

# 플라즈마 공정을 위한 새로운 고전력 밀도 맞춤 파형 모듈레이터

김재상, 김동민, 김태우, 김재호, 문건우  
KAIST

## A New High-Power Density Tailored Waveform Modulator for Plasma Processing

Jae-Sang Kim, Dongmin Kim, Taewoo Kim, Jaeho Kim, Gun-Woo Moon  
KAIST

### ABSTRACT

플라즈마 공정의 정밀도를 향상시키기 위해 좁은 플라즈마 이온 에너지 분포가 요구된다. 맞춤 전압 파형 기반 플라즈마 공정은 단일 이온 에너지 분포를 달성할 수 있어 주목을 받고 있다. 이 논문에서는 바이어스 전압 모듈레이터와 슬로프 전압 모듈레이터를 통합함으로써 스위치 수와 부피를 줄이는 새로운 고전력 밀도 맞춤 전압 파형 모듈레이터를 제안한다. 제안된 회로는 고장 상황에서 인덕터 전류 우회로를 제공함으로써 인덕터 에너지를 소산하는 추가 회로가 필요하지 않다. 또한, 두 개 이상의 음전압 바이어스를 사용하는 multimodal IED 시스템으로 확장할 때, 인덕터 전압 스윙을 크게 줄일 수 있어 작은 부피를 달성할 수 있다. 제안된 변조기의 실행 실효성은 100 kHz에서 1.2kV의 맞춤 전압 파형을 출력할 수 있는 프로토타입을 통해 검증되었습니다.

### 1. 서론

최근, 반도체 산업은 더 작고 효율적인 반도체를 생산하기 위해 복잡하고 정교한 제조 공정을 요구한다. 그 결과, 플라즈마 공정의 정밀한 제어가 중요한 요소로 부상하고 있다. 플라즈마 공정은 기판에 충돌하는 이온의 물리적, 화학적 반응을 통해 기판을 가공할 수 있으므로 정밀한 이온 에너지 제어를 통해 공정의 속도, 선택도, 이방성을 향상하는 것이 중요하다. 플라즈마 이온 에너지는 전극에 인가되는 바이어스 전압에 의해 직접적으로 제어 될 수 있다. 따라서 바이어스 전압의 정교한 제어가 플라즈마 공정의 정밀도를 향상을 위해 필수적이다.

맞춤형 전압 파형 바이어스는 단일 에너지의 ion-energy distribution(IED)을 달성할 수 있어 활발하게 연구되고 있다. 그림 1은 맞춤 전압 파형의 전압과 플라즈마 쉬스 전압, IED를 보여준다. 실질적인 공정이 이루어지는 음전압 구간에서 지속적으로 기판으로 충돌하는 양이온으로 인해 쉬스 전위가 상승하게 되고 이는 IED를 넓어지게 하는 요인이다. 이를 보완하기 위해 바이어스 전압에 슬로프를 적용하면 일정한 쉬스 전위를 얻을 수 있으며 좁은 IED를 달성할 수 있다. 주기적인 양전압 바이어스는 기판 전압을 낮춰 바이어스 전압의 과도한 상승을 방지한다. 따라서 음전압에 비해 작은 시비율로 운용된다.<sup>[1][2]</sup>

맞춤 전압 파형을 구현하기 위해 모듈레이터 회로에 대한 다양한 논문과 특허가 제안되었다. 이러한 연구 중에서 스위치 모드 파워 서플라이를 활용하여 모듈레이터의 높은 효율과 낮

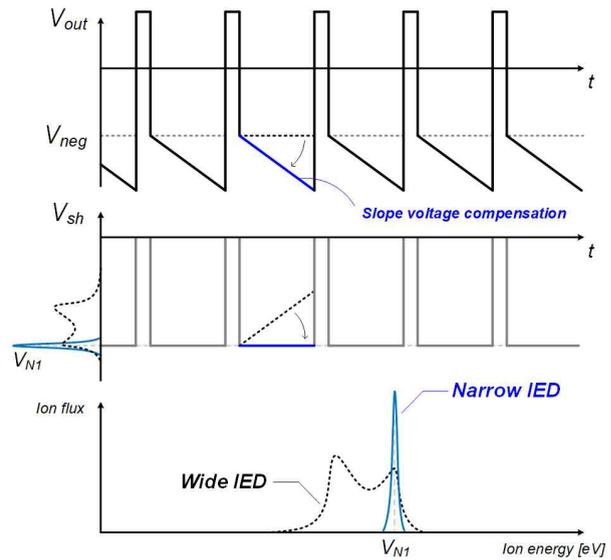


그림 1. 플라즈마 공정에서 바이어스 전압으로 사용되는 맞춤형 전압 파형과 해당 플라즈마 쉬스 전압, 이온 에너지 분포.

은 비용을 달성하는 연구가 진행되었다. 하프-브리지 인버터를 음전압 바이어스로 활용하며 인덕터를 출력에 직접 연결함으로써 슬로프 전압을 구현한 모듈레이터 회로가 제안되었다.<sup>[3]</sup> 하지만 큰 출력 전압 스윙이 직접적으로 인덕터에 인가되어, 인덕턴스와 부피가 증가하는 문제를 가지며 고장 상황에서 인덕터 전류의 바이패스 경로가 없어, 릴레이와 저항으로 구성된 추가적인 소산 회로가 필요하다.

추가된 다이오드가 있는 중성점 클램프(NPC) 인버터를 전압 바이어스로 사용하며 벡-부스트 컨버터를 슬로프 전압 모듈레이터로 활용한 회로가 제안되었다.<sup>[4]</sup> 이 회로는 벡-부스트 컨버터가 인덕터 전류 바이패스 경로를 제공할 수 있으므로 추가적인 에너지 소산 회로 없이 동작할 수 있다. 또한, NPC 인버터를 확장함으로써 다양한 음전압 바이어스를 가지는 multimodal IED 시스템을 효과적으로 달성할 수 있다. 하지만, 스위치 수의 증가로 인해 모듈레이터의 부피가 커지고 스위치 관리의 부담이 증가하는 문제를 가진다.

이 논문에서는 새로운 맞춤형 전압 파형 모듈레이터를 제안한다. 제안된 모듈레이터는 NPC 인버터 기반의 바이어스 전압과 슬로프 전압 모듈레이터를 통합함으로써 소자 수를 줄이고 고전력 밀도를 달성한다. 특히, multimodal IED 시스템으로 확

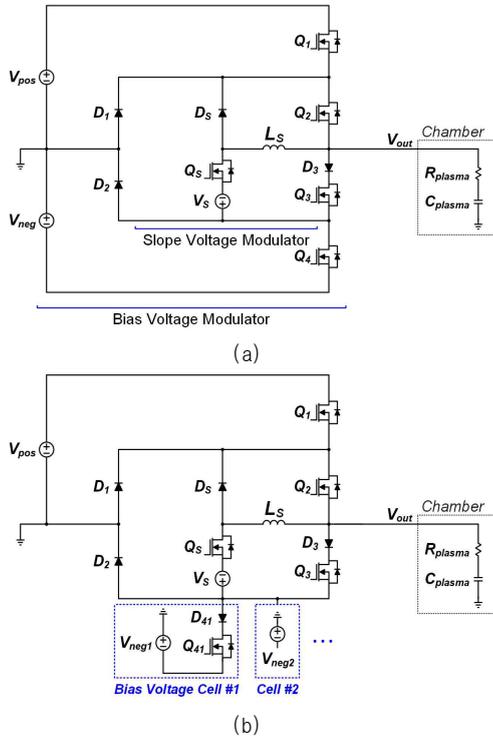


그림 2. 제안된 맞춤 파형 모듈레이터의 회로 구조. (a) unimodal IED 시스템 적용. (b) multimodal IED 시스템 확장 적용.

장될 때, 인덕터 부피가 크게 감소 될 수 있다. 또한, 인덕터 전류 바이패스가 제공되기 때문에 고장 상황에서 인덕터 에너지 소산을 위한 추가 회로가 요구되지 않는다. 결과적으로, 제안된 맞춤형 전압 파형 모듈레이터는 고전력 밀도를 달성할 수 있다.

## 2. 제안된 맞춤 파형 모듈레이터

### 2.1 제안된 맞춤 파형 모듈레이터 회로

그림 2.(a)는 바이어스 및 슬로프 전압 모듈레이터를 통한 제안된 맞춤 파형 모듈레이터를 나타낸다. 제안된 모듈레이터는 양전압 출력 구간동안  $Q_1$ 과  $Q_2$ 가 켜지고 인덕터 전류는  $Q_2$ 와  $D_5$ 를 통해 바이패스 될 수 있다. 결과적으로 슬로프 전압 모듈레이터로 별도의 백-부스트 컨버터를 사용하는 기존 회로에 비해 스위치 수를 줄이면서도 기존과 동일한 기능을 유지할 수 있다. 추가적으로,  $V_S$ 를 바이어스 전압 소스,  $Q_s$ 와 함께 쌍음으로써  $V_S$ 의 정격 전압과 전력을 줄일 수 있으며, 이로 인해 더 작은 디커플링 커패시터를 설계할 수 있다. 더욱이, 그림 2.(b)와 같이 NPC 인버터를 확장하여 multimodal IED 시스템에 적용할 때, 제안된 모듈레이터는 인덕터에 인가되는 음전압 바이어스 변동에 대한 영향을 없앨 수 있어 전압 스윙을 크게 줄일 수 있고 인덕터를 작게 설계할 수 있다.

### 2.2 동작 원리

그림 3은 제안하는 모듈레이터의 주요 동작 파형을 보여준다. 제안된 회로의 동작은 크게 양전압 출력과 음전압 출력으로 나누어진다.

양전압 출력 모드 [ $t_1$ - $t_3$ ]:  $Q_1$ 과  $Q_2$  스위치가 켜지면 출력 전압이  $V_{pos}$ 로 클램프 됩니다. 해당 모드가 시작되면 인덕터 전류는  $D_5$ 를 방전시키며 방전이 완료되면  $D_5$ 와  $Q_2$ 를 통해 프리윌링한다. 이러한 동작은 고장시에도 활용될 수 있으며 추가적인

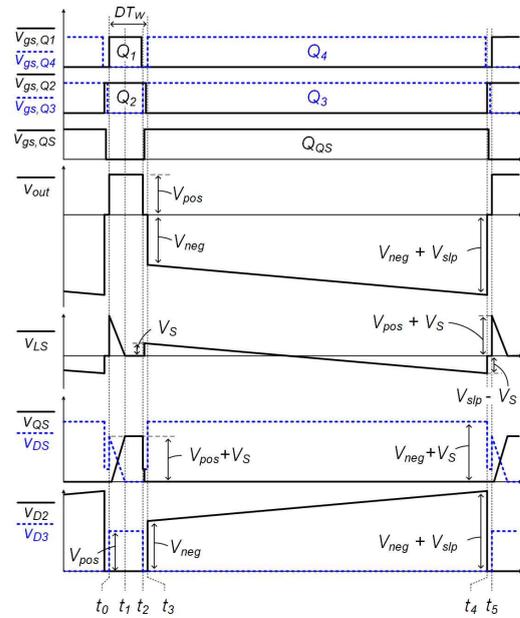


그림 3. 제안하는 맞춤 파형 모듈레이터의 핵심 동작 파형.

인덕터 에너지 소산 회로 없이 회로 동작을 보장할 수 있다.

음전압 출력 모드 [ $t_3$ - $t_5$ ]:  $Q_1$ 과  $Q_2$ 가 꺼지고  $Q_3$ 와  $Q_4$ 가 켜지면 출력 전압은  $V_{neg}$ 까지 하락합니다. 또한  $Q_s$ 가 동작함에 따라  $L_S$ 의 전류는  $V_{out}$ 을 선형적으로 하강시키며  $V_S$ 와  $V_{neg}$ 를 통해 흐른다. 출력 전압이  $V_{neg}$ 보다 낮아지면  $D_3$ 가 꺼지면서 출력 전압이 추가적으로 하강할 수 있다. 해당 모드에서 인덕터의 좌측 노드 전압은  $V_S$ 와  $V_{neg}$ 의 합이 인가되며 이는 바이어스 전압을 여러개 사용하는 multimodal IED 시스템으로 확장될 때 바이어스 전압 변동으로 인한 인덕터 전압 스윙을 크게 줄여 인덕터 부피를 감소시킬 수 있다.

## 3. 실험 결과

제안된 맞춤 파형 모듈레이터의 실험 가능성과 효과성은 [4]의 기존 모듈레이터와 비교되었다. 맞춤 파형은 표 I에 요약된 매개변수를 사용하여 unimodal과 multimodal IED 시스템에서 실험되었다.

실험 검증을 위해, 플라즈마 등가 부하에 3RLab 10Ω 무유도 저항 ET-150과 Maidensha 1.6 kV, 2nF, SCF-320H52WR 고전압 진공 커패시터를 사용하였다. 출력 전압의 파형은 고전압 패시브 프로브 PPE5KV를 사용하여 측정하였다.

그림 4는 unimodal IED 시스템에서 출력 전압 파형과 슬로프 전압 모듈레이터의 전력 반도체 전압 스트레스를 비교하는 파형을 보여준다. 그림 4(a)는 기존 모듈레이터의 스위치 전압 스트레스를 보인준다.  $Q_{S2}$ 에 가해지는 전압 스트레스는 출력 전압과 동일하여 최대 전압 스트레스는 800 V이다. 반면에, 그림 4(b)는 제안된 모듈레이터에서  $Q_s$ 와  $D_5$ 의 전압 스트레스를 보여준다. 결과적으로,  $Q_s$ 와  $D_5$ 의 최대 전압 스트레스는 각각 530 V와 630 V로 감소하여, 기존 모듈레이터에 비해 낮은 전압 스트레스를 달성한다.

그림 5는 multimodal IED 시스템으로 확장되었을 때 출력 전압과 인덕터에 인가되는 전압의 파형을 나타낸다. 그림 5(a)에서 보듯이, 기존 모듈레이터의 인덕터 전압은 바이어스 전압이 변함에 따라 크게 변하며, 균형이 맞지 않는 인덕터 전압이

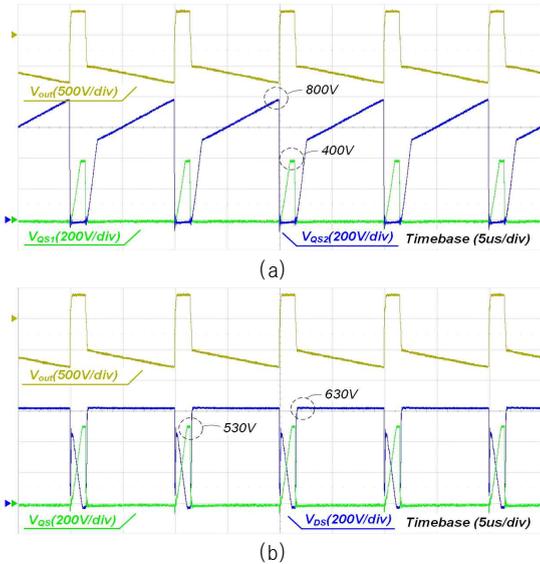


그림 4. 출력 전압과 슬로프 모듈레이터 전압 스트레스 실험 파형. (a) [4]의 기존 모듈레이터, (b) 제안된 모듈레이터.

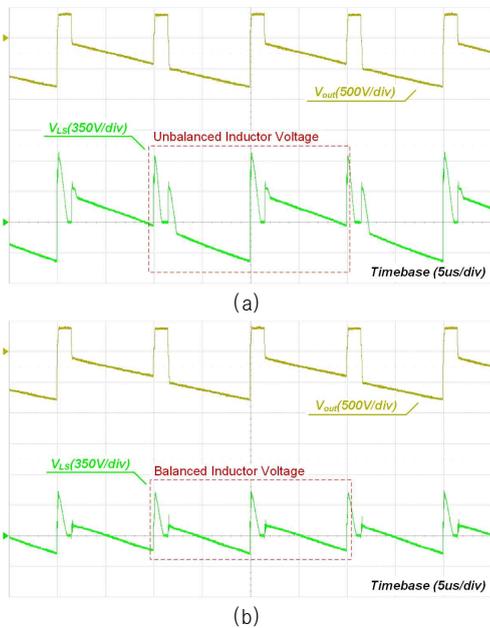


그림 5. 인덕터 전압 변동 실험 파형. (a) [4]의 기존 모듈레이터, (b) 제안된 모듈레이터.

발생한다. 따라서, 전류 변화를 줄이기 위해 인덕터는 높은 인덕턴스로 설계되어야 한다. 반면에, 제안된 모듈레이터는 바이어스 전압이 슬로프 전압 소스와 쌓여서 인덕터에 적용되므로 바이어스 전압 스윙이 상쇄된다. 결과적으로, 바이어스 전압 스윙에도 불구하고 균형 잡힌 인덕터 전압이 얻을 수 있습니다. 따라서 인덕턴스를 기존 164 mH에서 30 mH로 감소시킬 수 있으며 이는 376.6 cm<sup>3</sup>에서 111.1 cm<sup>3</sup>로 약 70 %의 인덕터 부피 감소가 가능하다. 또한 슬로프 전압 모듈레이터의 스위치를 2개 감소시킬 수 있어 전체적으로 48.5 %의 부피 감소와 27 %의 비용 감소를 달성할 수 있다.

#### 4. 결론

이 논문에서는 새로운 맞춤형 파형 모듈레이터를 제안되었다.

표 1. 실험 매개변수

Parameters	Symbol	Value
Positive bias voltage	$V_{pos}$	400 V
Negative bias voltage	$V_{neg}$	500 V
Negative bias voltage 2 (Multimodal IED only)	$V_{neg2}$	100 V
Slope voltage	$V_{slp}$	300 V
Waveform frequency	$f_w$	100 kHz
Duty cycle	$D$	0.15
Load resistor	$R_{plasma}$	10 $\Omega$
Load capacitor	$C_{plasma}$	2 nF

제안된 회로는 바이어스 전압 모듈레이터와 슬로프 전압 모듈레이터를 통합함으로써 스위칭 구성 요소, 비용, 그리고 부피를 크게 줄인다. 또한, 제안된 모듈레이터는 고장 시 인덕터 전류 바이패스를 보장함으로써 인덕터 에너지를 위한 추가 회로 없이 작동할 수 있다. 제안된 회로는 두 개 이상의 바이어스 전압을 사용하여 multimodal IED 시스템으로 확장할 수 있으며, 슬로프 전압 소스를 바이어스 전압과 쌓는 구조를 통해 인덕터 전압 스윙을 크게 줄인다. 결과적으로, 제안된 모듈레이터는 기존 회로에 비해 총 부피를 48.5% 그리고 비용을 27% 줄일 수 있다. 또한, 제안된 모듈레이터는 스위칭 전압 스트레스가 낮아, 고전압 설계에 유리하다.

맞춤형 파형 모듈레이터는 공간 확보가 중요한 진공 챔버 근처에 위치하기 때문에, 위에서 언급한 이점들이 적합하다. 따라서, 제안된 회로는 플라즈마 공정용 바이어스 전력 시스템에 효과적으로 적용될 수 있다.

이 성과는 2023년도 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (2022R1A2B5B02001877)

#### 참고 문헌

- [1] Q. Yu, E. Lemmen, K. Wijnands and B. Vermulst, "Accurate Ion Energy Control in Plasma Processing by Switched-Mode Power Converter," 2022 International Power Electronics Conference (IPEC-Himeji 2022- ECCE Asia), Himeji, Japan, 2022.
- [2] B. Chae, J. Min, Y. Suh, H. Kim and H. Kim, "Current-Source-Type Pulse Current Generator With Reduced Waveform Distortion for Capacitively Coupled Plasma Systems," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 57, no. 3, pp. 2578-2590, May-June 2021.
- [3] V. Brouk, R. Heckman, and D. Hoffman, "System, method and apparatus for controlling ion energy distribution," *U.S. Patent 9 287 086 B2*, Mar. 15, 2016.
- [4] H. Bae, H. Kim, J. Kim, C. Park and Y. Choi, "Voltage generator, voltage waveform generator, semiconductor device manufacturing apparatus, voltage waveform generation method, and semiconductor device manufacturing method," U.S. Patent 10 516 388 B1, Dec. 24, 2019.