

## 영상변류기 동작 방식을 이용한 2개의 컨버터 병렬 운전시 고장 탐지 및 분리

孫承燦, 成世鎭

### Fault Detection and Isolation of Parallel Operation of Two Converters Using Zero Current Transformer Method

Seung-Chan SOHN, Se-Jin SEONG

#### 요 약

시스템 특성상 fault tolerant system을 위해 두개의 컨버터를 1개의 전류센서를 사용하여 영상변류기 동작 방식으로 병렬 운전하는 경우 컨버터에 고장이 발생하면 영상변류기 출력은 두 컨버터의 공급 전류 차이이므로, 어떤 컨버터에서 고장이 발생하였는지 고장 탐지 및 분리가 곤란하였다. 본 논문에서는 fault tolerant system을 위해 2개의 컨버터를 병렬 운전하는 경우 컨버터의 고장 탐지 및 분리를 위한 방안을 제시하고 실험을 통하여 제안한 방법의 타당성을 확인하였다.

#### ABSTRACT

In case of operating two converters in parallel with ZCT operation method using one current sensor for fault tolerance by system characteristics, identifying fault detection and isolation is difficult of which converter is fault since the ZCT output is a difference of two converters' supply current when a converter has fault. This thesis suggest a fault detection and isolation method of converter in case of operating two converters in parallel for fault tolerant system and verified this suggested method through an experiment.

**Key Words** : converter, CT, fault detection, isolation, parallel operation, ZCT

#### 1. 서 론

반도체 산업의 발전에 따라 컴퓨터 성능이 향상되고, 이에 따라 군사, 금융, 통신, 프로세스 산업 분야 등에 컴퓨터 시스템 적용이 늘어나고 있다. 이런 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 공급할 수 있는 전원 용량의 한계가 있다. 따라서 전원 용량을 키우기 위해서는 1개의 power source보다는 다수의 모듈화된 전원 source를 병렬 운전하는 것이 더 효율적이다.

병렬 운전으로 전체 시스템의 동작 신뢰성이 향상될 수 있다. 특히 군용 장비의 경우는 장비의 동작 신뢰

성이 매우 중요한 파라미터이다. 두 개의 컨버터를 병렬 운전 할 때 만약 1개의 컨버터에서 fault가 발생해도 다른 컨버터로 fault tolerant system 기능을 할 수 있어 전체적으로 장비 동작 신뢰성을 높일 수 있게 된다.

지금까지 제안된 능동 부하 전류 분배 제어 방법들은 두 개의 컨버터를 병렬 운전할 경우 2개의 CT (current transformer)가 필요한 방법<sup>[1, 12]</sup>와 1개의 CT만으로 운전하는 방법<sup>[13-16]</sup>이 제안되어 있다.

2개의 CT를 사용하는 병렬 운전은 컨버터 고장시 고장을 쉽게 탐지 가능하나, 1개의 CT를 사용하는 경우는 컨버터의 고장 탐지 방안이 연구되어 있지 않았다.

본 논문에서는 그림 1과 같이 fault tolerant system을 위해 2개의 컨버터를 1개의 CT를 사용하여 ZCT

방식으로 병렬 운전하는 시스템에서 컨버터 고장 탐지 및 분리(fault detection and isolation) 방안에 대하여 제안하고 실험을 통하여 제안한 방법의 타당성을 확인하였다.

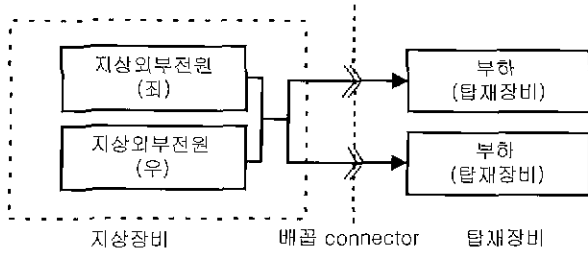


그림 1 fault tolerant를 위한 병렬 운전 시스템 구성  
Fig. 1 System configuration of parallel operation for fault tolerant

### 2. 전류차 검출 회로

2개의 컨버터를 병렬 운전하기 위한 구성은 그림 2(a)와 같이 두 컨버터가 공급하는 전류차를 구하기 위해서 2개의 CT를 컨버터에 각각 사용하여 컨버터의 전류  $I_a$ ,  $I_b$ 를 측정한 다음 평균치를 구하고 이로부터 전류 오차를 구한다.

1개의 CT만으로 두 개의 컨버터를 병렬 운전하는 방안은 그림 2(b)와 같이 두 컨버터가 공급하는 전류차를 측정하기 위하여 각각의 컨버터 plus(+) 쪽 공급 라인을 1개의 CT에 반대 방향으로 통과(관통)시켜 hall CT를 ZCT처럼 동작시킨다. 즉 ZCT 출력은 두 컨버터가 부하로 공급하는 전류차에 비례하는 전압을 얻을 수 있다. 이렇게 구성하면 CT가 ZCT처럼 동작하기 때문에, 두 컨버터가 부하로 공급하는 전류차  $i_c (= I_a - I_b)$ 를 그림 2(b)와 같이 1개의 CT만으로 간단하게 얻을 수 있게 된다.

그러나 그림 2(b)와 같이 1개의 CT만으로 2개의 컨버터를 병렬 운전할 때 컨버터에 고장이 발생하면 ZCT 출력은 두 컨버터의 전류차이므로 어느 컨버터에서 고장이 발생했는지 고장 탐지 및 분리가 어렵다.

즉 ZCT에서 얻을 수 있는 정보는 두 컨버터의 공급 전류 오차인  $i_c(v_c)$  뿐이므로 이 값을 이용하여 컨버터가 정상인지 고장인지 판단하여야 하며, 고장시 어느 컨버터가 고장인지 판단하고 고장난 컨버터를 회로에서 자동으로 분리해야 한다. 이렇게 해야 fault

tolerant system을 이룰 수 있게 된다.

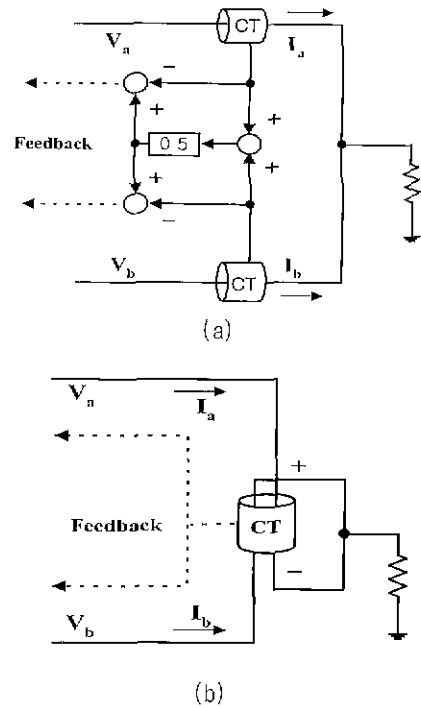


그림 2 전류차 검출 회로 방식비교 (a)2개의 CT를 사용하는 방법 (b)1개의 CT를 사용하는 방법

Fig. 2 Comparison of the current difference sensing methods (a) using 2 CTs method (b) using 1 CT method

### 3. 컨버터 설계

시스템 특성상 fault tolerant system을 위하여 1개의 CT로 2개의 컨버터를 병렬 운전시 고장 탐지 및 분리 실험을 위하여 실험용 파워드 컨버터를 설계, 제작하였다. 설계된 컨버터의 주요 파라미터는 표1과 같고, 블록도는 그림 3과 같다. 설계된 파워드 컨버터의 제어증폭기  $A(s)$ 는 과도응답 향상과 부하 레귤레이션 (Regulation)을 위하여 원점에 극점이 있고, 2중 극점과, 2중 영점을 갖도록 제어기를 설계하였다.<sup>[17-22]</sup> 그림 4에서 병렬 운전을 위한 전류 분배 제어기  $K_1(s)$ 는 Ziegler-Nichols 방법으로 설계하였다.<sup>[23]</sup>

병렬 운전시 두 컨버터의 전류 오차 제환을 갖는 컨버터 블록도는 그림 4와 같다. 단위 컨버터와 관련되는 파라미터는 아래 첨자 a, b로 표시하였고, 2 개의 컨버터 병렬 운전시와 관련되는 파라미터는 아래 첨자 1, 2로 표시하였다.

표 1 포워드 컨버터 설계 파라미터  
Table 1 Design parameters of forward converter

항목	기호	값
컨버터 입력 전압	$V_i$	28 [V]
컨버터 출력 전압	$V_o$	5 [V]
컨버터 출력 전류	$I_o$	5 [A]
필터 인덕턴스	$L$	75 [ $\mu$ H]
필터 캐패시턴스	$C$	2200 [ $\mu$ F]
스위칭 주파수	$f_{sw}$	40 [Khz]
기준전압	$V_r$	2.5 [V]
변압기 권선비	$n$	0.7

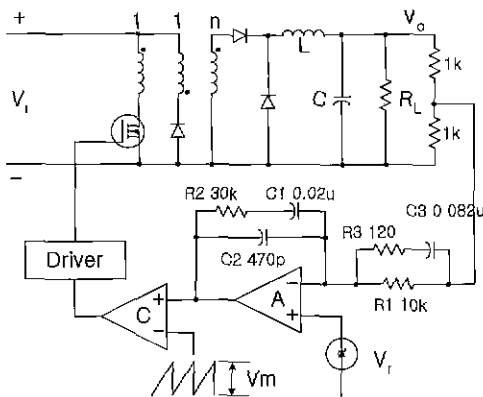


그림 3 병렬 운전을 위해 설계 제작한 포워드 컨버터 블록도  
Fig. 3 Designed and implemented forward converter block diagram for parallel operation

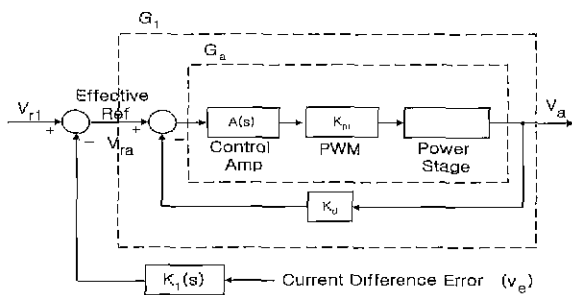


그림 4 전류 오차 궤환을 갖는 A 컨버터 블록도  
Fig. 4 A converter block diagram with current error feedback

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

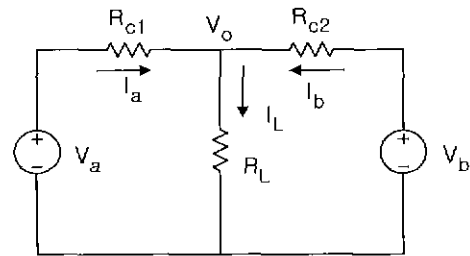


그림 5 병렬 운전시의 간략화한 등가 회로  
Fig. 5 Simplified equivalent circuit of converters parallel operation.

$$I_a = \frac{(V_a - V_b)R_L + V_a R_{c2}}{R_x} \quad (1)$$

$$I_b = \frac{(V_b - V_a)R_L + V_b R_{c1}}{R_x} \quad (2)$$

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 (1), (2)로부터 식(3)을 구할 수 있다.

$$2R_L(V_a - V_b) = V_b R_{c1} - V_a R_{c2} \quad (3)$$

식(3)에서 두 컨버터의 전압이 이론적으로 같다면  $R_{c1} = R_{c2}$ 가 되어야 한다는 결론에 도달한다. 그러나  $R_{c1}$ ,  $R_{c2}$ 는 컨버터에서 부하까지의 케이블 저항으로  $R_{c1}$ ,  $R_{c2}$ 가 물리적으로 항상 같기는 사실상 불가능하다. 그러므로  $I_a = I_b$ 를 이루기 위해서는 각 컨버터의 부하 전류값에 따라 식(3)이 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 제어

기 회로를 통한후 각 컨버터 기준 전압과 합성하여 얻어진 유효한(effective) 기준 전압을 각각의 컨버터에 병렬 운전 제어를 위한 기준 전압으로 사용하게 된다.

### 4. 전류분배 제어기 설계 및 시뮬레이션

그림 6(b)에서 전류 분배 제어기를  $K_1(s)$ ,  $K_2(s)$  라고 할 때, 컨버터 출력 전압  $V_a$ ,  $V_b$ 는 다음 식과 같이 표현 할 수 있다.

$$V_a = G_1(s)(V_{r1} - K_{ct}K_1(s) i_e) \quad (4)$$

$$V_b = G_2(s)(V_{r2} + K_{ct}K_2(s) i_e) \quad (5)$$

- 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 전류 분배 제어기
- $K_2(s)$  = 컨버터 B 전류 분배 제어기
- $K_{ct}$  = CT gain 0.1

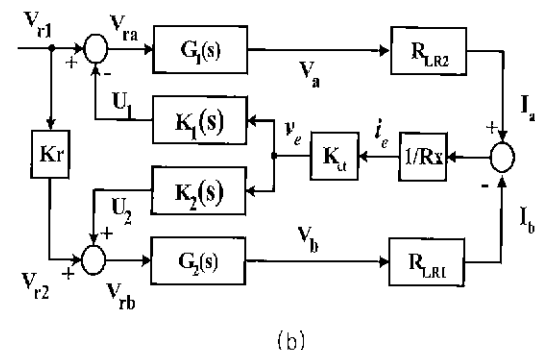
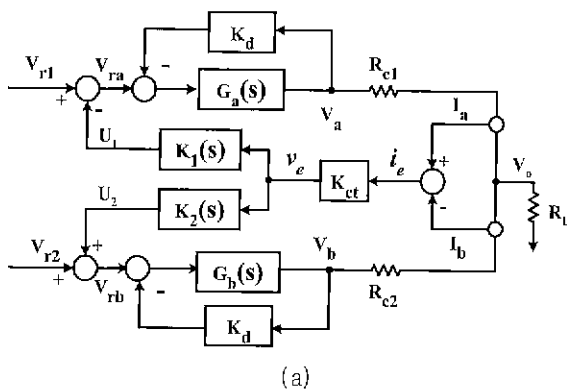


그림 6 병렬 운전시의 블록도 (a)기능 블록도 (b)간략화된 블록도

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

그림 6(b)에서 입력을  $U_1$ ,  $U_2$ 로 하고 출력을  $v_e$ 로 하면,  $K_1(s)$ ,  $K_2(s)$ 가 포함되지 않은 개루프 전달 함수  $T_{ol}$ 은 중첩의 원리를 적용하면 다음과 같다.

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

$$v_e = \frac{-K_{ct}U_1G_1(s)R_{LR2}}{R_x} \quad (6)$$

여기서  $R_{LR2} = 2R_L + R_{c2}$

개루프 전달 함수는 정의( $-\frac{y}{u}$ )에 의하여

$$\frac{v_e}{U_1} = \frac{K_{ct}G_1(s)R_{LR2}}{R_x} \quad (7)$$

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

$$\frac{v_e}{U_2} = \frac{K_{ct}G_2(s)R_{LR1}}{R_x} \quad (8)$$

여기서  $R_{LR1} = 2R_L + R_{c1}$

중첩의 원리를 적용한 개루프 전달 함수  $T_{ol}$ 은 다음 식과 같다.

$$T_{ol} = \frac{K_{ct}(G_1(s)R_{LR2} + G_2(s)R_{LR1})}{R_x} \quad (9)$$

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

$$T_{olk} = \frac{K_{ct}[G_1(s)K_1(s)R_{LR2} + G_2(s)K_2(s)R_{LR1}]}{R_x} \quad (10)$$

식(1), (2)와 그림 6 (b)에서  $i_e$ 를 구하면

$$i_e = i_a - i_b = \frac{V_a R_{LR2} - V_b R_{LR1}}{R_x} \quad (11)$$

로 주어진다.

식(11)에 식(4), (5)를 대입하고 정리하면

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

$$\frac{G_2(s) [V_{r2} + K_{cl}K_2(s)i_e]R_{LR1}}{R_s} \quad (12)$$

로 된다.

식(12)를  $i_e$ 에 대하여 정리하고, 간략화(1 input, 1 output)를 위하여 그림 6(b)에서  $K_r = 1$ 로 놓으면  $i_e$ 에 대한 병렬 연결 컨버터의 폐루프 전달 함수  $T_{cl}$ 은

$$T_{cl} = \frac{G_1(s)R_{LR2} - G_2(s)R_{LR1}}{R_s + K_{cl}[G_1(s)K_1(s)R_{LR2} + G_2(s)K_2(s)R_{LR1}]} \quad (13)$$

이 된다.

식 (13)에서 만약  $R_{cl} = R_{c2}$ ,  $G_1(s) = G_2(s)$ 라면 분자항이 0이 되고 따라서  $i_e = 0$ 이 되어 이론적으로는 완전한 부하 전류 분배가 이루어질 수 있다.

그러나 일반적으로 같은 컨버터인 경우에도  $R_{cl} \neq R_{c2}$ ,  $G_1(s) \neq G_2(s)$ ,  $V_{r1} \neq V_{r2}$ 이기 때문에 완전한 전류 분배가 이루어질 수 없어 전류차가 존재한다.

전류분배 제어기를 설계하기 위하여 식(9)의 개루프 전달 함수로부터 스텝(step) 응답을 구한다. 이 스텝 응답 그래프로부터 기울기가 최대인 점을 찾는다. 이 점에서 최대의 기울기를 갖는 선을 그리고 x축, y축과 교차하는 점을 각각 구한다. 이점들로부터 Ziegler-Nichols 방법에 의하여 PI 제어기 파라미터를 설계한다.

설계된 제어기를 기본으로 하여 시행 착오법(trial and error method)을 통하여 식(14)과 같이 원점에 극점이 있고, 1개의 극점과 1개의 영점을 갖는 전류 분배 제어기를 설계하였다.

$$K_1(s) = \frac{1 + K_{cl}s}{G_s(1 + K_{cl}s)} \quad (14)$$

실제 소자값을 대입하고 MATLAB을 이용하여 병렬 연결된 컨버터의 안정도를 시뮬레이션한 결과는 그림 7과 같다. [21] 시뮬레이션 결과 이득 여유는 128 dB, 위상 여유는 54.0°로 설계 목표치 이득 여유 10 dB 이상, 위상 여유 45° ~ 60°를 만족시켰다.

### 5. 컨버터 병렬 운전중 고장 탐지 및 분리

Fault tolerant system을 위해 2개의 컨버터를 병렬 운전하는 경우, 정상 상태에서 각각의 컨버터는 부하 전류의 50%씩 부담한다. 만약 하나의 컨버터에서 고장이 발생하면 고장을 탐지하여 고장난 컨버터를 시스템(회로)에서 분리시키고(부하 부담 0%), 나머지 정상적인 컨버터가 부하 전류를 100% 부담하도록 하여 시스템을 fault tolerant system이 이루어지도록 한다.

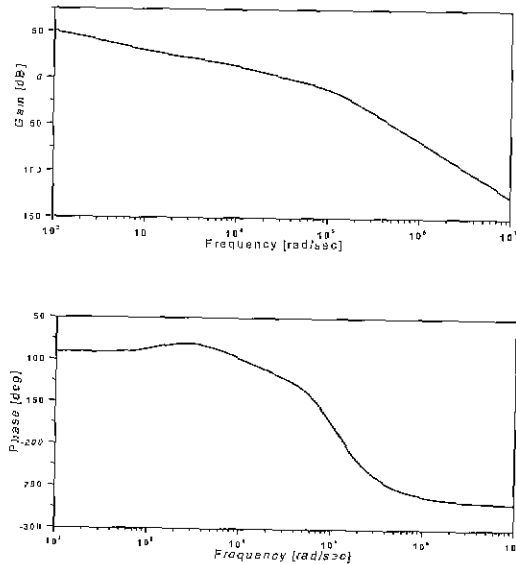


그림 7 컨버터 병렬 운전시의 안정도(이득여유, 위상여유)  
Fig 7 Stability of parallel connected converter (gain margin, phase margin)

1개의 CT만으로 ZCT로 동작시키기 때문에 두 컨버터간의 전류 오차 ( $i_e$ )를 알 수 있지만, 고장 발생시  $i_e$  그 자체만으로는 어느 컨버터에 이상이 발생하였는지는 알 수 없게 된다.

2개의 컨버터가 정상적으로 병렬 운전하는 중에는 컨버터간 부하 전류 분담이 잘 이루어지기 때문에 전류 오차값인  $i_e$ 가 작다. 그러나 2개의 컨버터중 1개의 컨버터에 고장이 발생하면 부하전류를 공급하지 못하므로 그 결과는 최종적으로  $i_e$ 의 크기가 크게 나타나게 된다.

컨버터의 병렬 운전시 고장 탐지를 위한 기준 조건으로  $i_e$ 는 컨버터의 분담전류 오차를 고려하여 2A ( $v_e = 0.2$ )로 설정하였다. (ZCT 방법으로 병렬 운전시 두 컨버터간 최대 전류차를 고려)

$$\begin{aligned} |v_e| > \alpha &: \text{컨버터 병렬 운전중 고장} \\ |v_e| \leq \alpha &: \text{컨버터 정상 병렬 운전} \end{aligned} \quad (15)$$

여기서,  $\alpha=0.2$

A, B 컨버터중 어느 컨버터에 고장이 발생했는지 알기 위하여  $v_e$ 의 극성을 판정하였다. 만약 A 컨버터가 정상이고 B 컨버터가 고장이면 B 컨버터는 부하에 전류를 공급하지 못하므로  $v_e \geq 0$ 이 된다. A 컨버터가 고장이고 B 컨버터가 정상이면 A 컨버터는 부하에 전류를 공급하지 못하므로  $v_e < 0$ 이 된다.

$$\begin{aligned} v_e \geq 0 &: A \text{ 컨버터 정상, } B \text{ 컨버터 고장} \\ v_e < 0 &: A \text{ 컨버터 고장, } B \text{ 컨버터 정상} \end{aligned} \quad (16)$$

컨버터의 고장 발생 여부 및 어느 컨버터에 고장이 발생했는지는 이들 조건의 조합으로 정리하면 표 2와 같고, 고장 탐지 및 분리를 위한 블록도는 그림 8과 같다.

표 2 컨버터의 고장 탐지 진리표  
Table 2 Truth table for fault detection

항목	$ v_e  > \alpha$	$ v_e  \leq \alpha$
$v_e \geq 0$	A 컨버터 정상, B 컨버터 고장	정상 운전
$v_e < 0$	B 컨버터 정상, A 컨버터 고장	정상 운전

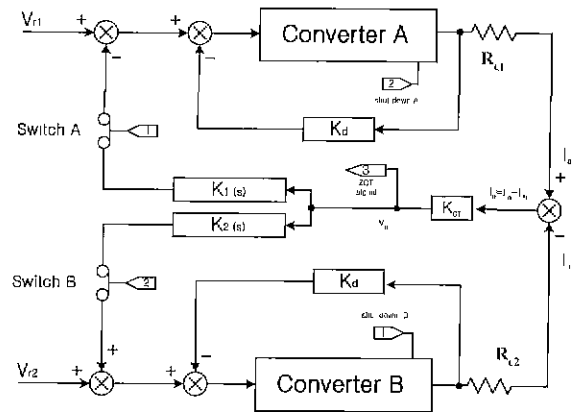
그림 6(a)에 고장 탐지 및 분리 회로를 추가하면 그림 8(a)와 같고, 고장 탐지 로직은 그림 8(b)와 같다.

고장난 컨버터를 병렬 운전중인 회로에서 분리하기 위하여 전류차 궤환 루프 차단에 아날로그 스위치 A, B (Siliconix사의 DG182, normal close type)를 사용하였고, 고장난 컨버터의 power 단에는 MOSFET의 gate drive용으로 gate drive IC(International Rectifier사의 IR 2110)의 shut down pin을 사용하여 컨버터 동작을 정지시켰다.

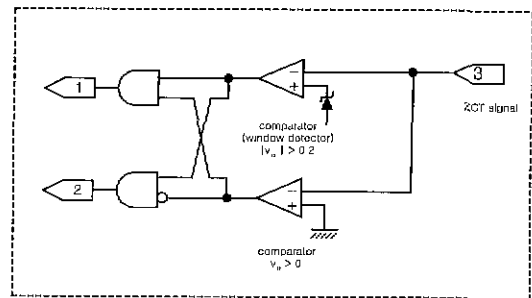
### 6. 실험 결과

제한한 방안의 성능 확인을 위하여 실험용 포워드 컨버터를 설계 제작하고 최대 부하에서 병렬 운전하도

록 회로를 구성했다. 컨버터를 외부에서 임의로 고장(컨버터 동작 중지)을 발생시켜 정상적인 컨버터가 고장난 컨버터의 전류까지 부하로 공급하는지 실험을 통하여 확인하였다.



(a)



(b)

그림 8 고장 탐지 및 분리 블록도 (a) 전체 블록도 (b) 고장 탐지 logic

Fig 8 Block diagram of fault detection and isolation (a) total block diagram (b) fault detection logic

고장 탐지 회로의 신호에 따라 그림 9와 같이 약 500 us 정도에 부하 전류가 큰 지연 없이 고장난 컨버터에서 정상적인 컨버터로 부하 분담이 바뀌어 고장난 컨버터가 회로에서 분리되는 것을 알 수 있다.

고장 탐지와 동시에 정상적인 컨버터로 부하 분담이 즉시 옮겨가지 않는 이유는 고장 컨버터의 내부 회로에 있는 gate drive 회로를 차단(shut down)하였기 때문으로, 고장 탐지 회로 동작에 따라 MOSFET gate drive 회로가 shut down되어도 고장난 컨버터의 출력

단 LC 필터에 남아있던 에너지가 완전히 방출되는 데까지는 시간이 필요하며 점차 정상적인 컨버터로 부하 분담이 옮겨가기 때문이다.

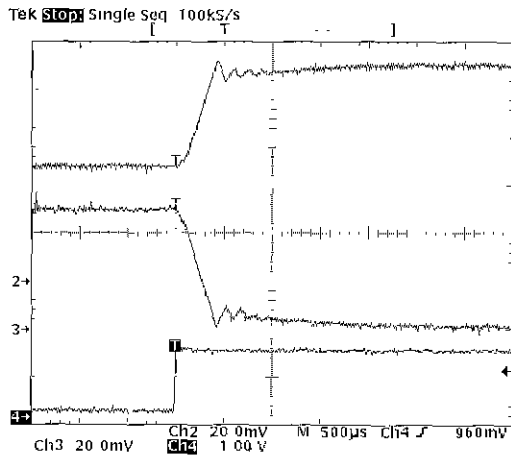


그림 9 최대 부하에서의 컨버터 고장시 과도 응답  
 ch 2 : A 컨버터 전류 (X : 500us/div, Y: 2A/div)  
 ch 3 : B 컨버터 전류 (X : 500us/div, Y: 2A/div)  
 ch 4 : 고장 탐지 로직 신호 (X : 500us/div, Y: 10V/div)

Fig 9 Transient response of converter fault at maximum load  
 ch 2 : converter A current (X : 500us/div, Y: 2A/div)  
 ch 3 : converter B current (X : 500us/div, Y: 2A/div)  
 ch 4 : fault detection logic signal (X : 500us/div, Y: 10V/div)

### 7. 결 론

장비 동작 신뢰성 제고를 목적으로 하는 시스템 특성상 fault tolerant system 구성을 위하여 2개의 컨버터로 전원을 공급하는 시스템에서, 병렬 운전시 두 컨버터의 전류차를 구하기 위해서 1개의 CT를 ZCT 방식으로 병렬 운전할 경우 ZCT 출력은 두 컨버터가 부하로 공급하는 공급 전류의 차이만 알 수 있다. ZCT 출력인 이 전류차만으로는 컨버터에 고장 발생시 어느 컨버터에 고장이 발생하였는지 고장 탐지 및 분리가 곤란하였다.

1개의 CT를 ZCT 방식으로 2개의 컨버터를 병렬 운전하는 경우 컨버터 고장 탐지 및 분리를 위한 방안을 제안하였고 제안한 방법의 타당성을 확인하기 위하여 실험용 파워드 컨버터를 설계 제작하였다. 제작한 파워드 컨버터를 이용한 고장 탐지 및 분리 실험을 통하여

컨버터 고장 발생후 500 us 이내에 고장난 컨버터가 회로에서 분리됨(부하 부담이 옮겨감)을 확인하였다.

1개의 CT 만으로 ZCT 방식으로 병렬 운전하는 경우 2개의 CT로 병렬 운전하는 경우와 같이 컨버터의 병렬 운전 뿐 아니라 컨버터 고장 탐지 및 분리가 가능한 것을 확인하여 제안한 방법 의 타당성을 입증하였다.

### 참 고 문 헌

- [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. Kodera, 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 Active Current Sharing", *IEEE Power Electronics Specialist Conference*, pp. 1080-1086, 1996.
- [9] T. Ninomiya, R.H. Wu, Y. Kodera, 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] 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

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

[14] 손승찬, 성세진, "영상변류기 동작 방식을 이용한 2개의 컨버터 병렬 운전", 전기학회 논문지, pp. 256-264, 2000. 4.

[15] 손승찬, 박상은, 정민재, 성세진, "단일 전류 센서를 이용한 마스터-슬레이브 전류 분배형 2개의 DC-DC 컨버터 병렬 운전", 전력전자학회 논문지, pp. 184-191, 2000. 4.

[16] S. C. SOHN, S. E. Park, S. J. SEONG, "Zero Current Transformer Method for Master-Slave Type Two DC-DC Converters Parallel Operation", International Power Electronics Conference- Tokyo, pp 879-884, 2000. 4

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

[18] 김희준, 스위치모드파워서플라이, 성안당, 1994.

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

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

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

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

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

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

## 저 자 소 개



### 손승찬(孫承燦)

1955년 5월 5일생. 1978년 충남대학교 공과대학 공업교육과(전기전공) 졸업(학사), 1987년 연세대학교 산업대학원 졸업(석사). 1997년 충남대학교 공대 전기공학과 박사과정 수료. 1983-1990 LG 산전 연구소 선임연구원.



### 성세진(成世鎭)

1948년 7월 15일생 1973년 서울대 공대 공업교육과 졸업(학사) 1975년 동 대학원 졸업(석사). 1988년 일본 동경 공업대학원 졸업(박사). 현재 충남대 공대 전기공학과 교수. 당 학회 부회장.