상 제어 기법을 이용한 3상 인터리브드 양방향 DC-DC 컨버터의 시스템 설계

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

Design of 3-Phase Interleaved Bidirectional DC-DC Converter for Phase Controlled Switching Method

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

ABSTRACT

본 논문에서는 3상 인터리브드 양방향 DC DC 컨버터의 상 제어 스위칭 기법을 이용하여 부하의 변동에 따라 2상 또는 3상 인터리빙이 되도록 하는 시스템 설계방법을 제시한다. 3 [kW] 시스템에 대하여 전류 임계모드가 되도록 하는 인덕턴스 값을 유도하였으며 2상으로 동작 시 최대 전력 구간 범위를 구하고 시뮬레이션을 통하여 제안한 방식의 타당성을 입증하였다.

1. 서 론

3상 인터리브드 양방향 DC DC 컨버터 토폴로지는 출력 전류의 리플이 작다는 장점으로 인해 배터리와 같은 에너지 저장 시스템에 적용하기 위한 연구가 활발히 수행되고 있다[1,2].

본 논문은 상제어 스위칭 기법을 사용하는 3상 인터리브드 양방향 DC DC 컨버터에 관한 것이다. 상 제어 스위칭은 부하 변동에 따라 2상 또는 3상 인터리빙이 되도록 하여 소프트 스위칭은 물론 배터리 충·방전 전류에 포함된 리플 전류의 크기도 최소화하는 효과가 있다. 따라서 주어진 입출력 사양을 토대로 하여 3상 인터리브드 양방향 DC DC 컨버터의 리플크기에 대하여 분석하고 최적의 시스템 파라미터 설계 방법을 제안하고자 한다. 시뮬레이션을 통해 제안한 설계 방법의 타당성을 입증하고 아울러 3상 인터리브드 방식의 양방향 DC DC 컨버터의 성능향상에 기여하고자 한다.

2. 양방향 DC-DC 컨버터

2.1 시스템 구성 및 동작원리

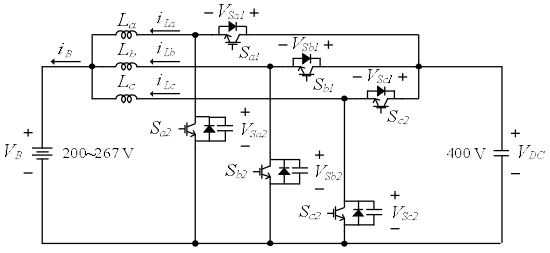

그림 1 3상 인터리브드 양방향 DC-DC 컨버터 회로
Fig. 1 3-phase interleaved bidirectional DC-DC converter circuit

그림 1은 본 논문에서 다루고자 하는 양방향 DC DC 컨버터의 회로도이다. V_{DC}는 계통연계형 인버터의 DC link단 전압이며 400 [V]로 가정하였다. 시스템에 사용된 배터리 전압 V_B의 변동범위는 176 [V] ~ 280 [V]이다.

제안하는 시스템은 전류 임계모드로 동작하며 부하 전력은 스위칭 주파수를 이용하여 제어한다. 양방향 DC DC 컨버터는 배터리 충전 시 벅 컨버터, 방전 시 부스트 컨버터로 동작한다.

2.2 전류 리플의 크기 분석

그림 2와 3에 출력전류 리플의 크기 분석을 위한 양방향 DC DC 컨버터의 3상과 2상 동작 시 각 상전류를 나타내었다. 소프트 스위칭을 위한 공진 구간이 스위칭 주기와 비교하여 매우 작다면 각 상의 전류는 삼각파로 가정할 수 있다.

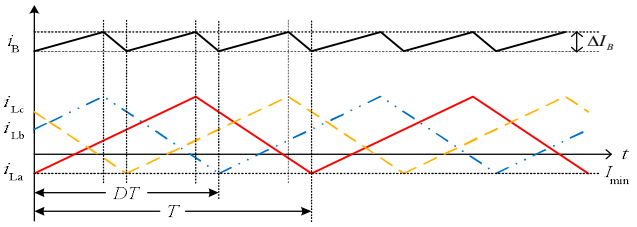

그림 2 3상 동작 시 인덕터 전류
Fig. 2 Inductor currents in 3-phase operation

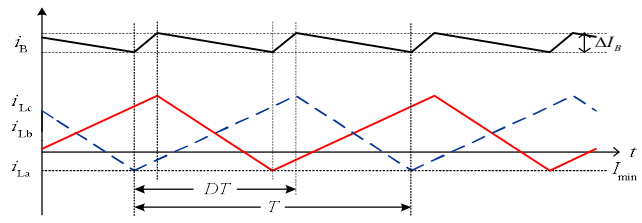

그림 3 2상 동작 시 인덕터 전류
Fig. 3 Inductor currents in 2-phase operation

3상으로 동작할 경우 리플전류 Δi_B는 배터리 전압에 따라 0 [V] ~ 133 [V], 133 [V] ~ 267 [V], 그리고 267 [V] ~ 400 [V]로 구분하여 구할 수 있으며, 2상으로 동작하는 경우 Δi_B는 배터리 전압에 따라 0 [V] ~ 200 [V]과 200 [V] ~ 400 [V]인 구간으로 구분하여 구할 수 있다.

본 논문에서 사용되는 배터리의 전압변동 범위는 176[V] ~ 280[V]이므로 3상으로 동작하는 경우 176[V] ~ 267[V]와 267[V] ~ 280[V], 2상으로 동작하는 경우 176[V] ~ 200[V]와 200[V] ~ 280[V]구간으로 구분하여 Δi_B의 크기를 구하였다.

3상으로 동작할 때 전류 리플의 크기는 배터리 전압 V_B가 267[V]인 경우 영(Zero)이 된다. 그림 2의 176[V] ~ 267[V]구간과 267[V] ~ 280[V]구간에서의 배터리 입·출력 전류의 리플 크기 Δi_B는 각각 식 (1)과 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$\triangle i_B = \frac{2V_{DC} - 3V_B}{L} DT \quad (1)$$

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

2상으로 동작할 때 전류 리플의 크기는 배터리 전압 V_B가 267[V]인 경우 영(Zero)이 된다. 그림 3의 176[V] ~ 200[V]구간과 200[V] ~ 280[V]구간에서의 배터리 입·출력 전류의 리플크기 Δi_B는 각각 식 (3)과 식 (4)로 나타낼 수 있다.

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

$$\triangle i_B = \frac{2(V_{DC} - V_B)}{L} DT \quad (4)$$

2.3 인덕터 설계 및 상 전환 적용구간 분석

제안하는 시스템의 최대 충·방전 전력은 3[kW]이다. DC link단 전압인 V_{DC}는 400[V]이며, 배터리 전압인 V_B는 176 ~ 280[V]로 가변 할 때 IGBT소자를 사용하기 위해 스위칭 주파수의 최대값은 20[kHz]로 제한하였다.

최대 충·방전 전력인 3[kW]에서도 인덕터의 전류가 DCM으로 동작해야 하므로 다음 식을 만족해야 한다.

$$L \leq \frac{3V_B^2}{2P_c} DT \quad (1)$$

Δi_B의 크기가 가장 큰 지점에서 Δi_B를 약 30[%]로 설계하였을 때 L은 1.52[mH]이다. 정격부하인 3[kW]를 기준으로 전력 반도체 소자를 선정하는 경우 2상으로 동작 시 최대출력이 낮아진다.

그림 4에 스위치 소자의 전류 정격 사양을 이용하여 배터리 전압에 대한 2상 동작 시 컨버터의 최대 출력을 그래프로 나타내었다. 그림에서 배터리 전압이 증가함에 따라 출력이 증가하는 것을 알 수 있다.

그림 4와 식 (1) ~ 식 (4)를 이용하여 2상 동작이 가능한 영역을 그림 5에 나타내었다. 상 제어 기법을 적용하는 경우 배터리 전류의 리플 크기를 배터리 전압변동에 대하여 나타낸 것이다. V_B가 231[V]인 지점을 기준으로 상 전환을 하게 되면 전류 리플을 줄일 수 있는 것을 알 수 있다. 그러나 그림 4에서 V_B가 231[V]인 경우 2상 최대출력이 2.624[kW]보다 출력이 낮은 경우에만 2상으로 전환하여 리플 전류의 크기를 줄일 수 있게 된다. 2상으로 동작 시 V_B에 따른 2상 동작 최대 출력 p_o의 크기는 빨간선과 같으며 이는 그림 5에서 표시된 영역 B와 같다.

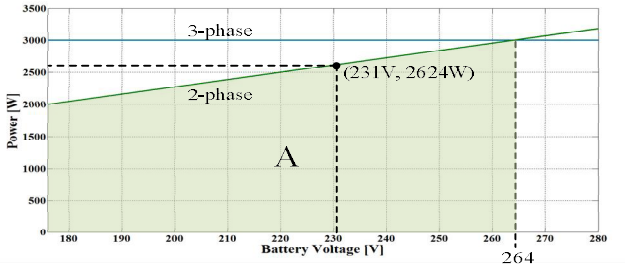

그림 4 최대 배터리 전류를 가지는 경우 3상과 2상 동작 시 배터리 전압에 대한 충·방전 전력 크기

Fig. 4 Magnitude of power in 3-phase and 2-phase operation versus battery voltage in case of maximum battery current

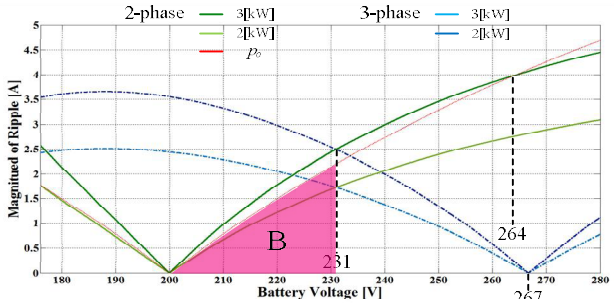

그림 5 3상과 2상 동작 시 배터리 전압에 대한 전류 리플의 크기

Fig. 5 Magnitude of current ripple in 3-phase and 2-phase operation versus battery voltage

3. 결론

본 논문에서는 양방향 DC DC 컨버터의 출력 전력에 대하여 시스템의 전력반도체 소자의 최대 스위칭 주파수를 기준으로 각 상이 전류 임계모드로 동작할 때의 인덕턴스 값을 설계하였고 상 전환 스위칭 기법이 적용될 때의 최대전력 구간 범위를 분석하였다. 정격 3[kW], 스위칭 주파수의 제한치를 20[kHz], 전류 리플은 30[%] 이내로 하는 L값은 1.52[mH]이다. V_B는 231[V], 출력 전력이 2.624[kW]이하인 경우 2상동작이 가능하고 V_B가 감소할수록 2상 동작의 최대출력은 낮아진다.

제안하는 상전환 기법은 3상 인터리브드 컨버터의 성능향상에 큰 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다.

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.

[2] Zhan Wang, Hui Li, "A soft switching three phase current fed bidirectional dc dc converter with high efficiency over a wide input voltage range," IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 27, No. 2, pp. 669 684, 2012, Feb.