154kV XLPE 케이블 실선로 진단 연구

*이전선, *하체웅, *김충식, *김종철, **박창기, ***정현우
*LG전선, **한국전력, ***M-power

Diagnosis of 154kV XLPE cable system

*J.S Lee, *C.W.Ha, *C.S.Kim, *J.C.Kim, **C.K.Park, ***H.W.Jeong
*LG Cable, **KEPCO, ***M-power

Abstract - 국내 154kV XLPE 케이블 시스템은 장기 운전에 따른 열화진단 및 유지보수의 필요성이 증대되고 있다. 현재 실선로 진단에 적용되고 있는 기술은 열화상 측정, 부분방전 검출, 시스순환전류분석 및 저감기술등이 있다.

본 논문에서는 상기의 진단기술을 운전중인 154kV 실선로에 적용하여 결함을 검출한 사례를 기술하였다. 특히 부분방전 진단의 경우 접속함 내부에 존재하는 결함을 검출하여 사고를 미연에 방지한 것으로 사료된다.

1. 서 론

국내 154kV 초고압 XLPE 케이블 선로는 1983년에 최초 포설되어 20년 이상 운전되고 있어 설계수명에 도래함에 따라 장기운전에 따른 열화진단 및 유지보수의 필요성이 증대되고 있다. 최근 전자기술의 발달로 인하여 고성능 진단장비가 개발되고, 고감도 측정기술이 연구되어 신뢰성 있는 현장선로 진단이 가능한 단계에 있으며, 열화상 측정법, 고주파 부분방전 검출법(HFPD: High Frequency Partial Discharge Measurement)과 시스순환전류분석 및 저감기술이 적용되고 있다.

열화상 측정은 고성능의 열화상 카메라를 이용하여 접속함 외부의 온도를 측정하는 방식으로 도체의 온도추정이나 국부적인 과열현상을 검출하는데 사용된다. HFPD 부분방정 측정은 XLPE 케이블이나 접속함에서 발생된 결함을 검출할 수 있는 가장 효과적인 방법으로 제시되고 있으며, 국내에서는 345kV XLPE 케이블 선로(신영능포 #1 T/L)의 준공시험에 적용하여 선로의 안정성을 입증하였으며, 최근에는 노후선로(신인 T/L) 진단에 적용하였다.[1,2,3] 시스 순환전류 측정/분석 및 저감기술은 시스순환전류 과다에 따른 손실을 감소시켜 허용전류를 증가시킬 수 있는 케이블 계통운용에 상당히 중요한 기술이다.

본 논문에서는 상기의 진단기술을 현재 운전중인 실선로 진단에 적용하여 결함을 검출하여 문제를 해결한 사례를 제시하였다. 특히 부분방전을 검출하여 해체조사를 통하여 결함을 발견한 사례는 사고를 미연에 방지한 진단사례로 사료된다.

2. 본 론

2.1 열화상 측정

열화상 측정은 고성능의 열화상 카메라를 이용하여 접속함의 외부온도를 측정하는 진단방법으로 도체온도의 감시나 국부적인 과열현상을 측정한다. 그림1은 154kV 초고압 케이블 접속함의 열화상 측정 사진으로 주위의 케이블 온도보다 8℃ 이상의 온도 차이를 나타내었다. 이러한 국부적인 과열현상이 장기간 지속되어 온도를 상승시켜 절연체를 손상시키거나 지락전류와 같은 과전류가 순간적으로 유입되면 취약개소로 작용하여 사고로 이어질 수 있으므로 원인을 파악하여 문제를 제거하여야 한다. 본 선로에서는 케이블의 온도와 비교하여 5℃ 이상의 온도차가 발생되는 총6개소가 발견되었고 모두 동일한 부분에서 발열이 발생된 것으로 분석되었다. 접속함 조립도면 분석결과 이 지점은 접속외함 (동관)과 케이블 Al-Sheath 사이를 전기적으로 연결 (Sheath 순환전류 통로)하고 고정하기 위해 조립된 Al-Spacer 부위로 판명되었고 케이블의 열신축에 의한 접촉저항 증가로 발열될 수 있음이 분석되었다.

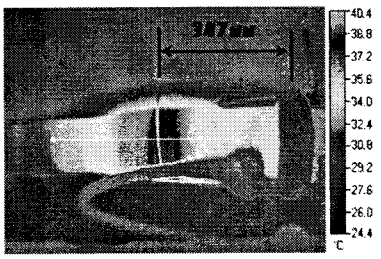


그림 1. 열화상 측정사진

이에 접촉저항을 줄여주어야 하므로 그림2와 같이 연공부를 감싸고 있는 에폭시 부분을 제거하고 편조선을 동관과 알루미늄 시스에 용접하여 전류의 새로운 경로를 만들어 주었다. 보수 후 재측정한 결과 모든 개소에서 국부과열의 문제점이 제거되었다.

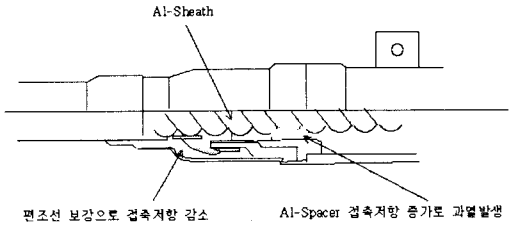


그림 2. 편조선 보강을 통한 국부과열 현상 해결

2.2 부분방전 측정

HFPD 부분방전 측정법은 XLPE 케이블 절연부에 존재하는 결함을 검출할 수 있는 가장 효과적인 방법으로 현장에서 수pC 이하의 고감도로 측정하였다. 측정결과 1개의 접속함에서 부분방전 신호가 검출되어 해체조사를 통하여 결함을 검출하였다. 접속함 교체 후 부분방전을 재측정한 결과 부분방전은 검출되지 않았다.

2.2.1 측정원리

절연접속함의 PVC 방식층 표면에 절연통을 좌 우로 하여 한 쌍의 금속 박 전극을 설치하고, 금속 박 전극과 보호동관 사이에 형성되는 커패시턴스로서 내부 부분방전을 커플링(coupling) 하는 방식을 적용하였다. 그림 3은 등가회로로서 접속함 내부에서 부분방전이 발생할 경우, 절연통을 경계로 한 반대 편 케이블은 C2에 의한 커플링 커패시터 역할을 하게 된다. 이때 금속 전극에 의해 형성된 C3, C4는 부분방전 펄스 전류의 경로를 만들고 Zd에 부분방전이 커플링 된다.

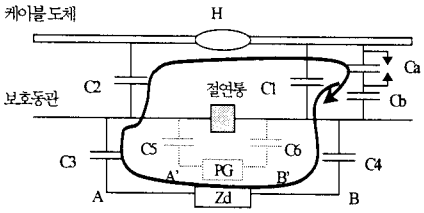


그림 3 부분방전 검출 원리

2.2.2 측정장비

그림 4와 같이 센서에서 검출된 광대역 신호는 앰프를 통해 측정기 본체에 입력된다. 측정기 본체에서는 주파수 분석을 통하여 S/N비가 가장 우수한 주파수 대역의 신호를 검출한다. PD 패턴 분석은 ∅-q-n 패턴을 분석하였다. 부분방전 측정은 3회 측정하였으며 1, 2차 측정은 휴대형 PD측정 장비를 이용하였고 3차 측정은 On-line PD모니터링 장비를 이용하여 7일간 연속 측정하였다. 또한 공중파나 접지로 유입되는 외부 노이즈 신호를 측정하기 위해서 안테나 센서, HFCT 센서, UHF 센서를 이용하여 측정하였다.

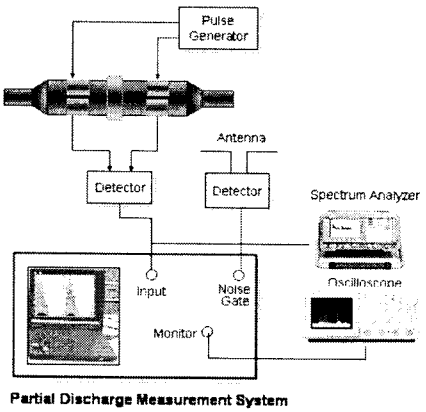


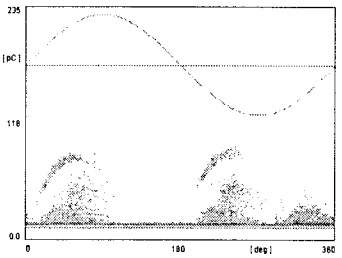
그림 4. 부분방전 검출 시스템

2.2.3 PD발생 위치추정

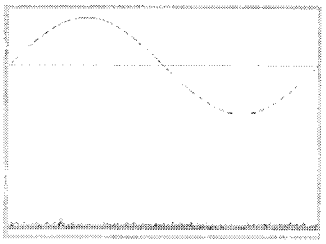
전력구에서 측정되는 신호의 유입경로는 3가지로서 제 1경로는 변전소에서 발생된 코로나 노이즈 신호가 케이블을 통해 유입된 경우로서 케이블을 따라 전파되면서 고주파 노이즈는 급격히 감쇄하고 저주파 노이즈 성분만 존재하므로 주파수 분석을 통하여 저주파 대역 신호를 제거한다. 제 2경로는 전력구 내부에 위치한 모터나 환풍기와 같은 전력기기에서 발생된 노이즈 신호가 공중파로 유입된 경우로서 안테나 센서를 전력구에 설치하여 공중파로 유입된 신호를 검출하여 제거한다. 제 3경로는 동일한 접지계통에 연결된 전력기기나 인접한 배전케이블에서 발생된 노이즈가 접지를 통해 센서에 유입된 경우로서 인접한 배전케이블 직선접속재에서 부분방전이 발생되고 있어 PD패턴 분석을 통하여 154kV 접속함에서 검출된 PD패턴과 배전케이블에서 발생된 PD패턴은 서로 다른 신호임을 확인하였다. 이와 같은 분석을 통하여 접속함 내부에서 PD가 발생되고 있음을 확인하였다.

2.2.4 PD패턴 분석

On-line PD 모니터링 검출 시스템에 검출된 대표적인 PD 패턴은 그림 5(a)와 같다. 이 같은 형태의 PD 패턴은 세계 각국의 많은 논문에서 보고 되었고 전형적인 보이드 부분방전 패턴이다. 접속함 내부에 존재 가능한 보이드는 내/외부 반도전층의 박리나 XLPE 내부에 존재하는 기공 형태의 보이드이므로, 이같은 결함이 존재할 것이라고 추정하였고 접속함 해체조사를 통하여 조사하였다. 그림 5(b)는 접속함 재작업 후 측정한 부분방전 패턴으로 부분방전 신호는 검출되지 않았다.



(a) 접속함 교체 전

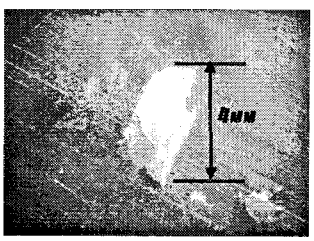


(b) 접속함 교체 후

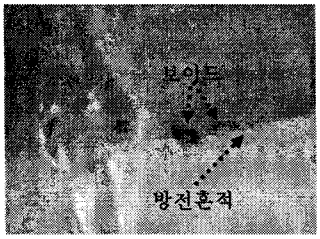
그림 5. ∅-q-n PD패턴 분석

2.2.4 접속함 해체조사 결과

PD 패턴 분석결과에 따라 외도 반도전층의 박리나 보이드의 결함을 검출하고자 시도하였고 그림 6(a)와 (b)와 같은 결함을 검출하였다. 그림 6(a)는 외부 반도전층의 하단부에 위치한 박리 결함이고 그림 6(b)는 보이드와 같색의 방전흔적이 검출되었다. 정밀분석결과는 차후 발표할 예정이다.



(a) 외도 박리 결함



(b) 보이드와 방전흔적(크기: 300㎛)

그림 6. 결함 검출

2.3 순환전류 분석 및 저감방법

지중송전계통에서 시스순환전류가 증가할 경우 시스손실을 증가시켜 시스의 온도가 상승하게 되고 결국 허용전류 감소의 한 요인이 된다. 관로포설의 경우 시스순환전류에 의한 손실률을 0.05로 가정하고 있는데 이 경우 시스에는 허용전류의 12%보다 큰 순환전류가 흐를 수 있으며, 36% 이상이 되면 허용전류를 10%이상 감소시킬 수 있다. 또한 전력구 포설의 경우 시스순환전류에 의한 손실률을 0.03으로 가정하고 있는데 이 경우 시스는 허용전류의 10%보다 큰 시스순환전류가 흐를 수 있으며, 48% 이상이 되면 허용전류를 10% 이상 감소시킬 수 있다.

2.3.1 측정 및 시뮬레이션 결과

시스순환전류를 측정하였던 진단대상 케이블에는 접속함 온도상승의 원인으로 접촉저항이 주 원인이 되고 있지만, 이는 과도한 시스순환전류 또한 접속함 온도 상승의 큰 원인이 된다. 왜냐하면 접속함에 발생하는 온도는 시스순환전류의 제곱에 비례해서 증가하기 때문이다.
그림 7에서 보듯이 진단 선로는 A S/S~J/B #3에 부하전류 대비 19%의 시스순환전류가 흐르고 있었으며, M/H #9~J/B #4에는 최대 38% 이상의 시스 순환전류가 흘러 접속함 내 온도상승 뿐만 아니라 허용전류의 감소, 손실증가, 케이블 열화, 고조파 발생 등의 문제점을 앉고 있었다.

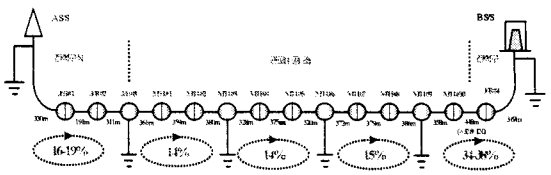


그림 7. 시스 순환전류 실측 데이터

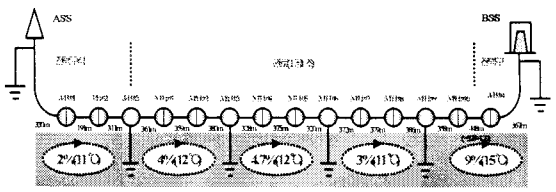


그림 8. 저감장치 적용에 따른 순환전류 및 접속함 온도

따라서 이와 같은 선로에 시스 순환전류 저감장치를 설치하였을 때 그림 8에서 보듯이 시스 순환전류는 부하전류 대비 10% 미만으로 흐르게 되어 그에 따라 접속함의 온도도 30℃이상에서 15℃ 이하로 50% 이상 저감하게 되어 일차적으로 시스 순환전류 감소에 따른 허용전류 증가 및 손실감소 뿐만 아니라, 접속함 내 온도상승 저하 등의 효과를 얻을 수 있다.

2.3.2 시스 순환전류 저감장치의 개발

저감장치가 갖추어야 할 조건은 실 계통을 고려하였을 때, 정상상태에서 시스 순환전류를 저감시켜야 하고 과도 및 사고전류가 흘렀을 때 전력계통 뿐만 아니라 저감장치 제품의 특성을 변화시켜서는 안 된다. 이러한 특성을 고려하여 시스순환전류 저감장치를 개발하였다. 그림 9는 실 제작 후 각종 TEST를 통과한 시스 순환전류 저감장치의 외관을 나타낸 것이다.

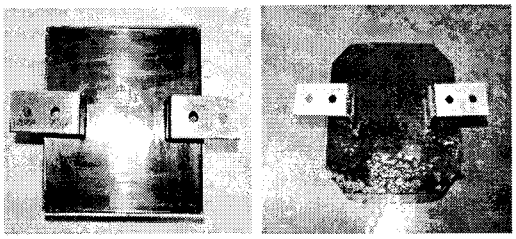


그림 9. 시스 순환전류 저감장치의 외관

3. 결 론

실제 154kV XLPE 케이블 선로를 진단하기 위해서 열화상측정, HFPD 부분방전 검출, 시스순환전류 분석 및 저감장치 적용연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 열화상 측정의 경우 접속함에서 발생된 국부발열 현상을 검출하였고 발열원인은 접속함 내부 알루미늄 스페이서 부분의 접촉저항 증가에 의한 발열로 확인되었다. 현재 실선로에 사용중인 동일구조의 접속함에 대한 관리가 요구된다.

- HFPD부분방전 측정의 경우 부분방전 검출과 해체조사를 통하여 접속함 내부에 존재하는 치명적인 결함을 검출하여 사고를 미연에 방지한 것으로 사료된다.

- 시스순환전류 분석 및 저감방법은 시스순환전류를 저감시켜 접속함의 온도 상승을 막을수 있을 뿐만 아니라 손실을 감소시키고 허용전류를 증가시킬 수 있는 케이블 계통 운용상의 중요한 기술로 사료된다.

[참 고 문 헌]

[1] 이전선, 김충식, 이동근, 공충호, 석광현, 이경욱, "HFPD검출법을 이용한 지중케이블 실선로 진단"전기설비 전문위원회 춘계학술대회 논문집, 2004

[2] J.S.Lee, C.S.Kim, S.H.Lee, K.Y.Lee, L.H.Lee,"Completion of 345kV long distance XLPE cable system" Proceedings of ICEE , pp.406-409, Sapporo, Japan, July 4-8,2004

[3] C.S.Kim, J.S.Lee, C.Y.Lee, W.N.Kim, "On-site PD measurement for after-laying test of 345kV XLPE cable system in Korea", Proceedings of J-K Symposium on ED & HVE, pp. 125-128, Nagasaki, Japan, Nov.. 6-7, 2003