한국전기전자재료학회 2001년도 하계학술대회 논문집

전력용 피뢰기의 임펄스에 의한 파손과 대책 기술

Fracture and Protection Technologies against Impulse of Power Arresters

한세원, 조한구, 김석수
(Han Se-Won, Cho Han-Goo, Kim Seok-Soo)

Abstract

ZnO varistors have been widely used to protect power system and electronic system against overvoltages based on their excellent nonlinearity. In order to increase their protection capability, the fracture and protection technologies of arresters have to study according to their applications, namely 1mA DC voltage, leakage currents, impulse residual voltages, withstanding capability to impulse surge, and energy absorption capability. ZnO varistors which have nonlinear current-voltage characteristic hame a number of failure mechanism when ZnO elements absorb surge energies. Failure mode by thermal stress and pin hole are among the most common failure mechanism at the high current surge current. In this study, the fracture mechaism of power arresters are introduced and protection technologies are researched. In particular the effect of thermal stress by surge currents to ZnO elements and methods against arc surge energy through withstand structure design of arrester are discussed.

Key Words : Arrester, ZnO Varistor, Fracture Mechanism, Surge Current, Arc Surge Energy,Protection Methods

1. 서 론

산화아연을 주성분으로 하는 바리스터 소자(ZnO 소자)는 우수한 전류-전압 특성의 비선형성과 큰 서지 에너지 흡수 능력으로 인해 뇌 또는 이상 서지 과전압으로 부터 전력기기를 보호하는 피뢰기에 광범위하게 사용되고 있다. 이 ZnO 소자의 전류-전압 특성은 전류 영역에서 저항치가 크게 변화하여 상시 인가된 전압에서는 높은 저항을 가지므로 미소한 누설전류만 흐른다. 그러나 전압이 상승하면 저항율이 크게 저하하여 서지 에너지를 흡수하는 특성을 나타낸다.

ZnO 소자에 요구되는 중요한 특성으로는 전류-전압 비선형 저항 특성, 장기 과전 수명 특성 및 서지 에너지 내량의 3가지이다. 비선형 저항 특성은 전류-전압 특성에 따르는 것으로 작은 전압 변화에 대한 저항의 변화가 큰 것이 요구된다. 장기 과전 수명 특성은 상시 인가된 전압에 대하여 누설전류가 안정되는 특성이 요구된다. 서지 에너지 내량 특성은 ZnO 소자가 큰 서지 에너지를 흡수할 경우 전기적, 기계적으로 파괴되지 않고 에너지를 안정하게 흡수할 수 있는 능력을 말한다.

ZnO 피뢰기 소자는 열전자적 불안정성(electrothermal instability)과 열 스트레스(thermal stress)에 의한 파괴 등 몇 가지 메커니즘에 의해 고장이 발생한다. 전극 가장자리(edge)의 절연파괴 경로(breakdown channel)는 대전류 영역에서의 가장 일반적인 고장 메커니즘 요인으로 알려져 있다. 이

한국전기연구원 신소재응용연구그룹
E-mail : swhan@keri.re.kr, hgcho@keri.re.kr

사고는 소자의 가장자리 앞뒤로 용융 관통(melting puncture)되는 형태로 나타난다. 이것은 ZnO 바리스터 소자의 에너지 흡수 능률을 제한하는 것으로 알려져 있다.

본 논문에서는 ZnO 소자가 서지 에너지를 흡수할 때 피뢰기 소자의 파괴 메카니즘에 대한 해석적, 실험적 기술동향을 제시하고, 이 메카니즘을 근거로 ZnO 소자의 에너지 내량 향상을 위한 기술적 내용을 검토하여 개선책을 제시하고자 하였다.

2. 피뢰기의 파괴 특성

2.1 ZnO 소자의 파괴 메카니즘과 대책

ZnO 소자가 과다한 서지 에너지를 흡수하는 경우 파괴와 관련한 여러 가지 모드(mode)가 보고되어 있다. 이것은 주로 열응력에 의한 기계적인 파괴에 기인하는 현상과 소자 표면에 발생하는 핀홀에 기인하는 현상으로 크게 나누어 설명할 수 있다. 전자는 ZnO 소자 내부의 결정 입경의 분포에 의한 것으로 서지 에너지를 흡수한 경우 발열이 불균일하게 일어나기 때문에 열응력이 발행하고 파괴에 이르는 현상이다. 이 파괴 현상의 대책은 소자 내의 결정 입경의 분포를 균일하게 제어하면 발생하는 열응력이 감소하여 소자의 에너지 내량을 향상시킬 수 있는 것으로 알려져 있다. 핀홀 파괴에 있어서는 소자의 용사 전극면에 발생하는 현상과 용사 전극 양단에 핀홀이 발생하는 현상이 있다. 전극면에 핀홀이 발생하는 경우는 열응력 파괴와 동일하게 ZnO 소자 내부의 결정 입경의 차이에 의한 것으로 저 저항 영역에서 전류가 집중하는 것이 원인이다. 그림 1은 전형적인 열응력에 의한 기계적 파손 형태를 보여준다.

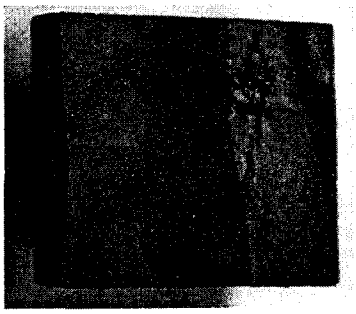

그림 1. 전형적인 열응력 파손 형태

열적으로 과다하게 유기된 기계적 스트레스는 ZnO 소자 원주 내부나 전극 근처에 균열을 일으킨다. 주로 다소 일정한 반경에서 나타나는 균열은 ZnO 소자의 전기적 특성이 소자를 통해 균일하지 않음을 나타낸다. ZnO에서 정상적인 입계의 전압강하는 3.5V의 값을 갖는다. 따라서 전도 개시를 위한 초기 전계는 양단 전극 사이를 흐르게 되는 전류가 통과하게 되는 정상적인 입계수의 함수에 따라 달라지는데 이것은 ZnO 입자와 입계수의 비율로 변화한다. 제조 공정에서 열적 조건에 따라 이러한 요소는 완전히 달라진다. 전도 개시를 위한 초기 전계는 높은 비선형 물질에서는 큰 변화가 없지만, 이 물질의 어떤 영역은 서지 전류가 작용하는 동안 다른 영역보다 훨씬 큰 전류 밀도를 가질 수밖에 없다. 이것은 물질 내부 기계적 후프(hoop) 스트레스와 불균일한 과열의 결과이다. 예를 들어 그림 2와 같은 서지인가 후 약 수백 J/㎠의 총 에너지 흡수가 발생하며 그 결과 ZnO 소자의 온도 분포는 약 1000~1700℃까지 상승하게 될 것이다. 따라서 반경 위치의 온도 변화는 피할 수 없으며 소자에 심각한 열적으로 유기된 기계적 스트레스를 일으키게된다.

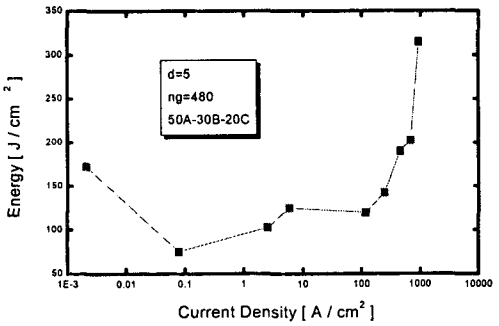

그림 2. 임펄스 서지에 의한 에너지 흡수 내량

한편 ZnO 소자가 과다한 에너지 흡수로 인해 고장날 때 전극 가장자리의 용융 관통이 가장 일반적인 사고 형태이다. ZnO 소자의 대전류 I-V 특성은 500℃ 이상에서 온도 의존성이 강하고 전도도의 온도계수는 550℃ 이상이 되면 정극성(positive)이 된다. 따라서 ZnO 소자의 어느 위치의 온도는 550℃ 이상 상승하게 되며 이 지역의 전류 밀도는 증가하여 소자를 열 폭주에 이르게 하는 경향이 있다. 이것이 전극 가장자리에서의 사고 형태이다. 항상 ZnO 비선형 소자의 가장자리와 전극의 가장자리 사이에는 여분이 존재한다. 이것이 결국 전극의 다른 영역

과 비교하여 전극 가장자리에서 전류 밀도가 커지는 결과를 가져온다. 여분이 없다면, 즉 전극이 비선형 ZnO 소자의 가장자리까지 도포되면 전류는 전극의 가장자리로 확산되지 않고 그러한 현상도 나타나지 않는다. 일반적으로 가장자리 여분 길이에 따른 전극 가장자리에서의 최대 온도 상승 특성에서 과잉 온도 상승 특성은 약 2㎜ 이상 여분이 되면 여분이 증가함에 따라 선형적으로 변화함을 보여준다. 실제적으로 어느 정도의 여분은 필연적이다. 전극 가장자리로부터 방사상의 필라멘트 돌출(filament protruding)은 피해야 한다. 전극 가장자리에서 나타나는 최악의 결함(defects)은 ZnO 소자의 공동(cavity)속에 금속 증착에 이른 방사형 돌출 필라멘트가 되는 것이다. ZnO는 항상 어느 정도 기공(porosity)을 가지므로 알루미늄 전극을 증착하기 전 소자 표면을 연마하는 과정에서 이러 공동은 피할 수 없다. 따라서 전극 가장자리 용융 관통 현상을 최소화하기 위해서는 1)전극 가장자리 여분이 최소화하여 균일하게, 2)전극 가장자리는 가능하면 매끄럽게, 3)ZnO의 기공은 줄여야 한다. 금속 증착물이 옆면으로 침투되어 표면 플레시오버 전압이 발생하지 않게 하기 위해 어느 정도 가장자리 여분은 필요하다. 가장자리 여분을 0.3에서 0.6㎜ 범위로 조절하고 매끄러운 전극 가장자리가 만들어지는 스프레이 기술을 적용하면 에너지 흡수 능률을 크게 향상시킬 수 있었다.

2.2 ZnO 소자 최적화

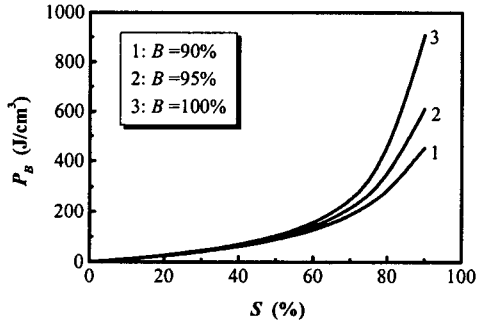

그림 3. 열적 균일성과 에너지 내량 관계

ZnO 소자의 균일성을 향상시키면 사고를 유발하는 후프(hoop) 스트레스를 제거 할 수 있다. 전극의 형상(topology)을 최적화하면 용융 관통 사고를 유발하는 에너지 흡수 능률을 증가시킬 수 있다. 이러한 개선의 정량적 결과를 그림 3에서 볼 수 있다. ZnO 소자의 서지 흡수 에너지 내량은 소자의 미세 구조적인 균일성과 열적 균일성이 높게 제조된 제품일수록 증가하게 된다.

2.3 전력용 피뢰기 방압 기술

전력용 피뢰기 시스템은 사고 전류 발생 시 이를 적절히 해소할 수 있는 방압 대책이 필요하다. 방압 대책이 미흡하면 앞에서 언급한 바와 같이 직접적인 피뢰기 소자의 파손으로 이어질 가능성이 크다. 하지만 방압 대책은 피뢰기 소자, 하우징 구조 및 단로기 성능과 밀접히 관련하여 협조가 이루어져야하는 기술적 어려움도 가지고 있다. 그림 4와 5에 전형적인 피뢰기 사고 전류에 따른 발생 아크 에너지와 압압 구조를 설계한 경우 아크 에너지 감소효과를 나타낸 것이다.

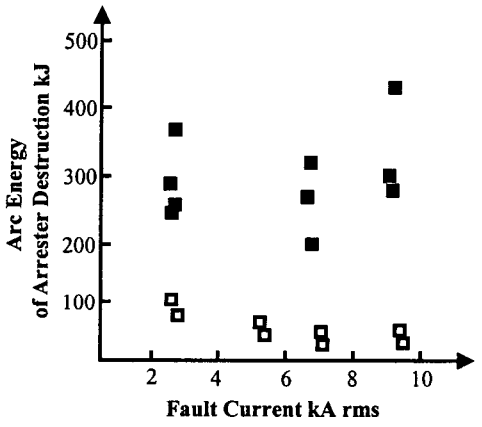

그림 4. 피뢰기 사고전류에 따른 아크 에너지

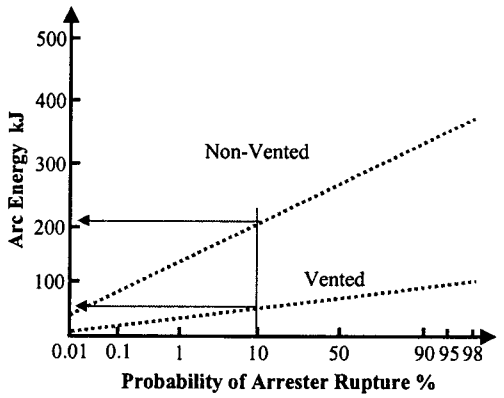

그림 5. 방압 설계에 따른 아크 에너지 감소 효과

참고 문헌

[1] L. M. Levinson and H. R. Phillip, "The Physics of Metal Oxide Varistors" *J. Appl. Phys.*, 46(3), pp1332-41, (1975).

[2] K. Eda, A. Iga and M. Matsuoka, "Degradation mechanism of non-ohmic Zinc oxide ceramics", *J. Appl. Phys.*, 51(5), pp2678-84, (1980).

[3] T. K. Gupta, W. G. Carlson and P. L. Hower, "Current instability phenomena in ZnO varistors under a continuous ac stress", *J. Appl. Phys.*, 52(6), pp4104-11, (1981). [4] E. R. Leite, J. A. Varela, and E. Longo, "Barrier voltage deformation of ZnO varistors by current pulse", *J. Appl. Phys.*, 72(1), pp147-50, (1992).

[5] K. Eda, "Conduction mechanism of non-ohmic Zinc oxide ceramics", *J. Appl. Phys.*, 49(5), pp2964-72, (1978).

[6] S. W. Han and H. B. Kang, "Effects of Al_2O_3 as dopants on the complex impedance and J-E behavior of ZnO-Bi_2O_3 varistors", *KIEE,* 46(10) pp1502-08, (1997)

[7] J. L. He, S. W. Han, H. G. Cho and H. B. Kang, "Impulse Destruction Mechamism of ZnO Varistors, " Ungyong Mulli, 11(4), 47-52(1998)