

ZCT 방식을 이용한 두 개의 컨버터 병렬 운전 시 고장 검출 및 분리

정민재*, 박상은*, 손승찬*, 이진**, 성세진*
충남대학교*, LG산전**

Fault Detection And Isolation Of Two DC-DC Converters Parallel Operation By ZCT Method

Min-Jae Jung*, Sang-Eun Park*, Seung-Chan Sohn*, Jin Lee**, Se-Jin Seong*
Chungnam National University*, LG Industrial Systems**

ABSTRACT

The paper presents the fault detection and isolation of two DC-DC converters parallel operation by ZCT method. Two experimental prototype converters were designed and implemented for evaluation of fault tolerant system. The experimental results show that fault detection and isolation circuit works very well.

1. 서론

컨버터 병렬운전의 주된 목적은 대용량의 전원 공급 및 fault tolerant system을 위한 것이다. 병렬 운전하는 데 있어서 기본적으로 요구되는 것은 완전히 자동화된 부하 전류 분배(균형), 피드백 컨트롤러들의 간단한 구성, 높은 신뢰성, 쉬운 유지와 보수라 할 수 있다.

하나의 CT를 ZCT방식으로 동작시켜 부하 전류를 균등하게 분배하기 위해서 두 컨버터간 공급 전류 오차(current error)를 얻어 각 컨버터에 feedback 시킨다.

본 논문에서는 단일 CT를 ZCT방식을 이용한 두 개의 컨버터 병렬운전 시 두 컨버터 중 하나가 고장을 일으킨 경우에 대한 연구하였다. 컨버터의 고장을 검출하고 고장난 컨버터를 회로에서 분리시킴으로써 컨버터가 전원 공급이 중단됨 없이 부하에 전원을 공급하게 하는 방안 에 대해 제안하고, 실제의 실험을 통하여 확인한다.

즉 부하로 전류를 공급하는 두 컨버터의 전류 공급 오차를 ZCT방식으로 측정하여 오차가 기준이상의 값이 되면 (두 컨버터의 전류 공급 오차가 기준 값 이상이면) 컨버터의 이상작동을 검출하고, 고장난 컨버터를 회로로부터 차단하여 남은 한 대의 컨버터만으로 부하에 전원을 공급하여 fault tolerant system을 이루도록 하고자 한다. 즉 하나의 ZCT로 컨버터 두 개의 병렬 운전뿐 아니라 고장 검출까지 가능하도록 회로를 구성하였다.

2. 시스템 구성

병렬 운전으로 전체 시스템의 신뢰성이 향상될 수 있다. 특히 군용 장비의 경우는 신뢰성이 매우 중요한 파라미터의 하나이다. 만약 1개의 컨버터에서 fault가 발생해도 다른 컨버터로 fault tolerant 기능을 할 수 있어 전체적으로 장비 동작 신뢰성을 높일 수 있게 된다.

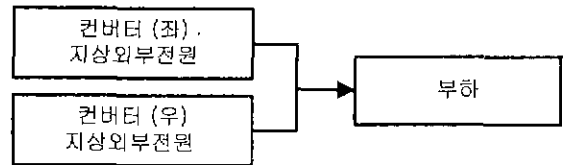
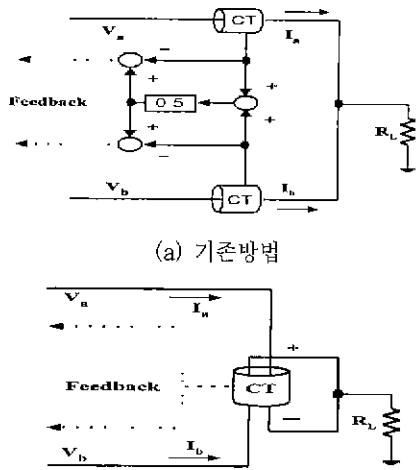


그림 1 컨버터 병렬운전 개념도

본 논문에서는 그림 1과 같이 시스템 특성상 장비 동작 신뢰성 증대를 위하여 2개의 컨버터로 시스템(부하)에 전원을 공급하는 경우 기존 방식으로는 2개의 CT가 필요하던 것을, 1개의 CT만으로 ZCT(zero current transformer)방식으로 동작시켜 병렬 운전는 방법이다.

기존에는 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 I_a , I_b 전류로부터 평균 전류(I_{avg}) $I_{avg} = 0.5 \times (I_a + I_b)$ 를 구한다. 각 컨버터가 부하로 공급하고 있는 전류 I_a , I_b 와 평균 전류와의 차이(error)를 구하여 이를 각 컨버터에 제환시켜 부하 전류 분배를 제어하는 방법을 사용하여 왔었다.



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

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 자속이 서로 상쇄되어 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(b)와 같이 1개의 CT만으로 간단하게 얻을 수 있게 된다.

ZCT 출력은 단지 두 컨버터의 전류 차이므로 컨버터에 고장이 발생하여도 어느 쪽 컨버터인지 알 수 없다. ZCT 출력의 크기와 부호를 가지고 고장 탐지 및 분리 방안을 제안 하였다.

3. 컨버터 설계

실험용 포워드 컨버터를 설계, 제작하였다. 설계된 컨버터의 주요 파라미터는 다음과 같다.

표 1 설계된 컨버터의 주요 파라미터

V_i	28[V]	컨버터 직류 입력전압
V_o	5[V]	컨버터 직류 출력전압
I_o	5[A]	컨버터 최대 출력전류
L	75[uH]	필터 인덕턴스
C	2200[uF]	필터 캐패시턴스
f_{sw}	40[KHz]	스위칭주파수
V_r	2.5[V]	기준전압
I_L	10[A]	최대부하전류

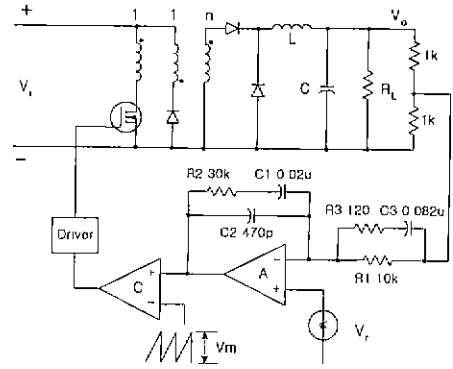


그림 3 병렬 운전을 위해 제작한 포워드 컨버터 블록도

컨버터 A, B의 출력전압을 V_a, V_b , 각 컨버터에서 부하로 공급하는 전류를 각각 I_a, I_b , 라고 하면 그림 4로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

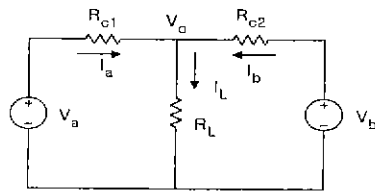


그림 4 병렬 운전시의 간략한 등가 회로

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

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

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

병렬 운전 시의 블록도는 그림 5와 같다.

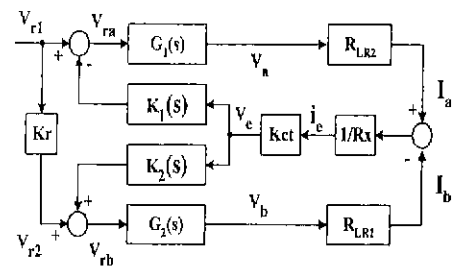


그림 5 병렬 운전 시의 블록도

여기서, $R_{LR2} = 2R_L + R_{c2}$, $R_{LR1} = 2R_L + R_{c1}$

그림 4와 그림 5에서 V_a , V_b 는 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$V_a = G_1(s)(V_{r1} - K_{ct}K_1(s)i_e) \quad (3)$$

$$V_b = G_2(s)(V_{r2} + K_{ct}K_2(s)i_e) \quad (4)$$

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

중첩의 원리를 적용한 개 루프 전달함수 T_{ol} 은 식(5)과 같다.

$$T_{ol} = \frac{K_{ct}(G_1(s)R_{LR2} + G_2(s)R_{LR1})}{R_x} \quad (5)$$

병렬 운전시 전류 분배 제어기 $K_1(s)$, $K_2(s)$ 가 포함된 병렬 연결 컨버터의 개 루프 전달 함수 T_{olk} 는 그림 5로부터 중첩의 원리를 적용하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T_{olk} = \frac{K_{ct}[G_1(s)K_1(s)R_{LR2} + G_2(s)K_2(s)R_{LR1}]}{R_x} \quad (6)$$

4. 고장 탐지 및 분리

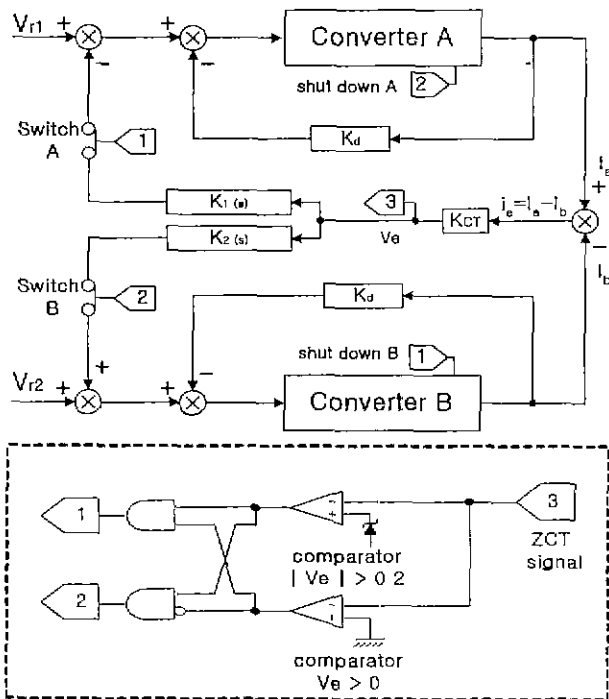


그림 6 컨버터 블록선도 (고장 탐지 및 분리)

컨버터 고장 탐지 및 분리를 위해서 그림 6과 같은 회로를 구성한다. comparator를 이용하여 전류 오차 신호가 fault라고 설정한 기준치 이상 벗어나면, 아날로그 스위치를 차단하고 컨버터를 shut down 시키도록 한다.

표 2는 검출된 신호와 기준 신호와의 차이에 따른 컨버터 고장 탐지 및 분리를 위한 조건이다.

표 2 컨버터 고장 탐지 및 분리를 위한 조건표

	Ve의 크기	
	Ve > 0.2	Ve <= 0.2
Ve > 0	SW A open shutdown B on	정상
Ve < 0	SW B open shutdown A on	정상

이를 도식적인 그림으로 나타난 것이 그림 7이다.

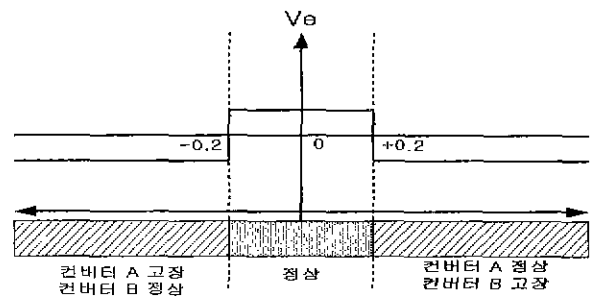


그림 7 고장 탐지 및 분리를 위한 로직

5. 실험결과

표 3 부하용량별 컨버터 고장탐지 및 분리 실험결과

부하	상태	Ia	Ib
20%	정상	0.88	0.88
	컨버터 B fault	1.89	0
	컨버터 A fault	0	1.87
40%	정상	1.86	1.88
	컨버터 B fault	3.80	0
	컨버터 A fault	0	3.82
60%	정상	2.81	2.84
	컨버터 B fault	5.72	0
	컨버터 A fault	0	5.74
80%	정상	3.76	3.80
	컨버터 B fault	7.63	0
	컨버터 A fault	0	7.62
100%	정상	4.68	4.74
	컨버터 B fault	9.48	0
	컨버터 A fault	0	9.47

그림 8은 컨버터의 고장을 탐지하여 스위치를 차단하고 컨버터를 shut down 했을 때의 각 컨버터의 전류 파형이다.

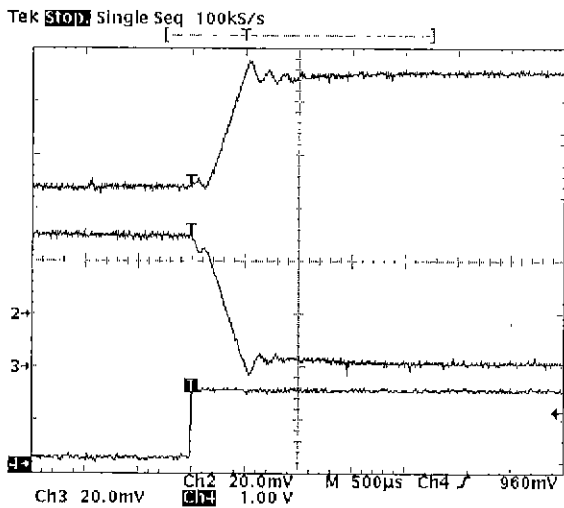


그림 8 컨버터 고장 시험 결과 파형

Ch2 : I_a , X=500us/div, Y=2A/div
 Ch3 : I_b , X=500us/div, Y=2A/div
 Ch4 : fault signal

fault가 발생한 시점으로부터 500us 이내에 fault tolerant가 이루어짐을 알 수 있다.

6. 결 론

시스템 특성상 2개의 컨버터는 병렬로 운전되는 시스템에서 두 컨버터를 1개의 CT를 이용하여 ZCT 방법으로 동작시켜 병렬 운전하는 방안을 제시하였다. 이 경우에 고장 탐지 및 분리에 따른 방안을 제시하고 실험 결과를 통하여 1개의 컨버터에 fault가 발생해도 다른 컨버터로 fault tolerant system 기능을 할 수 있음을 확인했다.

참 고 문 헌

[1] Ren-Hua Wu, Teruhiko Kohama, Yuichi Kodera, Tamotsu Ninomiya and Fumiaki Ihara, "Load-Current-Sharing Control for Parallel Operation of DC-to-DC Converters", Power Electronics Specialists Conference, PESC '93, pp.101-107, 1993.
 [2] J.Rajagopalan, K. Xing, Y. Guo and F.C. Lee, Bruce Manners, "Modeling and Dynamic Analysis of Paralleled dc/dc Converters with Master-Slave Current Sharing Control", Applied Power Electronics Conference and Exposition, Vol 2, pp. 678-684, 1996.
 [3] L.Thorsell and P.Lindman, "Reliability analysis of a direct

parallel connected n+1 redundant power system based on highly reliable DC/DC modules", Proc. 10th IEEE International Telecommunication Energy Conference (INTELEC'88), pp.551-556.
 [4] F.Petruzzirello, P.D. Ziogas, G. Joos, "A novel approach to paralleling of power converter units with true redundancy", 21th IEEE Power Electronics Specialists Conference Record (PESC'90), pp.808-813.
 [5] Keith Billings "SWITCH MODE POWER SUPPLY HANDBOOK", 2nd edition, Mc Graw Hill 1999.
 [6] Muhammad H.Rashid, "Power Electronics circuits, devices, and applications", 2nd edition. Prentice hall international(UK) Limited, 1993.
 [7] Richard C.Dorf, Robert H.Bishop, "Modern control systems" 7th edition, Addison-Wesley Publishing Company Inc.1995.
 [8] Karl Jordan Astrom, Tore Haggund, "Automatic Tuning of PID Controllers, Instrument Society of America(ISA),1988.
 [9] Mark Jordan, "UC3907 load share IC simplifies parallel power supply design", Unitorde application note.
 [10] 손승찬, 박상운, 정민재, 성세진, "단일 전류센서를 사용한 마스터-슬레이브 전류 분배형 2개의 DC-DC 컨버터 병렬 운전" 전력전자학회 논문지 vol. 5, No. 2, pp184-191, 2000.4.
 [11] S.E.Park, S.C.Sohn, S.J.Seong, "Zero Current Transformer Method for Master-Slave Type Two Converters Parallel Operation" IPEC-Tokyo 2000 vol 2, pp 879-884, 2000. 4.
 [12] 손승찬, 성세진, "영상 변류기 동작 방식을 이용한 2개의 컨버터 병렬 운전" 전기학회 논문지 vol 49, No. 2 pp265-271, 2000. 4.