

원격 플라즈마 발생장치를 위한 고주파 전력변환 토폴로지의 성능 분석

성원용, 채훈규, 구근완, 이병국[†]
 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

Performance Analysis of High Frequency Power Conversion Topologies for Remote Plasma Generators

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

ABSTRACT

본 논문에서는 원격 플라즈마 발생장치 (Remote Plasma Generator, RPG)에 적용하기 위한 공진형 토폴로지에 대해 비교한다. 원격 플라즈마 발생장치는 AC-DC 정류기, DC-AC 인버터, 공진탱크, 플라즈마 발생용 리액터, 점화장치로 구성되며, 이는 기존의 SMPS와 유사한 구성이다. 하지만 플라즈마 부하는 기존의 전력전자 어플리케이션들과는 달리 점화조건과 플라즈마 유지 조건을 충족시켜야 한다는 특징이 있다. 따라서 본 논문에서는 각 공진형 토폴로지들의 특성 비교 분석을 통해 원격 플라즈마 발생장치에 대한 적용 가능성에 대한 분석을 수행하였으며, 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

1. 서론

플라즈마는 챔버 또는 웨이퍼의 세정공정과 같은 산업분야에 널리 사용되어 왔다. 이러한 플라즈마를 발생시키기 위한 RPG는 AC-DC 정류기, DC-AC 인버터, 리액터, 점화회로로 구성되어 있으며, 이는 기존 SMPS의 1차측 구성과 매우 유사하다. 하지만 점화과정에서 플라즈마 부하의 임피던스 레벨은 수 μ s 동안에 개방상태에서 수 Ω 로 급격하게 변동하고, 점화 후에는 가스의 압력이 변동함에 따라 임피던스 레벨도 급격하게 변동하는 특성을 가지고 있다. 이는 플라즈마 부하의 급격한 변동에도 안정적인 동작을 하는 것이 RPG의 설계단계에서 매우 중요한 특성이라고 볼 수 있다. 또한 RPG는 기존 SMPS와는 달리 점화회로를 포함하고 있다. 점화 후에는 AC 전류원과 같이 동작해야하는 반면에, 점화 과정에서는 매우 높은 전압을 요구하는 특성을 가지고 있다^[1].

최근에 RPG는 가스에 전류를 유도하여 플라즈마와 자기적인 결합을 가져가는 형태가 많이 이용되고 있으며, 300kHz 이상의 주파수가 필요하기 때문에 스위칭 손실을 저감하기 위한 소프트 스위칭을 하는 공진형 컨버터를 많이 이용하고 있다. 그러므로, 시스템의 특성을 결정짓는 공진 네트워크의 설계는 안정성을 확보하는데 매우 중요하다^[2].

본 논문에서는 플라즈마 부하의 등가모델을 이용하여 RPG의 점화 전, 점화단계, 점화 후 플라즈마 발생 상태를 모사하고, 공진형 컨버터 토폴로지들을 RPG 시스템의 특성을 고려하여 비교, 분석한다. 또한 분석한 각 토폴로지의 특성에 대한 타당성을 시뮬레이션을 통해 검증한다.

2. RPG용 고주파 전력변환 토폴로지 분석

2.1 플라즈마 부하

기존 SMPS의 부하는 전력변환장치가 전압원의 형태로 동작할 경우, 부하가 증가함에 따라 임피던스 레벨이 단조 감소하는 형태이며, 전류원의 형태로 동작할 경우, 부하가 증가함에 따라 임피던스 레벨이 단조 증가하는 형태이다. 하지만, 그림 1에서 볼 수 있듯이, 플라즈마 부하의 임피던스 레벨은 동작상태에 따라 달라진다. 점화 전의 상태에서는 단순히 전압원의 형태로 동작하기 때문에, 임피던스 레벨은 개방상태와 마찬가지로 매우 크다. 반면에 점화 후부터 플라즈마를 유지하는 동안에는 임피던스 레벨이 수 Ω 로 매우 작으며, 가스의 압력이 증가함에 따라 임피던스가 증가하는 형태로 구성된다.

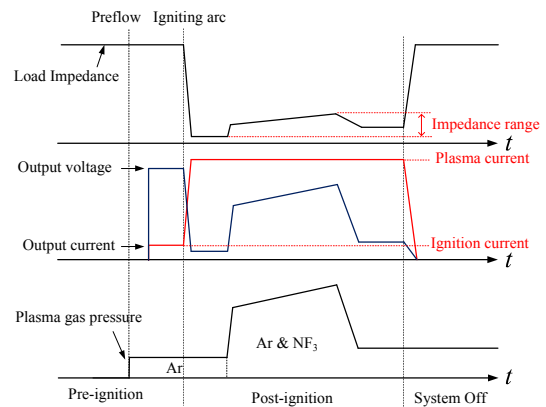


그림 1 RPG의 동작 시간 다이어그램
 Fig. 1. Operational timing diagram of RPG

2.2 공진 네트워크

그림 2는 그림 1의 시간 다이어그램에 기반한 RPG 시스템 모델이다. 플라즈마 부하는 아크에 의해 켜지는 스위치와 부하 저항, 점화저항으로 등가화 될 수 있다.

플라즈마 부하의 특성을 고려할 때, 전력변환 토폴로지는 다음과 같은 사항에 기준하여 선택되어야 한다:

1. 점화 전, 출력전압은 아크 전압을 발생시킬 만큼 높아야 한다.
2. 점화 중에 임피던스가 매우 급격하게 변동하기 때문에, 출력 전류는 토폴로지의 특성에 의해 제한되어야 한다.
3. 점화 후, 일정 전류 출력을 위한 스위칭 주파수 범위는

부하 변동에 대해 넓지 않아야 한다.

4. 스위칭 주파수를 저감하기 위해 영전압 스위칭이 가능하여야 한다.

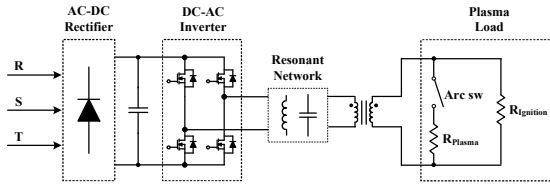


그림 2 RPG 시스템 모델
Fig. 2. System model for RPG

표 1은 위에서 정한 기준을 토대로 공진형 컨버터의 특성을 평가한 결과이다. 평가 대상 토폴로지들은 SRC, PRC, LLC, LCC, PSFB이다.

표 1 플라즈마 발생장치 시스템 사양
Table 1 Specification of plasma generator system

	점화전압	단락보호	Δf_{sw}	ZVS
SRC	X	X	X	O
PRC	O	O	O	O
LLC	X	X	X	O
LCL	O	O	O	O
PSFB	△	O	◎	△

SRC의 경우, 출력가능한 최대 전압이 입력전압으로 제한되기 때문에, 점화전압을 높게 출력하는 것이 어려우며, 부하 임피던스가 급격히 감소하는 상황에서 전류의 제한이 어렵다. 또한 LLC는 Region 2의 영역에서 출력전압의 승압이 가능하지만, 점화 직후, 임피던스의 급격한 변동으로 인해 Region 3의 영역으로 이동하여 ZCS 스위칭을 하게 될 가능성이 높아 현실적으로 설계가 어렵다. 또한 PSFB 컨버터의 경우, 고정 주파수로 스위칭을 하여 제어할 수 있다는 특징이 있으나, 경부하에서 지상레그의 영전압 스위칭이 어렵다는 특징이 있다.

PRC와 LCL의 경우, 인버터 출력에 LC 공진 네트워크가 위치하고, 커패시터에 병렬로 부하 또는 인덕터-부하 직렬 구조가 위치하기 때문에 입력전압보다 높은 전압을 출력함으로써 점화전압의 형성이 가능하며, 부하 임피던스가 급격히 작아지더라도, 인버터 출력이 직렬로 연결된 인덕터에 의해 전류의 급격한 상승이 제한된다. 또한 공진점 부근에서 스위칭하면서 전류제어가 가능하기 때문에, 스위칭 주파수 범위도 좁게 가져갈 수 있다.

2.3 시뮬레이션

LCL의 경우, 부하에 직렬로 인덕터가 연결되는 것을 제외하면, PRC와 공진 네트워크 구성이 동일하다. 특히 전류제어를 위해 동작범위를 설정할 때에는, 인버터측 인덕터와 공진 커패시터의 크기가 그 영역을 설정하기에 설계기준은 PRC와 유사하다. 그러므로 PRC를 이용하여 분석한 내용의 타당성을 검증한다. 시뮬레이션은 공진주파수 350kHz, 부하전류는 30A, 스위칭 주파수 범위는 400~500kHz로 설계하였다.

그림 3은 설계된 공진 네트워크의 주파수 응답이다. 동작 주파수 영역대 전구간에서 ZVS를 수행하는 것을 알 수 있다. 이를 기반으로 PSIM 시뮬레이션을 한 결과는 그림 4에 나타내

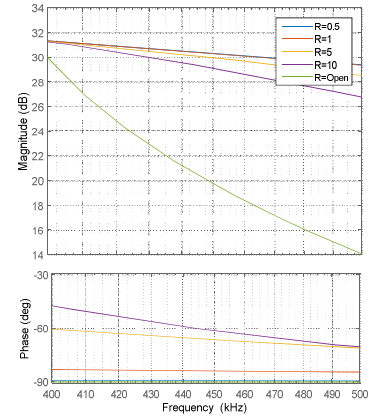
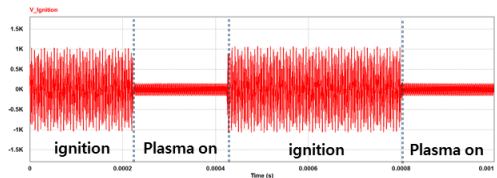
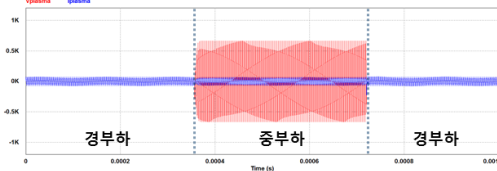


그림 3 공진 네트워크의 주파수 응답
Fig. 3. Frequency response of resonant network

었다. 시뮬레이션 결과 점화 전압 생성이 가능하며, 부하의 급격한 변동에도 과전류, 과전압 문제가 발생하지 않는 것을 알 수 있다.



(a) 점화전압



(b) 부하 변동

그림 4 시뮬레이션 결과
Fig. 4. Simulation results

3. 결론

본 논문에서는 RPG에 적용하기 위한 공진 네트워크의 특성에 대해 분석하였고, 여러 공진형 컨버터들의 적용가능성에 대해 검토하였다. PRC와 LCL 같은 병렬 부하 공진형 컨버터들이 RPG가 요구하는 특성에 적합한 토폴로지임을 분석하였고, 분석한 결과를 토대로 시뮬레이션을 수행하여, 분석 내용의 타당성을 검증하였다.

참고 문헌

- [1] A. Millner, T. Alexander, I. Bystryak, K. Tran, M. Joshi, US Patent Application US2007/0103092 A1, "Method And Apparatus Of Providing Power To Ignite And Sustain A Plasma In A Reactive Gas Generator, 10
- [2] Godyak, Valery, "Comparison of Inductively Coupled Plasmas with and without Ferromagnetic Core", paper QW00008, 58th Gaseous Electronics Conference, San Jose Calif., 19 Oct 2005. May 2007.