

## 고전압 펄스 발생 장치의 특성에 관한 시뮬레이션 연구

(Simulation Study of Characteristics for Device of the High Voltage Pulse Generator)

김영주\* · 신주희

(Young-Ju Kim · Ju-Hee Shin)

### Abstract

The high-voltage pulse generator is consist of transformers of fundamental wave and harmonic waves, and shunt capacitances. The pulse has the fundamental wave and the harmonic waves that have been increased as a series circuit by the transformers to make high voltage pulse. This paper shows the high-voltage pulse generator simulation using a circuit program with experiment data. In the equivalent circuit, magnetized inductances and loss resistances which affect output voltage, have been obtained. The output capacitor circuits have characteristics of band pass. The output voltages of the pulse width 50% and 25%(PWM) were obtained. The output of the high-voltage pulse generator is 2.5kHz, 1.8kV.

Key Words : PWM Pulse, Transformer, Harmonic Frequency, High Voltage, Inductance, Capacitance

### 1. 서 론

고전압 펄스를 만드는 연구가 많이 이루어 졌으며, 현재는 고전압에서 높은 주파수의 펄스를 만드는 연구가 진행되고 있다. 이러한 고전압 펄스의 응용분야로는 음이온 공기 청정기[1], 펄스방전에 의하여 발생되는 플라즈마에 의한 자동차 연소효율 증가[2], 이온 물질 표면처리[3], 음식물 부패방지[4], 살균소독[5],

여러 환경정화 분야에 적용되고 있다.

고전압 펄스 발생 방법으로는 IGBT switch와 step-up 트랜스포머를 사용하는 방식[3], 진공관(HT) 회로 방식[6], RCD 회로를 이용한 방식[7], 트랜스포머와 병렬로 역방향 다이오드를 사용한 방식[8] 등 여러 가지 방법이 있으며 3~40kV 고전압 펄스를 발생시키고 있다.

본 연구에서는 이런 Switching 소자나 Solid State 소자들을 사용하지 않고 대용량 고전압 펄스 장치를 구현하기 위해서 Fourier Series를 이용하여 펄스가 기본파와 고조파 성분들로 구성되어 각각 성분들을 트랜스포머를 이용하여 승압시키고 승압된 정현파를 합하여 고전압 펄스를 만들 수 있다. 실험한 자료[9]들을 참고하여 회로 프로그램으로 고전압 펄스발생 장치의 시뮬레이션을 행하였다. 트랜스포머 등가회로에

\* 주저자 : 홍익대 과학기술대 전자전기공학과 부교수  
\* Main author : Hongik University Science Technology  
College Electronic & Electricity Engineering  
Department Associate Professor  
Tel : 041-860-2483, Fax : 041-862-2740  
E-mail : jykim5712@hotmail.com  
접수일자 : 2012년 11월 1일  
1차심사 : 2012년 11월 3일  
심사완료 : 2012년 11월 14일

서 자화인덕턴스와 자화손실 값을 구했으며 고전압 펄스 2.5kHz, 1.8kV 50%, 25% duty 폭을 확인하였다.

## 2. 본 론

고전압 펄스 발생 장치로 그림 1과 같은 개략적인 회로도틀을 이용하였으며 본 연구에서는 실험한 자료 들로 고전압 펄스 발생장치에 관한 특성을 얻기 위 해 ADS 프로그램을 이용한 시뮬레이션을 행하였 다. 고전압 펄스 발생 장치의 실험장치는 그림 2와 같다[9].

변압기의 저전압측(입력)은 병렬연결이고 고전압측 (출력)은 직렬연결이다.

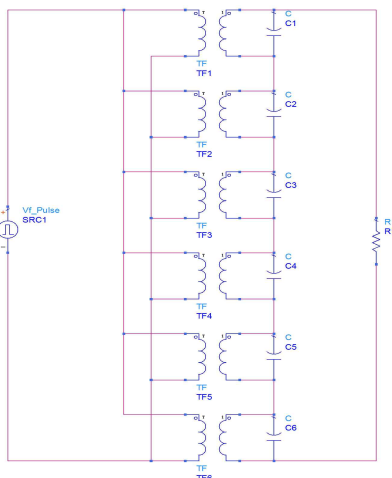
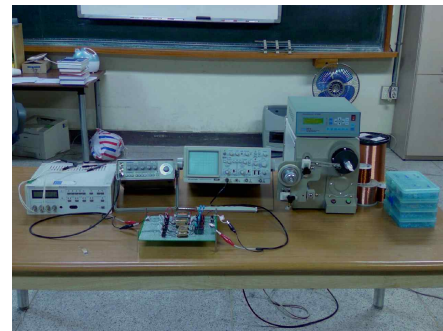
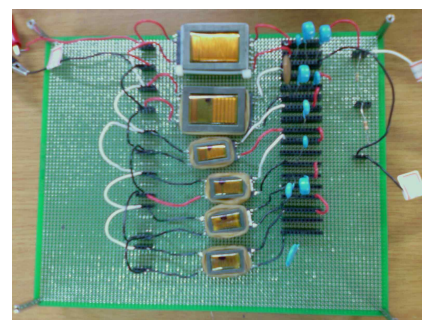


그림 1. 고전압 펄스 발생 개략적인 회로도  
Fig. 1. High-Voltage Pulse Generator of Circuit

저전압 펄스파형이 기본파와 여러 개의 흡수 고조파 로 구성되므로 기본파와 여러 고조파 성분들을 각각 트랜스포머들을 통하여 고전압 성분들로 만들고 이 들을 합하면 고전압 펄스가 된다. 저전압 입력 펄스파형 은 트랜스포머들이 병렬로 연결되어 들어가며 기본파 인 2.5kHz와 흡수 고조파 성분들인 7.5kHz, 12.5kHz, 17.5kHz, 22.5kHz, 그리고 27.5kHz으로 나누어진다. 트랜스포머의 출력은 각각의 승압된 성분들이 다시 직렬로 합쳐져서 2.5kHz, 1.8kV 50% 폭인 고전압 펄 스가 형성된다.



a) 실험 장치 구성도



b) 고전압 펄스 발생 장치

그림 2. 고전압 펄스 발생 장치 실험도  
Fig. 2. Experiment of High-Pulse Generator device

### 2.1 고전압 펄스 발생 회로 시뮬레이션

고전압 펄스 발생기에 사용되는 트랜스포머의 등가 회로는 그림 3과 같이 2종류가 있다[10].

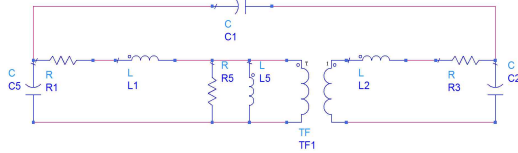
그림 3 (a)의 등가회로는 일반적인 회로이며 그림 3 (b)는 일차측으로 환산된 등가회로이다.

본 논문에서는 그림 3 (a)의 등가회로를 사용하였 으며 트랜스포머의 기본파 등가 회로도 는 그림 4와 같다.

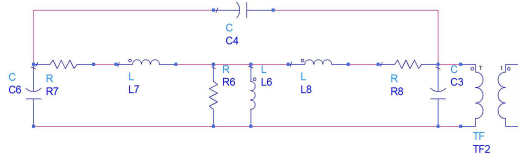
그림 4에서 입력단을 보면  $R_{11}$ 과  $L_{11}$ 은 트랜스포머 의 1차 권선의 저항과 인덕턴스 값이고  $L_m$ 과  $R_m$ 은 트 랜스포머의 자화에 의한 인덕턴스와 자화손실이다. 출력단에서 보면  $L_{22}$ 와  $R_{22}$ 는 2차측 권선의 인덕턴스 와 저항 값이다.  $C_{12}$ 는 트랜스포머의 입력단과 출력단 사이의 커패시턴스이다. 또한  $C_{11}$ 은 입력단의 커패시 턴스이며,  $C_{22}$ 는 외부에서 인가하는 출력단 커패시 턴스이다. 기본파 및 고조파들의 등가회로들에서 사용

고전압 펄스 발생 장치의 특성에 관한 시뮬레이션 연구

되는 저항, 인덕턴스, 커패시턴스 등은 실험에 의해 측정된 값을 사용하였다[9].



a) 트랜스포머의 등가 회로 1



b) 트랜스포머의 등가 회로 2

그림 3. 고전압 펄스 트랜스포머의 등가회로  
Fig. 3. Equivalent Circuits of High-Voltage Pulse Transformers

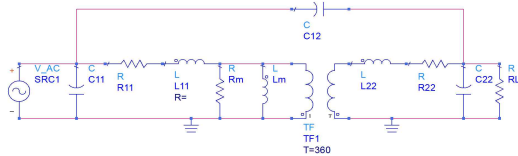


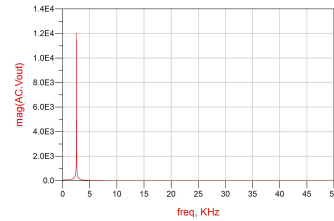
그림 4. 기본파 등가 회로도  
Fig. 4. Equivalent Circuits of Fundamental Wave

기본파 등가회로의 시뮬레이션 결과는 그림 5와 같다.

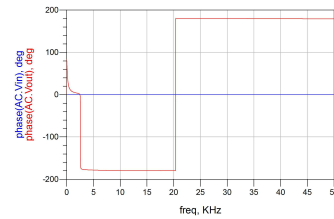
그림 5 (a)에서 기본파 주파수 영역은 대략 2.5kHz 대역으로 트랜스포머에 의하여 승압이 되고 있다는 것을 볼 수 있고, 그림 5 (b)에서 위상을 보면 위상차가 0°에 가까울수록 좋은 출력 파형을 갖는다는 것을 알 수 있다. 그림 5 (a), (b)에서 2.5kHz 주파수 대역에서의 저전압 입력 및 고전압 출력의 정현파를 시간영역에서 볼 수 있다.

## 2.2 고전압 펄스 발생 회로의 시뮬레이션 결과

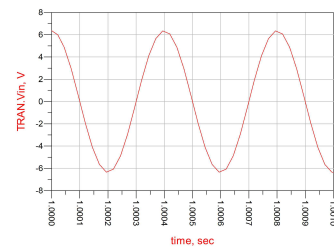
6개의 기본파 및 고조파 성분들의 트랜스포머들을



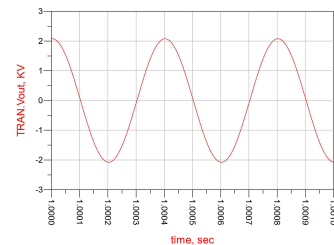
a) 주파수 영역에서 크기



b) 주파수 영역에서 위상



c) 시간 영역에서 입력파형



d) 시간 영역에서 출력파형

그림 5. 기본파의 등가회로 시뮬레이션 결과  
Fig. 5. Simulation Result of Fundamental Wave Equivalent

연결하여 고전압 펄스 발생장치의 회로도도 그림 6과 같다.

그림 6의 회로도에서 저전압 펄스 입력을 주기 위해서 푸리에 급수를 이용하여 펄스 입력 파형을 만들었는데 기본파와 5개 고조파의 정현파들을 사용하였다.

입력 파형은 2.5kHz, 10V<sub>pp</sub>로 하여 펄스폭은 50%이다. 부하는 100MΩ을 사용하였다.

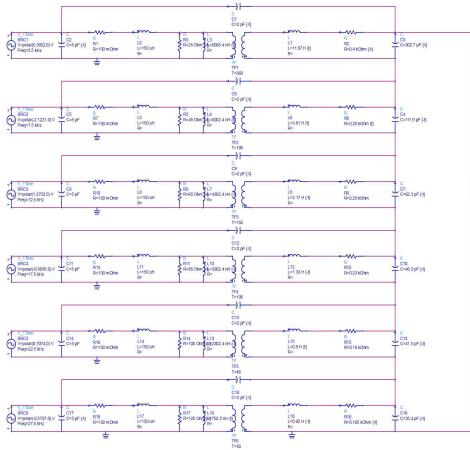


그림 6. 고전압 펄스를 발생하기 위한 회로도  
Fig. 6. The Circuit for High-Voltage Pulse Generator

입력파형의 기본파와 고조파의 성분은 표 1이다.

표 1. 입력파형의 기본파 및 각 고조파별 크기와 위상  
Table 1. Amplitude and Phase of the Fundamental Wave and Harmonic Waves

기본파		3 고조파		5 고조파	
크기(V)	위상(°)	크기(V)	위상(°)	크기(V)	위상(°)
6.3662	0	2.1221	180	1.2732	0
7 고조파		9 고조파		11 고조파	
크기(V)	위상(°)	크기(V)	위상(°)	크기(V)	위상(°)
0.9095	180	0.7074	0	0.5787	180

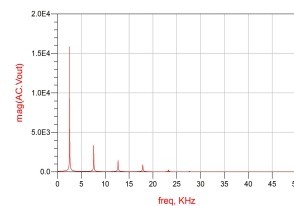
기본파와 고조파 트랜스포머들에서 시뮬레이션을 통하여 자화 인덕턴스( $L_m$ )와 손실( $R_m$ )을 구하였는데 이는 표 2에서 보여진다.

회로에서 커패시터와 인덕터가 포함되어 있다면 출력 파형은 시간에 따라 과도응답과 정상상태응답을 가지고 있으며 펄스 트랜스포머에서도 그러한 응답을 볼 수 있다.

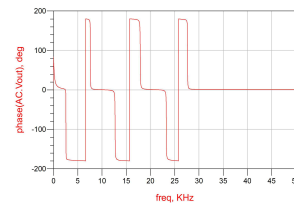
표 2. 시뮬레이션을 통하여 구한 자화 인덕턴스( $L_m$ )와 손실( $R_m$ )

Table 2. Magnetized Inductance and Resistance Using Simulation

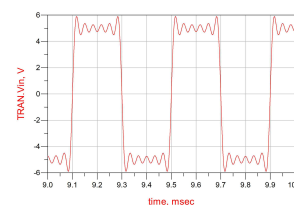
기본파		3 고조파		5 고조파	
$L_m$ (nH)	$R_m$ (Ω)	$L_m$ (nH)	$R_m$ (Ω)	$L_m$ (nH)	$R_m$ (Ω)
6088.4	20	5002.4	45	4302.4	62
7 고조파		9 고조파		11 고조파	
$L_m$ (nH)	$R_m$ (Ω)	$L_m$ (nH)	$R_m$ (Ω)	$L_m$ (nH)	$R_m$ (Ω)
3902.4	80	2302.4	104	702.5	123



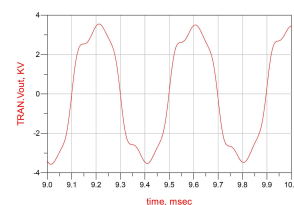
a) 주파수 영역에서 크기



b) 주파수 영역에서 위상



c) 시간 영역에서 입력파형

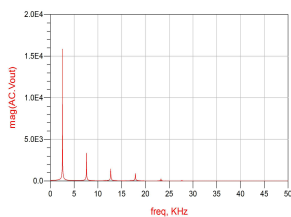


d) 시간 영역에서 출력파형

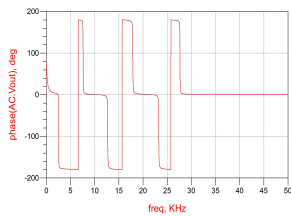
그림 7. 고전압 펄스 발생회로의 과도응답  
Fig. 7. Transient Response of High-Voltage Pulse Generator

그림 7은 9ms에서의 출력 파형이며 정현파에 가까운 파형으로 볼 수 있으며 이는 과도상태의 응답이며 제대로 승압된 펄스 파형을 보기 위해서는 적어도 1sec이상의 시뮬레이션 결과 후에 정상상태의 펄스를 볼 수 있었다.

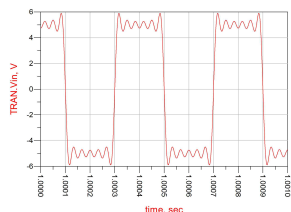
정상상태에서의 출력 파형을 보면 기본파와 홀수 고조파 성분들이 구성되어 있으며 각 고조파의 성분들은 해당되는 크기들과 위상들은 그림 8의 시뮬레이션 결과 그래프에 나타나 있다.



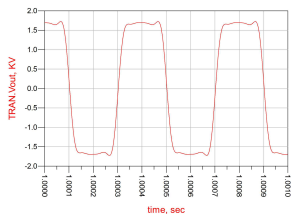
a) 주파수 영역에서 크기



b) 주파수 영역에서 위상



c) 시간 영역에서 입력파형



d) 시간 영역에서 출력파형

그림 8. 고전압 펄스 발생회로 시뮬레이션 결과  
Fig. 8. Simulation Results of High-Voltage Pulse Generator Circuits

6개의 고조파 트랜스포머에 대한 각 주파수별 출력의 크기와 위상을 시뮬레이션으로 계산한 결과는 표 3에서 주어진다.

기본파 성분(2.5kHz)은 기본파 트랜스포머에서 가장 큰 고전압이 발생되고, 다른 고조파 트랜스포머들에서는 작은 고조파 전압들이 각각 발생되어 이것들의 합이 고전압 펄스가 된다.

표 3. 기본파 및 각 고조파별 크기와 위상  
Table 3. Amplitude and Phase of the Fundamental Wave and Harmonic Waves

기본파		3 고조파		5 고조파	
크기(V)	위상(°)	크기(V)	위상(°)	크기(V)	위상(°)
15873.4	-3.6	3359.6	171.9	1458.8	-6.9
7 고조파		9 고조파		11 고조파	
크기(V)	위상(°)	크기(V)	위상(°)	크기(V)	위상(°)
349.5	176.2	252.2	-0.8	47.4	173.4

펄스폭을 변화시키는 PWM인 경우에 펄스폭을 25%로 변화시키면 저전압 입력의 기본파와 고조파들의 크기와 위상들이 표 4에 주어지며 고전압 출력의 기본파 및 고조파 성분들의 크기와 위상은 표 5에서 주어진다. 고전압 출력의 펄스는 그림 9에서 보여진다.

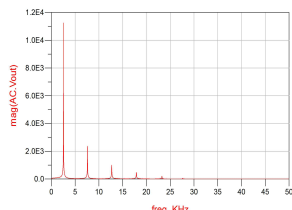
표 4. 펄스폭(25%)에 따른 저전압 입력의 기본파 및 각 고조파 별 크기와 위상

Table 4. Fundamental Wave and Harmonic Waves of Amplitude and Phase on 25% Pulse Width Low-Voltage Input

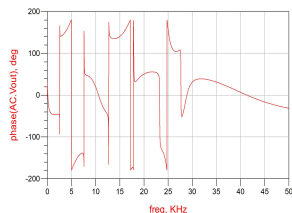
기본파)		3 고조파		5 고조파	
크기(V)	위상(°)	크기(V)	위상(°)	크기(V)	위상(°)
4.502	-45	1.500	-135	0.900	-45
7 고조파		9 고조파		11 고조파	
크기(V)	위상(°)	크기(V)	위상(°)	크기(V)	위상(°)
0.643	-135	0.500	-45	0.409	-135

표 5. 펄스폭(25%)에 따른 고전압 출력의 기본파 및 각 고조파 별 크기와 위상  
 Table 5. Fundamental Wave and Harmonic Waves of Amplitude and Phase on 25% Pulse Width High-Voltage Output

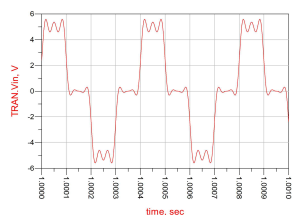
기본파		3 고조파		5 고조파	
크기(V)	위상(°)	크기(V)	위상(°)	크기(V)	위상(°)
11251.7	-49.1	2373.3	-143.5	1008.8	-49.2
7 고조파		9 고조파		11 고조파	
크기(V)	위상(°)	크기(V)	위상(°)	크기(V)	위상(°)
475.6	-173.8	200.7	54.1	52.4	107.5



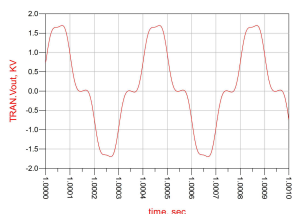
a) 주파수 영역에서 크기



b) 주파수 영역에서 위상



c) 시간 영역에서 입력파형



d) 시간 영역에서 출력파형

그림 9. PWM파형을 인가하였을 경우 시뮬레이션 결과  
 Fig. 9. Simulation Results with PWM Pulse

25%의 펄스폭을 인가하였을 경우에도 입력 파형이 증폭이 되어 2.5kHz, 1.8kV 고전압 출력으로 나오는 것을 볼 수 있다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 펄스의 기본파와 고조파 성분들을 각각 트랜스포머들로 승압시키고 이를 합한 고전압 펄스 장치의 실험결과와 비교하기 위하여 트랜스포머의 등가회로를 이용하여 시뮬레이션하였다. 자기화에 의한 인덕턴스( $L_m$ )와 손실저항( $R_m$ )은 출력전압의 크기에 영향을 주었으며 출력에서의 외부 커패시터(C22)에 의해서 고조파 성분 별로 제작된 트랜스포머는 대역통과 특성을 나타내었다. 이는 공진주파수  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{22}C_{22}}}$ 에 따라 결정되었다. 고전압 펄스 발생 장치의 출력은 2.5kHz, Peak-to-Peak 1.8kV 고전압 펄스의 파형을 시뮬레이션을 통해 관찰할 수 있었다.

이는 실험결과와 일치하였으며 앞으로 트랜스포머의 특성의 이론적 연구에 의한 고전압펄스발생 장치 설계가 필요하리라 생각된다.

### References

- [1] A. Mizuno. et al, "Indoor Air Cleaning using a Pulsed Discharge Plasma," IEEE trans. Industry application, Vol.35, No.6, pp.1284-1287, Nov. 1999.
- [2] Fei Wang et al, "Transient plasma Ignition of Quiescent and Flowing Air/Fuel Mixtures," IEEE Trans. Plasma Sci., Vol.33, No.2, pp.844-849, April. 2005.
- [3] Jose' O. Rossi et al, "A 4-kV/2-A/5-kHz Compact Modulation for Nitrogen Plasma Ion Implantation," IEEE Trans. Plasma Sci., Vol.34, No.5, pp.1757-1765, Oct. 2006.
- [4] K.H. Schoenbach et al, "Bio electrics-New applications for pulsed power technology," IEEE Trans. Plasma Sci., Vol.30, No.1, pp.293-300, Feb. 2002.
- [5] S.B. Dev. et al, "Medical applications of electroporation," IEEE Trans. Plasma Sci., Vol.28, No.1, pp.206-223, Feb. 2000.
- [6] K. Yukimura et al, "Two switch high voltage modulator for plasma based ion implantation," Surf. coat. Technol, Vol.156, No.1-3, pp-66-70, Jul. 2002.
- [7] L.M Redondo et al, "A new method to build a high-voltage pulse using only semiconductor Switches for plasma-immersion ion implantation," Surf. Coat. Technol.,

Vol.136, No.1-3, pp.51-54, Feb. 2001.

- [8] X. Tian et al, "Special modulator for high frequency, low-voltage plasma immersion implantation," Rev. Sci. Instrans., Vol.70, No.3, pp.1824-1827, Mar. 1999.
- [9] Y. Kim, "Study for the Design and Measurement of the High Voltage Pulse Generator Using Transformers," The Proceedings of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, 26(1), pp. 82 - 86, 2012.
- [10] IEEE, Transformer Equivalent Circuit, ANSI/IEEE Std 390TM - 1987(R2007).

◇ 저자소개 ◇



**김영주 (金榮珠)**

1957년 3월 12일생. 1980년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1985년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 Polytechnic University 졸업(박사). 1988~1993년 Polytechnic Univ. Research Assistance. 1993~1996년 Polytechnic Univ. Research

Fellow. 현재 홍익대 과학기술대 전자전기공학과 부교수.  
주관심분야 : Design of the microwave system,  
Design of the plasma source by RF



**신주희 (申紆熙)**

1986년 1월 7일생. 2011년 홍익대 전기 전자공학과 졸업. 현재 홍익대 전자전산과 대학원 재학.

주관심분야 : Design of the plasma source by RF