전력케이블 열화 감시방안에 관한 연구

A Study on Monitoring Means of Insulation deterioration of Electric Power Cable

한학수* 민경윤** 유기선***

Han, Hag-Su Min, Kyung-Yun Ryu, Ki-Son

ABSTRACT

Electric Power cable is the apparatus that receives electric power from the Korea Electric Power Corporation and supplies electric power to electric train and annex facilities of each railway station. With substantial ripple effect during power blackout accidents, such power blackout accidents must be coped with by discriminating the status of insulation deterioration of electric power cable in advance.

Discrimination of insulation deterioration of the electric power cable is normally executed while the power is disconnected and it is very difficult to discover, at early stage, the insulation deterioration of the power cable in operational state since the duration of inspection is limited.

This research aims to consider method of diagnosing the insulation deterioration of electric power cable in On-Line state rather than diagnosis in Off-Line state in order to secure reliability of power supply by reducing duration of power blackout (accidental blackout and blackout during works) and by seeking reduction in equipment and manpower used in diagnosis of deterioration through prevention of the accident itself prior to occurrence through early restoration of accident due to insulation deterioration of the electric power cable and assessment of performance of the cable under operation.

1. 서 론

전력케이블은 한전에서 전력을 공급받아 전동차 및 각 역사의 부대설비에 전력을 공급하는 역할을 하는 설비로, 정전 사고 시 그 파급효과가 매우 커서, 케이블의 절연열화 상태를 미리 판별하여 정전사고에 대처하여야 한다.

전력케이블의 절연열화 판별은 정전상태에서 주로 시행되고 있고, 점검시간이 한정되어 있어 운전상태에서의 전력케이블 절연열화를 조기에 발견하기란 매우 어렵다.

본 연구에서는 케이블 절연열화에 따른 사고의 조기복구와 운전 중인 케이블의 성능파악 등을 통하여 사고 자체를 미연에 방지하여 정전시간(사고정전, 작업정전)을 감소시키고 열화진단에 소요되는 장비와 인력의 경감 도모로 전력공급의 신뢰성을 확보하고자 정전상태에서의 진단방법이 아닌 활선상태에서의 전력케이블 절연열화 진단방법을 고찰하고자 한다.

* 서울메트로, 기술연구센터, 정회원
E-mail : hagsu@seoulmetro.co.kr
TEL : (02)520-5964 FAX : (02)520-5969
** 서울메트로, 기술연구센터, 팀장, 정회원
*** 서울메트로, 기술연구센터, 차장, 비회원

2. 본 론

2.1 열 화

2.1.1 열화의 개념

전기기기에 이용되고 있는 각종 고분자 절연재료가 열, 전기, 환경 및 기계적요인 등에 의한 장기간 스트레스를 받아 초기의 물성치를 유지하지 못하고 변질되어 절연성능 및 수명이 저하되는 현상을 열화되었다고 한다.

2.1.2 열화 요인

가. 전기적 요인

상시의 운전전압, 사고시의 지속성과 전압, 계통의 운전과 함께 발생하는 개폐서지전압, 뇌서지전압 등과 같은 전기적 요인에 의해 전력케이블의 열화가 발생한다.

나. 열적 요인

단락, 지락에 동반하는 온도상승, 고온에서의 사용, 기계적 요인과도 관련 있는 부하변동에 동반하는 케이블의 열 신축운동 등과 같은 열의 요인에 의해 전력케이블의 열화가 발생한다.

다. 화학적 요인

포설상태의 케이블에 침입하는 물, 기름, 화학약품 등의 화학적 요인에 의해 전력케이블의 열화가 발생한다.

라. 기계적 요인

포설상태인 케이블에 가해지는 굴곡, 충격하중, 측압(側壓), 외상 등의 요인에 의해 열화가 발생한다.

마. 생물학적 요인

파충류, 곤충, 쥐 등 동식물에 의한 식해(食害), 공식(孔食) 등에 의해 열화가 발생한다.

2.1.3 열화 형태

가. 전기적 열화

○ 부분방전 열화

절연체중의 공극, 절연체와 도체, 차폐층간의 공극 등에서 발생한 부분방전에 의해 케이블이 점차 열화 되어 가는 현상으로, 공극 사이나 공극 내에서 방전이 반복되어 서서히 절연체를 침식하여 케이블 절연체의 절연성능을 저하시킨다.

○ 전기Tree 열화

케이블 절연체내의 국부 고 전계부에서 부분파괴가 발생하여 수지(樹脂)형으로 진전하여 가는 열화형태로 케이블에 인가되어 있는 전압이 저하하여도 고 전계를 발생하는 조건이 있으면 일어날 수 있다.

○ 수Tree 열화

물과 전계가 공존상태에서 발생하는 수Tree에 의한 열화형태로 전기Tree에 비해서 저 전계에서도 발생하는데, 전기Tree와의 차이점은 건조하면 Tree가 보이지 않고 없어진다. 수Tree 열화의 종류로는 절연체중의 Void 수Tree, 이물로부터 발생하는 Bow-Tie 수Tree가 있다.

나. 환경과 조합된 열화

○ 열적 열화

고분자재료가 장시간 고온에 접하면서 열과 산소에 의해 분자구조가 파괴되어 인장강도, 신장율의 저하 등을 가져와 노화되고, 노화에 의해 케이블의 성능이 저하된다.

○ 화학적 열화

기름, 약품 등이 내부로 침투하여 재료의 팽윤, 기계적강도의 저하, 용해, 화학적 분해, 배합물의

추출에 의한 경화, 중량감소 등의 화학적 손상 열화로 절연성능이 저하되고, 황화수소 등의 동 도체와 화학반응을 일으켜서 황화동, 산화동 등을 생성하여 절연성능을 저하시키고, 전계의 유무에 상관없이 일어나며, 전계가 있는 경우는 촉진하기 쉬운 화학Tree 열화로 케이블의 성능을 저하시킨다. 또한 화학Tree는 그것 자체의 전계가 높기 때문에 절연체의 파괴전압을 현저히 저하시킨다.

다. 기계적 손상 및 변형

외상, 부하변동에 따른 열 신축운동, 생물학적 요인 등 여러 요인이 조합되어 절연성능을 저하시킨다.

2.2 케이블 사고

2.2.1 케이블 사고 원인

가. 시공불량

Pulling 작업시 발생하는 Sheath의 손상, 접속을 위하여 외부반도전층 제거시 절연층 손상, 이물질 유입 등에 의해 케이블 절연이 파괴된다.

나. 제조결함

반도전층과 절연층 사이의 탄화된 고분자 찌꺼기가 존재하고, 절연층내의 이물질이나 Void, 내도와 절연층 계면의 함침(Convolution) 등에 의해 케이블 절연이 파괴된다.

나. 자연열화

케이블 운전시 유입된 수분과 전계의 복합작용으로 발생하는 수Tree, 수분에 의한 중성선 부식으로 인한 전압의 불균형, 반도전층에 존재했거나 수분과 함께 유입된 이온성 불순물 등에 의한 고분자의 산화 등으로 케이블 절연이 파괴된다.

2.2.2 케이블 사고 발생 및 절연열화 진단의 문제점

가. 케이블 사고 발생

과거에 제조, 포설된 많은 케이블이 운전되고 있고, 설치된 케이블은 설치환경 및 사용조건에 따라 몇 년 되지 않아 열화 되고, 최근 포설한 케이블도 시공불량이나 기타 열악한 환경에 놓여있어 단시간에도 열화 되어 사고가 발생한다.

나. 절연열화 진단의 문제점

운전 중인 케이블의 성능 파악은 원활한 전력공급 및 사고의 미연 방지를 위해 대단히 중요하여 케이블의 열화를 정기적으로 진단할 필요가 있으나, 정전상태에서 장비를 통한 케이블의 열화를 진단하는 것이 대부분이라 절연열화를 진단하는 실시상의 문제와 판정을 하기 위한 기술적 문제가 따른다.

○ 실시상의 문제점

케이블이 대량 포설되어 있어, 진단작업과 기록판정에 많은 시간, 인력, 비용이 소요되고, 정전하여 점검할 필요가 있으나 운전 중 정전의 어려움으로 영업운전 종료 후 점검하여야 하는 등, 안전성 확보의 어려움이 있다.

○ 기술적인 문제점

열화를 판정할 수 있는 판정기준이 불충분하고, 측정오차로 절여 진단의 어려움이 있고, 고장점 위치를 탐색하기 어려우며, 숙련된 기술을 요하고 있어 케이블의 절연열화를 판정하기가 매우 어렵다.

2.3 검 토

2.3.1 전력공급의 고 신뢰화를 위한 검토

전력케이블은 매일 열화가 진행되고 있어, 전력케이블의 효율적 운용과 고 신뢰성을 확보하여, 사람에 의한 점검의 한계 극복, 케이블 수명 연장, 대형사고 "0"화를 통한 전력공급 서비스 환경을 개선하기

위하여 전력케이블 열화진단 상시 감시체계 Tool을 구축하여야 한다.

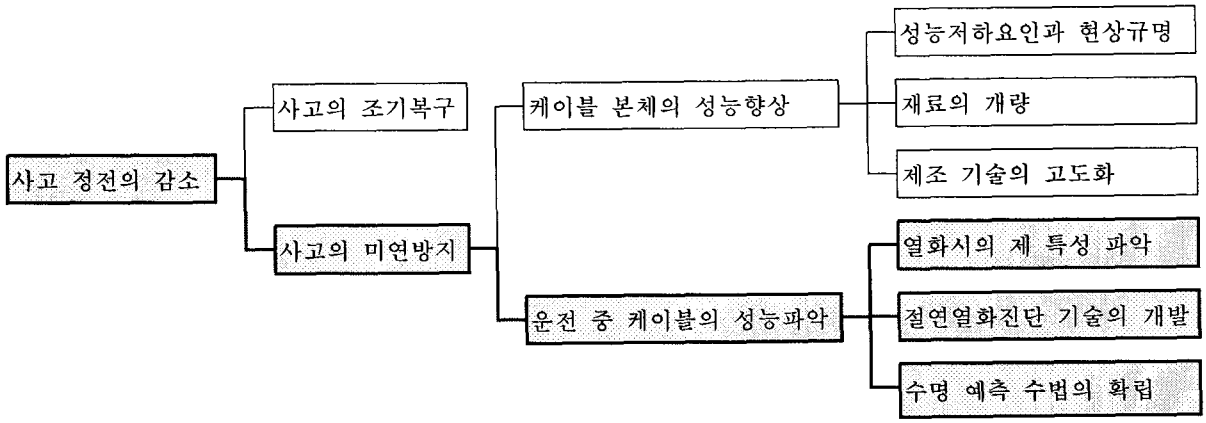


그림 1. 전력공급의 고 신뢰화를 위한 검토

2.3.2 케이블 사고 감소방법

가. 수Tree는 케이블의 절연열화와 가장 밀접하여 대부분의 절연열화를 차지하며, 케이블이 포설된 환경에 존재하는 수분이 화학적 성분이 함유되어 있거나 온수이면 깨끗한 물에 비해 케이블의 열화 진행속도가 빠르므로 케이블에서 수분이 존재하는 환경요소를 제거하여야 한다.

나. 대부분 외피손상 부분을 통하여 수분이 절연채로 침투하여 절연열화가 진행 되므로 외피 손상을 방지한다.

다. 중요한 사항이 빠질 수 있으므로 차단기 또는 설비와 분리하여 각 케이블마다 이력관리카드를 작성하여 케이블의 이력관리를 한다.

라. 짧은 시간에 많은 접속재 시공보다는 종단 및 직선접속재 시공시 세심하고 완벽한 시공을 한다.

마. 포설공사시 기계적 인장응력을 완화시키고, 지중선로용 피뢰기 등을 설치하여 Surge에 대한 보호대책을 수립하고, 열화 진단 및 평가 방법을 개선, 개발한다.

2.3.3 열화 진단방법의 종류

케이블의 절연열화를 진단하는 방법에는 크게 전기적 방법과 비 전기적 방법으로 구분할 수 있고, 이의 여러 가지 진단방법을 열거해 보면 아래와 같다.

구 분	진 단 방 법			비 고
전기적 방 법	정전(停電) 진단방법	직류법	절연저항법, (고압)직류누설전류법, 내전압시험법, 전위감쇄법(직류전압감쇄법), 역흡수전류법, 잔류전압법(회복전압법), 등온완화전류법(IRC), 잔류전하법(과도직류전류법)	비파괴시험
		교류법 (상용주파법)	유전정접(Tanδ)법, 내전압시험법, 교류손실전류법	
		초저주파법	유전정접(Tanδ)법, 부분방전(PD)법	
		준삼각파법	부분방전(PD)법	
		교직중첩법	유전정접(Tanδ)법, 부분방전(PD)법	
		교류전압파괴시험, 직류전압파괴시험, 충격전압파괴시험		파괴시험
	활선(活線) 진단방법	직류전압중첩법, 직류성분법, 활선Tanδ법, 저주파중첩법, 교류중첩법, 맥동검출법, 직류BIAS법, 접지선전류법, 초음파(AE)법, 온도측정법(RTD센서, OTDS, 정온식 선형 온도감지기)		비파괴시험
비전기적방법		외관검사, X선시험(Radiography), 해체검사, 절연체 Tree 관찰, 초음파법		
		특성분석시험		파괴시험

표 1. 케이블 절연열화 진단방법

2.3.4 활선상태에서의 진단방법

케이블 절연열화에 따른 사고의 조기복구와 운전 중인 케이블의 성능파악 등을 통하여 사고 자체를 미연에 방지하여 정전시간을 감소시키고 열화진단에 소요되는 장비와 인력의 경감 도모로 전력공급의 신뢰성 확보를 위한 활선상태에서의 주요 진단방법의 원리와 장·단점을 고찰해 보면 아래와 같다.

진단방법		원 리	장 점	단 점
직류성분법		교류전압 인가시 케이블 Sheath를 통해 대지로 흐르는 AC 누설전류 중 수Tree 정류작용에 의한 미소 DC 전류성분을 차폐 동테이프와 대지간의 접지선에서 검출	- 특별한 전원장치 불필요 - 접지선을 이용하여 충전부에 접촉하지 않고 측정하므로 간단하고, 안전 - Sheath의 이상유무, 열화 정도 확인	- 미주전류와 직류성분 전류의 판별이 필요 - 단말부 청소와 우천시 측정 고려 - 내·외도 수Tree 병존시 오 진단 우려 - Sheath 불량시 절연체 진단 불가
직류전압 중첩법		NGR 또는 GPT 1차 접지선을 통해 계통 모선에 직류전압(50V)을 중첩시켜 Sheath를 통해 대지로 흐르는 직류성분 검출	- 22.9kV까지 진단 가능 - 절연감도가 높다 - 케이블에 연결된 접속재도 동시에 열화측정	- Sheath 불량시 절연체 진단 불가 - 단말부 표면 누설저항이 낮으면 측정오차의 원인이 됨
저주파 중첩법		저주파 전압을 인가하고 케이블 접지선에 흐르는 저주파 전류 가운데 손실전류만을 검출	- 저주파, 저 전압으로 전원용량 작게 가능 - 관통, 미 관통 수Tree 열화 검출가능	- 관통, 미 관통 수Tree 검출 가능하나 명확한 구분 못함 - 케이블 단말 종류에 따라 측정치가 크게 변동
온도측정법	RTD[1] 센서	금속과 반도체의 전기저항의 온도의존성을 이용하는 것으로 온도에 따라 저항값이 변화	- Point 온도계측 - 고속응답	- 설치 Point만 측정 - 국부적이고, 소규모 - 장거리 전송시 별도 중계기와 선로 필요
	정온식 선형 온도 감지기	일국소의 주위 온도가 일정한 온도 이상이 되는 경우에 작동하는 것으로서 외관이 전선으로 되어 있는 것	- 1km 무 중계 측정 - 단거리에 유리	- 설정된 동작점 온도만 감지 - DB화 불가능 - 사전 사고 검출 불가능 - 늦은 응답
	OTDS[2]	광케이블 센서와 측정 장비 및 소프트웨어를 이용하여 케이블의 상태 (전류, 온도 등)를 자동 측정하고 중앙감시실에서 상시 감시 및 데이터 축적이 가능	- 연속적인 온도변화량 관측 및 DB화, 고속응답 - 사고 사전 검출 가능 - 6km 무 중계 측정 - 동작상태 확인 가능 - 전자유도장애 없음	- 설치비 고가

표 2. 활선상태에서의 주요 진단방법

위의 표 2 에서와 같이 활선상태에서의 주요 진단방법의 원리와 장·단점을 알아보았다.

활선상태 진단방법의 대부분은 이동용 계측장비를 활용하여 점검을 실시하기 때문에 점검에 소요되는 인력과 시간은 단전상태에서 측정하는 것과 동일하나, 광케이블을 이용한 광 분포 온도측정 시스템(OTDS)은 전구간의 고압케이블에 광케이블 센서를 설치하고 측정 장비 및 소프트웨어를 활용하여 중앙감시실에서 활선상태의 케이블 절연열화 상태를 상시 감시할 수 있을 뿐만 아니라 Data를 저장하여 관리하고 분석할 수 있어 가장 효율성이 높은 측정방법으로 판단된다. 따라서 OTDS의 열화 진단 및 감시 방법에 관하여 아래에 간략히 살펴본다.

2.3.5 광 분포 온도측정 시스템의 열화 진단

가. 측정원리

분포 온도 감지기술(Distribution Temperature Sensing) 및 광섬유 내에서 Raman 후방 산란광을

1) RTD센서(Resistance Temperature Detector sensor)

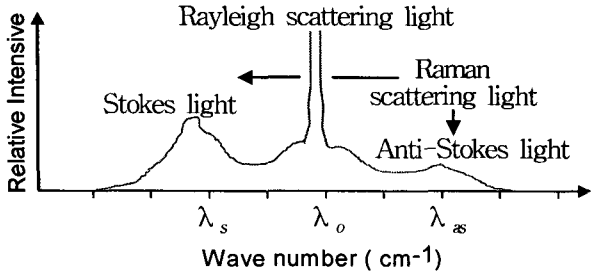
2) OTDS(Optical Temperature Distribution Sensor)

이용한 광 분포 온도측정 시스템(OTDS)을 이용하여 활선(活線)상태에서 열화감시 및 진단을 하는 것으로, 광섬유 내에 광이 입사되고 난 후 구성물질의 격자, 열 진동 중에서 횡파모드와 상호작용으로 반사되어 온 Raman 산란광 분석에 의한 온도정보 제공으로 열화 위치를 진단한다. 또한 케이블의 각종 상태를 측정하여 계측기기에서 일정한 주기로 여러 측정항목을 자동으로 측정하고, 상위 시스템 또는 중앙제어실 컴퓨터로 전송하여 Data의 기록과 평가 등을 하여 케이블 열화에 따른 사고를 예측하고 방지한다.

나. 열화 및 열화위치 판단(측정)

온도의존성이 있는 Anti-Stoke 신호는 온도계상에 이용하고, 온도의존성이 없는 Stoke 신호는 거리계산 등의 참조신호로 이용하는 것으로

○ 열화 판단(온도측정)은 광섬유내의 Stokes광과 Anti-Stoke광의 역 산란광 비를 측정하여 광 강도나 입사조건, 광섬유의 구조, 재질의 조성에 상관없이 매체의 절대온도를 계산하여 열화를 판단한다. 즉, Raman 산란광의 강도와 온도의 관계식을 이용하여 판단한다.



$$\frac{I_{as}}{I_s} \propto \exp^{(-\frac{hcv}{kT})}$$

I_{as} : Anti-Stoke 광의 강도

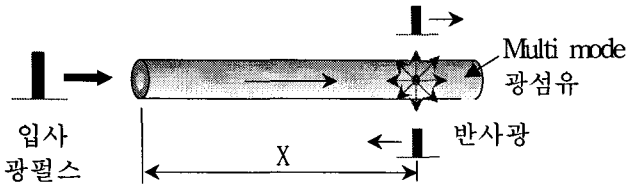
I_s : Stoke 광의 강도

h : Plank 상수　　k : Boltzmann 상수

v : 진공중의 광속도　　T : 입사광의 주파수

그림 2. Raman 산란광의 강도와 온도 관계

○ 열화위치 판단(거리측정)은 광섬유 내부에 광 펄스를 입사하면 산란광이 발생하는데 이 산란광이 반사(역 산란광)되어 돌아온 시간을 측정하여 열화위치를 계산한다. 즉, OTDR(Optical Time Domain Reflectometer)의 원리를 이용하여 거리판단을 한다.



$$x = c \times \frac{t}{2}$$

x : 광이 입사된 후 반사되어 온 지점까지의 거리

c : 광섬유 내에서의 빛의 전송속도(2×10^8m/s)

t : 산란광이 되돌아오는데 걸리는 시간

그림 3. 열화위치 판단

다. 측정시스템 구성

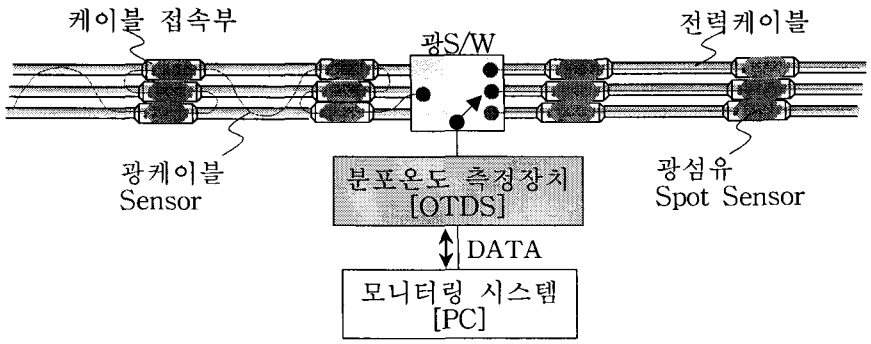


그림 4. 전력 감시시스템 구성도

라. 센서용 광섬유의 특징

○ 통신용 광섬유 자체를 온도 측정 센서로 이용할 수 있어, 한 가닥 광섬유를 포설하여, 넓은 지역의 전체 온도를 실시간으로 측정 가능하며, 전자기적 잡음(EMI Immunity)에 대한 면역성, 전기적 절연, 화학적 불활성, 내 부식성 등의 장점이 있어, 정규 진단시 생기는 인력 및 기타 자원의 소비를 감소시킨다.

○ 광섬유 자체가 센서와 전송로의 역할을 하므로 설치가 용이하고 현장 장비가 없어 유지보수가 간단하고, 한 가닥의 광섬유 사용으로 경량화, 소형화, 정밀 측정 및 설치 대상물 전체의 온도 측정 등 대부분의 물리량 측정이 가능하고, 기존 센서에 비해 감도가 우수하고 다 지점의 변화를 동시에 연속적으로 계측 가능(자유로운 배치, 표면 온도, 주변온도, 간편한 시공 등 시스템 확장용이)하여, 전력케이블의 열화를 상시 감시함은 물론 화재도 감시할 수 있어 2중화 효과를 얻을 수 있고, 컴퓨터를 이용한 데이터 관리(표시, 데이터 저장, 제어, 보관 등)에도 유리하다.

3. 결 론

활선(活線)상태에서 고장이 발생되기 전에 케이블의 각종 상태(온도, 전류 등)를 실시간(Real Time)으로 자동측정하고, 상위 시스템 또는 중앙제어실 컴퓨터로 전송하여 Data의 기록과 평가 등을 바탕으로 한 사고 예측 및 방지로 효율적인 운용과 고 신뢰성을 확보하고, 수명 연장 및 대형사고 "0"화 라는 전력공급 서비스 환경을 개선하기 위해서는 광케이블을 이용한 광 분포 온도측정 시스템(OTDS)을 통한 상시 감시체계 구축이 필요할 것이다.

정전시간(사고정전, 작업정전)을 감소시키고 열화진단에 소요되는 장비와 인력의 경감 도모로 전력공급의 신뢰성을 확보하기 위해, 운전연수에 따른 주기적 진단보다는 유지보수 비용 절감을 위해 고장발생에 대한 재발방지의 EBM(Event Based Maintenance)개념과 사용연수, 운전환경 등을 고려하여 최초고장을 방지하는 CBM (Condition Based Maintenance)개념의 적절한 조합이 필요하다.

참고문헌

1. 김주용 외, "지중 배전케이블 열화진단 신기술 동향", 조명.전기설비학회 논문집(제15권 제1호), 2001
2. 김보경 외, "고압 및 특고압 전력케이블의 절연진단 및 유지보수 관리방법", 전력기술인지, 2004
3. 이동영, "해저 케이블 시스템의 열화진단 및 유지보수", 조명.전기설비학회 논문집(제17권 제3호), 2003
4. 안상필 외, "원전 케이블 상태감시 방법", 한국전기공사협회, 월간전기설비지, 2002
5. 송재용 외, "고압 CV 케이블에서의 부분방전 측정과 위치검출 방법에 관한 연구", 한국철도기술연구원
6. 이상욱 외, "전력선을 이용한 화재 경보 시스템의 구성", Journal of Engineering Research (Vol.27 No.1), 1996
7. 임종성 외, "전력케이블 열화진단 기술", 전기학회지(제5권 제4호), 1996
8. 한국전기안전공사, "케이블 무정전 점검기법 현장 적용화 연구", 1996
9. 임수원, "전력케이블의 특성분석 및 비파괴시험에 관한 연구", 석사논문, 위덕대학교, 2002
10. megapowertech, "케이블 절연진단법 외"
11. Agilent Technologies, "광섬유를 이용한 분포형 온도센서"
12. LS전선, "광섬유 복합 전력케이블", "실시간 전력케이블 허용전류 산정 및 예측 장치"
13. fibertekeng, "Optical Temperature Distribution Sensor"
14. 박헌의, "A Study on the Failure Prevention and Fault Location Technology in Power Transmission Cable", 석사논문, 한양대학교, 1998