

고전압 용량성 결합 플라즈마 시스템의 개선된 전압 파형 출력을 위한 펄스 전류 발생장치 회로

채범석¹, 민주화¹, 서용석¹, 김현배[†], 김혜진[†]
 전북대학교 공과대학 전기공학과¹, 삼성전자 생산기술연구소

Current Source Type Pulse Generator with Improved Output Voltage Waveform for High Voltage Capacitively Coupled Plasma System

Beomseok Chae¹, Juhwa Min¹, Yongsug Suh¹, Hyejin Kim[†], and Hyunbae Kim[†]
 Dept. of Electrical Engineering, Chonbuk National University, Korea¹
 Manufacturing Technology Center, Samsung Electronics, Korea[†]

ABSTRACT

본 논문은 용량성 결합 플라즈마 응용 시스템을 위한 전류형 토폴로지 기반의 전력 변환장치 구조를 제안한다. 제안된 시스템은 독립적으로 제어된 두 개의 고 정밀 펄스 전류를 부하로 출력하는 병렬 연결된 전류형 전력 변환장치로 구성된다. 전체 회로 토폴로지는 네 가지 세부 부분; 바이어스 전류 발생기, 바이어스 전류 모듈레이터, 슬로프 전류 발생기, 슬로프 전류 모듈레이터로 구성되어 있다. 제안된 시스템은 빠른 과도 특성을 위해 1200V/90A급 SiC MOSFET 스위치를 사용하였다. 제안된 전력 변환장치는 4.5kV의 출력전압, 40A급 출력전류와 100ns급 전류 상승/하강 특성을 충족시키도록 설계되었다. 본 연구는 펄스 전류형 전력 변환회로를 제안함으로써 전압형 전력 변환장치에 비해 전압 스파이크 및 전압 파형 왜곡을 줄여 보다 정확한 출력 전압을 발생시킴으로써 용량성 결합 플라즈마 시스템의 안정도 및 정밀도를 향상시킬 수 있다.

1. 서 론

최근 전력전자 기술은 플라즈마 응용 시스템에 효과적으로 적용되고 있다. 최근 소자 기술의 발전으로 인해 고전압, 고속 스위칭 어플리케이션 영역의 한계가 확장됨으로써 그동안 전력 전자 기술이 적용되지 않았던 플라즈마 응용 분야에서도 전력 전자 기술의 적용이 가능하게 되었다.^[1] 최신 플라즈마 응용 시스템은 고전압, 고전류, 고주파수 및 빠른 동적 성능을 요구한다. 특히 반도체 제조 공정에서 사용하는 플라즈마는 수 kV의 전압과 100ns 미만의 전류 상승/하강 시간을 필요로 한다.^[2] 이러한 수kV단위의 전압, 수십 암페어 단위의 전류, 그리고 고속 과도 특성을 가지는 플라즈마 시스템은 전력변환시스템에 새로운 도전 과제를 제시한다.

수 kV의 출력 전압 및 수십 암페어의 전류를 100ns 미만의 시간으로 상승/하강을 시키기 위해서는 몇 가지 방법이 있다. 한 예로 짧은 과도 시간 내에 에너지를 저장 및 방출하는 커패시터를 이용한 전압형 펄스 발생장치 토폴로지가 있다. 현재 전압형 펄스 발생장치는 펄스 전원장치에 널리 사용되고 있다.^[3] 하지만 전압형 펄스 발생장치는 용량성 결합 플라즈마에 사용할 경우 전원부 커패시터와 부하 커패시턴스 사이에서 단락 전류가 발생된다. 이렇게 제어되지 않은 단락 전류는 출력 부하단에 전압 스파이크 및 왜곡을 발생시켜 플라즈마 어플리

케이션에 시스템 성능을 저하시키는 요인이 된다.

본 논문에서는 출력 전압 4.5kV_{pp}, 출력 전류 40A, 상승/하강 시간 100ns 미만의 전력 변환기 회로를 제안한다. 제안된 회로는 전류형 컨버터 기반의 회로가 병렬 연결된 구조를 이용하여 고정밀 출력 사양을 충족시킨다. 전체 시스템은 Bias Current Generator, Bias Current Modulator, Slope Current Generator, Slope Current Modulator 이렇게 총 4개의 회로로 구성되어 있다. 또한 제안된 회로는 빠른 동적 특성을 충족시키기 위해 1200V/90A급 SiC MOSFET 소자를 사용하여 제작되었다. 이렇게 설계된 회로는 전압형 펄스 발생장치와 비교하여 보다 낮은 전압 스파이크 및 낮은 부하 전압 왜곡을 성공적으로 달성하였으며 이를 통해 보다 정밀한 플라즈마 응용 제어가 가능하게 되었다.

2. 용량성 결합 플라즈마 시스템

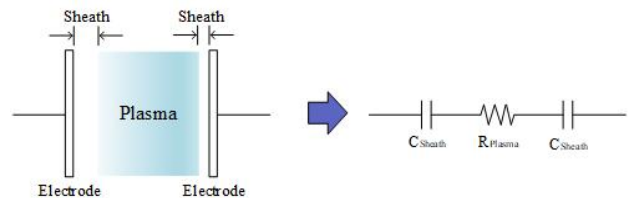


그림 1 용량성 결합 플라즈마 부하와 등가회로

그림 1은 용량성 결합 플라즈마 시스템의 부하와 그 등가회로를 보여준다. 플라즈마 부하는 시스(sheath) 커패시턴스와 별크 플라즈마의 저항성분으로 구성되어 있다.

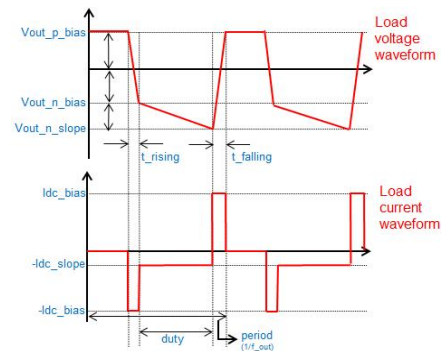


그림 2 용량성 결합 플라즈마 부하의 전압(상단)과 전류 파형(하단)

목표 부하 전압과 전류 파형은 그림 2에 표시되어 있다. 플라즈마 식각 공정에서 펄스 전압과 전류의 파형은 시스템의 성능 향상과 수율의 증가에 있어 중요한 요인이 된다. 부하 전압의 peak to peak 값은 플라즈마 전극 양단의 총 전위를 결정한다. 부하 전압의 슬로프 구간(duty 구간)은 플라즈마 내부의 전압 강하 현상을 보상하여 일정한 전압이 플라즈마 내부에 형성될 수 있도록 동작한다.

3. 전압형 펄스 발생장치

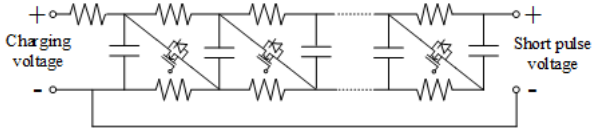


그림 3 막스 제네레이터 회로

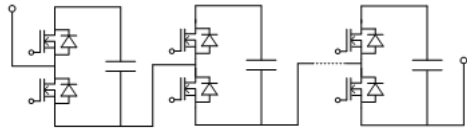


그림 4 하프브릿지 멀티레벨 모듈러 컨버터(HB MMC) 회로

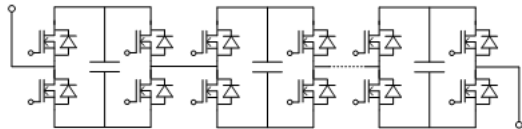


그림 5 풀브릿지 멀티레벨 모듈러 컨버터(FB MMC) 회로

고전압 플라즈마 시스템에서 전압형 컨버터를 기반으로 한 전원장치를 사용하기도 한다. 그림 3~5는 대표적인 전압형 고전압 전원장치 회로들이다. 그림 3은 막스 제네레이터로 커패시터를 병렬 연결하여 충전한 뒤 다시 직렬 연결시켜 전압을 상승시키는 동작을 수행한다. 그림 4는 하프브릿지 멀티레벨 모듈러 컨버터로 독립 DC 전원들을 직렬 연결 또는 바이패스하는 동작으로 고전압을 발생시킨다. 그림 4는 풀브릿지 멀티레벨 모듈러 컨버터로 그 동작은 하프브릿지 멀티레벨 모듈러 컨버터와 같지만 양방향 극성의 펄스 전압을 출력할 수 있다는 특징이 있다. 이러한 전압형 펄스 발생장치는 용량성 결합 플라즈마 부하에 연결할 때 단락전류가 발생할 수 있기 때문에 직렬 연결된 필터 인덕터가 필요하다. 이 경우 그림 2와 같이 짧은 상승/하강 기울기를 가지는 펄스 파형의 부하 전압 및 부하 전류를 얻기가 어려워진다. 이러한 한계를 해결하기 위해 본 논문에서는 전류형 펄스 전원장치를 제안하고자 한다.

4. 제안된 전류형 펄스 발생장치

앞서 언급한 전류형 펄스 전원장치의 동작 속도 문제를 해결하기 위해 그림 6에서 전류형 펄스 전원장치 회로를 제안한다. 제안된 전류형 펄스 전원장치는 병렬 연결된 두 개의 전류 소스를 사용한다. 이 구조는 그림 2에서 보여지는 부하 전압과 부하 전류의 특성을 충족시키기 위해 설계되었다. 기본적으로 제안된 회로는 Bias Current Generator, Bias Current Modulator, Slope Current Generator, Slope Current Modulator로 구성되어 있다.

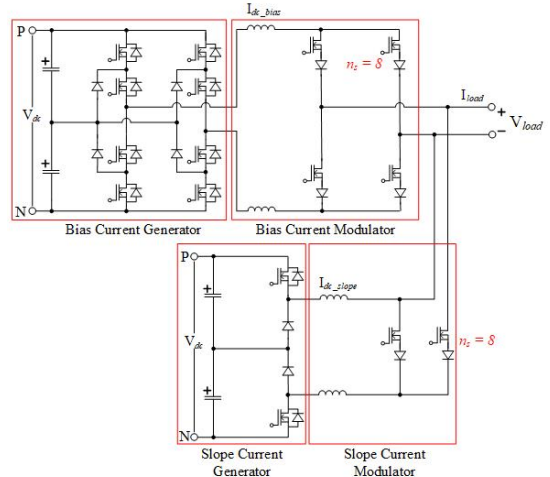


그림 6 제안된 전류형 펄스 전원장치 회로

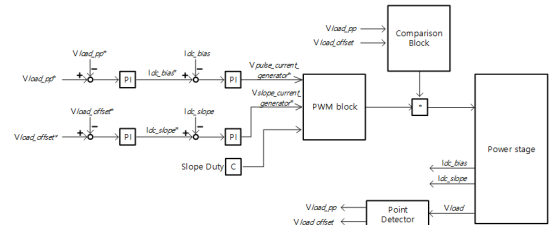


그림 7 전류형 펄스 전원장치의 제어기 블록 다이어그램

4.1 전류형 펄스 발생장치의 동작

그림 6에서 2개의 병렬 연결된 전류 소스 중 상단의 회로는 부하측으로 전달되는 바이어스 전류 (I_{dc_bias})를 발생시킨다. 이 전류 소스는 Bias Current Generator와 Bias Current Modulator 이렇게 두 개의 세부 회로로 구성된다. Bias Current Generator는 풀브릿지 3레벨 NPC 타입 컨버터이다. Bias Current Modulator는 풀브릿지 전류형 컨버터 회로로 설계하였다. 일정한 DC 전류를 입력받아 양방향 펄스 형태의 전류를 부하측으로 전달한다. Bias Current Modulator는 양방향 부하 전압을 차단하기 위해 역방향 차단 다이오드가 포함되어 있다. Bias Current Modulator는 스위치와 다이오드를 각각 8개씩 직렬 연결하여 수kV 범위의 AC 부하 전압을 차단할 수 있다.

그림 6에서 하단의 회로는 슬로프 전류(I_{dc_slope})를 발생시킨다. 슬로프 전류를 발생시키는 회로는 Slope Current Generator와 Slope Current Modulator로 구성된다. 슬로프 전류(I_{dc_slope})는 바이어스 전류(I_{dc_bias})보다 훨씬 작은 값을 가지고 긴 시간동안 부하로 전달되는 특징이 있다. 작은 크기의 전류가 긴 시간동안 부하로 전달됨으로써 부하 전압의 슬로프 구간 파형을 형성할 수 있다. Slope Current Generator는 DC 전압을 입력받아 슬로프 전류(I_{dc_slope})를 출력한다. 이 슬로프 전류(I_{dc_slope})는 부하 전압의 음의 방향 기울기만을 형성하므로 단방향 펄스 전류를 부하로 전달하면 된다. 때문에 I_{dc_slope} 을 부하로 전달하기 위한 Slope Current Modulator 회로는 단방향 펄스 전류를 발생시킬 수 있는 구조로 설계되었다.

4.2 전류형 펄스 발생장치 제어 알고리즘

플라즈마 부하는 본질적으로 매우 역동적인 전기적 특성을 갖는다. 따라서 부하 전압과 부하 전류는 복잡한 플라즈마 공정 요인들의 영향을 크게 받는다. 이러한 동적 특성과 다양한 요인들을 반영하여 시스템을 제어하기 위해 그림 7과 같은 제어를 설계하였다. 기본적으로 제어기는 그림 2에서 표시된 출력 전압 파형을 플라즈마 부하에 인가하는 것을 목표로 한다. 따라서 제어기는 출력 전압을 측정하여 피드백 제어를 수행한다. 제어기는 부하 전압의 $V_{out_p_bias}$, $V_{out_n_bias}$ 및 $V_{out_n_slope}$ 값을 측정하여 해당 값들을 제어하기 위한 I_{dc_bias} 및 I_{dc_slope} 의 값을 결정한다. 이 두 전류의 값을 제어함으로써 바이어스 전압의 피크 두 피크 크기와 슬롭 전압의 크기를 상대적으로 높은 정확도 내에서 능동적으로 제어할 수 있다.

5. 전류형 펄스 발생장치 시뮬레이션 및 실험

제안된 펄스 전류 발생장치의 전체 시스템은 PLECS 시뮬레이터를 이용하여 검증하였다. 시뮬레이션 조건은 표 1에 표시하였다. 그림 8은 시뮬레이션을 통해 얻은 부하단 출력 파형이다. 부하 전압은 4.5kVpp값을 가짐을 확인하였고 또한 부하 전류는 양방향 45A 펄스 전류와 단방향 1A 펄스 전류를 출력함을 확인하였다.

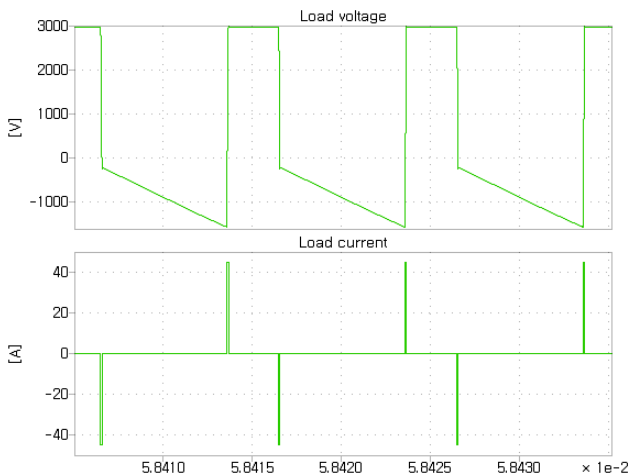


그림 8 전류형 펄스 발생장치의 부하 전압(상단)과 부하 전류(하단) 시뮬레이션 결과 파형

실험 환경은 그림 9에 나타난 것과 같이 전류형 펄스 발생장치 하드웨어와 그것을 제어하기 위한 제어보드로 구성하였다. 그림 10과 11은 각각 두 가지 다른 목표 조건에서 부하 전압 및 전류의 실험 파형을 측정하였다.



그림 9 전류형 펄스 발생장치(좌측)와 제어보드(우측)

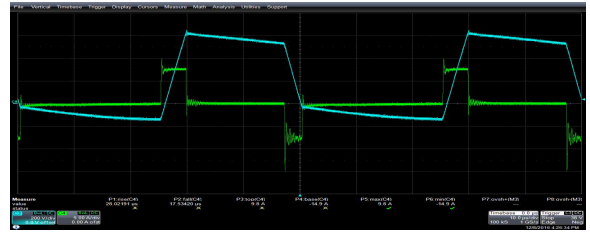


그림 10 전류형 펄스 발생장치의 부하 전압(700Vpp)과 부하 전류 (7A/1A) 실험 파형

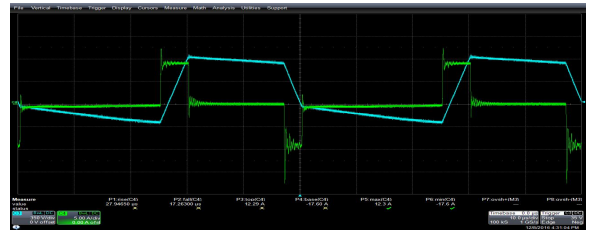


그림 11 전류형 펄스 발생장치의 부하 전압(1kVpp)과 부하 전류 (9A/1A) 실험 파형

그림 10은 700Vpp, 7A (200V/div, 5A/div)를 목표로 실험을 수행하였고, 그림 11은 1kVpp, 9A (350V/div, 5A/div)를 목표로 실험을 수행하였다. 실험을 통해 얻은 전압 및 전류 파형은 그림 2의 목표 부하 전압 및 부하 전류 파형과 유사한 패턴을 보임을 확인하였다. 이를 통해 시뮬레이션 및 하드웨어가 용량성 결합 플라즈마 시스템에서 원하는 동작을 수행함을 확인할 수 있었다.

6. 결 론

본 논문에서는 용량성 결합 플라즈마 응용 시스템을 위한 새로운 전력 변환장치 솔루션을 제안하였다. 제안된 컨버터 시스템은 4.5kV의 출력 전압과 45A의 출력 전류를 100ns 미만의 상승/하강 시간을 충족하기 위해 설계하였으며 목표로 하는 파형을 성공적으로 출력함을 확인하였다. 서로 다른 기율기의 부하 전압을 형성하기 위해 설계된 두 전류 발생장치는 정교하게 제어된 전류를 출력하였고 이를 이용하여 목표로 한 전압 파형을 얻을 수 있었다. 또한 제안된 회로를 통해 얻은 전압 파형은 스파이크 전압 및 전류 리플을 억제하여 출력 파형의 정밀성 확보를 달성하였다. 결과적으로 시뮬레이션 및 실험 검증을 통해 제안된 회로의 우수성을 확인할 수 있었다.

본 연구는 한국전력공사의 2018년 착수 에너지 거점대학 클러스터 사업에 의해 지원되었음 (과제번호:R18XA04)

참 고 문 헌

- [1] B. Koo, Z. Fang, L. Godet, S. B. Radovanov, C. Cardinaud, G. Cartry, A. Grouillet, and D. Lenoble, "Plasma Diagnostics in Pulsed Plasma Doping (P2LAD) System," IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 32, no. 2, pp. 456-463, Apr. 2004.
- [2] I. V. Grekhov, "Pulse Power Generation in Nano- and Subnanosecond Range by Means of Ionizing Fronts in Semiconductors: The State of the Art and Future Prospects," IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 38, no. 5, pp. 1118-1123, May 2010. Curtis F. Gerald, Applied Numerical Analysis: Second Edition, Addison-Wesley Publishing Company, Inc. pp. 1-14, 1978.
- [3] Demiral Akbar, "Investigation of Single and Dual RF Capacitively Coupled Nitrogen Plasma Discharges Using Optical Emission Spectroscopy," IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 42, no. 8, pp. 2058-2064, Aug. 2014.