2-스위치 비절연형 양방향 승·강압 DC/DC 컨버터

유준우[1], 김진우[1], 강민경[1], 송용재[2], 김은수[1†]
전주대학교[1], 비나텍(주)[2]

2-Switch Non-isolated Bidirectional Buck-Boost DC/DC Converter

Jun-woo Yoo[1], Jin-woo Kim[1], Min-Gyeong Kang[1], Yongjae Song[2], Eun-Soo Kim[1†]
Jeonju University[1], VinaTech[2]

1. 서 론

지속 가능한 미래를 위한 친환경 교통수단의 필요성은 전기 및 수소 자동차, 특장차, 농기계 등에서 빠르게 대두되고 있다. E-mobility의 확산은 배출가스 저감, 에너지 효율성 향상, 유지비 절감 등의 이점을 제공하며 글로벌 시장에서 급성장하고 있다. 이러한 수송기기의 보급을 촉진하기 위해서는 경량화, 고효율, 가격 저감, 고신뢰성을 만족시키는 전장 부품 기술의 발전이 필수적이다. 특히, 리튬 이차전지에 비해 긴 수명과 고속 충·방전 성능을 갖춘 슈퍼커패시터는 전력 저장 및 관리 분야에서 중요한 역할을 하고 있다. 슈퍼커패시터는 빠른 에너지 전달이 가능해 전기차, 특장차, 농기계 등의 고효율 전력 관리 시스템에 적합하며, 배터리 부하를 줄여 시스템 수명을 연장하고 신뢰성을 높이는 데 기여한다. 본 연구에서는 이러한 슈퍼커패시터 기반 하이브리드 전력제어시스템을 E-mobility에 적용하고, PSIM 시뮬레이션을 통해 제어 성능을 구현 및 검증할 계획이다. 이를 통해 전기 및 수소 자동차뿐만 아니라 특장차와 농기계와 같은 다목적 수송기기에 적용 가능한 기술적 발전을 모색하고자 한다.

2. 제안한 2-스위치 비절연형 양방향 승·강압 DC/DC 컨버터

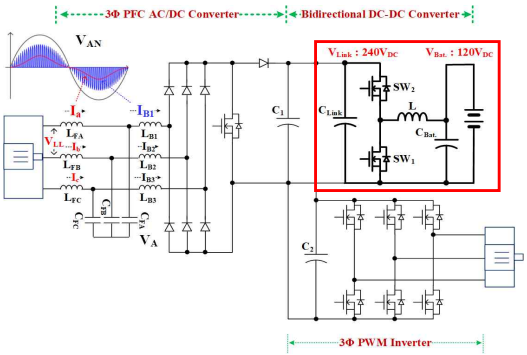

그림 1. 2-스위치 비절연형 양방향 승·강압 DC/DC 컨버터

그림 1의 양방향 Buck-Boost 컨버터는 전압 승압(Boost)과 강압(Buck) 모드에서 양방향 전력흐름을 처리하는 회로로, 인덕터를 통해 에너지를 저장하고 방출하면서 전력변환을 수행한다.[1] Boost 모드에서는 인덕터가 전류를 저장한 후 배터리전압($V_{Bat.}$)을 상승시키며, Buck 모드에서는 링크전압(V_{Link})을 낮춰 배터리전압($V_{Bat.}$)을 조정한다. 인덕터설계는 스위칭주파수와 전류리플(ΔI_L)을 고려하여 이루어지며, 아래 식(1)을 이용하여 CCM으로 동작하기 위해 인덕터의 크기를 15 uH로 설계하였다. 이때 인덕터값이 클수록 전류리플이 줄어들지만, 너무 높은 주파수는 스위칭손실을 증가시킨다. 양방향 FET 스위치를 통해 전력흐름의 방향에 따라 동작모드를 전환하며, 부하 요구에 따라 에너지를 공급하거나 회생제동시 배터리에 저장한다. 이 컨버터는 $120V_{DC}$ 배터리로부터 $240V_{DC}$ 링크단을 제어하며, 슈퍼커패시터와 결합해 고효율 에너지관리시스템을 구현한다.

$$L > \frac{V_{Link} \cdot DT}{2(I_L - I_{\min})} \quad (1)$$

2.1 전력제어 시스템 동작 컨셉

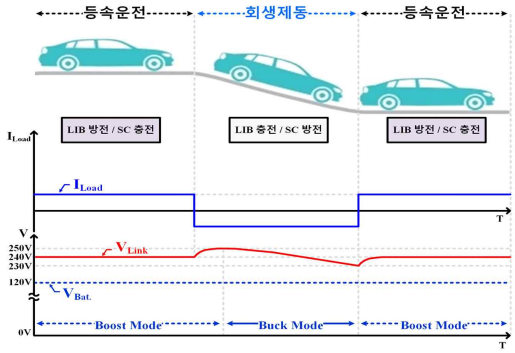

그림 2. 양방향 DC/DC 컨버터 동작

그림 2에 나타낸 바와 같이 Boost 모드에서는 제어시스템이 링크전압(V_{Link})을 $240V_{DC}$로 유지하며, 배터리전압($V_{Bat.}$)을 전압 상승을 통해 전력전달하고 필요한 전력을 안정적으로 공급한다. 회생제동이 발생하면 시스템은 링크전압(V_{Link})이 $250V_{DC}$로의 상승에 따라 Duty를 감소시키고, Duty가 0에 도달하면 자동으로 Buck 모드로 전환되어 링크전압(V_{Link})이 안정적으로 감소한다. 이때 회생제동으로 발생한 에너지는 저장되거나 배터리로 전달되어 에너지효율이 극대화된다. Buck 모드에서 링크전압이 $230V_{DC}$ 미만으로 떨어지면 시스템은 다시 Boost 모드로 전환되어 링크전압(V_{Link})을 상승시킨다. 이와 같은 양방향전력변환은 전압의 상승과 하강을 효율적으로 처리하여 전력변환 손실을 줄이고 시스템의 안정성을 유지한다. 이러한 제어 시스템은 다양한 운행조건에서도 안정적인 전력공급을 보장하며, 회생제동과 에너지 재활용을 통해 전기차와 수소차의 전반적인 에너지효율을 향상시킨다.

3. PSIM 시뮬레이션 구현

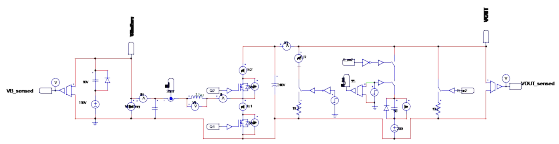

그림 3. PSIM으로 구현한 양방향 승·강압 DC/DC 컨버터

그림 3은 PSIM 시뮬레이터로 구현한 비절연형 양방향 승/강압 DC/DC 컨버터이다. 크게 주회로, C-Block, 레퍼런스 요소로 구성되어 있다. 실질적인 회로동작은 주회로에서 이루어지며, 하나의 인덕터 및 두 개의 스위치와 커패시터로 이루어져 있다. C-Block은 주회로동작을 위한 PWM 생성, ADC, PID 제어 동작을 하는 블록으로 이루어져 있다. 배터리단은 120V_{DC}, 링크단은 240V_{DC}로 제어를 하게 된다. 아래의 표1은 PSIM으로 구현한 주회로의 파라미터이다.

표 1. 비절연형 양방향 컨버터 파라미터

Power	3 kW
L	15 uH
C_{Link}(Super Capcitor)	0.05 F
V_{Bat}(Nominal)	120 V_{DC}
V_{Link}	240 V_{DC}
f_s	100 kHz

3.1 C-Block 동작

이 시스템의 C-Block은 양방향 Buck-Boost 컨버터에서 ADC, PWM, PI 제어기를 사용한 디지털 제어 알고리즘을 구현하여 전압과 전류를 제어한다. 먼저, ADC는 전압과 전류 등의 입력 신호를 디지털화한다. ADC의 게인(G_{adc})은 아래의 식 (2)를 활용하여 구할 수 있다. 샘플링이 이루어질 때 샘플된 값들은 PI 제어기에 전달되며, PI 제어기는 입력 신호와 목표 값의 오차를 계산하여 보상 신호를 생성한다. Boost 동작시 전류 센싱값이 최대값에 도달하게 되면, 일정한 step값 만큼 전류 레퍼런스 값이 줄어들 게 하여 과전류를 방지하는 알고리즘을 추가했다. PWM 모듈은 상승/하강 카운터를 기반으로 삼각파 신호를 생성하며, 이 신호는 PI 제어기의 출력과 비교된다. 이 비교 결과로 생성된 PWM 신호는 스위칭 장치로 전달되어 시스템의 Duty 사이클을 업데이트하며, 데드타임을 고려하여 스위칭 신호(SW_1, SW_2)를 생성한다. 마지막으로, 모드 전환 알고리즘은 Boost 모드 진행 중 회생제동에 따른 PWM Duty사이클이 특정 값(Duty 0) 이하로 떨어지면 Buck 모드로 전환한다. 이후 Buck 모드에서도 마찬가지로 Duty값이 0 이하로 떨어지면 Boost 모드로 동작한다. 이 모든 과정에서 디지털 제어기와 비교기를 사용해 안정적인 전압 및 전류 제어를 달성한다.

$$digital_value = sensed_value \times \frac{2^{12}-1}{3} \times coef \qquad (2)$$

3.2 제어 시퀀스

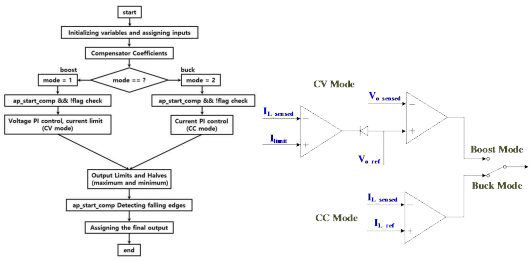

그림 4.제어 시퀀스

Boost 동작 시 CV(Constant Voltage)제어를 진행한다. 실제 전압과 레퍼런스 전압을 통해 제어 중 인덕터 전류의 제한 값을 두어 해당 동작 시 과전류 검출 시 전압 레퍼런스를 낮춰 실제 전압 값을 낮추는 알고리즘을 갖는다. 이를 통해 Boost 동작 시 발생할 수 있는 과전류를 방지한다. Buck 동작 시에는 CC(Constant Current)제어를 하게 된다.[2]

3.3 안정적인 모드 변환

급격한 모드 전환으로 인한 과전류 발생을 방지하기 위해서는 안정적인 모드전환이 필수적이다. 이를 위해, Boost 동작 중 회생동 발생 시 250V_{DC}에 도달하게 된다. 이때, PI 제어기의 에러값에 따라 PWM의 Duty 비율(Duty Ratio)이 점차 감소하며, Duty 값이 0에 도달하게 된다. 이 과정에서 전류가 0에 도달하게 되면, 안정적인 모드 전환을 통해 Buck 모드로 전환된다. 반대의 상황에서는 Buck 모드에서 슈퍼커패시터의 전압이 감소하며, 설정된 모드 전환 임계전압인 230V_{DC}에 도달하기 전에 Duty 비율을 점진적으로 감소시켜 Duty값이 0에 도달하도록 제어된다.

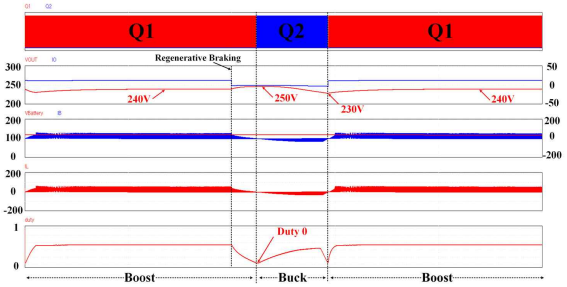

그림 5. 시뮬레이션 결과 파형

4. 결론

시뮬레이션 결과에 따라, Boost 모드에서 회생제동이 발생할 때 전압이 250V_{DC}로 상승하고 에러값에 따라 Duty 비율이 자연스럽게 감소하면서 전류가 점진적으로 0에 가까워지는 양상을 확인할 수 있다. 이를 통해 Duty값이 0에 도달했을 때 안정적으로 Buck 모드로 전환되었음을 시뮬레이션 결과에서 확인할 수 있다. 반대로, Buck 모드에서 슈퍼커패시터의 전압이 서서히 감소함에 따라 Duty 비율 역시 점차적으로 감소하며, 230V_{DC}에 도달하기 전에 Duty가 0으로 조정되었음을 알 수 있다. Duty가 0에 도달한 후에는 다시 Boost 모드로의 전환이 이루어졌으며, 이러한 전환 과정에서 전류 변화가 급격하지 않고 안정적인 양상을 보임으로써 모드 전환 시 과전류를 방지하는 제어 알고리즘이 효과적으로 작동했음을 시뮬레이션 결과를 통해 알 수 있었다. 또한 Boost 모드에서는 240V_{DC}로의 전압 제어가, Buck 모드에서는 120V_{DC}로의 전압을 제어하는 것을 확인하여 실제 시제에 적용할 수 있는 가능성을 확인했다.

이 논문은 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로
한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임
(RS-2022-KP002707, 전북 지역에너지 클러스터 인재양성)

참 고 문 헌

[1] J. -S. Lai and D. J. Nelson, "Energy Management Power Converters in Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles," in Proceedings of the IEEE, vol. 95, no. 4, pp. 766-777, April 2007.

[2] W. Jianhua, Z. Fanghua, G. Chunying and C. Ran, "Modeling and analysis of a buck/boost bidirectional converter with developed PWM switch model," ICPE, 2011, pp. 705-711.