

# 디지털로 제어되는 저압 직류 배전용 절연형 양방향 CLLC 공진형 컨버터

정지훈, 김호성, 류명효, 김종현, 김태진, 백주원

한국전기연구원

## Isolated Bidirectional CLLC Resonant Converter using Digital Control for LVDC Distribution System

Jee-Hoon Jung, Ho-Sung Kim, Myung-Hyo Ryu, Jong-Hyun Kim, Tae-Jin Kim, Ju-Won Baek

Korea Electrotechnology Research Institute

### Abstract

A bidirectional full-bridge CLLC resonant converter using a digital control method is proposed for a LVDC power distribution system. This converter can operate under high power conversion efficiency since the CLLC resonant network has soft switching capability for primary switches and output rectifiers. In addition, the power conversion efficiency of any directions is exactly the same as each other because of the symmetric structure of the converter. Intelligent digital control methods are proposed to regulate output voltage under any power flow directions. A 5kW prototype converter was designed for a high-frequency galvanic isolation of 380V dc buses using a digital signal processor to verify the performance of the proposed topology and algorithms.

### 1. 서론

기존의 교류배전 시스템 대신에 직류배전 시스템을 가정이나 빌딩에 사용하면 전자기기에서 사용되는 전력의 변환효율이 증가하고 신재생 에너지원과 같은 분산전원의 계통 연결성이 향상되는 장점이 있다 [1]. 그러나 직류 배전 시스템을 효과적으로 구축하기 위해서는 기존의 교류배전 시스템과 전력을 교환할 수 있도록 연계되어야 하며, 이를 위해서는 양방향 전력변환장치를 통한 직류 배전 전압의 안정화와 전력교환 제어가 요구된다. 그 중에서도 교류배전 전원과의 절연을 위해 몇 가지 종류의 고주파 절연형 양방향 DC-DC 컨버터가 개발되었다. 부스트 타입의 풀브릿지 ZVS PWM DC-DC 컨버터가 많이 소개되고 있는데 스너버 회로의 종류에 따라 구분된다 [2]-[3]. 이 토폴로지는 승압과 감압이 가능하기 때문에 변동이 큰 입출력 전압을 갖는 응용분야에 적합하지만 전압 스트레스 저감용 스너버 회로가 필요하며, 승압 시 효율이 감소된다. 양방향 위상변이형 풀브릿지 컨버터는 스위치의 ZVT 동작이 가능하여 전력변환 효율이 높은 장점이 있다 [4]. 하지만 감압 동작만이 가능하여 승압 동작이 요구될 시 제어가 복잡한 한계가 있다.

스너버가 없는 양방향 풀브릿지 CLLC 컨버터가 UPS 시스템용으로 소개되었다 [5]. 이 토폴로지는 양방향으로 소프트 스위칭이 가능하며 스위치의 전압이 입출력 전압에 의해 제한되어 스너버가 필요 없다. 하지만 입출력 전압의 차이가 클 경우 변압기의 턴 비 차이에 의해 동작점이 크게 변하여 최적 설계가 어려운 단점이 있다. 본 논문에서는 380V의 직류배전 시스템용 고주파 절연 장치로 양방향 CLLC 컨버터를 사용하여 상기의 문제를 피하도록 설계하였다. 소프트 스위칭 조건과 FHA를 이용한 전압이득 분석으로 컨버터가 고효율에서 동작할 수 있도록 설계방법을 제시한다. 또한 컨버터가 효과적으로 전력변환 흐름을 제어할 수 있도록 디지털

제어 알고리즘을 제안하였다. 5kW급 시제품을 제작하여 컨버터의 동특성, 전력제어, 효율 등의 성능을 검증하였다.

### 2. 본론

#### 2.1 양방향 CLLC 공진형 컨버터의 구조

그림 1은 본 논문에서 제안하는 양방향 CLLC 공진형 컨버터의 구조이다. 1차측과 2차측이 변압기를 사이에 두고 정확히 대칭적으로 구성되어 있으며, 변압기의 턴 비는 1:1이다. 스위치는 전력변환 방향에 따라 파워링 모드와 제너레이팅 모드로 구분되어 동작하며, 파워링 모드 시 1차측이 인버팅 스테이지, 2차측이 정류 스테이지가 된다. 공진 네트워크는 공진 인덕터  $L_{r1}$ 과  $L_{r2}$ , 공진 캐패시터  $C_{r1}$ 과  $C_{r2}$ 가 서로 쌍을 이루어 공진을 일으켜 전력을 변환하는 구조이다.

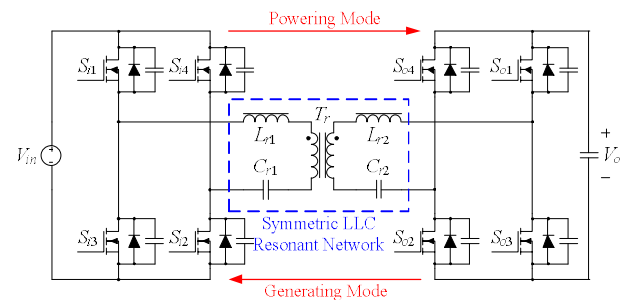


그림 1 제안하는 양방향 CLLC 공진형 컨버터의 구조

#### 2.2 FHA를 이용한 컨버터의 전압이득 특성 분석

FHA(First Harmonic Approximation)란 컨버터의 기본 주파수 성분만 추출하여 동작을 분석함으로써 모델의 해석을 간결화하는 방법이다. 그림 2는 제안한 컨버터의 FHA 등가회로로 이를 이용하여 컨버터의 기본 주파수 성분에 대한 전력변환 분석을 할 수 있다. 그림 3은 FHA를 이용하여 얻은 양방향 CLLC 공진 컨버터의 부하에 따른 전압이득 곡선이다. 컨버터의 입출력 전압 조건으로부터 필요한 전압이득을 만족시키는 공진 네트워크의 설계를 그림 3과 같은 전압이득 곡선으로부터 확인할 수 있다.

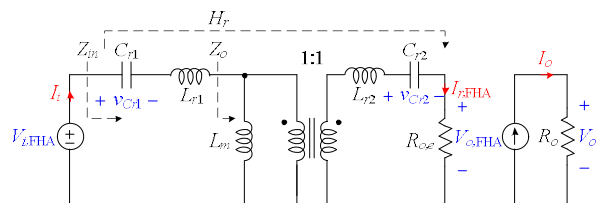


그림 2 양방향 CLLC 공진형 컨버터의 FHA 등가 모델

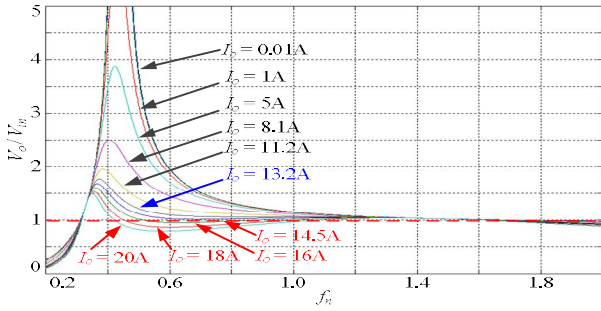


그림 3 컨버터의 부하에 따른 전압 이득 곡선

### 2.3 컨버터의 자화 인덕턴스 설계

양방향 CLLC 공진형 컨버터의 입력전류 형상으로부터 인버팅 스테이지 스위치의 ZVS는 데드타임과 스위치 출력 캐패시턴스에 의해 결정됨을 알 수 있다. 또한 정류 스테이지의 ZCS 조건은 스위치의 최대 동작주파수가 공진 주파수 이하로 동작하는 것이다. 따라서 상기에 언급한 두 가지 소프트 스위칭 조건으로부터 식 (1)과 같이 변압기 자화 인덕턴스의 최대치를 설계할 수 있다.

$$L_m \leq \frac{t_{dt}}{16C_s f_{s,max}} \square \frac{t_{dt}}{16C_s f_r} \quad (1)$$

### 2.4 양방향 전력변환을 위한 제어 알고리즘

양방향 전력변환 흐름의 제어를 위해서는 어느 지점에서 전력변환 방향을 어떻게 결정할 지 판단해야 한다. 이를 위해서 출력전압의 이력을 갖는 데드밴드 제어 알고리즘을 구현하였다. 본 제어기를 통하여 직류 버스의 출력전압 크기만으로도 정확한 양방향 전력흐름의 제어가 가능하다. 제안하는 데드밴드 제어 알고리즘과 CLLC 공진형 컨버터의 PFM 제어를 적절하게 조합한 스위치 제어 알고리즘을 설계하여 컨버터의 출력전압과 전력흐름을 동시에 제어할 수 있도록 설계하였다. 그림 4는 제안하는 데드밴드 제어기와 스위치 제어 알고리즘이다.

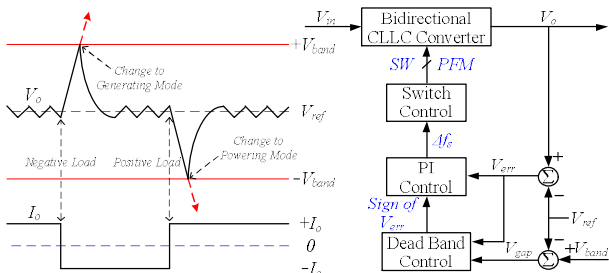


그림 4 데드밴드 제어기와 스위치 제어 알고리즘

### 2.5 실험 결과

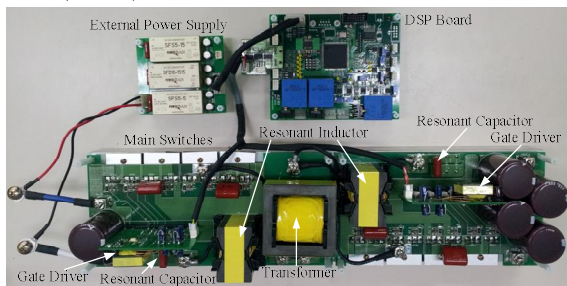


그림 5 5kW 양방향 CLLC 공진형 컨버터 시제품

그림 5는 5kW급 컨버터의 시제품으로 파워 스테이지 보드와 DSP 제어보드로 구성되어 있다. 그림 6은 시제품

컨버터의 전부하 동작과형과 ±2.5kW 스텝응답 동작과형이다. 실험과형을 통해 단방향과 양방향 전력변환이 잘 이루어지는 것을 확인할 수 있다. 그림 7은 시제품 컨버터의 부하에 따른 전력변환 효율이다. 최대 효율은 97.8%로 2.5kW 이상의 고부하 영역에서 효율이 높은 것을 확인할 수 있다. 이는 순환전류에 의한 도통 손실이 고부하 영역에서는 그 비중이 줄어들기 때문이다.

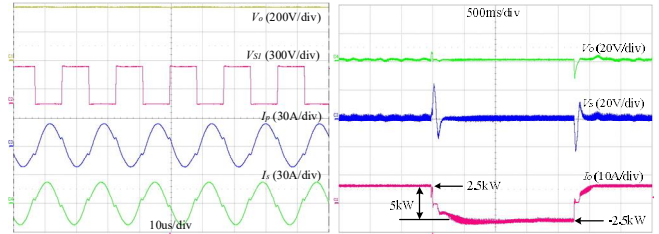


그림 6 시제품 컨버터의 전부하와 스텝응답 실험과형

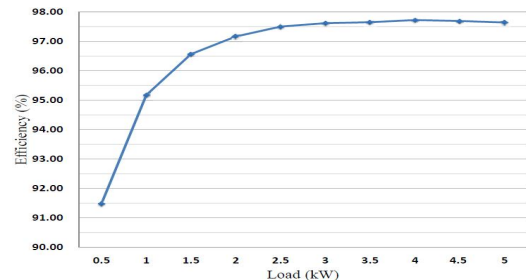


그림 7 시제품 컨버터의 부하에 따른 효율

## 3. 결론

본 논문에서 직류배전용 고주파 절연을 위한 고효율 양방향 CLLC 공진형 컨버터를 제안하였다. 고효율 전력변환을 위하여 전압이득 특성과 자화 인덕턴스 설계 방법을 보였으며, 효과적인 양방향 전력 제어를 위하여 데드밴드 제어기와 이를 이용한 스위치 제어 알고리즘을 제안하였다. 5kW급 시제품 컨버터를 제작하여 제안한 설계와 제어 알고리즘의 유효성을 보였으며, 97.8%의 전력변환 효율을 기록하였다.

## 참고 문헌

- [1] D. Boroyevich, I. Cvetkovic, D. Dong, R. Burgos, F. Wang, and F. Lee, "Future Electronic Power Distribution Systems -A Contemplative View-", 12th International Conf. Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), pp. 1369-1380, 2010.
- [2] Y. Miura, M. Kaga, Y. Horita, and T. Ise, "Bidirectional Isolated Dual Full-bridge dc-dc Converter with Active Clamp for EDLC ", IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), pp. 1136-1143, 2010.
- [3] T.-F. Wu, Y.-C. Chen, J.-G. Yang, Y.-C. Huang, S.-S. Shyu, and C.-L. Lee, "1.5 kW Isolated Bi-directional dc-dc Converter with a Flyback Snubber", International Conf. Power Electronics and Drive Systems (PEDS), pp. 164-169, 2009.
- [4] S. Inoue and H. Akagi, "A Bidirectional dc-dc Converter for an Energy Storage System with Galvanic Isolation", IEEE Trans. Power Electronics, Vol. 22, No. 6, pp. 2299-2306, 2007, November.
- [5] W. Chen, P. Rong, and Z. Lu, "Snubberless Bidirectional dc-dc Converter with New CLLC Resonant Tank Featuring Minimized Switching Loss", IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol. 57, No. 9, pp. 3075-3086, 2010, September.