DC 링크 전압이 가변하는 경우의 3상 인터리브드 양방향 DC-DC컨버터의 전류리플 해석

선다운, 정재헌, 노의철, 김흥근*, 전태원**
부경대학교, 경북대학교*, 울산대학교**

Current Ripple Analysis of 3-phase Interleaved Bidirectional DC-DC Converter In Case of DC Link Voltage Variation

Daun Sun, Jae Hun Jung, Eui Cheol Nho, Heung Geun Kim*, Tae Won Chun**
Pukyong National Univ., Kyungpook National Univ.*, University of Ulsan**

ABSTRACT

본 논문은 계통연계형 인버터의 DC Link단 전압 변동에 따른 3상 인터리브드 양방향 DC DC 컨버터의 배터리 전류 리플 분석에 관한 것이다. 배터리 전류 리플 저감을 위하여 인터리브드 방식을 사용하였으나 전압 변동에 따라 전류 리플이 변하므로 전류 리플을 최소화 하는 방법을 찾고자 한다. 전 부하 구간에서 전류 임계모드로 동작시켜 시스템의 효율을 높였으며, 배터리 전압과 DC Link단 전압 변동에 따라 주파수와 듀티를 가변시켜 출력전력을 제어하였다. 시뮬레이션을 통하여 전류 리플 해석 결과를 보였다.

1. 서 론

전기 자동차의 에너지 저장장치와 계통을 연계하는 V2G (Vehicle to Grid) 기술은 계통연계를 위한 PWM 인버터와 함께 양방향 DC DC 컨버터의 연구를 필요로 한다. 양방향 DC DC 컨버터의 입·출력 전류 리플은 전기 자동차의 에너지 저장장치 수명에 영향을 미치게 된다.

양방향 DC DC 컨버터의 스위칭 손실을 줄이기 위하여 전류 임계 모드로 동작 시켰으며, 인터리브드 방식을 사용하여 충·방전 시 전류 리플을 저감하도록 하였으나 전압 변동에 따라 리플도 증감하게 된다. 따라서 컨버터 입·출력 전압 변동을 고려하여 충·방전 전력에 따라 주파수 및 듀티를 제어하면서 전류 리플이 어떻게 변하는지 살펴보았다.

2. 3상 인터리브드 양방향 DC-DC 컨버터

그림 1은 본 논문에서 다루고자 하는 시스템의 회로도이다. 시스템 파라미터는 표 1과 같다. 배터리의 전압을 충전하는 경우 상단의 스위치를 온·오프 시키는 Buck 컨버터로 동작하며, DC Link단에서 배터리로 에너지가 전달된다. 하단의 스위치는 배터리 전압을 방전 시키는 Boost 컨버터 동작에 이용한다. 스위치에 병렬로 연결된 커패시터는 스위치 턴 온 시 ZVS와 ZCS, 턴 오프 시 ZVS 스위칭을 가능하게 하며, 기존 3상 인터리브드 양방향 DC DC 컨버터[1]보다 ZVS용 커패시터 개수를 반으로 줄였다. 부하가 커지면 주파수가 감소하여 전력을 제어하며, 부하가 감소하면 주파수를 증가시키며 전력을 제어한다. 경부하 시 스위칭 주파수가 매우 커지게 되는데 최대 스위칭 주파수에 제한을 두어 스위치에 대한 부담을 감소 시켰다.

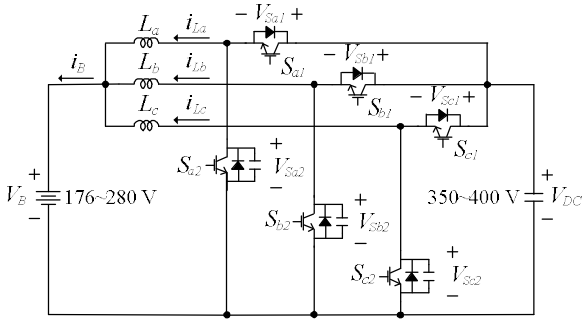

그림 1 3상 인터리브드 양방향 DC-DC 컨버터
Fig. 1 3-phase interleaved bidirectional DC-DC converter

표 1 시스템 파라미터
Table 1 System parameters

Parameter	Value
V_{DC}	350 ~ 400 [V]
V_B	176 ~ 280 [V]
L	1 [mH]
C	2.2 [nF]
P_{rated}	3 [kW]
f_{sw}(Frequency for mode change)	20 [kH]

2.1 동작원리

그림 2는 충전 모드에서의 스위칭 신호, 인덕터 전류, 스위치 전압 파형 및 각 모드별 단상 회로의 전류 흐름도 이다. 인덕터 전류가 0일 때 스위치 S_2를 턴 온 시키면 Mode I이 시작된다. 이때 S_2는 ZVS, ZCS 턴 온 하며 V_{DC}와 V_B차이로 인하여 인덕터 전류 i_L이 상승한다. Mode II는 S_2가 ZVS 턴 오프 되면 시작한다. 이 때 L—C공진이 일어나게 되고 V_{S2}의 전압은 0으로 방전한다. V_{S2}가 영전압이 되면 S_2의 다이오드로 전류가 흐르며 Mode III가 시작된다. 이때는 i_L이 하강하게 되며 전류가 0이 되는 순간에 스위치 S_1을 ZVS, ZCS 턴 온 하면 Mode IV가 시작된다. 이때 i_L은 스위치 S_2의 ZVS용 커패시터를 방전 시켜주고, 커패시터가 영전압이 되면 S_2는 ZVS 턴 오프 되고 Mode IV는 종료된다. Mode V에서 다시 L C공진되어 V_{S1}이 영전압이 되면, S_1의 다이오드로 전류가 흐르며 Mode VI이 시작된다.

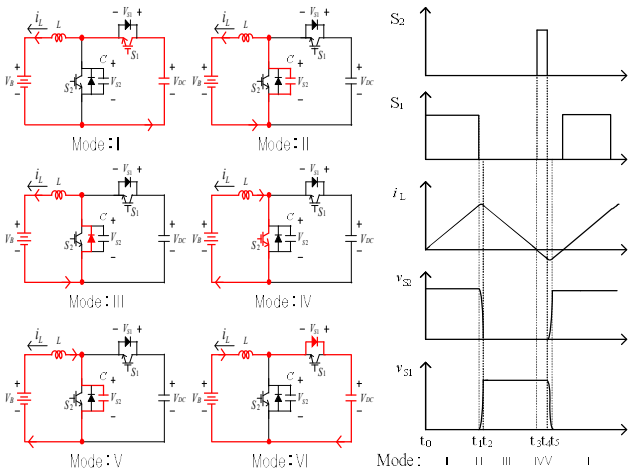

그림 2 시스템 단상 회로의 전류 흐름도 및 파형 (충전모드)

Fig. 2 Current path and waveforms of single-phase circuit in the system (Charge mode)

2.2 충·방전 전력과 주파수

중부하시 충·방전 전력은 스위칭 주파수를 이용하여 제어하게 된다. L C공진 구간은 스위칭 주기에 비해 시간이 매우 짧아 영향을 미치지 않는다고 가정하며, 인덕터 전류 파형을 구간별로 나누어 충전 전력에 대한 주파수를 계산하면 다음과 같다.

$$f = \frac{1}{\left(\frac{1}{V_{DC}-V_B}+\frac{1}{V_B}\right)\left(\frac{2P_C L}{3V_B}+2I_{\min}L\right)} \quad (1)$$

그림 3에 식 (1)을 이용하여 DC 링크 전압이 각각 350 [V]와 400 [V]로 변동하는 경우 스위칭 주파수에 대한 출력 전력의 크기를 그래프로 나타내었다.

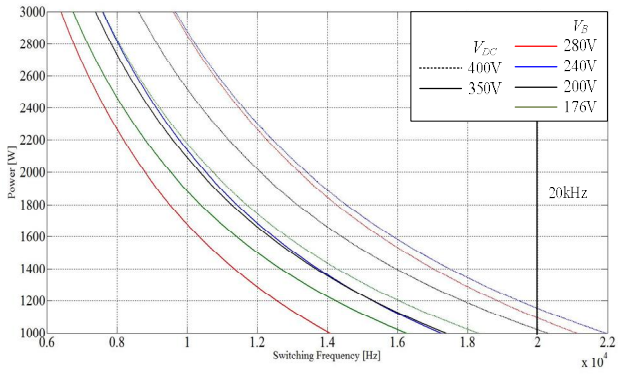

그림 3 배터리와 DC-Link 전압 변동에 따른 스위칭 주파수에 대한 출력 전력

Fig. 3 Output power versus switching frequency with the variation of battery and DC-link voltage

2.3 전류 리플 해석

전력에 따라 주파수가 변하게 되면서 배터리의 전류 리플 ΔI_B가 변하게 된다. 또한 배터리 전압이 변동함에 따라 인덕터 전류 I_L의 하강 기울기가 변하기 때문에 배터리 전압 V_B 또한 전류 리플에 영향을 미치게 된다. 배터리 전압이 DC 링크 전압의 2/3인 구간에서 배터리 전류 리플의 크기는 0 [A]가 된다. 배터리 전류 리플은 $V_B > 2V_{DC}/3$인 경우 식 (2)와 같고, $V_B < 2V_{DC}/3$인 경우 식 (3)과 같다.

$$\Delta I_B = \frac{3(V_{DC}-V_B)DT}{L} \quad (2)$$

$$\Delta I_B = \frac{(2V_{DC}-3V_B)DT}{L} \quad (3)$$

그림 4는 식 (2)와 식 (3)으로부터 부하가 1 [kW], 2 [kW], 3 [kW]로 변하고 DC 링크 전압이 350 [V]와 400 [V]인 경우에 대하여 배터리 전압의 변화에 따른 배터리 전류 리플의 변화를 나타낸 것이다. 그림 4로부터 배터리 전압이 233 [V]에서 267 [V]로 변하는 구간에서는 DC 링크 전압을 350 [V]에서 400 [V]로 가변해주면 리플을 완전히 제거할 수 있다.

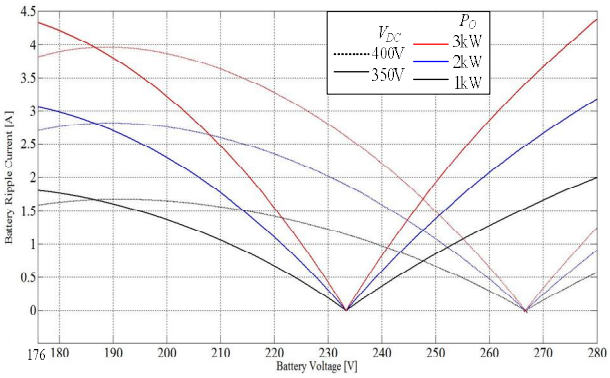

그림 4 출력 전력 및 DC-Link 전압 변동에 따른 배터리 전압에 대한 리플 전류의 크기

Fig. 4 Magnitude of current ripple versus battery voltage with the variation of output power and DC-Link voltage

3. 결 론

본 논문에서는 3상 인터리브드 양방향 DC DC 컨버터의 DC 링크 전압 변동에 따른 배터리 리플 전류에 관하여 분석하였다. 인터리브드 방식을 사용하여 충·방전 시 전류 리플을 저감하도록 하였으며, DC 링크 전압 변동에 따른 배터리 전류 리플 변화를 시뮬레이션을 통하여 나타내었다. 배터리 전압이 DC 링크 전압의 2/3인 경우 배터리 리플 전류가 0이 되며, 충·방전 시 배터리 전압이 변동하는 일정 구간에서 DC 링크 전압을 가변 해주면 배터리 전류 리플 값이 0으로 유지 시킬 수 있다는 것을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] Junhong Zhang, Jih Sheng Lai, Rae young Kim, Wensong Yu, "High power density design of a soft switching high power bidirectional DC DC converter," IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 22, No. 4, pp. 1145 1153, 2007, Jul.