

양방향 컨버터를 위한 디지털 주파수 적응 제어

백종복, 최우인, 조보형
서울대학교 전기. 컴퓨터공학부

Digitally adaptive frequency control for bidirectional Converter

Jongbok Baek, Woo-In Choi and Bohyung Cho
School of Electrical Engineering and Computer Science Seoul National University

ABSTRACT

본 논문에서는 직류배전 시스템의 안정적이고 효율적인 운영을 위한 핵심요소인 양방향 충전전이 가능한 컨버터의 새로운 적응제어 기법을 제안한다. 제안한 방법은 소프트 스위칭을 위해 영전류를 검출하는 대신 계산을 통하여 동작 주파수를 결정한다. 따라서 다양한 입력력 조건에서 쉽게 소프트 스위칭이 가능하다. 효율 향상을 위해 다상 인터리빙 기법을 적용하였으며 이는 전류 리플 또한 줄일 수 있어 캐패시턴스를 줄이는 효과를 얻을 수 있다. 이와 같은 방법은 영전류 검출 회로가 필요하지 않기 때문에 양방향 구동 시 회로의 구성이 간편하며 전류 제어의 불안정성이나 노이즈 문제를 완화시킬 수 있다. 제안한 방법은 동작원리 분석을 바탕으로 200W 다상 벡-부스트 컨버터의 하드웨어 실험을 통해 효율성과 타당성을 검증하였다. 넓은 범위에서 고효율을 보였으며 최대 98.5%의 효율을 나타내었다.

1. 서론

최근 에너지 고갈과 환경문제가 대두되면서 신재생 에너지에 대한 요구가 급증하고 있다. 하지만 이러한 신재생 에너지원은 기상조건에 영향을 많이 받으며 임의로 출력을 제어하는 것이 불가능하다. 따라서 이러한 에너지를 효율적으로 관리하고 전력 품질을 높이기 위해서는 에너지 저장 시스템(Energy Storage system, ESS)이 필수적이다. 하지만 기존의 교류 배전의 경우 2 stage를 통과하면서 많은 손실이 발생할 수 있다. 그렇기 때문에 이러한 손실을 줄이기 위한 연구의 일환으로 그림 1과 같은 직류 배전에 대한 연구가 이루어지고 있다. 이와 같은 직류 배전 시스템은 신재생 에너지가 주 에너지원이 될 경우 에너지 손실 저감을 극대화 할 수 있다. 따라서 이러한 기술을 효율적으로 적용시키기 위해 배터리를 충전할 수 있는 고효율 양방향 DC/DC 컨버터가 필수적이다.

고효율 양방향 컨버터를 위해 영전압 스위칭 가능한 동기 컨버터가 일반적으로 사용된다. 하지만 고정 주파수로 동작할 경우 영전압 스위칭 조건을 만족시키지 못하거나 순환전류가 커지는 단점이 있다 [1]. 따라서 본 논문에서는 넓은 범위에서 고효율로 양방향 DC/DC 전력변환을 할 수 있는 디지털 주파수 적응 제어 방법을 제안한다. 이는 센싱한 값을 계산을 통해 실시간마다 적절한 동작 주파수를 선정하여 영전압 스위칭이 가능하게 하여 고효율을 달성하게 한다. 또한 다중 인터리빙 기법을 적용하여 도통 손실 감소와 캐패시턴스 감소의 효과를 보도록 하였다. 동작원리와 시스템 설계 가이드에 대한 분석이 이루어졌으며 30-38V 버스 전압, 15-25V 배터리 전압, 200W의 다상 인터리빙 벡/부스트 양방향 컨버터 하드웨어 실험을 통해 효율성을 검증한다.

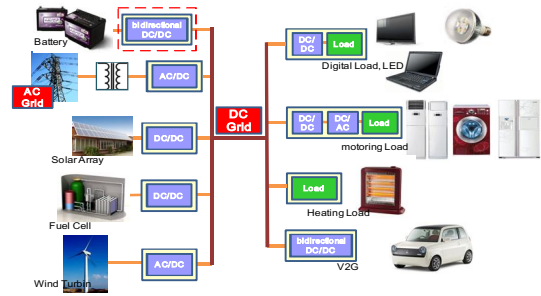


그림 1 직류 배전 시스템 구성
Fig. 1 Configuration of DC distribution system

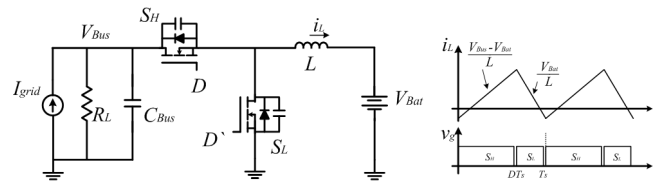
2. 디지털 주파수 적응 제어

2.1 영전압 스위칭 양방향 DC/DC 컨버터

그림 2.(a)에 나타난 하프브리지 구조의 벡-부스트 컨버터는 일반적으로 사용되는 양방향 컨버터 토폴로지이다. 이와 같은 토폴로지는 적절한 인덕턴스 값의 설계를 통해 매 스위칭마다 스위치의 전류를 양과 음으로 교번시킬 수 있기 때문에 쉽게 소프트 스위칭이 가능하다. 그림 2.(b)과 같이 인덕터 전류가 음으로 흐르는 구간 동안 두 스위치 사이에 일정한 데드 타임이 생길 경우 두 스위치가 턴오프 시 인덕터 전류가 스위치 양단의 내부 캐패시턴스를 충전시켜 영전압 스위칭이 가능하게 하며 반대의 경우도 동일하다. 따라서 영전압 스위칭을 위해서 아래 식을 만족시켜야 한다.

$$\frac{1}{2}LI_{off}^2 > C_{oss}V_{bus}^2 \quad (1)$$

이 때 L 은 인덕턴스, I_{off} 은 인덕터의 턴오프 전류, C_{oss} 는 MOSFET의 출력 캐패시턴스, V_{bus} 는 bus전압이다.



(a) 동기 컨버터 구조 (b) 영전압 스위칭 조건
그림 2 영전압 스위칭 양방향 컨버터 회로

Fig. 2 A zero voltage switching bidirectional converter 공진 주기의 1/4 이후 영전압 스위칭 조건이 이루어지기 때문에 두 스위치의 온 오프 사이의 데드 타임 T_d 은 $T_{res}/4$ 보다 커야 한다.

$$T_d > \pi \sqrt{\frac{LC_{oss}}{2}} \quad (2)$$

따라서 위 조건을 만족시킬 경우 준공진을 이용하는 양방향 벡-부스트 컨버터는 쉽게 영전압 스위칭을 할 수

있으며 다이오드의 역회복 현상을 완화시키는 장점을 얻을 수 있다. 넓은 범위에서 소프트 스위칭이 가능하다는 장점에도 불구하고 동작 특성상 큰 리플 전류는 효율 향상에 제한을 가져온다. 이를 해결하기 위해 그림 3과 같이 다상 인터리빙 기법이 적용될 수 있다. 이는 전류 분배를 통해 도통손실을 줄일 뿐만 아니라 캐패시턴스의 감소 효과도 가져올 수 있다.

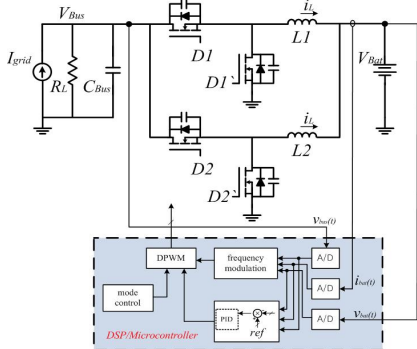


그림 3 디지털 주파수 적응 제어가 적용된 다상인터리빙 컨버터
Fig. 3 Digitally adaptive controlled multiphase interleaving converter

2.2 실시간 주파수 가변 제어

일정한 주파수 동작 시 영전압 조건을 만족시키기 위해 부하가 큰 경우가 최악 조건이 된다. 따라서 부하가 클 경우 문제가 되지 않지만 부하가 작아질 경우 순환 전류가 커지게 되며 이는 효율 향상을 저해하는 요소가 된다. 따라서 이러한 순환전류를 줄이기 위해 부하에 따라 적절한 주파수로 동작하도록 하였으며 이 주파수는 실시간으로 계산을 통해 정해진다. 이는 CRM 동작과 유사하지만 ZCD 회로가 필요하지 않으며 쉽게 양방향 구동이 가능하다는 장점을 갖는다.

벽 모드(충전모드)를 기준으로 최대 부하 $P_{o,max}$ 에서 영전압 스위칭을 만족하기 위한 최대 인덕턴스 값은 아래 식과 같이 결정되며 이 때 최소 스위칭 주파수로 동작하게 된다.

$$L = \frac{1}{2} \frac{(V_{bus} - V_{bat})}{(P_{o,max}/n_{module})} \frac{V_{bat}^2}{V_{bus}} T_{s,max} \quad (3)$$

이 때 n_{module} 은 병렬 모듈의 수이며 $T_{s,max}$ 는 최대 스위칭 주기이다. 인덕턴스 값이 정해지고 전력단이 설계 되면 제어부에서는 실시간으로 각 조건에서 동작 주파수를 결정하게 된다. 전류의 센싱은 각 상마다 할 수도 있으며 전체 배터리 전류를 센싱할 수도 있다. 이는 평균 전류를 센싱 또는 평균 전류 제어를 사용하기 때문이다.

배터리 전류 i_{bat} 을 센싱한다 가정하고 벽 모드를 기준으로 했을 때 주파수를 결정하는 과정은 아래와 같다.

각 상에 따른 기준 전류 I_{Lref} 는 식(4)와 같이 정해지며

$$I_{Lref} = I_{bat} / n_{module} \quad (4)$$

이를 바탕으로 피크 전류를 계산할 수 있는데 이 때 인덕턴스 값의 오차와 ZVS 조건을 고려하여 일정한 여유를 줄 수 있다.

$$I_{L_pk} = 2 \times (I_{Lref} + I_{offset}) \quad (5)$$

따라서 턴 온 시간과 턴 오프 시간은 아래와 같이 결정되며

$$T_{on} = L \frac{I_{L_pk}}{V_{bus} - V_{bat}}, \quad T_{off} = L \frac{I_{L_pk}}{V_{bat}} \quad (6)$$

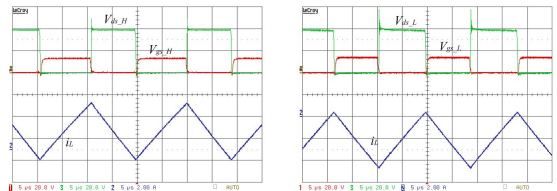
따라서 스위칭 주파수는 다음과 같이 계산된다.

$$f_{sw} = \frac{1}{(T_{on} + T_{off})} = \frac{(V_{bus} - V_{bat}) \cdot V_{bat}}{L \cdot I_{L_pk} \cdot V_{bus}} \quad (7)$$

부스트 모드(방전모드)에서도 동일한 방법으로 스위칭 주파수가 결정되며 온 오프 타임이 바뀔 뿐이다.

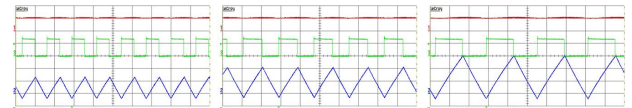
3. 실험 결과

제안한 방법을 검증하기 위해 다상 인터리빙 동기 벽-부스트 프로토타입 회로를 제작 및 실험하였다. 제작된 회로의 제반 사항은 다음과 같다: Bus 전압 V_{bus} 30V-38V, 배터리 전압 V_{bat} 15-25V, 최대 출력 P_o 200W, 최소 스위칭 주파수 20kHz이다. 알고리즘 구현 및 제어를 위해 TI사의 TMS320F28335를 사용하였으며 그림 4와 같이 각 모드에서 하드웨어 실험을 통해 제안한 방법을 검증하였으며 각 조건에 따라 주파수가 변하고 영전압 스위칭이 이루어짐을 확인하였다. 그림 5는 단일 모듈의 벽 모드를 예로 부하에 따라 동작주파수가 가변되어 영전압 조건을 만들어 주는 것을 확인할 수 있다. 마찬가지로 전압 변동에 따라서도 주파수가 가변되어 영전압 스위칭을 통한 효율 향상이 가능하다. 벽 모드(충전모드)에서 최대 96.6% 효율 부스트 모드(방전모드)에서 최대 95.4%의 효율 측정을 통해 제안한 방법의 효용성을 검증하였다.



(a) Buck mode ZVS 동작 파형 (b) Boost mode ZVS 동작 파형
그림 4 영전압 스위칭 양방향 컨버터 파형

Fig. 4 A zero voltage switching waveforms of Buck/Boost bidirectional converter



(a) $I_o=1A$ 78kHz (b) $I_o=2A$ 55kHz (c) $I_o=3A$ 38kHz
그림 5 부하에 따른 벽 모드 파형

Fig. 5 Waveforms of Buck mode for various load conditions

4. 결론

고효율 양방향 DC-DC 컨버터를 위해 넓은 범위에서 영전압 스위칭이 가능한 디지털 적응 주파수 제어 제안하였다. 제안한 방법은 DSP를 통한 주파수 가변을 통해 넓은 영역에서 쉽게 영전압 스위칭이 가능하도록 하였다. 또한 다상 인터리빙 기법이 적용되어 효율 향상과 캐패시턴스 감소를 피하였다. 제안한 방법은 TI사의 TMS320F28335를 이용하여 구현하였으며 다양한 조건의 각 모드에서 최대 96.6%의 높은 효율을 달성하였다. 이는 하드웨어 실험을 통해 고효율을 요구하는 신재생 에너지 분야의 저장 시스템 혹은 V2G 기술 등에 다양하게 적용될 수 있음을 확인하였다.

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다 (No.20104010100490)

참고 문헌

- [1] D. M. Sable, F. C. Lee and B. H. Cho, "A zero-voltage-switching bidirectional battery charger/discharger for the NASA EOS satellite," in Proc. IEEE APEC, Feb. 1992, pp.614-621.