



고압 및 특고압 전력케이블의 절연진단 및 유지보수 관리방법 ①

김보경 / 메가파워테크 대표

목영수 / 한국전력공사 중부지점 지중배전부 과장

이관우 / 호원대학교 교수

박대희 / 원광대학교 교수



목 차

1. 서론
2. 전력케이블의 사고분석, 열화원인 및 절연진단
현상
 - 2.1. 지중전력케이블의 사고현황 및 실태
 - 2.2. 전력케이블의 절연열화요인 및 열화
PROCESS
 - 2.3. 전력케이블의 절연진단현상, 문제점 및 대책
3. 정전상태에서의 전력케이블 절연진단법 상세
4. 활선상태에서의 전력케이블 절연진단법 상세
5. 국내에서의 활선절연진단법 동향 및 적용사례
6. 전력케이블 유지보수방법
7. 맺은 말

1. 서론

오늘날 전력사용이 급증하면서 부하가 대용량화되는 추세에 따라 전기설비의 규모는 점차 대 규모화 되고 사회는 점점 고도 정보화 사회로 발전되고 있다. 따라서 설비의 사고 및 정전 사고 등은 높은 전기적 의존을 가진 고도 산업사회에 막대한 경제적 손실 및 장애를 가져다준다. 한편, 도시환경의 미화차원에서 지중 송배전선로는 점차 증가하고 특히 전력 케이블은 주로 공장 또는 대도시의 도로지반하에 분포하고 있어 사고시 복구에 많은 시간이 필요하며 교통 및 산업 활동에 막대한 피해를 끼치게 된다.

이러한 반면에 우리나라에서는 송배전용 케이블로 XLPE케이블(이하 CV케이블이라 칭함)을 포설하기 시작한지 30년에 이르고 있으며, 이러한 CV케이블은 설치한 후 설치환경 및 사용조건에 다르겠지만, 6~8년이 경과하면 열화가 발생하여 사고가 발생한다는 많은 절연파괴사고 사례 보고가 있다. 그리고, 근래에 포설한 케이블이라 할지라도 시공불량 및 기타 열악한 환경에 놓여있게 되면 단시간에도 사고에 이룰수가 있어 설비 및 수용가에 원활한 전력공급 및 사고의

미연방지를 위해 케이블의 열화상태를 정기적으로 진단할 필요가 있으며, 이를 위한 예방진단 기술의 연구가 필요로 하게 되었다.

본 자료는 이러한 배경하에서 케이블에서의 열화사고 현황, 절연 열화요인과 일본 전기학회에서 조사한 절연진단 조사 앙케이트 결과 분석, (특)고압 전력케이블의 정전 및 활선상태에서의 절연진단법, 국내에서 적용되고 있는 활선 절연진단법의 적용사례에 대해 기술하고, 전력케이블의 유지보수 관리방법에 대해 기술하고자 한다. 또한, 향후 기회가 된다면 저압전선로 및 부하기기의 절연감시방법에 대해 현재 사용되고 있는 메가에 의한 절연저항 측정법 및 클램프메타에 의한 누설전류법의 문제점의 대책으로 기대되는 활선상태에서의 절연저항 감시방법에 대해서 향후 기술할 기회를 가질 예정이다.

2. 전력케이블의 사고현황, 열화원인 및 절연진단현상

최근 전력수요의 증대나 고도 정보화의 진전은 전력수요에 높은 신뢰성을 요구하고 있으며 이 공급 신뢰성에서 최고로 중요한 것은 정전시간이다. 정전의 감소에서는 사고정전의 감소, 작업정전의 감소가 중요한데 작업정전의 감소방안으로는 현재 활선하에서의 열화진단방법이 개발되고 있다. 즉, 휴전작업으로 인한 정전시간을 감소시키고 열화진단에 소요되는 장비와 인력의 경감이 중요시되고 있다. 한편 사고정전을 감소하기 위해서는 정전시간의 감소, 즉 사고의 조기 복구대책이 중요하여 전력회사를 중심으로 검토가 행해지고 있지만, 사고 그 자체를 미연에 방지하는 것이 무엇보다도 중요하다. 이러한 사고를 미연에 방지하기 위하여는 CV 케이블 자체 성능의 향상 방법과 운전중 케이블의 성능을 파악하여 사고를 미연에 방지하는 2가지 대책을 들 수 있다. 케이블 자체의 성능은 초고압 케이블의 개발과 함께 제조기술이나 품질관리 등의 종합적 연구성고가 비약적인 향상을 가져와 최근 CV 케이블의 수트리 열화의 문제는 많이 감소하고 있다.

그러나 과거에 제조, 포설된 많은 케이블이 운전되고 있고 운전중인 케이블의 성능파악은 대단히 중요한데 반하여 사전정전진단인 현재의 여러 열화진단방법은 충분한 진단법이 되지 못하여 여러가지 새로운 열화진단기술이 연구되고 있다. 다음에 전력공급의 고신뢰화를 위하여 검토되고 있는 내용을 정리하면 표1과 같다.

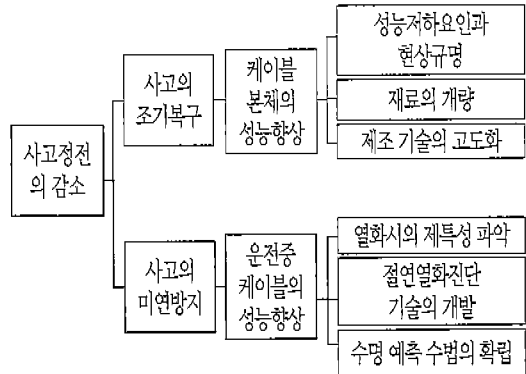


표 1. 전력공급의 고신뢰화를 위한 검토

2.1 지중 전력케이블 사고현황 및 실태

2.1.1 국내의 케이블 절연열화 사고의 현황

한전에서 발표한 2001년도 지중배전선로 고장 분석 및 예방대책 자료에서 표2와 같이 1997년~2001년 설비별 고장사례건수 사고통계를 케이블 및 접속재가 약 82%로 지중고장의 대부분을 차지하고 있다. 그리고 표3과 같이 원인별 고장 사례건수 통계를 보면 외상에 의한 사고가 39%, 열화에 의한 사고가 44%를 차지하고 있다. 한편, 표4와 같이 1991년도 한전의 지중선 고장현황 중 케이블 및 접속재의 사고 분석자료를 보면 외상에 의한 사고가 40%, 외상 이외의 사고가 60%를 차지하고 있으며, 외상 이외의 사고 60%에 대해 분석해보면 케이블이 36%, 접속재가 64%를 차지하고 있으며, 케이블에서는 자연열화가 42%로 높은 사고원인으로 점유하고 있으며, 접속재에서는 시공불량이 56%로 가장 높은 것으로 나타났다.



| | 케이블 | 접속재 | 개폐기 | 변압기 | 기타 | 계 |
|-------|-----|-----|-----|------|-----|------|
| 2001년 | 153 | 45 | 20 | 22 | 2 | 242 |
| 2000년 | 139 | 39 | 25 | 20 | 4 | 227 |
| 1999년 | 117 | 43 | 12 | 15 | 3 | 190 |
| 1998년 | 97 | 45 | 16 | 11 | 3 | 172 |
| 1997년 | 118 | 42 | 8 | 18 | 2 | 188 |
| 평균점유율 | 61% | 21% | 8% | 8.4% | 16% | 100% |

표2. 지중 배전선로의 설비별 고장사례건수

| | 외상 | 열화 | 제직불량 | 시공불량 | 기타 | 계 |
|-------|-----|-----|------|------|----|-----|
| 2001년 | 101 | 113 | 15 | 4 | 9 | 242 |
| 2000년 | 82 | 112 | 16 | 2 | 15 | 227 |
| 1999년 | 67 | 104 | 8 | 1 | 10 | 190 |
| 1998년 | 61 | 56 | 13 | 9 | 33 | 172 |
| 1997년 | 85 | 67 | 5 | 6 | 25 | 188 |
| 평균점유율 | 39 | 44 | 5.6 | 2.4 | 9 | 100 |

표3. 지중 배전선로의 원인별 고장사례건수

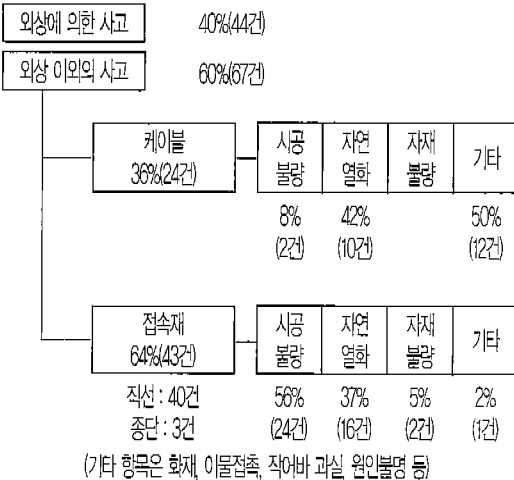


표4. 1991년도 지중전력 케이블 설비 고장현황 분석

따라서, 표2~표4의 통계자료를 종합 분석하여 보면 지중 배전선로 설비에 있어 케이블과 접속재의 효과적인 관리가 필요하며 특히 외상에 의한 사고에 대한 대책이 필요하다. 이 외상에 의한 사고는 타설비 시공을 위한 도로 굴착작업시 발생되고 있는 것도 많이 차지하고 있을 것으로 판단되지만, 다음에 기술하는 일본에서의 사고

통계 및 CV케이블에서 대부분을 차지하는 열화의 원인으로 파악되는 수트리(WATER TREE)가 케이블 외피의 손상부분을 통해 침입하는 수분에 의해 열화가 진행된다는 주요 케이블 사고 원인으로 되는 점을 간과할 수 없기 때문에 케이블 포설시 외피가 손상되지 않도록 공사하는 것이 중요하다. 그리고 또한 접속재에서는 시공불량이 과반수를 차지하고 있는 통계와 더불어 케이블과 접속재의 설치 시공 관리가 더욱 철저해야 한다는 사실을 말해주고 있으며, 또한, 장기간 운전중에 발생하는 열화사고를 미연에 방지하고, 신뢰도를 제고하기 위해서도 정기적으로 케이블 및 접속재의 절연진단을 실시해야 할 것으로 판단된다.

2.1.2 국외의 케이블 절연열화 사고의 현황

일본의 경우 1955년 후반, 배전선에 CV 케이블을 처음 사용한 이래 현재 배전용 케이블로서의 자리를 완전히 굳혀왔고 매년 막대한 양의 CV 케이블이 출하 및 포설되고 있다. 일본의 6.6KV 고압배전선로의 원인별 사고를 분석해보면 표5와 같이 외상에 의한 사고가 약42%, 외상 이외의 사고가 약 78%를 차지하고 있다. 이것은 한국에서의 케이블과 접속재 부분만 분석한 표4와 같이 외상에 의한 사고와 외상 이외의 사고비율이 거의 같은 비율이라는 점이다. 그러나, 일본에서는 6.6kV배전선로의 원인별 사고건수중 외상 이외의 사고비율을 분석해보면 접속재가 약 40%, 케이블이 약60%를 차지하고 있다.

| 사고원인 | 3.3kV배전선로 | | 6.6kV배전선로 | |
|----------|-----------|------|-----------|------|
| | 건수 | % | 건수 | % |
| 열화 | 67(12) | 58.8 | 192(49) | 24.7 |
| 자연열화 | 5(0) | 4.4 | 27(3) | 3.5 |
| 외상 | 49(17) | 12.3 | 325(2) | 41.8 |
| 시공, 자재불량 | 19(7) | 16.7 | 140(10) | 18.0 |
| 기타 | 9(4) | 7.9 | 93(20) | 12.0 |
| 합계 | 114(35) | 100 | 777(184) | 100 |

주) ()의 수치는 접속재의 사고건수를 의미함

표5. 일본의 고압배전선로의 원인별 사고건수

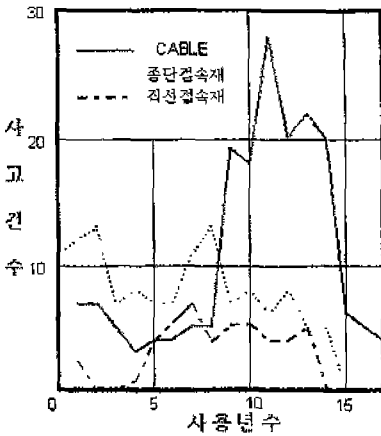


그림1. 일본의 고압배전선로의 사용년수와 사고건수

일본에서의 고압배전선로의 사용년수와 사고 건수를 분석한 그래프를 그림1에 나타냈다. 그림 1과 같이 접속재에서는 설치후 약 7년이내에 사고가 많이 발생하고 있는 것에 반하여, 케이블에서는 설치후 약 7년 이후부터 급격히 증가하고 있다. 이것은 접속재에서는 잘못시공한 부분에서 전계가 집중되면서 부분방전의 발생으로 인하여 설치초기에 사고가 많이 발생하는 것으로 판단되며, 케이블은 약 7년후부터 외피의 손상된 부분을 통하여 수분침투에 의한 수트리열화, 습식가교방식을 사용한 케이블 제조시 발생하는 수분함유에 의한 수트리열화 또는 특히 중단접속재의 잘못된 시공으로 인한 수분침투에 의한 수트리열화 등에 의해 열화사고가 발생되고 있는 것으로 판단된다.

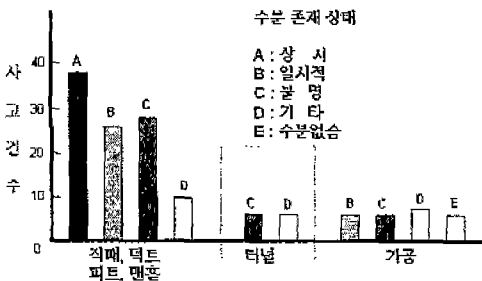


그림2. 일본의 CV케이블의 포설환경과 사고건수

한편, 그림2와 같이 CV케이블에서의 포설환

경과 사고건수 통계분석자료를 보면 CV케이블에서 수분이 존재할 수 있는 직매, 피트, 맨홀과 같은 포설환경에서 대부분의 케이블사고가 발생하고 있다. 또한 이 사항도 수분과 밀접한 함수 관계를 가지고 있어 CV케이블에서 가장 문제가 되는 물(수분) 존재여부는, 다음에 기술하는 수트리(WATER TREE)열화와 밀접한 관계를 가지고 있다는 사실을 말해주고 있다.

2.2. 케이블 열화요인 및 열화 PROCESS

2.2.1 CV케이블의 TREE현상

전기기에 이용되고 있는 각종 고분자 절연재료는 열, 전기, 환경 및 기계적요인 등에 의한 스트레스를 장기간 받으면 초기의 물성치를 유지하지 못하고 변질되기도 하고 극단적인 경우 파괴되기도 하는데 이것을 열화라고 하며 이로인해 수명이 저하하게 된다.

CV 케이블의 열화진행은 케이블 자체가 가지고 있는 결함의 형태, 조건, 사용 환경 등에 따라 크게 좌우되며, 이 주요 요인들에 따라 크게 수트리(WATER TREE), 화학트리, 전기트리로 나눌 수 있다. 여기서 트리(TREE)라는 말은 그림3과 같이 열화진행하는 모양이 나무가지 모양 같다고 해서 트리(TREE)라 칭해지고 있으며, 수트리(WATER TREE, 물트리 라고도 함)은 케이블내에서 수분이 존재하면 극부적으로 고전계가 발생하는 그곳으로 응집되어 나무모양으로 발전하는 트리이고, 화학트리는 황화물이 존재하는 분위기에 포설된 케이블의 경우에 황화물이 PE 층을 투과하여 도체인 등과 반응하여 황화물을 만들고 운전중에 이러한 분자들이 외부로 나가면서 나무모양으로 성장하여 가는 것이고, 전기 트리는 케이블내 공극이나 돌기와 같은 결격지점에서 부분방전에 의해 부분적으로 나무가지모양과 유사형태로 진전되는 트리로서, 궁극적으로는 VENTED TREE가 하나씩 수량이 계속 증가되면 절연파괴로 이어지게 된다.

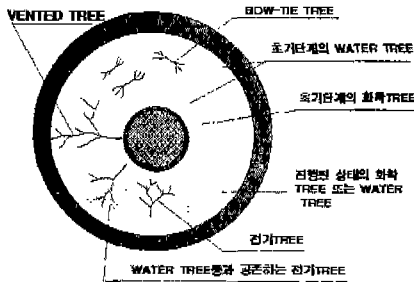


그림3. CV케이블의 트리형태 예

CV케이블이 수분흡습상태로 사용되는 경우 폴리에틸렌에서의 전계집중 및 물리화학 작용에 의해 수트리가 발생한다. 수트리에는 내부 및 외부 반도체층의 결합요소로 부터 신장하는 수트리(Vented Tree)와 절연체의 이물 및 보이드를 시작점으로 양쪽으로 신장하는 Bow-Tie 트리가 있다. 이 가운데 외부 반도체층과 내부 반도체층에서 발생하는 수트리는 전하의 공급과 수분공급이 이루어지면 쉽게 활성화되어 시간과 함께 진전하여 절연파괴에 이르며, 특히 고압 이상의 전력케이블에 있어서는 전기트리와 수트리는 케이블 절연체의 주요한 파괴요인이다.

수트리와 전기트리의 방지대책에 대해서는 그림4에 요약되어 있고, 케이블 제조시 첨가제를 넣는 절연체 자체의 개량 및 제조기술의 향상, 내외부 반도체층의 재료의 개량, 수트리 억제에 대한 연구가 진행되고 있으며, 케이블 구조 설계의 변경으로는 케이블의 절연체에 물이 침입되지 않도록 외부 차수형 케이블 및 도체 수밀형 케이블이 최근 국내에서 개발되어 사용중에 있다. 제조공정은 과거 수증기가교(습식가교) 제조로 인한 제조상 결함이, 전식가교방식인 신공정법과 내외부 반도체층의 압출방식을 3중압출방식으로 바뀌어 제조되고 있어 제조 및 구조상 수트리 및 전기트리의 원인을 많이 제거하고 있다. 그럼에도 불구하고, 포설 및 접속의 잘못으로 케이블에 물이 들어가는 경우가 많기 때문에 이에 따른 대책이 더욱 더 필요하다.

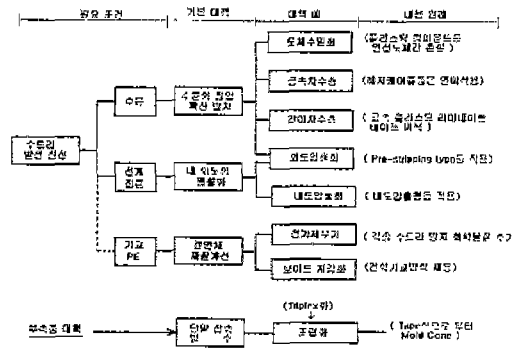


그림4. 전력케이블에 대한 각종 트리대책

2.2.2 CV케이블의 열화종류 및 열화PROCESS

케이블의 절연열화는 보통 사용되는 환경하의 여러요인들에 의해 중첩되는 복합열화의 상태로 발생되며 그중에서도 수트리를 포함한 전기적요인, 열적요인, 기계적 요인 등이 중요한 열화의 요인이 되고 있다. CV 케이블에서 각종 열화요소에 의한 열화진전 Process 와 열화신호를 요약하면 표6과 같다.

| 열화의 종류 | 고장 MODE | 열화 Process | 열화 신호 |
|-------------------|----------------|--|----------|
| 열적 열화 | 금속피로 (차폐층) | 과열 → 열신축에 의한 금속피로 → 파단 - Case C | 차폐층 저항증가 |
| | 열열화 (절연체) | 과열 → 산화, 분해 → 반응생성물이온 → 절연성능 저하 | 절연저항 저하 |
| 흡수 열화 (방식층 이상 침투) | 수 Tree열 해(절연체) | Case A 수분침투 → 수Tree 발생지전 → 절연체 관통 → 절연파괴 | 절연저항 저하 |
| | 부식파괴 (금속 차폐층) | Case B 수분침투 → 차폐층 부식손상 → 강도저하 → 파단 | 차폐층 저항증가 |
| | 열열화 (절연체) | Case C 파단발열 → 파단부 절연체 과열 노화, 탄화 → 절연파괴 | 절연저항 저하 |
| 전기적 열화 (Void, 들기) | 열열화 (절연체) | Case D 국부 고전계 → 부분방전 → 절연체 침식 → 절연파괴 | 절연저항 저하 |

표6. 열화요소에 의한 케이블의 열화 Process 및 신호

2.3 전력케이블의 절연진단 현상, 문제점 및 대책

전력설비의 절연과피사고를 미연에 방지하고 계통의 신뢰성 확보를 도모하기 위해 절연열화진단기술은 많이 향상되어 왔다. 그러나 지금까지 개발된 기술은 전력설비의 정지중에 있어서 절연열화진단에 관한 것이 대부분이 있다. 최근에는 전력설비의 보다 효율적 이용과 보수점검의 스피드UP, 성력화 등을 목적으로 하여 운전중에 있어 선로의 절연진단을 예방보전의 입장에서 할 필요가 높아지고 있다. 이와 같은 점을 감안하여 절연진단의 현상과 문제점을 명확하게 하기위하여 참고자료로 1992년 일본 전기학회에서 일반 공장수용가 및 철도회사를 대상으로 앙케이트 조사한 결과를 다음과 같이 정리하였다.

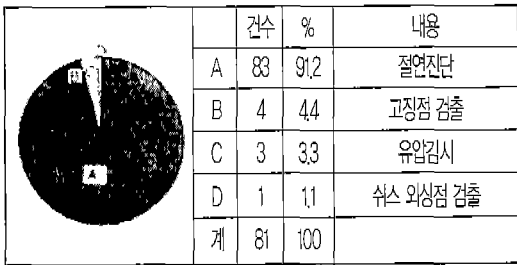


표7. 전력케이블의 절연진단관련 업무내용

| 항목 | | 합계 | 일반 | 철도 |
|------------|--------------|----|----|----|
| 정전 절연진단 | 절연저항측정 | 56 | 40 | 16 |
| | 직류고압누설전류측정 | 44 | 32 | 12 |
| | 잔류전압측정 | 1 | 1 | 0 |
| | 차폐등 Tape측정 | 2 | 2 | 0 |
| | Tan δ측정 | 8 | 4 | 4 |
| | 코로나측정 | 3 | 2 | 1 |
| | 교류전압전류시험 | 4 | 4 | 0 |
| 활선 절연진단 | 직류전압중첩법 | 4 | 3 | 1 |
| | 방식중절연저항측정 | 1 | 1 | 0 |
| | 차폐등등Tape절연검시 | 1 | 1 | 0 |
| | 고장점검출 | 4 | 3 | 1 |
| 쉬스 외상점 검출 | | 1 | 1 | 0 |
| 유압검시 | | 3 | 3 | 0 |

표8. 전력케이블의 절연진단방법의 현상

상기 표7,8를 보면 전력케이블에 있어 관리는 절연진단을 주로 실시하고 있으며, 절연진단에서는 정전 절연진단이 많이 실시되고 있고, 특히 절연저항측정, 직류고압누설전류측정이 대부분을 차지하고 있다. 이 직류고압누설전류측정법은 엄밀하게 구분하면 케이블 설치공사시 통상 우리나라에서 시험하는 내전압(내압)시험법과는 다르며, 이 사항에 대해서는 다음 호에 기술하는 정전진단법 설명시 상세하게 설명할 예정이다.

현재의 전력케이블의 절연진단의 문제점으로 실시면과 기술면을 나누어 표9, 표10에 표시하였다.

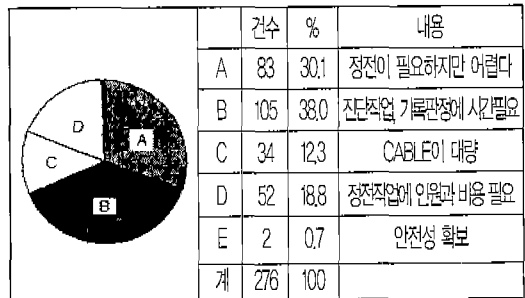


표9. 현재의 절연진단 방법의 문제점(실시면)

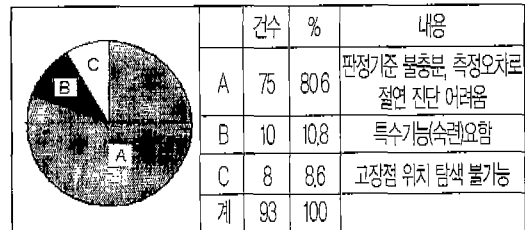


표10. 현재의 절연진단 방법의 문제점(기술면)

실시상의 문제점은 진단작업과 측정에 시간과 인력과 비용이 많이 필요하다는 것이다. 정전하여 점검할 필요가 있으나, 정전하기 어렵다는 내용으로 주로 정전진단시에 발생하는 문제점에 해당되는 것이고, 또, 기술적인 면에서는 판정기준이 불충분하고 측정오차 요인에 의해 정확한 절연진단을 할 수 없다는 내용도 정전진단시에 발생하는 문제점일 것이다. 이들 문제점의 비율

은 표11에 나타나져 있는 것 같이 절연진단에 많은 문제점이 있다는 것이다.

| | | 문제가 많다 | 보통 이다 | 문제가 적다 |
|---------|---------|--------|-------|--------|
| 일반 User | 절연진단 | 25 | 22 | 11 |
| | 고장점 검출 | 1 | 2 | 1 |
| | 쉬스 외상검출 | - | 1 | - |
| 철도 | 절연진단 | 5 | 7 | 7 |
| | 고장점 검출 | - | 1 | - |
| | 쉬스 외상검출 | - | - | - |

표11. 전력케이블의 절연진단 문제점 비율

현재의 전력케이블의 절연진단의 현상을 개선하기 위한 방법을 표12에 나타냈지만, 현실 절연진단 장치의 도입의 필요성이 매우 많았다. 이것은 표9의 정전이 필요하지만 정전하기 어렵다는 실시상의 어려움을 해결하기 위한 것이다.

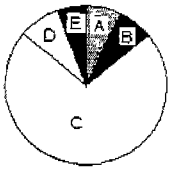
| | | 건수 | % | 내용 |
|--|---|----|------|-----------------|
|  | A | 6 | 7.1 | 절연진단 방법과 기준확립 |
| | B | 6 | 7.1 | 정전절연진단 기술 향상 |
| | C | 60 | 71.4 | 활선절연진단장치 도입 |
| | D | 7 | 8.3 | 저가격 간단한 진단장치 도입 |
| | E | 5 | 6.0 | 불량 고정점 탐색장치 도입 |
| | 계 | 84 | 100 | |

표12. 현재의 절연상태의 개선방법

절연진단을 실시함으로써의 기대효과는 표13에 나타낸 것과 같이 점검(진단) 및 보수 계획의 합리화를 도모하고 절연파괴 사고의 미연방지를 하고자 함에 있다.

절연진단시의 측정빈도에 관한 내용은 표14에 표시한 것과 같이 상시 또는 정기적으로 절연진단을 하여, 절연파괴의 사고를 미연에 방지하고 점검 및 보수계획합리화를 도모하고자 하고 있다.

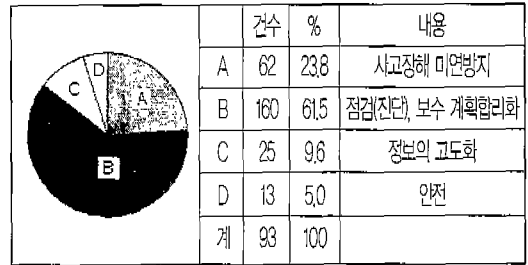


표13. 장비도입 기대효과

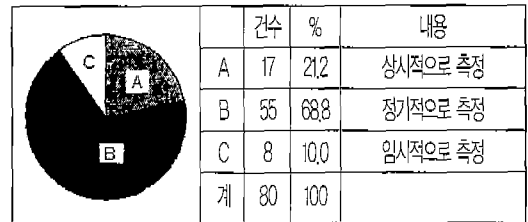


표14. 절연진단 측정빈도

위에서 살펴본 것은 1992년 일본 전기학회에서 일본의 여러 분야의 총67개 회사에서 절연열화진단기술의 전력설비로의 적용에 관한 앙케이트조사 결과중 전력케이블 분야의 결과중 일부만 기술한 것이지만, 현재 우리나라의 대규모 공장 및 중소규모의 공장에서도 케이블 관리자들의 현상과 기대를 나타낸 것이라 생각된다.

다음 호는 정전 및 활선상태에서의 전력케이블 절연진단법에 관한 상세 내용이 계속 이어집니다.

다음호에 계속됩니다

"To know is nothing at all; to imagine is everything."
"안다는 것은 전혀 중요하지 않다; 상상하는 것이 가장 중요하다."

Anatole France
(아나톨 프랑스)
[작가, 1844-1924]

