

# 커플링/디커플링 네트워크 내장 서지발생장치의 설계 및 제작

김남훈, 강태호, 신한신, 길경석 

한국해양대학교 전기전자공학과

## Design and Fabrication of a Surge Generator with Coupling/Decoupling Networks

Nam-Hoon Kim, Tae-Ho Kang, Han-Sin Shin, and Gyung-Suk Kil

Department of Electrical and Electronics Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan, 49112, Korea

(Received October 15, 2019; Revised October 31, 2019; Accepted November 4, 2019)

**Abstract:** Metal oxide varistors (MOVs) protect circuits and devices from transient overvoltages in electric power systems. However, a MOV continuously deteriorates owing to manufacturing defects or repetitive protective operations from transient overvoltages. A deteriorated MOV may result in a short circuit or a line-ground accident. Previous studies focused on the analysis of deterioration mechanisms and condition diagnosis techniques for MOVs owing to their recent growth of use. An accelerated deterioration experiment under the same conditions in which a MOV operates is essential. In this study, we designed and fabricated a surge generator that can apply a surge current to a MOV connected to AC mains. The coupling network operates at a low impedance against the surge current from the surge generator and transfers the surge current to the MOV under test. It also acts as a high impedance against AC mains for the AC voltage not to be applied to the surge generator. The decoupling network operates at a high impedance against the surge current and blocks the surge current from AC mains. It also acts as a low impedance against AC mains for the AC voltage to be applied to the MOV under test. The prototype surge generator can apply the 8/20  $\mu$ s up to 15 kA on AC voltages in the approximate range of 110~450 V, and it fully operates on a LabVIEW-based program.

**Keywords:** MOV, Surge generator, Surge current, Accelerated deterioration, Coupling decoupling network

### 1. 서론

급속한 산업 발달과 전기에너지 이용에 따른 전기전자기술의 발전으로 반도체 소자를 포함하지 않는 기기 또는 장치를 찾아보기 어렵다. 회로에 집적된 반도체 소자나 약전류 회로의 배선 등은 상용 교류 계통의 배선이나 기기에 비해 낮은 절연레벨을 가지고 있어 과도전압이나 서지로부터 절연이 취약하며, 이에 대한 대책으로 회로에 직렬 또는 병렬로 MOV (metal oxide

varistor)를 설치한다 [1-3]. 그러나 MOV는 제조 시 결함, 사용 환경에서의 기계적·열적 열화(deterioration) 또는 서지에 대한 반복되는 보호동작으로 최종 단락 상태가 되어 회로의 단락 또는 지락으로 폭발이나 전기 화재를 초래한다 [4-6]. 이러한 배경에서 MOV의 열폭주(thermal runaway)와 열화에 대한 실험적 연구가 활발히 진행되어 왔으며, 여기에 MOV의 사용 환경에서와 같이 AC 전원이 인가된 상태에서 가속열화시험이 필수적이다 [6,7].

본 연구에서는 MOV의 가속열화를 위해 IEC 61000-4-5와 IEC 61643-11에 근거하여 표준 뇌서지전류 8/20  $\mu$ s를 MOV에 AC 전원이 인가된 상태에서 최대 15 kA를 연속적으로 인가할 수 있는 서지발생장치를 설계·제작하였다.

✉ Gyung-Suk Kil; [kilgs@kmou.ac.kr](mailto:kilgs@kmou.ac.kr)

Copyright ©2020 KIEEME. All rights reserved.  
 This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서지발생장치의 제어는 LabVIEW 기반 데이터취득 장치(DAQ)에 알고리즘을 설계하여 적용하였으며, 서지 충전용 콘덴서는 HVDC (high voltage DC) 모듈로 충전하였다. 콘덴서의 충전과 방전, CDN (coupling decoupling network)의 제어 등 모든 스위치 개폐동작은 공압 실린더를 적용함으로써 전기적 절연문제를 해결하였다. 또한 MOV가 설치된 AC 전원 인가상태에서 서지전류를 전달하기 위해, 서지와 같은 고주파성분에 낮은 임피던스, AC 전원과 같은 낮은 주파수에는 높은 임피던스를 갖는 커플링 네트워크와 서지에 높은 임피던스, AC 전원에 낮은 임피던스를 갖는 디커플링 네트워크를 결합한 CDN을 설계해 적용하였다. 최종적으로 본 연구는 MOV에 AC 전원이 인가된 상태에서 서지전류를 연속적으로 인가할 수 있는 CDN 내장형 서지발생장치를 개발하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 서지전류 발생 장치

KS C IEC 60060 - 1에서 서지 파형은 지수함수에 따라 상승 및 하강하는 파두장 및 파미장으로 결정한다. 파두장은 전압 또는 전류의 발생부터 규약 원점까지 도달하는 시간이며, 파미장은 규약 원점의 50% 지점까지 감소하는 시간이다. MOV의 열화에 서지전류를 적용하며 그림 1에 8/20  $\mu s$ 의 표준 뇌서지 전류의 파형을 나타내었다 [8,9].

서로 다른 파두장과 파미장을 갖는 서지 파형의 발생을 위해서는 시정수가 2개 이상이어야 하며, 2개 이상의 수동 부품으로 구성하여 2계 선형미분방정식으로 해석할 수 있다.

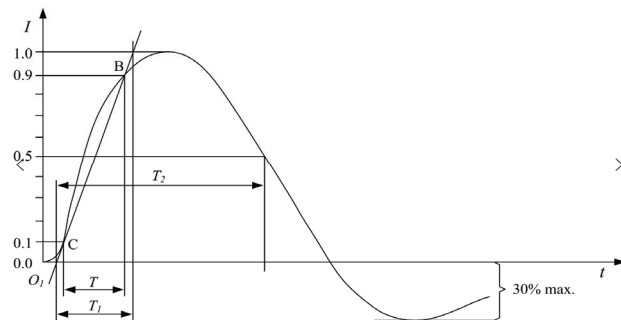


Fig. 1. Waveform of the standard lightning surge current.

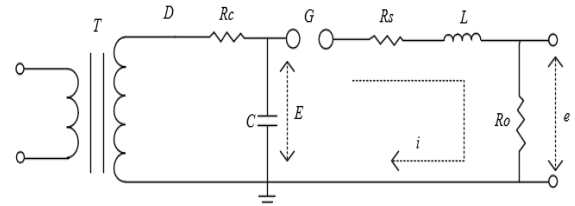


Fig. 2. Basic circuit of surge current generator.

그림 2는 서지발생장치의 등가회로이며, 승압변압기  $T$ , 고압 다이오드  $D$  및 충전저항  $R_c$ 로 콘덴서  $C$ 를 충전한다.  $C$ 의 충전전압을 방전갭  $G$ 를 통해 방전시키면  $R_o$ 에 서지전류가 발생하며, 본 논문에서 콘덴서  $C$ 의 충전은 HVDC모듈로 대체하였다.

콘덴서  $C$ 가  $E$ 로 충전되고, 시각  $t=0$ 에서 방전갭이 트리거 된다고 할 때,  $R, L$  및  $C$ 의 관계에 따라 과진동, 임계진동, 부족진동을 하게 되며, 방전 전극의 저항을 무시하면 다음 식(1)의 회로 방정식이 성립한다.

$$L \frac{di}{dt} + (R_s + R_o)i + \frac{1}{C} \int_0^t i dt = E \quad (1)$$

이며,

$$R > 2\sqrt{\frac{L}{C}} \text{ 일 때, 과제동} \quad (2)$$

$$R = 2\sqrt{\frac{L}{C}} \text{ 일 때, 임계제동} \quad (3)$$

$$R < 2\sqrt{\frac{L}{C}} \text{ 일 때, 부족제동이 발생한다.} \quad (4)$$

본 서지발생회로에서는 표준 뇌서지파형을 만들기 위해 충전용 콘덴서  $C$ 는  $30 \mu F$ , 저항  $R_s$ 는  $0.27 \Omega$  그리고 인덕터  $L$ 은  $2.14 \mu H$ 를 산출하고 PSpice 시뮬레이션 결과로 규정된 파형을 만족하는 것을 확인하였다.

### 2.2 커플링/디커플링 네트워크(CDN)

커플링 네트워크와 디커플링 네트워크는 그림 3에서와 같이 피시험품인 MOV 양단에 설치되어, MOV의 실제 환경에서와 같이 AC 전원이 인가된 상태에서 서지전류 MOV에 전달하기 위해 사용된다.

커플링 네트워크는 MOV 좌측에 설치되어 서지발생장치로부터의 서지전류에 대해 낮은 임피던스( $X_C = \frac{1}{2\pi f C}$ )

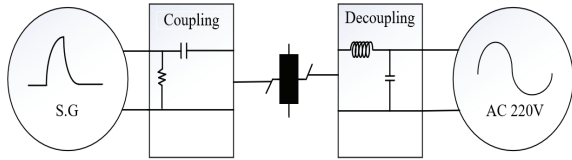


Fig. 3. Block diagram of coupling and decoupling networks.

로 동작시켜 MOV에 전달하고, AC 전원과 같이 낮은 주파수에 대해 높은 임피던스로 작용하여 AC 전원이 서지발생장치로 인가되지 않도록 한다. 이와는 반대로 디커플링 네트워크는 MOV 우측에 설치되어 서지전류에 대해 높은 임피던스( $X_L = 2\pi fL$ )로 동작시켜 AC 전원으로 서지전류가 전달되지 않도록 하고, 동시에 AC 전원에 대해서는 낮은 임피던스로 작용하여 AC 전원이 MOV에 인가되도록 한다 [8-10].

그림 3은 MOV에 대한 커플링, 디커플링 장치를 블록 다이어그램으로 나타낸 것이다. 교류 또는 직류 공급라인에 대한 CDN은 단락회로의 서지전류 파두장이  $8 \mu s \pm 20\%$  파미장이  $20 \mu s \pm 20\%$ 의 허용 오차 요구사항을 만족하도록 설계되어야 한다 [10]. 본 논문의 제안된 서지발생장치는 단락회로에서의 서지전류 발생 회로 및 CDN을 통한 실제 동작 상태에서의 MOV의 열화시험 조건을 충족하도록 하였다.

2.3 설계 및 제작

그림 4는 CDN 내장 서지발생장치의 전체 회로를 나타내었다. 저항 R1, 충전 콘덴서 C1, 인덕터 L1 및 저항 R2로 구성하였으며, 인덕터 L1과 저항 R2로 서지 파형을 조정할 수 있다. 저항 R1은 C1의 잔류전하를 방전시킬 때 접지된다. 콘덴서 C2는 커플링 네트워크에 해당하며, 각 스위치는 전기 절연을 위해 공압 실린더로 구성되어 제어된다.

SW2는 폐로 시 HVDC 모듈로부터 충전 콘덴서 C1을 충전하며, SW1은 방전저항 R1과 함께 접지측과 연결하여 시작 대기상태 또는 시험 종료 후 C1의 잔류전하를 방전시킨다. SW3와 SW4는 폐로 시 방전회로를 구성하며, 발생한 서지전류를 커플링 네트워크로 전달한다.

DAQ 등 제어회로에 전도 또는 방사 모드로 전달되는 EMP (electromagnetic pulse)의 영향을 최소화하기 위해 DAQ 외부는 차폐하였으며, 각 제어선과 신호선에는 아발란치 다이오드와 페라이트 bead를 접속하였다.

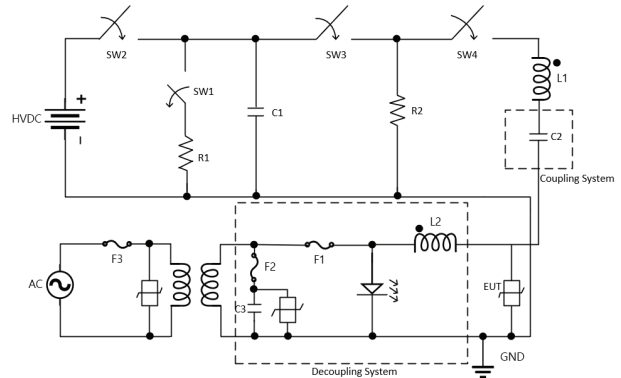


Fig. 4. Circuit of the surge generator with CDN.

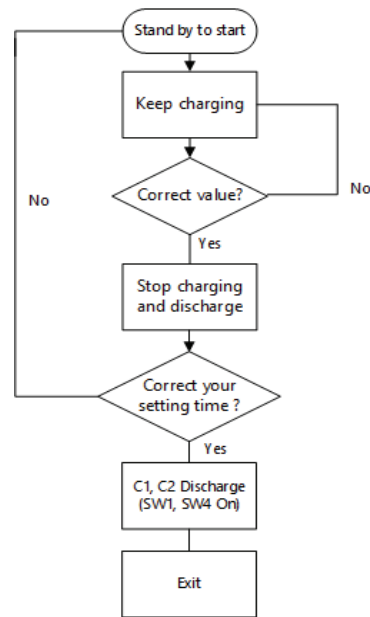


Fig. 5. Example of operation sequence.

LabVIEW Prg. 기반으로 각 스위치의 개로 및 폐로 제어 알고리즘을 설계하였으며, 동작 순서는 그림 5와 같다.

프로그램이 시작되면 대기 상태에서 콘덴서 C1이 충전되고 설정한 전압에 도달하고 시간이 경과하면 방전 후 설정한 횟수의 루프를 실행한다. 설정한 루프만큼 실행되지 않았다면 대기상태로 돌아가 충·방전을 반복하게 되며, 루프횟수가 일치하면 콘덴서 C1과 C2를 SW1과 SW4를 폐로시켜 잔류전하를 방전시킨다.

각 상태에서의 스위치 SW1~4의 동작은 최초 대기 상태에서 방전용 스위치인 SW2만 폐로상태이고, 충전이 시작되면 SW2는 개방되고 SW1은 폐로된다. 설정

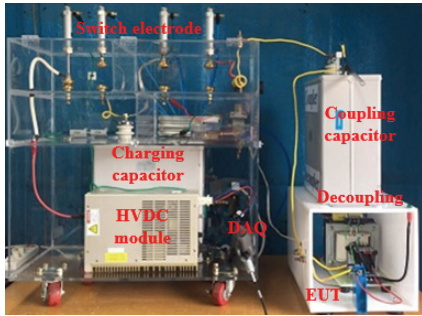


Fig. 6. Photograph of the surge generator with CDN.

한 충전시간에 도달했을 때 SW1은 개방되며 충전이 정지된다. 다음 SW4가 1초 먼저 폐로되고 그 후 SW3이 폐로된다.

그림 6은 제작된 서지발생장치의 사진이며 HVDC 모듈, 충전용 콘덴서 및 CDN, 충·방전 스위치로 구성되어 있다. CDN을 통해 서지전류와 AC 전원이 MOV로 전달된다.

### 3. 결과 및 고찰

본 논문에서 설계·제작한 서지발생장치의 성능을 평가하기 위하여 표 1에 나타낸 MOV를 대상으로 AC 전원이 인가된 상태에서 서지전류를 인가하여 실험을 수행하였다. 전체 실험계의 구성과 배치는 그림 7과 같으며, 서지전류는 관통형 고주파 변류기(1 V/kA, 30 MHz, Stangenes)로 그리고 MOV 양단의 제한전압은 고압 프로브(1,000:1, 70 MHz, Tektronix)로 측정하였다.

그림 8은 서지발생장치와 CDN이 연결된 상태에서 AC 220 V 전압이 접속되고 서지발생장치로부터의 서지전류가 인가되었을 때, AC전압의 위상 90°에 8/20  $\mu$ s 뇌서지 전류가 중첩된 파형으로, MOV가 설치되어 운영 중인 환경에서의 동작특성을 정확히 모의할 수 있었다.

그림 9는 MOV에 1회의 서지전류 인가 시 측정된

Table 1. Specification of MOV.

Item	Components
Model	B60K440
MCOV [V]	440 V <sub>AC</sub> , 585 V <sub>DC</sub>
Reference voltage [V]	715
Peak surge current [kA]	70
Clamping voltage [V]	1,180 V@500 A
Max. energy absorption [J]	1,500

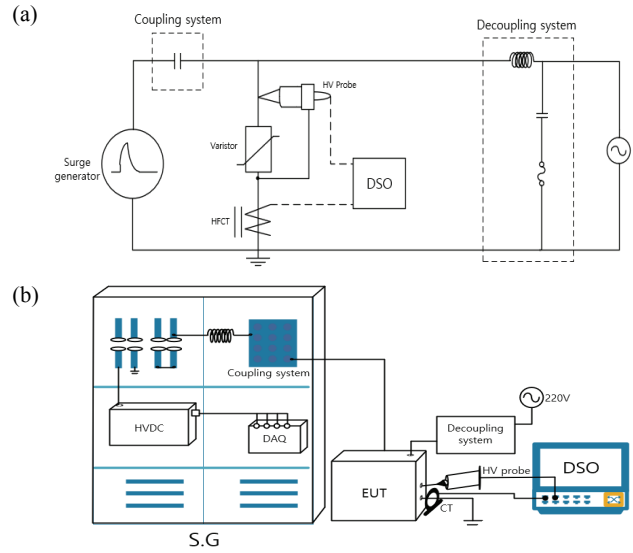


Fig. 7. Experimental set-up (a) configuration and (b) lay-out.

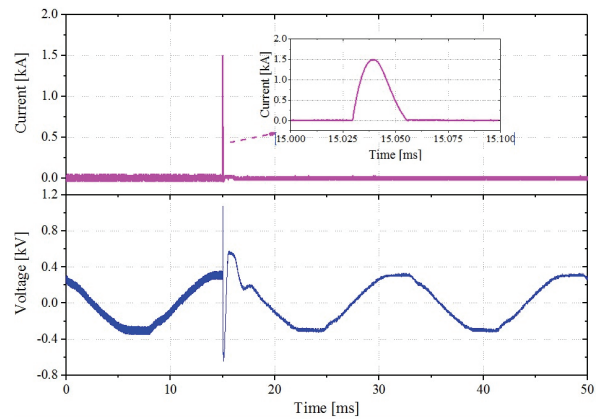


Fig. 8. Surge waveform with AC source.

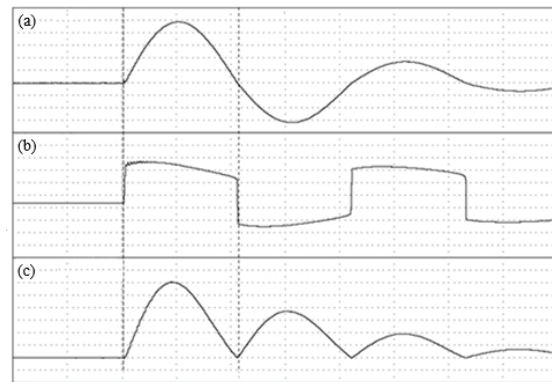


Fig. 9. Output waveforms. (a) 8/20  $\mu$ s Surge current 15 kA [300 A/div, 10  $\mu$ s/div], (b) clamping voltage 1,360 kV [400 V/div, 10  $\mu$ s/div], and (c) absorbed energy [ $W = \int i(t) \cdot v(t) dt = 150$  J]

서지전류와 MOV의 제한전압 파형이며, 이로부터 MOV에 흡수된 에너지를 나타낸 것이다. HVDC로 콘덴서 C1을 충전 후 방전시켰을 때,  $8/20 \mu s$ , 15 kA의 서지전류가 MOV에 인가되었을 때, MOV의 제한전압은 1,360 V, 흡수된 에너지는 150 J이었다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 AC 전원이 인가된 상태에서 MOV에 서지전류를 인가시켜 MOV의 사용 조건과 동일한 상태에서 가속 열화 시킬 수 있는 서지발생장치를 설계·제작하였다. IEC 61000-4-5와 IEC 61643-11에 규정된 표준 뇌서지파형을 만족하도록 서지 발생부를 설계하였으며, 이를 만족하는 회로 주요 구성요소는 충전용 콘덴서  $30 \mu F$ , 저항  $0.27 \Omega$  및 인덕터  $2.14 \mu H$ 이며,  $8/20 \mu s$ , 최대 15 kA의 서지전류를 발생시킬 수 있었다.

가속열화실험에 있어 핵심 요소인 CDN은 MOV가 실제 사용 환경에서와 같이 AC 전원이 인가된 상태에서 서지전류를 MOV에 전달하기 위해 적용하였다.

커플링 네트워크는 서지발생장치로부터의 서지전류에 대해 낮은 임피던스로 동작시켜 MOV에 전달하고, AC 전원에 대해서는 높은 임피던스로 작용하여 AC 전원이 서지발생부로 인가되지 않도록 한다.

디커플링 네트워크는 서지전류에 대해 높은 임피던스로 동작하여 AC 전원으로 서지전류가 전달되지 않도록 하고, 동시에 AC 전원에 대해서는 낮은 임피던스로 작용하여 AC 전원이 MOV에 인가되도록 하였다.

시제작 서지발생장치는 LabVIEW 기반의 운영프로그램에서 서지 인가횟수와 방전전류 등을 설정하여 자동으로 실험이 진행되므로, MOV의 사용 환경에서 열화 매커니즘과 열폭주 현상을 평가하는 데 충분히 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

#### REFERENCES

- [1] P. Papiński and J. Wańkiewicz, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **23**, 3458 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TDEL.2016.005873>]
- [2] F. M. Frigura-Iliasa, S. Musuroi, C. Sorandaru, and D. Vatau, *Energies*, **12**, 536 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.3390/en12030536>]
- [3] Y. Tsujimoto, N. Tsukamoto, R. Tsuge, and Y. baba, *Proc. 2018 34th International Conference on Lightning Protection (ICLP)* (IEEE, Rzeszow, Poland, 2018) p. 46. [DOI: <https://doi.org/10.1109/ICLP.2018.8503337>]
- [4] K. S. Park, G. Wang, S. C. Hwang, S. J. Kim, and G. S. Kil, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **29**, 635 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2016.29.10.635>]
- [5] G. Wang, S. J. Kim, S. J. Park, G. S. Kil, and H. K. Ji, *Trans. Electr. Electron. Mater.*, **17**, 289 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.4313/TEEM.2016.17.5.289>]
- [6] G. Wang, W. H. Kim, J. H. Lee, and G. S. Kil, *J. Electr. Eng.*, **69**, 352 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.2478/jee-2018-0051>]
- [7] W. H. Kim, S. C. Hwang, G. Wang, G. S. Kil, and C. H. Ahn, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **30**, 12 (2017). [DOI: <http://doi.org/10.4313/JKEM.2017.30.12.817>]
- [8] IEC, IEC 61643-11: *Low-Voltage Surge Protective Devices Part11: Surge Protective Devices Connected to Low-Voltage Power Distribution Systems - Requirements and Tests, 2nd ed* (IEC, Geneva, 2011) p. 12.
- [9] IEC, IEC 61000-4-5: *Testing and measurement techniques - Surge immunity test* (IEC, Geneva, 2010) p. 23
- [10] D. Miller, R. Kennel, M. Reddig, and M. Schlenk, *Proc. 2016 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)* (IEEE, Austin, USA, 2016) p. 52. [DOI: <https://doi.org/10.1109/intlec.2016.7749027>]

#### ORCID

Gyung-Suk Kil

<https://orcid.org/0000-0002-1672-2812>