

부하 공진을 이용한 소프트 스위칭 방식의 부스트형 대기압 플라즈마 파워서플라이에 대한 연구

김민영*, 서광덕**, 한희민**, 최병준*, 김준석*
인천대학교*, (주)이엔테크놀로지*

A Study on Soft Switching Boost Type Power Supply Using Load Resonance for Atmospheric Pressure Plasma Generation.

MinYoung Kim*, KwangDuk Seo**, HeeMin Han*, ByungJun Choi*, JoohnSheok Kim*
University of Incheon*, EN Technologies Inc.**

Abstract: 본 연구는 부스트형 대기압 플라즈마 전원장치에 대한 연구로서 부스트형 전원장치는 플라즈마의 발생을 원활하게 하기 위해 커패시터로 모델링되는 부하단에 인가되는 전압을 직접 제어하는 방식을 의미한다. 기존의 정현파 공진형 전원장치는 PWM기법을 이용하여 펄스의 폭을 증감하는 방식으로 전압의 크기를 제어하지만 이 방식은 별도의 공진회로를 이용하여 공진을 일으킨 다음 이를 부하에 인가하는 방식으로 구성되기 때문에 속응성이 떨어지고 균일한 플라즈마를 발생시키기 어렵다. 부스트형 전원장치는 별도의 부스트 컨버터를 직류전압을 제어하여 부하단에 입력되는 전압을 직접 제어하므로 매우 균일한 플라즈마를 발생시킬 수 있는 이점이 있으나 별도의 부스트용 스위치가 필요하고 이로 인한 효율의 감소 및 사이즈의 증가가 되는 문제점이 생긴다. 본 연구에서는 커패시터로 모델링되는 부하를 이용하여 직접 공진을 일으키고 공진된 부하 전압을 직접 부스트 스위치에 인가시키는 방식으로 부스트용 스위치의 소프트 스위칭이 가능한 새로운 방식을 개발하였다. 개발된 방식에서는 부스트용 스위치가 ZCS형태로 켜지고 ZVS형태로 꺼지는 특성을 갖게 되므로 별도의 추가 회로 없이도 획기적인 효율 증가와 방열판 사이즈의 감소로 인한 제품의 경량화가 가능한 장점이 있다. 또한, DC링 커패시터의 최소화로 인하여 부하단의 아크 문제가 자동적으로 해결되는 장점도 있다. 제안된 제어 방식은 시뮬레이션과 실험으로 그 타당성을 입증하였다.

1. 서론

대기압 플라즈마란 진공이 아닌 대기압 하에서 플라즈마를 발생시키는 것을 의미하며 주로 반도체 혹은 LCD제품의 전처리 공정중에서 세정공정에 사용되고 있다. 대기압 플라즈마를 발생시킬 때에는 유전체 장벽 방전(Dielectric Barrier Discharge)을 이용한 플라즈마 전극 방식이 사용되며, 이때 유전체로 쌓여있는 두개의 도체 전극과 그 사이에 수십 kHz, 수십 kV의 전압을 인가할 수 있는 교류 전원장치가 필요하다[1-2]. 기존의 대기압 플라즈마용 전원장치는 주로 공진형 사인파 발생장치가 사용되고 있으며 이 방식은 장치 내부에 인덕터와 커패시터를 설치하여 공진을 발생시킴으로서 쉽게 연속적인 정현파 교류를 만들 수 있기 때문에 가장 널리 사용되고 있다. 공진형 전원장치는 PWM기법을 이용하여 펄스의 폭을 증감하는 방식으로 전압의 크기를 제어 하고 있으나, 출력 주파수가 고정되어 자유로운 전력 제어가 어렵고, 자체 LC공진으로 인한 대용량의 무효분 전력이 발생되어 전력용 소자의 용량이 매우 커지는 문제가 발생한다. 특히 부하의 변동에 대한 안정성을 확보하기 위하여 부하의 커패시턴스 보다 큰 C를 LC공진에 사용하기 때문에 근본적으로 속응성이 떨어지고 균일한 플라즈마를 발생시키기 어렵다.[3]

본 논문에서 제안한 부스트형 플라즈마 전원장치는 장치내부에 인덕터만을 준비하고 커패시터로 모델링되는 부하의 C를 직접 이용하여 부하단에 불연속 공진을 발생시킴으로서 부하에 전력을 공급한다. 이때 100~200Khz의 매우 높은 공진주파수를 사용하며 완전한 소프트 스위칭을 구현하기 위해 스위치의 On/Off 신호를 공진주기에 동기시키기 때문에 부하의 전압을 직접제어하기 어려운 문제가 생기며 이를

해소하기 위해 승압용 부스트 컨버터를 DC전원단에 부착하여 부하의 전압을 직접 제어하는 구조를 갖게 된다. 부하 전력의 제어는 기본적으로 단상 H-Bridge로 구성된 출력 인버터단의 출력 주기를 변경하여 부하전력의 밀도를 제어하는 일종의 PFM(Pulse Frequency Modulation)기법을 사용하며, 초기 플라즈마 이그니션(점화) 및 DC전압제어를 통한 부하전력 제어용으로 DC전원단의 부스트 컨버터를 사용한 PAM(Pulse Amplitude Modulation)기법을 혼용하여 사용한다. 제안된 방식에서는 인버터단의 4개의 스위치가 부하의 공진 주파수에 완전히 동기되어 있기 때문에 완전한 ZCS(Zero Current Switching) 턴온과 ZVS(Zero Voltage Switching) 턴오프가 보장되어 60kHz의 높은 출력 주파수에서도 매우 높은 효율을 갖게 된다. 또한, 별도의 DC전압 제어 능력으로 인하여 부하의 변동에 대하여 속응성이 매우 뛰어난 장점을 갖고 있으므로 높은 dv/dt를 필요로 하는 대기압 플라즈마 발생에 최적에 가까운 성능을 제공할 수 있다. 한 가지 문제는 부스트용 스위치가 하드 스위칭을 하기 때문에 효율이 상대적으로 감소하며 방열판의 크기 증대로 인하여 제품의 경량화가 어렵다는 것이며, 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위한 부스트용 스위치의 소프트 스위칭 기법을 집중적으로 다룬다.

일반적으로 소프트 스위칭을 구현하기 위해서는 ZCS용으로 스위치에 직렬로 부가되는 별도의 인덕터 혹은 ZVS용 병렬 커패시터가 필요로 하며 상태 전이를 위한 별도의 공진용 스위치가 부착되어야 한다. 그러나, 부스트형 DC/DC 컨버터의 경우에는 그 구조상 직렬 인덕터 및 병렬 커패시터가 이미 존재하고 있으며 이를 잘 활용하면 그 자체로 소프트 스위칭이 가능하다. 본 연구에서는 이점에 착안하여 별도 소자의 부가 없는 부스트 컨버터의 소프트 스위칭 방법을 개발하였다. 제안된 부스트 스위치의 소프트 스위칭 기법의 개요는 다음과 같다. 작은 인덕턴스 값을 갖도록 스위치와 직렬로 연결된 부스트용 인덕터를 설계하여 불연속 전류 모드로 부스트 컨버터를 동작시키면 부스트 스위치는 항상 ZCS 턴온이 가능하다. 또한, 출력단의 H-Bridge에서 발생하는 공진을 이용하여 그 공진 에너지를 모두 감당할 수 있는 최소한의 커패시터를 DC 커패시터로 사용하며 공진 주기에 따른 영전압을 DC커패시터에 유도할 수 있고 그 시점에 동기하여 부스트 스위치를 오프시키면 영전압에 가까운 전압에서 스위치의 턴오프가 가능하다. 이러한 방식으로 부스트 컨버터를 동작시키면 부하에 거의 무관하게 부스트 스위치가 ZCS 턴온, ZVS 턴오프로 동작하는 소프트 스위칭을 구현 할 수 있으며, 기존 공진형 전원장치에 비해 속응성이 매우 뛰어나면서도 효율이 비슷한 전원장치를 구성할 수 있다. 다만 부스트 출력단의 커패시터 크기는 부하에 맞게 에너지를 공급할 수 있어야 하며, 부하에 에너지를 공급한 후 커패시터 양단의 전압이 영이 되도록 용량을 설계하여야 완전한 ZVS 스위칭이 된다.[4-6] 때문에 부하 용량에 따른 부스트 출력단의 커패시터의 용량 선정이 필요하다. 시뮬레이션과 실험을 통하여 제안된 전원 장치의 우수성을 입증하였다.

2. 부하 공진을 이용한 부스트형 대기압 플라즈마 전원장치의 개발

2.1 회로 구성

본 연구에서의 대기압용 플라즈마 전원장치의 구성은 그림 1과 같이 DC전원, 싱글 스위치 부스트 컨버터(Boost Converter), H-Bridge형 사인펄스 인버터(Sine Pulse Inverter), 그리고 고압 유기를 위한 트랜스포머 및 DBD 전극으로 구성된다. 고압 트랜스는 최대 8000V의 전압을 부하에 인가하기 위하여 1:10의 비율을 갖는다. DBD전극은 전극을 둘러싼 유전체와 대기로 구성된 두 개의 커패시터로 모델링되며 전력소비는 대기성분의 커패시터에 직렬로 연결된 저항에서 소비되는 평균 전력으로 간이 모델링된다.

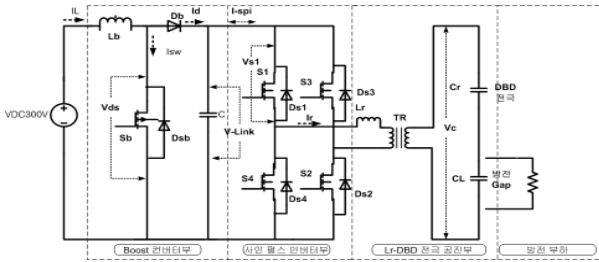


그림 1. 제안된 ZVT, ZCT 부스트형 전원장치 회로도

2.2 회로 해석

제안된 대기압용 플라즈마 전원장치의 기본적인 동작을 설명하기 위해서 모든 소자들은 이상적이라고 가정한다.

부스트 컨버터의 한 주기와 인버터의 사인펄스와 발생 동작은 그 구간에 따라 4개의 모드로 나누어 해석할 수 있다. 각 모드에 해당하는 파형을 그림2.에 도시하였다. 첫 번째 구간은 컨버터의 인덕터 전류가 0인 상태에서 부스트 스위치를 ZCS형태로 턴온하여 부스트 인덕터에 에너지를 축적하는 구간이다. 두 번째 구간은 부스트 컨버터의

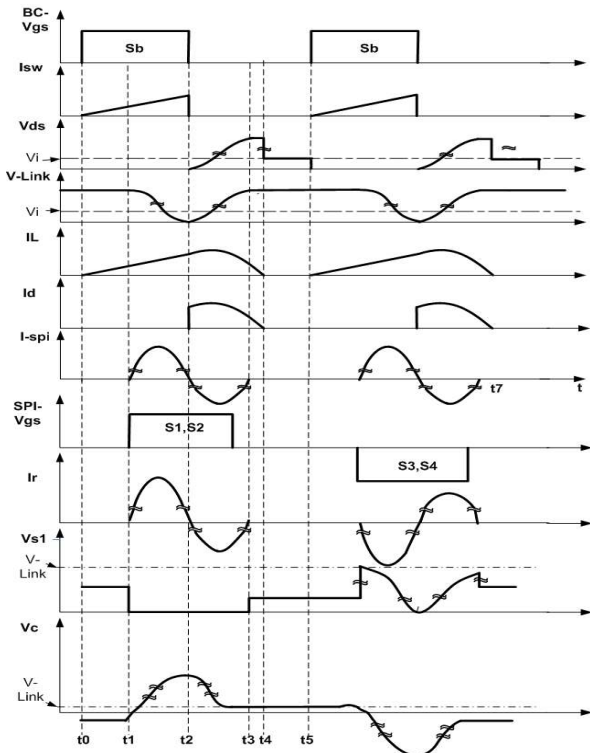
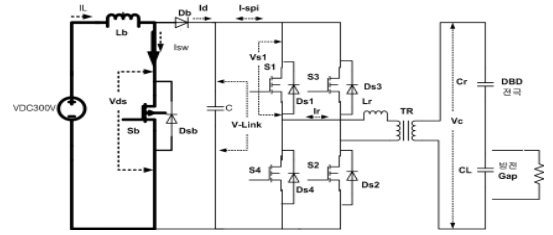
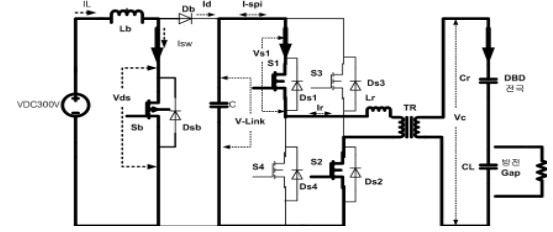


그림 2. 제안된 전원장치의 각부 동작파형.

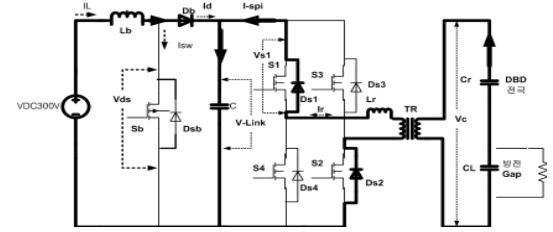
(제일 위부터, 부스트 스위치 On신호, Isw:부스트 스위치 전류, Vds:부스트 스위치 전압, V-link:부스트 출력단 커패시터 전압, IL:부스트 인덕터 전류, Id:다이오드 전류, Ispi:출력 인버터 유입전류, SPI-Vsg:출력 인버터 On 신호, Ir:부하전류, Vs1:인버터 스위치S1전압, Vc: 부하 커패시터 전압)



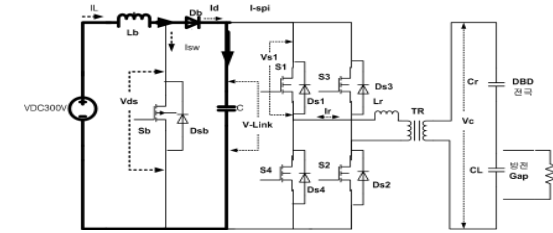
(a) 모드 1 ($t_0 \sim t_1$)



(b) 모드 2 ($t_1 \sim t_2$)



(c) 모드 3 ($t_2 \sim t_3$)



(d) 모드 4 ($t_3 \sim t_4$)

그림 3. 제안된 전원장치의 동작 모드

스위치가 온 된 상태에서 인버터 스위치(S1, S2)가 ZCS방식으로 턴 온하여 내부 인덕턴스 와 부하단에서 공진이 시작되는 구간이다. 이때 공진 에너지는 부스트 출력단 커패시터에서 공급하며 적절히 설계된 DC커패시터의 전압이 공진 전류의 증가에 따라 감소하게 된다. DC전압이 0(혹은 0근처)가 되면 부스트 스위치를 ZVS 방식으로 턴오프시키고 모드3으로 이행한다. 모드3에서는 공진전류가 S1,S2의 역병렬 다이오드를 통하여 반환되어 DC커패시터를 충전하는 구간이며 이 전압이 전원전압보다 큰 순간부터 부스트 인덕터에 축적된 에너지가 DC 커패시터로 유입되기 시작한다. 이 구간 임의 지점에서 S1,S2를 ZVS 방식으로 턴오프하며 부하의 공진전류가 0이 되면 이 모드가 끝난다. 따라서 부하에는 준-공진형태의 전압이 인가된다. 모드4에서는 부스트 인덕터에 남아있는 잉여의 에너지가 DC커패시터를 충전하며 부스트 인덕터의 전류가 0이 되면 하나의 동작주기가 끝난다. 이후 부하의 전압 발란스를 맞추기 위하여 인버터 S3,S4를 통한 두 번째 동작 주기가 시작될 수 있으며 이때의 휴지기를 이용하여 부하의 전력 밀도를 조절한다. 다음은 각 모드에 따른 상세 동작 설명이다.

□ 모드 1 ($t_0 \sim t_1$)

식(1) 과 같이 입력 전류가 불연속으로 동작하도록 인덕터(Lb)를 설계하면, 전류가 영(Zero)일 때 부스트 컨버터의 스위치 Sb를 턴온하여 영전류 스위칭을 한다. 스위치 Sb가 온 되면 입력전압이 모두 부스트 인덕터 Lb에 인가되어 인덕터에 에너지를 축적하게 되고, 이때 인덕터 전류(I_L)는 식(2)와 같은 기울기로 $t_0 \sim t_1$ 시간동안 상승

한다.

$$L_b < \frac{V_{DC}}{2I_L} DT \quad (1)$$

$$I_{L1} = \frac{1}{L} \int_{t_0}^{t_1} V_{DC} dt \quad (2)$$

여기서 D는 스위치의 통류율, T는 스위칭 주기이다.

□ 모드 2 ($t_1 \sim t_2$)

부스트 컨버터 스위치(Sb)가 온 되고 있는 상태에서 이 구간의 부스트 인덕터 전류(I_L)는 식(2)와 같이 $t_1 \sim t_2$ 시간 동안 상승한다. 인버터의 스위치(S1, S2)를 ZCS방식으로 턴 온 하여 소프트 스위칭을 하며, 이때 내부 인덕터와 부하의 커패시턴스에 의해 공진이 시작된다. 부하전압은 가파르게 상승하며 부하 공진 전류(I_r)가 정현파 형태로 흐른다. 부스트 컨버터의 출력단 커패시터(C)가 모든 공진 에너지를 공급하며 공진전류의 반주기가 지난후 커패시터가 충분히 작게 설계되면 DC전압이 영전압 가까이 감소하게 된다. 이 시점에서 ZVS 방식으로 부스트 스위치를 턴오프하여 모드2를 종료한다.

□ 모드 3 ($t_2 \sim t_3$)

부스트 스위치(Sb)가 영전압에서 턴 오프하는 경우에도 출력단 DC 전압이 입력단 전압보다 작기 때문에 부스트단의 차단 다이오드 Db를 통하여 에너지 축적이 계속되며 Db는 ZVS방식으로 턴 온 된다. 한편 부하 전류는 인버터 스위치 S1,S2에 역병렬로 부가된 다이오드 D1,D2를 통하여 음의 방향으로 증가하기 시작하며 이 전류로 인하여 부스트 출력단 커패시터가 충전되어 전압이 상승하기 시작한다. 이 구간에서는 인버터 스위치에 0전압이 인가되어 있으므로 임의의 지점에서 인버터 스위치를 ZVS형태로 턴오프시킬 수 있다. 부스트 출력단 커패시터의 전압이 입력전압보다 높게 충전이 되면 부스트 인덕터에 축적된 에너지가 커패시터로 유입되기 시작 한다. 커패시터에는 부하의 공진 전류와 부스트 인덕터의 전류가 동시에 흘러서 빠르게 충전하며 부하의 공진 전류가 0이 되면 이 모드가 종료된다. 부하 커패시터에는 반파 사인형태의 전압이 인가되며 이로써 준-공진의 한주기가 종료된다.

□ 모드 4 ($t_3 \sim t_4$)

인버터 및 부하는 동작을 하지 않으며, 부스트 인덕터 L_b 에 저장되었던 잉여의 에너지가 차단 다이오드 Db를 통하여 부스트 커패시터(C)에 전달되는 구간이다. 인덕터 전류가 0이되면 차단 다이오드는 ZCS방식으로 오프 한다.

□ 모드 5 ($t_4 \sim t_5$)

다음 순번의 공진을 위해 부스트 컨버터의 스위치가 재차 턴 온 할 때까지의 구간이며, 이 구간의 폭을 조절하여 부하에 인가되는 에너지의 밀도를 조절한다. 이 구간 이후에는 부하단의 전압 불균형을 위하여 인버터 스위치(S3, S4)를 통한 공진이 발생한다.

3. 시뮬레이션 결과

제안된 방식의 동작성능을 검증하기 위하여 Matlab을 이용한 시뮬레이션 연구가 수행되었다. 회로는 그림1과 같이 구성하였으며 부하는 2kW의 평균전력을 소비하도록 부하측 저항을 조절하여 진행하였다. 부스트 컨버터 스위칭 주파수는 120 kHz, 사인 펄스 인버터 스위칭 주파수를 60kHz로 설정하였으며 실제 출력 주파수는 인버터 스위칭 주파수와 같다. 그림4는 부스트 컨버터의 시뮬레이션 파형이다. 입력 전원은 300V 출력전압은 850V이다. 결과 파형에서와 같이 인덕터 전류(I_L)가 0인 상태에서 부스트 스위치가 ZCS방식으로 턴 온 하며, 부하의 공진으로 인하여 부스트 컨버터 출력단 커패시터 전압(V-Link)이 영으로 떨어질 때, 스위치를 ZVS방식으로 턴오프한다. 그림5는

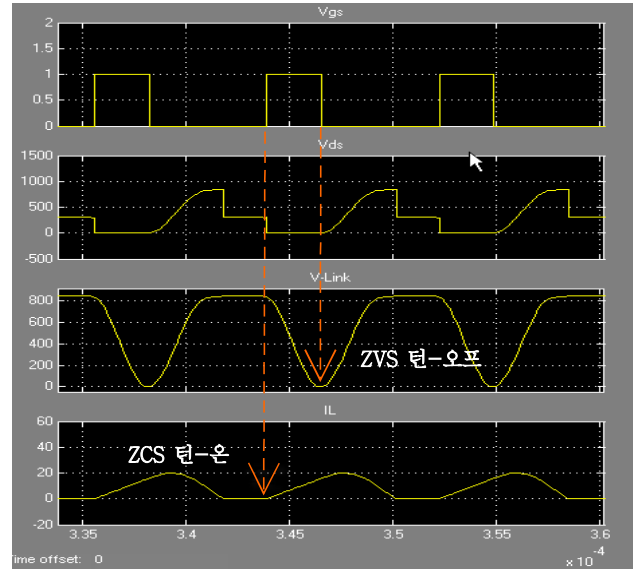


그림 4. 부스트 컨버터의 시뮬레이션 파형.

(a)부스트 컨버터 스위치(Sb) 제어신호(Vgs), (b)스위치 양단전압(Vds), (c)컨버터 출력단 전압(V-Link), (d)인덕터 전류(IL)의 시뮬레이션 파형.

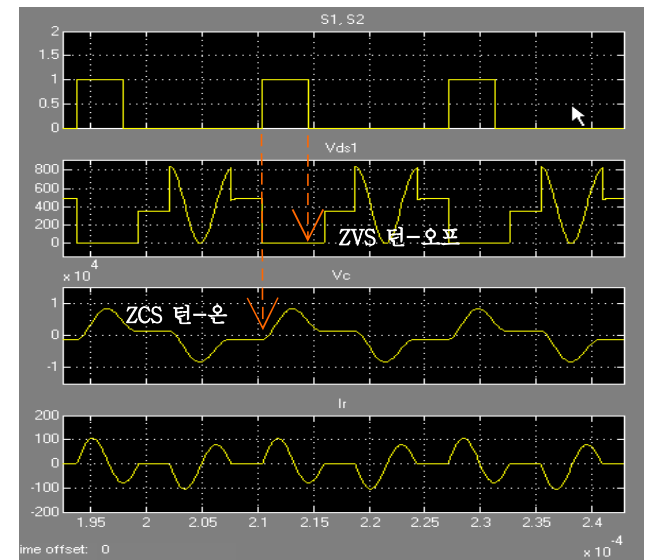


그림 5 인버터단 시뮬레이션 파형.

(a)인버터 스위치(S1) 제어신호(Vgs1), (b)스위치 양단전압(Vds1), (c)부하 출력단 전압(Vc), (d) 부하 공진전류(Ir)의 시뮬레이션 파형

사인 펄스 인버터 부분의 시뮬레이션 파형이다. 그림에서와 같이 영전류에서 인버터의 스위치(S1, S2)가 ZCS 턴온하며 공진전류가 환류하여 역병렬 다이오드 D1, D2가 턴 온 되어 있을 때, 스위치(S1, S2)를 턴오프 함으로써 ZVS 스위칭을 한다. 이러한 방식으로 완전한 소프트 스위칭을 구현함으로써 전체 전원장치의 효율을 크게 증가시킬 수 있다.

4. 실험결과

제안된 컨버터의 실제적인 동작을 검증하기 위하여 시뮬레이션에 이어 실험실 레벨의 실험이 구현되었다. 실험실에서 플라즈마 방전이 발생할 경우 오존 등의 유독가스가 발생될 가능성이 있으므로 부하단 중간의 고압 변압기를 제거하고 변압비를 고려한 플라즈마 부하의 등

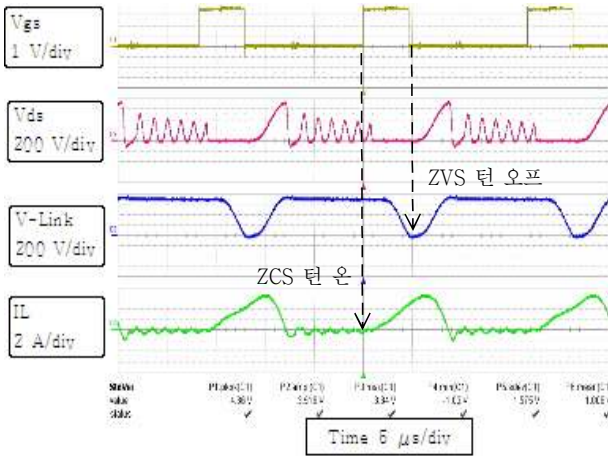


그림 6 부스트 컨버터 실험 파형.
(제일 위부터: 스위치 제어신호(Vgs), 스위치 양단전압(Vds), 부스트 컨버터 출력전압(V-Link), 인덕터 전류(IL) 파형)

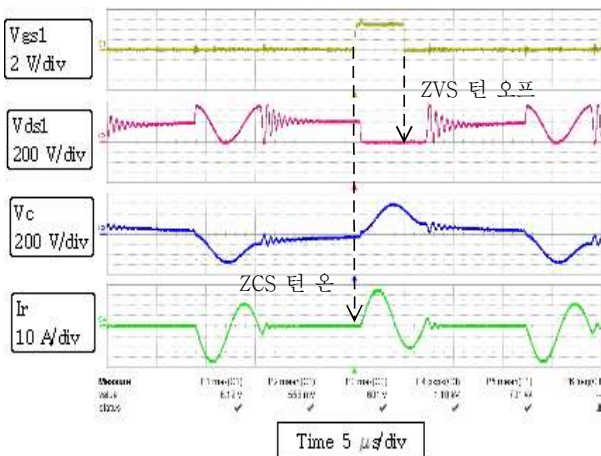


그림 7. 출력 인버터단 실험 파형.
(제일 위부터: 사인펄스 인버터 스위치 제어신호(Vgs1), 스위치 양단전압 (Vds1), DBD 부하 전극 전압(Vc), 부하 공진 전류(Ir)의 파형)

가 임피던스를 적용하여 R-C등가 부하를 구성하였으며 이 회로 상에서 실험이 이루어졌다. 등가 부하 저항은 약 700W의 평균 부하가 소비되도록 선정하였다. 모든 전력용 반도체 소자는 1200V/60A T MOS 스위치 및 1200V/100A 고속 다이오드로 구성하였으며 각 회로 소자의 정수는 표1.에 정리된 바와 같다.

표1. 제안된 플라즈마 전원장치의 각부 정수

종류	값	비고
Lb	120 μ H	부스트 입력단 인덕터
C	0.1 μ F 1200V	부스트 출력단 커패시터
Lr	30 μ H	공진용 인덕터
Cr	0.1 μ F	부하단 전극 커패시터(등가)
Cl	0.1 μ F	부하단 공극 커패시터(등가)
Rl	100 Ω	부하단 저항(등가)

그림6.은 부스트 컨버터 부분의 실험파형이다. 입력전압은 약 300V이며 출력전압은 700V이다. 출력단 DC전압의 제어는 PI제어를 사용하여 스위치 On시간을 결정하는 방식으로 이루어지며 전압의 샘플링은 모드4가 끝난 직후에 이루어진다. 일반적인 부스트 컨버터와 다른 점은 스위치의 턴오프 시점을 항상 출력단 인버터와 동기 시키고 턴온 시점을 조절하여 DC전압을 제어 한다는 점이다. 그림6의 실험

파형은 그림4.의 시뮬레이션 파형과 비교하기 위하여 순서를 동일하게 구성하였다. 실험 결과는 시뮬레이션과 거의 동일하게 나타나며 부스트 스위치가 ZCS 턴온 및 ZVS 턴오프로 동작함을 알 수 있다. 다만, 부하단의 공진이 종료되고 인덕터의 에너지가 완전히 출력단 DC커패시터에 전달되면 부스트 인덕터의 양단 전압이 정의되지 않는 구간이 발생하며 이때 부스트 스위치의 기생 커패시턴스와 부스트 인덕터 사이에 기생공진이 발생하는 것을 실험에서 볼 수 있다. 이러한 기생공진은 부스트 인덕터에 직렬로 다이오드를 추가하여 상당 부분을 제거할 수 있으나 실험 파형에서 확인 할 수 있는 바와 같이 실제 기생전류의 양이 극히 미미하여 전체 효율에 큰 지장을 주지 않기 때문에 그냥 두어도 큰 문제는 없다. 그림7.은 그림5.의 시뮬레이션 파형과 동일한 실험 결과이다. 시뮬레이션과 약간 다른 점은 스위치에 존재하는 기생 커패시터와 부유 인덕턴스 사이에서 별도의 기생 공진이 발생한다는 것과 스위치 On신호와 실제 스위치의 동작 시간에 약간의 지연이 있다는 것 정도이다. 실험 파형에서 볼 수 있는 바와 같이 인버터의 스위치가 완전한 소프트 스위칭 상태에서 동작하고 있음을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 DBD 전극의 커패시턴스와 내부의 가변 인덕터의 공진만을 이용하여 부스트 컨버터의 스위치를 ZCS 턴온, ZVS 턴오프시키는 고 효율의 대기압 플라즈마용 전원장치를 제안하였다. 제안된 장치는 출력 인버터의 모든 스위치 및 부스트 단의 스위치, 차단 다이오드 등이 모두 소프트 스위칭 상태로 동작하므로 매우 높은 효율의 플라즈마용 전원 장치를 구현 할 수 있다. 또한, 별도의 부스트 스위치로 작은 커패시터로 구성된 DC전압을 직접 제어하므로 순시전압 제어 능력이 매우 뛰어나며 이를 이용하여 플라즈마 전원장치의 큰 문제 중의 하나인 아크 제거 성능을 손쉽게 구현할 수 있는 장점도 있다.

연구된 새로운 소프트 스위칭 방식을 사용하면 제품의 효율상승 및 방열판 감소에 따른 경량화가 가능하기 때문에 상용의 대기압 플라즈마 전원장치에 폭 넓게 적용할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] Zhi Fang, Xiangqun Qiu, Yuchang Qiu, and Edmund Kuffe " Dielectric Barrier Discharge in Atmospheric Air for Glass-Surface Treatment to Enhance Hydrophobicity" IEEE Tran. on Plasma Science, Vol. 34, No. 4, pp1216~1222, 2006.
- [2] 임환섭 "대기압 플라즈마와 응용" 한국진공학회지 제15권 2호, pp.117~138, 2006.
- [3] Ne ti Vishwanathan, V. Ramanarayan "High Voltage DC Power Supply Topology for Pulsed Load Applications with Converter Switching Synchronized to Load Pulses", PEDS Conf Record, pp618~623, 2003.
- [4] Seong-Jeub Jeon and Kyu-Hyeong Cho, "A Zero-Voltage and Zero-Current Switching Full Bridge DC-DC Converter With Transformer Isolation," IEEE Trans. on PE. Vol. 16, pp573~580, 2001.
- [5] R. Itoh, K. Ishizaka, H. Kiyotake and H. Okada " Soft-switched single-phase boost rectifier using full-bridge resonant switch" ,Electronics Letters Vol. 38 No. 76 ,pp 843~844, 2002.
- [6] Akiteru Ueda, Yuichiro Ito, Yoshitaka Kurimoto "Boost Type Three-phase Diode Rectifier Using Current Resonant Switch" Conference Record IEEE PCC-Osaka pp13~18, 2002.