

3상 인터리브드 양방향 DC-DC 컨버터의 부드러운 상전환을 위한 스위칭 기법

정혜수, 정재현, 김지현, 노의철, *김흥근, **전태원
부경대학교, *경북대학교, **울산대학교

A Switching Method for Seamless Phase Transform of 3-phase Interleaved Bidirectional DC-DC Converter

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

ABSTRACT

본 논문은 3상 인터리브드 양방향 DC-DC 컨버터의 전류 리플 최소화에 관한 것이다. 3상 양방향 컨버터를 부하에 따라 3상 또는 2상으로 상전환 시 전류 변동의 크기를 최소화하기 위한 스위칭 기법을 제안하고 시뮬레이션을 통하여 제안한 방식을 검증하였다.

1. 서론

배터리 충·방전용 토폴로지 중에서 입출력 전류의 리플이 작은 인터리브드 방식의 컨버터에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 인터리브드 방식의 컨버터를 전류임계모드로 동작하는 주파수 변조 방식으로 제어하는 경우 각 상의 위상과 주파수는 한 상을 기준으로 결정된다. 최근 배터리 전류 리플을 최소화하기 위한 새로운 기법으로 상전환 방식이 제안되었다.^[1] 그런데 부하에 급격한 변동이 발생하는 경우 상전환이 발생하는 시점에서 배터리 전류에 외란이 발생하게 된다. 본 논문에서는 부하변동으로 인한 상전환 발생시 각 상의 주파수와 위상을 보상하여 갱신하는 새로운 스위칭 기법을 제안하며 배터리 전류에 발생하는 외란을 최소화하였다. 시뮬레이션을 통하여 제안하는 방식의 타당성을 입증하였다.

2. 3상 인터리브드 양방향 DC-DC 컨버터

2.1 시스템 동작원리

그림 1은 3상 인터리브드 양방향 DC-DC 컨버터 회로이다. 본 시스템은 DC 링크 전압 V_{DC} 에서 배터리 전압 V_B 로 충전할 경우 상단의 S_{1a} , S_{1b} , S_{1c} 스위치를 이용하여 벡 컨버터로 동작하고, 방전하는 경우 하단의 S_{2a} , S_{2b} , S_{2c} 스위치를 이용하여 부스트 컨버터로 동작한다. 그림 2는 단상을 기준으로 나타낸 충전 모드시 인덕터 전류와 각 부의 전압 파형이다.

- (a) 모드 1 : S_1 턴온 시 인덕터에는 V_{DC} 와 V_B 의 차이의 전압이 인가되어 인덕터 전류 i_L 은 상승한다.
- (b) 모드 2 : S_1 턴오프 시 LC공진이 발생한다.
- (c) 모드 3 : LC공진이 끝난 후 인덕터에는 V_B 가 인가되어 인덕터 전류 i_L 은 하강한다.
- (d) 모드 4 : i_L 이 영전류가 되면 LC공진이 발생하며 $V_{\mathcal{L}}$ 는

V_{DC} 만큼 상승한다.

S_1 턴온 시 ZVS 및 ZCS, 턴오프 시 ZVS가 된다. 방전 모드에서는 S_2 가 온-오프하며 충전 모드의 동작원리와 동일하다.

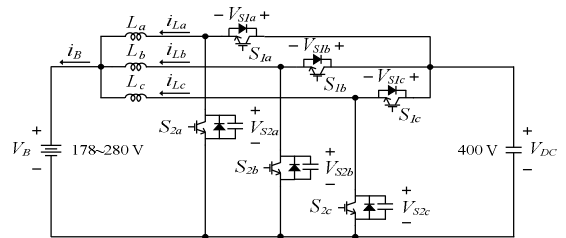


Fig. 1 3-phase interleaved bidirectional dc-dc converter

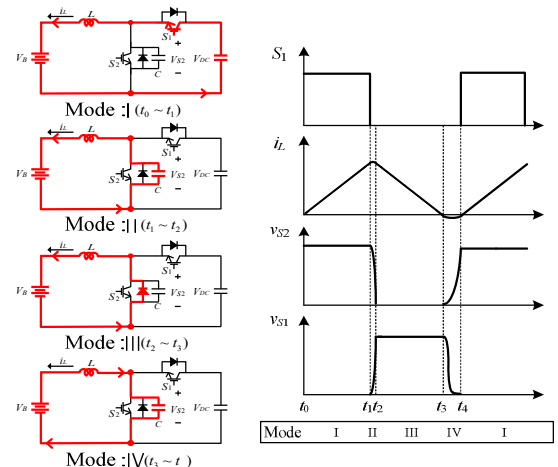


Fig. 3 Current path and waveforms of a-phase circuit in the system (Charge mode)

2.2 상전환 구간 분석

그림 1의 회로를 배터리 전압과 부하의 크기에 따라 3상 및 2상으로 동작시켰다. 배터리 전류의 크기는 각 상에 흐르는 전류의 합과 같고 배터리 전류 리플의 크기는 배터리 전압 범위에 따라 다음과 같이 구할 수 있다.

3상 동작시 배터리 전류 리플의 크기는 식 (1) 및 (2)와 같으며 V_B 가 267 [V]일 때 배터리 전류 리플 크기는 0이다.

$$\Delta i_B = \frac{2V_{DC} - 3V_B}{L} DT \quad (176 \leq V_B < 267) \quad (1)$$

$$\Delta i_B = \frac{3(V_{DC} - V_B)}{L} DT \quad (267 < V_B \leq 280) \quad (2)$$

2상 동작시 배터리 전류 리플의 크기는 식 (3) 및 (4)와 같으며 V_B 가 200 [V]일 때 배터리 전류 리플 크기는 0이다.

$$\Delta i_B = \frac{V_{DC} - 2V_B}{L} DT \quad (176 \leq V_B < 200) \quad (3)$$

$$\Delta i_B = \frac{2(V_{DC} - V_B)}{L} DT \quad (200 < V_B \leq 280) \quad (4)$$

그림 3에 3상 동작시 부하가 2 [kW], 3 [kW]인 경우와 2상 동작시 부하가 2 [kW]인 경우의 배터리 전류 리플 크기를 나타내었다. 부하가 2 [kW]이며 배터리 전압이 222 [V] 이하인 경우 시스템이 3상으로 동작할 때보다 2상으로 동작 시 배터리 전류 리플의 크기가 작은 것을 알 수 있다.

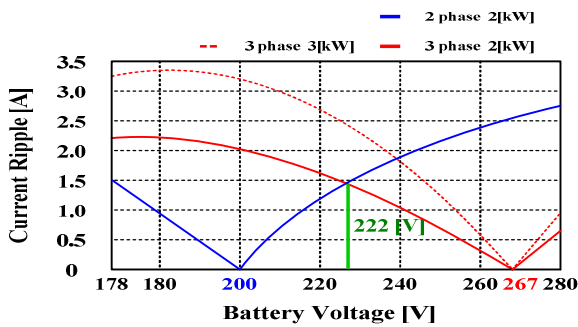


Fig. 4 Magnitude of current ripple in 3-phase and 2-phase operation versus battery voltage

3. 부드러운 상전환을 위한 스위칭 기법

3.1 제안하는 스위칭 기법

본 논문의 컨버터는 스위칭 주파수를 이용하여 부하를 제어한다. 부하변동에 따른 상전환 발생 시 각 상전류와 MCU의 카운터 값을 그림 4에 나타내었다. 그림 4에서 $h_x(x=1,2)$ 는 임의의 스위칭 주파수를 생성하기 위한 카운터 값의 최대치이다. h_x 의 값이 작아지면 삼각파의 주파수가 증가하고 h_x 의 값이 커지면 삼각파의 주파수는 감소한다. 따라서 h_x 의 값은 스위칭 주파수와 반비례관계에 있다. x_B 는 보상하고자 하는 주파수 변동분이다.

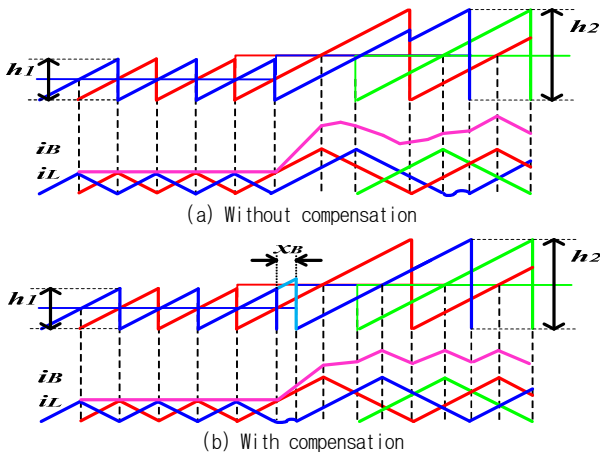


Fig. 4 Waveforms of i_L , i_B and counter of each phase

그림 4-(a)는 a상의 카운터 값이 0인 지점에서 3상의 h_x 값이 동시에 갱신되는 경우 각 상전류와 카운터 값을 나타내었다. 부하 변동 후 i_B 의 첫 번째 주기의 위상이 120° 가 아니기 때문에 배터리 전류에 리플 성분 외의 외란이 발생하는 것을 알 수 있다. 외란의 크기는 부하와 배터리 전압의 크기에 따라 변한다. 그림 4-(b)는 본 논문에서 제안하는 스위칭 기법이다. a 상을 기준으로 나머지 상의 위상과 주파수는 부하의 변동에 따라 보상 후 갱신된다. 2상에서 3상으로 변환하는 경우 기준 상인 a 상에서 b 상의 값을 식 (5)와 식 (6)을 이용하여 x_B 만큼 보상하면 그림 4-(b)에 나타난 것처럼 각 상 전류는 임계모드로 동작하고 배터리 전류의 리플 또한 외란 없이 부드러운 상전환을 할 수 있다.

$$h_2 = h_1 + x_B \quad (5)$$

$$x_B = \frac{h_2}{2} - \frac{h_1}{3} \quad (6)$$

3.2 시뮬레이션

그림 5는 충전 모드에서 부하가 1[kW]에서 3 [kW]로 변할 때 2상에서 3상으로 상전환하는 시점을 나타낸 시뮬레이션 파형이다. 배터리 전류와 각 상전류가 부하 증가분에 대해 신속히 추종하는 것을 알 수 있다.

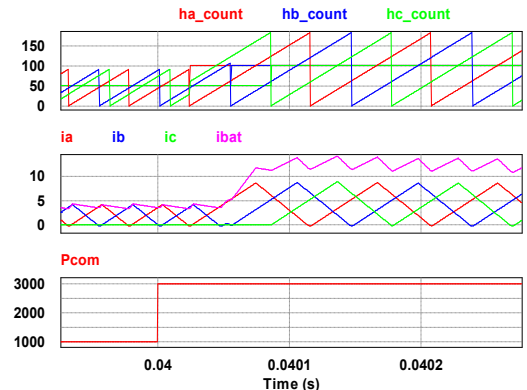


Fig. 7 Simulation waveforms of i_L , i_B , P_{com} and counter of each phase.

4. 결론

본 논문에서는 3상-2상 동작모드를 가지는 3상 인터리브드 양방향 DC-DC 컨버터의 상전환을 위한 스위칭 기법에 대하여 다루었다. 배터리 전압 또는 부하의 변동에 따른 상전환 발생 시 배터리 전류 리플의 외란을 최소화하는 스위칭 기법을 제안하였으며, 부하 급변시 부하 전류 값을 빠르게 추종하는 것을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 제안하는 상전환 스위칭 기법은 배터리 전류 리플 성분이 최소가 되는 구간을 늘릴 수 있어 배터리 수명 연장에 기여할 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] 김지현, 정재현, 노의철, 김홍근, 전태원 “상 제어 기법을 이용한 3상 인터리브드 양방향 DC-DC 컨버터의 시스템 설계” 전력전자학회 2015년도 정기총회 및 추계학술대회, 2015.11, 191-192.