

직류링크 전류를 이용한 인터리브드 양방향 컨버터의 상전류 불균형 보상 방법

(Compensation of Unbalanced Phase Currents in Interleaved Bi-directional Converter
with DC Link Current Sensed)

한정호* · 최유현 · 송중호**

(Jungho Han · Yuhyon Choi · Joongho Song)

Abstract

This paper presents a compensation method of unbalanced phase currents in interleaved bi-directional converters. Phase currents in interleaved bi-directional converter are apt to be unbalanced due to circuit parameter error and switch operation difference. This problem causes the switch element failure and the reduced efficiency of the converter. Therefore, it is necessary that a certain balance control algorithm is provided in interleaved bi-directional converter system. In this paper, a balance control algorithm based on the circular chain control method is proposed. Further, in order to reduce the number of phase current sensors, this paper shows a simple method in which phase currents can be extracted indirectly through a DC-link current sensor in both charging and discharging modes. The validity and the effectiveness of the proposed phase currents balance control algorithm are illustrated through the simulation results.

Key Words : Battery Charger, Circular Chain Control(3C), Interleaved Bi-Directional Converter

-
- * 주저자 : 서울과학기술대학교 철도전문대학원 박사과정
 - ** 교신저자 : 서울과학기술대학교 전기정보공학과 교수
 - * Main author : Dept. of Railway Electrical and Signaling Engineering, Seoul National University of Science and Technology, PhD candidate
 - ** Corresponding author : Dept. of Electrical and Information Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Professor
- Tel : 02-970-6415, Fax : 02-978-2754
E-mail : joongho@seoultech.ac.kr
접수일자 : 2014년 5월 19일
1차심사 : 2014년 5월 21일
심사완료 : 2014년 6월 16일

1. 서 론

최근 다양한 응용분야에 쓰이는 양방향 컨버터에 대한 관심이 높아지고 있다. 양방향 컨버터는 주로 배터리를 충·방전 시키는 역할을 하는데, 용량이 증대됨에 따라 인터리브드 컨버터 방식이 사용되고 있다. 인터리브드 컨버터는 각 상전류의 위상을 조절하여 배터리 전류리플을 줄일 수 있는 장점이 있다. 또한 각 상전류는 단일 인덕터를 사용할 때 보다 적게 흐르기 때문에 컨버터의 용량 증대를 효과적으로 구현할 수 있다. 인터리브드 컨버터의 각 상전류 제어는 기본적인

으로 같은 스위칭 주파수를 가지는 PWM의 위상만을 조절하여 제어하게 되지만, 스위칭 손실, 파라미터 오차 등으로 인해 각 상전류가 동일하게 유지되지 못한다. 이러한 이유로 각 상전류를 센싱하여 개별 제어하는 방법을 사용해 왔다[1-4]. 하지만 개별제어 방법의 상의 개수가 증가할 때 전류센서와 전류제어기 개수도 함께 증가하기 때문에 비용 증가와 제어 신뢰성 감소 등의 단점을 가지고 있다. 센서의 개수 문제에 대한 단점을 극복하기 위하여 각 상전류 센싱 없이 직류링크전류에서 각 상전류 값을 추출하여 제어하는 방법이 연구되었다[5-6].

참고문헌 [5]는 인터리브드 컨버터의 스위치 상태 조합에 따른 직류링크전류와 상전류 관계를 이용하여 상전류 센싱없이 상전류를 제어하는 방법이다. 이 논문에서는 각 상 전류 센싱 없이도 센싱한 것과 거의 유사한 제어성능을 가지는 것을 보여주고 있다. 하지만 이러한 방법은 여전히 상의 개수가 증가할수록 전류 제어기 개수도 증가한다는 단점을 가지고 있다. 참고문헌 [5]의 상전류 추출 방법은 2상 인터리브드 컨버터일 때는 유효하지만 3상 이상의 인터리브드 컨버터에서는 상의 개수에 따라 듀티비를 최소값 이상으로 유지해야 하는 제약 조건이 있다. 이 제약에 관해서는 본 논문의 2장에서 자세히 논하기로 한다.

참고문헌 [6]은 별도의 스위치 2개를 이용하여 입력 전류로부터 상전류를 추출하는 방법을 이용하고 있다. 또한 각 상전류 분담을 동일하게 유지하기 위하여 상전류 균형제어기를 추가하였다. 이 결과로 정상상태 뿐만 아니라 과도 상태에서도 각 상전류 균형 제어 성능이 우수한 것을 보여준다. 하지만 참고문헌 [6]에서 추가한 2개의 스위치는 추가적인 스위칭 손실을 발생시키지 않는다고 밝히고 있지만, 스위치 2개를 추가한 것은 여전히 비용 증가를 야기하는 단점으로 볼 수 있다. 또한 참고문헌 [6]의 전류제어기는 OP앰프를 이용한 제어기이기 때문에 마이크로프로세서를 기반으로 하는 대용량 응용분야의 인터리브드 컨버터 제어에는 적합하지 않다.

따라서 본 논문은 배터리전류를 직접 제어하여 상의 개수가 증가하더라도 전류제어기 개수를 하나로 구현할 수 있도록 하는 방법과, 파라미터 오차나 스위

칭 동작 지연 발생 등과 같은 이유로 각 상전류 크기 불균형이 발생하는 현상을 제어하기 위하여 circular chain control을 이용한 상전류 균형 제어 알고리즘을 제안한다. 본 논문이 제안한 상전류 균형제어 알고리즘은 이웃하는 상전류를 제어 기준으로 삼아 자신의 상전류와 이웃하는 상전류의 크기를 동일하게 만들어 주는 방법이다. 이러한 제어 방법은 인버터 병렬제어 등의 선행연구에서 그 우수성이 증명되었다[7]. 상전류 크기는 참고문헌 [5]와 듀티비 제약 조건을 고려하여 직류링크전류로부터 추출하는 방법을 이용한다. 시뮬레이션을 통하여 본 논문이 제안한 인터리브드 양방향 컨버터 제어 방법의 타당성과 실효성을 증명한다.

2. 인터리브드 양방향 컨버터 동작 특성 및 상전류 추출 조건

인터리브드 양방향 컨버터 구조는 그림 1과 같다. 본 논문에서는 컨버터의 용량과 부피를 고려하여 상의 개수를 3상으로 하였다. 인터리브드 양방향 컨버터의 동작은 충전 모드와 방전 모드로 나누어진다. 먼저 충전 모드일 경우 S_{T1} , S_{T2} , S_{T3} 의 스위치 조합에 의해 동작하게 된다. 이때, S_{B1} , S_{B2} , S_{B3} 와 D_{T1} , D_{T2} , D_{T3} 는 동작하지 않고, S_{T1} , S_{T2} , S_{T3} 의 상태에 따라 D_{B1} , D_{B2} , D_{B3} 가 스위치의 반전으로 동작하게 된다. 이와 유사하게 방전 모드일 경우는 S_{B1} , S_{B2} , S_{B3} 의 스위치 조합에 의해 D_{T1} , D_{T2} , D_{T3} 가 스위치의 반전으로 동작하게 된다. 인터리브드 양방향 컨버터는 그림 2와 같이 삼각파 위상차를 120° 만큼 이동시켜 각 스위칭 신호를 출력한다.

그림 2는 어느 특정 듀티비를 중심으로 스위치의 on-interval이 서로 중복되거나, 서로 분리되는 것을 보여주고 있다. 스위칭논리 '1'은 스위치on이고, '0'은 스위치off를 나타낸다. 그림 2로부터 인터리브드 컨버터의 듀티비가 d_{min} 보다 작을 경우 한 주기 동안 스위치 조합은 $000 \rightarrow 100 \rightarrow 000 \rightarrow 010 \rightarrow 000 \rightarrow 001 \rightarrow 000$ 이고, 듀티비가 d_{min} 보다 클 경우 스위치 조합은 $101 \rightarrow 100 \rightarrow 110 \rightarrow 010 \rightarrow 011 \rightarrow 001 \rightarrow 101$ 이 됨을

알 수 있다. 표 1은 스위치 조합에 따른 직류링크전류와 각 상전류와의 관계를 나타낸다.

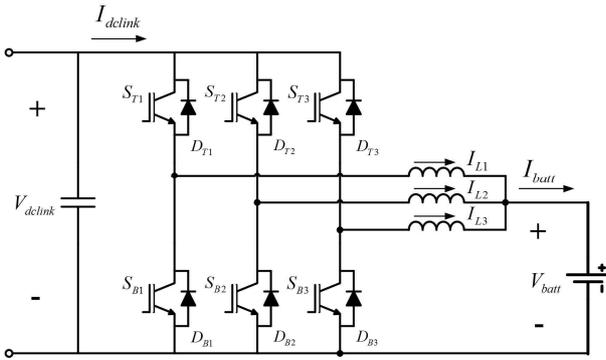


그림 1. 인터리브드 양방향 컨버터
Fig. 1. Interleaved bidirectional converter

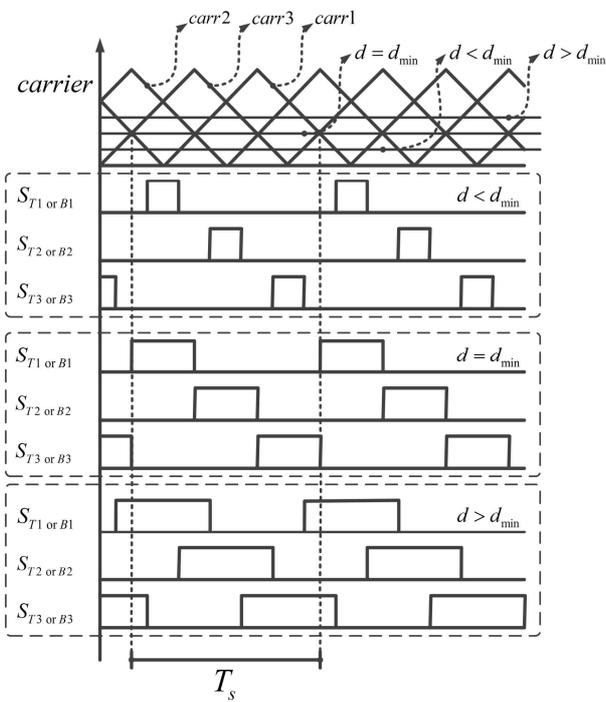


그림 2. 인터리브드 양방향 컨버터의 스위치 동작
Fig. 2. Switch Operation of Interleaved Bidirectional Converter

표 1로부터 특정한 스위치 조합에서 직류링크전류와 임의의 상전류가 같아지는 것을 알 수 있다. 충전 모드에서는 d_{min} 과 관계없이 직류링크전류와 상전류가 같아지는 100, 010, 001 스위치 조합이 나타나지만,

방전 모드에서는 반드시 듀티비가 d_{min} 보다 클 때 나타나는 011, 101, 110 스위치 조합을 가지는 조건에서 직류링크전류와 임의의 상전류가 같아지는 구간이 나타난다. 그러므로 인터리브드 양방향 컨버터에서 직류링크전류로부터 각각의 상전류를 추출하기 위해서는 듀티비를 d_{min} 이상으로 유지해야 한다. 이러한 d_{min} 은 상의 개수 n 에 따라 식 (1)로 나타낼 수 있다.

표 1. 스위치 상태와 직류링크전류, 상전류의 관계
Table 1. Relationship of switch states, dclink current and phase currents

S_{X1}	S_{X2}	S_{X3}	I_{dclink} (충전)	I_{dclink} (방전)
0	0	0	0	0
1	0	0	I_{L1}	$I_{L2} + I_{L3}$
0	1	0	I_{L2}	$I_{L1} + I_{L3}$
0	0	1	I_{L3}	$I_{L1} + I_{L2}$
0	1	1	$I_{L2} + I_{L3}$	I_{L1}
1	0	1	$I_{L1} + I_{L3}$	I_{L2}
1	1	0	$I_{L1} + I_{L2}$	I_{L3}

$x = T \text{ or } B$

$$d_{min} = \frac{1}{n} \quad n = 3, 4, 5, \dots \quad (1)$$

식 (1)로부터 상의 개수가 증가할수록 d_{min} 값이 작아지는 것을 알 수 있다.

3. 각 상전류 추출 방법

배터리전류를 직접 제어하는 방법은 전류제어기가 한 개만 필요하다는 장점을 가지고 있지만, 각 상 간에 전류 불균형이 발생할 수 있다는 문제점을 가지고 있다. 이러한 상전류 불균형 문제를 해결하기 위해서는 각 상전류 크기를 알아야 한다. 따라서 3장에서는 참고문헌 [5]의 상전류 검출 방법과 2장에서 밝힌 제약 조건을 이용하여 직류링크전류 센싱만으로 각 상전류의 크기를 추출하는 방법을 보여준다.

그림 3 (a)는 충전모드에서 스위치 상태가 100일 때 각 상전류의 흐름을 나타낸다. 먼저 S_{T1} 를 통하여

I_{dclink} 는 I_{L1} 으로 흐르게 되고, D_{B2} , D_{B3} 를 통하여 각각 I_{L2} 와 I_{L3} 가 흐르게 된다.

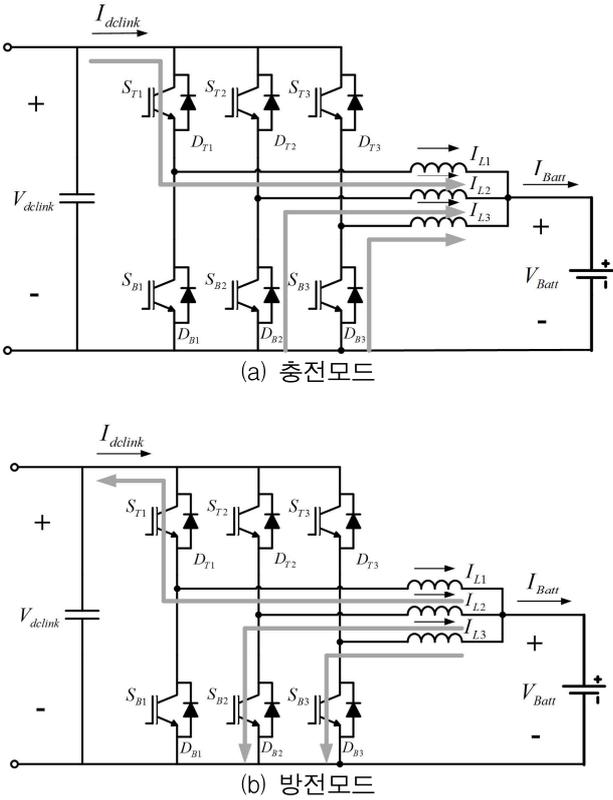


그림 3. 직류링크전류와 각 상전류 관계
Fig. 3. Relationship of dc-link current and phase currents

상전류의 합으로 이루어진 배터리전류는 상전류가 중첩됨으로써 전류리플이 감소한다.

직류링크전류와 상전류의 관계를 스위치 상태의 수식으로 정리하면 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$I_{dclink}(t) = S_{T1}I_{L1}(t) + S_{T2}I_{L2}(t) + S_{T3}I_{L3}(t) \quad (2)$$

그림 3 (b)는 방전모드에서 스위치 상태가 011일 때 각 상전류의 흐름을 나타낸다. 충전 모드와 달리 D_{B1} 을 통하여 I_{L1} 은 I_{dclink} 로 흐르게 되고, S_{B2} , S_{B3} 를 통하여 각각 I_{L2} 와 I_{L3} 가 흐르게 된다. 이와 같이 직류링크 전류와 상전류의 관계를 스위치 상태의 수식으로 정리하면 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$-I_{dclink}(t) = (1 - S_{B1})I_{L1}(t) + (1 - S_{B2})I_{L2}(t) + (1 - S_{B3})I_{L3}(t) \quad (3)$$

그림 4와 표 1로부터 직류링크전류를 센싱하는 시점으로 각 상전류를 추출할 수 있음을 알 수 있다. 표 1에서 I_{dclink} 와 I_{L1} 이 같아지는 구간은 스위치 조합이 100일 때이고, 식 (2)로부터 스위치 조합에 따른 직류링크전류와 상전류의 관계를 알 수 있다. 그림 4 (a)에서 스위치 조합이 100인 구간에서 I_{dclink} 를 센싱하면 I_{L1} 을 얻을 수 있다. 이때, 센싱 시점은 삼각파가 최소가 되는 시점이다. I_{L2} , I_{L3} 도 이와 같은 방법으로 구할 수 있다. 방전모드일 때는 I_{dclink} 와 I_{L1} 이 같아지는 구간은 스위치 조합이 011일 때이고, 식 (3)로부터 스위치 조합에 따른 직류링크전류와 상전류의 관계를 알 수 있다. 그림 4 (b)에서 스위치 조합이 011인 구간에서 I_{dclink} 를 센싱하면 I_{L1} 을 얻을 수 있다. I_{L2} , I_{L3} 도 이와 같은 방법으로 구할 수 있다.

4. 상전류 불균형 보상 제어

상전류 불균형 제어는 circular chain control을 이용한다. circular chain control은 이웃하는 상전류를 제어 기준으로 삼아 자신의 상전류와 이웃하는 상전류의 크기를 동일하게 만들어 주는 방법이다. 이러한 circular chain control은 제어기 연결이 끊어 졌을 경우 불균형 제어에 치명적인 악영향을 미치기 때문에 각각의 모듈을 사용하는 불균형 보상에 있어서 신뢰성을 보장할 수 없다. 그러나 본 논문과 같은 인터리브드 컨버터의 경우 모듈 한 개에서 불균형 제어 보상이 이루어지기 때문에 불균형 제어 보상에 있어서 신뢰성을 보장할 수 있다. circular chain control를 이용하여 출력되는 각 상전류 불균형 보상 듀티비는 식 (4)~(6)으로 나타낼 수 있다.

$$d_{bal1} = k_p(I_{L3} - I_{L1}) \quad (4)$$

$$d_{bal2} = k_p(I_{L1} - I_{L2}) \quad (5)$$

$$d_{bal3} = k_p(I_{L2} - I_{L3}) \quad (6)$$

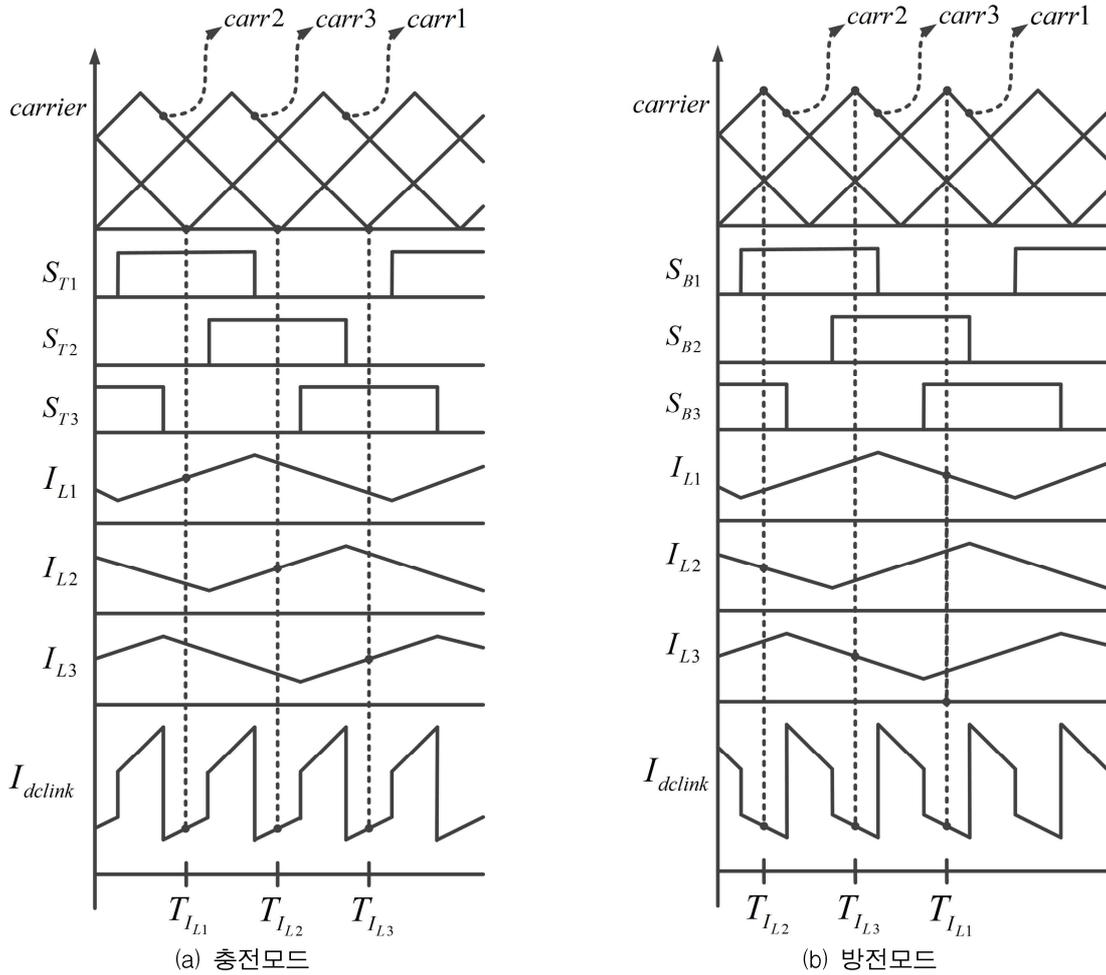


그림 4. 직류링크전류를 이용한 상전류 측정 시간
 Fig. 4. Measurement timing of phase currents using dc-link current sensing

여기서 k_p 는 상전류 불균형 보상 계인이다.

식 (4)~(6)로부터 상전류 불 균형 보상 성분은 두 상전류의 크기가 동일하면 0이 되는 것을 알 수 있다.

최종적으로 배터리전류 보상 듀티비 성분과 상 불균형 보상 듀티비 성분을 포함한 각 상 최종 듀티비는 식 (7)~(9)로 나타낼 수 있다.

$$d_1 = d_{com} + d_{bal1} \quad (7)$$

$$d_2 = d_{com} + d_{bal2} \quad (8)$$

$$d_3 = d_{com} + d_{bal3} \quad (9)$$

식 (7)~(9)로부터 각 상 최종 듀티비의 상 불균형 보상 듀티비 성분들은 이웃하는 출력에 영향을 미치는 링(ring) 구조를 가지고 있다는 것을 알 수 있다. 이러한 구조는 한 상전류에 불균형이 발생하더라도 전체 상전류 불균형 보상에 영향을 줌으로써 상전류의 균형을 가져 올 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그림 5는 배터리 전류제어 듀티비와 상 불균형 보상 듀티비를 포함하는 3상 인터리브드 양방향 컨버터의 제어 알고리즘이다. 먼저 충전모드일 때는 배터리 전압에 입력받는 충전 알고리즘을 통하여 배터리전류 기준치를 생성한다. 생성된 배터리전류 기준치는 제안한 제어

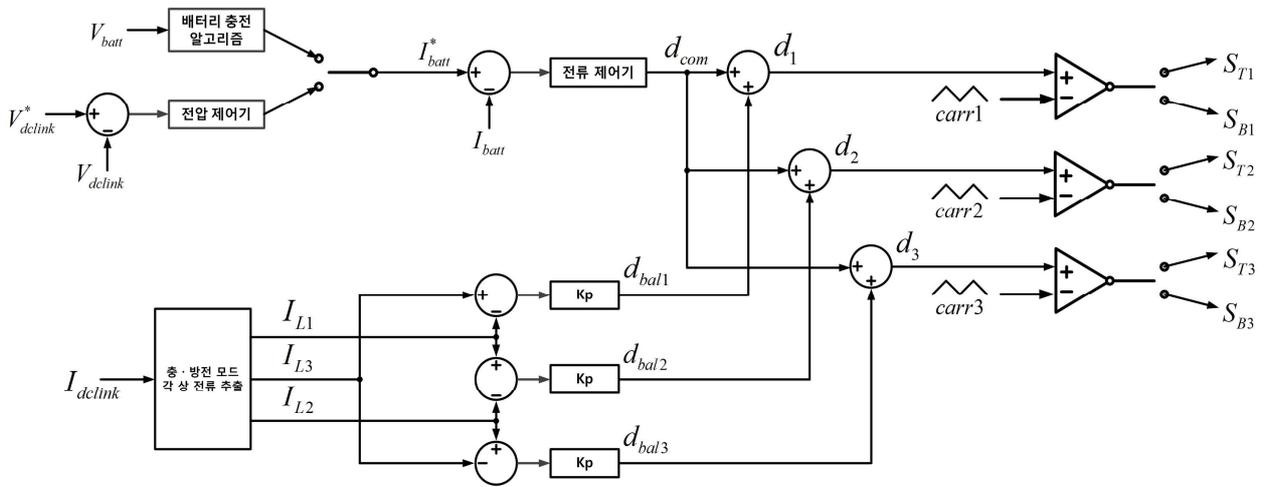


그림 5. 제안한 인터리브드 양방향 컨버터 제어 알고리즘
 Fig. 5. Proposed interleaved bidirectional converter control algorithm

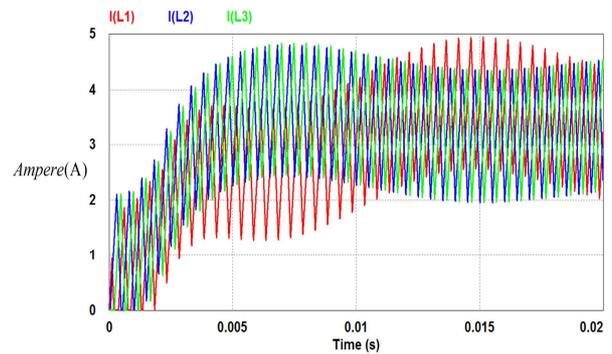
알고리즘을 통해 S_{T1} , S_{T2} , S_{T3} 에 스위치 신호를 출력한다. 방전모드일 때는 직류링크 전압을 레귤레이션하는 전압 제어기로부터 배터리전류 기준치를 얻어 제안한 제어 알고리즘을 통해 S_{B1} , S_{B2} , S_{B3} 에 스위치 신호를 출력한다.

5. 시뮬레이션

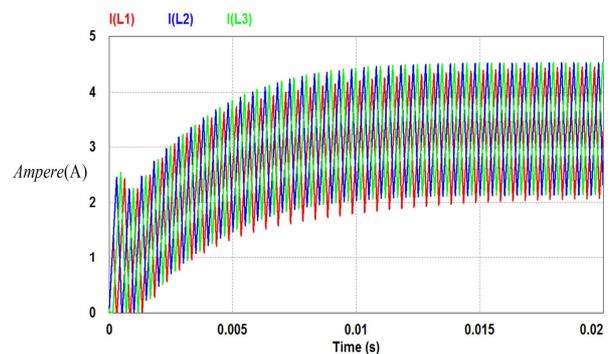
본 논문에서 제안한 제어 알고리즘을 적용한 3상 인터리브드 양방향 컨버터에 대한 시뮬레이션을 수행한다. 표 2는 시뮬레이션 파라미터를 나타낸다. 시뮬레이션 프로그램은 PSIM을 이용한다.

표 2. 시뮬레이션 파라미터
 Table 2. Simulation parameter

파라미터	값
컨버터 용량	4kW
각 상인덕터	10mH
직류링크 커패시터	1000uF
직류링크 전압	200V
배터리 전압	120V
배터리 용량	100Ah
비례게인(Kp)	0.5



(a) 제안한 알고리즘 적용 전

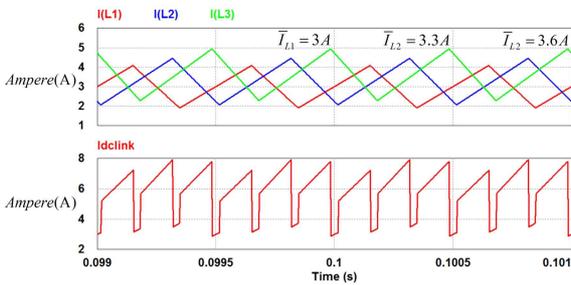


(b) 제안한 알고리즘 적용 후

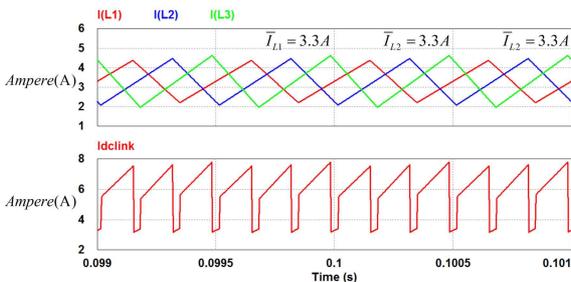
그림 6. 과도상태에서의 상전류 균형제어 성능
 Fig. 6. Performance of phase currents balance control in transient state

그림 6은 과도 상태에서 제안한 알고리즘 적용 전과 적용 후 시뮬레이션 결과이다. 제안한 제어 알고리즘 적용 전에는 과도상태에서 상전류 크기가 불균형인 것을 알 수 있지만, 제안한 알고리즘은 과도상태에서도 상전류가 균형을 이루는 것을 알 수 있다.

그림 7은 충전 모드에서 상전류 불균형 제어 알고리즘 적용 전과 적용 후를 나타내고 있다. 상전류 불균형 상황을 시뮬레이션하기 위하여 L_2 는 10mH로 유지시키고, L_1 의 인덕턴스를 L_2 보다 10% 증가, L_3 의 인덕턴스를 L_2 보다 10% 감소시켰다. 제안한 알고리즘 적용 전에는 상전류 균형제어기가 없으므로 상전류와 직류링크전류가 불균형인 것을 알 수 있고, 적용 후에는 상전류와 직류링크전류가 균형 제어됨을 알 수 있다.



(a) 제안한 알고리즘 적용 전



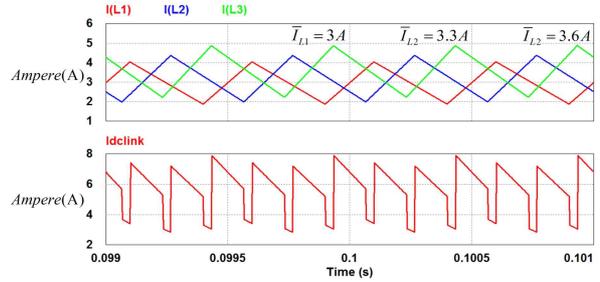
(b) 제안한 알고리즘 적용 후

그림 7. 충전모드에서 상전류의 균형제어 성능 상전류(위), 직류링크전류(아래)

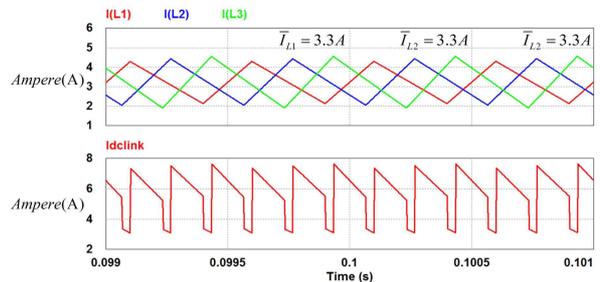
Fig. 7. Sharing performance in charging mode, phase currents(upper), dc-link current(lower)

그림 8은 방전 모드에서 상전류 불균형 제어 알고리즘 적용 전과 적용 후를 나타내고 있다. 파라미터 조

건은 충전 모드와 같다. 제안한 알고리즘 적용 전에는 상전류 균형제어기가 없으므로 상전류와 직류링크전류가 불균형인 것을 알 수 있고, 적용 후에는 상전류와 직류링크전류가 균형 제어됨을 알 수 있다. 또한 각상 스위치가 off일 때 직류링크전류가 흐르게 되므로 충전 모드와 다르게 직류링크전류 파형이 나타난다.



(a) 제안한 알고리즘 적용 전



(b) 제안한 알고리즘 적용 후

그림 8. 방전모드에서 상전류의 균형제어 성능 상전류(위), 직류링크전류(아래)

Fig. 8. Sharing performance in discharging mode, phase currents(upper), dc-link current(lower)

6. 결론

본 논문은 인터리브드 양방향 컨버터의 상전류 균형 제어 알고리즘을 제안하였다. 시뮬레이션을 통하여 제안한 상전류 균형제어 알고리즘이 상전류 균형제어에 우수한 성능 가지고 있음을 증명하였다. 또한 3상 이상의 인터리브드 컨버터에서 직류링크전류를 이용한 상전류 추출의 제약 조건을 밝히고 이를 적용하였다. 이러한 상전류 추출 방법은 전류센서를 줄이는 효과적인 방법임을 알 수 있다. 제안한 상전류 균형제어

알고리즘을 적용한 인터리브드 양방향 컨버터는 충·방전 모드에서 우수한 특성을 가진 것을 시뮬레이션을 통하여 확인하였다.

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술 연구비(일부 지원)로 수행되었습니다.

References

- [1] J. H. Kim and T. H. Jeon, "Analysis of Current Ripple for Two-Phase Interleaved Boost PFC," Transactions of KIEE, vol. 61P, no. 3, pp. 122-128, 2012.
- [2] W. J. Lee, J. K. Eom, B. M. Han, and H. J. Cha, "Design and Experiment of Three-phase Interleaved DC-DC Converter for 5kW Lead-Acid Battery Charger," Transactions of KPEE, vol. 16, no. 3, pp. 227-233, 2011.
- [3] Y. J. Kang and H. J. Cha, "Design and Control of Interleaved Boost converter for Multi-string PV Inverter," Transactions of KIEE, vol. 60, no. 3, pp. 538-543, 2011.
- [4] C. Gavriluta, C. Citro, K. Nisak and H. Beltran San Segundo, "A simple approach for fast controller prototyping for a three phase interleaved DC-DC converter," IEEE Int. Symposium on. ISIE, pp. 2015-2019, 2012.
- [5] K. Hongrae, M. Falahi, T. M. Jahns, and M. Degner, "Inductor Current Measurement and Regulation Using a Single DC Link Current Sensor for Interleaved DC-DC Converters," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 26, no. 5, pp. 1503-1510, 2011.
- [6] R. P. Singh and A. M. Khambadkone, "Current Sharing and Sensing in N-Paralleled Converters Using Single Current Sensor," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 46, no. 3, pp. 1212-1219, 2010.
- [7] T. F. Wu, Y. K. Chen and Y. H. Huang, "3C Strategy for Inverters in Parallel Operation Achieving an Equal Current Distribution," Industry Electronics, vol. 47, no. 2, pp. 273-281, 2000.

◆ 저자소개 ◆



한정호 (韓廷虎)

1984년 11월 3일생. 2008년 서울과학기술대학교 전기공학과 졸업. 2011년 동대학교 철도전문대학원 철도전기신호공학과 졸업(석사). 2011년~현재 동대학원 박사과정.

E-Mail : hanston@seoultech.ac.kr



최유현 (崔有鉉)

1987년 2월 9일생. 2013년 서울과학기술대학교 전기공학과 졸업. 2013년~현재 서울과학기술대학교 전기정보공학과 석사과정.

E-Mail : cyh2690@seoultech.ac.kr



송중호 (宋重鎬)

1957년 1월 30일생. 1980년 서울대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1982년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 한국과학기술원 전기및전자공학과 졸업(박사). 1995~1996년 미국 위스콘신대 초빙연구원. 1982~1985년 이화전기 기술개발부. 1985~2002년 한국과학기술원 지능제어연구센터 책임연구원. 2002년~현재 서울과학기술대학교 전기정보공학과 교수.

E-Mail : joongho@seoultech.ac.kr