

폴리머 접연물 소재의 전기적 및 복합열화 특성평가 기술

안명상, 박효열, 나문경
한국전기연구원

Evaluation Technology of Electrical and reliability Characteristics for Outdoor Polymer Insulator Materials

Ahn Myeong Sang, Park Hoy Yul, Na Moon Kyeong
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - There have been numerous accelerated aging laboratory tests for evaluating suitability of polymeric materials and devices. Aging test for materials and its full scale device has been conducted. Service experience plays a key role in the utility section of composite insulators. A meaningful and reliable accelerated aging test is needed for evaluating composite insulator. During the service these insulators are subjected to aging stress such as humidity, pollution, and electrical field, and erosion and tracking of the weathershed occurs. This paper presents the criteria of reliability evaluation and evaluation facilities for 22.9 kV suspension composite insulator. We adopt the criteria of reliability evaluation consist of two test methods. One is CEA tracking wheel test for examining the tracking and erosion performance of composite insulator. The other is multi-stress aging test for examining effects of environmental factors such as UV, temperature, humidity, etc on composite insulator.

1. 서 론

폴리머 애자는 기계적 강도유지를 위한 FRP core와 표면절연성 능유지를 위한 고무 갖으로 구성되어 있다. 폴리머 애자는 초고압 절연능력과 구조물로서의 기계적 강도 특성이 우수하고 송배전설비의 혁신적 변화유도가 가능하여 옥외 절연물로서 많이 사용되고 있다. 산업의 대규모화와 도시의 과밀화로 매연과 분진에 의한 절연물의 오손이 증가하고 있으며 전력 부하가 밀집된 도시의 공간지역은 대부분이 염해가 있는 해안 지역에 위치하고 있기 때문에 표면방전에 의한 외피 소재의 열화내성이 중요한 인자로 부각되고 있다. 폴리머 애자용 갖 소재는 트래킹성(재료침식), 내광성, 산화안정성 등의 성능이 기본적으로 우수해야 하고 오염으로 인해 재료열화가 가속되는 환경에서도 장기간 잘 견디어야 한다. 따라서 애자성능은 오손조건에서의 갖 재료성능에 크게 의존하는데 실리콘 및 EPDM 등의 고무가 좋은 성능을 보이고 있다.

실리콘 및 EPDM 등의 하우징 재료가 내열성, 내후내광성, 산화안정성, 발수성, 내오염성 등 절연소재로서의 우수한 특성을 가지고 있지만 갖 표면에서는 방전발생이 불가피한 옥외절연물에서 장기적인 성능은 하우징 재료의 배합처방에 따라 상당히 차이가 나는 것으로 밝혀지고 있다. 고무소재의 발달은 첨가제의 발달에 기인하고 있는데 폴리머 애자의 하우징용 재료가 장기절연성능을 유지하기 위해서 트래킹 방지제인 Aluminum Trihydroxide(ATH)와 발수성과 성형성에 영향을 주는 오일들의 최적처방을 통해 우수한 장기성능을 가진 고무소재의 개발이 필수적이다. 특히, 전기방전이 발생될 때 고온의 열과 단파장의 빛이 재료표면에서 발생하는 상황과 하우징 재료의 열화기구 등을 고려할 때 ATH가 가장 우수한 보강제인 것으로 많은 연구에서 밝혀져 있다.

폴리머 애자의 장기성능예측을 위하여 많은 수단과 측정방법이 연구되어 왔다. 그러나 폴리머 애자에 있어서 성능저하는 대부분 갖 재료의 열화에 기인되고 있어 예측 및 진단목적의 연구가 갖 재료의 가속열화에 초점이 맞추어져 있다.

본 논문에서는 하우징용 소재의 특성을 평가하기 위한 평가방법과 평가결과를 해석하는 기술에 대하여 기술하였다

2. 본 론

2.1 코로나 방전에 의한 고무 표면의 열화

하우징용 고분자 고무의 발수성 회복특성(recovery of hydrophobicity)을 평가하기 위하여 그 표면 열화 수단으로서 코로나 discharge를 많이 사용한다. 코로나 방전처리 장치는 주파수, 전압, 전극과 시료와의 간격, scan(왕복운동) 속도 및 횡수 등의 변수가 있다. 이러한 코로나 표면처리 효과를 확인하기 위하여 실리콘 고무에 물을 스프레이 하여 코로나 처리된 부분과 미처리 부분에 있어서의 물의 거동으로 알 수 있다.

방전 열화된 시편으로 SEM을 사용하여 표면열화 정도를 비교하거나 접촉각을 측정하여 평가할 수 있다.

2.2 발수성 측정

옥외 절연물이 사용 중에 오손 및 습윤 상태가 되었을 경우 표면으로 흐르는 누설전류와 이로 인한 방전량은 오손액의 전도도와 재료표면의 발수성에 기인한다. 오손 및 습윤이 실제 사용 환경에서 불가피한 요인이라고 보면 표면에서 발생하는 방전량은 거의 재료의 발수성에 의존한다고 볼 수 있다.

실리콘 및 EPDM 고무 소재가 옥외절연물 하우징용 소재로 각광을 받고 있지만 장기성능은 고무배합의 처방에 따라 상당히 차이가 나는 것으로 알려지고 있다. 표면 발수성을 평가하기 위한 수단으로서 접촉각 측정을 통하여 알 수 있다.

여러 가지의 전기적 특성의 향상을 위하여 ATH를 첨가하게 되면 발수성은 떨어지는 효과를 나타내게 되므로 발수성과 ATH의 적절한 조합이 필요하다.

2.3 SEM 측정

트래킹, 아크, 코로나 등에 의하여 열화된 표면 등을 관찰하거나 표면의 발수성을 구분하기 위한 수단으로 SEM(주사전자현미경)을 사용할 수 있다. 재료의 배합처방에 따라서 열화정도가 다르게 나타나므로 표면의 특성을 SEM을 이용하여 비교분석하기가 매우 용이하다.

2.4 내아크성 측정

절연체의 표면이 아크에 노출되면 그 열과 광에 의하여 열적 및 화학적으로 분해가 일어나거나 침식이 생겨 도전료가 형성되고 시료의 표면 및 내부로 전류가 흐르기 시작하여 곧 단락으로 이어지게 되어 절연성을 상실하게 된다. 내아크성은 이러한 아크에 대한 절연체의 내성을 말하며 표면절연성능 저하로 아크가 소멸할 때까지의 시간으로 나타낸다.

절연물은 전체강도를 충분히 고려하여 설계하지만 실제 계통에서 사용되면 절연물의 표면 오손과 습윤에 의해 불평등한 전계가 생기게 되고 짧은 거리에 고전계가 걸려 아크가 발생할 수 있으며 아크에 의해 열화될 때 전도성이 높은 탄화물이 생기기 때문에 내아크성을 향상시키는 것이 중요하다. 일반적으로 내아크성을 향상시키고자 하는 경우에는 무기물을 첨가한다. 설라코로 이어지는 아크방전은 오손 정도와 밀접한 관계가 있다. 초기에 Joule열에 의해 건조대(dry band)가 형성되면 양단에 고전계가 유도되어 아크 방전으로 이어지게 되며 전기적 스트레스와 열이 수반되어 탄화, 분해 등이 일어난다. 이때 남은 물질의 특성에 따라 절연성은 크게 달라지게 되는데 유기 물질이 탄화되면 전도성이 있는 그라파이트(graphite) 구조로 바뀌는 경우가 많으므로 절연내력이 떨어져서 결국 절연회복이 되지 않을 수가 있지만 실리콘 고무는 탄화되어도 절연성이 우수한 실리카로 변하기 때문에 절연성의 저하는 나타나지 않으며, 또한 내열성이 우수하기 때문에 열화가 잘 일어나지 않는다.

일반적으로 JEC-143, ASTM D 495에 의하면 2차 회로 개방시의 전극전압은 12,500V를 표준으로 하고 있다. 한 단계를 1분으로 하며, 흐르는 전류의 on-off에 따라 7단계(420초 동안)로 이루어진다. 사용되는 전극은 직경이 2.4 mm, 전극 사이의 거리가 6.35 mm로서 두 전극 사이에 직선으로 아크방전을 유지하기 위하여 30°를 유지한다. 전극의 재료는 두 가지로서 시험재료의 내아크성이 작은 경우(180초 이하)에는 stainless steel strip이 유용하지만 내아크성이 큰 시편의 경우(180초 이상)에는 stainless steel strip의 모서리가 아크에 의하여 마모가 되므로 텅스텐 봉이 적절하다.

EPDM과 같은 고무는 전극 양단에 전압이 걸려서 아크가 발생할 경우 탄화가 발생되는데 그 때까지의 시간으로 내아크성을 평가한다. 그러나 실리콘 고무와 같이 전극의 양단에 전압이 걸려서 아크가 발생하여도 탄화잔존물이 잘 생기지 않고 용삭(erosion)만이 생기므로 그 때에는 용삭이 발생된 양을 서로 비교하여 내아크성을 평가하기도 한다.

2.5 내트래킹성 측정

폴리머 애자에서 장기신뢰성은 하우징용 고무 소재의 성능에 의존하는데 옥외환경에서 오염되고 물이 존재하는 조건이 되면 폴리머 애자 표면으로 누설전류가 증가하게 되고 더불어 방전이 일어나면서 소재열화가 진행된다. 이와 같은 전기방전의 발생과 이로 인한 열화의 진행은 불가피한데 이것이 흔적을 남기면서 진행된다고 하여 트래킹이 발생한다고 한다. 방전열화로 인하여 표면 전도도가 올라가면 그 부위는 절연성을 상실하게 되며 열화되지 않은 부위에 전계집중과 더불어 방전이 그 부위에서 주로 발생하므로 트래킹은 점점 진전되어 간다. 실리콘 고무소재는 열화시 탄화로 인한 도전성 잔존물이 거의 생성되지 않기 때문에 트래킹보다는 특정부위에 방전이 계속되어 파먹는 형태의 용삭(erosion)이 주로 발생되며 EPDM의 경우는 탄화에 의한 트래킹이 발생되어 진다. 고분자 절연물의 내트래킹성 측정은 IEC 60587(IPM : inclined plane method)을 사용하며, 이에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있는 실정이다. IEC 60587에서의 평균전계는 20~120 V/mm이며, 시험 주파수는 60Hz, 출력전압은 $\pm 2\%$ 이내에서 7kV까지, 전류는 600mA로 설정된다. 상부전극과 하부전극의 거리는 $50 \pm 0.5\text{mm}$ 이며, 수평으로부터 45°로 유지하였다. 트래킹파괴는 고압회로에 60mA 이상의 전류가 2초간 연속적으로 흐를 때의 시간과 도전로(conducting path)가 하부전극으로부터 25mm의 표시에 도달하는 시간으로 평가한다.

옥외절연물로서 사용하기 위한 EPDM과 실리콘 고무 등은 제일 높은 등급에서도 트래킹 파괴가 발생되지 않으므로 용삭이 발생된 양을 서로 비교하여 내트래킹성을 평가하기도 한다.

2.6 성능평가시험

폴리머 애자는 외부의 환경에 의하여 복합적인 열화가 일어나지만 이러한 열화에 미치는 영향을 단독적인 스트레스로 분리하고 최소한의 사용성능을 평가한 시험이 성능평가시험이다. 성능평가시험으로서의 외관검사, 구조검사, 인장내하중시험, 기계적 하중-시간시험, 비틀림 내하중시험, 인장파괴하중시험, 전과장해전압시험, 상용주파전조성락전압시험, 상용주파주수성락전압시험, 뇌충격성락전압시험(정, 부), X-선 투과시험, 접착력 시험, 수분침투시험, 염색용액 침투시험, 수분확산시험, 내아크시험, 난연성 시험, 내후성 시험, 도금시험, 경년변화시험 등이 있다.

2.7 신뢰성 평가시험

신뢰성 평가시험은 장기신뢰성을 평가하기 위해서 스트레스가 복합적으로 작용하는 복합가속열화시험과 내트래킹시험으로 구성되어 있다.

2.7.1.1 복합가속열화시험

복합가속열화시험방법은 이러한 각종 기후나 운전환경을 모의하여 특성을 평가하는 시험으로, 복합가속열화방법과 관련된 규격화된 국제규격이 있지만 각각의 폴리머 애자의 운전환경이 다르므로 모두 각각의 운전환경을 모의한 복합가속열화방법을 고안하고 있다.

우리나라의 기후패턴에 따라서 고장형태가 여름보다 겨울에 오손에 의해 많이 발생하고 있다. 여름의 특징은 일조량이 많고 온도와 습도가 높고 비가 많이 온다. 비가 많이 오는 여름에는 오손물이 비에 쉽게 씻겨 내려가므로 애자의 오손사고는 겨울에 비하여 상대적으로 적게 나타난다. 겨울에는 여름과는 반대의 현상이 나타나고 있다. 따라서 가속열화시험의 주기도 비가 많이 오는 여름주기와 비가 적게 오는 겨울주기로 나누어 반복하여 시험하는 패턴이 적절한 것으로 생각된다.

실제의 기후조건과 운전환경을 대표하도록 여름주기와 겨울주기로 구분하여 열화시험을 실시하는 EPRI/FPL의 시험법을 기본으로 하여 국내환경에 맞도록 적용, 연구한 한국전력공사의 시험법을 참조하여 복합가속열화시험법을 결정하였다.

이러한 결과로부터 여름주기 10일, 겨울주기 11일의 순서에 의한 열화시험을 결정하였다. 여름주기는 인공비, 자외선, 온난한 온도로 구성되어 있으며 겨울주기는 오손물, 적은 양의 비, 자외선, 차가운 온도로 구성된다.

설비의 구성은 폴리머 애자를 설치하여 시험하는 챔버, 온도, 습도, 자외선, 인공강우, 염무, 인장하중, 전압 등의 가속열화인자 발생장치, 누설전류측정시스템, 시스템의 가동에 따른 데이터 저장 및 분석 시스템(data acquisition system)으로 되어 있다.

2.7.1.2 시험평가방법

a) 평가방법

- 시험 중 섬락으로 인한 전원의 트립이 없을 것
- 트래킹이 발생되지 않을 것
- 침식에 의해 코아가 드러나지 않을 것
- 날개에서 관통이 발생되지 않을 것

b) 전기적 검증시험

복합가속열화 시험 후 다음을 만족하여야 함

- 상용주파전조성락전압시험 : 정격전조성락전압치의 95 % 이상
- 상용주파주수성락전압시험 : 정격주수성락전압치의 80 % 이상
- 뇌충격성락전압시험 : 정격뇌충격성락전압치의 92 % 이상

2.7.2 내트래킹시험

CEA LWTWG의 5.6(Tracking and erosion test)에 의하여 시험한다.

- 육안평가

- 트래킹이 없을 것
- 코아에 침식이 없을 것
- 몸체에 관통파괴가 없을 것

- 급준과전압시험 :

- 애자 각각에 10 회의 정, 부극성의 임펄스(1,000 kV/μs)를 가하여 외부섬락 발생시험 : 관통파괴가 발생되지 않아야 함

- 전조 성락전압 시험 : 시험 후의 평균 섬락 전압치가 시험 전의 90 % 이상이어야 함

- 평균성락전압치의 80 %를 30 분 동안 인가 : 관통파괴가 발생되지 않아야 함

시험 직후 shank의 온도가 대기의 온도보다 20 °C 이상 높지 않아야 함

3. 결 론

하우징용 소재의 특성을 평가하기 위한 평가방법으로서 코로나에 의한 열화 및 발수성, 내아크성, 내트래킹성 등을 설명하고 평가결과를 해석하는 기술에 대하여 기술하였다. 여러 가지 평가기준에 의하여 평가를 하여도 재료의 특성에 따라서 각각 적용하는 방법이 다르다. 또한 특성 향상을 위하여 배합처방을 하더라도 그것이 다른 특성에는 나쁜 영향을 미치므로 여러 가지의 특성에 가장 적합한 배합처방이 필요하다. 그리고 폴리머 현수애자의 장기신뢰성 평가방법은 매우 다양하지만 각각의 규격을 분석하고 그 동안의 연구 결과를 바탕으로 국내의 환경에 맞는 신뢰성 평가기준을 제정하였다. 본 신뢰성 평가기준에 의한 신뢰성평가 결과를 이용하여 신뢰성 평가가 폴리머 애자의 장기 신뢰성 향상에 기여할 수 있도록 신뢰성 평가기법을 향상시켜 나가야 할 것으로 생각된다.

[참 고 문 헌]

- [1] D. H. Han, H. Y. Park, D. P. Kang, H. G. Cho, "Effects of Added Silicone Oils on the Surface Characteristics of SIR", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 9, No. 2, p. 323, 2002
- [2] Y. Hirano, T. Inohara, M. Toyoda, H. Murase, and M. Kosakada, "Accelerated Weatherability of Shed Materials for Composite Insulators", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 8, No. 1, p. 97, 2001.
- [3] H. Deng and R. Hackam, "Low Molecular Weight Silicone Fluid in RTV Silicone Rubber Coatings", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 5, No. 1, p. 84, 1998.
- [4] H. Homma, T. Kuroyagi, and K. Izumi, "Diffusion of Low Molecular Weight Siloxane from Bulk to Surface", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 6, No. 3, p. 370, 1999
- [5] Ravi S. Gorur, B.S. Bernstein, "Field and Laboratory Aging of Polymeric Cable Terminations: Part 1 - Field Aging", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 13, No. 2, pp. 316-322, 1998.
- [6] Ravi S. Gorur, B. S. Bernstein, "Field and Laboratory Aging of Polymeric Cable Terminations: Part 2 - Laboratory Aging", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 13, No. 2, pp. 323-329, 1998.
- [7] S. M. de Oliveira et al., "Aging of Distribution Composite Insulators under Environmental and Electrical Stresses", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 5, No. 2, pp. 1074-1077, 1990.
- [8] ANSI C 29.1 Test methods of electrical power insulators.
- [9] ANSI C 29.2 Wet process porcelain and toughened glass - pension type.
- [10] ANSI C 29.11 Composite suspension insulators for overhead transmission line.
- [11] ASTM D 2565 Standard practice for xenon-arc exposure of plastics intended for outdoor applications.
- [12] ASTM G 26 Standard practice for operating light-exposure apparatus (xenon-arc type) with and without water for exposure of nonmetallic materials.
- [13] CEA LWTWG-01 Dead-end/suspension on composite insulator for overhead distribution line.
- [14] IEC 61109 Composite insulators for a.c over head line with a nominal voltage greater than 1000V-definition, test methods and acceptance criteria.