

전기 집진기 구동용 고전압 DC 전원장치 개발

김태현^{1,2}, 손성호^{1,2}, 권창현^{1,2}, 김형석^{1,2}, 유찬훈², 장성록^{1,2}
과학기술연합대학원대학교¹, 한국전기연구원²

Development of High-Voltage DC Power Supply for Electrostatic Precipitator

Tae-Hyun Kim^{1,2}, Sung-Ho Son^{1,2}, Chang-Hyun Kwon^{1,2},
Hyoung-Suk Kim^{1,2}, Chan-Hun Yu², Sung-Roc Jang^{1,2}

University of Science and Technology¹, Korea Electrotechnology Research Institute²

ABSTRACT

본 논문은 전기 집진기(Electrostatic Precipitator, ESP) 구동을 위한 고전압 DC 전원장치 개발에 대해 기술한다. 개발 전원장치는 전류 연속 모드(CCM)로 동작하는 LCC 공진형 컨버터 기반으로 설계된다. LCC 공진형 컨버터는 소프트 스위칭 특성을 이용한 고주파 설계 및 고효율 달성에 유리하다. 고주파 동작은 컨버터의 공진 탱크 및 변압기의 크기를 줄일 수 있어 컨버터 소형화에 유리하며, 출력 전압 리플을 저감할 수 있다. 본 연구에서는 전기 집진기의 하전부 및 집진부 구동을 위한 컨버터를 각각 개발하고, 집진부 부하를 이용한 실험을 통해 개발 전원의 성능을 검증한다.

1. 서론

세계보건기구(World Health Organization, WHO)는 건강 위협 요소 중 하나로 산업, 발전 시설, 교통수단 등에 의해 발생하는 미세먼지를 언급하고 있다. 전기 집진기(Electrostatic Precipitator, ESP)는 미세먼지 걸름을 위한 효율적인 수단 중 하나로써 산업 시설에서 많이 이용되고 있다^[1-4]. 전기 집진기는 공기 중의 분진을 코로나 방전을 이용하여 이온화(Ionization)시킨 후, 이온화된 분진을 집진부에 포집한다. 전기 집진기는 분진 이온화를 위한 하전부와, 분진 포집을 위한 집진부로 구성되며, 구동을 위해 고전압 전원장치가 요구된다.

고전압 전원장치 개발에는 일반적으로 고전압 변압기가 사용되기 때문에, 스위칭 모드 파워 서플라이(Switching Mode Power Supply, SMPS)가 주로 사용된다. 또한, 전원장치의 고주파 구동 설계는 크기 및 출력 전압 리플 개선의 장점을 갖는다. 공진형 컨버터는 소프트 스위칭 특성을 이용하여 브리지 회로의 스위칭 손실을 줄임으로써 고주파 구동이 가능하다^[5].

본 연구에서는 전류 연속 모드(CCM)로 동작하는 LCC 공진형 컨버터를 이용하여 고전압 DC 전원장치를 개발한다. LCC 공진형 컨버터는 고전압 변압기의 누설 인덕턴스와 기생 커패시턴스를 공진 파라미터로 활용할 수 있는 장점이 있다. 추가로, 소자들의 도전 손실 저감을 위해 사다리꼴 형태의 공진전류를 설계한다. 개발된 고전압 DC 전원장치의 성능은 전기 집진기 부하를 이용한 실험을 통해 검증한다.

2. LCC 공진형 컨버터 동작 원리 및 설계

그림 1은 LCC 공진형 컨버터의 회로를 나타낸다. 회로는 하프-브리지 인버터(S1, S2), 직렬 공진 인덕터(L_s), 직렬 공진 커패시터(C_s), 병렬 공진 커패시터(C_p), 변압기(TX), 그리고 배전압 정류회로(C_b , $D_{rec,n}$)로 구성된다. 그림 2는 LCC 공진형 컨버터의 동작 파형을 보여준다. 회로도 및 동작 파형에 기반한 동작 원리는 아래와 같다.

모드 1 (M1) : $t_0 - t_1$

스위치 S1이 턴-온된 상태에서 공진 전류가 흐르기 시작한다. 변압기의 1차 측을 기준으로 병렬 공진 커패시터의 초기 전압은 배전압 정류 회로의 단수(n) 및 변압기의 1차 권선과 2차 권선의 권선비(N_{TX})를 고려하여 $-V_o/n \cdot N_{TX}$ 의 값을 갖는다. 모드 1은 공진 전류가 병렬 공진 커패시터를 같은 값을 갖

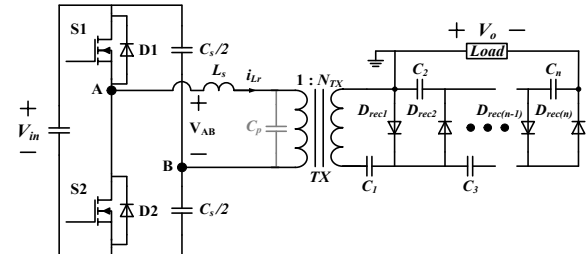


그림 1. 배전압 정류 회로를 포함한 LCC 공진형 컨버터 회로도
Fig. 1. Circuit diagram of LCC resonant converter including voltage multiplier

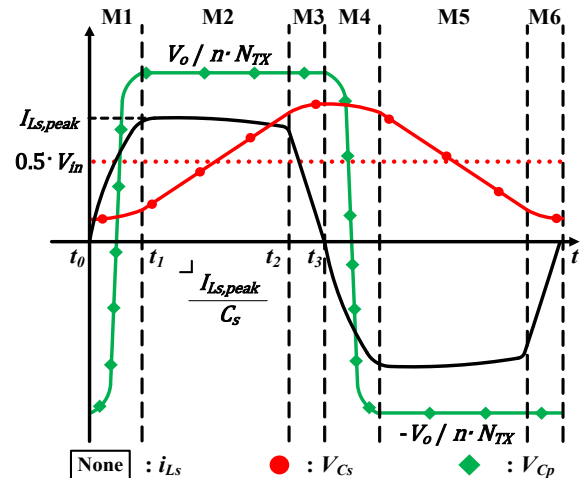


그림 2. LCC 공진형 컨버터 동작 파형
Fig. 2. Operating waveforms of LCC resonant converter

는 양의 전압($V_O/n \cdot N_{TX}$)에 도달할 때까지의 구간을 의미한다. 사다리꼴 형태의 공진 전류 형성을 위해 C_p 는 C_s 보다 매우 낮게 선정되기에, 모드 1에서의 공진 주파수(f_{op}) 및 특성 임피던스(Z_{op})는 L_s 와 C_p 에 의해 결정된다^[6]. 모드 1의 전류는 부하로 전달되지 않는 순환 전류이며, 컨버터의 경부하 운전 및 공진 전류 첨두치($I_{Ls,peak}$)와 연관된다. 관련 수식은 (1)과 같다.

$$P_{TX} = \left(1 - \frac{5}{8} \frac{f_{sw}}{f_{op}}\right) \cdot \frac{V_{in}}{2} I_{Ls,peak} \quad (1)$$

모드 2 (M2) : t_1 - t_2

C_p 의 충전이 완료된 후, L_s 와 C_s 의 공진을 통해 전류가 형성된다. 모드 2의 공진 주파수(f_{os})는 f_{op} 보다 느리며, 특성 임피던스(Z_{os})는 Z_{op} 보다 크다. 여기서 C_s 전압은 크게 설계된 C_s 로 인해 입력 전압의 반전압으로 간주되며, 공진 인덕터에 인가되는 전압은 영전압에 가깝다. 따라서 평평한 형태의 공진 전류가 형성된다. 모드 2는 스위치 S1의 턴-오프 전까지 지속된다.

모드 3 (M3) : t_2 - t_3

S1이 t_2 때 턴-오프되면서 공진 전류는 S2의 역병렬 다이오드인 D2를 통해 흐른다. 그 결과, 공진 인덕터에 직렬 커패시터 전압 및 출력 전압이 음의 방향으로 인가되면서 공진 전류는 급격히 감소한다. 또한, S2에 인가되는 전압은 D2의 순방향 도통 전압이기 때문에, S2는 스위칭 손실이 거의 없는 소프트 스위칭을 이용한 턴-온이 가능하다. 모드 3는 공진 전류 영전류 도달 시점까지이며, 전류 방향 전환이 일어나며 모드 4가 시작된다. 모드 4부터 모드 6까지의 동작 원리는 모드 1, 2, 3과 같다.

공진 파라미터 설계 과정은 아래와 같다.

부하에 필요한 경부하 운전 범위를 고려한 f_{op} 를 선정하여 $I_{Ls,peak}$ 를 수식 (1)로부터 얻은 후, 수식 (2)로부터 Z_{op} 를 구한다.

$$Z_{op} = \sqrt{\frac{L_s}{C_p}} = \frac{V_{in} + V_{Cs,peak}}{I_{Ls,peak}} \quad (2)$$

수식 (2)에서 얻은 Z_{op} 값을 기준으로, 수식 (3)과 (4)를 이용하여 L_s 및 C_p 를 얻을 수 있다.

$$L_s = \frac{Z_{op}^2}{2\pi f_{op}} \quad (3)$$

$$C_p = \frac{L_s}{Z_{op}^2} \quad (4)$$

마지막으로, 수식 (5)를 이용하여 C_s 를 얻는다.

$$C_s = \frac{I_{Ls,peak} \left(\frac{T_{sw}}{2} - \frac{3}{8} T_{op} \right)}{V_{Cs,peak}} \quad (5)$$

3. 실험 결과

개발된 고전압 DC 전원장치의 사양은 표 1과 같으며, 하전부 및 집진부의 전압 인가를 위한 각각의 컨버터가 개발되었다. 그림 3과 그림 4는 집진기 부하를 이용한 컨버터 실험 파형을 나타낸다. 그림 3의 하전부 컨버터 동작 파형으로부터 사다리꼴 형태의 공진전류(i_{Ls})를 확인할 수 있다. 또한, 앞서 설명한 모드 3 구간에서의 MOSFET 드레인-소스 전압(V_{DS})파형

표 1. 개발된 DC 전원장치 사양

Table 1. Specifications of developed DC power supplies

	하전부	집진부
입력 전압 [V]	12	12
최대 출력 전압 [kV]	12	12
최대 출력 전류 [mA]	4	2
최대 출력 전력 [W]	48	12
최소 스위칭 주파수 [kHz]	250	250

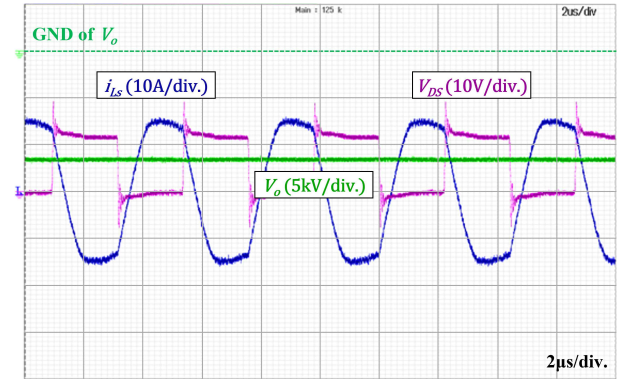


그림 3. 하전부 컨버터 동작 파형

Fig. 3. Operating waveforms of the converter for ionizer

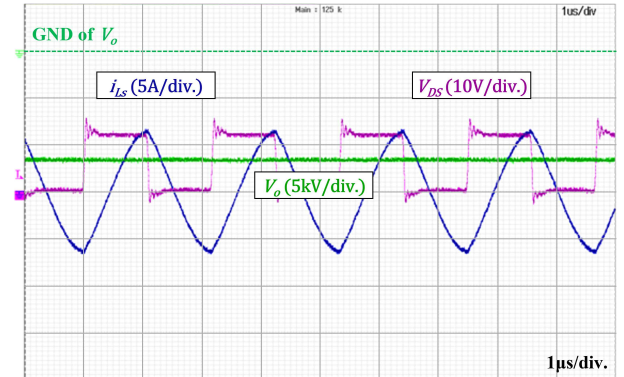


그림 4. 집진부 컨버터 동작 파형

Fig. 4. Operating waveforms of the converter for collector

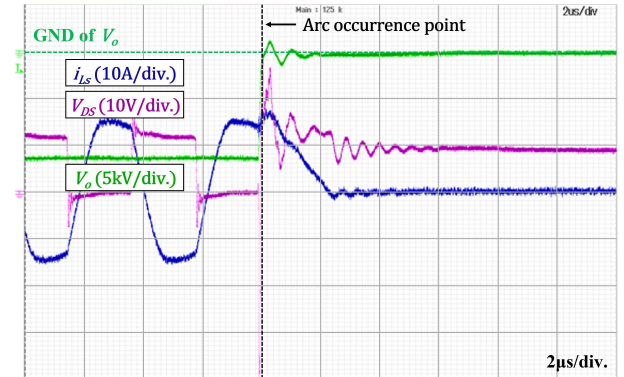


그림 5. 아크 보호 회로 동작 파형

Fig. 5. Operating waveforms of arc protection circuit

으로부터, 소프트 스위칭이 이루어지고 있음을 볼 수 있다. 출력전압(V_o)의 경우, 표 1에 명시된 사양과 같이 12kV가 측정되었다. 그림 4의 집진부 컨버터 파형의 경우 그림 3과 상이한 공진전류 형태가 측정되는데, 이는 집진부 부하가 개방회로로 간주되어 컨버터가 경부하 동작을 하기 때문이다. 하지만, 하전

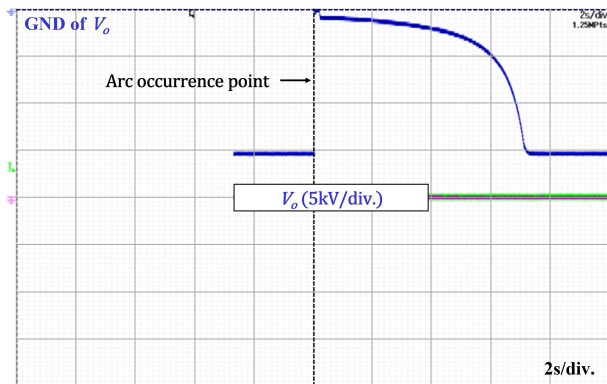


그림 6. 아크 발생 후 전원장치 재기동 파형

Fig. 6. Restart function test of the developed power supply after arc protection

부 동작과 마찬가지로 소프트 스위칭이 이루어지며 출력 전압 또한 12kV로 측정되었다.

추가로, 집진기 부하에서 빈번히 발생하는 아크로부터 전원장치를 보호하기 위한 아크 보호 회로 실험 및 컨버터 재기동 실험이 진행되었다. 그림 5는 아크 보호 회로 동작 파형을 보여준다. 파형에서 보이듯이 아크 발생 후 수 마이크로초 이내에 컨버터 동작이 멈추는 것을 확인할 수 있다. 그림 6은 아크 보호회로 동작 후 전원장치가 다시 동작하는 파형을 나타낸다. 아크 발생 지점에서 전원장치 동작이 멈춘 후, 다시 원래의 출력 전압에 도달하는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문은 전기 집진기 구동용 고전압 DC 전원장치 개발에 대해 다룬다. 하진부 및 집진부의 고전압 인가를 위해 각각의 컨버터는 LCC 공진형 컨버터를 기반으로 개발되었다. 개발된 전원장치의 성능은 집진기 부하를 이용한 실험을 통해 검증되었다. 또한, 집진기 부하에서 빈번히 발생하는 아크로부터 전원장치를 보호하기 위한 아크 보호 회로 실험 및 전원장치 재기동 실험을 진행함으로써, 개발된 전원장치의 신뢰성을 확보하였다.

이 논문은 2023년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회의 지원을 받아 수행된 한국전기연구원 기본사업(No. 23A01034)의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- [1] N. Grass, W. Hartmann and M. Klockner, "Application of different types of high-voltage supplies on industrial electrostatic precipitators," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 40, no. 6, pp. 1513-1520 (2004).
- [2] Z. Yuan, K. Suzuki, Y. Ehara, J. Ikeda, K. Yamashiro and T. Takano, "Corona Discharge Characteristics in Electrostatic Precipitator under High Temperature," 2020 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting,

Detroit, MI, USA (2020).

- [3] T. B. Soeiro, J. M. Hlethaler, J. Linnér, P. Ranstad and J. W. Kolar, "Automated Design of a High-Power High-Frequency LCC Resonant Converter for Electrostatic Precipitators," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 60, no. 11, pp. 4805-4819 (2013).
- [4] J. Podlinski and J. Mizeraczyk, "Visualization of Dust Collection in DC-Corona-Driven Electrostatic Precipitator," in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 39, no. 11, pp. 2260-2261 (2011).
- [5] R. L. Steigerwald, "A comparison of half-bridge resonant converter topologies," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 3, no. 2, pp. 174-182 (1988).
- [6] S. -R. Jang, C. -H. Yu and H. -J. Ryoo, "Trapezoidal Approximation of LCC Resonant Converter and Design of a Multistage Capacitor Charger for a Solid-State Marx Modulator," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 33, no. 5, pp. 3816-3825 (2018).