

배전용 케이블 접속재의 활선진단기술 개발 및 신기술 동향

송일근 · 김주용 <전력연구원 선임연구원>
이우영 <한국전기연구소 책임연구원>

1. 머리말

지중배전선로는 도심과 산업단지 등 부하가 밀집되어 있는 지역에 전력을 공급하고 있는 경우가 많기 때문에 선로계통에 이상이 발생되면 안전과 경제적인 면에서 막대한 손실이 예상된다.

케이블의 접속개소는 지중배전선로의 급증과 더불어 증가될 것으로 예상되며, 지중배전케이블의 고장원인은 주로 시공불량과 접속재 부위에서 발생되고 있고, 접속재의 절연상태 양부를 사전에 활선 상태에서 판정하여 지중배전케이블의 고장 예방 및 작업공간(예 : 맨홀)에서의 작업자 안전을 위하여 접속재 활선진단이 필요하다.

따라서 지중계통의 사고예방 기술은 지중배전선로를 통한 전력수요가 증가하고 있는 현 상황으로 보아 시급히 확립되어야 할 것으로 보인다. 지중배전선로는 케이블과 이를 연결하는 접속부로 구성되어 있으며, 포설될 케이블은 제조공장에서 품질관리 공정에 따라 다양한 방법으로 품질검사가 이루어지고 있으나 현장에서 시공되는 접속부는 시공과정의 관리가 쉽지않을 뿐 아니라, 시공 중 발생할 수 있는 결함들을 검출하는 방법도 제한되어 있어, 지중케이블 선로사고의 많은 부분이 접속재에 의한 것으로 나타나고 있다.

이는 케이블 포설시의 시공불량이 전체 절연사고의 85%를 차지하며, 그 중 접속재가 원인이 된 것이 80%로 대부분을 차지하고 있다.

접속재에서 발생될 수 있는 결함에 대해 시공초기에 효과적으로 점검할 수 있는 방법이 도입된다면, 케이블선로에서의 절연사고 방지에 큰 효과가 있을 것으로 기대된다.

이러한 케이블 접속재 진단기술의 필요에 따라 일본과 유럽에서는 접속재 진단에 유력한 방법으로 알려져 있는 접속재내 부분방전을 측정하여 상태를 진단하는 기술들에 대해 많은 연구가 수행되어지고 있다. 일본의 경우 전기적 신호측정방식에 의한 부분방전 측정방식과 음향방출신호 측정방식을 이용한 부분방전 측정방식이 연구가 수행되어지고 있고, 유럽에서는 주로 전기적 신호 측정방식에 의한 진단방식이 연구되고 있다.

따라서 본 고에서는 국내 케이블 접속재의 고장 검출이 가능한 열화진단기술개발에 대하여 기술하고자 한다.

2. 접속재의 구조와 종류

케이블 접속재의 종류는 직선접속재, 종단접속재, T 접속재 및 Elbow 접속재로 구별되며, 케이블의 구

조에 비해 접속재 구조가 복잡하고, 가장 중요한 절연부에 있어서도 접속재의 주 절연재료가 케이블의 절연재료와 다르기 때문에 복합적인 절연구조로서 두 절연체사이의 계면이 존재하게 된다. 이러한 구조에서는 두 종류의 절연재료에 발생하는 열화현상이

복합적으로 발생하고, 또한 계면압력변화 또는 Grading 같은 계면 특유의 열화현상이 발생된다.

표 2.1은 지중배전선로의 주요 구성부품 및 대표적인 재료이며, 그림 2.1은 조립식 직선접속재의 구조이고, 그림 2.2는 조립형 종단 접속재의 구조이다.

표 2.1. 지중배전선로 주요 구성부품 및 대표적인 재료

| 명 칭 | CV전력케이블 | 직 선 접 속 부 | 종단접속부 |
|-----------|-------------|---------------------|------------------|
| 주요 구조물 | 도체(Cu) | 도체 접속관(Cu) | 단자(Cu) |
| | 내부 반도전층(PE) | 내부Stress Cone(EPR) | 절연Cap(EPR) |
| | 절연층(XLPE) | 절연층(EPR) | Washer(SUS) |
| | 외부반도전층(EVA) | 외부 Stress Cone(EPR) | 절연Skirt(EPR) |
| | 차폐층(Cu) | 외피(EPR) | Stress Cone(EPR) |
| | 쉬스(PVC) | 수밀Tape(Rubber) | 수밀Tape(Rubber) |
| | | 접지선(Cu) | 보호Tape(PVC) |
| | 보호Tape(PVC) | 접지금구(SUS) | |
| | | Bracket(Al) | |

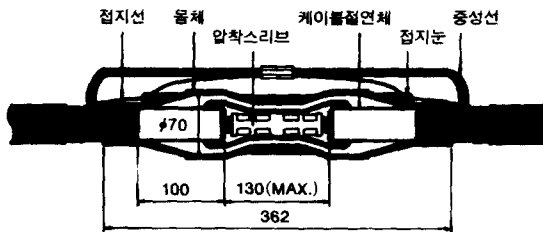


그림 2.1. 조립형 직선접속재의 구조

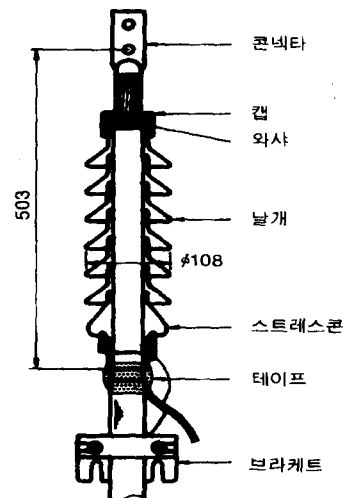


그림 2.2. 조립형 종단 접속재 구조

3. 접속재 고장원인 분석

표 3.1은 Mold형 접속재의 고장원인 및 영향들을 간략히 종합한 것이다.

접속재의 열화현상은 재료 자체의 결함에 의한 열

화요인도 있으나 주로 조립과정의 작업자 미숙련, 부주의 또는 작업환경상의 문제 등에서 발생하는 작업상의 시공불량이 대부분을 차지하고 있다. 이러한 현상은 국내의 경우에서도 확인된 바 있다.

표 3.1. Mold형 접속재의 고장원인 및 영향

| 고 장 경 로 | 원 인 | 영 향 |
|---------------------|--------------------------|--------------------------------|
| 절연체를 관통하는 직접고장 | 보존기간이 지난 절연체 사용 | 절연특성의 불안정 |
| | 절연체내, 접합부의 기포 | 부분방전 발생, 절연파괴 |
| | 반도전성 차폐층 개방 | Gap사이 충전전류의 방전Arc로 인한 절연손상 |
| | Shield Gap에 부적합한 Surge침입 | Gap 절연파괴 |
| | Sleeve 외형 불량 | 부분방전에 의한 Sleeve 근처에서의 절연파괴 |
| | Sleeve 불균일 압축 | 과열에 따른 절연파괴 |
| | 절연체와 Shield의 분리 | 절연파괴 |
| | Sleeve와 Shield의 접촉부분 굴곡 | System-bird cage 손상 |
| | 짧은 반도전층 절단 | 고전계 발생에 따른 반도전층 끝부분 절연파괴 |
| | Stress Relief Cone의 누락 | |
| 절연체를 관통하는 사선방향의 고장 | 금속 Shield의 누락 | 고전계로 인한 절연파괴 |
| | 케이블절연체 표면의 평활도 불량 | 접촉면을 따라 기포형성, Tracking 발생 |
| 축 방향으로의 고장 | 주형품과 절연체의 접촉압력 부적당 | 부분방전 발생에 의한 불규칙한 고장 경로 |
| | 수분침입으로 인한 트래킹 | 절연체의 표면탄화, 트래킹 |
| | 단말부의 부적당한 Tape처리 | Tape가장자리를 따라 나선형 파괴 |
| | 케이블 절연체 표면 오염 | 접촉면에서 길이 방향으로 Tracking 발생 |
| 길이방향과 반경방향 이 조합된 고장 | 주형품의 크기가 과대 | 길이 방향의 Tracking |
| | 계면의 오염이나 부적합한 케이블 말단 처리 | 계면을 따른 Tracking 발생 후 반경방향으로 전진 |

3.1. 국외의 접속재 고장원인

캐나다의 Hydro-Quebec의 연구결과를 중심으로 살펴보면, 접속재에서 발생한 사고유형은 크게 세가지 형태로 구분되어지는데 첫째, 접속재 내부의 도체 접속부에서 발생하는 과열에 의한 사고와 접속재 절연체에서 발생하는 사고 등이 있다.

도체접속부 과열원인으로 접속 슬리브의 압착 잘못이 있으며, 이는 시공불량으로 과열사고의 주된 원인으로 간주하는 경우가 많다. 이러한 과열의 한 원인으로 heat cycling에 의한 접속 슬리브의 도전특성 변화를 유의해야 할 것으로 보이며, 한 예로 시공 초기에 $10\mu\Omega$ 의 저항치를 나타내던 슬리브가 사고후 $50\sim 600\mu\Omega$ 으로 변화된 결과가 이러한 사실을 뒷받침해 준다. 그리고 접속부위의 설치상태 불량으로 기계적 힘이나 통전 전류에 의한 전자기력이 주어지게 되면 접속상태가 안정되지 못하여 과열의 원인으로 진행되는 경우가 있기 때문에, 접속부위의 곡률이나 지지대 상태가 양호하게 유지될 수 있도록 유의해야 한다.

둘째 계면에서의 트래킹 현상에 의한 절연파괴 사고를 들 수 있다. 접속재 계면에서의 절연거리는 수 cm 정도로 동일 전압을 유지하고 있는 절연체의 두께에 비해 5배 이상되지만 계면의 오염과 계면형태의 열적변형 등의 요인들에 의해 절연내력이 약해지고 트래킹을 유발시키게 된다. 계면의 오염원으로는 실리콘 구리스의 열화와 수분침투, 그리고 접속재 시공시 유입된 불순물 등이 있다. 또한 통전전류로 인한 접속부에서 발생하는 장기간의 열적변화에 의해 고무재질의 불안정성이 접속재 재질에 포함된 요소들을 계면으로 유출시켜 트래킹에 대한 저항성이 낮아지게 한다.

접속부에서 계면에 인가되는 기계적 압력이 계면에서 방전발생을 억제하는데 중요한 역할을 한다는 사실로, 불규칙적인 온도의 변화는 계면에서의 열적, 기계적 힘의 균형에 좋지않은 영향을 주기 때문에 계면에서의 절연파괴 저항력을 떨어트리는 역할을

하게 된다.

세째 접속재 절연체에서의 사고는 비교적 발생 빈도수가 작으며, 대부분의 경우 접속재 절연층은 케이블의 경우보다 두꺼운 절연층을 가지도록 설계되고 있다.

3.2. 국내의 접속재 고장원인

국내의 절연체에서 사고가 발생할 경우 23kV급 XLPE 케이블의 절연층 두께는 7.4mm로 되어 있으며, 사용되는 접속재에서는 절연체인 EPDM의 두께가 8.25mm로 제작된다. 이는 단위 절연강도가 EPDM보다는 XLPE가 높기 때문이며, 그 정도는 접속재의 절연체로 사용되는 EPDM의 절연정도는 시료두께를 1mm로 했을 경우 30~40 kV/mm 범위의 특성을 나타내었으며, 동일한 조건에서 XLPE의 경우는 약 50 kV/mm 정도를 보였다. 따라서 전극길이에 따른 전계강도의 특성변화를 감안하더라도 절연체에 이상, 즉 결함에 의한 경우가 아니면 절연성능은 충분하게 확보될 수 있도록 설계되어 있다.

한편, 국내의 사고케이블 분석 결과 대체적으로 절연층의 불순물 농도가 선진 전력회사의 전력케이블보다 많이 함유되어 있으며, 절연층의 두께 방향으로 균일한 분포를 갖는 경우는 매우 드물고 절연체의 중간부분과 반도체층에서 상당히 큰 차이를 보였다. 사고 시료의 거의 모든 시료가 보여 주는 공통적인 특성은 반도체층으로 갈수록, 절연층의 특성이 저하되었다.

특히 금속성 불순물이 다량 함유되어 있고, 이 불순물은 고분자의 물리적 성질을 저하시키는 가장 중요한 요인으로 작용했을 가능성이 매우 크기 때문이다.

4. 직선접속재의 시험기준 동향

배전용 케이블의 접속재관련 시험규격을 살펴보기 전에 먼저 일반적으로 많이 알려진 관련규격의 기관들을 살펴보면, 미국을 중심으로한 지역에서는 IEEE, NEMA, ANSI 등이 있고, 유럽지역에는 국제기관으

로 IEC, CENELEC와 국가기관으로 프랑스의 UTF, 독일의 VDE, 이탈리아의 CEI, 스웨덴의 SEN, 영국의 BSI 등이 있으며, 그 외 프랑스 전력공사의 EDF, 이탈리아 전력공사의 ENEL 등을 들 수 있다. 일본의 경우에는 전기학회의 JEC, 전기사업연합회의 전력용 규격, 그리고 일본 전력케이블 접속기술협회의 JCAA 등이 있으며, 국내에는 한전 규격이 사용되고 있다.

상용주파 부분방전시험은 23kV급의 경우 IEEE 404에서는 시험전압 21.6kV (1.5U⁰)에서 3pC 이하로 되어있고, IEC 502의 경우 시험전압 20kV(1.73U⁰)에서 10pC 이하, 그리고 JEC 209에는 시험전압 17[kV](1.3U⁰)에서 10pC 이하로 되어있다. 여기서 시험전압의 기준으로 되어있는 U⁰는 표준대지전압을 나타낸다.

과통전 heat cycle시험의 전후로 상용주파 부분방전시험이 실시하도록 규정하고 있으며, 방전량의 허용기준치가 IEC 502의 경우는 10pC 전후가 동일하

지만, JEC 209의 경우는 전후가 각각 10pC, 50pC 등으로 다르게 규정되어 있다.

표 4. 1은 23[kV] 케이블 종단접속재 및 직선접속재를 대상으로 한 PS 117-810~868의 내용을 일부 나타낸 것으로 장기 과통전시험 전후 모두 시험전압 21.5×1.2[kV]를 인가했을 때 방전량의 허용치가 5pC 이하가 되어야 하도록 부분방전시험에 규정되어 있다.

장기과통전 시험후의 부분방전량 허용치가 JEC에서 다른 규격치에 비해 다소 높은 기준치가 제시되었는데, 이렇게 결정된 배경은 측정환경의 차이에 따라 각각 다른 잡음허용치를 기준으로 하였기 때문이다. 이는 현장측정을 대상으로 판정기준치를 설정하고자 하는 목적에 가장 적합한 기준치인 것으로 볼 수 있다.

즉 옥내에서 수행되는 초기 성능시험에서는 잡음 허용치가 5pC로 낮게 설정되어 있으나, 장기 과통전 시험의 경우는 측정이 옥외에서 수행되는 점을 고려하여 25pC으로 높게 설정되고, 허용방전량치는 이러

표 4.1. 접속재 시험 규격

| 시험 방법 | 특 성 | | 비 고 |
|---------------------|------------|------------|--|
| | 종단접속재 | 직선접속재 | |
| 충격전압시험 | 240kV | 240kV | |
| 부분방전시험 | 5pC | 5pC | - 시험전압 : 21.5kV×1.2 - Load Cycle시험 전후 실시하며 동일한 규정치 내에 들어야 함 |
| 건조내전압시험(1분간) | 65kV(rms) | - | |
| 건조내전압시험(6시간) | 55kV(rms) | 53kV(rms) | |
| 직류건조내전압시험 (15분간) | 105kV(평균) | 75kV(평균) | |
| 주수내전압시험(10초간) | 60kV(rms) | - | |
| RIV시험 | 100μV | - | |
| Track Resistance 시험 | 4.5kV, 6시간 | 4.5kV, 6시간 | |
| Load Cycle 시험 | 30일 | 30일 | |

한 외부잡음 허용치의 2배를 기준으로 결정하였다.

이러한 허용방전량치 설정배경은 외부잡음의 측면에서 다양하게 변화될 수 있는 현장측정의 여건을 감안할 때 IEEE, IEC 그리고 국내 규격에 비해 비교적 큰 방전량 값인 50pC를 현장의 활선진단 시스템의 판정기준치로 채택한 근간이다.

5. 음향방출기법을 이용한 접촉재 활선진단 시스템 개발

개발된 활선진단 시스템의 허용방전량 값은 앞장에서 기술한바와 같이 50pC의 판정 기준치로 채택하여 개발하였다.

본 연구에서 개발된 활선진단시스템은 하드웨어와 소프트웨어로 구성되었으며, 측정과 판정 과정에서 현장성과 간편성이 확보될 수 있도록 설계되었다. 그리고 현장에서 부분방전을 측정할 때 받게되는 외부잡음의 영향을 최소화하기 위해 방전에 의해 발생하는 음향신호를 측정하는 방식이 채택되었다.

활선진단시스템은 음향방출센서, 부분방전 검출기와 디지털타이저, 그리고 데이터 분석용 컴퓨터로 크게 구성되었고, 현장에서의 적용절차는 초기검출과정, 상세검출과정 및 방전패턴 검출과정을 통하여 접촉재의 양부를 판정토록 되어 있으며, 개발된 활선진단 장치의 장치구성은 다음과 같다.

본 시스템은 배전케이블의 직선접속재에 대한 현장진단용 활선진단을 위해 다음과 같은 요소들로 구성되었으며, 그림 5.1은 본 시스템의 외형을 나타낸 것이다.

(1) 음향센서 및 센서홀더

대상 접속재의 초기 측정시는 음향센서를 직접 손으로 접속재의 표면에 접촉시키거나 센서홀더를 사용하여 접촉하는 방식을 이용하여 측정에 소요되는 시간을 단축할 수 있게 하였다. 그리고 센서패터를 사용하여 곡면인 접속재 표면에 음향센서가 안정되게 접촉될 수 있도록 하였다.

(2) 부분방전 검출기

외형을 최대한 축소시켜 현장에서 휴대하고 측정하기 용이하도록 제작하였고, 맨홀과 같은 현장에서는 전원 유니트는 외부에 두고 본 검출기만을 휴대하여 측정할 수 있도록 전원용 케이블로 전원을 공급받게 하였다.

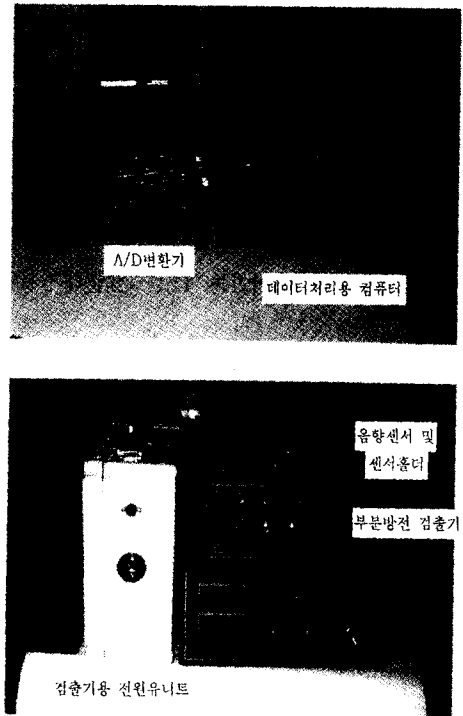


그림 5.1. 현장용 활선진단시스템의 외형

(3) A/D 변환기

현장에서 주로 사용되는 휴대용 오실로스코우프를 사용하므로 현장성과 안정성을 높였으며, 범용으로 사용이 가능하기 때문에 기기의 효율성을 높일 수 있다.

(4) 데이터 처리용 컴퓨터

노트북형 컴퓨터로 휴대가 간편하며 전원도 자체 배터리로 운용하였다. 그리고 A/D 변환기와는 RS-232C 통신방식에 의해 측정된 데이터를 수신하

고 측정조건을 송신할 수 있도록 하고 있다. 본 시스템 운용에 필요한 프로그램으로는 데이터 송수신용 프로그램과 수신된 데이터를 처리하여 측정된 방전이 어떤 결함의 종류에 의한 것인가를 구별하는 프로그램으로 구성된다.

(5) 검출기용 전원유닛

밧데리가 내장된 부분방전 검출기의 전원으로 4시간 이상 측정이 가능하며, 측정이외의 시간에 밧데리 충전기를 통해 충전할 수 있다.

(6) 밧데리 충전기

밧데리용 전원유닛을 충전시키기 위한 것으로 현장에서는 휴대하지 않아도 된다.

(7) 기타 부속품

센서패더, 동축케이블 (2m×4개), CT, 센서부착용 구리스

7. 맺음말

지중배전선로의 고장은 케이블 자체의 결함에 의한 고장보다는 접속부위의 시공불량, 제작불량 및 경년열화 등에 의해서 지중배전선로가 사고로 이어지므로 접속재 부위의 활선진단기술이 확보되어 고장정전을 감소시켜야 한다.

따라서 본 고에서는 접속재의 종류와 구조, 고장원인분석, 접속재 진단관련 규격검토 및 활선진단기 개발 기술에 대하여 서술하였고, 개발된 활선진단기가 향후 실계통에 확대되어 지중배전선로의 신뢰도를 향상시키는데 조금이나마 기여될 수 있기를 기대한다. 현재 개발품은 실계통 적용을 위해 전문업체에 기술을 이전·완료하였으며, 시사용 후 현장에 확대 보급 예정이다.

참 고 문 헌

- (1) 송일근 외, "지중배전선로의 준공시험기술 및 접속재진단기술 개발", 전력연구원, '98.1
- (2) 송일근 외 5, "23kV급 전력케이블 조립형 직선접속재의 활선진단기기 개발", 대한전기학회지, 통권 47호, 제3호, pp. 358-363, '98. 3
- (3) 송일근, 광희로, "개발된 전력용케이블 절연체의 부분방전 특성 해석", 한국조명전기설비학회지, 통권 53호, 제 11권 5호, pp. 93-102, '97. 10
- (4) 송일근외 5, "접속재 결함의 가속열화에 따른 방전특성 연구", 대한전기학회학술회의, pp. 1740-1742, '97. 7. 22
- (5) 송일근외 5, "초음파기법에 의한 접속재 내부 파티클 영향 연구", 대한전기학회학술회의, pp. 1853-1855, '97. 7. 22

◇著 者 紹 介◇



송 일 근 (宋一根)

1961년 3월 3일생. 1984년 숭실대 공대 전기공학과 졸. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸(석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸(박사). 1985. 9~현재, 전력연구원 전력계통연구실. 배전기술그룹 Project Leader/선임연구원. 관심분야 : 배전설비(케이블, 애자, 피뢰기, 변압기 등)의 활선진단 및 수명예측



김 주 용 (金周勇)

1969년 9월 27일생. 1992년 경북대 공대 전기공학과 졸. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸(석사). 현재 전력연구원 전력계통연구실 선임연구원.



이 우 영 (李佑暎)

1957년 10월 2일생. 1982년 한국전기연구소 입소. 1980년 경북대학교 전자공학과 졸업. 1982년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1982년~현재 한국전기연구소 산업전기연구단 신전력기기연구그룹, 고전압 대전력 측정분야 Technical Leader/책임연구원.