

## 전도성 E1 펄스에 대한 ZnO 바리스터의 동작특성 분석

방정주, 허창수 

인하대학교 전기공학과

### Response Characteristic Analysis of ZnO Varistors by the Conductive E1 Pulse

Jeong-Ju Bang and Chang-Su Huh

Department of Electrical Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea

(Received February 28, 2019; Revised March 22, 2019; Accepted March 27, 2019)

**Abstract:** This work presents the response characteristics of a ZnO varistor to conductive EMP. An E1 pulse, standardized to MIL-STD-188-125-1, was applied to the varistors wherein the residual current and response times were measured with the applied E1 pulse current. Additionally, the response time was measured according to the length of the connection path. Consequently, the amplitude of the residual voltage through the ZnO varistors was increased with increasing amplitude of the applied E1 pulse current. As the length of the connection path increased, the operating response time and residual peak voltage also increased. These results indicate that the response characteristics of ZnO varistors can be applied to basic data to support the use of varistors as a protective measure against conductive EMP.

**Keywords:** E1 pulse, HEMP, Varistor, EMP, ZnO varistor

### 1. 서론

현대사회는 반도체소자 기술과 정보통신기술의 발전으로 전자기기에 대한 의존도가 증가하고 있다. 이에 따라 산업분야와 사회기반시설들은 전자기기를 기반으로 하는 시스템으로 변화하고 있으며, 전자기기는 고성능, 소형화, 저전력 등의 특징을 갖게 되었다. 그러나 이러한 전자기기는 고출력 전자기펄스에 매우 취약한 환경에 처하게 되었다 [1].

고고도 핵폭발에 의해 발생하는 고출력 전자기펄스(HEMP)는 지상의 광범위한 지역에 영향을 주며 복사와 전도를 통해 전자기기의 오동작과 손상을 발생시킨다. 주요 군사시설과 사회기반시설들이 고출력 전자기

펄스에 노출될 경우 시설을 구성하는 전자기기에 오동작과 손상이 발생할 경우 막대한 피해가 발생할 수 있으며, 이에 따라 주요 군사시설 및 사회기반시설의 고출력 전자기펄스의 복사와 전도에 대한 보호가 필요하다 [2,3].

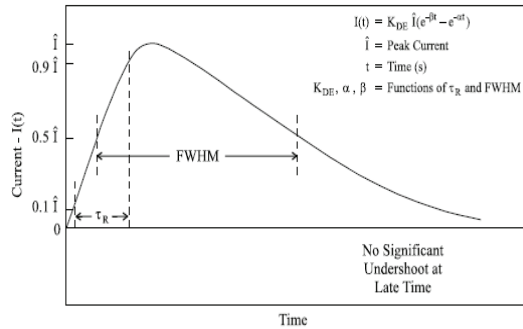
고출력 전자기펄스의 복사성 영향에 대한 보호방안으로는 차폐가 있으며, 전도성 영향에 대한 보호방안으로는 가스방전관(GDT), 어레스터와 같은 절연 파괴 전압 장치와 금속산화물 바리스터(MOV) 등과 같은 전압 제한 장치, 필터 및 보호회로와 같은 대역폭 제한 장치, 광링크 및 광결합기 등과 같은 분리장치, 동축 홀더 및 스테르브 라인, 공진기와 같은 동축형 RF 회로 보호기 등이 있다 [4]. 산화아연(zinc oxide, ZnO) 바리스터는 기존의 과도전압에 대한 보호소자로 양방향성, 큰 에너지 내량, 빠른 동작속도, 우수한 전압-전류 비선형 저항특성 등의 장점이 있어 가장 널리 사용되고 있다 [5].

현재 HEMP 보호 시설의 성능평가에 일반적으로 적용하고 있는 Mil-Std-188-125-1에서는 전도성 HEMP를 표 1과 같이 초기(early-time) HEMP 신호(E1)와 중

✉ Chang-Su Huh; [csuh@inha.ac.kr](mailto:csuh@inha.ac.kr)

**Table 1.** Definition of conducted HEMP waveform in Mil-Std-188-125-1.

Classification	E1	E2	E3
Rise time	≤ 20 ns	≤ 1 μs	≤ 0.2 s
FWHM	500~550 ns	3~5 ms	20~25 s
Amplitude	2,500 A	250 A	1,000 A



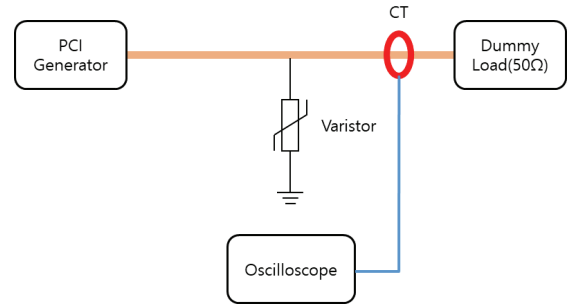
**Fig. 1.** Current waveform of E1 pulse.

기(intermediate-time) HEMP 신호(E2), 말기(late-time) HEMP 신호(E3)로 분류하고 있으며, 파형은 그림 1과 같이 이중 지수 함수의 임펄스 파형이다 [6]. 전도성 E1 펄스파형은 펄스의 상승시간이 20 ns 이하이고 펄스폭이 500~550 ns로 펄스의 상승시간이 빠르기 때문에 전도성 HEMP의 보호방안으로 바리스터를 적용하기 위해서는 전도성 E1 펄스에 대한 바리스터의 동작특성 파악이 필요하다. 본 논문에서는 바리스터의 동작전압과 선로에 접속하는 경로의 길이 변화가 바리스터의 동작특성에 미치는 영향을 분석하였다.

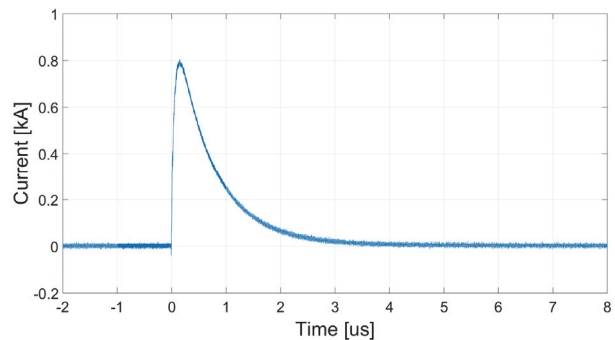
## 2. 실험 방법

전도성 E1 펄스에 대한 바리스터의 동작특성 분석을 위해 그림 2와 같이 실험구성을 하였다. E1 펄스 발생장치와 50 Ω 부하 사이에 케이블을 사용하여 선로를 구성하였고, 케이블의 중간에 바리스터를 접속하고 접지와 연결하였다. 펄스 인가 시 바리스터를 통과하여 부하 방향으로 흐르는 잔류전류를 측정하기 위해 바리스터와 부하 사이에 전류프로브를 설치하여 오실로스코프로 전류파형을 측정하였다.

시험에 적용한 전도성 E1 펄스발생장치는 MIL-STD-188-125-1에 규정되어 있는 10/500 ns의 펄스를 발생시키며 파형은 그림 3과 같다.



**Fig. 2.** Experimental set-up.



**Fig. 3.** The output waveform of PCI generator.

**Table 2.** Specification of varistors.

Classification	Varistor 1	Varistor 2	Varistor 3	Varistor 4
Maximum clamping volt VC at 200 A current (8/20 μs)	595 V	1,110 V	1,700 V	2,420 V
Varistor voltage at 1 mA DC test current	324 V	643.5 V	990 V	1,425 V
Typical capacitance f=1 MHz	1,100 pF	560 pF	380 pF	250 pF
Disc Dia. (mm)	20	20	20	20

시험에 사용된 바리스터는 ZnO 바리스터로 동작전압이 다른 4종류의 바리스터를 사용하였다. 바리스터의 직경은 20 mm로 모두 동일하며, 동작전압이 높아질수록 두께는 증가한다. 바리스터의 동작전압과 제한전압은 표 2에 나타내었다.

바리스터의 동작특성 분석을 위해 200, 400, 600, 800 A의 전도성 E1 펄스를 인가하여 잔류전류를 측정하였고, 바리스터와 선로 사이의 접속경로 길이에 따른 동작응답시간 분석을 위해, 바리스터의 리드선을 케이블에 바로 접속한 경우와 접속선로의 길이가 30 cm와 60 cm인 경우의 동작응답시간을 측정하였다.



Fig. 4. The varistors used in test.

### 3. 결과 및 고찰

전도성 E1 펄스를 바리스터에 인가하여 입력파형과 바리스터를 통과하여 부하 쪽으로 흐르는 잔류전압파형의 예를 그림 5와 6에 나타내었다. ZnO 바리스터는 양단의 전압이 동작개시전압에 도달하기 전에는 입자 사이 계면의 임피던스에 의해 전류가 거의 흐르지 않지만 동작개시전압 이상에서는 작은 전압 변화에도 대단히 큰 전류의 변화가 일어나는 비선형 저항 특성을 가지고 있다. 때문에 그림 5와 같이 동작개시전압 이상의 전압이 인가될 경우 제한전압으로 제한되는 것을 확인할 수 있으며, 잔류전압은 리드선의 인덕턴스 영향으로 동작개시 후 약간 상승하는 파형을 나타내었다. 그러나 단위시간당 전류의 상승폭이 큰 펄스를 인가한 경우의 잔류전압파형은 그림 6과 같이 바리스터 동작 응답시간 전까지의 인가펄스 앞부분이 바리스터를 통과하여 부하 쪽으로 흐르는 현상을 보였다.

400~800 A의 전도성 E1 펄스를 인가한 경우 4종류의 바리스터 모두 그림 7과 유사한 잔류전압 파형을 보였다. 바리스터가 동작하기 전까지 인가펄스의 일부가 부하 쪽으로 통과하고 바리스터가 동작한 이후에는 급격하게 감소하여 제한전압으로 제한되는 현상을 보인다.

각 바리스터의 인가 펄스전류의 크기에 따른 잔류피크 전압의 변화를 그림 8에 나타내었다. 4종류의 바리스터 모두 입력펄스의 크기가 증가할 경우 잔류전압의 피크가 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있으며, 각 바리스터의 동작전압과는 무관하게 모두 유사한 결과를 보였다. 이러한 현상을 분석하기 위해 잔류전압의 동작응답시간을 분석하였다. 동작응답시간은 잔류파형의 시작부터 피크까지의 시간을 측정하였으며, 그림 9와 같이 동작전압이상의 전압에서 4종류의 바리스터 모두 약 6.2 ns로 유사하게 나타났다. 따라서 바리스터의 동작응답시간인 약 6.2 ns 동안의 펄스가 통과하며, 인가 펄스의 크기가 증가할 경우 단위 시간당 전

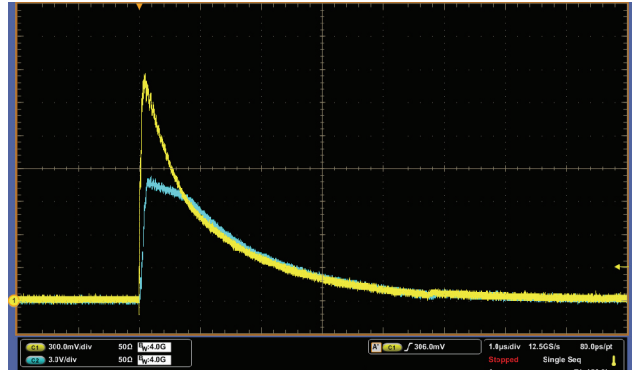


Fig. 5. Waveforms of the input pulse current and residual voltage at 200 A.

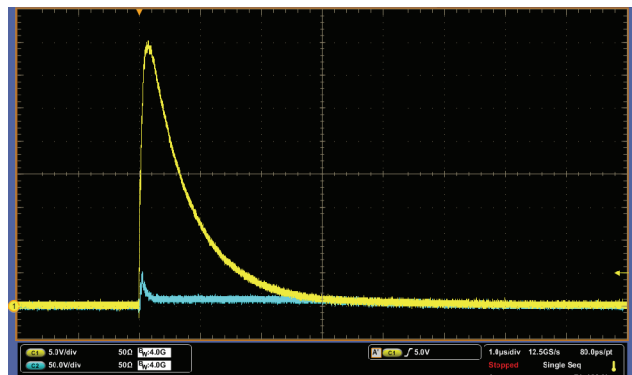


Fig. 6. Waveforms of the input pulse current and residual voltage at 800 A.

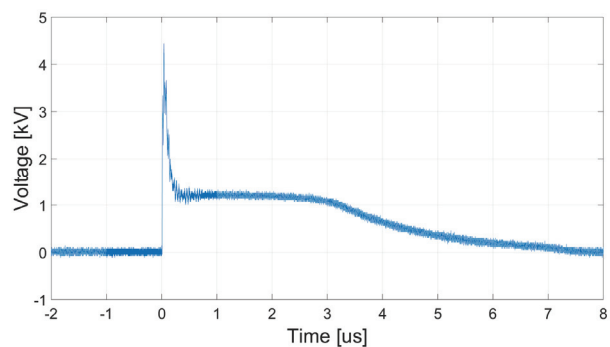


Fig. 7. Typical waveform of residual voltage.

압의 상승률이 크기 때문에 동일한 시간 동안 더 높은 펄스가 통과하여 잔류전압의 크기도 증가한다. 또한 이 결과를 통해 바리스터의 동작전압을 결정하는 바리스터 소자의 두께는 동작응답시간에 큰 영향을 주지 않는 것을 확인할 수 있다.

선로와 바리스터 사이의 접속 도선의 길이에 따른

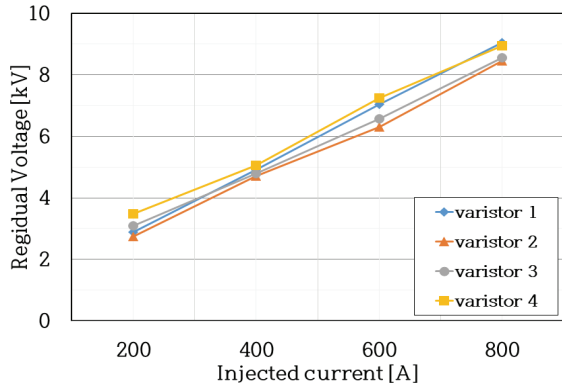


Fig. 8. Changes of residual voltage to injected E1 pulse.

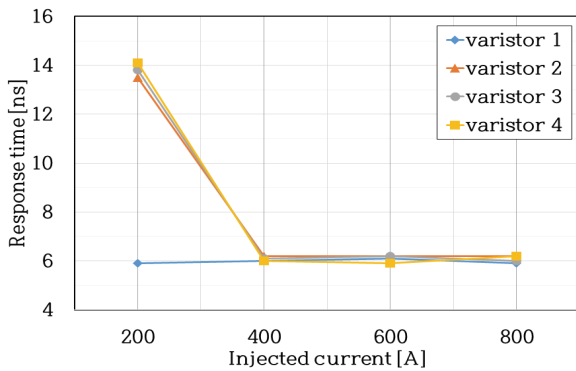


Fig. 9. Changes of response time to injected E1 pulse.

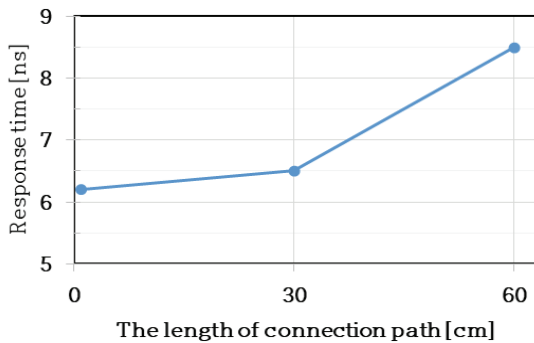


Fig. 10. Changes of response time with length of connection path.

바리스터의 동작특성을 분석하기 위해 바리스터를 케이블에 바로 접속한 경우와 도선의 길이가 30 cm와 60 cm인 경우의 동작응답시간을 측정하였다. 시험 결과 그림 10과 같이 접속 도선의 길이가 길어질수록 동작응답시간이 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

케이블에 바리스터를 바로 접속한 경우에는 동작응답시간이 약 6.2 ns로 나타났으며, 60 cm 길이에서는 동작응답시간이 8.5 ns로 증가하였다.

Table 3. The response time and residual peak voltage with change of connection path length.

Classification	0 cm	30 cm	60 cm
Response time [ns]	6.2	6.5	8.5
Residual peak voltage [kV]	6.31	10.31	11.69

동작응답시간이 증가함에 따라 잔류전압의 피크전압도 증가하였으며 각 길이에 따른 잔류 피크 전압은 표 3에 나타나 있다. 접속도선의 길이가 60 cm인 경우는 바로 접속한 경우의 약 2배로 증가하였다.

바리스터의 동작응답시간은 1 ns 이하로 응답시간이 매우 빠른 소자이지만, 소자를 구성하는 리드선과 바리스터가 선로에 접속되는 도선의 길이와 인덕턴스 영향으로 동작응답시간이 늘어난 것으로 판단되며, 바리스터의 설치환경에 따라 선로와 바리스터 사이의 접속경로가 긴 경우에는 바리스터의 동작응답시간이 늘어나기 때문에 전도성 E1 펄스와 같이 상승시간이 수 ns인 과도전류가 흐를 경우 바리스터의 동작이 지연되는 시간 동안의 펄스가 통과할 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 전도성 E1 펄스에 의한 바리스터의 응답특성을 분석하기 위하여, Mil-Std-188-125-1에 규정되어 있는 전도성 E1 펄스를 바리스터에 인가하여 동작특성을 분석하였다.

바리스터에 전도성 E1 펄스를 인가하였을 때 잔류전압파형은 바리스터가 동작하기 전까지 인가펄스의 일부가 부하 쪽으로 통과하고 바리스터가 동작한 이후에는 급격하게 감소하여 제한전압으로 제한되는 현상을 보였다. 인가펄스의 크기가 증가할수록 잔류전압의 피크는 선형적으로 증가하였으며, 그 이유는 바리스터의 동작응답시간이 약 6.2 ns로 동작시간 전까지의 펄스가 통과하기 때문으로 나타났다.

바리스터와 선로를 연결하는 접속경로의 길이에 따른 바리스터의 동작응답시간은 접속경로의 길이가 증가할수록 선로 인덕턴스의 영향으로 동작응답시간이 증가하였으며, 동작응답시간이 증가할 경우 증가한 시간동안의 펄스가 바리스터를 통과하기 때문에 잔류전압도 증가하였다. 선로와 바리스터의 접속경로가 긴 경우에는 전도성 E1 펄스와 같이 고전류에 빠른 상승시간을 갖는 과도전류가 흐를 때 바리스터의 동작이 지연되는 시간 동안의 펄스가 바리스터를 통과하여 기기

에 영향을 줄 수 있을 것으로 보이며, 따라서 수 ns의 상승 시간을 갖는 전도성 E1 펄스에 대한 보호방안으로 바리스터를 적용 시 선로와 바리스터의 접속경로를 최대한 짧게 구성하여 동작응답시간을 최소화해야 할 것으로 판단된다.

#### ORCID

Chang-Su Huh

<https://orcid.org/0000-0002-4566-3823>

#### REFERENCES

- [1] S. Y. Hyun, J. K. Du, W. Kim, and J. G. Yook, *J. Korean Inst. Electromagn. Eng. Sci.*, **25**, 757 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.5515/kjkiees.2014.25.7.757>]
- [2] W. A. Radasky, C. E. Baum, and M. W. Wik, *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, **46**, 314 (2004). [DOI: <https://doi.org/10.1109/temc.2004.831899>]
- [3] S. B. Smith and R. B. Standler, *IEEE Trans. Power Del.*, **7**, 1275 (1992). [DOI: <https://doi.org/10.1109/61.141841>]
- [4] T. H. Jang, *J. Korean Inst. Electromagn. Eng. Sci.*, **24**, 772 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.5515/kjkiees.2013.24.8.772>]
- [5] J. H. Lee, J. S. Han, G. S. Kil, J. W. Kwon, D. Y. Song, and N. S. Choi, *J. Korea Inst. Inf. Commun. Eng.*, **4**, 793 (2014).
- [6] Mil-Std-188-125-1, "High-Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) protection for ground-based c4i facilities performing critical, time-urgent missions, Part I - fixed facilities", 2005.