

고전압 펄스 발생 장치의 관한 부하의 변화를 고려한 펄스회로의 이론적 연구

(Theoretical Study of Pulse Circuits with the Load Variation for Device
of the High Voltage Pulse Generator)

김영주* · 방상석 · 이재한 · 김상현

(Young-Ju Kim · Sang-Seok Bang · Chae-Han Lee · Sang-Hyun Kim)

Abstract

The high-voltage pulse generator consists of transformers of fundamental wave and harmonic waves, and shunt capacitors. The pulse has the fundamental wave and the harmonic waves that have been as a series circuit by the transformers to make high voltage pulse. This paper shows that pulse generator circuit is analyzed by using transformer equivalent circuits with the effect of load and simulated in time domain using Matlab program. The output voltage of pulse were obtained to 2.5kHz, 2.0kV. In high voltage circuit, capacitors are related to frequency band pass characteristics. Also, it is shown that the voltage of output pulse increases according to the growth of load.

Key Words : Transformer, Harmonic Frequency, High Voltage, Pulse, Resonant Circuits

1. 서 론

고전압 펄스를 만드는 연구가 많이 진행되어 있으며 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 switch 와 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 1-40kV 고전압 펄스를 발생시키고 있다.

본 연구에서는 실험한 자료[9]들을 참고하여 트랜스포머의 등가회로에서 부하의 영향을 고려하기 위하여 2차측 임피던스를 1차측으로 환산하여 트랜스포머의 1차측 전압을 구하였다. 따라서 기본파 및 고조파들의 회로들을 재구성하여 고전압 펄스 발생 장치의 이론적 특성을 새로이 구하였다. 또한 부하변화에 의한 출력펄스 전압의 변화를 구하였다.

* Main author : Hongik University Science
Technology College Electronic & Electrical
Engineering Department Professor
Tel : 044-860-2483, Fax : 044-862-2740
E-mail : yjkim1@wow.hongik.ac.kr
Received : 2015. 12. 24.
Accepted : 2016. 2. 25.

2. 본 론

고전압 펄스 발생 장치를 트랜스포머로 구성하여 실험을 하였으며[9], 실험한 자료들로 고전압 펄스 발생장치에 관한 특성을 얻기 위해 시뮬레이션을 하였고[10] 본 연구에서는 이론적으로 회로의 특성 [11]을 새로이 분석하여 고전압 펄스 발생을 확인 하였다.

전체 회로도에는 그림 1와 같으며 입력 전압 파형은 펄스 입력으로써 Fourier Series로 풀어서 각각의 트랜스포머에 병렬로 인가하였다. 출력단은 기본파와 고조파 성분들인 고전압들이 직렬로 합쳐져 고전압 펄스를 형성한다.

저전압 펄스파형은 기본파인 2.5kHz와 홀수 고조파 성분들인 7.5kHz, 12.5kHz, 17.5kHz, 22.5kHz, 그리고 27.5kHz로 구성되어 진다. 이러한 성분들을 출력단에서 직렬로 합쳐서 2.5kHz, 2.0kV의 고전압 펄스가 형성된다.

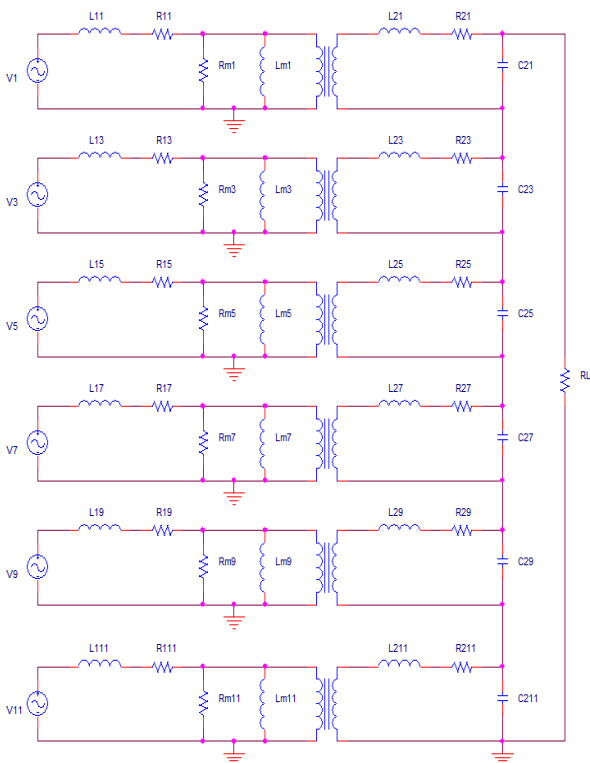


Fig. 1. The Circuit of High-Voltage Pulse Generator

2.1 고전압 펄스 발생 회로 이론적 분석

고전압 펄스 발생장치에 사용되는 트랜스포머의 기본파 등가회로는 그림 2와 같다.

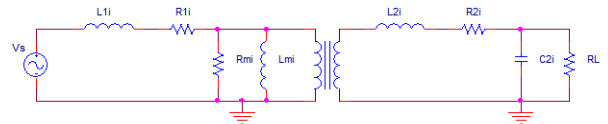


Fig. 2. Fundamental Wave Circuit of High-Voltage Pulse Transformer

등가회로에서 트랜스포머의 누설 커패시터들은 주파수에 따라 영향이 있으나 2.5kHz 주파수에서는 그 영향이 미비하여 회로에서 생략하였다.

2.1.1 입력단 분석

기본파 및 고조파들의 등가 회로도들은 각각 입력단과 출력단으로 나누어 해석하며 기본파와 고조파 등가회로들의 구조는 같으므로 등가회로의 입력단은 그림 3과 같다.

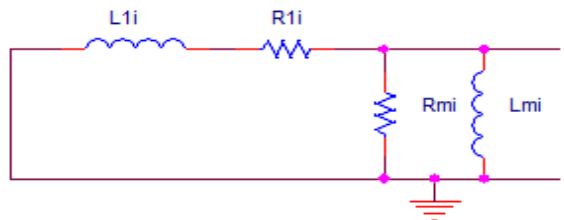


Fig. 3. Input part of Equivalent circuit

트랜스포머의 1차측에서 본 임피던스는 아래 식 (1)과 같다.

$$Z_{1i} = \frac{R_{1i} + j\omega_i L_{1i}}{1 + \frac{R_{mi} + j\omega_i L_{mi}}{j\omega R_{mi} L_{mi}} (R_{1i} + j\omega_i L_{1i})} \quad (1)$$

트랜스포머 2차측에서 본 입력단 임피던스는 식 (2)와 같다.

$$Z_{si} = n_i^2 Z_{1i} \quad (2)$$

출력단에서 본 임피던스는 그림 4에서 보여진다.

$$Z_i = \frac{R_{2i} + j\omega_i L_{2i} + Z_{si}}{(1 - \omega_i^2 L_{2i} C_{2i}) + j\omega_i R_{2i} C_{2i} + j\omega_i C_{2i} Z_{si}} \quad (3)$$

단 첨자 i 는 고조파 수를 의미한다. 따라서 각 고조파에서 출력단에서 본 임피던스는 식 (3)에 따라 각각 $Z_1, Z_3, Z_5, Z_7, Z_9, Z_{11}$ 로 표시한다.

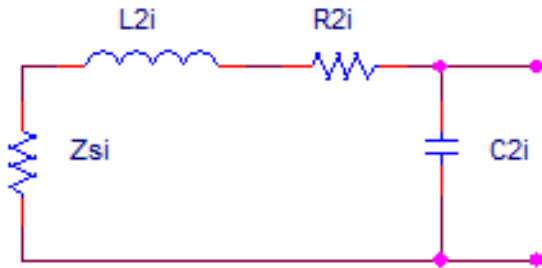


Fig. 4. Output part of Equivalent circuit

입력단에서 전압값을 구하면 식 (5)로 주어진다.

$$Z_T = \frac{j\omega_i L_{mi} R_{mi} Z_{oi}}{R_{mi} Z_{oi} + j\omega_i L_{mi} Z_{oi} + j\omega_i L_{mi} R_{mi} n_i^2} \quad (4)$$

$$V_{1i} = \frac{Z_T}{R_{1i} + j\omega_i L_{1i} + Z_T} V_{si} \quad (5)$$

단 Z_{oi} 는 출력단 분석에서 식 (8), (10), (12), (14), (16), (18)로 각각 구하여진다.

입력단에서 전압값을 구하는 회로는 그림 5와 같다.

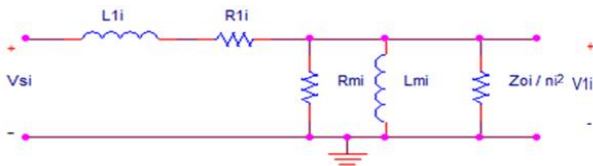


Fig. 5. Input Voltage circuit

트랜스포머 출력단에서 입력전압은 식 (6)으로 구해진다.

$$V_{2i} = n_i V_{1i} \quad (6)$$

2.1.2 출력단 분석

출력단에서 전압비 $\frac{V_{L1}}{V_{21}}$ (i 는 고조파수이다.)는 그림 1에서 직렬로 연결되어진 고조파 성분들의 공진회로들을 고려하여야 한다.

기본파의 등가회로는 그림 6과 같으며 기본파의 출력단 해석을 위해서는 직렬로 연결된 3, 5, 7, 9,와 11 고조파의 공진회로들을 고려하여야 하며 공진 회로들의 합성 임피던스를 구하여야 한다.

기본파의 전압비 $\frac{V_{L1}}{V_{21}}$ 를 수식 (7)로 구한다.

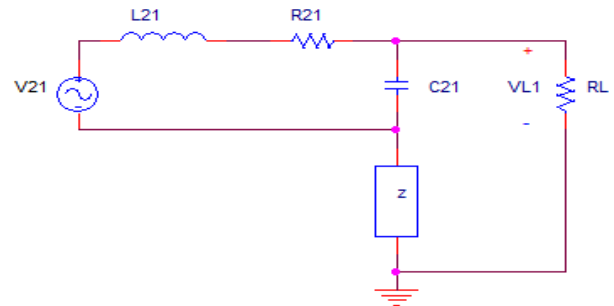


Fig. 6. Output Level Equivalent Circuit of Fundamental Wave

$$\frac{V_{L1}}{V_{21}} = \frac{1}{j\omega_1 C_{21} \left(1 + \frac{z}{R_L}\right) (R_{21} + j\omega_1 L_{21}) + \frac{R_{21} + j\omega_1 L_{21}}{R_L} + \left(1 + \frac{z}{R_L}\right)} \quad (7)$$

$$z = Z_3 + Z_5 + Z_7 + Z_9 + Z_{11}$$

여기에서 $Z_3, Z_5, Z_7, Z_9, Z_{11}$ 은 식 (3)에서 구해진다. 출력단의 입력측에서 본 임피던스는 식 (8)로 주어진다.

$$Z_{o1} = \frac{R_{21} + j\omega_1 L_{21}}{1 - \frac{1}{\frac{R_{21} + j\omega_1 L_{21}}{R_L} + j\omega_1 C_{21} \left(1 + \frac{z}{R_L}\right) + \frac{R_{21} + j\omega_1 L_{21}}{R_L} + \left(1 + \frac{z}{R_L}\right)}} \quad (8)$$

3차 고조파의 등가회로는 그림 7과 같으며 3차 고조파의 출력 해석을 위해서 기본파의 공진 회로와 5, 7, 9와 11 고조파의 공진회로들을 고려하여야 한다.

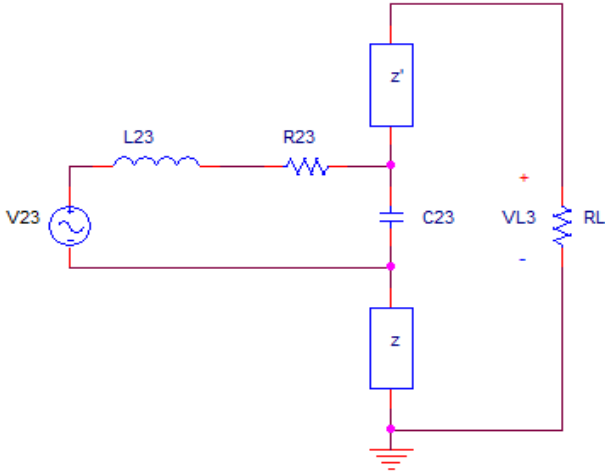


Fig. 7. Output Level 3rd Harmonic Equivalent Circuit

전압비 $\frac{V_{L3}}{V_{23}}$ 를 구하면 수식 (9)와 같다.

$$\frac{V_{L3}}{V_{23}} = \frac{1}{j\omega_3 C_{23} \left(1 + \frac{z' + z}{R_L}\right) (R_{23} + j\omega_3 L_{23}) + \frac{R_{23} + j\omega_3 L_{23}}{R_L} + \left(1 + \frac{z' + z}{R_L}\right)} \quad (9)$$

$$z = Z_5 + Z_7 + Z_9 + Z_{11}$$

$$z' = Z_1$$

출력단의 입력측에서 본 임피던스는 식 (10)으로 주어진다.

$$Z_{o3} = \frac{R_{23} + j\omega_3 L_{23}}{1 - \left(1 + \frac{z'}{R_L}\right) \frac{1}{\frac{R_{23} + j\omega_3 L_{23}}{R_L} + \left(1 + \frac{z'}{R_L}\right)}} \quad (10)$$

$$\frac{j\omega_3 C_{23} \left(1 + \frac{z'}{R_L} + \frac{z}{R_L}\right) (R_{23} + j\omega_3 L_{23})}{}$$

5차 고조파의 등가회로는 그림 8과 같으며 위쪽의 기본파, 3고조파 임피던스와 아래쪽의 7, 9, 11 고조파 합성 임피던스를 고려하여야 한다.

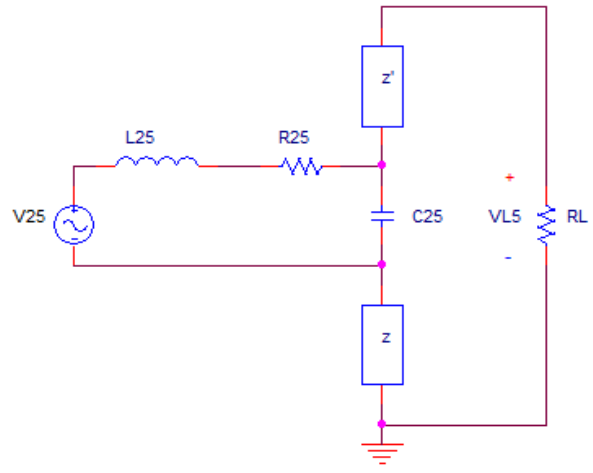


Fig. 8. Output Level 5th Harmonic Equivalent Circuit

수식 (3)에서 Z_7 를 구하면 출력단의 전압비는 식 (11)과 같이 구해진다.

$$\frac{V_{L5}}{V_{25}} = \frac{1}{j\omega_5 C_{25} \left(1 + \frac{z' + z}{R_L}\right) (R_{25} + j\omega_5 L_{25}) + \frac{R_{25} + j\omega_5 L_{25}}{R_L} + \left(1 + \frac{z' + z}{R_L}\right)} \quad (11)$$

$$z = Z_7 + Z_9 + Z_{11}$$

$$z' = Z_1 + Z_3$$

출력단의 입력측에서 본 임피던스는 식 (12)로 주어진다.

$$Z_{o5} = \frac{R_{25} + j\omega_5 L_{25}}{1 - \left(1 + \frac{z'}{R_L}\right) \frac{1}{\frac{R_{25} + j\omega_5 L_{25}}{R_L} + \left(1 + \frac{z'}{R_L}\right)}} \quad (12)$$

$$\frac{j\omega_5 C_{25} \left(1 + \frac{z'}{R_L} + \frac{z}{R_L}\right) (R_{25} + j\omega_5 L_{25})}{}$$

7차 고조파는 수식 (3)에서 Z_7 를 구하면 출력단의 전압비는 식 (13)과 같이 구해진다.

$$\frac{V_{L7}}{V_{27}} = \frac{1}{j\omega_7 C_{27} \left(1 + \frac{z' + z}{R_L}\right) (R_{27} + j\omega_7 L_{27})} \cdot \frac{1}{\frac{R_{27} + j\omega_7 L_{27}}{R_L} + \left(1 + \frac{z' + z}{R_L}\right)} \quad (13)$$

$$z = Z_9 + Z_{11}$$

$$z' = Z_1 + Z_3 + Z_5$$

출력단의 입력측에서 본 임피던스는 식 (14)로 주어진다.

$$Z_{o7} = \frac{R_{27} + j\omega_7 L_{27}}{1 - \left(1 + \frac{z'}{R_L}\right) \frac{1}{\frac{R_{27} + j\omega_7 L_{27}}{R_L} + \left(1 + \frac{z'}{R_L}\right)}} \cdot \frac{1}{j\omega_7 C_{27} \left(1 + \frac{z'}{R_L} + \frac{z}{R_L}\right) (R_{27} + j\omega_7 L_{27})} \quad (14)$$

9차 고조파는 수식 (3)에서 Z_9 를 구하면 출력단의 전압비는 식 (15)와 같이 구해진다.

$$\frac{V_{L9}}{V_{29}} = \frac{1}{j\omega_9 C_{29} \left(1 + \frac{z' + z}{R_L}\right) (R_{29} + j\omega_9 L_{29})} \cdot \frac{1}{\frac{R_{29} + j\omega_9 L_{29}}{R_L} + \left(1 + \frac{z' + z}{R_L}\right)} \quad (15)$$

$$z = Z_{11}$$

$$z' = Z_1 + Z_3 + Z_5 + Z_7$$

출력단의 입력측에서 본 임피던스는 식 (16)으로 주어진다.

11차 고조파는 수식 (3)에서 Z_{11} 를 구하면 출력단의 전압비는 식 (17)과 같이 구해진다.

출력단의 입력측에서 본 임피던스는 식 (18)로 주어진다.

$$Z_{o9} = \frac{R_{29} + j\omega_9 L_{29}}{1 - \left(1 + \frac{z'}{R_L}\right) \frac{1}{\frac{R_{29} + j\omega_9 L_{29}}{R_L} + \left(1 + \frac{z'}{R_L}\right)}} \cdot \frac{1}{j\omega_9 C_{29} \left(1 + \frac{z'}{R_L} + \frac{z}{R_L}\right) (R_{29} + j\omega_9 L_{29})} \quad (16)$$

$$\frac{V_{L11}}{V_{211}} = \frac{1}{j\omega_{11} C_{211} \left(1 + \frac{z'}{R_L}\right) (R_{211} + j\omega_{11} L_{211})} \cdot \frac{1}{\frac{R_{211} + j\omega_{11} L_{211}}{R_L} + \left(1 + \frac{z'}{R_L}\right)} \quad (17)$$

$$z' = Z_1 + Z_3 + Z_5 + Z_7 + Z_9$$

$$Z_{o11} = \frac{R_{211} + j\omega_{11} L_{211}}{1 - \left(1 + \frac{z'}{R_L}\right) \frac{1}{\frac{R_{211} + j\omega_{11} L_{211}}{R_L} + \left(1 + \frac{z'}{R_L}\right)}} \cdot \frac{1}{j\omega_{11} C_{211} \left(1 + \frac{z'}{R_L}\right) (R_{211} + j\omega_{11} L_{211})} \quad (18)$$

2.1.3 출력펄스 해석

트랜스포머 입력과 출력의 전압이득은 각 고조파 주파수 별로 구해지므로 이를 합하면 부하의 출력 전압은 식 (19)로 표시된다.

$$V_L = \sum_{i=1,3,5,7,9,11} V_{Li} \quad (19)$$

2.2 고전압 펄스 발생 회로 시뮬레이션 결과

기본파와 5개의 고조파로 이루어진 고전압 펄스 발생 회로에서 저전압 기본파와 각 고조파들을 인가하였을 경우 Matlab을 이용한 결과는 아래와 같으며 고전압 기본파와 각 고조파들의 성분은 표 1에서 주어진다.

고전압 펄스를 만들기 위해서 기본파와 각 고조파들의 크기는 푸리에 계수와 동일하며 위상은 180° 차이를 보이며 기본파 및 고조파 성분들의 위상들을 각각 0°과 180°로 이루기 위하여 입력파형의 위상을 조절

Table 1. Output Amplitude and Phase at Frequency Domain

기본파 (2.5kHz)		3 고조파 (7.5kHz)		5 고조파 (12.5kHz)	
크기(V)	위상(°)	크기(V)	위상(°)	크기(V)	위상(°)
2.5390	0.2	850.5	-179.8	507.7	0.9
7 고조파 (17.5kHz)		9 고조파 (22.5kHz)		11 고조파 (27.5kHz)	
크기(V)	위상(°)	크기(V)	위상(°)	크기(V)	위상(°)
357.3	179.9	272.9	0.7	221.4	179.1

하였으며 그 성분들은 표 2와 같다.

Table 2. Input Amplitude and Phase at Frequency Domain

기본파 (2.5kHz)		3 고조파 (7.5kHz)		5 고조파 (12.5kHz)	
크기(V)	위상(°)	크기(V)	위상(°)	크기(V)	위상(°)
6.366	138.0	2.122	-70.0	1.273	98.0
7 고조파 (17.5kHz)		9 고조파 (22.5kHz)		11 고조파 (27.5kHz)	
크기(V)	위상(°)	크기(V)	위상(°)	크기(V)	위상(°)
0.959	-90.0	0.909	90.6	0.571	-92.0

출력단에서 외부 커패시터(C_{2i})와 고압측 인덕턴스(L_{2i})의 공진주파수 특성($\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{2i}C_{2i}}}$)에 의하여 표 3과 같다.

Table 3. High-Voltage Resonance Frequency

	기본파	3고조파	5고조파
C_{2i} (pF)	337.7	112.6	74.7
L_{2i} (H)	12	4	2.17
공진 주파수(kHz)	2.5	7.5	12.5
	7고조파	9고조파	11고조파
C_{2i} (pF)	54.1	50.0	83.7
L_{2i} (H)	1.53	1	0.4
공진 주파수(kHz)	17.5	22.5	27.6

식 (19)를 이용하여 시간 영역에서 출력전압을 구해보면 그림 9와 같은 펄스(약 2.0kV)를 얻을 수 있다.

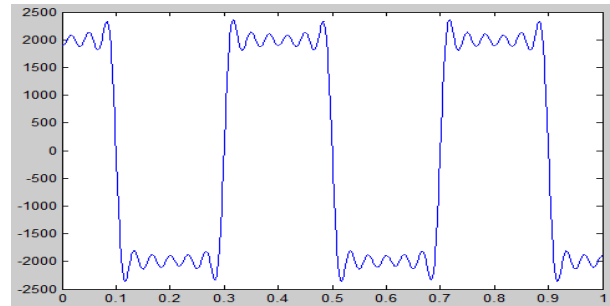


Fig. 9. Output Wave at Time Domain

출력전압의 스펙트럼 분석은 아래 그림 10에서 보여진다. 기본파 성분들과 각 고조파 성분들이 고전압에서 나타나는 것을 알 수 있다.

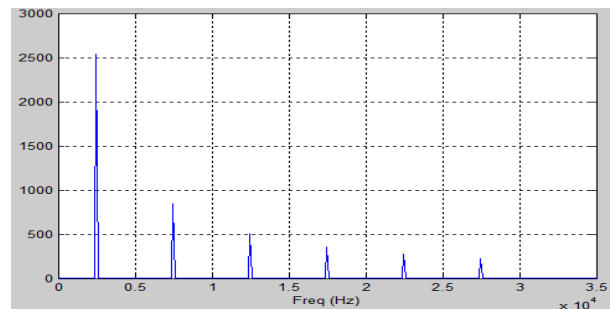


Fig. 10. Output Spectrum at Frequency Domain

부하의 크기를 변화시켜 고전압 펄스를 구하여보니 부하의 크기에 따라서 고전압 펄스의 크기가 변화하는 것을 그림 11에서 보여진다.

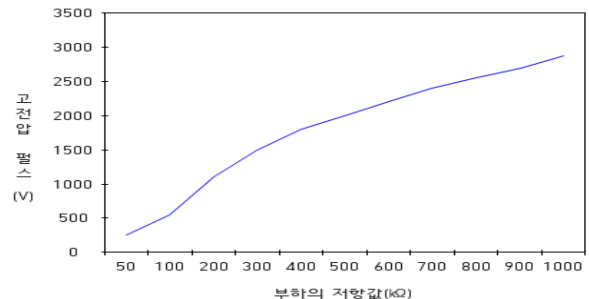


Fig. 11. High Voltage Output vs Amplitude of the load

3. 결 론

본 논문에서는 펄스의 기본파와 고조파 성분들을 각각 트랜스포머들로 승압시키고 이를 직렬로 합하여 고전압 펄스를 얻는 장치의 특성을 얻기 위하여 이론적 회로분석을 하였다. 부하의 영향을 고려하기 위하여 부하를 포함한 트랜스포머 2차측 임피던스를 1차측으로 전환하였고 트랜스포머의 1차측 전압을 구하였다. 또한 기본파 및 고조파 트랜스포머들의 상호작용을 분석하기 위하여 1차측 임피던스를 2차로 전환하여 이론적 분석을 하였다. 출력에서는 외부 커패시터(C_{2i})와 인덕턴스(L_{2i})에 의해서 고조파 성분 별로 대역통과 특성을 나타내었다. 고전압 펄스 발생 장치의 출력은 2.5kHz, 20kV 고전압 펄스의 파형을 회로분석과 프로그램을 통해 구할 수 있었다. 또한 부하의 변화에 따른 고전압 펄스값의 변화도 구하였다. 즉 부하가 증가하면 고전압 펄스값도 증가하는 것을 알 수 있었다.

부하 변동에 따른 회로분석에 의한 설계에 관한 연구로 앞으로 고전압펄스 발생장치 분야에 응용되리라 생각한다.

4. 후 기

이 논문은 2014년도 홍익대학교 학술 연구 조성비에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

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, Aprl. 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. Instrons., Vol.70, No.3, pp.1824-1827, Mar. 1999.
 [9] Youngju Kim, "Study for the Design and Measurement of the High Voltage Pulse Generator Using Transformers," JIEE, 26(1), pp. 82 - 86, 2012.
 [10] Youngju Kim et al, "Simulation Study of Characteristics for Device of the High Voltage Pulse Generator," JIEE, 26(12), pp. 80-86, 2012.
 [11] Youngju Kim, "Theoretical Study of the Circuits for Device of the High Voltage Pulse Generator," JIEE, 27(1), pp. 99-108, 2013.

◇ 저자소개 ◇



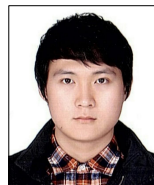
김영주 (金榮珠)

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 정교수.
 주관심분야 : Design of the microwave system, Design of the plasma source by RF



방상식 (房相碩)

1989년 11월 18일생. 현재 홍익대 과학기술대 전자전기공학과 4학년 재학.



이채한 (李彩漢)

1991년 6월 29일생. 현재 홍익대 과학기술대 전자전기공학과 4학년 재학.



김상현 (金相顯)

1991년 9월 6일생. 현재 홍익대 과학기술대 전자전기공학과 3학년 재학.