

LCC 공진형 컨버터를 적용한 산업용 전원장치 응용연구

안석호¹, 장성록¹, 류홍제[†]

The Design and Applications of LCC Resonant Converter

Suk-Ho Ahn¹, Sung-Roc Jang¹, and Hong-Je Ryoo[†]

Abstract

This study introduces an LCC resonant converter operating on a continuous conduction mode. The LCC resonant converter has the advantage of improving system efficiency, especially under the rated load condition, because it can reduce conduction loss by improving the resonance current shape and switching loss by increasing the lossless snubber capacitance. The proposed LCC resonant converter is applied to various applications, including a 60 kW EV fast charger, a 24 kJ/s high-voltage capacitor charger, and a 20 kV, 20 kW high-precision DC power supply. Experimental results prove that the proposed LCC resonant converter topology can be effectively used as a converter topology for these applications.

Key words: Resonant converter, EV fast charger, High-voltage capacitor charger, High-voltage power supply

1. 서 론

전력변환 장치의 높은 전력 밀도, 높은 효율에 대한 요구를 만족시키기 위하여 스위칭(Switching) 방식의 컨버터는 가장 기본적인 형태인 PWM 컨버터로부터 공진형 컨버터(Resonant converter), 소형 전원장치에 사용되는 쿼지 공진형 컨버터(Quasi-resonant converter) 그리고 소프트 스위칭(Soft-Switching) PWM 컨버터에 이르기까지 지속적인 발전을 거듭해 왔다.

하드 스위칭(Hard-switching) 방식의 PWM 컨버터는 하드 스위칭 조건에 의해 컨버터가 높은 주파수로 동작하게 될 경우 스위칭 디바이스(Device)의 스위칭 손실의 증대나 스위칭 과도현상(Transition)에 수반한 전압 서지(Surge)나 전류 서지에 의한 EMI의 노이즈(Noise) 발생을 초래하게 된다. 이를 개선하기 위하여 직렬 및 병렬 공진형 컨버터, 쿼지 공진형 컨버터, 다중 공진형(Multi-resonant) 컨버터와 같은 공진형 컨버터가 제안되었으며, 이들은 정현파 혹은 준정현파(Quasi-sinusoidal wave)의 형태의 전류파형을 가지고

부하가 요구하는 전력을 공급한다. 따라서 공진형 컨버터에 포함된 스위치는 영전류(Zero-current) 스위칭 내지는 영전압(Zero-voltage) 스위칭 조건에서 전류(Commutation)하게 되므로 하드 스위칭 방식의 PWM 컨버터와 비교하여 스위칭 손실 및 스위칭 스트레스를 감소시킬 수 있다.

최근에는 기존 PWM 컨버터가 가지는 장점 가지며 온, 오프 스위칭 시 공진을 사용하는 ZVS, ZCS 소프트 스위칭 PWM 컨버터에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 산업전반에 널리 사용되고 있다. 한편, 공진형 컨버터의 고유한 장점을 이용하여 전류원 특성을 필요로 하는 고전압 전원장치 또는 광범위한 부하 운전이 필요로 하지 않고 정격 운전이 추가 되는 특정 전원장치 응용분야를 중심으로 공진형 컨버터가 사용되고 있다.

이러한 특성을 가지는 공진형 컨버터 중 연속도전모드로 동작하는 직렬 부하 공진형 컨버터는 상대적으로 낮은 도전손실을 가지며, 영전압, 영전류의 상태에서 턴-온이 가능하다. 또한, 부하전류가 증가할수록 스위칭주파수가 감소하는 특성으로 정격부하영역에서 주로 동작하는 응용분야에 효과적으로 적용 가능하다. 그러나 턴-오프 시, 하드스위칭으로 인한 손실이 발생 되고, 이를 해결하기 위한 방안으로 턴-오프 스너버가 사용되지만 스너버 커패시터의 용량을 키우는데 제약이 존재한다 [1]~[2][4][6].

본 연구는 공진형 컨버터의 효과적인 적용을 위해, 전류원으로 동작하면서 정격에서의 효율이 향상된 고효율

Paper number: TKPE-2015-20-6-10

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: hjryoo@cau.ac.kr, School of Energy Systems Engineering, Chung-Ang University
Tel: +82-2-820-5178 Fax: +82-2-3280-5867

¹ Electric Propulsion Research Center, Korea, Electrotechnology Research Institute

Manuscript received Sep. 1, 2015; revised Sep. 17, 2015; accepted Nov. 9, 2015

- 본 논문은 2015년 전력전자학술대회 우수추천논문임

의 부하 공진형 컨버터를 제안한다. 제안하는 고효율의 부하 공진형 컨버터는 연속 도전모드로 동작하는 직렬 부하 공진형 컨버터를 기반으로 LCC 공진형 컨버터를 구성하여 직렬 부하 공진형 컨버터의 전류원 특성을 유지하면서 정격 운전시의 공진 전류 파형을 개선해 파고치(Crest Factor)를 낮추어 도전 손실을 줄일 수 있다. 또한 무손실 스너버 커패시터의 커패시턴스를 효과적으로 키울 수 있는 구조적 장점으로 턴-오프시의 스위칭 손실을 저감하여 정격에서의 효율을 효과적으로 향상시킴으로써, 정격 운전동작영역이 많은 전원장치 분야에 효과적으로 적용 가능하다^[1].

본 연구에서는 제안하는 고효율의 부하 공진형 컨버터 제안 내용과 이러한 고효율의 부하 공진형 컨버터를 기반으로 이를 적용하여 개발된 60kW 전기자동차 급속 충전기, 24kJ/s 고전압 커패시터 충전기 그리고 20kV, 20kW DC 전원장치에 주요 실험 결과를 제시한다^{[1][6]}.

2. 제안된 공진형 컨버터

그림 1과 그림 2는 제안된 공진형 컨버터의 회로와 동작모드에 따른 공진 전류와 전압 파형을 나타낸다. 기존 직렬 부하 공진형 컨버터의 형태에서 추가적으로 변압기 2차측과 부하에 병렬인 커패시터(C_p)를 추가한 형태이다. 추가적인 커패시터는 공진 전류 극성이 바뀌는 시점에 전류가 이 커패시터를 통하여 흐르면서 전류를 급격히 상승시켜 사다리꼴 형태의 전류 모양으로 기존 사인파 형태의 전류보다 동일 스위칭 주파수 동작 시 실효전류를 증대할 수 있다. 따라서 제안하는 컨버터는 동일 부하전류 조건에서 공진 전류의 최댓값을 낮게 가져 도전 손실을 줄일 수 있으며 턴-오프 시 흐르는 전류를 줄여 턴-오프 손실을 저감할 수 있는 장점이 있다. 또한 커패시터에 의해 빠르게 상승되는 전류는 공진 인덕터에 저장된 에너지를 증가시켜 스위칭 손실을 줄이기 위해 사용되는 무손실 스너버 커패시터 (C_1-C_4 ; loss less snubber capacitor)를 효과적으로 크게 키울 수 있도록 한다.

2.1 제안된 공진형 컨버터의 동작원리

제안된 컨버터의 구조는 무손실 스너버 커패시터를 포함하는 기존의 LCC 타입의 부하 공진형 컨버터 (직렬 부하 공진형 컨버터)와 같은 형태를 가지나 변압기 2차측의 병렬 공진 커패시터(C_p)를 통해 공진 전류의 빠른 상승시간을 가지도록 한다. 병렬 공진 커패시터는 변압기 1차측의 직렬 공진 커패시터(C_s)에 비해 상대적으로 매우 작은 값을 가지도록 설계하여 짧은 구간 동안 공진되도록 동작하는 특징이 있다.

제안된 컨버터를 공진 주파수보다 높은 스위칭 주파수로 운전하게 되면 기존의 공진 주파수 이상 연속 도전 모드에서 동작하는 직렬 부하 공진형 컨버터와 같이 턴-오프 시 ZVZCS(Zero Voltage Zero Current Switching)

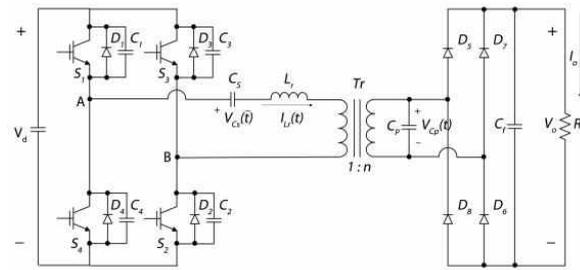


Fig. 1. Scheme of proposed LCC resonant converter.

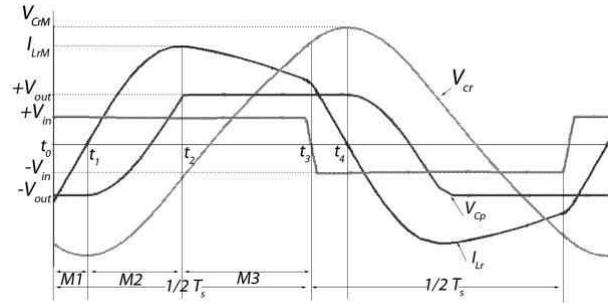


Fig. 2. Resonant current(i_{Lr}) and voltage(V_{Cr}) waveforms of proposed LCC resonant converter.

가 가능하여 턴-온 손실을 줄일 수 있다. 또한 매우 작은 값의 병렬 공진 커패시터는 전류원 특성을 유지하면서 공진 전류의 파형을 기존의 정현파 형태에서 사다리꼴(Trapezoid) 형태로 변화시킬 수 있다. 이러한 사다리꼴 형태의 공진 전류를 정류하게 되면 기존의 컨버터에 비해 부하 전류의 맥동은 감소하게 되고 파고치(Crest factor)를 개선하게 됨으로 도전 손실을 줄일 수 있는 장점을 가지게 된다. 또한 빠르게 상승하는 공진 전류는 공진 인덕터에 축적되는 에너지를 증가시킴으로 무손실 스너버 커패시터에 축적된 에너지를 빠르게 방전시킬 수 있다. 이는 컨버터에 비교적 큰 값의 무손실 스너버 커패시터를 적용할 수 있게 하여 턴-오프 손실을 효과적으로 줄일 수 있다. 그림2, 3에서 보이는 바와 같이 제안된 컨버터의 정상 상태 동작은 한주기 스위칭에 8개의 모드로 나눌 수 있다. 다음의 모드별 정상 상태 동작원리를 통해 제안된 컨버터의 특징을 살펴본다.

모드1(M1, $t_0 \leq t < t_1$)

$t=0$ 시점에 공진 인덕터 전류 (I_{Lr})는 스위치 S_1 과 S_2 의 역병렬 다이오드 D_1 과 D_2 로 흐르게 된다. 이 때 스위치 S_1 과 S_2 의 양단 전압과 전류는 거의 0이며, 모드1에서 스위치 S_1 과 S_2 에 턴-온 게이트 신호가 인가되며, ZVS, ZCS 상태에서 스위치 S_1 과 S_2 이 턴-온 된다. 즉 턴-온 시 스위칭 손실이 발생되지 않는다.

모드2(M2, $t_1 \leq t < t_2$)

공진에 의해 공진 인덕터 전류 (I_{Lr})의 방향이 변하여 역병렬 다이오드 D_1 과 D_2 로 흐르던 전류가 스위치 S_1 과

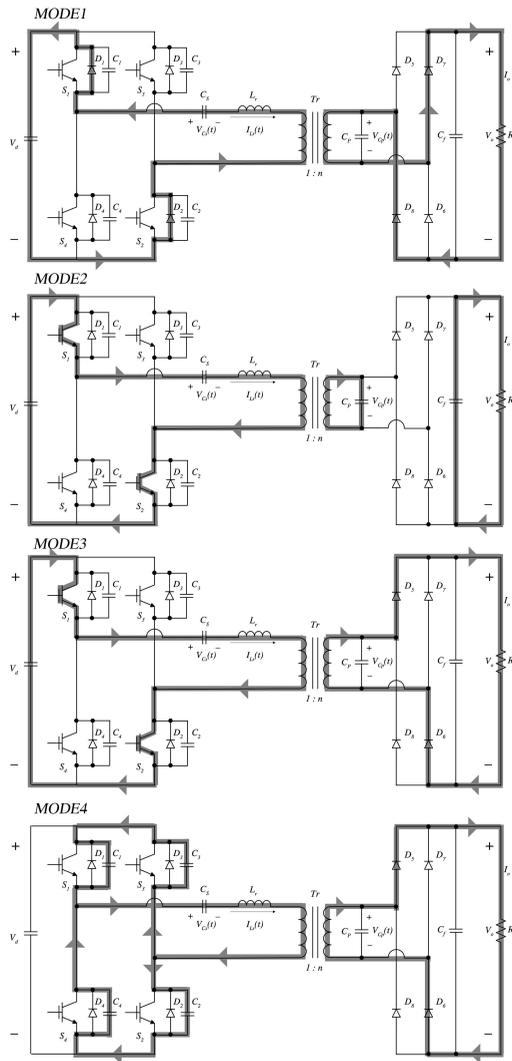


Fig. 3. Operation modes of proposed LCC resonant converter.

S_2 로 흐르게 된다. $t \leq t_1$ 시점에 병렬 공진 커패시터(C_p)는 $-V_0$ 로 충전되어 있었고 이 모드에서 공진 인덕터 전류(I_L)는 병렬 공진 커패시터(C_p)를 통해 흐르고 병렬 공진 커패시터(C_p)는 $-V_0$ 부터 $+V_0$ 까지 충전된다.

모드3(M3, $t_2 \leq t < t_3$)

이 모드에서는 병렬 커패시터 전압(V_{Cp})이 직류 출력 전압($V_{Cp} = V_0$)으로 클램프(Clamp)되며 병렬 공진 커패시터(C_p)는 공진에 기여하지 않게 된다. 이때 공진 전류는 부하로 전달된다.

모드4(M4, $t_3 \leq t < t_4$)

주어진 제어 신호에 의해서 스위치 S_1 과 S_2 는 턴-오프되며 공진 탱크(Resonant tank)에 축적된 에너지에 의해 공진 전류는 무손실 스너버 커패시터 C_1 과 C_2 를 충전시키고 무손실 스너버 커패시터 C_3 , C_4 를 방전시키는 역할을 하며 Free-wheeling한다. 이 때 무손실 스너버 커패시터에 의해 스위치 S_1 과 S_2 의 양단의 전압은

서서히 증가하게 된다. 이 모드에서 무손실 스너버 커패시터 C_3 과 C_4 를 완전히 방전시키지 않으면 다음 스위칭 주기에 큰 턴-온 손실을 야기하게 되므로 스너버 커패시터가 완전히 방전할 수 있도록 모드 4를 유지하여야 한다. 비록 이 모드에서 스위치 S_1 과 S_2 는 일정 전압과 전류 상태에서 턴-오프되나 무손실 스너버 커패시터가 충분히 큰 값의 커패시턴스를 가지게 되면 스위치 턴-오프 시의 양단전압은 0에 가까워지며 스위치의 턴-오프 손실이 저감된다.

모드5(M5, $t_4 \leq t < t_5$)

무손실 스너버 커패시터 C_1 과 C_2 가 완전히 충전 되면 공진 인덕터 전류(I_L)는 스위치 S_3 과 S_4 의 역병렬 다이오드 D_3 과 D_4 를 통해 지속적으로 흐르게 된다. 이때의 스위치 S_3 과 S_4 의 양단 전압과 전류는 거의 0이 되어 S_3 과 S_4 는 ZVZC 상태에서 턴-온 하게 된다.

모드5~모드8은 이전 모드와 동일하게 해석될 수 있으며, 앞에서 언급된 바와 같이 유도 할 수 있다.

2.2 제안된 공진형 컨버터의 해석

제안된 공진형 컨버터는 전압원과 공진 탱크로 이루어진 비감쇠 직렬 공진 회로로 등가화 하여 해석할 수 있으며, 이를 통해 공진 인덕터 전류를 수식화하면 다음과 같다.

$$i_{L_r} = I_{L_r} \cos \omega_{eq} (t - t_0) + \frac{V_d - V_{C_{eq}}(t_0)}{Z_0} \sin \omega_{eq} (t - t_0) \quad (1)$$

$$\text{여기서, } \omega_{eq} = 2\pi f_{eq} = \frac{1}{\sqrt{L_r C_{eq}}}, \quad Z_0 = \sqrt{\frac{L_r}{C_{eq}}}$$

식(1) 통해 공진 인덕터와 공진 커패시터 값에 따라 계산된 Z_0 와 ω_{eq} 에 의해 공진 전류의 최대치와 주파수가 결정되는 것을 알 수 있다. 그림 3의 동작모드 분석과 같이 제안한 컨버터는 병렬 공진 커패시터를 충전하는 구간과 직렬 공진 회로가 부하와 직렬로 연결되어 공진을 형성하는 구간으로 나눌 수 있다. 모드2에서 병렬 공진 커패시터의 영향으로 합성 공진 커패시터(C_{eq})가 $C_{eq} = C_s C_p / (C_s + C_p)$ 로 계산됨으로써 높은 공진 주파수를 가지며, 모드3에서 합성 공진 커패시터(C_{eq})는 $C_{eq} = C_s$ 가 됨으로써 상대적으로 낮은 공진 주파수를 가지게 된다. 이에 따라 제안된 컨버터의 공진 전류 파형은 그림 2와 같이 모드2에서 고주파 공진에 의해 빠르게 상승된 전류가 모드3에서 저주파 공진에 의해 유지된다. 스위칭 주기 내에 두개의 공진 주파수로 동작하도록 설계하여 공진 전류 파형을 사다리꼴형태로 개선함으로써 파고치를 줄이는 것이 제안된 컨버터의 장점이다.

따라서 사인과 형태의 공진 전류를 가정하고 공진형 컨버터를 해석하는 일반적인 방식(First Harmonic Approximation Analysis Method)과 달리 동작모드별

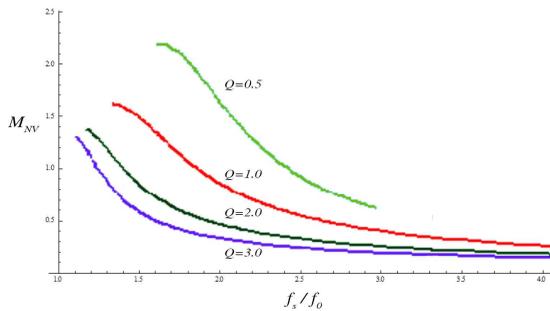


Fig. 4. Voltage conversion ratio vs switching and quality factor.

공진 전압과 전류의 경계조건 분석을 통해 제안된 공진형 컨버터를 해석할 수 있다^[7].

이를 통해 유도된 공진 회로의 Quality factor 및 스위칭 주파수에 따른 제안된 공진형 컨버터의 전압 전달비는 그림 4와 같다. 제안한 컨버터는 기본적으로 직렬 부하 공진형 컨버터와 유사한 전압이득 특성을 가지나, 병렬 공진 커패시터를 사용하기 때문에 입력전압 보다 높은 출력전압을 얻을 수 있는 특징이 있다.

3. LCC 공진형 컨버터를 적용한 산업용 전원장치 응용연구

제안한 LCC 공진형 컨버터의 장점을 활용하여 정격부하영역에서 동작하며 경부하영역의 사용이 제한적인 전기자동차 급속충전기와 전류원 특성을 필요로 하는 고전압 커패시터 충전기 및 DC 전원장치가 개발되었으며 각각의 사양은 표 1과 같다.

3.1 전기자동차 급속 충전기

급속 충전기의 경우 빠른 충전을 위하여 배터리에서 허용 가능한 최대 충전 전류로 정전류 충전 구간에서 대부분의 동작이 이루어지므로 경부하 영역에서의 사용이 매우 제한적이며 정격전류에서의 높은 효율을 구현하는 것이 중요한 설계 고려사항이라 할 수 있다. 본 논문에서 제안하는 LCC 공진형 컨버터는 급속충전기에 효과적으로 적용 가능한 장점을 지니며, 직렬 부하 공진형 컨버터의 전류원 동작 특성을 유지하여 정전류 제어가 용이하고 병렬 운전을 통해 쉽게 용량을 증대시킬 수 있다. 따라서 용량의 확장성과 Redundancy를 가지는 모듈 단위 설계가 가능하여 안정적 시스템으로 구현할 수 있다. 개발된 전기자동차 급속 충전기는 60kW 정격으로 출력전압 가변범위는 50Vdc~500Vdc로 총 3층의 구조로 10kW 컨버터 모듈 6개로 구성되며, 두 모듈이 출력 필터 등을 공유하는 구조이다. 그림 7은 한층의 케이스 안에 10kW 모듈 두개로 구성된 20kW 전력변환 회로 사진을 보여준다. 저항부하 실험을 통해 10kW 컨버터의 최대 효율은 98.5%로 측정되었으며, 그림 5와 같이 입력 정류부 효율을 포함한 60kW 전기자동차 급속 충전기 최대 효율은 97%로 측정되었다. 320V급 배터리

TABLE I
SPECIFICATION OF DEVELOPED POWER SUPPLIES

Spec.	EV Rapid Charger	24kJ/s Capacitor Charger	20kV, 20kW DC Power Supply
Max. Volt.	500V	12kV	20kV
Max. Curr.	150A	4A	1A
Max. Power	60kW	48kW	20kW
Max. Efficiency	97%	96%	98%
Power Density	855W/ℓ	547W/ℓ	420W/ℓ
Picture			

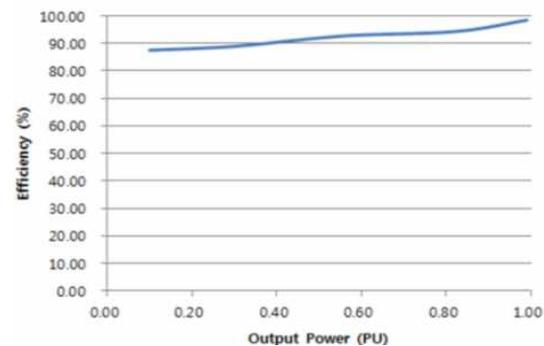
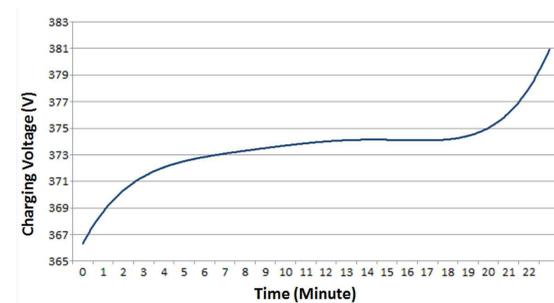
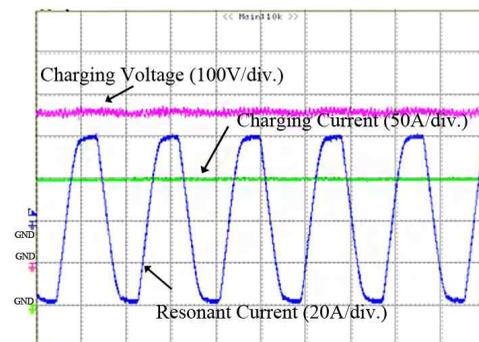


Fig. 5. 60kW EV fast charger efficiency measurement test result.



(a) Measured charging voltage vs. time



(b) Experimental waveforms of 60kW fast charger (Time : 20us/div.)

Fig. 6. Experimental results for charging 320V 60Ah LiFePO2 battery.



Fig. 7. Picture of developed 20kW EV fast charger block consisted of two 10kW converter modules.

부하를 사용한 급속 충전시의 효율은 95~96%로 측정되었다. 급속 충전기로써의 성능 검증을 위하여 다양한 배터리 충전 시험이 진행되었으며 320V, 19.2kW LiFePO4 배터리 충전시험 결과 그림6(a)와 같이 SOC 10%부터 90%까지 충전 소요시간은 17분으로 측정되었다. 그때의 각부 파형은 그림6(b) 같다. 검증을 통해 개발된 전기자동차 급속 충전기는 충전효율 및 충전시간 등 제시된 사양을 만족하며 제안한 컨버터가 전기자동차 급속 충전기에 효율적으로 적용 가능함을 검증 하였다.

3.2 24kJ/s 고전압 커패시터 충전기

전열 화학포(Electro-thermal chemical gun), 레일건(Rail gun) 등의 국방 및 산업 분야 등 펄스 파워 응용 분야를 중심으로 더 빠른 충전시간, 고효율, 높은 전력밀도 및 신뢰성을 가지는 고전압 커패시터 충전기와 관련된 많은 연구가 수행되고 있다.

제안한 LCC 공진형 컨버터는 빠른 충전 시간을 위한 높은 충전 전류를 공급해야하며, 우수한 정전류 제어 성능을 가져야 하는 고전압 커패시터 충전기에 적절히 활용될 수 있다. 또한 병렬 공진 커패시터를 사용함으로써 전압 부스팅(Voltage-boosting) 특성 가지기 때문에 고전압 변압기의 권선비를 줄일 수 있으며, 고전압 전원장치의 높은 권선비에 의한 권선 간의 기생 커패시턴스(Parasitic capacitance)의 영향을 줄이고 효율적인 변압기 절연설계가 가능한 장점이 있다. 본 절에서는 이와 같은 장점을 가지고 제안한 LCC 공진형 컨버터를 응용하여 적용한 최대출력 48kW, 평균 24kJ/s의 고전압 커패시터 충전기 설계 및 실험 결과를 소개한다. 설계사양은 표2와 같으며 그림 8은 최대 출력 동작시의 각부 파형을 보여준다.

개발된 고전압 커패시터 충전기는 저항 부하 실험을 통해 그림 9와 같이 96%의 최대 효율을 가지는 것을 확인 하였고, 그림 10의 4mF의 커패시터 충전시험을 통해 빠른 충전 시간을 달성하였다. 그림 11은 개발된 24kJ/s 고전압 커패시터 충전기 내부 사진을 보여주며 547W/liter의 높은 전력밀도를 달성 하였다. 실험 결과를 통해 제안한 LCC 컨버터를 이러한 고전압 커패시터 충전기에 적용함에 있어 효율, 신뢰성, 전력밀도 측면에서 장점을 가지는 것을 검증하였다.

TABLE II
SPECIFICATION OF DEVELOPED CAPACITOR CHARGER

Spec.	Value
Input Voltage	380Vac \pm 10%
Max. Charging Volt.	12kV
Max. Charging Curr.	4A
Max. Instant Power	48kW
Average Continuous Power	24kJ/s

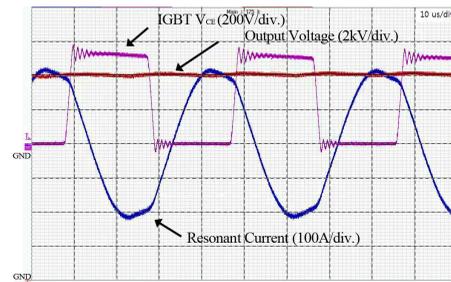


Fig. 8. Experimental waveforms for 48kW rated operation (Time : 10us/div.).

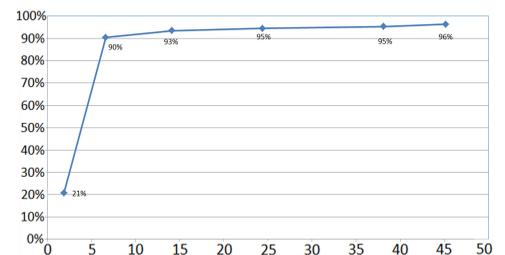


Fig. 9. Measured efficiency of developed capacitor charger.

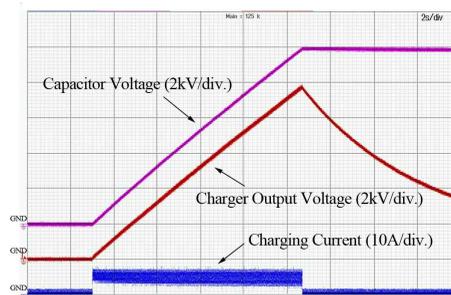


Fig. 10. Experimental result of 4mF capacitor charging test.

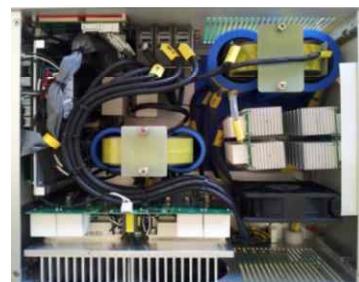


Fig. 11. Picture of developed capacitor charger.

TABLE III
SPECIFICATION OF DEVELOPED
HIGH-VOLTAGE DC POWER SUPPLY

Spec.	Value
Input Voltage	380Vac \pm 10%
Output Voltage	1~20kV
Output Current	~1A
Max. Power	20kW
Output Voltage Ripple	< 0.1%
Arc Energy	< 5J
Max. Efficiency	> 96%

3.3 20kV, 20kW 고전압 DC 전원장치

레이더, 선형 가속기 등과 같은 응용분야를 중심으로 출력전압의 리플 및 제어 정밀도 측면에서 고성능의 전원장치 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 리플 저감을 위해서는 스위칭 주파수를 높이거나 출력 필터 커패시터 값을 키우는 방식이 사용될 수 있지만 전원장치의 용량이 커짐에 따라 반도체 소자에서 발생하는 스위칭 손실에 의해 스위칭 주파수를 키우는데 제한적일 수 밖에 없다. 반면, 출력 필터커패시터를 키워 출력전압의 리플을 최소화 할 수 있지만 마그네트론, 자이로트론, 레이더 등과 같은 RF tube를 이용하는 응용분야에서 빈번히 발생할 수 있는 아크로부터 부하를 보호하기 어려운 단점이 있다. 다시 말하면, 아크 발생시 전원장치는 고장조건에 의해 트립 되지만 출력 필터 커패시터에 저장된 에너지는 모두 부하단으로 전달되고 이로 인해 부하가 소손될 수 있다. 이 같은 문제 해결을 위해 스위칭 동작이 빠른 스위치를 전원장치 출력과 부하 사이에 연결하여 아크 에너지를 강제적으로 차단하는 방식이 이용되고 있지만 시스템의 부피와 비용 측면에서 비효율적인 면이 있다. 표3과 같은 출력전압의 리플, 제어정밀도, 낮은 아크에너지를 포함한 전원장치의 요구사항을 만족시키기 위해 제한한 LCC 공진형 컨버터를 기반으로 3상 공진형 컨버터 설계하여 고정밀 고전압의 20kV, 20kW DC 전원장치로 구현하였다. 개발된 전원장치는 제안한 LCC 공진형 컨버터의 장점을 가지며, 다상운전을 통해 리플을 저감할 수 있도록 그림 12와 같이 구성되었다. 또한 다상의 스위칭 레그 중에 하나의 스위칭 레그를 경부하시 단독 운전하도록 설계하여 낮은 전압 및 전력을 제어하는 경우 스위칭 주파수가 올라가면서 발생하는 손실이 하나의 레그에서만 발생하기 때문에 전부하 제어 영역에서 높은 효율로 동작 가능하다. 즉 경부하 동작 영역에서 비교적 낮은 스위칭 주파수로 동작하여 리플이 커지는 단점을 다상운전을 통해 개선하고 경부하 영역에서는 별도 설계된 스위칭 레그의 단독 고주파 스위칭 운전을 통해 전부하 영역에서의 높은 제어정밀도 및 저리플을 달성할 수 있다. 그림 13은 개발된 20kV, 20kW 고전압 DC 전원장치의 최대출력동작시의 각부 파형을 나타낸다. 성능 검증을 위한 실험결과 최대 효율은 그림 14에서 보이는 바와 같이 98%의 최대

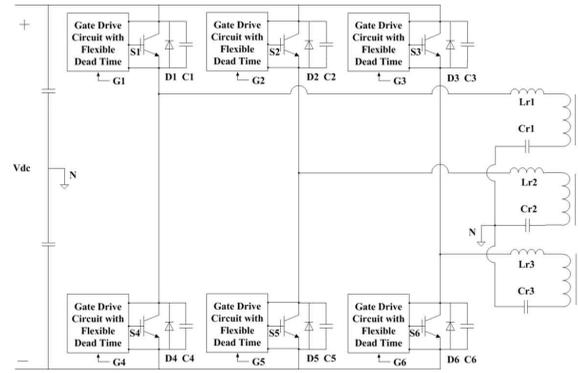


Fig. 12. Scheme of asymmetric 3-phase LCC resonant converter switching leg.

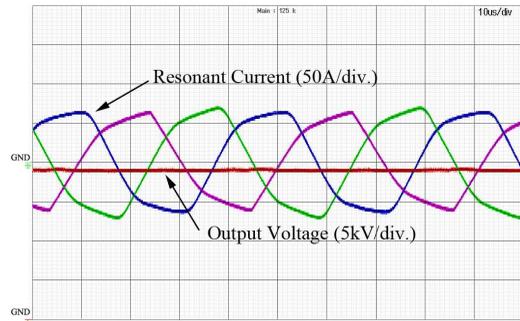


Fig. 13. 3-phase resonant current and output voltage waveforms of 20kV, 20kW high-voltage DC power supply (Time : 10us/div.).

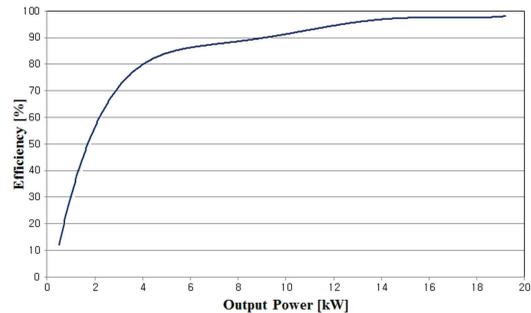


Fig. 14. Measured efficiency of developed 20kV, 20kW high-voltage DC power supply.

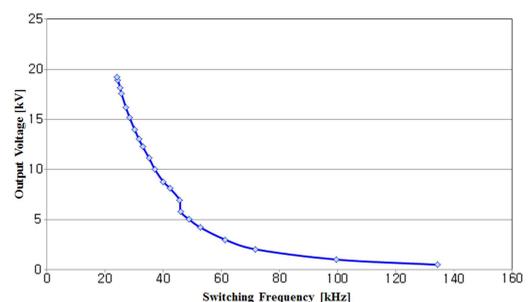


Fig. 15. Measured control characteristic of developed 20kV, 20kW high-voltage DC power supply.



Fig. 16. Picture of developed 20kV, 20kW high-voltage DC power supply.

효율이 측정 되었으며, 상대적으로 작은 출력 필터 커패시터(6.67mF)를 가지면서도 작은 전압 리플율(0.05%)을 달성 하였다. 또한, 500V에서 20kV의 넓은 출력 전압 제어 범위를 달성한 것을 그림 15를 통해 확인할 수 있다. 그림 16는 개발된 20kV, 20kW 고전압 DC 전원장치의 내부사진을 보여주며 실험결과를 통해 저리플, 광범위한 부하 운전이 요구되는 응용 분야에 효과적으로 적용될 수 있음을 검증하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 기존의 연속도전모드의 직렬 부하 공진형 컨버터를 기반으로 정격 운전 조건에서 턴-오프 손실 및 도전 손실을 저감하여 효율 및 전력밀도 측면에서 향상된 LCC 공진형 컨버터를 제안하고, 다양한 산업용 전원장치에 적용한 연구 결과를 소개 하였다.

개발된 60kW 전기자동차 급속 충전기, 24kJ/s 고전압 커패시터 충전기 그리고 20kV, 20kW DC 전원장치 실험결과를 통해 제안한 LCC 공진형 컨버터가 다양한 응용분야에 효과적으로 적용 가능함을 검증하였다.

References

- [1] S. H. Ahn, J. W. Gong, S. R. Jang, H. J. Ryoo, and D. H. Kim, "Design and implementation of enhanced resonant converter for EV fast charger," *Journal of Electrical Engineering & Technology*, Vol. 9, No. 1, pp. 143-153, Jan, 2015.
- [2] S. H. Ahn, H. J. Ryoo, J. W. Gong, and S. R. Jang, "Low-ripple and high-precision high-voltage DC power supply for pulsed power applications," *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 42, No. 10, pp. 3023-3033, Oct. 2014.
- [3] S. H. Ahn, H. J. Ryoo, J. W. Gong, and S. R. Jang, "Design and test of a 35-kJ/s high-voltage capacitor charger based on a delta-connected three-phase resonant converter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 29, No. 8, pp. 4039-4048, Aug. 2014.
- [4] J. W. Gong, H. J. Ryoo, S. H. Ahn, and S. R. Jang, "Design and implementation of a 40-kV, 20-kJ/s capacitor charger for pulsed-power application," *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 42, No. 11, pp. 3623-3632, Nov. 2014.
- [5] H. J. Ryoo, S. H. Ahn, J. W. Gong, and S. R. Jang, "Design and comparison of capacitor chargers for solid-state pulsed power modulator," *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 41, No. 10, pp. 2675-2683, Oct. 2013.
- [6] H. J. Ryoo, S. R. Jang, Y. S. Jin, J. S. Kim, Y. B. Kim, S. H. Ahn, J. W. Gong, B. H. Lee, and D. H. Kim, "Design of high voltage capacitor charger with improved efficiency, power density and reliability," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 20, No. 4, pp. 1076-1084, Aug. 2013.
- [7] S. H. Ahn, "The Design and Application of Novel High-efficiency Series-parallel Resonant Converter," Ph. D. Dissertation, University of Science & Technology, 2015.



안석호(安石濠)

1983년 3월 19일생. 2009년 인천대 전기공학과 졸업. 2015년 과학기술연합대학원대학교 에너지변환공학과 졸업(공박). 2015년~현재 한국전기연구원 전기추진연구센터 박사후연구원.



장성록(張成錄)

1983년 1월 16일생. 2008년 경북대 전기전자컴퓨터공학부 졸업. 2011년 과학기술연합대학원대학교 에너지변환공학과 졸업(공박). 2011년~현재 한국전기연구원 전기추진연구센터 선임연구원. 2015년~현재 과학기술연합대학원대학교 에너지변환공학과 조교수.



류홍제(柳泓齊)

1969년 3월 4일생. 1991년 성균관대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1996년~2015년 한국전기연구원 전기추진연구센터 센터장(책임연구원). 2005년~2015년 과학기술연합대학원대학교 에너지변환공학과 전공책임교수. 2015년~현재 중앙대 에너지시스템공학부 부교수.