

LCCL 공진네트워크를 이용한 RPG용 공진형 인버터 시스템 설계 및 제어

구근완¹, 성원용¹, 유승희², 임창섭², 이병국^{1†}
성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과¹, (주)뉴파워플라즈마²

Design and Control of Resonant Inverter Systems Using LCCL Resonant Network for RPG

Keun Wan Koo¹, Won Yong Sung¹, Seung Hee Ryu², Chang Seop Lim², Byoung Kuk Lee^{1†}
Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University¹
Research Institute, New Power Plasma Corporation²

ABSTRACT

본 논문에서는 플라즈마 부하의 특성을 고려하여 LCCL 공진 네트워크가 적용된 RPG (remote plasma generator)용 공진형 인버터를 설계 하고 제어한다. 공진네트워크 설계와 인버터 제어 시, 플라즈마 부하가 가지는 특징인 Drop out 현상을 방지하면서 정격범위 내에서 출력 전류를 얻을 수 있도록 하기 위해 위상천이 기법을 적용할 수 있도록 설계하고 시뮬레이션을 통해 설계된 공진네트워크의 타당성을 검증한다.

1. 서론

반도체 시장의 급격한 성장과 함께 반도체 제조공정에 사용되는 플라즈마 발생장치의 중요성이 점차 증가하고 있다. 플라즈마 발생장치는 기체에 높은 에너지를 주입하여 기체를 플라즈마화 하는 장치로 플라즈마 발생을 위해 고전압, 유지를 위해 일정한 전류로 제어하는 높은 주파수 시스템을 채택한다^[1].

이러한 플라즈마 부하용 시스템의 경우 부하에 관계없이 일정한 전류 제어를 위해 PRC 형태의 공진네트워크를 사용하였으나, 플라즈마 발생을 위해 포함되는 리액터의 누설인덕턴스 영향 때문에 필연적으로 LCL 네트워크 형태를 가지게 되며, 이런 누설인덕턴스는 플라즈마 부하용 공진네트워크 설계에 제약조건이 된다. 이러한 제약은 플라즈마 부하용 공진네트워크 설계 시 Drop out 현상을 방지하며 ZVS 조건을 만족하는 위상천이각을 설계할 수 없다는 치명적인 단점으로 나타난다.

따라서 본 논문에서는 리액터에 의한 LCL 네트워크의 단점을 보완하며 플라즈마 부하의 특성인 Drop out 현상의 영향을 받지 않고 출력전류를 제어할 수 있는 플라즈마 부하의 적합한 공진네트워크를 설계하고, 설계된 공진네트워크의 타당성을 시뮬레이션을 통해 검증한다.

2. RPG용 공진형 인버터의 공진네트워크 설계

2.1 플라즈마 부하 특성

그림 1은 플라즈마 발생장치용 시스템으로 풀 브릿지 인버터, 공진네트워크, 플라즈마 리액터를 포함한다. 이 시스템은 NF_3 , A_2 등의 가스를 플라즈마화 하기 위해 리액터에 일정한 전류를 인가한다. 기체가 플라즈마화 되며 에너지를 소모하고 이 에너지만큼 전기적 저항값이 측정된다. 이러한 플라즈마 부하를 분석하기 위해 다음과 같은 실험을 진행하였다.

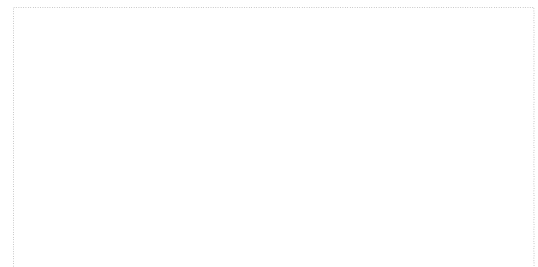


그림 1 PRC를 적용한 기존 RPG 시스템
Fig. 1 Conventional RPG system with PRC.

스위칭 주파수 및 i_{plasma} 고정 조건에서 가스투입량 증감
스위칭 주파수 및 가스투입량 고정 조건에서 i_{plasma} 증감
가스투입량 및 i_{plasma} 고정에서 스위칭 주파수 증감

진행한 실험 결과 플라즈마 부하의 임피던스는 가스투입량에 비례하고, 출력전류인 i_{plasma} 의 크기에 반비례하며 스위칭 주파수 변화에 대한 영향은 적은 것으로 나타났다. 이러한 현상 때문에 PRC에서 주파수 변동을 통해 전류를 감소시킬수록 전류는 작아지고, 작아진 전류에 의해 저항값이 증가한다. 이에 따라 Q factor가 증가하고 그 결과로 인해 다시 전류가 줄어들게 되는 연쇄반응으로 나타나며 이를 Drop out 현상이라 한다.

Drop out 현상은 PRC의 주파수 제어 시 그림 2와 같은 출력 전류 변동을 나타낸다. 일반 부하의 경우 전류 증감에 관한 부하의 임피던스 변화가 적고, Q factor의 변동에 대한 영향이 적으나 플라즈마 부하의 경우 전류 증감에 대한 임피던스 변동으로 인해 주파수 제어로 안정적인 출력을 얻기 어렵다.

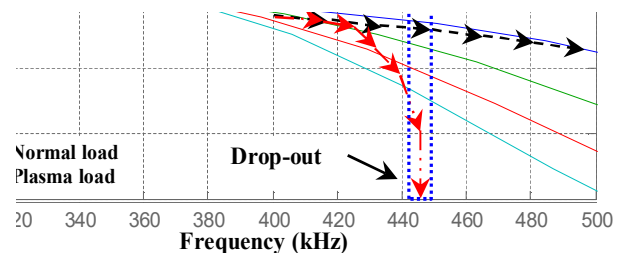


그림 2 플라즈마 부하와 일반적인 부하의 전류 크기 비교
Fig. 2 Comparison of current magnitude between plasma load and normal load.

2.2 공진네트워크 설계 및 제어

플라즈마 부하에 적용되는 LCL 네트워크는 부하 변화에 대해 앞서 언급한 이유에 따라 출력전류의 변화폭이 둔감한 공진 주파수에서 제어가 이루어져야 하며, 목표하는 출력 확보를 위해 주파수 제어방법이 아닌 위상천이 방식을 사용해야 한다.

따라서 인버터 설계시 공진주파수에서 최대 설계조건에 적합한 최대 전류를 출력할 수 있도록 설계 되어야 한다. 이러한 출력전류 조건을 만족시키기 위한 L_r , C_r 값은 정전류의 기본 네트워크 구성인 PRC 형태를 통해 만족될 수 있다. 이때 L_r , C_r 의 값은 공진 주파수를 나타내는 식 (1)과 공진탱크의 임피던스 관계로부터 계산된 식 (2)에 의해 구해질 수 있으며, 식 (2)의 경우 PRC 형태를 가지는 모든 네트워크에 적용되어 적용될 수 있다. 하지만 RPG용 공진네트워크의 경우 플라즈마 발생 유지에 최적화 되어 설계된 L_{lkg} 값을 조절하여 공진네트워크 특성을 설계하기 어렵다. 특히 LCL 구조의 경우 인버터 전압 전류의 위상차는 식 (3)과 같이 나타난다. 따라서 L_{lkg} 의 크기가 커질수록 인버터 전압 전류의 위상차이는 줄어들게 되 위상천이를 통해 출력전류를 제어할 수 있는 범위가 줄어든다. 이러한 단점을 보완하기 위해 그림 3과 같은 LCCL 형태의 네트워크를 사용하였고, LCCL 네트워크의 인버터 전압 전류의 위상차이는 임피던스 관계식으로부터 식 (4)와 같이 결정된다.

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

$$i_{load}(f_r) = \frac{v_{o,\infty}\sqrt{C_r}}{\sqrt{L_r}} \quad (\text{단, } v_{o,\infty} \text{는 기본파}) \quad (2)$$

$$\theta_{LCL}(f_r) = \tan^{-1}\left[\frac{L_r - L_{lkg}}{R\sqrt{L_r C_r}}\right] \quad (3)$$

$$\theta_{LCCL}(f_r) = \tan^{-1}\left[\frac{\sqrt{L_r C_r}}{RC_{add}} + \frac{(L_r - L_{lkg})}{R\sqrt{L_r C_r}}\right] \quad (4)$$

$$v_{o,\infty} = \frac{4V_{DC}}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\sin(n\theta/2)}{n} \cos[n(\omega t - \theta/2)] \quad (5)$$

Reactor

Network

그림 3 제안하는 RPG용 공진네트워크
Fig. 3 Proposed resonant network for RPG.

표 1 RPG 시스템 파라미터
Table 1 Parameters of RPG system

Parameter	Value
Input voltage	V_{in} 311 [V]
Switching frequency	f_s 400 [kHz]
Plasma current	i_{plasma} 20~35 [A]
Plasma resistor	R_{plasma} 2~9 [Ω]
Resonant inductor	L_r 3.18 [μ H]
Leakage inductor	L_{lkg} 2 [μ H]
Resonant capacitor	C_r 49.7 [nF]
Added capacitor	C_{add} 50 [nF]

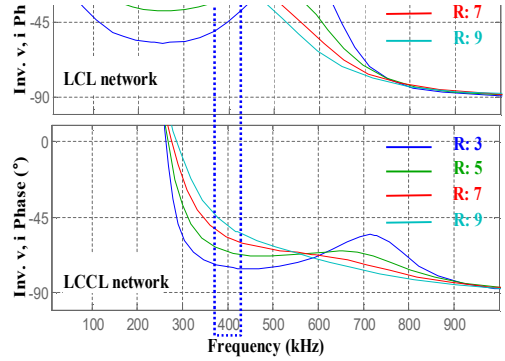


그림 4 공진 네트워크별 전압, 전류 위상 차이
Fig. 4 Comparison of phase differences between voltage and current of LCL and LCCL.

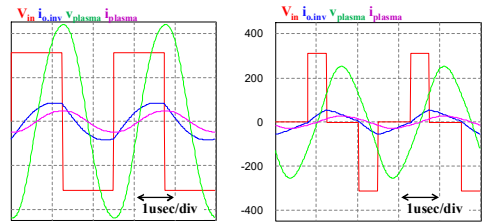


그림 5 RPG용 LCCL 네트워크의 시뮬레이션 파형
Fig. 5 Simulation waveforms of LCCL for RPG.

표 1의 시스템 설계 조건 및 파라미터 맞는 공진네트워크 설계시 각각의 네트워크에 따라 그림 4과 같은 인버터 전압, 전류 위상 차이를 얻을 수 있다. 플라즈마 Drop out을 피하며, ZVS영역에서 플라즈마 전류를 제어하기 위한 인버터 전압 전류의 위상각은 식 (5)를 통해 계산될 수 있으며 약 50° 이상이다. 설계 조건 중 가장 치명적인 조건인 저항이 9 Ω 인 경우에 대해 LCL 네트워크와 LCCL 네트워크는 각각 18°, 50°의 인버터 전압, 전류 위상 차이를 가진다. 이를 통해 기존 네트워크로 제어하기 어려웠던 출력전류를 LCCL 네트워크를 통해 제어 가능함을 알 수 있으며 이를 그림 5와 같은 psim 시뮬레이션 을 통해 검증하였다.

3. 결론

본 논문에서는 플라즈마 부하의 특성인 Drop out 현상에 관한 분석을 통해 기존 공진네트워크 설계시 문제점을 밝히고 이를 해결하기 위해 위상천이 제어를 고려해 LCCL 공진네트워크를 설계하였다. 설계된 공진네트워크의 타당성을 검증하기 위해 시뮬레이션을 진행하였고 위상천이 제어를 통해 인버터가 출력사양을 만족하도록 제어되는 것을 확인하였다.

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.
(No. 20168530050030)

참고 문헌

[1] 이정호, 최대규, 김수석, 이병국, 원충연, "환경친화형 페라이트 코어 유도결합 플라즈마 고주파 전력 변환 장치", Journal of the KIIEE, Vol. 20, No. 8, pp. 6 14, 2006, September