

## ESS 구성을 위한 고효율 3-레벨 양방향 인버터

권오원<sup>1</sup>, 김준석<sup>1</sup>, 김광섭<sup>1</sup>, 차우준<sup>1</sup>, 권봉환<sup>1</sup>, 최정환<sup>2</sup>, 김수홍<sup>2</sup>, 이재근<sup>2</sup>  
 포항공과대학교<sup>1</sup>, LG이노텍<sup>2</sup>

### High Efficiency 3-level bi-directional inverter for ESS

O-Won Kwon<sup>1</sup>, Jun-Seok Kim<sup>1</sup>, Kwang-Seop Kim<sup>1</sup>, Woo-Jun Cha<sup>1</sup>, Bong-Hwan Kwon<sup>1</sup>,  
 Jung-Hwan Choi<sup>2</sup>, Soo-Hong Kim<sup>2</sup>, Jae-Geun Lee<sup>2</sup>  
 Pohang University of Science and Technology (POSTECH)<sup>1</sup>, LG Innotek<sup>2</sup>

#### ABSTRACT

본 논문에서는 ESS 구성을 위한 고효율 3-레벨 양방향 인버터를 제안한다. 제안된 인버터는 저주파 레그와 고주파 레그로 구성되어, dc-link 전압과 계통간의 양방향 전력 변환을 수행한다. 제안된 인버터는 3-레벨의 전압을 제공하며 기존 풀브리지 타입의 2-레벨 인버터에 비해 고조파 성분이 적고 필터의 크기를 줄일 수 있다. 또한, 소자들에 걸리는 전압 스트레스가 낮고 동작 중에 스위칭 소자의 바디 다이오드를 사용하지 않기 때문에 도통 손실과 스위칭 손실을 최소화 할 수 있다. 따라서 제안하는 양방향 인버터는 기존 2-레벨 인버터 대비 높은 계통 전류 품질과 높은 효율을 제공한다. 최종적으로 시제품을 제작하여 제안하는 양방향 인버터의 타당성을 검증하였다.

#### 1. 서론

화석연료 고갈, 지구온난화와 이산화탄소 배출 등의 환경적인 문제들로 인해 신재생 에너지에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 그러나 신재생 에너지의 간헐적인 전력 생산은 계통 전력의 질에 부정적인 영향을 미친다. 에너지 저장 시스템(ESS)은 이와 같은 문제를 완화시키는데 중요한 역할을 하고 추가적으로 피크부하저감과 정전관리의 역할을 수행한다.<sup>[1]</sup>

ESS에서는 배터리와 계통간의 양방향 전력 변환을 위해 계통 연계형 양방향 인버터를 필요로 한다. 기존의 계통 연계형 양방향 인버터들은 2-레벨 풀브리지 기반의 인버터를 사용한다. 하지만, 이러한 구조의 인버터는 큰 필터를 필요로 하고 높은 전압 스트레스를 가지는 단점이 있다.<sup>[2]</sup> 이로 인해 높은 스위칭 손실을 가지고, 큰 도통 저항을 가지는 스위치의 사용으로 도통 손실 또한 크다. 결과적으로 전체적인 시스템의 효율이 낮아진다.

본 논문에서는 앞서 언급한 기존의 2-레벨 풀브리지 기반 인버터의 단점들을 개선한 고효율의 5kW급 양방향 인버터 회로를 제안한다. 제안하는 인버터는 2개의 스위치로 이루어진 저주파 레그와 3-level voltage cell로 이루어진 고주파 레그로 구성된다. 계통 주파수로 동작하는 저주파 레그는 매우 낮은 스위칭 손실을 가진다. 고주파 레그의 스위치는 전압 스트레스가 절반으로 줄어 낮은 스위칭 및 도통 손실을 가진다. 최종적

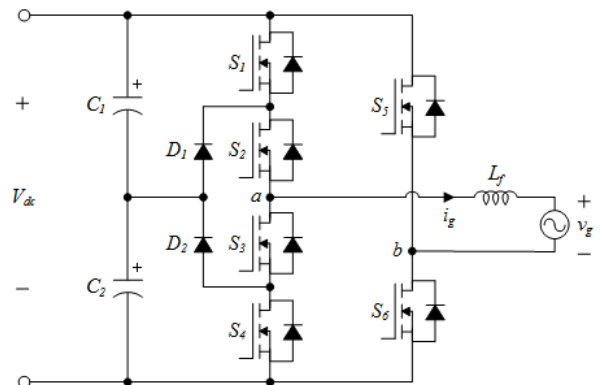


그림 1 제안된 3 레벨 계통 연계형 양방향 인버터  
 Fig. 1 Proposed 3-level bi-directional inverter

으로 5kW급 시제품을 완성하였고, 이를 통한 실험결과를 바탕으로 제안하는 인버터의 우수성 및 성능을 검증하였다.

#### 2. Three-level 계통 연계형 인버터

##### 2.1 시스템 구성 및 특징

그림 1은 본 논문에서 제안하는 ESS 구성을 위한 3-레벨 양방향 인버터로, 2개의 dc-link 커패시터  $C_1, C_2$  2개의 다이오드  $D_1, D_2$  4개의 고주파 스위치  $S_1-S_4$  2개의 저주파 스위치  $S_5, S_6$  와 한 개의 필터 인덕터  $L_f$  로 이루어져있다. 저주파 레그는 2개의 저주파 스위치로 이루어져있고 계통전압과 동기화되어 동작한다. 고주파 레그는 3-level voltage cell로 이루어져 있어 3가지의 전압 레벨을 제공한다. 또한, 고주파 레그는 제안하는 인버터가 높은 역률과 낮은 고조파 왜곡을 가지도록 계통 전류를 제어하는 역할을 한다.

##### 2.2 동작원리 및 제어 알고리즘

제안하는 인버터는 전력 전달 방향에 따라 Rectifier 모드 또는 Inverter 모드로 동작한다. Rectifier 모드에서는 계통의 전력을 dc-link로, Inverter 모드에서는 dc-link의 전력을 계통으로 전달시킨다. 두 모드는 전류의 방향만 반대이고 동일한 제어 방식을 이용하기 때문에, 본 논문에서는 Rectifier 모드만 자세히 다루도록 한다.

Rectifier 모드에서 저주파 레그의 스위치는 계통 전압과 동기화되어 계통 전압이 양인 경우  $S_6$ 가 켜지고 음인 경우  $S_5$ 가 켜진다.  $S_1$ 과  $S_3$ ,  $S_2$ 와  $S_4$ 는 각각 상보적으로 동작한다. 따라서 제안된 양방향 인버터는 오직  $S_1$ ,  $S_2$ 의 듀티비만 조정 함으로써 양방향 전력변환이 가능하다. 제안하는 양방향 인버터는 고주파 레그와 저주파 레그의 스위칭 상태에 따라  $v_{ab}$ 를 총 5개의 전압을 표현할 수 있다( $V_{dc}$ ,  $V_{dc}/2$ ,  $0$ ,  $-V_{dc}/2$ ,  $V_{dc}$ ). 계통전압  $v_g$ 를 5개의 전압을 기준으로 나누어보면,  $v_g$ 는 4개의 mode로 분류된다. mode1 ( $V_{dc}/2 < v_g < V_{dc}$ ), mode2 ( $0 < v_g < V_{dc}/2$ ), mode3 ( $-V_{dc} < v_g < 0$ )과 mode4 ( $-V_{dc} < v_g < -V_{dc}/2$ )이다. 각 mode에서  $S_1$ ,  $S_2$ 의 듀티비  $D_1$ ,  $D_2$ 는 인덕터  $L_f$ 의 volt-second 평형 조건에 의해 다음과 같이 공칭 듀티비와 듀티비 변화율 $\Delta D$ 의 합으로 나타낼 수 있다.

$$D_1 = \frac{2v_g}{V_{dc}} - 1 + \Delta D, \quad D_2 = 1, \quad \text{mode1} \quad (1)$$

$$D_1 = 0, \quad D_2 = \frac{2v_g}{V_{dc}} + \Delta D, \quad \text{mode2}$$

$$D_1 = \frac{2v_g}{V_{dc}} + 1 + \Delta D, \quad D_2 = 1, \quad \text{mode3}$$

$$D_1 = 0, \quad D_2 = 2 + \frac{2v_g}{V_{dc}} + \Delta D, \quad \text{mode4}$$

듀티비 변화율 $\Delta D$ 는 직접적으로 계통 전류 제어에 기여한다. 듀티비 변화율 $\Delta D$ 는 계통 전류 기준을 따라가도록 하는 역할이고 계통 전류 기준  $i_{gref}$ 과 측정된 계통 전류  $i_g$ 의 차이가 전류 제어를 거쳐 나오게 된다.

### 3. 실험 결과

ESS 구성을 위한 3-레벨 양방향 인버터의 동작 및 성능을 검증하기 위해 5kW 시작품을 제작하여 실험을 진행했다. 실험 조건은 스위칭 주파수 20kHz, 계통 전압  $v_g$ 는 220Vrms, 60Hz이며,  $V_{dc}$ 는 450V,  $L_f$ 은 1mH 로 설정했다.

그림 2 는 시작품을 통해 얻은 실험결과이며 계통전압  $v_g$ , 계통전류  $i_g$ 와  $v_{ab}$ 의 파형을 보인다.  $v_{ab}$ 의 파형을 보면 앞서 언급한 5개의 전압 레벨이 잘 표현되고 있음을 확인할 수 있다. 또한 계통전류  $i_g$ 의 파형은 왜곡 없는 정현파임을 확인할 수 있으며, 정격에서 총고조파왜곡은 4% 미만이다. 그림 3은 부하에 따른 효율을 나타낸다. 최대 효율 및 정격 효율은 각각 98.2%, 98%로 측정되었다. 이 실험 결과를 통해, 제안하는 인버터가 3-레벨 회로 구성과 하이브리드 스위칭 방식을 통해 높은 품질의 출력 전류와 고효율을 달성하는 것을 알 수 있다.

### 4. 결론

본 논문에서는 고효율의 장점을 가지는 ESS 구성을 위한 3-레벨 양방향 인버터를 제안하였다. 제안된 인버터는 3-레벨 회로 구성과 하이브리드 스위칭 방식을 통해 기존의 2-레벨 풀브리지 기반의 양방향 인버터의 단점인 높은 전압 스트레스와 이에 따른 높은 전력 손실을 극복하고 최대효율 98.2%의 고효율을 달성했다.

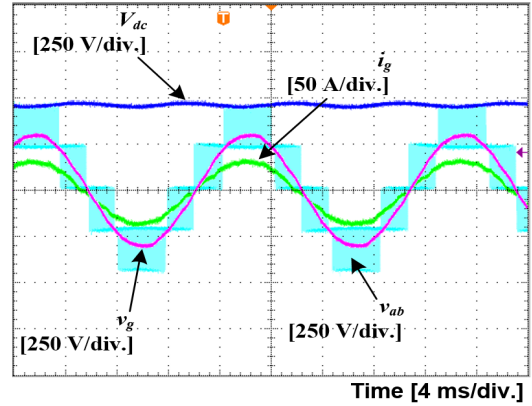


그림 2 Rectifier 모드에서  $v_{ab}$ , 계통 전압 및 전류, dc-link 전압의 실험 파형

Fig. 2 Experimental result of the 3-level voltage  $v_{ab}$ , the grid voltage  $v_g$ , the grid current  $i_g$ , and dc-link voltage  $V_{dc}$  in rectifier mode

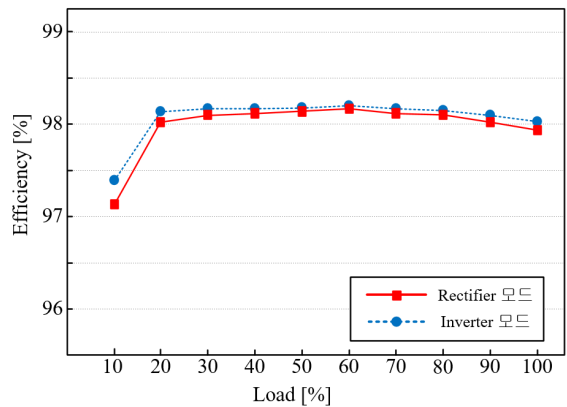


그림 3 부하에 따른 효율

Fig. 3 Measured power efficiency under entire load conditions

"본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 ICT 명품인재양성사업의 연구결과로 수행되었음" (IITP-R0346-16-1007)

### 참고 문헌

- [1] D. Tran and A. M. Khambadkone, "Energy management for lifetime extension of energy storage system in micro-grid applications", IEEE Trans. Smart Grid, Vol. 4, No. 3, pp. 1289-1296, 2013, Sep.
- [2] Sung-Ho Lee, "Single-Phase transformerless bidirectional inverter with high efficiency and low leakage current", IET Power Electronics, Vol. 7, No. 2, pp. 451-458, 2014, Feb.