

소프트스위칭 특성을 갖는 전기자동차 배터리 충방전용 양방향 DC-DC 컨버터

서보길, 정재현, 박해영, 노의철, 김인동, *김흥근, **전태원
부경대학교, *경북대학교, **울산대학교

Bidirectional DC-DC Converter with Soft-Switching for Battery Charging and Discharging of Electric Vehicle

Bo Gil Seo, Jae Hun Jung, Hae Young Park, Eui Cheol Nho, In Dong Kim,
*Heung Geun Kim, **Tae Won Chun
Pukyong National Univ., *Kyungpook National Univ., **University of Ulsan

ABSTRACT

본 논문에서는 전기자동차 배터리 충방전용 3상 인터리브드 양방향 DC DC 컨버터의 소프트 스위칭에 대해 다루었다. 양방향 DC DC 컨버터의 한쪽 단자는 계통과 연결된 PWM 컨버터의 DC link단과 연결되고, 다른 한쪽 단자는 배터리에 연결된다. 양방향 DC DC 컨버터의 소프트스위칭에 대해 기술한 다음 인덕터의 권선 저항이 소프트 스위칭 동작에 미치는 영향을 분석하였으며, 시뮬레이션을 통하여 제안한 방식의 타당성을 검증하였다.

1. 서론

본 논문에서는 기존의 전기자동차용 배터리의 충방전을 위한 3상 인터리브드 양방향 DC DC 컨버터의 소프트 스위칭 기법과 인덕터 권선저항이 실제 스위칭 동작에 미치는 영향을 분석하였다.

3상 인터리브드 양방향 DC DC 컨버터는 각 폴의 스위칭이 120°의 위상차를 가지며 충방전 동작을 하기 때문에 동일한 수위칭 주파수를 갖는 1 모듈 1 폴 컨버터를 사용하는 경우보다 충전 및 방전 전류의 리플이 작다는 장점이 있다. 각 상은 전류 불연속 모드로 동작하며 인덕터와 스위치에 병렬로 연결된 커패시터의 공진을 이용한 ZVS 및 ZCS 동작이 이루어지도록 설계 하였다. 본 논문에서는 시스템의 출력이 300 W~3kW일 때, 인덕터의 권선저항을 고려한 회로 동작 시, 인덕터 전류와 스위치에 인가되는 전압을 분석 하였으며 시뮬레이션을 통하여 인덕터의 권선저항에 의한 감쇠가 발생하더라도 소프트스위칭 특성을 확보할 수 있다는 것을 확인하였다.

2. 시스템 구성 및 동작 원리 설명

그림 1은 1 모듈 3 폴로 구성된 양방향 DC DC 컨버터를 나타낸다.^[1] V_B 는 배터리전압을 나타내며 V_{DC} 는 인버터의 DC link 전압을 나타낸다. V_{DC} 는 400V로 일정하고 V_B 는 200V ~ 280V로 가변한다. 충전시에는 S_1 이 스위칭을 하고 S_2 에는 오프신호가 인가되어 역병렬 다이오드만 동작하게 되므로 Buck 컨버터로 동작하게 된다. 방전시에는 S_2 가 스위칭 하고 S_1 에는 오프신호가 인가되어 역병렬 다이오드만 동작하게 되므로 Boost 컨버터로 동작하게 된다. 컨버터의 최대출력 3kW

에서 전류 불연속 모드로 동작하도록 $L_a \sim L_c$ 는 200 uH로 정하였고, 스너버 커패시터는 2 nF으로 선정하였다.

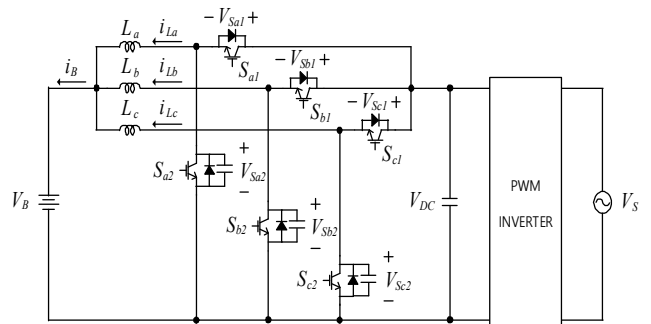


그림 1 1-모듈 3-폴로 구성된 3상 인터리브드 양방향 DC-DC 컨버터

그림 2는 출력이 3kW 미만 일 경우 S_1 의 스위칭 패턴과 S_2 의 전압 및 I_L 의 전류 파형이다. 전류 불연속 모드로 동작하기 때문에 I_L 전류가 영전류가 되는 구간이 발생하는데($t_3 \sim t_4$) 배터리 전압과 인덕터 S_2 와 병렬로 연결된 커패시터가 공진을 하게 된다. 이 구간에서 인덕터의 권선저항에 의해 전압감쇠가 심하게 발생하여 V_{S1} 이 영전압이 되지 않기 때문에 ZVS 동작이 이루어지기 어렵다.

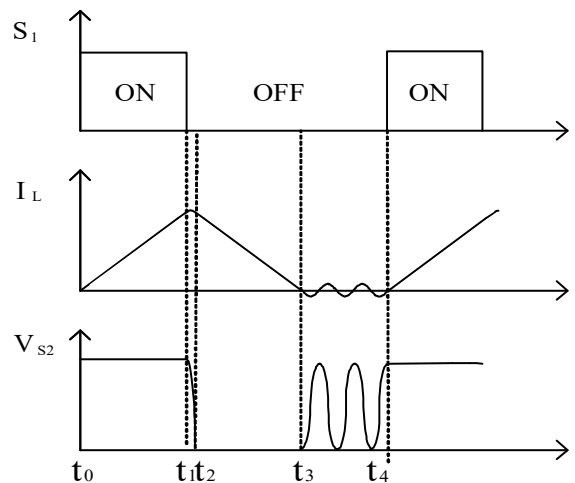


그림 2 충전용량이 3kW 미만일 경우 스위칭 패턴과 전압 및 전류 파형

3. 시뮬레이션 결과와 소프트스위칭 특성 분석

제한한 시스템의 최대출력인 3kW에서 인덕터에 흐르는 전류는 5A이다. Ritz Wire 데이터시트를 이용하여 계산한 권선 저항은 13mΩ이다. 인덕터의 권선저항을 고려하였을 때 감쇠율을 계산하면 S₁의 턴 온 시의 걸리는 전압과 흐르는 전류를 계산할 수 있다. IGBT 스위칭 동작시 시뮬레이션과 소프트스위칭 특성 분석은 한 폴의 스위치만 고려하여 수행하였다.

3.1 인덕터 권선저항에 따른 감쇠율 분석

공진전류가 흐를 때 등가회로는 RLC 직렬 공진회로와 같다. 공진시 $\alpha < \omega_o$ 이므로 부족감쇠(under damping)의 경우이다. 이때의 전류의 극소값과 극대값 각각은 식(1)과 식(2)로 표현할 수 있다.

$$|i_{ms}| = \frac{V_B}{\sqrt{L_r / C_r}} \varepsilon^{-\frac{\alpha}{\beta}(\theta + s\pi)} \quad (1)$$

$$|i_{m(s+1)}| = \frac{V_B}{\sqrt{L_r / C_r}} \varepsilon^{-\frac{\alpha}{\beta}(\theta + (s+1)\pi)} \quad (2)$$

식(1), (2)에서 α 는 감쇠율, β 는 감쇠각주파수이다. 본 회로에서 공진 주파수는 스위칭 주파수의 5배이므로 최소출력인 300W의 경우 공진이 3.5주기만큼 발생한다. 식(1)과 식(2)를 통해 감쇠정도를 계산하여 IGBT 턴 온 시 걸리는 전압을 계산할 수 있다.

3.2 시뮬레이션 결과

그림 3은 양방향 DC DC 컨버터에서 3kW로 충전하는 경우의 결과 파형이다. 공진전류가 흐르는 구간에서 공진은 반주기 동안 발생하므로 최대출력인 3kW에서 인덕터의 권선저항에 따른 손실이 가장 작다. 식(1)을 이용하여 계산한 S₁의 턴 온 시 걸리는 전압은 80mV이며 시뮬레이션에서는 89mV로 측정되었다.

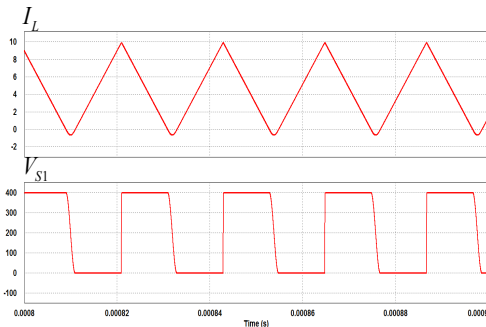


그림 3 출력 3kW일 경우 스위치의 전압, 전류 파형

그림 4는 출력 300W인 경우 I_L과 V_{S1}의 파형이다. 공진전류가 흐르는 구간에서 공진전류가 3.5주기 동안 발생하므로 최소출력인 300W에서 인덕터의 권선저항에 따른 손실이 가장 크다. 식(1)을 이용하여 계산한 턴 온 시의 전압은 181mV이다. 시뮬레이션에서는 209mV로 측정되었다.

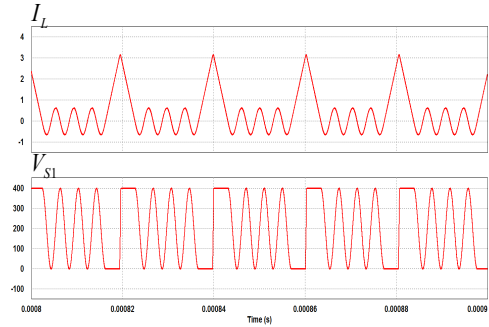


그림 4 출력 300W일 경우 스위치의 전압과 인덕터 전류 파형

3.3 소프트스위칭 특성 분석

양방향 DC DC 컨버터의 소프트 스위칭 조건을 확보하기 위하여 인터리브드 컨버터 회로를 구성하는 인덕터와 소프트스위칭을 위해 추가된 커패시터의 공진을 이용하는데, 만약 공진회로 내에 저항 성분으로 인한 감쇠가 심각하게 발생하게 되면 소프트스위칭(ZVS)조건을 만족시킬 수가 없다. 따라서 부하조건을 300W ~ 3kW로 가변하면서 스위칭 소자에 걸리는 최소 전압을 분석한 결과 부하가 가장 큰 경우와 작은 경우 각각 89mV 및 209mV에 지나지 않았다. 이 값들은 200V ~ 400V에 비해 매우 작은 값이고 0V에 가깝기 때문에 ZVS 조건을 확보했다고 판단할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 소프트 스위칭 특성을 갖는 전기자동차 배터리 충방전용 3상 인터리브드 양방향 DC DC 컨버터의 소프트스위칭 특성을 분석하였다. LC 공진을 이용한 소프트스위칭이므로 공진 주파수가 스위칭 주파수보다 높고 공진이 1주기 이내로 이루어지는 경우에는 거의 완벽하게 ZVS 조건을 확보할 수 있으나, 공진이 수주기에 걸쳐 발생하도록 하는 경우에는 공진회로 내의 저항성분에 의한 감쇠로 인하여 ZVS 조건을 확보하지 못 할 수가 있다. 본 논문에서 제안한 방식에 의한 공진 회로 동작을 분석한 결과 부하에 무관하게 항상 ZVS가 거의 가능하다는 것을 입증하였으며, 이 결과는 양방향 DC DC 컨버터의 고효율화 설계에 크게 기여할 것으로 기대된다.

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (NO. 20111020400260)

참고 문헌

- [1] 권창근, 정재현, 노의철, 김인동, 김홍근, 전대원, “전기자동차 배터리 충방전용 양방향 DC DC 컨버터의 고효율화”, 전력전자학회 2012년도 전력전자 학술대회 논문집, 2012.7, pp. 17-18.