

# 위상 천이 제어를 통한 고효율 고전압 커패시터 충전기 개발

권창현\*, 손성호\*, 유운상\*, 장성록\*\*, 유찬훈\*\*, 김형석\*\*,  
 과학기술연합대학원대학교\*, 한국전기연구원\*\*

## Development of High-Efficiency and High-Voltage Capacitor Charger with Phase Shift Modulation

Chang-Hyun Kwon\*, Seong-Ho Son\*, Yun-Sang Yu\*, Sung-Roc Jang\*\*, Chan-Hun Yu\*\*,  
 Hyoung-Suk Kim\*\*,\*\*

University of Science & Technology\*, Korea Electrotechnology Research Institute\*\*

### ABSTRACT

본 논문은 위상 천이 제어를 통한 고효율 고전압 커패시터 충전기 개발에 대해 기술한다. LCC 공진형 컨버터는 변압기의 기생 성분들을 활용할 수 있어 고전압 커패시터 충전기에 널리 사용되나 초기 충전 동작 시 큰 피크 전류로 인해 소자 스트레스가 증가하고 효율이 떨어지는 문제점을 가진다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 논문에서는 출력전압에 따라 위상을 조절해주는 위상 천이 제어 기법을 제시한다. 제안된 위상 천이 제어를 통해 초기 충전 동작 시 피크 전류를 줄여 스위치의 손실을 줄일 수 있고, 고정 스위칭 주파수 동작을 통해 게이트 드라이버 설계를 용이하게 한다. 제안된 위상 천이 제어를 활용한 LCC 공진형 컨버터 설계 방법 및 곡선 근사화 방법을 통한 출력전압과 위상각 간의 근사화 된 방정식을 제시한다. 커패시터 충전기 실험을 통해 제안된 기법의 타당성을 검증하였다.

### 1. 서론

고전압 커패시터 충전기는 수처리, 가속기, 자유 전자 레이저 등 다양한 펄스 파워 응용 분야에서 사용되고 있으며, 응용 분야에 따라 반복률, 효율, 재현성 등의 사양들이 다양하게 요구된다<sup>[1]</sup>. 이러한 요구사항에 맞추어 다양한 컨버터 토폴로지 및 제어 방법들이 제시되고 있다. 특히, LCC 공진형 컨버터는 변압기 기생성분 활용성 및 소프트 스위칭 특성 때문에 높은 전력 밀도 및 효율을 가질 수 있어 고전압 커패시터 충전기에 많이 사용되고 있다. 하지만, 초기 충전 동작 시 큰 피크 전류로 인해 소자 스트레스가 증가하고, 이를 방지하기 위한 제어 방식이 필요하다.

본 논문에서는 효율을 높일 수 있는 위상 천이 제어 방식 및 출력전압에 따른 제어를 위한 곡선 근사화 방법에 대해 기술한다. 제안된 위상 천이 제어 방식은 초기 충전 시 위상차 키움으로써, 스위치의 턴-오프 손실을 줄일 수 있다. 또한, 출력전압과 위상각 간의 곡선 근사화 방법을 사용해 간단한 수식으로 제어를 할 수 있다.

### 2. 개발된 커패시터 충전기

그림 1은 개발된 커패시터 충전기의 회로도를 나타낸다. 커

패시터 충전기는 풀브릿지 인버터( $S_1$ - $S_4$ ), 공진인덕터( $L_s$ ), 직렬공진 커패시터( $C_s$ ), 변압기(Tx), 배전압 정류회로(Rec)로 구성되어 있다. 공진인덕터는 변압기의 누설인덕턴스를 사용한다. 고전압 다이오드 구현을 위해 10개의 다이오드를 직렬 연결하였으며, 전압 밸런스를 위해 병렬 연결된 커패시터를 활용하여 병렬 공진커패시터( $C_p$ )를 구현했다. 개발된 커패시터 충전기에 사용된 LCC공진형 컨버터 설계 파라미터를 정리하면 표1과 같다.

#### 2.1 개발된 커패시터 충전기 동작모드

개발된 커패시터의 동작모드는 다음과 같이 8가지 모드로 나눌 수 있다.

1) Mode1 ( $t_0$ - $t_1$ ) : 다이오드  $D_1$ ,  $D_4$ 가 도통된 상태에서 스위치  $S_1$ ,  $S_4$ 를 턴-온함으로써 영전압 스위칭이 가능하다. 공진전류는 공진인덕터( $L_{ss}$ ), 직렬공진커패시터( $C_s$ ), 병렬 공진 커패시터( $C_p$ )를 통해 흐르게 되며, 병렬공진 커패시터를 출력전압( $V_o$ )까지 충전한다.

2) Mode2 ( $t_1$ - $t_2$ ) : 병렬공진 커패시터가 충전된 후, 2차측 정류다이오드가 도통되며 파워 전달이 시작된다. 공진 전류는 입력전압, 출력전압, 공진인덕터 및 직렬공진커패시터에 의해 결정된다.

3) Mode3 ( $t_2$ - $t_3$ ) :  $t_2$ 에서 스위치  $S_4$ 를 턴-오프 한 후, 다이오드  $D_2$ 가 도통이 될 때, 스위치  $S_2$ 를 턴-온 함으로써 영전압 스위칭이 가능하다. 공진전류는 출력전압, 공진인덕터 및 직렬공진커패시터에 의해 결정된다.

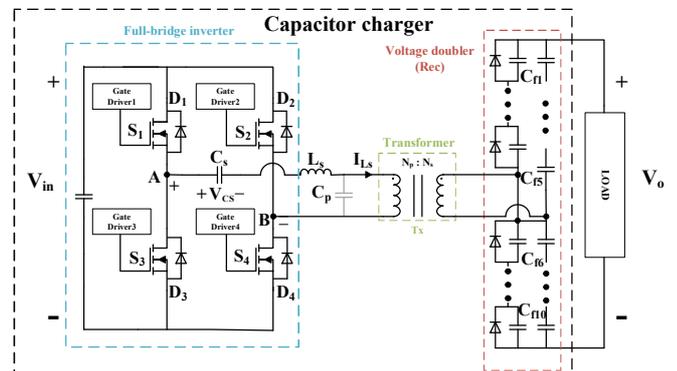


그림 1 개발된 커패시터 충전기 회로도  
 Fig. 1 Circuit diagram of developed capacitor charger

표 1 커패시터 충전기 설계 파라미터  
Table 1 Design parameters for capacitor charger

Input voltage, $V_{in}$	250Vdc
Output voltage, $V_o$	0~5kV
Resonant inductor, $L_s$	75 $\mu$ H
Series resonant capacitor, $C_s$	150nF
Parallel resonant capacitor, $C_p$	8nF
Transformer turns ratio, $N_{tr}$	19 : 190
Filter capacitor, $C_{fl-f10}$	33nF
Load capacitor, $C_{load}$	1 $\mu$ F
Switching frequency, $f_s$	100kHz

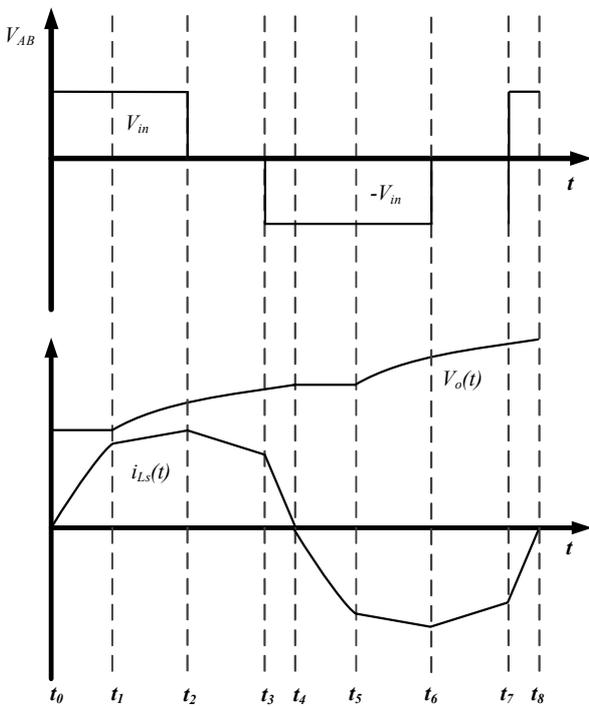


그림 2 커패시터 충전기 동작원리  
Fig. 2 Operational principle of capacitor charger

4) Mode4 ( $t_3-t_4$ ) :  $t_3$ 에서 스위치  $S_1$ 을 턴-오프 한 후, 다이오드  $D_3$ 가 도통될 때, 스위치  $S_3$ 을 턴-온함으로써 영전압 스위칭이 가능하다. 입력전압이 역으로 걸림으로써, 공진전류가 빠르게 감소한다.

Mode5 - Mode8 의 동작해석은 스위칭 소자가 다르고, 입력전압 및 전류 극성이 반대다.

## 2.2 제안된 위상 천이 제어 특징

제안된 위상천이 제어방식의 주요 특징은 다음과 같다.

1) 높은 효율과 전력밀도: 개발된 커패시터 충전기는 연속모드에서 동작하는 LCC 공진형 컨버터를 기반으로 설계한다. 연속모드 동작에서는 초기 충전 시 발생하는 높은 피크전류를 방지하기 위해서 고주파 구동을 하는 주파수 변조방식을 많이 사용하고 있다. 하지만, 이러한 주파수 변조 방식은 스위칭 손실을 증가시킬 뿐만 아니라 변압기 및 게이트 드라이버의 설계를

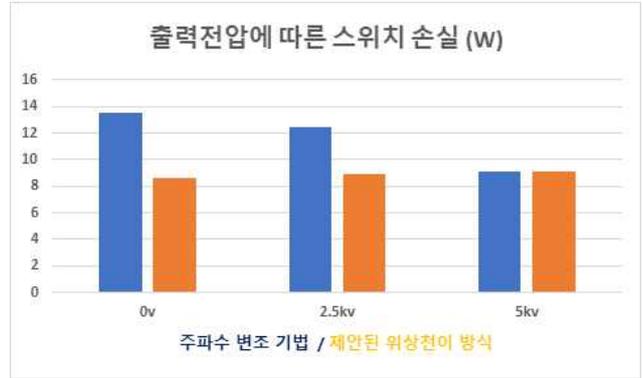


그림 3 제어 방식에 따른 스위치 손실  
Fig. 3 Switching losses based on control method

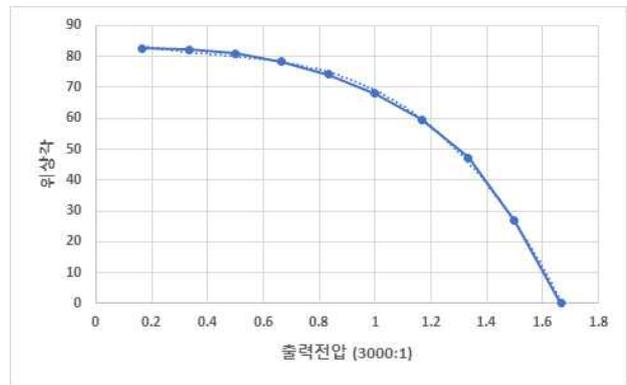


그림 4 출력전압에 따른 위상각  
Fig. 4 Output voltage as a function of phase angle

어렵게 한다. 반면, 위상 천이 제어 방식은 주파수를 고정시킴으로써 소자들의 최적설계를 가능하게 하고, 스위칭 손실 및 자기 손실을 줄임으로써 높은 효율을 가진다. 그림 3는 다양한 출력전압에서 주파수 변조 방법과 제안된 위상천이 방식을 사용했을 때의 스위칭 손실을 나타낸다.

2) 출력전압과 위상각 간의 간단한 방정식: 출력전압에 따른 위상각 제어를 위해서는 매 스위칭 주기마다 출력 전압이 변함에 따라 출력 전압에 따른 위상각 계산이 필요하다. 위상각은 초월함수를 포함하고 있기 때문에 수치 해석적인 방법을 필요로 한다. 하지만 이 방법은 복잡한 연산과정으로 인해 매 스위칭 주기마다 출력전압에 따른 위상각을 찾기 어렵다는 문제점을 가진다. 이를 해결하기 위해, 곡선 근사화 방식을 이용해 커패시터 충전기의 출력전압에 따른 3차 다항식을 도출함으로써 간단한 계산으로 고주파 구동이 가능하다. 그림 4는 출력전류를 0.2A로 설정하였을 때, 곡선 근사화 방식을 통해 커패시터 충전기의 출력전압에 따른 위상각 3차 다항식으로 나타낸 그래프이며, 수식은 다음과 같다. PD는 위상각,  $V_{os}$ 는 출력전압( $V_o$ )에서 센싱계인(3000:1)이 곱해진 값이다.

$$PD = -36.151V_{os}^3 + 45.361V_{os}^2 - 26.836V_{os} + 86.687 \quad (1)$$

## 3. 실험 결과

개발된 커패시터 충전기 및 제안된 위상천이 제어의 성능 검증을 위해 1 $\mu$ F 커패시터와 83k $\Omega$  저항부하를 사용하여 실험

을 진행하였다. 그림 6은 제안된 위상천이 제어를 적용해 커패시터 충전 시 출력전압, 센싱전압, 공진전류 및 인버터의 브릿지 전압( $V_{AB}$ )을 나타내는 실험파형이다. 그림 6.(a), 6.(b), 6.(c)는 각각 출력전압 0V, 2.5kV, 5kV에서의 브릿지 전압 및 공진전류를 측정된 파형이다. 출력전압이 낮을 때 스위치 간의 위상차를 키움으로써 턴-오프 전류를 낮추어 높은 효율을 얻을 수 있고, 출력전압이 높아짐에 따라 위상차가 줄어들며, 사다리꼴의 공진전류를 얻을 수 있다.

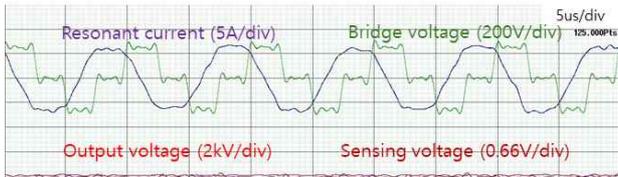


그림 6.(a)

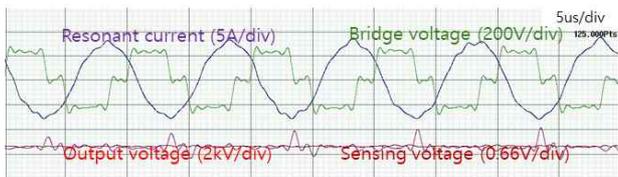


그림 6.(b)

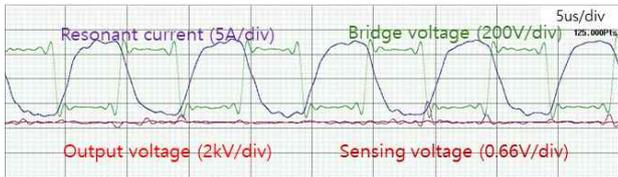


그림 6.(c)

그림 6 출력전압에 따른 공진전류 및 브릿지 전압 파형  
Fig. 6 Waveform of resonant current and bridge voltage according to output voltage

#### 4. 결론

본 논문에서는 위상 천이 제어 방식 및 곡선 근사화 방법을 기술했다. 제안된 위상 천이 제어 방식을 통해 충전 동작 시 출력전압이 낮을 때, 위상차를 키움으로써 스위치의 턴-오프 손실을 줄일 수 있다. 또한, 곡선 근사화 방법을 통해, 매 스위칭 마다 복잡한 수치해석 방법을 사용하지 않고 출력전압에 따른 위상각 수식으로 제어를 할 수 있다.

이 연구는 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회의 지원을 받아 수행된 한국전기연구원 기본사업임(No.24A01075)

#### 참고 문헌

[1] S. R. Jang, H. J. Ryoo, Y. S. Jin, S. H. Ahn and G. H. Rim, "Application of pulsed power system for water treatment of the leachate," 2009 IEEE Pulsed Power Conference, Washington, DC, USA, 2009, pp. 980-983, doi: 10.1109/PPC.2009.5386150.