

저온 플라즈마 발생을 위한 ASM 방식의 펄스파워 발생장치에 관한 연구

양천석, 정용호, 김한준  
LG산전(주) 중앙연구소

A Study on ASM Pulsed Power Generator for Non-thermal Plasma Applications

Chun-suk Yang, Yong-ho Chung, Han-joon Kim  
LG Industrial Systems R&D Center

**Abstract** - This paper describes an ASM(All Solid-state Modulator) pulsed power generator for non-thermal plasma applications. The proposed generator can produce 20kV, 500A, 100ns pulses at repetition rates up to 10kHz, and it is composed of 30 series connections of power circuit card assembly which contains paralleled MOSFETs, MOSFET drivers, energy storage capacitors and specially designed 1:1 pulse transformer. Higher pulse voltages and currents can easily be obtained by increasing the numbers of series and parallel connections of power circuit card and MOSFETs, respectively. Component layouts are optimized to minimize the leakage inductance and the voltage spikes across switching devices. Especially it put emphasis on the over-current protection (including short circuit) for the reliable operation in real situations. Experimental results show that the proposed pulser is very efficient in air pollution control application and could be useful for other applications such as synthesis of nanosize powders and non-thermal food processing.

1. 서 론

펄스파워 기술은 전기에너지를 짧은 시간에 방출하여 순간적으로 고전압 및 대전류의 대전력을 획득 및 제어하는 기술이며, 펄스파워에 의하면 자연계에서 잘 존재하지 않는 고전계 혹은 고강자계 등을 임의로 만들어 내는 것이 가능함에 따라 이는 산업계 및 학계에 매우 다양한 응용분야를 갖고 있는 유망 핵심기술이다. 그 중에서도 펄스파워 출력을 반응기(Reactor)를 통하여 가스에 인가하면, 고전계에 의하여 코로나 방전이 일어나고 이는 리액터 내의 가스를 분해하여 저온 플라즈마(Non-thermal Plasma)<sup>(1)</sup>를 발생 시키는 데, 이러한 저온 플라즈마 현상은, 환경오염원인 각종 유해물질 처리 및 신물질 생성, 미세입자 가공 그리고 비가열 식품살균처리등 매우 다양한 분야에 응용이 가능하다. 하지만 이러한 유용한 저온 플라즈마 기술이 본격적으로 산업계에 응용되지 못하고 있는 것이 현실인데, 이는 이를 발생하기 위한 기존의 Thyatron, Spark, Gap 혹은 MPC(Magnetic Pulse Compressor)방식<sup>(2)</sup> 등의 펄스파워 전원장치가, 스위칭 소자 자체의 스위칭 수명의 제한에 의한 짧은 수명 및 전원장치의 자체의 큰 전기적 손실로 인한 전력비용 상승 등 치명적인 약점이 있기 때문이다. 본고는 이러한 문제점을 근본적으로 해소하기 위하여 스위칭 수명이 반영구적인 범용 반도체 스위칭 소자와 에너지 저장 캐패시터(Capacitor) 및 손실이 매우 작은 권선비 1:1의 펄스트랜스포머(Pulse Transformer)를 직, 병렬 결합한 새로운 회로 Topology에 의한 펄스파워 전원장치의 연구결과에 관한 것이다.

2. ASM방식 펄스파워 기술

2.1 기본 회로 Topology

ASM(All Solid-state Modulator)방식의 펄스파워 기술의 기본 개념 회로는 그림1과 같다. 이것은 펄스 트랜스포머의 1차측 전압( $V_o$ )을 저전압으로 하고, 저전압/저전류 형 범용 반도체 소자를 사용한 고전압/고전류 펄스파워 변조 Topology이다. M개의 캐패시터와 스위치를 병렬 접속하여 각 모듈(module)을 구성하고, 각 모듈은 권선비 1:1의 펄스 트랜스포머 1차를 구동하고, 펄스 트랜스포머 2차를 N개 직렬 접속하여 고전압을 획득한다.

$$\begin{aligned} V_{out} &= N \times V_o \\ I_{out} &= M \times I_o \end{aligned} \quad \dots\dots \text{식(1)}$$

여기서,

$V_o$ : 입력전압,  
 $I_o$ : 입력전류

따라서, 모듈 병렬결합 수(M)과 펄스 트랜스포머의 2차측 직렬결합 회로 수(N)의 조합에 의하여 임의의 출력 전압과 출력전류가 획득 가능한 구조다.

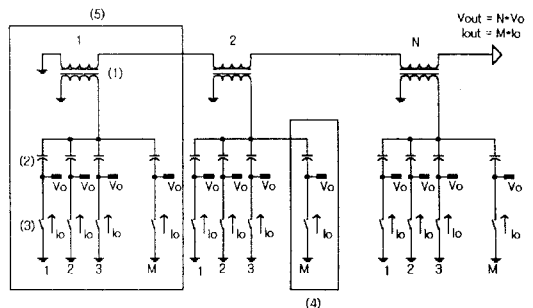


그림 1. ASM 방식 펄스파워 기본 개념회로

저온 플라즈마 발생을 위한 펄스파워 기술의 중요한 요소는 펄스 폭의 짧기 및 펄스 상승시간이다. 따라서 펄스 트랜스포머의 누설 인덕턴스 및 시간 부유용량을 최대한 작게 하지 않으면 안된다. 이를 위해 ASM 펄스파워 기술에서는 최적구조의 펄스 트랜스포머를 설계하였으며, 권선비를 1:1로 한 이 유가 거기에 있다. 또한 이러한 회로 Topology에서는 에너지 충전 캐패시터의 충전 및 방전 전류 방향이 반대이므로 펄스 트랜스포머의 용이한 리셋(Reset)이 가능하다.

## 2.2 실제 구현회로

그림2는 실제로 구현한 저온 플라즈마 발생을 위한 ASM 펄스파워 Generator System의 구성도이다. 이것은 크게 세 부분으로 구분된다.

### a. Charger/Controller

ASM 펄스파워 Generator의 에너지 저장용 캐패시터들을 모두 임의의 전압( $V_0$ )으로 충전/제어하고, 필스벤조 스위치(MOSFET)들을 동기구동 하기 위한 신호를 발생하며, 플라즈마 리액터 내의 Arc등 단락의 경우에 System을 보호하는 기능을 하는 등 전체 시스템을 운전하고 제어한다.

과전류 판단은 아래 설명한 Ireset 전류를 검출함으로써 가능하다. 즉, 이 값이 설계치 이상이면 과도한 전압 강하 차( $V_{cc}-V_{cp}$ )이 발생한 것이고, 이는 부하전류의 증가를 의미하기 때문이다.

### b. ASM 펄스파워 Generator

그림1의 개념회로에서 각 모듈에 실제 저전압/저전류 반도체 스위치로써 MOSFET을 사용한다. 이러한 스위치와 캐패시터를 각 1개를 1브랜치(branch)로 하여 이것이 M개 병렬 접속되어, 1모듈을 구성한다. 각 모듈은 1:1 펄스 트랜스포머의 1차에 각각 병렬형태로 연결되고, 각 모듈의 펄스 트랜스포머 2차는 N개 직렬접속되어 있으므로 1차 전압의 N배 전압이 출력된다. 각 모듈은 Power 회로 card형태이며 이를 최적의 직렬접속 구조로 적층함으로써 누설 인덕턴스를 최소화 하였다.

동작은 Charger/Controller부의 운전에 의하여 캐패시터,  $C_p$ 에 에너지를 충전하고 매우 짧은 시간동안 전체 MOSFET 스위치를 동시에 턴온함으로써 고전압/대전류 펄스파워를 출력측에 발생하도록 되어있다.

펄스 트랜스포머의 포화방지 및 최적 제적 설계를 위한 Reset 전류는 식(2)에 의해 결정된다.

$$I_{reset} = \frac{(V_{cc} - V_{cp})}{\sqrt{\frac{(L_c + L_{pt})}{M \cdot C_p}}} \sin \frac{1}{\sqrt{M \cdot C_p(L_c + L_{pt})}} t \quad \dots\dots\dots \text{식(2)}$$

여기서,

- $V_{cc}$  : Charger 출력전압( $C_c$ 충전전압)
- $V_{cp}$  :  $C_p$ 의 방전 후 전압
- $L_{pt}$  : 펄스 트랜스포머의 여자 인덕턴스
- $L_c$  : 충전 인덕턴스
- $C_p$  : 충전 콘덴서의 캐패시턴스

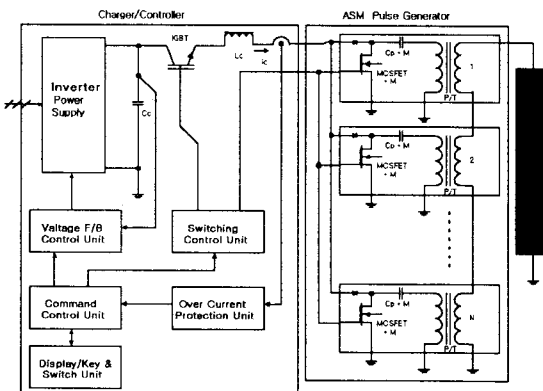


그림2. ASM 펄스파워 Generator System

### c. Reactor

리액터는 인가된 펄스파워에 의해 정(+) 및 부(-)극성의 양 전극에 고전계가 걸리고 이는 리액터를 관통하는 가스 혹은 액체 분자를 이온화 함으로써 저온 플라즈마화 하고 Radical등의 화학반응을 거쳐 유해물질 처리 및 신물질 생성 등에 응용한다.

## 2.3 ASM 펄스파워 시스템의 특징 및 사양

첫째, 스위칭 수명이 반영구적인 범용 반도체소자를 스위칭 소자로 사용함으로써 기존의 Thyatron 및 스파크 갭 방식의 한계였던 스위칭 소자 수명 문제를 해소하였고

둘째, 저손실/고속 소자인 MOSFET과 최적 펄스 트랜스포머에 의한 회로설계로 매우 짧은 폭의 펄스파워를 고속 제어함으로써 고효율을 확보하여 MPC방식의 문제점 이었던 저효율 및 그로 인한 운전비용의 문제점을 해소 하였으며

셋째, 에너지 저장 캐패시터의 충전전압을 임의로 제어 할 수 있고, 능동소자인 반도체 스위치의 용이한 제어에 의하여 원하는 펄스출력을 용이하게 획득할 수 있어, 광범위한 펄스 전압 및 펄스 반복률(Pulse Repetition Rate) 출력이 가능하다

표1. ASM 펄스파워 사양

스위칭 수명	> 10 <sup>11</sup>	400Hz 24시간 운전 시: 수년
전기적 효율	~90%	
Pulse 폭	~100ns	
Pulse 전압	~20kV	
Pulse 전류	~500A	
Pulse 주파수	~ 10(kHz)	

## 3. 실험결과

### 3.1 저항부하 시험

그림3은 50Ω 저항부하 시, 20kV, 100ns의 펄스 전압 출력 파형이다. 따라서 출력 전류는 400A이다, 모듈 Power회로 Card 수를 30으로 하여 직렬결합 하였고, 따라서 펄스 트랜스포머 1차에는 700V를 인가하였다. 이렇게 한 이유는 반도체 스위치(MOSFET)의 내압이 1000V이기 때문이다.

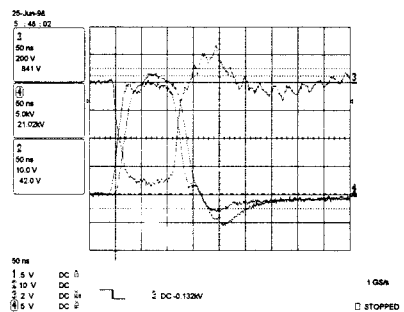


그림3. 저항부하 출력파형  
ch2.출력전류(100A/div), ch3.P/T 1차전압 (200V/div), ch4.출력전압(5kV/div)

1, 2차 전압에 Backswing이 보이는 이유는 스위치 턴 오프 시 펄스 트랜스포머의 여자 에너지를 소모해야

하는 데, 실제로 저항 부하가 완전한 무유도 저항이 아니며, 배선 인덕턴스가 존재하며, 출력 케이블간 그리고 대지간에 부유용량이 존재하여 영향을 끼치기 때문이다. 이것은 에너지 저장 캐패시터(Cp)의 방전 후 남아 있는 전압과 더해지는 방향으로 반도체 스위치의 드레인파 소스간에 인가되기 때문에 소자 파괴를 막기 위하여 이 전압을 소자의 내압 이하로 억제해야만 한다.

식(3)은 스위치 턴 오프 시 펄스 트랜스포머의 오프 시 Trailing Edge 해석<sup>(3)</sup>에 의한 Backswing의 영향 요소를 나타낸다.

$$D = \frac{1}{2Rt} \sqrt{\frac{Lpt}{Cd}} \quad \dots\dots \text{식(3)}$$

여기서,

- D : Damping Factor
- Rt : Total Shunt Resistance
- Lpt : 펄스 트랜스포머의 여자 인덕턴스
- Cd : Total 부유용량

D가 클수록 Backswing은 작아진다. 따라서 Rt를 줄이는 것이 해소책임을 알 수 있다. 이를 위해 본 시스템에서는 Clipping 회로(Dcp, Rcp)를 그림4와 같이 착안하였다.

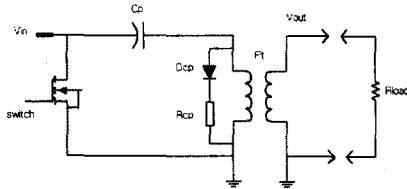


그림4. 과전압 억제용 Clipping 회로

### 3.2 Reactor부하 시험

저온 플라즈마(Non-thermal Plasma) 기술이란 기체 혹은 액체에 Plasma를 발생시키되 물질 전체가 Plasma 현상에 의해 온도가 올라가는 것이 아니라 분자고리를 직접 끊거나 또는 Radical 들을 이용해 원하는 화학반응이 일어날 수 있을 정도의 에너지를 전자에 부여하는 기술이며, 이때 반응로(Reactor) 내부의 온도는 상온정도이다. 이때 펄스파워는 바로 이러한 저온 플라즈마를 발생시키는 에너지원이 된다.

그림5는 공기가 통과하는 Wire-Plate형 Reactor부하에 본 장비의 출력을 인가 시 전압, 전류 파형이다. 파형이 저항부하와 다르게, 변곡점을 가지며 왜곡되는 것은 Reactor부하가 Plasma발생 전에는 용량성 부하로 보이다가 Plasma가 생성되면, 저항성 부하에 가까워지는 임피던스 변화를 보이기 때문이다.

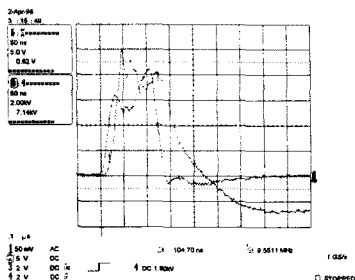


그림5. Wire-Plate형 Reactor부하의 전압, 전류

표2.는 본 장비에 의한 화력발전소나 디젤 엔진에서 많이 발생하는 NO가스 처리 결과로, 종전의 결과<sup>(4)</sup>와 비교하여, 매우 우수한 결과를 얻었음을 알 수 있다. NO가스의 초기농도를 200ppm으로 하고, 유량을 6m<sup>3</sup>/Hour로 했을 때의 사용한 전압, 주파수, 전력 및 NO 제거율을 나타냈다..

표2. NO가스 처리결과 실험 데이터

주파수(Hz)	이용전력(W)	NO제거율(%)
200	14.7	23.5
500	39.3	47.0
700	52.0	60.0
1000	74.4	73.5
1200	89.3	81.5
1500	111.9	92.0
1750	130.2	93.5
2000	148.5	96.5

단펄스 전압크기/펄스폭 : 10kV/100ns  
 처리 NO가스 처리전 농도 : 200ppm  
 처리 NO가스 유량 : 6m<sup>3</sup>/Hour  
 반응기 형태 : Wire-Cylinder Type

### 4. 결 론

본 연구는 종래의 펄스파워 전원장치의 성능개선 차원이 아니라 전혀 다른 개념에서 새로운 펄스파워 전원장치를 구현하고자 하였다. 이러한 관점에서, 첫째, 범용 반도체 스위칭 소자와 1:1 펄스 트랜스포머에 의한 새로운 회로 Topology를 제안하였고 둘째, 고신뢰성을 확보하기 위하여 과전류/과전압 보호 회로를 착안하였으며, 셋째, 상기 아이디어에 의하여 ASM 방식 펄스파워 전원장치를 성공적으로 구현함으로써, 다른 방식의 문제점을 획기적으로 개선하였고 넷째, 이에 의해 실제 NO가스를 처리한 결과 매우 우수한 결과를 얻었다.

ASM방식 펄스파워 전원장치는 유해가스 처리 등 환경오염 방지분야를 비롯한, 많은 저온 플라즈마 응용분야의 발전에 기여할 수 있으리라 사료되며, 용량 및 사양 확대가 향후 과제이다.

### (참 고 문 헌)

- [1] J.S. Chang, "Energetic electron induced plasma processes for reduction of acid and greenhouse gases", Non-Thermal Plasma Techniques for Pollution Control, Part A, Springer-Verlag Pub. Co. pp1-32, 1993
- [2] D.L. Brix 외 5인, "Experiments in magnetic switch", 3rd IEEE International Pulsed Power Conference, pp262-268, 1981
- [3] William M. Flanagan, Handbook of transformer design and applications, McGRAW-HILL, INC., pp5.1-5.20, 1992
- [4] Akira Mizuno, A.Chakrabarti, and Ken Okazaki, "Application of corona technology in the reduction of greenhouse gases and other gaseous pollutants", Non-Thermal Plasma Techniques for Pollution Control, Part B, Springer-Verlag Pub. Co. pp165-185, 1993