

# 직류배전을 위한 공진형 플라이백 컨버터

\*한 병문, 공 석주, 박 인식  
명지대학교 전기공학과

## Resonant Fly-back Converter for Direct-Current Distribution

\*Byung-Moon Han, Suk-Joo Gong, In-Suk Park  
Myongji University

Abstract - This paper describes a resonant fly-back converter for high-voltage dc distribution system. The proposed converter operates to change high-voltage dc into low-voltage dc with isolation and large converting ratio. The converter has a thyristor switch with an LC resonant circuit for commutation in the primary side of the gap transformer. The operation of the proposed system was verified through computer simulations and hardware scaled-model tests. The proposed system can be implemented with commercially available components and proven technologies.

### 1. 서론

전기가 처음 상용 판매되던 1800년대 말에는 직류발전기로 전기를 생산하여 근거리에서 위치한 수용가에 선로를 통해 공급하였다. 그후 개발된 변압기는 교류발전기로 생산된 전기를 원거리에서 용이하게 전송 가능하였다. 따라서 이후 전기의 상용 판매는 전 세계적으로 교류방식이 채택되었다.

그런데 교류방식의 경우 선로의 인덕턴스에 의한 전압강하와 이에 따른 무효전력 소모 문제로 수용가가 이산된 산간이나 오지에서는 전기의 효율적인 공급이 어렵다. 이를 개선하기 위해 최근 고려되고 있는 방식이 직류배전이다. 직류고압송전은 다이리스터의 점호각에 따라 결합된 교류측에서 무효전력 소모를 야기하여 직류배전에 그대로 적용이 불가능하다. 또한 직류송전에서는 전력이 송전단과 수전단 양방향으로 이동 가능하나, 직류배전에서는 단일 방향으로만 가능하다.

본 논문에서는 새로운 직류배전 시스템을 제안하고 전체 시스템에서 핵심을 이루고 있는 공진형 플라이백(fly-back)컨버터의 토폴로지(topology)를 제안한다. 또한 컨버터의 각 모드(mode)별 동작을 이론적으로 분석하고 EMTF를 이용한 시뮬레이션으로 검증한다. 특히 제안하는 컨버터의 하드웨어 실용화 가능성을 검토할 목적으로 축소모형을 제작하고 이의 실험을 통해 동작과 실용화 가능성을 실험적으로 검증한다.

### 2. 본론

#### 2.1 직류배전시스템

그림 1은 본 논문에서 제안하는 직류배전 시스템의 구성을 보인 것인데, 전체 시스템은 다이오드 브리지, 배전선로, 공진형 플라이백 컨버터, 그리고 인버터로 구성된다. 다이오드 브리지는 전력회사의 변전소에 설치되어 교류를 약 10kV의 직류로 바꾸어 단선과 접지 또는 두선과 접지로 이루어진 배전선로를 통해 수용가가 위치한 지역에 공급된다. 수용가가 위치한 지역에는 플라이백 컨버터와 인버터가 설치되어 있으며 공급된 직류전압은 플라이백 컨버터에 의해 약 400V 정도로 강압한 후 인버터에 의해 삼상 또는 단상 220V로 변환하여 수용가에 공급한다.

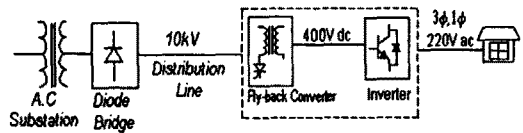


그림 1. 직류배전시스템

#### 2.2 공진형 플라이백 컨버터

제안하는 직류배전 시스템에서 가장 핵심이 되는 요소는 공진형 플라이백 컨버터이다. 직류강압을 위해 플라이백 방식을 채택한 이유는 높은 강압비를 얻을 수 있으며, 고압과 저압측이 전기적으로 분리되어 있어 안전성이 있기 때문이다.

구조상으로 공진형 플라이백 컨버터는 스위칭모드 전원으로 사용되고 있는 소용량 플라이백 컨버터와 거의 동일하다. 그러나 전압과 전류 용량이 크기 때문에 스위칭 소자로는 다이리스터나 GTO 또는 IGBT를 사용해야 한다. GTO나 IGBT의 경우 직렬동작이 어렵고 강제전류에 의한 스위칭 손실이 대단히 크며 소자의 가격이 비싼 편이다. 반면에

다이리스터는 직렬동작이 용이하고 가격이 싸며, 공진형 커뮤테이션(commutation)회로를 적용 할 경우 스위칭 손실도 대단히 적다.

그림 2는 제안하는 공진형 플라이백 컨버터의 전력 회로도도를 나타낸 것이다. 다이리스터  $T_1$ 은 주회로 스위치이고, 다이리스터  $T_2$ 와 LC 공진회로 그리고 다이오드  $D_1$ 은 커뮤테이션 회로 이다. 변압기의 경우 소용량 컨버터에서는 페라이트 코어를 사용하나 제안하는 직류배전에서는 통상 교류변압기에 사용되는 실리콘강판을 적층한 코어를 사용한다. 변압기의 자기특성과 다이리스터의 스위칭 속도를 고려하여 스위칭 주파수는 1kHz 정도로 하였다.

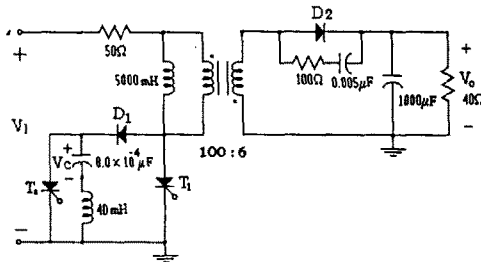


그림 2. 공진형 플라이백 컨버터

플라이백 컨버터의 입출력 관계식은 volt · sec 평형 조건에 의해 다음과 같이 유도된다.

$$V_o = \frac{N_1}{N_2} \frac{D}{1-D} V_1 \quad (1)$$

여기서,

$N_1$  = 변압기 1차 권선수

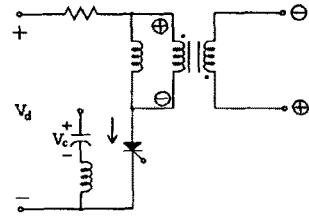
$N_2$  = 변압기 2차 권선수

$D$  = 시비율 (duty cycle)

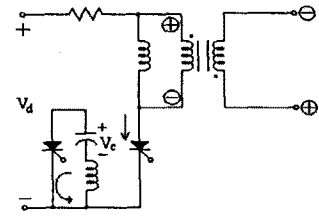
그림 3은 공진형 플라이백 컨버터의 동작을 등가 회로를 이용하여 5가지 모드로 나누어 설명한 것이다.

(a) 모드 1 : 공진 캐패시터는 그림에 보인 극성으로  $+V_c$ 로 충전되어 있고 1차측 다이오드와 다이리스터  $T_2$ 는 오프 상태로 있다. 1차측에 전압이 가해진 상태에서 다이리스터  $T_1$ 에 게이트 신호를 가하면 온 상태로 되고 변압기의 극성 때문에 2차측 다이오드는 역방향으로 바이어스 되어 있으므로 배전선에서 공급되는 전류는 변압기의 자화인덕턴스에 의해 자기에너지로 저장된다.

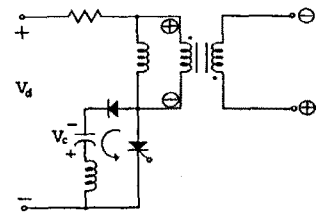
(b) 모드 2 :  $T_2$ 에 게이트 신호를 가하면 온 상태로 되고 캐패시터의 전압은 LC 공진 전류가 흐르면서 반대 극성으로 전환된다. 즉, 캐패시터 전압은  $-V_c$ 가 된다.



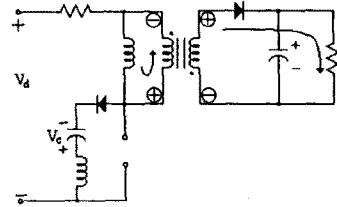
(a) Mode 1



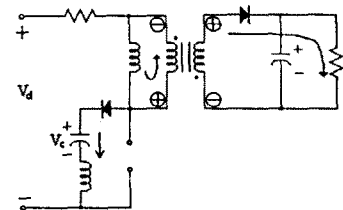
(b) Mode 2



(c) Mode 3



(d) Mode 4



(e) Mode 5

그림 3. 동작모드별 등가회로

(c) 모드 3 : 캐패시터 전압이 완전히 반전되면  $T_2$ 는 자동으로 오프되고 다이오드, 캐패시터, 리액터, 그리고  $T_2$ 는 폐회로를 이룬다. 충전된 캐패시터는 리액터를 통해 방전하면서 공진을 발생하는데 이때 생성되는 공진전류가 다이리스터  $T_1$ 에 흐르는 전류보다 크면  $T_1$ 은 오프 된다. 전압 측면에서 보면 LC 회로 양단에 걸리는 전압의 크기가 다이리스터  $T_1$ 에 순방향으로 걸리는 전압보다 크기 때문에 다이리스터  $T_1$ 은 오프 된다.

(d) 모드 4 : 다이리스터  $T_1$ 이 오프 되면 후리펄링에 의해 변압기 1차측의 극성은 반대가 되고, 2차측 역시 극성이 반전되어 다이오드는 정방향으로 바이어스되고 도통하여 자화리액터스에 의해 저장된 자기에너지는 부하에 전력으로 전달한다.

(e) 모드 5 : 입력단 전압과 변압기 양단에 걸리는 전압에 의해 1차측 다이오드가 도통되어 전류가 흐르면서 공진 캐패시터가 충전되기 시작한다. 완전히 충전되면 다이오드는 오프 되어 공진회로는 모드 1과 같은 상태로 된다. 다만  $T_1$ 은 아직 게이트 신호를 가하지 않았으므로 오프 상태 이다.

LC 공진회로에서 다이리스터  $T_1$ 을 오프 하는 데 필요한 공진전류의 최대값과 공진주파수는 다음식에 의해 정해진다.

$$i_p = V_c \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (2)$$

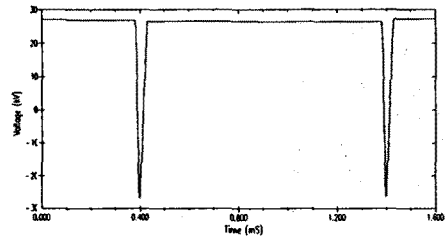
$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3)$$

### 2.3 시뮬레이션

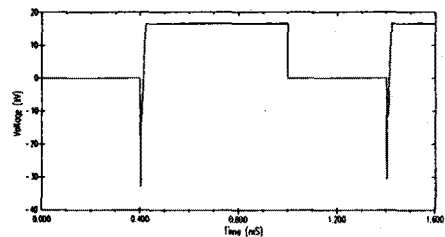
제안하는 플라이백컨버터의 동작을 검증하기 위해 EMTP 프로그램을 이용하여 그림 2에 보인 회로에 대해 시뮬레이션을 실시하였다. 다이리스터와 다이오드는 EMTP가 제공하는 type-11 스위치로 모델링 하였고 변압기는 단상변압기 모형에 자화리액터를 모의하기 위해 이에 해당하는 인덕터를 1차측에 병렬로 연결하여 모델링 하였다.

그림 4는 이상에 설명한 모형을 이용하여 시뮬레이션한 결과를 나타낸 것이다. 그림 4a 는 공진 캐패시터의 전압 변화를 나타낸 것인데,  $T_2$ 를 온 하는 순간 반전되고  $T_1$ 이 오프 된 후에는 다시 전압이 초기 상태로 됨을 알 수 있다. 그림 4b 는 다이리스터  $T_1$  양단에 걸리는 전압을 나타낸 것인데, 공진회로에 의해 적절히 오프 됨을 확인 할 수 있다. 그림 4c 는 변압기 1차측 양단에 걸리는 전압을 나타낸 것인데  $T_1$  오프되어 에너지가 부하에 공급되

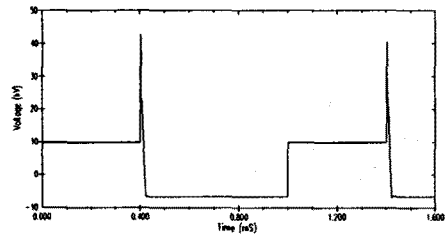
는 순간에는 공급전압의 2배가 나타난다. 그림 4d 는 부하측에 걸리는 전압을 나타낸 것인데, 일정 전압이 나타남을 알 수 있다.



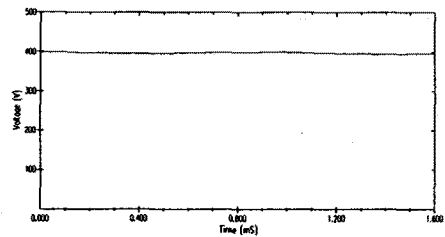
(a) 공진회로 C



(b)  $T_1$  전압



(c) 변압기 1차측



(d) 출력 전압

그림 4. 시뮬레이션 결과

### 2.4 축소모형 제작 및 실험

실규모 시스템의 구현 가능성을 확인하고 시뮬레이션에서 얻는 결과를 검증하기 위해 하드웨어 축소모형을 제작하고 실험을 실시하였다. 그림 5는 축소모형의 회로도를 나타낸 것이다.

제작된 공진형 플라이백 컨버터의 스위칭소자로 다이리스터를 사용하였다. 특히 공진회로의 경우 신속한 동작을 위해 고속 다이리스터를 사용하였으며, 전체 시스템의 제어와 펄스생성장치로는 마이크로 프로세서 80C196KC를 사용하였고 스위칭 주파수는 500Hz이다.

입력단 전원은 브리지 다이오드로 정류된 160VDC를 인가하였으며, 2차측에서는 에너지를 신속하게 부하단으로 전달하기 위하여 고속다이오드를 연결하였고, 축소모형의 부하로는 저항(30W/10 $\Omega$ ) 6개를 병렬로 연결하여 사용하였다.

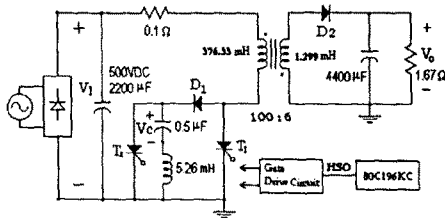
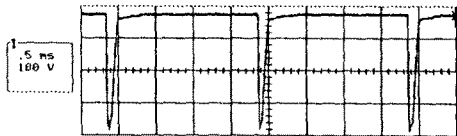
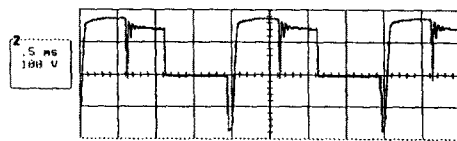


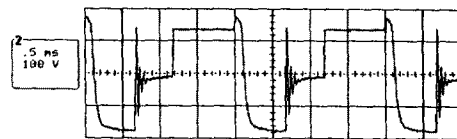
그림 5. 축소모형 회로도



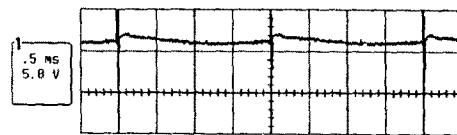
(a) 공진회로 C



(b)  $T_1$  전압



(c) 변압기 1차측



(d) 출력 전압

그림 6. 축소모형 실험결과

그림 6은 축소모형의 실험결과를 보인 것이다. 그림 6a는 공진 캐패시터의 전압 변화를 나타낸 것인데,  $T_2$ 를 온 하는 순간 반전되고  $T_1$ 이 오프된 후에는 다시 전압이 초기 상태로 됨을 알 수 있다.

그림 6b는 다이리스터  $T_1$  양단에 걸리는 전압을 나타낸 것인데, 공진회로에 의해 적절히 오프됨을 확인 할 수 있다. 그림 6c는 변압기 1차측 양단에 걸리는 전압을 나타낸 것인데  $T_1$  오프되어 에너지가 부하에 공급되는 순간에는 공급전압의 2배가 나타난다. 그림 6d는 부하측에 걸리는 전압을 나타낸 것인데, 일정 전압이 나타남을 알 수 있다.

### 3. 결론

본 논문에서는 수용가가 이산된 산간이나 오지에 전기를 효율적으로 공급하기 위해 직류배전시스템을 제안하고 전체 시스템중 핵심이 되는 직류강압 컨버터의 토폴로지를 제시하였다. 제시한 컨버터의 동작을 이론적으로 분석하고 컴퓨터 시뮬레이션과 축소모형 실험을 통해 검증하였다. 시뮬레이션과 실험 결과는 제안하는 시스템이 직류배전에 효과적인 dc-dc 컨버터임을 확인 할 수 있었다. 제안하는 시스템은 상용화된 부품과 이미 실용화된 기술로 실현 가능하며 비용면에서도 충분히 경쟁력이 있을 것으로 판단된다.

### 참고 문헌

- [1] B. Ooi and X. Wang, "Boost Type PWM HVDC Transmission System", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 6, No. 4, October 1991.
- [2] N. Kimura and et. al. "Transient Analysis of HVDC System using Forced Commutation Converter in Fault", ICPE '95, Seoul, Korea, October 10-14, 1995.
- [3] K. Fleischer and R. Munnings, "Power System Analysis for Direct Current Distribution System", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 32, No. 5, Sept./Oct. 1996.
- [4] P. Caldera, and et. al., "Utilisation of the Series Resonant DC Link as a DC Motor Drive", IEEE IAS Annual Meeting, 1990.
- [5] M. Rashid, "Power Electronics : Circuits, Devices, and Applications", Prentice Hall, 1988.
- [6] L. Bui and et. al., "Dyanamic Interactions between HVDC Systems Connected to AC Buses", IEEE PES Winter Meeting, 90 WM 192-5, Atlanta, Georgia, Febuary 4-8, 1990.

본 연구는 과학재단 해외방문연구  
지원으로 착수 되었음.