Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers (2012) 26(1) : 82~86
http://dx.doi.org/10.5207/JIEIE.2012.26.1.082
논문 26-1-12

트랜스포머를 이용한 고전압 펄스 발생 장치의 설계와 측정평가에 관한 연구

(Study for the Design and Measurement of the High Voltage Pulse Generator Using Transformers)

김영주*
(Young-Ju Kim)

Abstract

High-capacity high-voltage pulse generator that can be used for environmental clean-up was developed using transformers. High-voltage pulse is consists of the primary wave and the harmonic wave which are increased as a series circuit using transformers to make pulses. Each transformer has a band-pass characteristics. The output voltage of the pulse width 50[%] was decided. The output voltage of high-voltage pulse generator device was measured as 1.4[kV] (Peak-to-Peak)

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

1. 서 론

고용량 고전압 펄스 발생장치는 전계의 세기따라 여러 분야에서 응용되고 있으며, 그것의 응용분야로는 다음과 같다. 음이온 공기 청정기[1], 펄스방전에 의하여 발생되는 플라즈마에 의한 자동차 연소효율 증가[2], 이온 물질 표면처리[3], 음식물 부패방지[4], 살균 소독[5], 환경정화 등 여러 분야에 적용되고 있다.

고전압 정현파를 사용할 경우 발생되는 전자의 에너지는 시간적으로 일정하지 않게 되지만 고전압 펄스를 사용할 경우 전자에너지는 균일하게 되어서 적용효율을 높일 수 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]들이 있다.

본 연구에서는 펄스는 기본파와 고조파 성분들로 구성되어 있으므로 기본파와 고조파 성분들을 각각 트랜스포머들로 승압시켜 이를 합하면 고전압 펄스를 만들 수 있다.

트랜스포머는 대역통과 특성이 존재하며 권선 수에 비례하여 각 고조파 성분들을 승압시킬 수 있었다. 이런 고조파 성분들을 직렬연결을 통하여 1.4[kV], 2.5[kHz] 출력 전압을 얻을 수 있었다. 또한 PWM (Pulse Width Modulation) 방법을 적용하면 펄스폭을 조절하는 것이 가능하다.

* 주저자 : 홍익대학교 과학기술대 전자전기공학과 부교수
Tel : 041-860-2483, Fax : 041-862-2740
E-mail : jykim5712@hotmail.com
접수일자 : 2011년 12월 8일
1차심사 : 2011년 12월 10일
심사완료 : 2012년 1월 5일

2. 본 론

2.1 고전압 펄스 발생 회로 이론

본 연구에서 고전압 펄스 발생 장치는 그림 1과 같이 PWM(Pulse Width Modulation) 저전압 발생 회로, 트랜스포머 회로와 고전압 전극으로 구성된다. 저전압 펄스파형이 기본파와 여러 개의 홀수 고조파 성분들로 구성되므로 기본파와 여러 고조파 성분들을 각각 트랜스포머들을 통하여 고전압 성분들을 만들고 이를 합하면 고전압 펄스가 된다. 트랜스포머의 인덕턴스 성분과 출력단에 달려있는 커패시턴스 성분과의 차단 주파수만을 통과시키게 되고 고전압 전극에서 여러 고조파 성분들을 직렬로 합하면 고전압 펄스를 얻게 된다.

그림 1. 고전압 펄스 발생 회로 구조
Fig. 1. Circuit of High Voltage Pulse Generator

기본파인 2.5[㎑]와 홀수 고조파 성분들인 7.5[㎑], 12 .5[㎑], 17.5[㎑], 22 .5[㎑], 27.5[㎑]들을 분리하여 각 성분들에 대한 트랜스포머의 대역 통과 필터 특성을 갖도록 하여 고전압 펄스 발생 장치를 그림 2와 같이 구성한다. 입력측인 저전압 펄스는 병렬로 트랜스포머에 연결되고 출력측인 고전압 펄스는 직렬로 연결된다.

대역 통과 필터 역할을 하는 트랜스포머에서 1차 측의 커패시터 값과 트랜스포머의 2차측 권선수에 따른 인덕턴스 값에 의한 서로 다른 차단 주파수를 갖게 된다. 차단 주파수에 관한 식 $1/2\pi\sqrt{LC}$로 구할 수 있다.

각 트랜스포머의 주파수 성분의 크기와 위상의 합으로 출력전압을 만든다. 각 트랜스포머에서 전압 벡터를 계산할 경우 서로의 합 즉, 평행사변형 꼴의 계산으로 하였다. 고전압 펄스의 고조파 성분들도 저전압 펄스와 같은 크기의 비로 조절할 수가 있다.

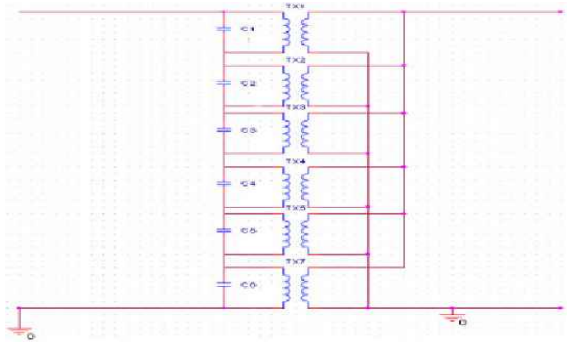

그림 2. 고전압 펄스 발생 장치 구조도
Fig. 2. Diagram of High Voltage Pulse Generator

2.2 고전압 펄스 발생 회로 시뮬레이션

고전압 펄스 발생기의 고압 펄스를 발생하기 위한 회로도는 아래 그림 3으로 주어지며 출력의 파워는 1[mW] 이하로 가정하여 출력 저항을 100[kΩ]으로 하였고 저전압 펄스의 피크값을 16[V]로 하였다.

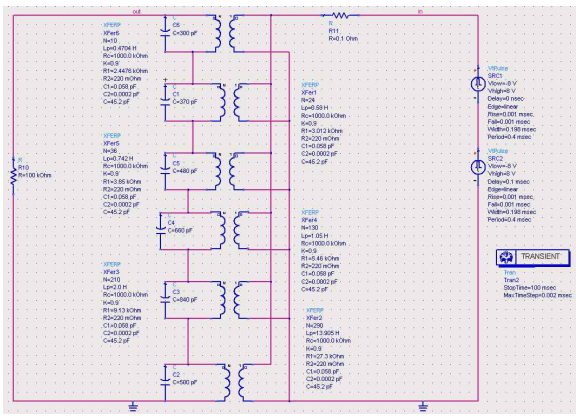

그림 3. 고전압 펄스의 시뮬레이션 회로도
Fig. 3. Simulation Circuit of High Voltage Pulses

PWM에 의한 저전압 펄스는 2.5[㎑], -16[V]와 16[V]를 Peak로 하며 펄스폭을 25[%]로 만들었다. 저전압 펄스는 기본파와 홀수 고조파 성분들로 구성되어 있으며, 각 고조파 성분들에 해당되는 크기와 위상들이 그림 4에서 보여진다.

6개의 고조파 트랜스포머에 대한 각 주파수별 출력의 크기와 위상을 시뮬레이션으로 계산한 결과는 표 1에서 주어진다. 기본파 2.5[kHz]의 성분은 트랜스포머

1에서 가장 큰 고전압이 발생되고, 다른 트랜스포머들에서는 작은 전압들이 발생되어 기본파 성분은 이것들의 합이 된다. 3 고조파 성분의 출력은 트랜스포머 2에서의 최대 출력이 되고 다른 트랜스포머들의 성분들을 합하면, 3 고조파 성분이 된다. 따라서 고전압 출력 펄스는 기본파와 고조파 성분들의 합으로 구해진다.

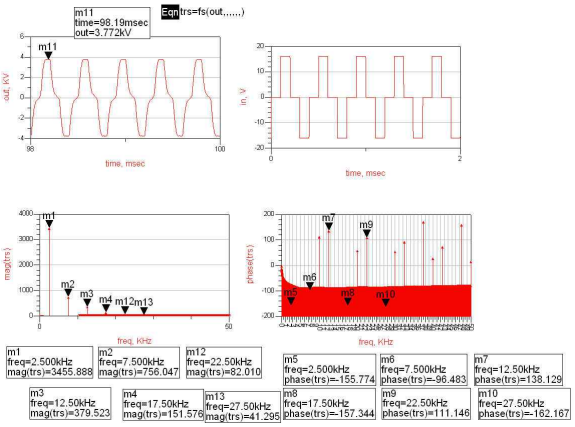

그림 4. 저전압 펄스 고조파 성분
Fig. 4. Harmonics of Low Voltage Pulse

표 1. 주파수 성분별 크기와 위상
Table 1. Magnitude and Phase per Frequencies

	2.5[kHz]		7.5[kHz]		12.5[kHz]	
	크기	위상	크기	위상	크기	위상
1	2150.51	98.85	258.70	85.84	48.98	-26.95
2	1206.84	129.11	606.81	165.14	157.33	10.71
3	734.97	134.31	433.49	-143.44	366.16	58.34
4	208.22	124.14	107.70	-129.17	99.76	120.33
5	137.72	124.26	66.82	-125.73	51.17	131.57
6	57.08	124.08	26.88	-123.95	18.80	136.03
합계	4327.56	115.04	1038.06	-179.75	541.93	57.32

	17.5[kHz]		22.5[kHz]		27.5[kHz]	
	크기	위상	크기	위상	크기	위상
1	14.13	53.24	5.89	-36.16	3.01	59.24
2	44.37	78.84	18.19	-15.30	9.23	77.94
3	95.73	88.33	33.44	-13.08	15.66	78.34
4	132.34	146.48	31.35	-14.89	11.16	72.71
5	49.80	-153.05	82.13	60.38	21.00	79.54
6	14.62	-140.05	17.60	123.83	33.43	163.78
합계	240.99	127.32	131.55	28.18	70.04	105.17

2.3 고전압 펄스 발생 회로 실험 측정

고전압 펄스 발생 회로를 실험 장치는 아래 그림 5와 같다.

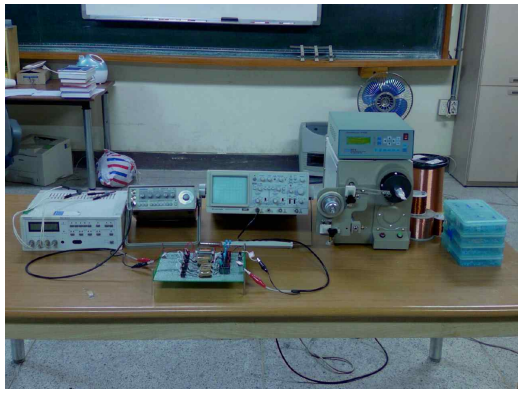

그림 5. 실험 장치
Fig. 5. Experimental Equipment

트랜스포머 장치는 기본파와 각 고조파 주파수 대역별로 6개가 제작 되었으며, 그 구조도는 아래 그림 6과 같다.

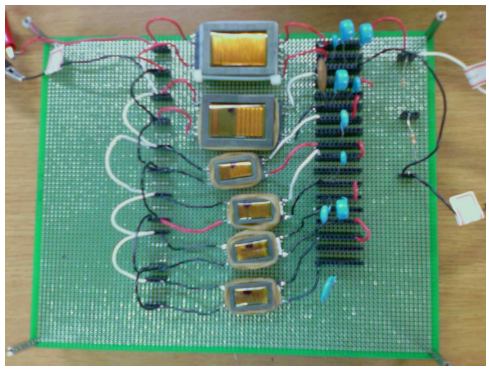

그림 6. 고전압 펄스 발생 장치
Fig. 6. Device of High Voltage Pulse Generator

실험한 트랜스포머의 특성값과 공진 회로의 커패시턴스의 값은 아래 표 2와 같다.

시뮬레이션 결과와 실험에서 설계된 트랜스포머의 특성은 차이가 많은데, 이는 이상적인 트랜스포머와 실제 제작된 트랜스포머의 특성 차이로 인하여 발생된다. 제작된 트랜스포머는 코일의 선경에 따라 저항

값, 인덕턴스 값들이 달라지며 기생 정전용량이 존재한다. 트랜스포머의 1차측 권선수는 5로 결정하였는데 1차측 권선수를 늘리면 밴드대역통과 특성이 사라지게 된다.

표 2. 기본파와 고조파의 트랜스포머 특성 및 정전용량
Table 2. Transformer Characteristics of Harmonics

	Transformer	1차		
		turns	R	L
①	2.5[kHz]	5	130[mΩ]	150[uH]
②	7.5[kHz]	5	130[mΩ]	150[uH]
③	12.5[kHz]	5	130[mΩ]	150[uH]
④	17.5[kHz]	5	130[mΩ]	150[uH]
⑤	22.5[kHz]	5	130[mΩ]	150[uH]
⑥	27.5[kHz]	5	130[mΩ]	150[uH]

	Transformer	2차			
		turns	R	L	C
①	2.5[kHz]	1800	0.4[kΩ]	12[H]	16[pF]
②	7.5[kHz]	930	0.28[kΩ]	4[H]	1.4[nF]
③	12.5[kHz]	760	0.25[kΩ]	2.17[H]	5.1[nF]
④	17.5[kHz]	530	0.23[kΩ]	1.53[H]	2.6[nF]
⑤	22.5[kHz]	230	0.18[kΩ]	1[H]	4.8[nF]
⑥	27.5[kHz]	150	0.15[kΩ]	0.4[H]	11[nF]

각 주파수별 전압측정 값은 표 3에서 주어진다. 고전압 출력전압의 절연 문제로 입력전압은 Peak-to-Peak 8[V]로 감소 시켰다. 목표전압은 입력전압 공급 시 출력되는 전압을 시뮬레이션으로 구한 것이다. 각 주파수별 트랜스포머 전압들을 각각 측정했을 경우와 직렬연결 후 측정했을 때의 출력전압이 다르게 측정되었는데, 이것은 각 주파수별 트랜스포머가 대역통과특성의 기능을 가지고 있지만 인접 고조파 주파수 성분들도 일부 통과시키므로 출력전압이 다소 감소되었다. 이는 위상이 다르기 때문에 성분들이 상쇄를 일으키는 것으로 생각된다. 또한 직렬 연결하였을 때 각각의 트랜스포머의 주파수 특성이 변하므로 전압값이 감소하는 것을 알 수 있다. 트랜스포머들의 인덕턴스, 커패시턴스 성분들이 직렬 연결되어 전체의 값이 달라지므로 나타나는 주파수 특성의 변화라고 생각되어진다.

표 3. 기본파와 고조파 성분 별 트랜스포머 전압측정
Table 3. Transformer Voltage Measurement

	2.5[kHz]	7.5[kHz]	12.5[kHz]
주파수별 입력전압	5.2[V]	1.73[V]	1.04[V]
목표전압	800[V]	266[V]	160[V]
각각의 트랜스포머 독립측정	800[V]	400[V]	360[V]
연결 후 측정	800[V]	220[V]	80[V]
연결 후 최대값(주파수)	800[V]	290[V] (6.8[kHz])	140[V] (10.4[kHz])

	17.5[kHz]	22.5[kHz]	27.5[kHz]
주파수별 입력전압	0.726[V]	0.564[V]	0.416[V]
목표전압	114[V]	89[V]	72[V]
각각의 트랜스포머 독립측정	240[V]	170[V]	160[V]
연결 후 측정	40[V]	50[V]	60[V]
연결 후 최대값 (주파수)	80[V] (15.5[kHz])	100[V] (19.6[kHz])	160[V] (24[kHz])

아래 그림 7, 8에서는 펄스 트랜스포머의 출력전압 파형을 보여주며, Peak-to-Peak 1.4[kV] 출력을 나타낸다. Samhwa Electronics의 고주파용 EE Core를 사용하였다. 그림 8에서 펄스폭을 25[%]로 했을 경우에 파형이 일그러지는 현상은 트랜스포머의 인덕턴스와 외부 커패시턴스에 의한 방전의 문제인 것으로 사료된다.

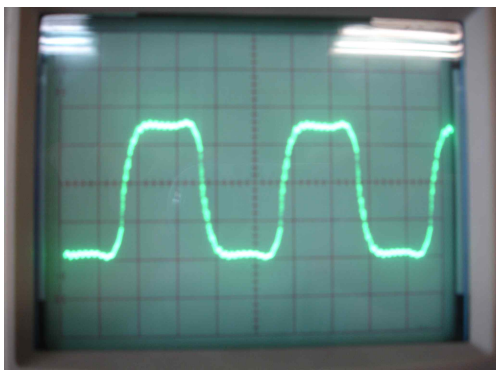

그림 7. 고전압 펄스 출력 파형(P-P 1.4[kV] 펄스폭 : 50[%])
Fig. 7. Output Voltage of High Voltage Pulse

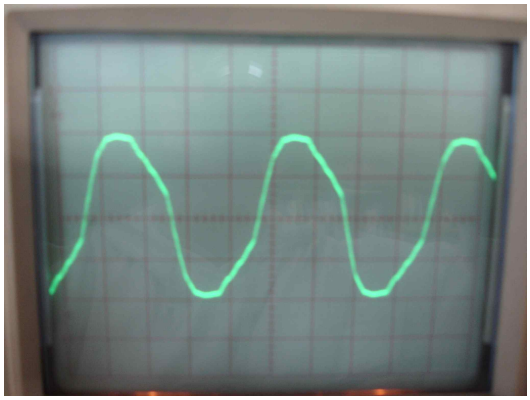

그림 8 고전압 펄스 출력 파형(P-P 1.4[kV] 펄스폭 : 25[%])
Fig. 8. Output Voltage of High Voltage Pulse

3. 결 론

본 논문에서는 펄스의 기본파와 고조파 성분들을 각각 트랜스포머들로 승압시켜 이를 합하여 고전압 펄스 발생장치를 설계, 측정하였다. 특히 고조파 성분 별로 제작된 트랜스포머는 대역통과 특성을 나타내었다. 그러나 직렬연결로 통합 시 그 특성이 간섭현상에 의하여 변화하여 시뮬레이션 결과와 차이를 보였다. 고전압 펄스 발생 장치의 출력은 2.5[kHz], Peak-to-Peak 1.4[kV] 고전압 펄스의 파형을 관찰할 수 있었다.

향후, 고조파 성분들의 트랜스포머에 직렬연결시 간섭현상들을 상세히 분석하여 설계한다면, 진공관이나 전력반도체등의 스위칭 소자를 사용하지 않고도 고전압 펄스를 발생시킬수 있다.

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 Qniescent 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 implatation," 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.

◇ 저자소개 ◇

김영주 (金榮柱)
1957년 3월 12일생. 1980년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1985년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 Polytechnic University 졸업(박사). 1993~1996년 Polytechnic Univ. Research Fellow. 현재 홍익대학교 과학기술대 전자전기공학과 부교수 재직중.