

파괴 및 비파괴진단 비교분석을 통한 케이블 열화특성평가

(Insulation Aging Characteristic Assessment on the Power cables with the Comparative Analysis Between Destructive and Nondestructive Diagnosis)

이동영*

(Dong-Young Yi)

요 약

본 논문에서는 지중전력케이블을 대상으로 케이블의 절연열화특성 분석시험을 통해 케이블의 절연열화와 절연진단결과 및 파괴강도와의 상관관계에 대한 실증연구를 수행하였다. 시험대상 선로의 제조결함 여부를 확인하기 위해 가교도분석, 핫오일테스트 등을 실시한 결과 제조결함은 없는 것으로 확인되었다. 진단대상 선로는 3상 모두 장기간 사용에 의해 열화가 많이 진전되었고, 특히 B상이 수트리 길이 및 화학구조결함 농도 면에서 가장 열화된 케이블인 것으로 판단되며, C상, A상의 순으로 열화정도가 다소 감소함을 확인하였다. 상기 결과는 진단시험 및 파괴강도시험 결과와 일치하며, 따라서 열화시정수법을 이용한 진단장치가 열화상태가 심각한 케이블의 선별에 효과적인 진단방법임을 확인하였다.

Abstract

The insulation aging characteristics and structural analysis test were performed to analyze the correlations among the insulation deterioration, diagnostic results and the breakdown strength for the underground power cables. From the results of the degree of crosslinking test, hot-oil test etc., it could be confirmed that there were no manufacturing defects in the power cables under test. From the results of the water tree test and chemical structural analysis, it could be confirmed that the aging status of cable under test were very poor, especially for B-Phase and the degree of aging was increased in the orders of A, C and B-phase. From the above results, it could be concluded that the insulation aging characteristic analysis results were well consistent with the diagnostic and breakdown test results, and also confirmed that the diagnostic system under consideration was successful to discriminate the bad cables which is likely to cause cable system failure.

Key Words : Insulation Aging Characteristics, Chemical Structure, Diagnosis, Breakdown Strength

* 주저자 : 위덕대학교 에너지전기공학부 부교수

Tel : 054-760-1661, Fax : 054-760-1669

E-mail : dyyi@uu.ac.kr

접수일자 : 2009년 5월 20일

1차심사 : 2009년 5월 26일

심사완료 : 2009년 6월 1일

1. 서 론

전력케이블 절연진단은 사고를 초래할 수 있는 열화를 주 대상으로 하여 주절연층을 포함한 케이블시스템 전체를 범위로 케이블의 열화상태를 평가하는

데 그 최소한의 목적이 있다. 또한 전력회사 및 사용자의 입장에서는 상기의 목적을 가장 경제적으로 달성함으로써 선로 유지보수비용을 절감하고 전력공급의 신뢰도를 확보하는 것이 주된 목표가 될 것이다. 효과적이고 경제적인 절연진단을 위한 다양한 시도의 일환으로 절연저항검출법의 일종인 열화시정수법을 이용한 절연진단장치가 국내에서 이미 개발된 바 있다[1]. 진단장치의 현장적용성을 평가하고 진단신뢰도를 확인하기 위해서는 대상선로에 대한 비파괴시험법인 진단시험과 동시에 파괴시험법인 절연파괴시험 등의 전기적특성시험과 제조결함, 열화상태 등의 확인을 위한 가교도시험, 화학구조분석 시험 등이 필수적으로 요구된다. 따라서 본 논문에서는 노후화된 현장선로를 대상으로 제조결함 분석을 위한 가교도시험, 핫 오일 테스트 등을 실시하고 수트리시험, 화학구조분석 등을 통해 절연물의 열화 정도를 확인하고 이를 진단시험결과 및 전기적특성 시험 결과와 비교분석함으로써 국내에서 기 개발된 진단장치의 진단신뢰도를 검증해 보고자 한다.

2. 진단기법 및 열화특성시험

2.1 열화진단기법

전력케이블의 진단기법은 직류시험법과 교류시험법으로 나눌 수 있으며 직류시험법은 다시 절연저항법과 분극특성법으로 나누어진다. 절연저항법에는 누설전류법과 감쇠전압법등이 있고 분극특성법에는 동온완화전류법과 회복전압법등이 있다[2]. 분극특성법은 열화 시 발생하는 수트리 등에 의한 계면분극의 변화를 이용하여 케이블의 열화상태를 평가하는 방법으로 케이블 열화중 대표적인 수트리 열화의 진전과정 및 성장과정의 검출이 가능하고 진단장치 중 가장 낮은 시험전압(1[kV])을 사용하는 장점이 있으며 수트리관통과 같은 열화나 열화와는 무관한 가교부산물등의 저분자량물질이나 부풀음테이프층의 수분 등이 존재할 때 판정의 오류를 일으킬 가능성이 있는 단점이 있다[3-4]. 한편, 절연저항법중 열화로 인한 등가절연저항의 변화를 케이블의 열화시정수 측정 또는 충전전압의 감쇠정도로 검출하는 진

단기법은 수트리열화의 중기이후 즉, 열화상태가 불량에 가까울수록 검출성능이 높아지고 단말이나 접속부등의 계면열화에 의한 절연저항저하가 반영되는 장점이 있으나 수트리 초기열화는 거의 검출이 불가능한 단점이 있다. 열화시정수법을 이용한 진단장치는 진단대상선로의 평균적열화를 측정하는 Global Test 설비임에도 불구하고 관통수트리가 존재하는 경우 등과 같은 사고가능성이 농후한 국부적 열화의 검출이 가능하다.

절연저항법의 일종인 열화시정수법 또는 감쇠전압측정법을 이용한 배전용 전력케이블 포괄진단설비의 현장적용성 평가를 위한 현장진단시험 및 교류절연파괴장도시험 결과는 진단장치 개발시험의 일환으로 이미 보고된 바 있다[1]. 그림 1은 상기 시험에 사용된 진단장치의 진단기법 개념도이다.

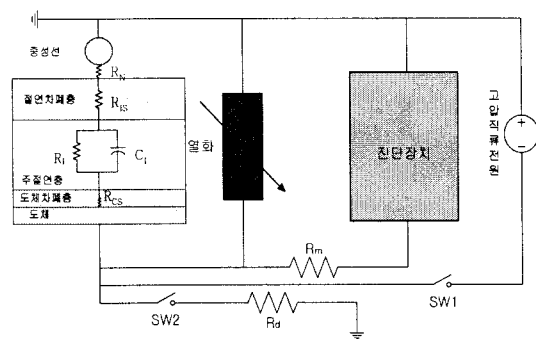


그림 1. 진단기법 개념도
Fig. 1. Schematic diagram of diagnosis

2.2 열화특성분석

열화특성 및 상태분석을 위한 시험선로의 케이블 제원은 진단장치의 현장적용시험에 사용된 선로와 동일하다. 열화특성시험은 22.9[kV]급 CN/CV 케이블을 대상으로 실시되었으며 케이블 규격은 325[mm], 포설년도는 1989년이다. 시험에 사용된 선로는 계통에서 약 13년간 사용되었으며 구간은 총 151[m]이다.

전력케이블의 절연열화상태에 대한 특성평가를 위해 진단시험 및 파괴시험이 완료된 케이블을 대상으로 아래와 같은 시험을 실시하였다. 파괴시험이

파괴 및 비파괴진단 비교분석을 통한 케이블 열화특성평가

완료된 케이블에 대하여 우선 도체 및 중성선의 부식 정도를 관찰하였으며, 제조결함 유무의 확인을 위해 계면불규칙 관찰 및 hot oil test, 가교도 분석을 실시하였다. 또한 수트리 및 화학구조결함을 분석하여 열화정도를 파악하였다.

계면불규칙 분석은 선반을 이용하여 케이블 단면을 절단한 후 광학현미경으로 관찰하였으며 핫 오일 테스트(hot oil test)는 끓는 실리콘 용액 중에서 절연층 내부에 존재하는 보이드등의 결함을 육안으로 관찰하는 방법으로 진행되었다. 화학구조결함 분석의 검사항목은 일반적으로 열화정도를 반영하는 ester, acid 등이며 시험은 적외선 분광기를 사용하여 절연층 두께에 따른 화학구조의 분포를 측정하였다[5].

3. 시험 결과

3.1. 열화특성 분석시험 결과

전력케이블의 절연열화상태 평가와 진단시험 및 파괴시험 결과와의 비교분석을 위해 상기의 시험 항목과 절차에 따라 케이블 열화특성분석시험을 수행하였다.

도체 및 중성선의 부식관찰에서는 도체에 미약한 부식이 있었으나, 중성선에는 부식현상이 나타나지 않았다. 케이블의 제조결함 여부를 판정하기 위한 계면불규칙 관찰 시험, 핫 오일 테스트 및 가교도 분석결과는 다음과 같다. 계면불규칙 분석 결과 절연층과 내부반도전층의 계면에서 약간의 불규칙 현상(돌기 또는 굴곡 등)이 발견되었으나 기준치 이하인 것으로 나타났으며 hot oil test 결과 절연층 내부에서 보이드 등의 결함은 발견되지 않았다.

그림 2는 가교도분석 결과이며 가로축에서 “1”은 내부반도전층 부근의 절연층을 “7”은 외부반도전층 부근의 절연층을 의미한다. 가교도 분석결과는 그림 2에서 보는 바와 같이 A상, B상, C상 모두 외부반도전층 근처에서 가교도가 다소 감소하지만 문제는 없는 것으로 나타났다.

이상과 같은 계면불규칙 검사, 보이드 분석 및 가교도 시험 결과, 시험 대상 선로의 제조결함으로 추정되는 열화현상은 없는 것으로 판단된다.

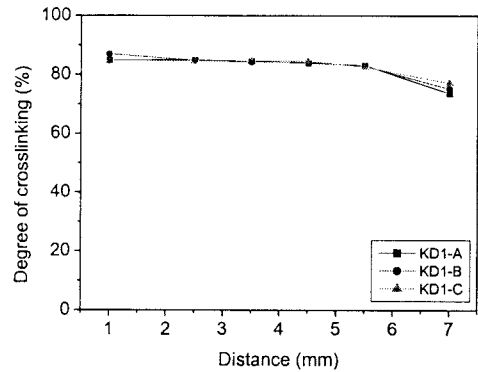
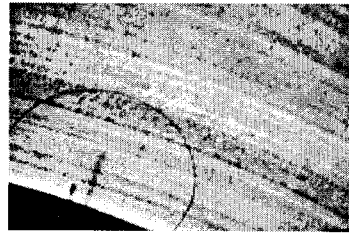


그림 2. 케이블의 가교도 분포
Fig. 2. Degree of crosslinking



(a) B상



(b) A상

그림 3. 수트리 시험 결과
Fig. 3. Water tree test results

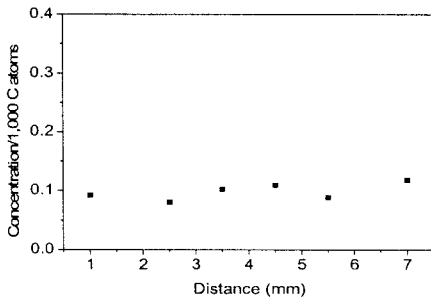
케이블의 대표적 열화형태인 수트리 열화정도를 확인하기 위한 시험으로 수트리 관찰시험을 실시하였으며 그림 3은 수트리 분석결과이다. 내부반도전층 부근에서 다수의 수트리가 발견되었으나, 길이는 1[mm] 이하로 짧게 나타났다. 그림은 대표적인 수트리만 나타낸 것으로 B상의 길이가 가장 길었고, A상과 C상은 0.4[mm] 정도의 수트리만 발견되었다.

다음으로 화학구조결함 분석을 통해 장기사용시 자연열화에 따른 케이블 절연체의 화학적 특성의 변

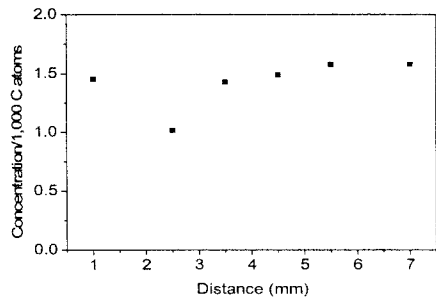
화를 조사해 보았다[6].

그림 4는 A, B, C 각상의 ester, acid 등의 화학구조결함 분포도이다. 그림의 가로축에서 “1”은 내부반도전층 부근의 절연층을 “7”은 외부반도전층 부근의 절연층을 의미한다. 일반적으로 ester 성분은 열화시 발생하는 carbonyl group과 밀접한 관련이 있기 때문에 분석에서 매우 중요하며 신품 케이블의 경우에는 1000개 탄소당 0.3개 정도의 ester가 발견된다.

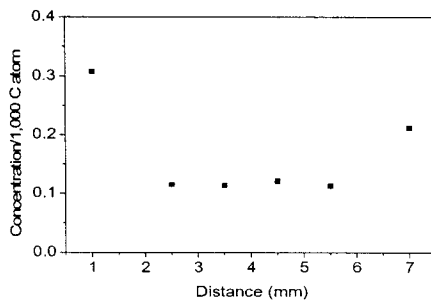
적외선 분광기를 이용한 화학구조결함 분석에서는 모든 상이 열화에 의해 ester 및 acid 성분이 크게 증가하였다. B상 케이블이 가장 큰 화학구조결함을 보여 열화가 가장 심함을 알 수 있으며, A상의 화학구조결함 농도가 가장 낮게 나타났다. 따라서 화학구조결함 분석결과, B상이 가장 열화정도가 심하고 C상, A상의 순으로 열화정도가 다소 감소함을 확인할 수 있었다.



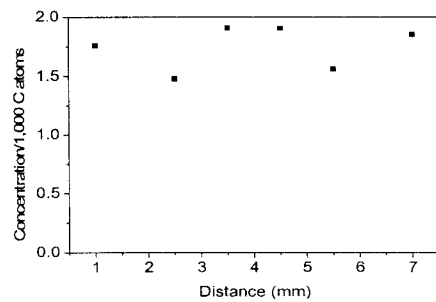
(a) A상-acid



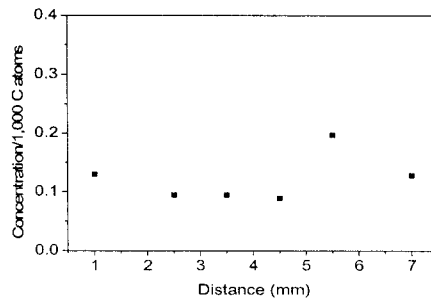
(b) A상-ester



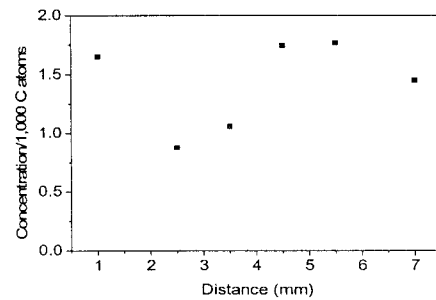
(c) B상-acid



(d) B상-ester



(e) C상-acid



(f) C상-ester

그림 4. 화학구조결함 분포도

Fig. 4. Distribution of chemical structural defects

3.2 진단 및 파괴시험 결과 비교

다음 표 1은 상기의 열화특성분석 시험과 동일한 선로를 대상으로 진행된 진단장치의 현장적용시험 및 파괴강도 시험결과이다[1].

표 1. 진단 및 파괴 시험결과
Table 1. Diagnostic and breakdown test results

상	진단결과		파괴시험결과
	평가	열화지수	평균파괴강도[kV]
A상	불량	4.21	96 (7.27U ₀)
B상	불량	4.94	76 (5.75U ₀)
C상	불량	4.32	108 (8.18U ₀)

진단시험결과 대상 케이블의 모든 상이 불량으로 판정되었다. 각 상별 진단결과를 보면 3상중 B상이 열화지수 4.94로 가장 열화상태가 심각함을 보여주고 있으며 C상과 A상은 열화지수가 각각 4.32과 4.21로 C상, A상의 순으로 열화정도가 다소 감소함을 확인할 수 있었다. 파괴강도시험은 각 상별로 5개 시료를 대상으로 이루어졌으며 각 상별 평균파괴강도시험결과를 보면 모든 케이블이 130[kV] 이하의 낮은 절연파괴강도를 나타내어 매우 불량한 케이블임이 확인되었으며 B상의 파괴강도 시험결과가 5.75U₀로 A상과 C상의 7-8U₀에 비해 가장 낮은 파괴강도를 나타내고 있다. 이때 U₀는 각상의 상전압이며 22.9[kV]급 케이블의 경우 13.2[kV]이다. 이상의 결과는 수트리 분석 및 화학구조결합 분석시험결과와 매우 잘 일치함을 확인할 수 있다.

전력케이블의 열화특성분석 결과와 진단시험 및 파괴강도 시험결과를 비교 분석해 본 결과, 진단대상 선로는 장기간 사용에 의해 열화가 많이 진행된 것으로 나타났으며, 특히 B상이 수트리 길이 및 화학구조결합 농도 면에서 가장 열화된 케이블인 것으로 판단된다. 또한 모든 상의 케이블이 낮은 교류절연파괴강도를 보인 이유는 수트리 성장과 화학적 열화에 기인하는 것으로 보인다.

4. 결 론

계면불규칙 검사, 보이드 분석 및 가교도 시험 결

과, 시험 대상 선로의 제조결함으로 추정되는 열화 현상은 없는 것으로 판단된다.

수트리 분석결과, 내부반도전층 부근에서 다수의 수트리가 발견되었으며, B상의 길이가 가장 길었고, A상과 C상은 0.4[mm] 정도의 수트리만 발견되었다. 화학구조결합 분석에서는 모든 상이 열화에 의해 ester 및 acid 성분이 크게 증가하였으며, B상이 가장 열화정도가 심하고 C상, A상의 순으로 열화정도가 다소 감소함을 확인할 수 있었다.

이상의 열화특성시험분석 결과는 진단시험 및 파괴강도시험 결과와 잘 일치함을 확인하였다. 진단대상 선로는 3상 모두 장기간 사용에 의해 열화가 많이 진행된 것이고, 특히 B상이 수트리 길이 및 화학구조결합 농도 면에서 가장 열화된 케이블인 것으로 판단되며, C상, A상의 순으로 열화정도가 다소 감소함을 확인하였다.

References

- [1] D.Y. Yi, "Development of Global Insulation Assessment System for Medium Voltage Power Cable Systems", Journal of the Illuminating and Electrical Engineers, Vol. 17, No.2, pp.66-72, 2003.
- [2] IEEE P-400/D14-1999, "IEEE Guide for Field Testing and Evaluation of the Insulation of Shielded Power Cable Systems".
- [3] M. Beigert, "Destruction Free Ageing Diagnosis of Power Cable Insulation Using the Isothermal Relaxation Current Analysis", IEEE 1994 ISB, Pittsburgh, June 1994.
- [4] S. Hvidsten, F. Faremo, J. Benjaminsen and E. Ildstads, "Condition Assessment of Water Tread Service Aged XLPE Cables by Dielectric Response Measurements", 21-201, Session 2000, CIGRE.
- [5] F.M. Rugg et al., "Infrared Spectrophotometric Studies on Polyethylene. II. Oxidation", J. Polym. Sci., pp.535-547, 1954.
- [6] EPRI Reports: EL-5387(RP 1782-1), EL-6207(RP 7897-2), EL-7076(RP 7897-1).

◇ 저자소개 ◇

이동영 (李東映)

1962년 7월 19일생. 1985년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1985~1986년 삼성반도체(주) 사원. 1990년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1995~1996년 기초전력공학공동연구소 선임연구원. 1996~1997년 한전 전력연구원 선임연구원. 1997년~현재 위덕대학교 에너지전기공학부 부교수.