버터와

관련되는 파라미터는 아래 첨자 a, b로 표시하였고, 2 개의 컨버터 병렬 운전시와 관련되는 파라미터는 아래 첨자 1, 2 로 표시하였다.

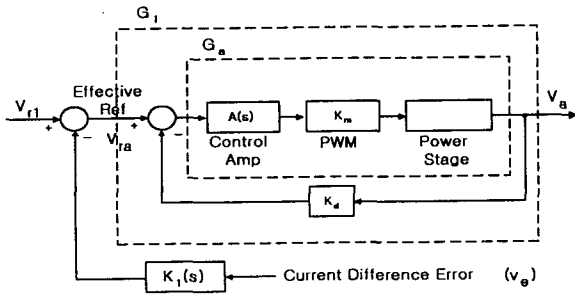


그림 4 전류 오차 제환을 갖는 컨버터 블록도
Fig. 4 Converter block diagram with current error feedback.

컨버터 출력단으로부터 부하까지의 케이블 저항을 각각 R_{c1} , R_{c2} 라고 하면, 병렬 운전시의 간략화한 등가 회로는 그림 5와 같다. 컨버터 A, B의 출력전압을 V_a , V_b , 각 컨버터에서 부하로 공급하는 전류를 각각 I_a , I_b , 라고 하면 그림 5로부터 다음 식을 얻을 수 있다. [19]

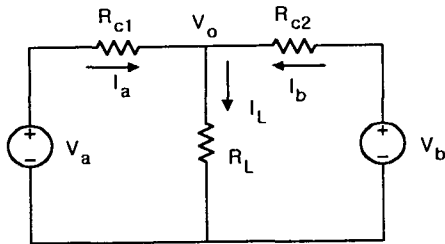


그림 5 병렬 운전시의 간략화한 등가 회로
Fig. 5 Simplified equivalent circuit of converters parallel operation.

$$I_a = \frac{(V_a - V_b)R_L + V_a R_{c2}}{R_x} \quad (2)$$

$$I_b = \frac{(V_b - V_a)R_L + V_b R_{c1}}{R_x} \quad (3)$$

여기서 R_{c1} = 컨버터 A의 케이블 저항
 R_{c2} = 컨버터 B의 케이블 저항
 R_L = 부하저항
 $R_x = (R_{c1} + R_{c2})R_L + R_{c1}R_{c2}$

만일 두 컨버터의 전류가 $I_a = I_b$ 이라면 식 (2), (3)으로부터 식(4)를 구할 수 있다.

$$2R_L(V_a - V_b) = V_b R_{c1} - V_a R_{c2} \quad (4)$$

식(4)에서 두 컨버터의 전압이 이론적으로 같다면 $R_{c1} = R_{c2}$ 가 되어야 한다는 결론에 도달한다. 그러나 R_{c1} , R_{c2} 는 컨버터에서 부하까지의 Cable 저항으로 R_{c1} , R_{c2} 가 물리적으로 항상 같기는 사실상 불가능하다. 그러므로 $I_a = I_b$ 를 이루기 위해서는 각 컨버터의 부하 전류값에 따

라 식(4)가 성립하도록 각 컨버터의 출력전압 V_a , V_b 를 제어해 주어야한다. 각 컨버터의 출력 전압 V_a , V_b 를 제어하기 위한 방법으로 ZCT 출력(current error)을 전류 분배 제어기 회로를 통한후 각 컨버터 기준 전압과 합성하여 얻어진 유효한(effective) 기준 전압을 각각의 컨버터에 병렬 운전 제어를 위한 기준 전압으로 사용하게 된다.

4. 전류 분배 제어기 설계 및 시뮬레이션

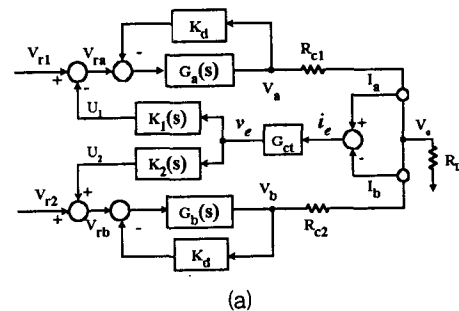
그림 6(b)에서 컨버터 출력 전압 V_a , V_b 는 다음 식과 같이 표현 할 수 있다.

$$V_a = G_1(s)(V_{r1} - G_{ct}K_1(s)i_e) \quad (5)$$

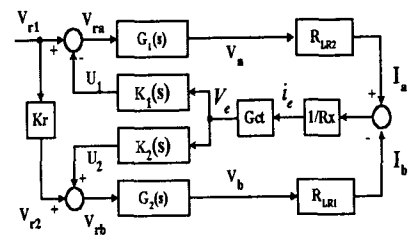
$$V_b = G_2(s)(V_{r2} + G_{ct}K_2(s)i_e) \quad (6)$$

여기서 $G_1(s)$ = 컨버터 A 페루프 전달함수
 $G_2(s)$ = 컨버터 B 페루프 전달함수
 V_{r1} = 컨버터 A 기준전압
 V_{r2} = 컨버터 B 기준전압
 $K_1(s)$ = 컨버터 A 전류분배제어기
 $K_2(s)$ = 컨버터 B 전류분배제어기
 G_{ct} = CT gain 0.1

전류 분배 제어기 $K_1(s)$, $K_2(s)$ 설계는 다음과 같다. 그림 6(a)에서 입력을 U_1 , U_2 로하고 출력을 v_e 로 하면 $K_1(s)$, $K_2(s)$ 가 포함되지 않은 개루프 전달함수 T_{ol} 은 다음과 같다.



(a)



(b)

그림 6 병렬 운전시의 블록도 (a)기능 블록도 (b)간략화한 블록도

Fig. 6 Parallel connected converter block diagram (a) functional block diagram (b)simplified block diagram.

먼저 $U_1 \neq 0, U_2 = 0$ 일때의 개루프 전달 함수를 구하면

$$v_e = \frac{-G_{cl} U_1 G_1(s) R_{LR2}}{R_x} \quad (7)$$

여기서 $R_{LR2} = 2R_L + R_{c2}$

개루프 전달 함수는 정의($-\frac{V}{U}$)에 의하여

$$\frac{v_e}{U_1} = \frac{G_{cl} G_1(s) R_{LR2}}{R_x} \quad (8)$$

같은 방법으로 $U_1 = 0, U_2 \neq 0$ 에 대하여 개루프 전달 함수를 구하면

$$\frac{v_e}{U_2} = \frac{G_{cl} G_2(s) R_{LR1}}{R_x} \quad (9)$$

여기서 $R_{LR1} = 2R_L + R_{c1}$

중첩의 원리를 적용한 개루프 전달 함수 T_{ol} 은 식(10)과 같다.

$$T_{ol} = \frac{G_{cl} (G_1(s) R_{LR2} + G_2(s) R_{LR1})}{R_x} \quad (10)$$

식(10)의 개루프 전달 함수로부터 스텝(step) 응답을 구한다. 이 스텝 응답 그래프로부터 기울기가 최대인 점을 찾는다. 이점에서 최대의 기울기를 갖는 선을 그리고 x축, y축과 교차하는 점을 각각 구한다. 이점들로부터 Ziegler-Nichols 방법에 의하여 PI 제어기 파라미터를 설계하였다. [20]

설계된 제어기를 기본으로 하여 시행 착오법(trial and error method)을 통하여 식(11)과 같이 원점에 극점이 있고, 1개의 극점과 1개의 영점을 갖는 전류 분배 제어기를 설계하였다.

$$K_1(s) = \frac{1 + K_{z1}s}{G_k s(1 + K_{p1}s)} \quad (11)$$

병렬 운전시 전류 분배 제어기 $K_1(s), K_2(s)$ 가 포함된 병렬 연결 컨버터의 개루프 전달 함수 T_{olk} 는 그림 6(b)로부터 중첩의 원리를 적용하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T_{olk} = \frac{G_{cl} [G_1(s) K_1(s) R_{LR2} + G_2(s) K_2(s) R_{LR1}]}{R_x} \quad (12)$$

MATLAB을 이용하여 병렬 연결된 컨버터의 안정도를 시뮬레이션한 결과는 그림 7과 같다. 시뮬레이션 결과 이득 여유는 12.8 dB, 위상 여유는 54.0° 로 설계 목표치 이득 여유 10 dB 이상, 위상 여유 $45^\circ \sim 60^\circ$ 를 만족시켰다.

식(2), (3)과 그림 6(a)로부터 병렬 연결된 컨버터의 폐루프 전달 함수 G_{cl} 을 구하기 위하여 i_e 를 구하면

$$\begin{aligned} i_e &= I_a - I_b \\ &= \frac{(V_a - V_b)R_L + V_a R_{c2}}{R_x} - \frac{(V_b - V_a)R_L + V_b R_{c1}}{R_x} \\ &= \frac{V_a R_{LR2} - V_b R_{LR1}}{R_x} \end{aligned} \quad (13)$$

으로 주어진다. 식(13)에 식(5), (6)을 대입하고 정리하면

$$i_e = \frac{G_1(s) [V_{r1} - G_{cl} K_1(s) i_e] R_{LR2}}{R_x} - \frac{G_2(s) [V_{r2} + G_{cl} K_2(s) i_e] R_{LR1}}{R_x} \quad (14)$$

로 된다.

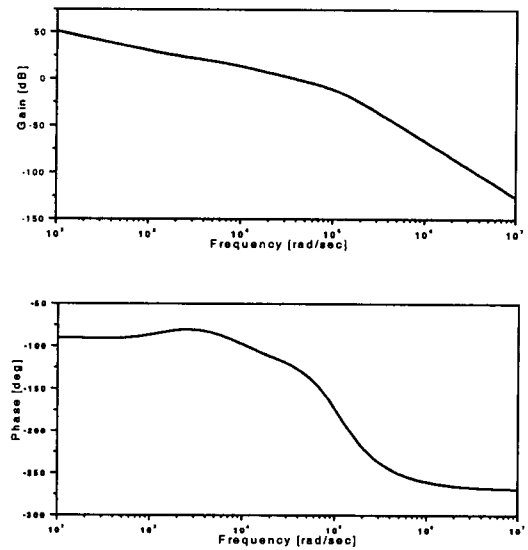


그림 7 컨버터 병렬 운전시의 안정도(이득여유, 위상여유)
Fig. 7 Stability of parallel connected converter (gain margin, phase margin)

식(14)를 i_e 에 대하여 정리하고, 간략화(1 input, 1 output)를 위하여 그림 6(b)에서 $K_r = 1$ 로 놓으면 병렬 연결된 컨버터의 폐루프 전달 함수 T_{cl} 은

$$T_{cl} = \frac{G_1(s) R_{LR2} - G_2(s) R_{LR1}}{R_x + G_{cl} [G_1(s) K_1(s) R_{LR2} + G_2(s) K_2(s) R_{LR1}]} \quad (15)$$

가 된다.

식(15)에서 만약 $G_1(s) = G_2(s), R_{c1} = R_{c2}$ 라면 분자항이 0이 되고 따라서 $i_e = 0$ 이 되어 이론적으로는 완전한 부하 전류 분배가 이루어질 수 있다. 그러나 일반적으로 똑같은 컨버터인 경우에도 $G_1(s) \neq G_2(s), R_{c1} \neq R_{c2}, V_{r1} \neq V_{r2}$ 이기 때문에 완전한 전류 분배가 이루어질 수 없어 전류차가 존재한다.

실험에 사용된 소자 값을 측정하고 그림 8과 같이 MATLAB으로 시뮬레이션하면, 그림 9와 같은 결과를 얻을 수 있다[21].

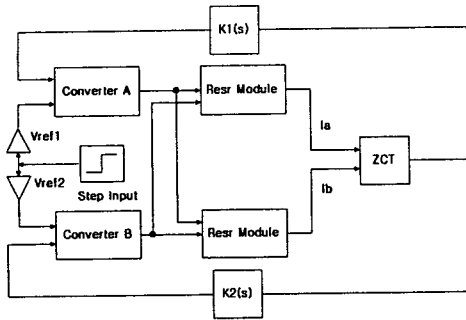


그림 8 MATLAB 시뮬레이션을 위한 블록도
Fig. 8 Block diagram for MATLAB simulation

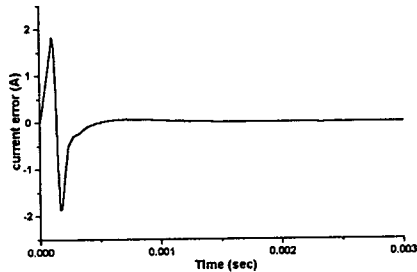


그림 9 컨버터 병렬 운전시의 부하 전류 오차 과도 응답 시뮬레이션

Fig. 9 Load current error transient response simulation of parallel connected converters.

시뮬레이션 결과 1 msec 이내에 목표치의 1% 이내에 안정화되어 시스템이 안정되게 동작함을 알 수 있다.

정상 상태에서의 두 컨버터의 부하 전류 분담에 대한 각 컨버터 전류차를 평가하기 위한 항목으로 전류 불평형을 CUR (Current Unbalance Ratio)을 식(16)과 같이 정의하자. CUR 수치가 작을수록 부하 전류 분담이 잘 이루어진다.

$$CUR = \frac{|I_{avg} - I_a|}{I_{avg}} * 100 [\%] \quad (16)$$

5. 실험 결과

제안한 ZCT 방식의 DC-DC 컨버터 병렬 운전 성능 평가를 위하여 2대의 실험용 파워 컨버터를 설계, 제작하고 병렬 운전 실험을 하였다. 제안한 ZCT 방식과 CT 2개가 필요한 기존 방식인 peak current method와 부하 전류 분담을 위한 병렬 운전 성능을 비교하기 위하여 부하 전류와 설계 파라미터를 바꾸어 가면서 실험을 수행하였다.

오실로스코프 파형은 20% 부하에서 100% 부하로 스텝 변화시 과도 상태에서의 부하 전류 분배 성능을 나타낸 것으로, 상단 파형 (Ch2)은 컨버터 A의 전류(I_a), 아래 파형 (Ch3)은 컨버터 B의 전류(I_b), 가운데 파형(Math 3)은 $I_e (= I_a - I_b)$ (전류 오차)를 각각 나타낸다.

5.1 Normal인 경우의 실험 결과

컨버터를 설계 제작한 파라미터 그대로, 즉 임의로 실험 조건을 바꾸지 않은 경우에 대한 실험으로 ZCT 방식에 의한 부하 전류 분배 성능과 peak current method에 의한 정상 상태에서의 부하 전류 분배 성능은 그림 10, 과도 상태에 대한 부하 전류 분배 성능은 그림 11과 같다. 각각의 부하 전류에 대한 실험 결과 CUR은 표 2와 같다.

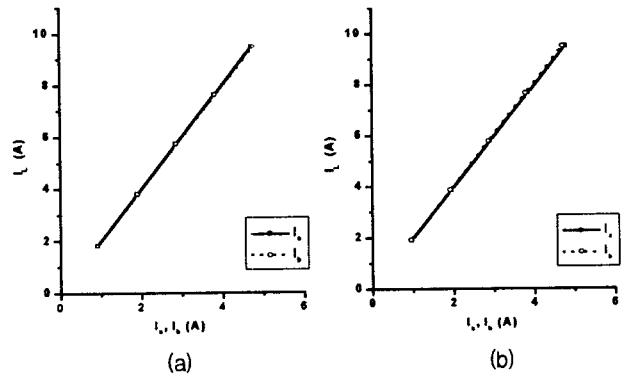


그림 10 Normal의 경우 정상 상태 부하 전류 분배 성능 (a) ZCT 방법 (b) peak current 방법

Fig. 10 Load current sharing performance in case of normal at steady state

(a) ZCT method (b) peak current method

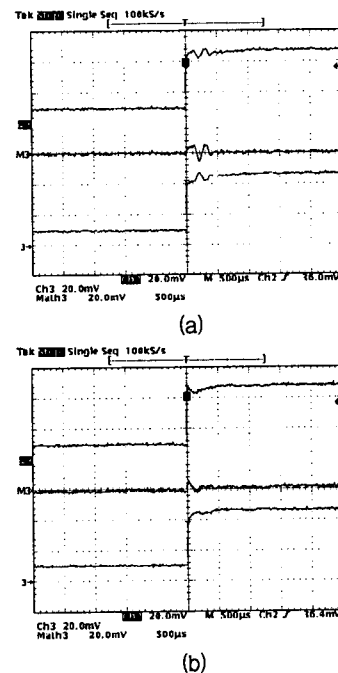


그림 11 Normal의 경우 과도 상태시 부하 전류 분배 성능 (a) ZCT 방법 (b) peak current 방법 X:500 uS/Div Y:2 A/Div Ch2: I_a Ch3: I_b M3: $I_a - I_b$

Fig. 11 Load current sharing performance in case of normal case at transient (a) ZCT method (b) peak current method X:500 uS/Div Y:2 A/Div Ch2: I_a Ch3: I_b M3: $I_a - I_b$

표 2 Normal의 경우 정상 상태에서의 전류 불평형을
Table 2 Current unbalance ratio in case of normal at steady state

ZCT method		peak current method	
$I_L(A)$	CUR(%)	$I_L(A)$	CUR(%)
9.47	0.317	9.49	0.737
7.62	0.262	7.64	0.785
5.71	0.175	5.76	0.694
3.79	0.264	3.86	0.518
1.82	0.001	1.91	0.524

실험 결과 normal의 경우는 ZCT 방법 및 peak current method 모두 전류 분배 성능이 양호함을 알 수 있다.

5.2 상이한 파라미터인 경우 실험 결과

ZCT 방식에 의한 병렬 운전 성능과 peak current 방법에 의한 병렬 운전 성능을 비교하기 위하여 상이한 기준 전압, 상이한 케이블 저항, 상이한 제환 이득의 경우에 대하여 과장되게 조건을 바꾸면서 실험하였다.

5.2.1 상이한 케이블 저항의 경우

컨버터 A에만 컨버터 출력단과 부하 사이에 임의로 정상 케이블 저항값의 2.4배인 47 mΩ의 저항을 추가로 삽입하고 실험하였다. 정상 상태에서의 부하 전류 분배 성능은 그림 12, 과도 상태에 대한 부하 전류 분배 성능은 그림 13과 같다. 각 부하 전류에 대한 실험 결과 CUR을 계산해 보면 표 3과 같다.

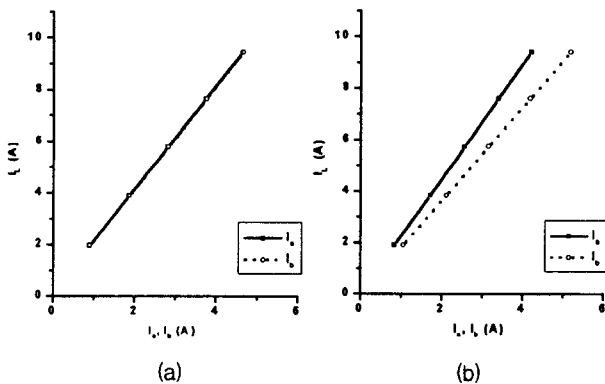
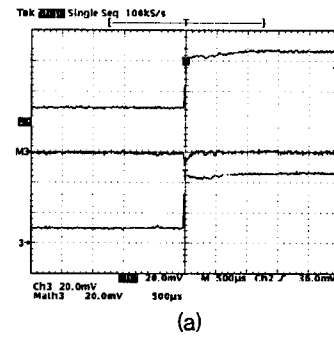
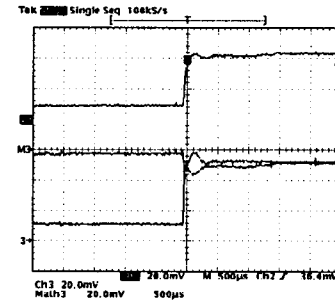


그림 12 케이블 저항이 상이한 경우의 정상 상태 부하 전류 분배 성능 (a) ZCT 방법 (b) peak current 방법

Fig. 12 Load current sharing performance in case of different cable resistance at steady state (a) ZCT method (b) peak current method



(a)



(b)

그림 13 케이블 저항이 상이한 경우의 과도상태 부하 전류 분배 성능 (a)ZCT 방법 (b)peak current 방법 X:500 uS/Div Y:2 A/Div Ch2: I_a Ch3: I_b M3: $I_a - I_b$

Fig. 13 Load current sharing performance in case of different cable resistance at transient (a) ZCT method (b) peak current method X:500 uS/Div Y:2 A/Div Ch2: I_a Ch3: I_b M3: $I_a - I_b$

표 3 상이한 케이블 저항인 경우 정상 상태에서의 전류 불평형을

Table 3 Current unbalance ratio in case of different cable resistance

ZCT method		peak current method	
$I_L(A)$	CUR(%)	$I_L(A)$	CUR(%)
9.31	0.107	9.40	10.425
7.50	0.267	7.59	10.408
5.65	0.177	5.73	10.296
3.75	0.267	3.84	10.416
1.80	0.001	1.90	11.579

상이한 케이블 저항의 경우 ZCT 방법은 CUR이 0.27% 정도, peak current 방법은 CUR이 11.5% 정도로 나타났다.

5.2.2 상이한 기준 전압의 경우

컨버터 A에는 정상값보다 큰 2.6V의 기준 전압을 가하고, 컨버터 B에는 정상값인 2.5V 기준 전압을 가하고 실험하였

다. 정상 상태에서의 부하 전류 분배 성능은 그림 14, 과도 상태에 대한 부하 전류 분배 성능은 그림 15와 같다. 각 부하 전류에 대한 실험 결과 CUR을 계산해 보면 표 4와 같다.

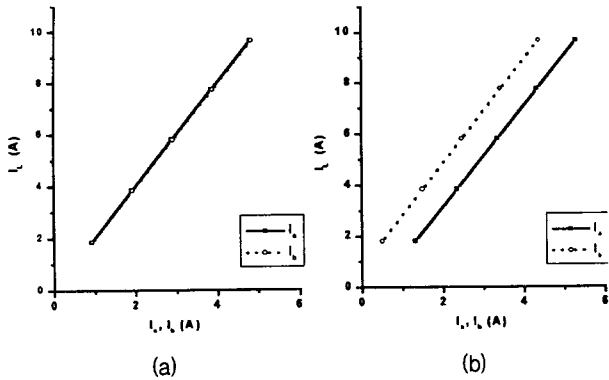


그림 14 기준 전압이 상이한 경우의 정상 상태 부하전류 분배 성능 (a) ZCT 방법 (b) peak current 방법
 Fig. 14 Load current sharing performance in case of different feedback voltage reference at steady state (a) ZCT method (b) peak current method

표 4 기준 전압이 상이한 경우 정상 상태에서의 전류 불평형을

Table 4 Current unbalance ratio in case of different voltage reference

ZCT method		peak current method	
$I_L(A)$	CUR(%)	$I_L(A)$	CUR(%)
9.62	0.416	9.66	9.524
7.73	0.388	7.75	11.742
5.80	0.345	5.80	15.172
3.84	0.521	3.83	22.193
1.85	0.541	1.80	45.555

상이한 기준 전압의 경우 ZCT 방법은 CUR이 0.54% 정도인데 비하여, peak Current 방법은 CUR이 45% 정도 나타났다.

5.2.3 상이한 궤환 이득의 경우

그림 3에서 컨버터 A의 R2 값을 30KΩ에서 15KΩ으로 바꾸고 실험하였다. 정상 상태에서의 부하 전류 분배 성능은 그림 16과 같고, 과도 상태에 대한 부하 전류 분배 성능은 그림 17과 같다. 각 부하 전류에 대한 실험 결과 CUR을 계산해 보면 표 5와 같다.

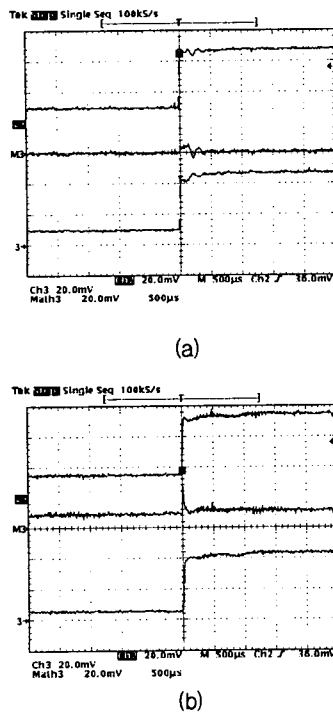


그림 15 기준 전압이 상이한 경우의 과도 상태 부하 전류 분배 성능 (a) ZCT 방법 (b) peak current 방법
 X:500 uS/Div Y:2 A/Div Ch2: I_a Ch3: I_b M3: $I_a - I_b$

Fig. 15 Load current sharing performance in case of different voltage reference at transient (a) ZCT method (b) peak current method X:500 uS/Div Y:2 A/Div Ch2: I_a Ch3: I_b M3: $I_a - I_b$

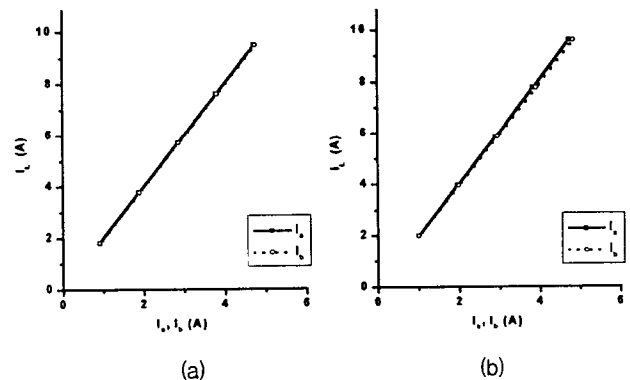


그림 16 궤환 이득이 다른 경우의 정상 상태 부하 전류 분배 성능 (a) ZCT 방법 (b) peak current 방법
 Fig. 16 Load current sharing performance in case of different feedback gain at steady state (a) ZCT method (b) peak current method

6. 결론 및 향후 과제

시스템 특성상 fault tolerant를 위하여 2개의 컨버터로 전원을 공급하는 시스템에서, 병렬 운전을 위해 두 컨버터의 전류차를 구하기 위해서 기존의 방법으로는 2개의 CT가 필요하였으나, 본 논문에서는 1개의 CT를 이용한 ZCT 방식의 병렬 운전 방법을 제안하였다.

제안한 방법의 타당성을 확인하기 위하여 실험용 포워드 컨버터를 설계 제작하였고, peak current method와의 부하 전류 분배 성능을 비교하였다.

실험 결과 normal의 경우는 CUR은 별로 차이가 없었으나, 케이블 저항이 상이한 경우, 기준 전압이 상이한 경우, 레귤 이득이 상이한 경우는 peak current method보다 ZCT 방법이 CUR이 더 적은 것으로 확인되어 전류 분배 성능이 우수한 것을 알 수 있었다.

컨버터 2개를 병렬 운전하는 경우, 기존의 방법으로는 2개의 CT가 필요하였으나 제안한 ZCT 방식을 이용하면 1개의 CT로도 2 컨버터의 부하 전류 분배가 잘 이루어짐을 확인할 수 있었다.

향후 병렬 운전중 1개의 컨버터의 고장 검출, n개의 다수 컨버터까지 병렬 운전하기 위한 study는 좋은 연구 과제이다.

참고 문헌

- [1] Shiguo Luo, Zhihong Ye, Ray-Lee, Fred C. Lee, "A Classification and Evaluation of Paralleling Methods for Power Supply Modules", IEEE Power Electronics Specialists Conference, pp 910-908, 1999
- [2] M. Jordan, "UC3907 Load Share IC Simplifies Parallel Power Supply Design", Unitrode Application Note U-129
- [3] I. Batarseh, K. Siri and H. Lee, "Investigation of the Output Droop Characteristics of Parallel -Connected DC-DC Converters", IEEE Power Electronics Specialists Conference, pp. 1342-1351, 1994
- [4] J. Perkinson, "Current Sharing of Redundant DC-DC Converters in High Availability Systems - A Simple Approach", IEEE Applied Power Electronics Conference, pp. 952-956, 1995
- [5] C. Jamerson, C. Mullett, "Paralleling Supplies via Various Droop Methods", HFPC, pp. 68-76, 1994
- [6] J. Rajagopalan, K. Xing, Y. Guo and F. C. Lee, B. Manners, "Modeling and Dynamic Analysis of Paralleled dc/dc Converters with Master-Slave Current Sharing Control", IEEE Applied Power Electronics Conference, pp. 678-684, 1996
- [7] R.H. Wu, T. Kohama, Y. Koderu, T. Ninomiya, F. Ihara, "Load-Current Sharing Control for Parallel Operation of DC-to-DC Converters", IEEE Power Electronics Specialists Conference, pp. 101-107, 1993
- [8] V. J. Thottuvelil, George C. Verghese, "Stability Analysis of Paralleled DC/DC Converters with

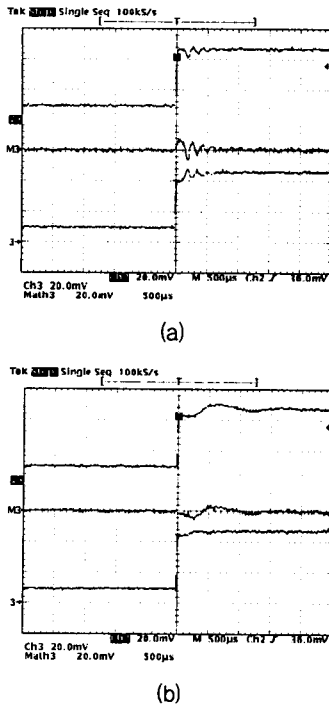


그림 17 레귤 이득이 상이한 경우의 과도 상태 부하 전류 분배 성능 (a) ZCT 방법 (b) peak current 방법
X:500 uS/Div Y:2 A/Div Ch2: I_a Ch3: I_b M3: $I_a - I_b$

Fig. 17 Load current sharing performance in case of different feedback gain at transient (a) ZCT method (b) peak current method X:500 uS/Div Y:2 A/Div Ch2: I_a Ch3: I_b M3: $I_a - I_b$

표 5 상이한 레귤 이득의 경우 정상 상태에서의 전류 불평형을

Table 5 Current unbalance ratio in case of different feedback gain

ZCT method		peak current method	
$I_L(A)$	CUR(%)	$I_L(A)$	CUR(%)
9.47	0.316	9.59	1.147
7.60	0.263	7.75	1.161
5.70	0.350	5.87	0.851
3.77	0.265	3.95	1.161
1.81	0.552	2.00	1.147

상이한 레귤 이득의 경우 ZCT 방법은 CUR이 0.55% 정도인데 비하여, peak current 방법은 CUR이 1.1% 정도로 나타났다.

Active Current Sharing", IEEE Power Electronics Specialist Conference, pp. 1080-1086, 1996

[9] T. Ninomiya, R.H. Wu, Y. Koderu, T. Kohama, F. Ihara, "Novel Control Strategy for Parallel Operation of Power Supply Model", IEEE Power Conversion Conference pp. 159-164, 1993

[10] Z. Moussaoui, I. Batarseh, H. Lee, C. Kennedy, "An overview of the control scheme for distributed power systems", Southcon 96 Conference Record, pp. 584-591, 1996

[11] K. Siri, J. Banda, "Analysis and Evaluation of Current-Sharing Control for Parallel-Connected Dc-Dc Converters Taking into Account Cable Resistance", IEEE Aerospace Applications Conference, pp. 29-48, 1995

[12] 박상은, 손승찬, 성세진 외, "ZCT 방식의 master-slave형 DC-DC 컨버터 병렬 운전", 전력전자 학술대회, pp 655-658, 1999. 7

[13] M. Brown, Power Supply Cookbook, Butterworth-Heinemann, 1994

[14] 김희준, 스위치모드파워서플라이, 성안당, 1994

[15] A. I. Pressman, Switching Power Supply Design, McGraw-Hill Inc., pp 427- 458, 1992

[16] RON LENK, PRACTICAL DESIGN OF POWER SUPPLIES, McGraw-HILL, pp. 128-135, 1998

[17] Ralph E. Tarter, Solid State Power Conversion Handbook, John Wiley & Sons, Inc. 1993

[18] 백수현, 김희준, 김영석, 홍순찬 역, 전력전자공학, 교보문고, 1996

[19] T. F. Wu, K. Siri, J. Banda, "The Central-Limit Control and Impact of Cable Resistance on Current Distribution for Parallel-Connected DC-DC Converters", IEEE Power Electronics Specialists Conference, pp. 694-702, 1994

[20] K. J. Aström, T. Häggglund, Automatic Tuning of PID Controllers, Instruments Society of America, pp.52-54, 1988

[21] Chee-Mun Ong, Dynamic of Electric Machinery using MATLAB/SIMULINK, Prentice Hall PTR, 1998

저 자 소 개



손 승 찬 (孫 承 燦)

1955년 5월 5일생. 1978년 충남대 공업 교육과(전기전공) 졸업. 1987년 연세대 산업대학원 졸업(석사). 1997년 충남대 대학원 전기공학과 박사과정(수료). 1983~1990 LG 산전 연구소 선임연구원
Tel : 042-821-7603, Fax : 042-823-3178
E-mail:scsohn@smps.ee.chungnam.ac.kr



성 세 진 (成 世 鎭)

1948년 7월 15일생. 1973년 서울대 공대 공업교육과 졸업(학사). 1975년 동 대학원 졸업(석사). 1988년 일본 동경공업대 대학원 졸업(공박). 현재 충남대 공대 전기공학과 교수
Tel : 042-821-5654, Fax : 042-823-3178
E-mail:seong@smps.ee.chungnam.ac.kr