

200kV급 동축형 Marx 펄스발생장치 제작 및 동작특성

이상욱\*, 이채민\*\*, 구자윤\*, 장용무\*\*\*  
 한양대 SMDT연구소\*, 이엠디\*\*, 한양대 퓨전전기응용연구센터\*\*\*

Fabrication of 200kV Coaxial Type Marx Generator and its Performances

Sang-Woog Lee\*, Chae-Min Lee\*\*, Ja-Yoon Koo\*, Yong-Moo Chang\*\*\*  
 Hanyang University SMDT laboratory\*, EMD\*\*, Hanyang University EFT center\*\*\*

**Abstract** - Pulsed power technologies in variable fields require the pulsed high power sources. We fabricated the pulsed power generator, named EMD Pulse Generator(EPG), by using Marx circuit with 200 kV high, 50 ns fast rise time. In this paper, we described about the performances.

**Key words** : marx generator, pulse power, fast rise time, high voltage

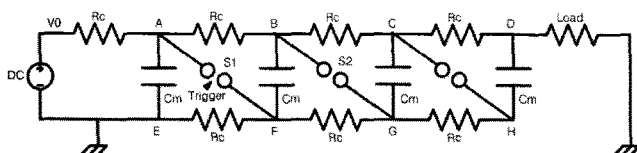
1. 서 론

펄스파워기술은 저장된 에너지를 아주 짧은 시간 동안에 방출하여 파워(power)를 극대화 시키는 기술로서 고온 고밀도 플라즈마의 발생을 이용한 핵융합과 고 출력의 펄스 레이저, 하전입자빔 가속, 전자력 가속, 고 출력 전자파 발생 등의 산업 및 군사적 응용과 날로 정교해지는 전력시스템에서 절연확보가 필요한 케이블 주변기기의 시험용 장치 및 기타 특수한 목적에 의해 급격히 발전하고 있는 분야이다.[1-2] 이러한 응용분야에는 고전압 펄스발생원(source)이 반드시 필요하다. 우리는 커패시터(capacitor)를 이용하여 에너지를 저장하고 스위칭 동작으로 펄스 출력을 비교적 간단히 얻을 수 있다. 그러나 일반적으로 대전력 충전기용 변압기의 전압이 100 [kV] 이하로 제한되므로 커패시터 충전전압을 100 [kV]이상 올리는 것은 쉽지 않다. 따라서 보다 큰 전압 출력을 얻기 위해 1923년 Erwin Marx에 의해 알려진 Marx 회로를 이용한 펄스발생기를 사용할 수 있다.[3]

본 논문은 최대 출력전압 200 [kV], 상승시간 50 [ns] 사양으로 설계·제작한 동축형 Marx 펄스발생장치(model명: EPG)의 표류용량에 대한 영향 및 출력특성을 확인하고 최적 운전조건을 구하기 위한 결과에 대하여 연구하였다.

2. 관련 이론

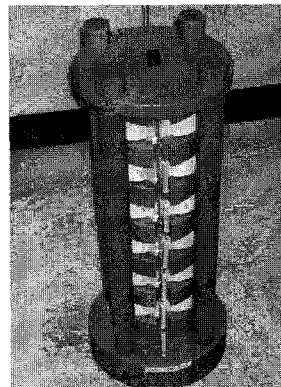
<그림1>은 기본적인 Marx 고전압발생장치의 개략도이다. Marx 장치는 그림의  $C_m$  커패시터를 충전하여 순간적으로 충전 에너지를 방출하여 높은 점두 출력을 얻을 수 있는 고전압 펄스 발생기이다. 동작원리는 a)회로의 모든  $C_m$  커패시터를 충전용 저항( $R_c$ )를 통해 병렬로  $V_0$ [V] 전압으로 충전시킨 후, b)스파크 갭 스위치(spark gap switch)  $S_1$ 에 펄스 트리거 신호(trigger signal)를 인가하여  $S_1$ 을 도통시키면 B점의 전위가  $2V_0$  [V]로 상승하여 갭 스위치  $S_2$ 가 절연 파괴되어 동작함으로써 C점의 전위가  $3V_0$ 로 된다. 이러한 동작원리로 인하여 Marx 회로의 모든 스파크 갭 스위치는 동시에 도통됨으로 인하여 병렬로 충전되었던 모든  $C_m$  커패시터는 전기회로적으로 직렬연결상태가 되어 고전압 펄스 출력이 부하(Load)에 인가된다. 즉, 각 단(stage)의  $C_m$  커패시터는 충전은 병렬로 방전은 직렬로 이루어지도록 전기적인 회로가 형성된다.



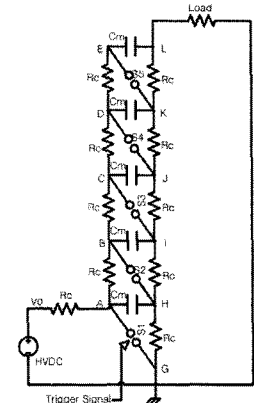
<그림 1> Marx 고전압발생회로 개략도

2. 동축형 Marx 펄스발생장치(EPG) 제작

<그림2>는 조립된 EPG의 실제사진과 개략도를 보여준다. 각각의 단은 원형 세라믹 커패시터( $C=2nF$ ,  $WV=35kV$ ) 3개가 원형 알루미늄 평판(두께 5mm, 직경 76mm)에 의해 병렬 배치되어 있으며 중앙에는 스파크갭 전극(직경 20mm, 길이 각각 10, 12mm)이 부착되어 있다. 각 단은 엔지니어링 플라스틱 스페이서(spacer: 두께35mm, 외경 112mm)로 갭스위치의 간격유지 및 절연시키며 스페이서 중앙을 내경 60mm로 관통시켜 간격 조절이 가능한 스파크 갭 스위치를 설치하였다. 충전용 저항( $R_c$ )는 각각의 원형 알루미늄판을 통해 두 단(stage)사이에 연결된다. DC 충전장치, 트리거 발생장치 및 집지 등은 하부 플랜지커버에 내장된 커넥터를 통해 각각 케이블로 연결된다. 펄스 출력은 상부 플랜지커버의 중앙에 있는 출력단자를 통하여 발생된다. 또한, 200 [kV] 출력으로 설계된 EPG 회로의 절연확보를 위하여 원통 하우징으로 밀폐시켜 절연가스를 충전시킬 수 있도록 하였다. 부하(load)는 인덕턴스 성분이 적은 액체저항(liquid resistor)을 이용하였다.



(a)



(b)

$C_m$  : Energy Storage Capacitors of EPG  
 $R_c$  : Charging Resistors of EPG  
 HVDC : High Voltage DC Power Supply  
 $S_1 \sim S_6$  : Spark Gap Switches  
 Load : Discharging Load of EPG  
 Trigger signal : the signal from triggering pulse generator

<그림 2> EPG의 (a)실제 사진과 (b)전체 시스템 개략도

제작된 동축형 Marx 펄스발생장치의 구성과 제원은 다음과 같다.

Configuration

- Charging Part
  - Variable DC Power Supply, 0 to 35 kV
  - Charging Cable for high voltage
- Triggering Part
  - Trigratron Electrode
  - Trigger Pulse Generator
- Main body for energy storage and generating HV
  - 6 stages of the capacitor bank for storage of the electrical energy
  - Insulating spacers
  - Spark gaps for fast switching
  - Resistors for charging HV to the capacitor banks
- Load

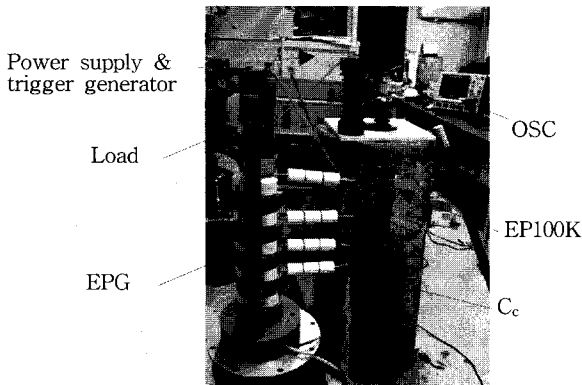
- Water resistor

**Specification**

- Charging Voltage : 0 to 35 kV
- Nominal Storage Capacitance : 1 nF
  - 6 nF/each stage
- Pulse Repetition Rate : Single Shot
- Pulse Forming Network :
  - Height : 558 mm
  - Diameter : 160 mm
- Nominal Output Voltage : 200 kV
- Nominal Rise Time : < 50 ns

**3. 실험**

EPG의 출력 펄스 전압 측정에 상용 고전압 프로브 EP100K(120 kV<sub>p</sub>, 일본 PEEC), 오실로스코프(LeCroy waveRunner 104Xi, 1GHz, 10G/s)를 사용하였다. 이번 연구에서는 EP100K 고전압 프로브의 측정가능 전압의 한계로 인하여 EPG 단(stage)을 5단 까지만 조립하여 최대 출력전압을 100 [kV<sub>p</sub>] 정도로 발생되도록 하였다. 스파크갭 스위치 커패시턴스(C<sub>g</sub>)와 표류용량(stray capacitance, C<sub>s</sub>)를 감안하여 EPG의 동작특성의 최적화를 위하여 보상 커패시터(C<sub>c</sub>)를 사용하였다. <그림3>은 EMP의 실험 전경으로 부하는 인덕턴스 성분이 적고 손쉽게 제작이 가능한 액체 저항(liquid resistor)[4]을 사용하였다.



<그림 3> EPG 실험 셋업

**4. 실험 결과 및 검토**

일반적으로 스파크 갭스위치를 적용한 Marx 고전압발생장치에서는 동작할 때 용량성 전압 분배관계에 있는 C<sub>g</sub>와 C<sub>s</sub> 커패시턴스 비가 특성에 중요한 역할을 한다. 즉 C<sub>g</sub> << C<sub>s</sub>의 조건이 만족되어야 최적화된 동작이 가능하다.[3, 5] 본 연구팀에서 내부적으로 수행한 시뮬레이션(CST EMS) 결과에 따르면 EPG의 C<sub>g</sub>는 약 3.9 [pF], C<sub>s</sub>는 약 1.3 [pF]로 계산되어 C<sub>s</sub>를 보상하기 위하여 보조 커패시터(C<sub>c</sub>, 약 190 [pF])를 적용하였다. 우선 EPG의 최적 동작조건을 찾기 위하여 C<sub>c</sub>의 위치에 따른 출력특성을 확인하여 <표1>에 결과를 나타내었다.

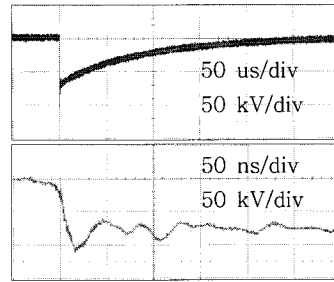
<표 1> C<sub>c</sub>의 위치와 EPG의 동작 특성(충전전압 16 [kV], 부하 3.1 [kΩ])

Position* (node)	max voltage[kV]	overshoot [%]	rise time[ns]
H	-	-	-
B	-98	22.5	7.5
B-H	-100	25	7
B-I	-96	20	7
B-C	-108	35	6
B-C-D	-90	12.5	7.5
B-C-D-E	-82	2.5	10.5
B-C-D-L	-81	1.25	15

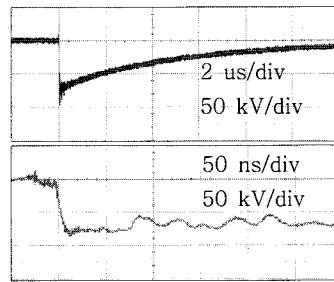
\* 그림2(b) 개략도의 node

<표1>의 결과는 또한 앞으로 새롭게 제작될 EPG나 기타 Marx 발생장치 등의 설계에 중요한 참고 자료로 활용될 것이다. 부하에 따른 출력을 비교하기 위해 오버슈트(overshoot)가 적고 상승시간이 비교적 빠른 B-C-D에 C<sub>c</sub>를 설치하여 실험을 하

였다. 부하를 3.1 [kΩ]인 수저항(water resistor)을 사용한 경우와 과 무부하인 두 경우에 대한 실험 결과를 <그림4>에 나타내었다.



(a) 무부하



(b) 3.1 [kΩ] 수저항

<그림 4>부하저항에 따른 출력변화, 충전전압 16 [kV]

무부하의 경우 펄스 상승시간 > 10 [ns], 피크값 110 [kV], 펄스폭 약 250 [μs]이며 수저항(3.1 [kΩ])의 경우 펄스 상승시간 < 10 [ns], 피크값 100 [kV], 펄스폭 약 15 [μs]를 가진다. <그림4>의 결과에서 볼 수 있듯이 펄스 상승시간은 물론이거니와 크기 면에서도 오버슈트 부분을 배제하더라도 매우 만족스러운 펄스 출력 결과를 보여준다.

이후에도 EPG의 보다 다양한 특성을 파악하기 위해 특성실험이 계속 진행 중이다. 특히 200 [kV] 50 [ns]의 목표치를 달성하기 위해 고전압프로브 제작 등의 실험 기자재 확충, 보다 다양한 부하저항값과 갭전극의 간격, 충전저항값, C<sub>c</sub>값, 트리거 펄스의 극성, 절연가스의 영향 등등 다양한 변수에 대한 특성 자료를 얻기 위한 연구가 진행 중에 있다.

**5. 결 론**

Marx 고전압발생회로를 이용하여 200 [kV], 50 [ns]급의 고전압 펄스발생장치인 EPG를 설계 제작하여 특성을 알아보았다. 시뮬레이션 결과에 따른 표류용량 보상을 위하여 190 [pF]의 보상 커패시터 C<sub>c</sub>를 적용하여 한 결과, 16[kV], 5단으로 충전하여 상승시간 10 [ns]이하, 100 [kV<sub>p</sub>]의 펄스전압을 얻을 수 있었다.

이러한 연구 결과에 따라 본 연구의 설계 사양인 6단 200 [kV], 50 [ns] 출력 펄스 발생용 EPG 성능 확인이 충분히 가능할 것으로 사료된다.

**[참 고 문 헌]**

- [1] Ihor Vitkovitsky, "High Power Switching", Van Nostrand Reinhold Co., p.vii, 1987.
- [2] 진윤식, 이홍식, 김중수, 김진성, "커패시터를 이용한 대출력 펄스과워 시스템", 전력전자학회지, v.9 no.1, pp.32, 2004
- [3] Hansjoachim Bluhm, "Pulsed Power Systems : Principles and Applications", p.63-73, 2006
- [4] A.I. Gerasimov, "Liquid Resistors in Accelerators of Pulse Electron Beams", Problems of Atomic Science and Technology, No 2, Nuclear Physics Investigations (46), p.61-63, 2006
- [5] S T Pai, Qi Zhang, "Advanced Series in Electrical and Computer Engineering, Vol.10: Introduction to High Power Pulse Technology", p13, 1995