

15kW 급 RPG용 부하병렬 공진형 컨버터의 공진네트워크 설계

채훈규, 성원용, 구근완 이병국[†]
 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

Design of Resonant Network of Parallel Loaded Resonant Converter for 15kW RPG System

Hun-Gyu Chae, Won-Yong Sung, Keun Wan Koo, and Byoung Kuk Lee[†]
 Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University

ABSTRACT

본 논문에서는 급변하는 특성을 갖는 부하를 제어하기 위한 병렬부하 공진컨버터의 공진 네트워크를 설계한다. RPG (Remote Plasma Generator)는 플라스마를 생성하기 위한 장치로서 플라스마 발생 전, 후의 부하 조건이 급격하게 달라지는 특성을 갖는다. 이때 플라스마를 발생시키기 위해서는 고전압이 필요하며, 플라스마를 유지하기 위해서는 높은 스위칭 주파수와 일정 크기의 정현파 전류가 필요하다. 이러한 특성을 고려하여 공진 네트워크를 설계하고, 시뮬레이션을 통해 과정의 타당성을 입증한다.

1. 서론

일반적으로 반도체 공정 과정에서 반도체를 만들기 위한 여러 공정을 거치게 되는데, 반도체 공정과정에서 생기는 부산물들은 진공펌프와 Scruber (GAS 처리 장치)를 통해 배기로 빠져 나오는 과정을 거치게 된다. 이때 플라스마를 이용하여 반도체 공정 시 발생하는 미세 유기오염물 또는 산화물 등을 효과적으로 제거한다. RPG (Remote plasma generator)는 중성 가스에 높은 전계를 인가하여 중성 가스의 일부가 양성자와 전자로 분리 되고, 전계의 에너지에 의해 중성 기체와 전자 및 양성자가 혼합된 플라스마를 발생시키는 장비이다. 플라스마를 발생시키는 일반적인 방법으로는 Medium Frequency 대역의 (300 kHz ~ 3 MHz) 고주파 전원을 인가하여 자기장을 발생시키고 변환된 전기장을 통해 플라스마를 생성한다.^[1] 이러한 RPG의 구동과 산화물들을 더욱 세밀하게 분해하기 위한 고전압, 고주파 인버터를 사용하는 RPG가 필요하다. 본 논문에서는 Full-bridge 회로를 기반으로 한 고전압, 고주파 인버터를 구성하고, 고주파 스위칭을 위한 공진 컨버터를 설계한다. 이 때 플라스마라는 특수한 특성을 가진 부하를 구동하기 위한 공진 네트워크 설계를 제안하며, 시뮬레이션을 통해 타당성을 검증한다.

2. RPG용 공진 네트워크 설계

2.1 플라스마 부하 특성

플라스마 발생기로서 공진 컨버터 2차측에는 기존의 도플로지와는 달리 플라스마가 부하로써 AC로드로 작용하게 된다.

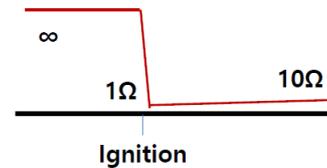


그림 1 플라스마의 부하특성
 Fig. 1. Load characteristic of plasma.

이때 플라스마는 그림 1과 같이 점화 전, 후로 나뉘어 모델링 될 수 있는데 기본적으로 점화전에는 중성 가스상태로 $\infty \Omega$ (open circuit)을 갖는 저항으로 등가 된다. 이후 고전압에 의해 점화가 이루어지면 가스 상태에서 양성자와 전자로 분리된 플라스마 상태가 되는데 이때는 1 Ω 에 가까운 아주 작은 저항으로 등가 된다. 이후 플라스마를 유지하기 위하여 새로운 기체(산소)를 추가함에 따라 1 Ω 에서 부터 증가하는 그래프를 보인다. 점화 이후 플라스마를 유지하기 위해서는 고주파의 일정한 AC 전류가 인가되어야 한다. 따라서 공진주파수에서 동작할 때 전류이득이 일정한 PRC (Parallel loaded resonant converter)를 타겟으로 하여 설계한다.

2.2 공진 네트워크 설계

PRC란 그림 2와 같이 부하와 직렬로 연결된 공진 인덕터 L_r , 부하와 병렬로 연결된 공진 커패시터 C_r 로 구성된다. L_r 과 C_r 를 설계하기 위해서는 우선 최대부하일 때 플라스마가 증가되는 저항값을 구해야한다. 식 (1)을 통해 최대부하시 출력전력과 플라스마를 유지하기위한 전류 rms값을 통하여 플라스마에 증가 되는 저항 값을 선정 할 수 있다. 이를 통해 선정된 저항 값을 입출력 전달함수인 식 (2)에 대입하여 L_r 과 C_r 값을 구할 수 있다.

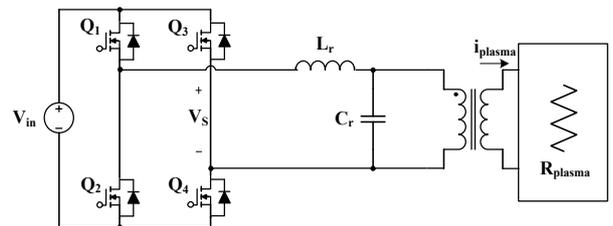


그림 2 Plasma 부하를 적용한 PRC 회로
 Fig. 2. Diagram of PRC with plasma load.

$$R_{plasma} = \frac{P_{out}}{i_{plasma}^2} \quad (1)$$

$$\frac{i_{plasma}(s)}{v_{in}(s)} = \frac{\frac{1}{sC_r} \parallel R_{plasma}}{sL_r + \left(\frac{1}{sC_r} \parallel R_{plasma} \right)} \quad (2)$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}} \quad (3)$$

$$Q = \frac{R}{\omega L_r} = \omega C_r R = R\sqrt{\frac{C_r}{L_r}} \quad (4)$$

이때 L_r 과 C_r 의 조합은 여러 가지로 나타날 수 있는데 식 (3)과 같은 공진 주파수의 수식을 고려하여 L_r, C_r 값을 찾을 수 있다.^[2] 선정된 L, C 의 조건에서 부하 변화에 따른 정전류 특성을 확인하기 위하여 식 (4)로 표현되는 Q 와 스위칭 주파수에 따른 전류 크기 곡선을 그림 3과 같이 나타내었다.

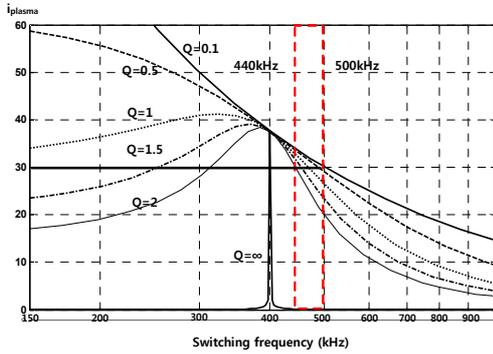


그림 3 PRC의 Q 와 스위칭 주파수에 따른 전류크기 곡선
Fig. 3. Current value of PRC versus switching frequency and Q .

그림 3에서 보이듯이 공진주파수인 400 kHz 부근에서 Q 의 변화와 상관없이 전류의 크기가 일정함을 보인다. ZVS 동작을 위하여 공진주파수와 근접한 420 kHz ~ 500 kHz의 범위를 갖고 동작 시킨다.

2.3 시뮬레이션 결과

위의 프로세스를 이용하여 15 kW급 RPG의 공진 네트워크의 파라미터를 표 1과 같이 선정하였다. 선정된 값들을 기준으로 PRC 시뮬레이션을 진행한 결과 점화 후 즉 1 Ω에 가까운 저항 값을 가질 때 출력전압과 전류의 크기를 그림 4와 같이 나타낸다. 그림 5에는 최대부하 출력인 16 Ω일 때의 출력전압과 전류의 크기이다. 부하 변동에도 일정한 전류의 크기를 가져야 하므로 각 조건에서 전류 크기에 맞는 스위칭 주파수로 동작하였다.

표 1 15kW급 RPG 공진 네트워크 파라미터
Table 1 Parameter of 15kW RPG resonant network

Parameter		Value
Input voltage	V_{in}	311 [V]
Switching frequency	f_s	420 ~ 500 [kHz]
Plasma current	i_{plasma}	30 [A]
Plasma resistance	R_{plasma}	1 ~ 16.6 [Ω]
Resonant inductance	L_r	3.29 [μH]
Resonant capacitance	C_r	48 [nF]

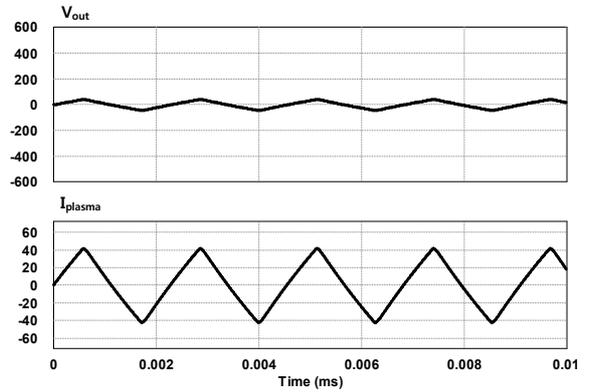


그림 4 경부하 시 출력 전압 및 출력 전류 ($f=500kHz$)
Fig. 4. Output current and voltage waveform at light-load condition.

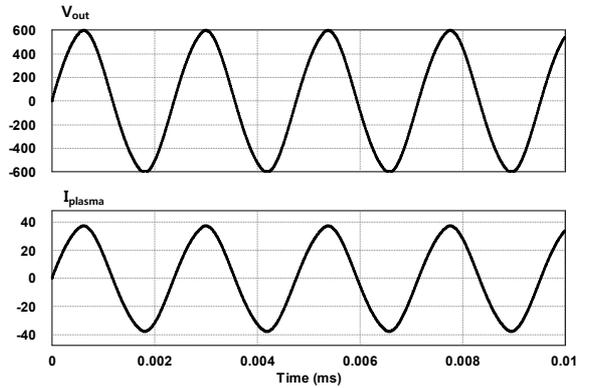


그림 5 최대부하 시 출력 전압 및 출력 전류 ($f=440Hz$)
Fig. 5. Output current and voltage waveform at full-load condition.

그림 4와 5를 비교하면 부하저항에 따라 전압크기는 많이 차이가 나지만 전류의 크기는 일정하여 플라즈마를 유지하는 자계를 형성할 수 있다.

3. 결론

본 논문에서는 급변하는 특성을 갖는 부하인 플라즈마를 구동하기 위한 공진 컨버터의 공진 네트워크 설계를 진행하였다. 정전류 특성을 갖는 PRC를 타깃으로 Q 의 곡선을 통하여 공진 커패시터와 공진 인덕터의 값을 정하였다. 선정된 공진 네트워크를 시뮬레이션을 통해 검증을 진행 하였다. 이를 통해 급변하는 특성을 갖는 부하를 구동하는 회로를 설계하기 위한 방법을 제시하였고, 차후 제한한 LC 조합을 실제 회로에 적용하여 플라즈마가 점화 전, 후에 시뮬레이션과 같이 동작하는지 실험을 진행할 예정이다.

참고 문헌

- [1] K. Tran, A. Miller, "A New Power Supply To Ignite And Sustain Plasma In A Reactive Gas Generator," *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, pp. 1885-1892, 2008
- [2] M. Borage, S. Tiwari, and S. Kotaiah, "Analysis and Design of an LCL-T Resonant Converter as a Constant-Current Power Supply," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, Vol. 52, No. 6, Dec 2005