



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2021年 8月

碩士學位論文

지중 전력케이블 고장사례 분석을 통한 효율적 유지보수 연구

朝鮮大學校 産業技術創業大學院

電氣技術融合工學科

金 成 雄

지중 전력케이블 고장사례 분석을 통한 효율적 유지보수 연구

An Investigation on Efficient Maintenance by
Analysis of Failure Cases in Underground
Power Cables

2021年 8月 27日

朝鮮大學校 産業技術創業大學院

電氣技術融合工學科

金 成 雄

지중 전력케이블 고장사례 분석을 통한 효율적 유지보수 연구

指導教授 金 南 勳

이 論文을 工學 碩士學位 申請論文으로 提出함.

2021年 4月

朝鮮大學校 産業技術創業大學院

電氣技術融合工學科

金 成 雄

金成雄의 碩士學位論文을 認准함

委員長 朝鮮大學校 教授

曹錦培



委員 朝鮮大學校 教授

崔然玉



委員 朝鮮大學校 教授

金南勳



2021年 5月

朝鮮大學校 産業技術創業大學院

그 립 목 차

그림. 2-1	고체 유전체의 열적 불안정 조건의 개략적 표현	4
그림. 2-2	고체 절연체와 주위 매질과의 유전율 차이에 의한 전계분포 곡선	10
그림. 2-3	부분방전의 종류	12
그림. 2-4	공극의 모양	13
그림. 2-5	전자사태(electron avalanche)	13
그림. 2-6	전력케이블 구조도(CN_CV)	15
그림. 2-7	절연체 내의 수트리(water tree)	18
그림. 2-8	전력케이블 수트리 현상	19
그림. 2-9	수트리 종류	20
그림. 2-10	트리 현상에 절연파괴 순서	21
그림. 2-11	케이블 내 전기트리	22
그림. 2-12	XLPE 케이블의 절연결합	22
그림. 3-1	절연체 내부의 전하분포	26
그림. 3-2	케이블 열화상태별 방전전류 변화	26
그림. 3-3	$\tan \delta$ 의 증가회로	28
그림. 3-4	수트리에 의한 위상변화	29
그림. 3-5	주파수 및 전압에 따른 $\tan \delta$ 의 변동	29
그림. 3-6	케이블 열화와 VLF TD의 전압의존성	30
그림. 3-7	직류성분 측정회로도	32
그림. 3-8	직류전압 중첩법의 회로도	33
그림. 3-9	충전전류 삭제방식의 회로도	35
그림. 3-10	교류전압 중첩법의 회로도	36
그림. 3-11	시간 측정을 이용한 PD진단	38
그림. 3-12	주파수 측정을 이용한 PD진단	38
그림. 3-13	광주지역관리 관내 고압배전선로 계통도	40
그림. 3-14	외부요인으로 발생한 지중케이블 절연파괴	43
그림. 3-15	내부요인으로 발생한 지중케이블 절연파괴	43
그림. 4-1	고장점 대비 측정위치에 따른 파형 분석	49
그림. 4-2	활선진단(Cable wise) 측정방법	50
그림. 4-3	노안SS~광주차량기지간 전차선로 급전케이블	51
그림. 4-4	광주차량기지 전차선로 급전케이블 활선진단 결과 요약도(1차)	52
그림. 4-5	접속함(J7) 접속재 활선진단 측정 결과	54
그림. 4-6	부분방전 음향진단 장비	55
그림. 4-7	접속함(J7) 접속재 열화상 측정 결과	55
그림. 4-8	광주차량기지 전차선로 급전케이블 활선진단 결과 요약도(2차)	56
그림. 4-9	접속함(J7~J8, J21~노안SS)간 케이블 활선진단 측정결과	58
그림. 4-10	접속함(J18) 접속재 활선진단 측정결과	59

표 목 차

표. 2-1	전력케이블 구성요소 기능 및 특징	16
표. 2-2	전력케이블 열화요인과 열화형태	17
표. 2-3	XLPE 케이블의 절연결합의 종류	23
표. 2-4	XLPE 케이블의 절연결합의 변화과정	23
표. 3-1	열화도에 따른 케이블 판정기준	27
표. 3-2	IEEE - VLF TD의 열화판정기준	31
표. 3-3	KEPCO 2009 - VLF TD의 열화판정기준	31
표. 3-4	KEPCO 2012 - VLF TD의 열화판정기준	32
표. 3-5	지중케이블 현황	41
표. 3-6	광주지역관리단 년도 및 선구별 고압배전선로 장애현황	41
표. 3-7	광주지역관리단 원인별 고압배전선로 장애현황	42
표. 3-8	절연저항 측정 4단계 판정기준	45
표. 3-9	접지저항 측정 4단계 판정기준	45
표. 3-10	적외선 열화상 측정 4단계 판정기준	45
표. 3-11	지중송전선로 점검항목	46
표. 3-12	전차선로 급전케이블 측정항목	47
표. 3-13	전차선로 급전케이블 측정항목 4단계 판정기준	48
표. 4-1	활선진단(Cable wise) 판정기준	50
표. 4-2	1차 활선진단(Cable wise) 케이블 판정결과	53
표. 4-3	1차 활선진단(Cable wise) 접속재 판정결과	53
표. 4-4	접속함(J7) 부분방전 음향진단 측정결과	55
표. 4-5	2차 활선진단(Cable wise) 케이블 판정결과	57
표. 4-6	2차 활선진단(Cable wise) 접속재 판정결과	59

ABSTRACT

An Investigation on Efficient Maintenance by Analysis of Failure Cases in Underground Power Cables

Kim, Seong-woong

Advisor: Prof. Kim, Nam-Hoon, Ph. D.

Department of Electrical Technology Convergence Engineering,
Graduate School of Industrial Technology and Entrepreneurship,
Chosun University

Electric railway has used a lot of underground power cables for high-voltage and extra-high-voltage. The underground power cables are inspected and measured in accordance with the inspection cycle for preventive maintenance; however, there occurs electric power-supply failures due to cable deterioration.

While the electric power-supply failures except some accidental failures should be prevented by the inspection and measurement, it is not sufficient in the fields. Until recently, the electric railways has inspected and measured with only the megger test of insulation resistance in the off-line, so some causes of deterioration such as partial discharge or water tree cannot be determined in advance.

Although Korea Electric Power Corporation has introduced the diagnostic method of very low frequency (VLF) $\tan\delta$ with operation thorough many tests and research, which is not easy to introduce to the electric railway due to various constraints. There have been several inspection methods that can supplement the constraints in the live wire; however, they are still insufficient to perceive the deterioration such as water tree.

In this thesis, cable wise method was proposed for a inspection method in the live-wire state of the electric railways, which could detect not only

the partial discharge but also the water tree deterioration. Two-times measurements and analyses were performed by using the proposed cable wise method and the excellence of the cable wise method has been proven in the live-wire sate of the electric railways. If it is introduced into the maintenance method for the underground cable in the electric railways, it is believed that it will greatly contribute to the stability of power facilities.

단하기 때문에 절연체 내부의 열화 진행 상황을 파악할 수가 없으며 예방유지보수에 대한 한계가 존재한다.

전력케이블의 진단방법은 현재도 계속 연구가 진행되고 있으며 많은 진단방법이 개발되어 사용되고 있는 등 점차 발전하고 있다. 각 진단방법은 장·단점이 있으며, 현장의 제약조건에 따라 사용이 제한되기도 한다. 현재 철도현장에서는 절연저항 측정방법이 가장 많이 사용되고 있다. 본 논문에서는 절연열화의 메커니즘 및 전력케이블 진단방법의 특성을 살펴보고, 측정과 실험을 통하여 신뢰성이 높고 철도현장에 적합한 진단방법을 제안하고자 한다.

제2장 이론적 배경

제1절 고체 절연파괴 이론

고체의 절연파괴는 에너지 평형상태에서 불평형이 발생하여 파괴로 이어지게 되는 것으로, 에너지 불평형 원인에 따라 전자적 파괴 과정, 기계적 파괴 과정 등으로 나뉜다.

1. 전자적 파괴

전계에 의해 가속된 전도전자는 전계로부터 얻는 에너지와 격자와 충돌에 의해 잃는 에너지의 평형을 이루지만 고전계에서는 얻는 에너지가 잃는 에너지보다 커지게 되어 평형상태가 무너지게 되어 파괴되는 경우로 진성파괴(Intrinsic Breakdown)라고 한다. 이 과정에 의한 파괴 전계는 시험재료의 두께, 전극 재료에 관계하지 않고, 또한 전압의 파형에도 의존하지 않으며, 유전율 등과 같이 물질 고유의 정수로 생각된다.

전도전자가 전계에서 격자원자의 전리에너지 정도의 에너지를 얻어 계속 기하급수적으로 전자를 생성하여 전자사태를 일으켜 파괴되는 경우를 전자사태파괴(Electron Avalanche Breakdown)라고 한다. 전자사태파괴의 모델은 1개의 전자에 기초한 단일 전자 모델과 전자의 에너지 분포를 고려한 사태 증배 모델이 제시된다.

매우 얇은 유전체에 고전계를 인가하면 전위 장벽이 낮아지고, 전계가 어느 정도 이상으로 증가하면 양자역학적 터널효과에 의하여 가전자대의 전자는 전도대로 천이한다. 이로 인하여 전류가 증가하고, 이에 의한 격자로의 에너지 주입이 격자계를 임계온도 이상 상승 되었을때 절연파괴가 일어난다. 이와 같은 파괴를 제너파괴(Zener Breakdown) 혹은 전계방출파괴(Field-Emission Breakdown)라고 한다. 터널효과가 10^7V/cm 이상의 전계에서 발생하기 때문에 매우 얇은 유전체에서 제너파괴가 나타나게 된다 [5].

2. 열적 파괴

절연체에 전계를 인가하면 주열손실, 유전손실에 의해 발열이 되는데, 이는 전계 E^2 에 비례한다. 또한, 이 발열은 열전도에 의해 방산되어 격자계 전체가 열적평형 상태에 이른다. 그러나 전류가 계속 증가하면 방산열 보다 많은 열이 발생하여 평형상태가 무너지게 되고, 시간에 따라 계속적인 온도 상승으로 재료는 용융되어 파괴되는데 이를 열적파괴(Thermal Breakdown)라고 한다. 그림 2-1은 절연체의 전계 변화에 따른 열적 불안정성의 조건을 보여준다. 전계가 E_3 일 때의 발열곡선과 방열곡선 그래프를 보면 온도 T_1 에서는 안정되지만, 온도를 계속 상승시켜 T_2 가 되면 절연체는 열적 불안정 상태로 파괴에 이르게 된다. 즉, 온도가 높을수록 보다 낮은 전계에서 열적 불안정성이 나타난다 [5].

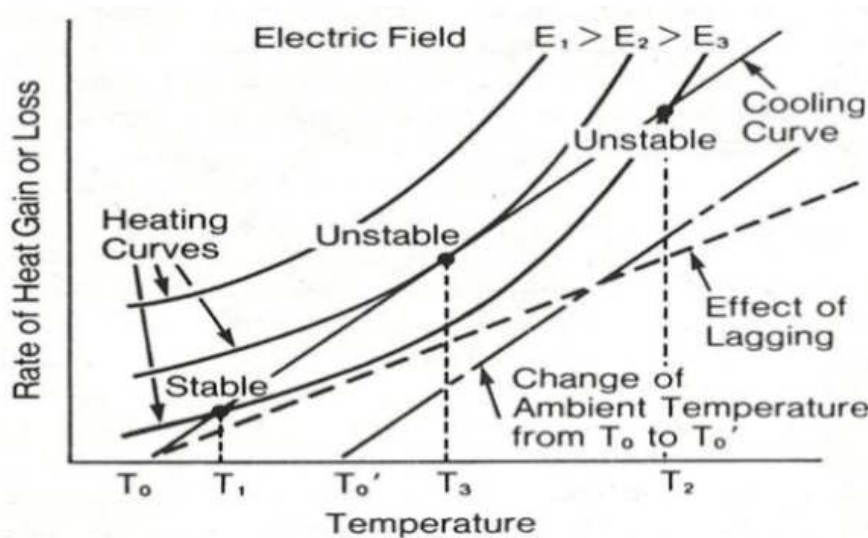


그림 2-1 고체 유전체의 열적 불안정 조건의 개략적 표현

상기 열적 불안정성에 대한 조건은 식 2.1과 같이 주입되는 에너지와 방사되는 에너지의 열평형 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$C_v \frac{dT}{dt} - k \nabla^2 T = \sigma E^2 \quad (2.1)$$

여기서 C_v 는 단위체적 당 비열 k 는 열전도율 σ 는 도전율을 의미한다. 그리고 교류 전계 하에서는 σ 를 $\sigma + w\epsilon_0\epsilon''$ 으로 대체하여야 한다. 좌변의 첫 번째 항은 절연체의 온도상승에 기여하는 단위 시간 당의 에너지를 나타낸다. 이것이 단위 시간당의 발열 에너지 σE^2 와 일치함을 의미한다. 또한, 전계를 가하는 방법에 의하여 식 2.1은 정상열파괴와 충격열파괴의 두 가지 경우에서 생각할 수 있다.

정상열파괴(Steady State Thermal Breakdown)는 계속 정상상태가 유지되도록 서서히 전계를 상승시킬 경우에 발생하며, 식 2.2에서 좌변의 첫 번째 항이 생략된다. 따라서

$$-k\nabla^2 T = \sigma E^2 \quad (2.2)$$

식 2.3이 된다. 전계가 인가되고 있는 넓은 판상의 시편을 생각하여 식 2.2를 풀어주게 되면 전기 전도를 전계와 독립적으로 가정하여 생각할 수 있다. 또한, 파괴가 녹는점 T_m 에서 파괴가 일어난다면 절연파괴 전압은

$$V_c^2 = 8 \int_{T_u}^{T_m} \left(\frac{k}{\sigma} \right) dT \quad (2.3)$$

로 되고, 여기서 T_u 는 전극 표면에서의 주위 온도이다.

충격열파괴(Impulse Thermal Breakdown)은 열 시정수에 비해 매우 짧은 시간에 전계를 상승시키면 식 2.1에서 열방사 항이 무시되므로 절연체는 식 2.4에 의해 가열된다.

$$C_v \frac{dT}{dt} = \sigma E^2 \quad (2.4)$$

절연체의 파괴가 T_m 에서 일어날 경우 식 2.4를 풀어주면 충격열파괴 전계가 구해진다. 현재 주어진 조건에서 정상열파괴 전계 E_C 이상의 전계 E_B 를 인가하

면 절연체의 온도는 상승하여, 파괴 온도 T_m 에 도달하게 된다, 그 때까지의 소요시간 t_b 는

$$t_b = \int_0^{t_b} dt = C_v \int_{T_u}^{T_m} \frac{dT}{\sigma E_B^2} \quad (2.5)$$

로 된다. 위 식에서 t_b 가 작기 위해서는 매우 높은 E_B 가 필요로 하는 것을 알 수 있다 [5].

3. 전기-기계적 파괴

절연체에 전계를 인가하면 전극간 압력인 맥스웰 응력(Maxwell Stress)이 발생한다. 이에 의해 시편은 약간씩 늘어나 그 응력은 탄성 한계치에서 변형이 발생하고, 탄성 한계치인 기계적 강도보다 크게 되면 기계적으로 파괴가 일어난다. 이 한계에서의 전계가 파괴전계 이다. 이때 맥스웰 응력은

$$\frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{2} \left(\frac{V}{d} \right)^2 \quad (2.6)$$

으로 나타낼 수 있고, 외력은

$$Y \ln \frac{d_0}{d} \quad (2.7)$$

로 나타낼 수 있는데, 여기서 d_0 는 시편의 초기 두께, d 는 수축된 때의 두께, Y 는 영률(Young's Modulus)를 의미한다. 식 2.6과 식 2.7이 일치되면 힘의 평형이 이루어지는데, 식을 정리하면

$$\frac{1}{2} [\epsilon_0 \epsilon_r \left(\frac{V}{d} \right)^2] = Y \ln \left(\frac{d_0}{d} \right) \quad (2.8)$$

이 되고, 따라서 이 식을 만족하는 전압 이상이 인가되면 평형이 유지되지 않

으므로 파괴전계

$$E_B = \frac{V_c}{d} = \left(\frac{Y}{\epsilon_0 \epsilon_r} \right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{1}{2}\right) \quad (2.9)$$

가 된다. 또한 영률은 온도가 상승함에 따라 감소하므로 이 파괴 이론은 $\frac{\partial E_B}{\partial T} < 0$ 이 되는 고온 파괴 특성을 갖는다 [5].

4. 2차 인자가 절연파괴에 미치는 영향

실제 고체 절연체의 파괴강도를 측정할 때, 온도, 인가 전압, 전극 현상, 매질 등의 2차 인자들에 의해 절연 파괴강도가 낮게 측정되는 경향이 있다. 이러한 2차 인자들을 완전히 제거하면 높은 파괴강도를 얻을 수 있지만, 그 방법은 간단하지 않다. 따라서 실용적인 견지에서 절연 파괴강도 측정 시 전극계, 전압 상승률, 전압 파형 등이 IEC 등의 시험 규격에 의해 규정되어 시편 간 상호 비교가 가능하도록 시험이 진행되며, 각 인자를 부기하도록 하고 있다. 절연파괴 시험 시 영향을 미치는 인자들을 살펴볼 필요가 있다.

고체 절연체의 두께와 파괴전압과의 관계는 재료, 연구자, 기타 전극의 모양, 전극과 재료와의 접촉상황 등에 따라 다르나 평행판 전극을 사용한 경우의 관계는

$$V = Ad^n \quad (2.10)$$

와 같고, V 는 파괴전압, d 는 두께, A 는 정수이고, n 은 재질, 전압파형, 두께의 범위에서 변화하는 0.3~1 사이의 값이며, 연구자에 따라 $\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$, $\frac{1}{3}$, 1 등의 값을 취하고 있다.

, 월터(Walter)는

$$V = Ad + B \quad (2.11)$$

, 스타인메츠(Steinmetz)는

$$d = AV + BV^2 \quad (2.12)$$

, 슈만(Schumann)은

$$V = \frac{d}{Ad + B} \quad (2.13)$$

등의 관계식을 제시하고 있다. 이상은 평행판 전극의 경우인데, 구 전극에 대해서는 대체로 식 2.10을 사용할 수 있다. 일반적으로 절연내력은 두꺼운 것이 얇은 것보다 낮은 경향이 있으며, 이것은 열의 방산에 대한 효과에 기인한 것으로 보고 있다. 또한, 고체 절연체의 두께가 두꺼울수록 재료 내부에 결함이 존재할 확률이 더 커지면서 절연내력이 저하하는 경향도 있다 [5].

전극의 크기를 크게 하면 절연내력이 적어지는 것이 일반적이다. 밀루나(Milnor)의 실험 결과에 의하면 파괴전압은

$$V = C_1 - C_0 \log A \quad (2.14)$$

이고, 여기서 A 는 전극면적, C_1, C_0 는 정수이다. 위 실험결과는 Weak Spot Theory의 정당성을 입증하는 것으로, 이것은 절연파괴는 전극 하에 있는 가장 약한 점에서 일어나므로 전극면적이 클수록 이러한 약점이 전극 하에 오는 확률이 커져 파괴전압이 낮아진다는 것이다. 식 2.11에서 전극면적이 크면 $n=1$, 적으면 n 은 1보다 작아진다고 말하고 있다 [5].

직류파괴 전압은 교류파괴 전압의 최대치 보다 커진다. 특히 절연물의 두께가 커지면 더욱 현저하다. 이를테면 케이블 등의 파괴전압은 직류에 대한 것이

보통 크다. 그러나 절연물 중에 습기가 많아지면 두 파괴전압은 같아진다. 또한, 고체 유전체가 열로 인하여 파괴되고, 그 열이 유전체 손에 기인한 것이라 하면 주파수가 높을수록 파괴전압은 낮아질 것이다. 그런데 60Hz 부근의 교류에 대해서는 주파수의 영향은 거의 나타나지 않고, 수만 Hz의 고주파로 되면 파괴전압은 갑자기 저하한다. 일반적으로 고체 절연체의 고주파 전압에 의한 파괴 현상에는 전극에서 발생하는 고주파 코로나 방전으로 인해 파괴되는 경우, 상용주파의 교류전압을 인가한 경우와 비슷한 파괴를 하는 경우, 유전체 손으로 인한 열에 의해 고체가 화학적 또는 기계적으로 변질·변형되는 경우 등의 세 가지가 있다. 실제로는 상기 원인들이 중첩하여 일어나므로 파괴 현상은 복잡하다.

고체 유전체에 충격전압이 인가된 경우는 파괴까지의 시간의 지연이 발생하여 직류, 교류전압에 대한 파괴전압 보다 당연히 그 파괴전압은 높아진다. 고체 유전체에 충격전압을 인가한 경우에는 부분적으로 파괴가 발생함으로 충격전압이 인가될 때마다 누적되어 결국에는 완전히 파괴하게 된다. 따라서 가스 액체의 경우에는 50% 방전율의 충격파괴 전압치로 그 충격전압에 대한 파괴전압을 표시하였으나 고체의 경우에는 어느 횟수의 충격전압에 의해 파괴되는가에 따라서 그 충격파괴 전압에 대한 정의도 달라진다 [5].

주의의 매질에 의한 영향 중 가장 큰 건 전극 주위의 매질에서 일어나는 표면 코로나 방전이다. 이로 인하여 고주파 진동이 일어나 재료에 전압이 여분으로 걸리게 된다. 또 어떠한 경우에는 재료가 코로나 방전으로 인하여 여분으로 가열 또는 변질되어 파괴전압이 저하된다. 이러한 영향의 주된 원인은 주위 매질과 고체 절연체의 유전율 차이에 의한 것이다. 유전율이 달라지는 경계에서 경계조건에 의해 등전위선은 매질과 절연체의 경계를 기준으로 굴절되며 유전율이 낮은 매질에서 경계면 쪽으로 등전위선이 굴절되는 경향을 갖는다. 이 때문에 전극과 고체 절연체 사이의 매질 부분에서 전계집중 현상이 생기게 되어 매질에서의 방전 현상이 발생하게 된다. 그림 2-2의 경우는 매질과 고체 절연체 간 유전율 차이가 줄어들게 되어서 등전위선의 굴절이 작게 되어 삼중점 부분에서의 전계집중 효과가 완화됨을 볼 수 있다. 따라서 주위 매질과 고체 절연체의 유전율을 일치시키면 등전위선은 왜곡되지 않아 평등한 전계분포를 갖

계 됨을 알 수 있다 [5].

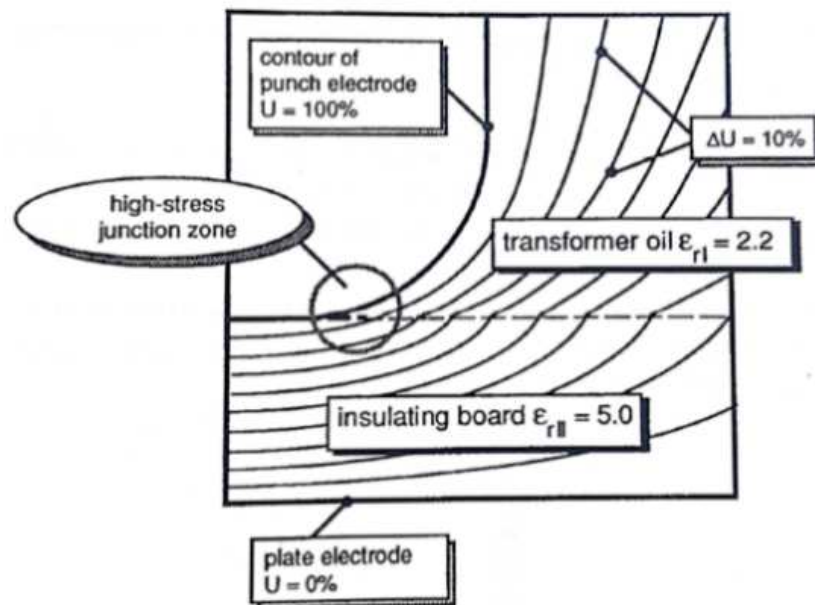


그림 2-2 고체 절연체와 주위 매질과의 유전율 차이에 의한 전계분포 곡선

절연파괴가 열적인 경우에는 전극재료에 따라 열의 전도가 달라지므로 파괴 전압이 달라진다. 즉 전극의 열전도가 나쁘면 파괴전압이 낮아진다 [5].

고체 유전체가 수분을 흡장(吸藏)하고 있으면 그 절연저항이 저하하고 유전체손도 증가한다. 따라서 그 절연내력이 저하하는 경향이 있다. 그러므로 섬유질 절연재료는 이것을 진공 처리에 의하여 흡장하고 있는 공기, 수분을 추출하고 절연유, 와니스, 콤파운드 등을 함침(含浸) 하거나, 이것을 절연유 중에 더욱 함침(含浸)하여 사용하거나 또는 질소 등으로 외부의 습기를 차단하여 사용하고 있다. 절연재료는 그 온도가 주위의 공기 온도 보다 높으면 흡수한 수분을 방출하나, 반대로 그 온도가 주위의 공기온도 보다 낮으면 공기 주위 수분을 흡수하여 그 절연성이 열화한다 [5].

보통 파괴전압 또는 절연파괴는 온도가 상승하면 강도가 하강하는 경향을 가지며 다음의 두 개의 영역으로 나뉜다. 저온영역 $\frac{\partial E_B}{\partial T} \geq 0$ 에서는 온도상승과 함께 절연파괴 강도 E_B 가 상승하거나 거의 변화가 없는 영역으로 비교적

저온 영역에서 관측이 된다. 고온영역 $\frac{\partial E_B}{\partial T} < 0$ 에서는 온도상승과 함께 E_B 가 저하되는 영역으로 비교적 고온 역에서 나타난다 [6].

제2절 부분 방전

전력설비에서 전극이 완전 단락이 아닌 상태에서 방전이나 전계분포가 불평등한 절연물에 인가전압을 서서히 상승하면 전계가 집중된 공극(Void)이나 크랙(Crack) 등에서 부분적으로 일어나는 방전을 부분방전이라고 하며, 복합 절연체 내의 공극이나 오염물질 등과 같은 결함은 부분방전을 발생시킨다.

유전체에 전압을 인가할 때 이러한 형태의 부분방전이 많아지면 열화 진행의 원인이 되어 종국에는 절연재료의 절연파괴를 초래하게 되므로 위치, 모양, 방전의 발생 수 및 크기에 대한 정보는 전기적 절연파괴를 파악하고 평가하는데 매우 중요하다. 고전압 설비에서 부분방전 발생은 열화 진행의 커다란 원인으로 작용하기 때문에 부분방전을 초기에 진단하여 결함의 위치 및 열화의 정도를 확인하고 이를 제거하는 것은 매우 중요하다 [6].

1. 부분방전의 종류와 위험도

부분방전은 방전 위치에 따라 코로나방전(Corona Discharge), 표면방전(Surface Discharge), 내부방전(Internal Discharge)등 3가지로 구분한다. 절연파괴로 이어지는 위험도 순으로 따지자면 내부방전, 표면방전, 코로나방전 순이다.

내부방전은 낮은 절연파괴 강도를 갖는 직물 섬유소, 종이, 먼지 등의 불순물이 주형 수지 등에 포함된 상태에서 고전압 인가에 의하여 발생하는 방전 현상이다. 에폭시 수지 같은 절연물의 내부에서 절연내력이 낮은 불순물이나 공동 등에서 발생하는 공극(Voids)의 방전도 내부방전이다. 전기적 트리도 내부방전으로 인해 일정 시간 이상 트리가 진전된 후에 고전압이 인가되면 매우 큰 내부방전이 일어나게 된다 [11][12].

표면방전은 절연물의 표면을 따라 발생하는 부분방전으로서 케이블의 말단이나 외부 표면과 접촉하는 부분 또는 코일 권선의 돌출부 에서 일어나며, 일

반적으로 전계에 큰 영향을 미친다 [6].

코로나방전은 고체나 기체 절연체 내부에 있는 코일이나 도체 외부 또는 예리한 첨단 등에 불평등 전계가 가해질 때 부분적으로 발생하는 방전현상으로 보통 고압 측에서 발생하지만 '0' 전위의 첨단에서 발생하거나 전극 중간에서도 일어날 수 있다 [6].

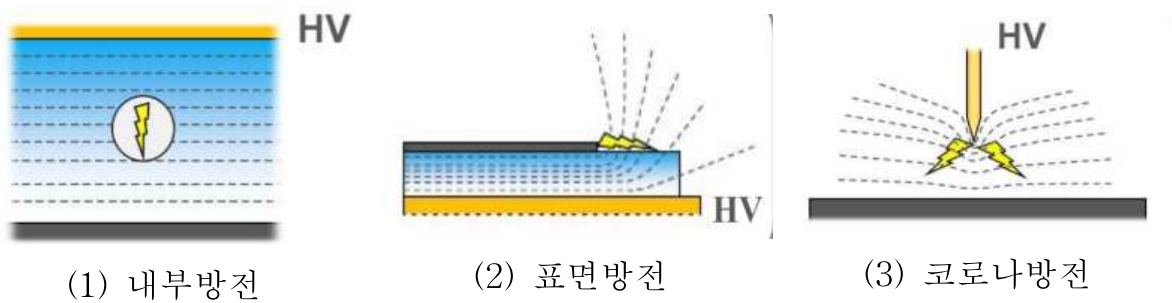


그림. 2-3 부분방전의 종류 [3].

2. 절연체 결함의 전계 및 부분방전 개시

내부방전은 절연체 내부에서 공극 등의 결함에 의해 발생하며 절연체 내부의 결함은 전계에 대해서 특성을 갖는다. 일반적으로 유전체 내부의 전계보다 공극의 전계가 더 크다. 전계밀도의 연속성에 따라 식 2.15~2.17이 성립된다.

$$D_{\in S} = D_{AIR} \quad (2.15)$$

$$\epsilon_0 \cdot \epsilon_{\in S} \cdot E_{\in S} = \epsilon_0 \cdot E_{AIR} \quad (2.16)$$

$$E_{AIR} = E_{\in S} \cdot \epsilon_{\in S} \quad (2.17)$$

한편 공극이 공기로 채워져 있으면, 유전체보다 전계강도가 더 낮다. 전체 절연체를 깨지 않으면서 공극 내에서만 발생할 수 있다 [3]. 절연체 내부의 전계 E_0 와 결함 내부의 전계 E_{cavity} 사이에는 준 정전기 모델 $curl \mathbf{E} = 0$ 와 자유전하 없음 $div \mathbf{D} = 0$ 의 2가지 가정을 도입하면, $E_{cavity} = fE_0$ 의 관계가 있다. 이 때, 상수 f 는 공극의 모양에 따라 결정된다.



(1) 구형 공극
 $1 < f < \epsilon_r$
 내부 결함 또는
 부적절한 함침을 가진
 폴리머, 레진절연체



(2) 길쭉한 공극
 $f = 1$
 트리 때문에 발생한
 공극



(3) 납작한 공극
 $f = \epsilon_r$
 절연체 계면에서 반복된
 가열 때문에 발생한
 박리

그림 2-4. 공극의 모양 [3].

절연체의 공극 내에 자유전자가 발생하면 전기장에 의해 가속이 된다. 공극 내의 공기 또는 가스 등 기체 분자와 충돌하여 물리적 (운동)에너지를 얻게 되며, 그 에너지가 기체 분자를 이온화 할 수 있을 정도로 충분하면 새로운 자유전자가 발생한다. 이러한 상황이 연쇄적으로 일어나면서 그림 2-5와 같은 전자사태 (Electron Avalanche)가 발생하고 부분방전이 개시된다 [3].

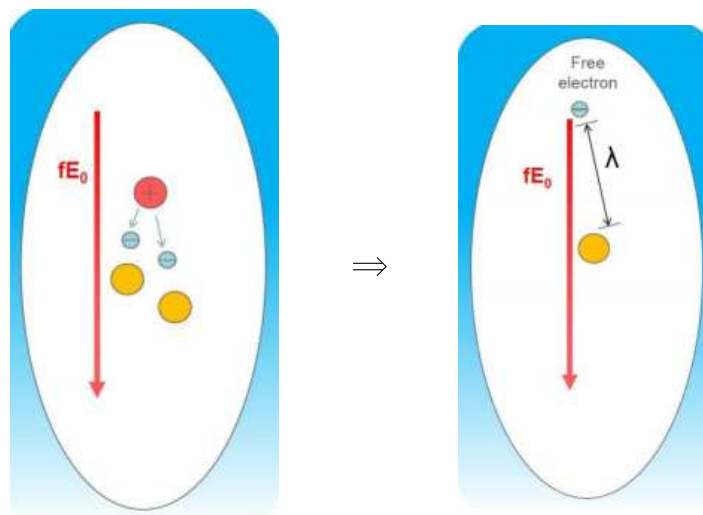


그림 2-5. 전자사태(Electron Avalanche).

제3절 전력케이블 구조

1. XLPE 케이블과 구조와 계층별 기능

전력케이블은 절연물질과 구조에 따라서 구분되며, 국내에서는 폴리에틸렌을 절연체로 주로 사용한 XLPE(CV) 케이블이 널리 사용되고 있다. XLPE 케이블이란 가교 폴리에틸렌 절연비닐 시스 케이블(Cross-Linked Polyethylene Insulated Vinyl Sheathed Cable)의 약자로 미국에서는 XLPE 케이블이라고 하지만 국내에서는 CV 케이블이라고 한다. CV 케이블은 내열성이 우수하여 약 250℃의 상당히 높은 온도에서도 변형되지 않고, 90℃에서 연속으로 사용할 수 있으며 전선관 내 침수가 있어도 안전한 편이다. 무극성으로 전기절연이 우수하여 특고압 이하의 배전선로에 대부분 사용되고 있으며, 특고압 이상에서도 많이 사용하고 있다. 유전손실이 적어 유전체 손에 의한 온도 상승이 적으며, 중량이 비교적 가벼워 다루기가 편하고 가요성이 높고, 접속도 용이하다. OF (Oil-Filed) 케이블에 비해 다방면으로 우수해 널리 사용되고 있다.



그림 2-6. 전력케이블 구조도(CN_CV).

XLPE 케이블은 그림 2-6과 같이 도체, 내부반도전층, 절연층, 외부반도전층, 차수테이프, 차폐층, 차수테이프, 외피로 구성되어 있다.

표 2-1. 전력케이블 구성요소 기능 및 특징 [4].

구 분	기능 및 특징
도체	<ul style="list-style-type: none"> · 구리(Cu) 또는 알루미늄(Al)
내부반도전층	<ul style="list-style-type: none"> · 케이블 제조 시 절연물의 도체 내 침투를 방지 · 도체면 진하분포를 고르게 하여 절연체의 절연내역을 향상 · 도체와 절연체 간의 간격 형성을 방지하여 코로나 방전 및 이온화를 방지
절연층	<ul style="list-style-type: none"> · 파괴전압 높고, 절연능력이 장기간 안정 · 폴리에틸렌을 절연체로 사용
외부반도전층	<ul style="list-style-type: none"> · 전기력선의 분포를 등전위로 만들어 절연내력을 향상
차폐층	<ul style="list-style-type: none"> · 지락사고 시 고장전류의 귀로 · 절연체의 내전압 값 향상 · 정전차폐의 역할
외피	<ul style="list-style-type: none"> · XLPE 케이블은 PVC, CE 케이블은 PE를 사용

2. XLPE 케이블의 열화요인과 열화 형태

전력케이블은 절연층의 열화로 절연능력을 상실하게 되면 케이블 본연의 기능을 하지 못한다. 전력케이블의 열화는 절연층의 열화를 말하며 케이블은 표 2-2와 같이 여러가지 요인에 의하여 촉진되며 다양한 형태로 나타난다. 대부분의 케이블 열화는 환경조건에 따라 여러가지 요인에 의해 복합되고 중첩된 상태로 발생하며, 그 중에서도 수트리(Water Tree) 현상을 포함한 전기적 요인, 기계적 요인 등이 열화의 주요 원인이 된다 [4].

표 2-2. 전력케이블 열화요인과 열화형태 [4].

열화 요인		열화 형태
전기적 요인	<ul style="list-style-type: none"> · 이상전압(과전압, 써지 등) 인가 · 운전전압 장기인가 	<ul style="list-style-type: none"> · 부분방전 열화 · 트리 열화
열적 요인	<ul style="list-style-type: none"> · 열신축 · 직사광선 	<ul style="list-style-type: none"> · 열적/기계적 손상 · 열 열화
화학적 요인	<ul style="list-style-type: none"> · 기름, 화학약품 등 	<ul style="list-style-type: none"> · 화학적 트리 · 화학적 손상 및 열화
기계적 요인	<ul style="list-style-type: none"> · 굴곡, 충격, 압축 등 	<ul style="list-style-type: none"> · 기계적 손상 및 변형
생물적 요인	<ul style="list-style-type: none"> · 곰팡이, 쥐, 개미, 등 	<ul style="list-style-type: none"> · 상처, 용손

제4절 전력케이블 트리 열화

1. 수트리(Water Tree)

수트리 현상은 수지형 전력케이블의 장기간 운용에서 발생할 수 있는 가장 대표적인 열화 현상이다. 절연체의 내부 불순물이나 손상부에서 수분과 전계의 복합작용으로 미세한 크랙이 발생하면, 이 크랙으로부터 폴리에틸렌 분자 간의 가교 계면이 파괴되거나 분리하여, 나뭇가지 모양으로 크랙이 진행되는 현상을 수트리로 정의한다.

수트리는 절연체 내부에서 붓이나 펜으로 그린듯한 모양으로 확산되는 구조를 가지며, 폴리에틸렌 절연체의 절연능력을 저하 시킨다. 수트리는 케이블 절연체 내부에서 전계 방향으로 진행하는 경향이 있으며, 트리의 진전은 수트리 끝에서 전계가 집중하면서 일어난다. 아래의 그림 2-7은 케이블 절연체 내부에서 성장한 수트리를 나타낸 것이다.

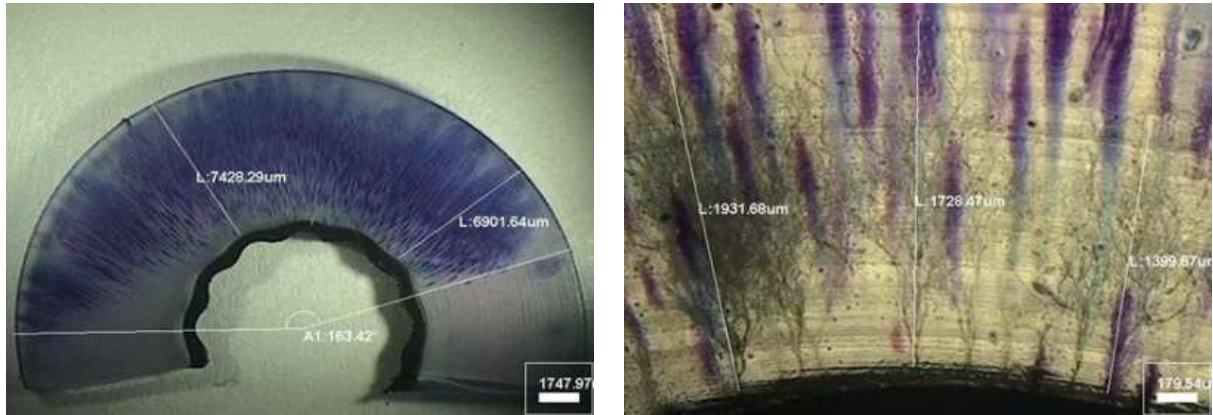


그림 2-7. 절연체 내의 수트리.

수트리가 지속적으로 성장하여 절연체를 관통하게 되면, 전도성 경로를 형성하고, 이 전도성 경로에 전류가 흐르면 절연파괴에 이르게 된다. 수트리는 보통 10여년 이상 장기적으로 성장하며, 결국 케이블 고장이 발생한다.

수트리의 발생 원인은 케이블 제조공정에서 생성되는 절연체 표면의 스크래치와 오염, 반도체층의 불순물, 재료의 보관 중 컴파운드의 오염 및 산화 등이 대표적이다. 케이블 내부에 수분이 유입되는 경로는 크게 두가지로 나뉜다.

첫 번째는 입상의 종단 접속재를 통하여 도체 사이의 틈으로 수분이 유입되는 경로이다. 전류에 의해 온도가 상승된 케이블이 빗물에 닿아 온도가 떨어지면서 도체 내부의 압력이 낮아지면서 외부의 빗물이 도체 심선 사이의 틈으로 유입되는 것이다.

두 번째는 지중 관로 또는 맨홀이 침수되어 배수가 되지 않는 경우이다. 케이블이 장기간 수분에 노출되면, 케이블의 외피나 직선접속재로 수분이 통과하여, 절연체에 수분이 침투하기 때문이다.

아래의 그림 2-8은 수트리가 발생하여 절연파괴 된 케이블을 여러 각도에서 촬영한 것이다. 절연체 단면의 수트리는 육안으로 확인하기 어렵기 때문에 염료를 사용하여 관찰한다.



(a) 수트리에 의한 케이블 절연파괴



(b) 빛에 투과된 절연체 내 수트리



(c) 수트리가 생성된 케이블 절연체 외관



(d) 염색한 수트리 발생 절연체

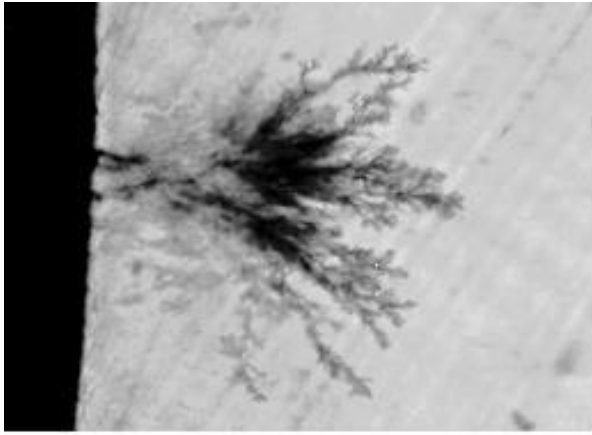
그림 2-8. 전력케이블 수트리 현상.

케이블의 내부로 유입된 수분은 도체와 절연체의 경계면으로부터 절연체 내부로 트리를 성장시키며, 수트리는 보우타이(Bow-tie)와 벤티드(Vented)의 두 종류 트리로 구분한다.

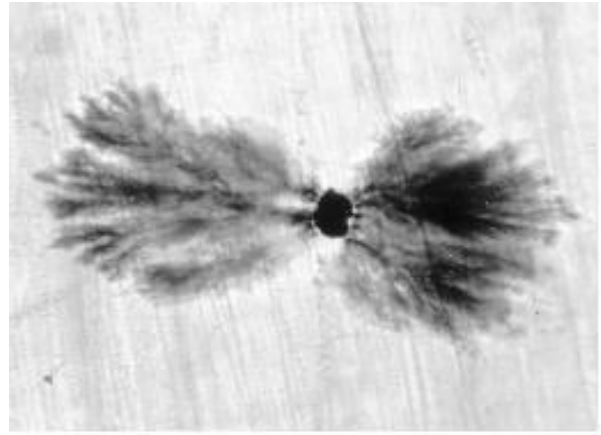
벤티드 트리는 경계면에서 발생하여 절연체의 중심부를 향하여 성장하며, 1년에 $10 \sim 1,000 \mu\text{m}$ 정도로 매우 느리게 성장하기 때문에 수년이 흐른뒤에 절연체 바깥부분에 도달하는 특징이 있다. 벤티드 트리는 전력케이블의 내·외부 반도체층에 상관없이 반도체층의 불순물(Inclusions)과 통풍(Ventilation)에 의해 트리를 성장시키는 것으로 알려져 있다. 벤티드 트리는 보우타이 트리와 비교하여, 초기 성장은 보우타이 트리보다 느리지만, 대부분이 보우타이 트리보다 더 큰 크기로 성장한다.

보우타이 트리는 절연체 내부에서 성장하는 트리로서 나비넥타이 트리라고

도 부르며, 서로 반대 방향으로 성장하는 두 개의 벤티드 트리를 보우타이 트리라고 한다. 보통 절연체의 중간 부분에서 발생하고, 양쪽 방향으로 약 0.5mm 까지 성장한다.



(a) 벤티드 트리



(b) 보우타이 트리

그림 2-9. 수트리의 종류.

XLPE 케이블의 설계수명은 약 40년 정도이다. 그러나 제조의 결함이나 다른 문제점이 발생하지 않는 경우에도 잦은 침수에 수트리가 발생하고, 케이블을 사용한지 대략 15년 정도 부터 고장이 발생하는 것으로 보고된다.

절연체의 내부에 수트리가 생성되면, 트리의 내부는 절연성을 잃게 된다. 따라서 절연물 두께 감소의 효과와 전계의 집중 현상이 일어나고, 수트리의 말단 부위가 전계의 집중에 의한 전기트리로 발전하게 된다. 그림 2-10은 수트리에 최대 전계가 집중되어 말단 부위에 다시 전기트리로 생성되어 있는 복합트리를 보여주고 있다.

Water-tree → Electrical tree → Breakdown

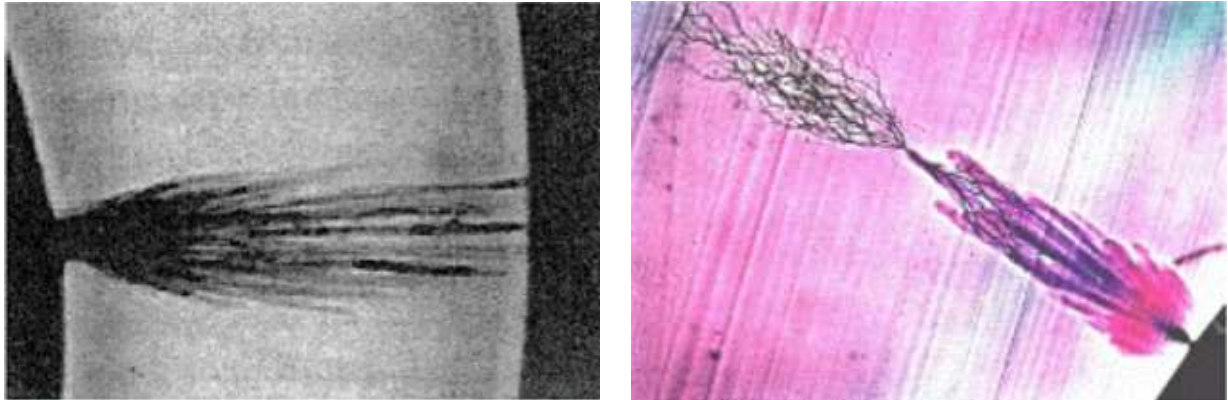


그림 2-10. 트리 현상에 절연파괴 순서.

2. 전기트리(Electrical Tree)

전력케이블의 절연체 내부에 결함이 발생하면, XLPE 케이블의 절연체는 비유전율이 2.4이기 때문에 비교적 절연내력이 취약한 공극(Voids)에 전계의 집중이 발생하고, 전계집중에 의한 열화는 절연성능을 크게 저하시켜 최종적으로 절연체를 절연파괴에 이르게 한다.

절연체 부분방전에 의해 탄화점이 발생하고, 탄화점에서의 지속적인 부분방전은 절연체의 부식을 촉진하면서 전기트리로 발전한다. 전기트리는 절연파괴가 발생하기 직전의 단계이며 보우타이 트리나 벤티드 트리의 시작점에서 부분방전의 발생, 탄화채널 형성과 함께 전기트리로 전이되어 성장하는 특징을 갖는다. 탄화채널의 생성과 함께 전기트리가 발생하면 급속도로 절연파괴가 진행된다. 그림 2-11은 케이블의 고장점 주변에서 발견된 전기트리를 나타낸 것이다.

그림 2-12는 XLPE 케이블 절연체의 결함의 종류를 종합적으로 나타낸 것이고, 표 2-3은 그림 2-12에 나타낸 결함의 구조에 따른 명칭을 나타낸 것이다. 그림 2-12와 같이 XLPE 케이블 절연체의 결함에는 내부의 공극(Voids), 불순물(Inclusions), 반도전층의 돌기(Protrusion) 등이 있고, 이러한 결함 부분에 전계가 집중됨으로써 시간이 지날수록 국부결함 즉 부분방전이 발생할 가능성이 크다.

부분방전에 의한 전기트리 발생의 공통점은 공극이 있으며, 공극 내의 부분

방전이 발생, 절연체 파괴의 대부분의 사례가 부분방전과 밀접한 관계를 가진다는 것이다 [8]. 표 2-4에 부분방전의 5가지 발생경위를 세분화하여 나타내었다 [8].



그림 2-11. 케이블 내 전기트리.

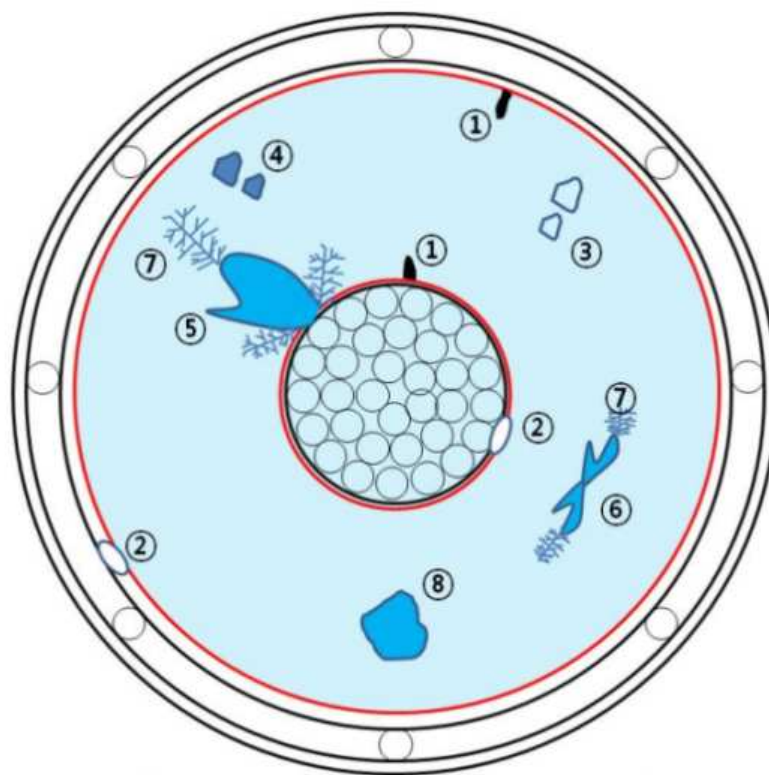


그림 2-12. XLPE 케이블의 절연결함 [6].

표. 2-3 XLPE 케이블의 절연결함의 종류[8]

No.	Defects Name
①	Protrusion of inner/outer semiconducting layer
②	Stripping, Air gap between insulation and semiconducting layer
③	Voids
④	Amber, Black metal
⑤	Vented tree
⑥	Bow-tie tree
⑦	Electrical tree
⑧	Moisture

표. 2-4 XLPE 케이블의 절연결함의 변화과정 [8].

No.	Partial Discharge Causes
①	Conductive impurities → Concentric electric field → Fever → Voids → PD
②	Non-conductive impurities → Chemical reaction(gas) → Voids → PD
③	Voids → PD → Fever → Enlargement of Voids
④	Water tree → Concentric electric field → Fever → Voids → PD → Electrical tree
⑤	Protrusion → Concentric electric field → Fever → Voids → PD → Electrical tree

제3장 고장사례 분석

제1절 진단방법

전력케이블 유지보수 진단방법으로 오래전에는 파괴시험인 절연내력시험으로 시행을 했지만 제품의 초기 고장 판별 외에는 무용론이 대두되어 왔다. 운용 중인 전력케이블에 절연내력시험을 가할 경우 전력케이블에 무리를 주어 오히려 잔존 수명을 더 짧게 만드는 결과를 초래하였다. 따라서 절연내력시험은 현재 유지보수 진단방법으로는 거의 사용하지 않고 있다. 현재는 일반적으로 비파괴 시험 중 사전진단 중 신뢰도가 높은 VLF $\tan\delta$ 측정을 가장 많이 사용하고 있으며, 이 외에 활선진단 방법이 많이 개발되고 있다.

1. 사전 진단

절연저항 측정법은 일반적으로 메거(Megger)라고 불리는 절연저항계를 사용하며, 자동식(전지식)과 수동식이 있다. 절연저항계는 케이블에 직류전압을 인가하여 누설전류를 측정하는 것으로, 측정 초기에는 측정 전로에 큰 직류충전전류가 흘러서 절연저항값이 '0'에 근접하나 측정 전로에 충전이 완료되면 충전전류는 '0'이 된다. 이후 측정 전로에는 누설전류만 흐르게 된다. 이 때문에 절연저항 측정은 보통 직류전압 인가로부터 1분 경과후의 절연저항값을 계측한다.

$$\text{절연저항 } R_0 [\text{M}\Omega] = \frac{\text{인가전압 } E [\text{V}]}{\text{누설전류 } I_0 [\mu\text{A}]} \quad (3.1)$$

절연저항은 절연의 양부를 판정하는 수단으로서 절연물에 인가된 직류전압 E 를 절연물을 통해 흐르는 누설전류 I_0 로 나눈 값을 말한다. 절연저항계는 소형 경량으로 어느 장소에서도 간단히 취급할 수 있고 조작도 간편하여 많이 사용되고 있으나 아주 미소한 열화는 측정할 수 없고 측정결과가 외부환경 영향에

의한 오차가 크기 때문에, 보통 참고값으로 사용하는 경우가 많다.

등온완화전류법(Isothermal Relaxation Current Measurement, IRC)이란 케이블에 직류전압을 일정 시간 인가한 후 방전하면서 시간에 따른 누설전류의 변화를 분석하여 절연체의 열화 진행정도(특히 수트리)를 측정할 수 있는 진단 기법이다. 방전 시 누설전류는 케이블의 절연체 및 각 부분에 형성된 결함 부분에 갇힌(Traped) 전하들이 빠져나오는데 걸리는 시간이 다르다는 부분에서 착안하여 경과시간에 의한 전류(Relaxation Current)의 크기를 측정하여 수트리 유무와 정도를 측정할 수 있다. 보통 인가전압은 직류 1kV를 사용하며, 30분 정도 전압을 인가한 후 전원을 분리한다. 이 과정은 형성과정(Forming)이라고 하며, 수트리 등에 전하를 Trap시킨다. 다음 단계로 5초 동안 방전(접지)한다. 이것은 케이블 정전용량(Eletric capacity)에 가압되는 전하는 케이블 진단과 상 관련 전하가 아니므로 이를 대지로 방전하는 것이다. 다음의 단계는 케이블의 완화전류가 고감도의 증폭기에 의해 기록되고 디지털화되어 기록값이 PC로 전송된다. 표준화된 연속시험에서 데이터 취득에 소요되는 시간은 30분이다. 이러한 데이터는 검증된 수식에 의해 열화도(Aging Factor)를 산출하여 케이블의 열화정도를 판정한다. [4]

그림 3-1과 같이 건설한 절연체에서는 5~10초 사이에 모든 전하가 빠져나오며, 다음 단계에서 전극과 절연체의 경계면(반도전층)의 충전전하는 약 30~80초, 그리고 마지막으로 절연체 내부에 형성된 수트리에 갇힌 전하는 200~500초가 소요된다. 이때 완화되는 측정전류는 수 pA에서 수 μ A로 아주 미미하여 측정장비는 잡음전류에 대한 대책과 더불어 높은 정밀도가 확보되어야 한다. 인가전압이 다른 진단기법에 비해 비교적 낮은 전압으로 안전한 비파괴시험법이라 할 수 있다. 측정되는 전류는 완화시간(시정수, Time Constant)이 다른 여러 전류성분의 합으로 표현되므로 이를 분리하기 위해서는 컴퓨터 분석이 필요하다 [5].

그림 3-2는 케이블 열화상태별 방전전류 변화를 보여주는 IRC Plot으로 Log형 방전커브(Discharge Curve)로서 세로축은 방전전류(nA·sec), 가로축은 시간(t/s)을 나타낸다 [5]. 포설(鋪設) 연수가 짧은 양호한 신조 케이블의 경우

그래프의 경사가 완만하고, 내부 열화가 많이 진행된 케이블(Critical)의 경우 그래프의 오른쪽으로 치우치며 경사가 매우 가파른 것을 볼 수 있다.

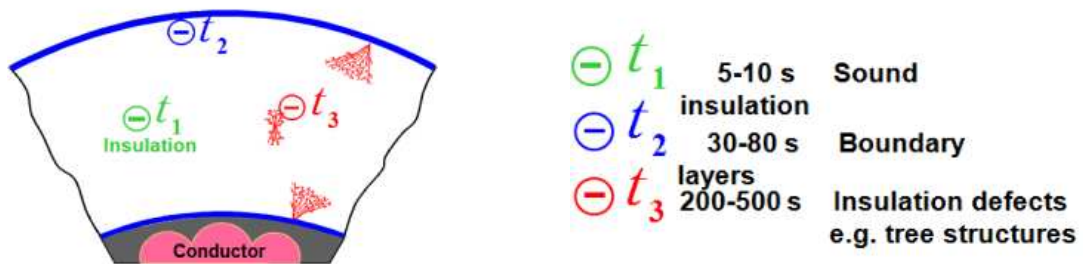


그림 3-1. 절연체 내부의 전하 분포.

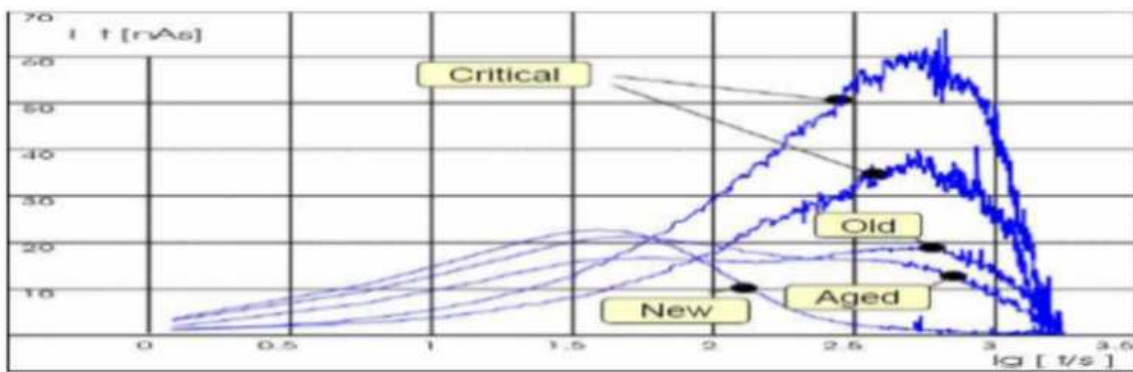


그림 3-2. 케이블 열화상태별 방전전류 변화 [4].

열화도(Aging Factor)는 식 3.4와 같이 반도체층에 가까운 절연체의 경계부분의 방전 전류치(Q_{t2})와 수트리 등으로 열화된 절연체 부분의 방전 전류치(Q_{t3})의 비율로 결정되며, 일반적으로 열화수치에 따른 전력케이블의 판정기준은 표 3-1과 같다 [7].

$$Aging Factor = \frac{Q_{t3}}{Q_{t2}} \quad (3.2)$$

표 3-1. 열화도에 따른 케이블 판정기준.

Aging Factor	판정기준	
~ 1.6 미만	PERFECT	아주 양호
1.6 ~ 1.85 미만	MIDDLE	양호
1.85 ~ 2.3 미만	OLD	요주의
2.3 이상 ~	CRITICAL	불량

등온완화전류(IRC)법을 이용한 진단장비로는 KDA-1, CDS 등의 장비가 국내 도입되었으며, 한국전력공사(한전)에서도 1997년부터 IRC 분석을 이용한 자료를 케이블 유지보수 기준으로 정하고 있다. [9]

지중의 배전용 전력케이블 열화 상태를 판정하기 위한 진단법의 하나로 VLF $\tan\delta$ 진단기법이 있다. VLF는 Very Low Frequency의 약어로 통신 분야에서는 3~30kHz의 주파수 대역을 의미하지만, 전력케이블의 상태 진단에 사용되는 주파수 범위는 0.01~1Hz의 극저주파를 의미한다. 이 방법은 극저주파 특성을 가진 정현파 AC 전원을 전력케이블에 인가한 후, 유전손실을 측정하여 열화 상태를 분석하는 방법이다. 이때 $\tan\delta$ 는 용량성 전류와 저항성 손실전류의 비 또는 무효전력과 유효전력의 비로 정의되며 유전정접(Dielectric Loss Tangent / Dielectric Dissipation Factor)이라고도 부른다. 따라서 $\tan\delta$ 의 산출식은 다음의 식과 같이 정의되고,

$$\tan\delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{\text{true power}}{\text{reactive power}} = \frac{\frac{V^2}{R}}{V^2\omega C} = \frac{1}{2\pi fCR} = \frac{1}{\omega CR} \quad (3.3)$$

, 압출 절연 케이블의 열화를 진단하기 위하여 1981년 최초로 사용되었다. 상태 해석에 사용되는 손실계수는 주로 전력케이블의 수분 유입에 따른 수트리의 진전 상태에 따라 결정된다. XLPE 케이블 절연체의 내부에 수트리에 의한 열화가 발생하면, 전자가 충전되었다가 다시 이탈하면서 유전손실을 발생시킨다. 손실전류가 증가하면 $\tan\delta$ 도 상승하므로, 손실전류의 증가와 감소를 통하여 절연체 내부의 이상 상태를 진단하거나 판단할 수 있게 된다 [8].

VLF $\tan\delta$ 의 기본원리는 휘스톤브리지 회로의 원리를 이용한 직접 측정 방식과 VLF의 교류 전원을 전력케이블에 인가하여 전압과 전류의 위상차를 측정하는 방식이 있다. 그림 3-3은 전력케이블의 등가회로와 $\tan\delta$ 를 나타낸 것이고, 전력케이블은 그림과 같이 저항 성분과 커패시터 성분이 복합적으로 구성된 임피던스를 가지고 있다.

전력케이블에 전압을 인가하면 저항과 커패시터를 흐르는 전류는 90° 의 위상차를 가지게 되고, $\tan\delta$ 는 '0'의 값이 된다. 그러나 케이블의 내부에 결함이나 수트리 등이 존재하면, 이 요소들이 전류의 위상 변화를 일으켜 $\tan\delta$ 의 값은 '0'이 아닌 임의의 값을 지니게 된다 [8].

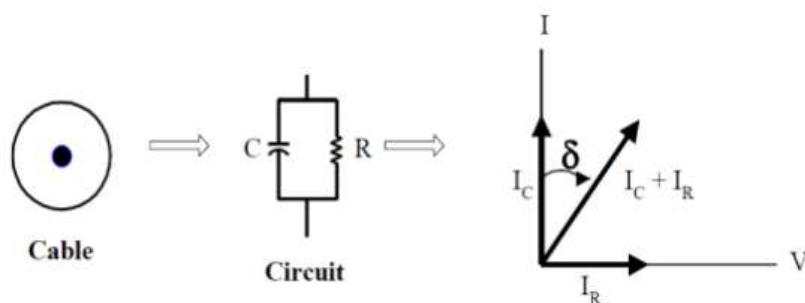


그림 3-3. $\tan\delta$ 의 등가회로.

그림 3-4는 수트리에 의하여 발생된 위상의 변화를 보여주고 있다. 정상 상태에서 저항과 커패시터를 흐르는 전류 I_R 과 I_C 는 청색과 녹색으로 표시 되었고, 수트리에 의하여 변화된 I_C 는 적색으로 표시하였다. 수트리 발생에 따른 위상차 Δt 를 측정한 후, 그 위상차를 이용하여 $\tan\delta$ 값을 얻는다. 따라서 전력케이블에 대한 $\tan\delta$ 의 변화를 측정하면, 수트리의 발생 이외에 절연체와 도체 사이의 열화상태 확인도 가능하게 된다. [8]

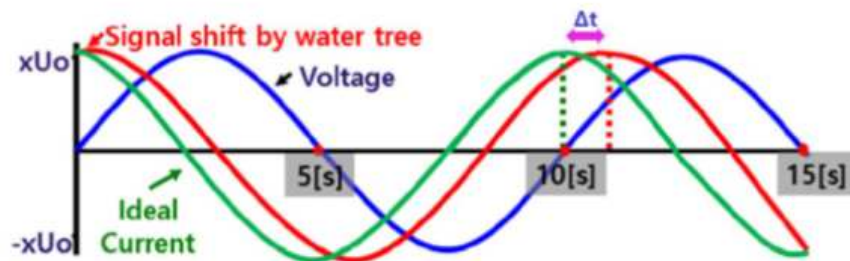


그림 3-4. 수트리에 의한 위상변화. [8]

한편 $\tan\delta$ 는 인가전압과 주파수에 따라 민감한 차이를 보여준다. 높은 전압의 인가는 저주파 대역에서 $\tan\delta$ 값이 크고, 고주파 대역에서는 $\tan\delta$ 값이 일정하게 나타난다. 낮은 전압을 인가하면 주파수 변화와는 무관하게 $\tan\delta$ 값은 항상 일정하게 나타난다. 따라서 $\tan\delta$ 의 측정은 저주파의 영역에서 일정 수준 이상의 전압을 이용하여 측정하는 방법이 이용되고 있다.

VLF 방법에 사용되는 전압은 DC에 가까운 AC의 전압이다. 따라서 DC 시험 전원이 가지고 있는 절연체 내의 공간전하 축적에 관한 문제의 해답으로 제시할 수 있다. 그림 3-5는 인가전압과 주파수에 변화에 의한 $\tan\delta$ 값을 나타낸 것이다.

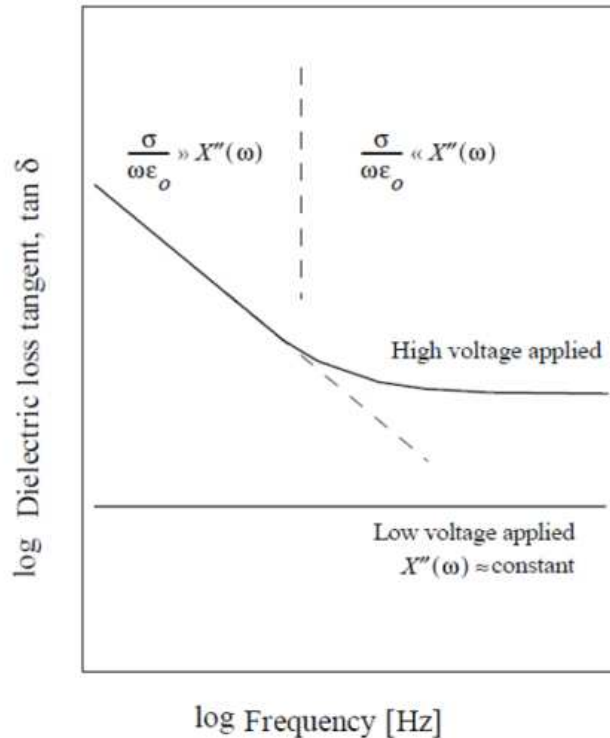


그림 3-5. 주파수 및 전압에 따른 $\tan\delta$ 의 변동.

또한 $\tan\delta$ 는 전압이 낮은 저전압에서는 주파수나 전압과 상관없이 일정하다. 하지만 고전압에서는 주파수가 낮아지면 민감도가 증가하고, 주파수가 상승하면 $\tan\delta$ 의 값이 일정하게 나타나는데, 그 이유는 포화 상태가 되었기 때문으로 해석할 수 있다. 그림 3-6은 인가전압에 따른 VLF $\tan\delta$ 값의 변화를 그림으로 나타낸 것이다. 인가전압이 증가하면 VLF $\tan\delta$ 값의 편차도 증가하는데, 이것은 인가전압 상승이 전력케이블의 열화를 가속하기 때문이다. 전력케이블의 VLF $\tan\delta$ 측정을 위하여 인가전압을 상승시키는 것은 케이블의 상태에 영향을 미칠 우려가 있으므로, 인가전압의 적절한 기준 설정이 필요하다.

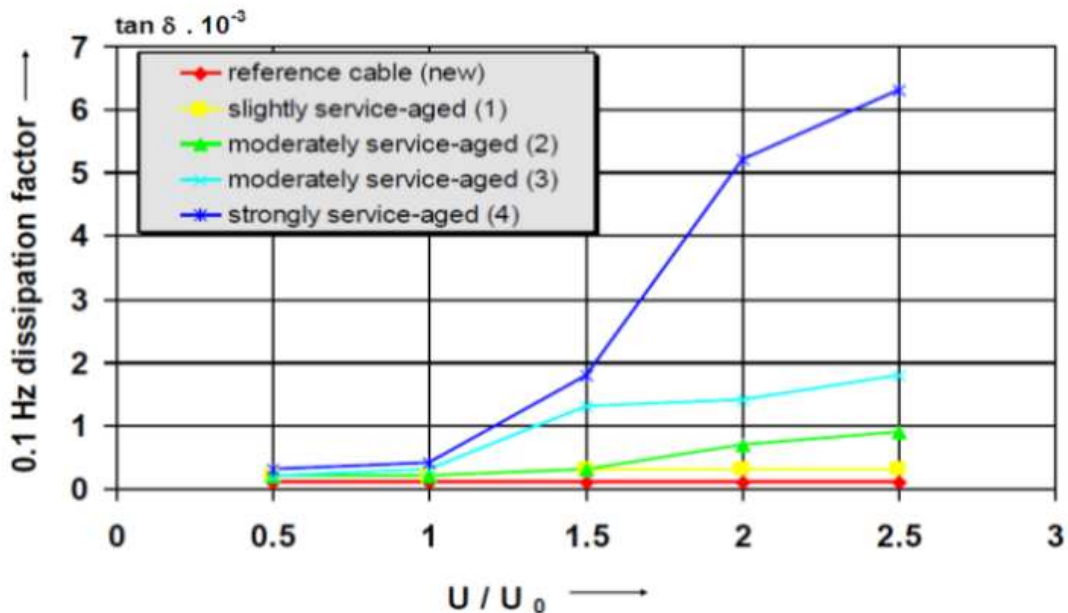


그림 3-6. 케이블 열화와 VLF $\tan\delta$ 진단의 전압 의존성.

표 3-2는 IEEE에서 유지보수가 필요한 상태의 XLPE 전력케이블의 측정 데이터를 기반으로 열화 판정기준을 3가지 상태로 제시하였고, 표 3-3은 이 판정기준을 기반으로 한전에서 2009년에 열화 판정기준을 정립한 것이다. 종전 IEEE에서 제시한 $0.5U_0$ 와 $1.0U_0$ 및 $2.0U_0$ 의 시험전압 중에서 $2.0U_0$ 를 제외하고, $1.5U_0$ 를 사용하도록 규정하였다. 추가로 어느 전압에서든지 500pC 초과 시 $\tan\delta$ 판정값에 관계없이 조치하는 고장임박조건을 설정하였다. 인가전압을 낮춘 것은 높은 인가전압에 의한 케이블의 스트레스를 제한하기 위한 것이다. 인

가전압을 낮춘 현재도 VLF tanδ 시험 후에 케이블 열화가 심해 절연파괴가 되는 현상이 보고되기도 한다.

표 3-2. IEEE - VLF tanδ 진단의 열화판정기준.

* $U_0 = 8.66[\text{kV}] [\times 10^{-3}]$

Condition Assessment	VLF tanδ Time Stability (STDEV at U_0)		Differential VLF tanδ ($1.5U_0-0.5U_0$)		Mean VLF tanδ (at U_0)
No Action Required	< 0.1	and	< 5	and	< 4
Further Study Advised	0.1 to 0.5	or	5 to 80	or	4 to 50
Action Required	> 0.5	or	> 80	or	> 50

표 3-3. KEPCO 2009 - VLF tanδ 진단의 열화판정기준.

※ $U_0 = 13.2[\text{kV}] \quad [\times 10^{-3}]$

Condition Assessment	$\tan\delta$ at $1.0U_0$	Differential of $\tan\delta$ ($1.5U_0-0.5U_0$)
Good	< 1.0	< 0.5
Aged	≤ 2.0	≤ 1.0
Highly degraded	> 2.0	> 1.0
Failure impending	At any test voltage, if VLF $\tan\delta$ is greater than 2.0×10^{-3} and unstable or continuously ncreasing	

※ NOTE : It has been found that copolymer dielectric materials such TR-XLPE or silicon fluid-treated insulations exhibit different $\tan\delta$ characteristics : therefore, other criteria are valid.

한전에서는 현장에서 측정한 7,800여개의 VLF tanδ 데이터를 통계·분석하고, 신뢰성이 높은 상태 판정을 위한 판정기준을 규정하려는 연구를 지속하여 왔다. 표 3-4는 2012년 VLF tanδ 판정기준을 나타낸 것이다. 종전 판정기 3단계에 6단계로 설정하였다. [8]

표 3-4. KEPCO 2012 - VLF $\tan\delta$ 진단의 열화판정기준.

Ass. Level	TD (1.0Uo)	TD (1.5Uo)	DTD (1.5Uo-0.5Uo)	STDEV (1.0Uo)	DEV (1.0Uo)	Level Upgrade
A	≤ 1.0	≤ 1.6	≤ 0.5			
B	≤ 2.0	≤ 2.8	≤ 1.2			
C	≤ 6.0	≤ 6.0	≤ 8.7	≥ 0.1	≥ 0.3	D
D	≤ 10.0	≤ 10.0	≤ 15.2	≥ 0.2	≥ 0.6	E
E	≤ 27.0	≤ 27.0	≤ 50.3	≥ 0.7	≥ 2.2	F
F	> 27.0	> 27.0	> 50.3			
1st Condition	OR			OR		Final Condition
	AND					

2. 활선 진단

전력케이블의 절연진단의 대하여 절연저항법, 직류누설전류법, 유전체정전($\tan\delta$)법, 부분방전법 등의 각종 측정법이 있으며, 직류누설전류법이 가장 널리 사용되어 왔다. 최근 직류전압중첩법, 직류성분측정법 등이 이용되고 있으며, 지속적으로 새로운 진단법이 개발되어 사용되고 있다. 아래는 전력케이블 활선 진단 중 가장 널리 사용되는 진단방법이다.

그림 3-7은 직류성분측정법의 측정회로도이다. 측정 시에 고압배전선, 피측정 케이블, 접지용변압기(GPT), 진단장치로 대지와 폐회로가 구성된다.

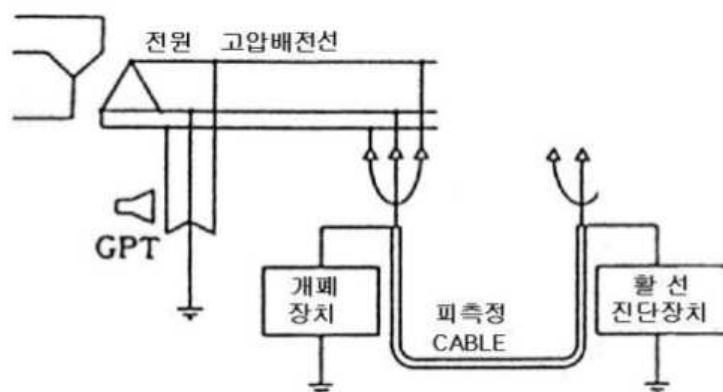


그림 3-7. 직류성분 측정회로도.

진단장치에서 측정되는 직류성분은 아주 미소하지만, 이 직류성분이 XLPE 케이블의 절연열화가 진행되었다는 신호이기 때문에 그림 3-7과 같이 측정회로를 사용하여 직류성분만 검출한다. 이러한 직류성분을 교류성분과 분리 검출하기 위해서는 직류성분 검출감도가 $10^{-10}\text{A}(0.1\text{nA})$ 정도가 필요하며, 저주파통과 필터(Low-Pass Filter)를 사용하여 직류성분만 검출한다 [7].

직류성분법은 별도의 과전압 전원장치가 필요하며, 접지선을 이용하여 충전부에 비접촉으로 측정할 수 있으므로 안전하고 간편하다. 측정 시 직류성분의 전류는 미소하기 때문에 외피 시스(Sheath)의 절연저항 값이 낮으면 미주전류(Stray Current)의 영향을 받기 쉬우므로 오 측정될 우려가 있다. 또한 케이블 종단부의 표면 누설저항이 낮으면 케이블 시스(Sheath)의 절연저항 값이 낮아지는 현상이 발생되어 종단부 청소를 해주는 것이 좋으며 우천 시에는 측정을 지양하는 것이 좋다.

직류전압중첩법은 중성점접지변압기(GPT)의 1차 중성점을 통해 고압 모선에 직류전압 50V를 교류전압에 중첩하고, 활선상태에서 케이블 도체와 차폐 간에 흐르는 직류누설 전류를 측정하여 절연저항을 산출한다. 그림 3-8은 직류전압중첩법의 측정회로도이고, 측정 시에는 GPT(Ground Potential Transformer), 피측정 케이블, 고압배전선, 측정기, 대지 및 직류전원으로 폐회로가 구성된다 [7].

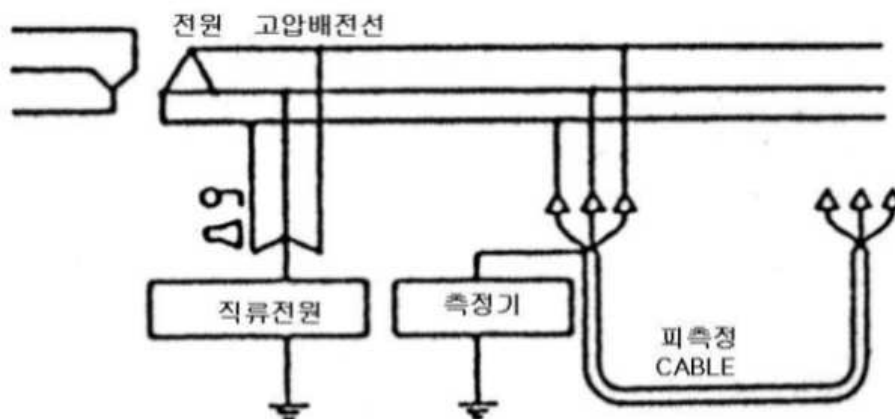


그림 3-8. 직류전압 중첩법의 측정회로도.

직류전압중첩법의 장점으로는 직류고압누설전류법과의 비교적 좋은 상관관계이며, 종단접속재의 감시기능을 병행하고 있다는 것이다. 단점으로는 미주전류가 변동하고 있을 경우 측정오차가 크게 되며, 종단부의 표면 누설저항이 낮으면 측정오차가 생길수 있는 원인이 될 수 있으며, GPT(Ground Potential Transformer)에 높은 직류전압을 장시간 인가하면 상별 여자전류가 불균형하게 제작된 GPT에서는 자속포화로 인한 영상전압이 생겨 보호계전기의 오동작 원인이 될 수도 있다. 이를 방지하기 위해서 GPT에 교류접지기를 설치하는 것과 동시에 수분 동안만 직류 50V를 인가하는 설계 보완구성으로 실제 현장에서는 이를 보완하여 사용하고 있다. [10]

일반적으로 실제의 절연재료에서는 교류전계가 인가되는 경우 전기적 에너지가 열에너지로 변환되는 과정에서 손실이 발생한다. 이 손실을 전기적으로 유전정접 $\tan\delta$ 라고 부르며, 절연재료의 유전율에 의해 나타나는 정전용량에 비해 90도 늦은 위상각을 갖는 저항성 부하특성으로 용량성 부하에 대한 비율로 표시되는 상대값이다. 유전정접 $\tan\delta$ 의 측정원리는 전력케이블의 인가전압과 차폐접지선에 흐르는 전류와의 위상차를 측정하고 $\tan\delta$ 를 산출하여 $\tan\delta$ 의 크기로 열화 상태를 판정하는 것이다.

활선 $\tan\delta$ 법을 원리에 따라 나누면 브리지법, 위상차법, 전력계법, 열류계법 등으로 나눌수 있다. 이 가운데 브리지법 및 전력계법은 회로의 평형상태를 조정할 필요가 있기 때문에 만약 자동화로 구성한다고 하여도 그만큼 복잡한 회로가 될 것으로 예상한다. 또한 열류계법은 부하로서 전류에 따라 발열이 생기는 경우의 활선 진단법으로 적용할 수 있지만, 정밀도 측면에서는 다소 문제점이 있다. 그리하여 현재 발표되고 있는 활선 $\tan\delta$ 측정장치는 대부분 위상차법을 적용하고 있다.

활선 $\tan\delta$ 의 특징으로는 첫번째 차폐지선에서 CT에 의해 전류를 검출하므로 접지선을 띄울 필요가 없다. 두번째, 특별한 고압전원 장치가 필요 없다. 유의할 부분으로는 전압측정을 위해 충전부에 접촉할 필요가 있으나, GPT의 2차 전압을 이용한 방법이 개발되어 충전부에 접촉할 필요가 없으며, 국부적인 열화 검출이 어려운 부분이 있다.[10]

저주파 중첩법은 전력케이블의 도체와 차폐층 간에 저주파 전압을 인가할 때에 흐르는 전류 중 손실전류만을 검출하고, 교류절연저항을 산출하여 열화의 진행정도를 판정하는 방법이다. 이 측정회로에는 그림 3-9와 같이 충전전류 삭제 방법과 브릿지 방식이 있다. 충전전류 삭제 방식은 주로 6kV급 XLPE 케이블의 열화 진단에 사용되고 있는 것으로, 7.5Hz-20V의 고정조건으로 측정한다. 충전전류를 삭제하기 때문에 기준 신호를 기초로 충전전류와 역 위상의 성분을 만들어 산출하고 있다. [10]

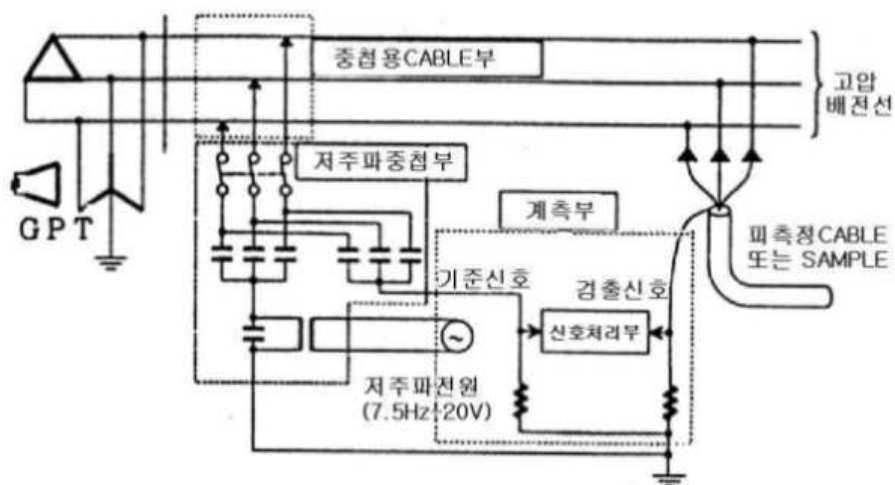


그림 3-9. 충전전류 삭제방식의 회로도.

한편, 브릿지 방식은 표준 콘덴서를 사용한 CR 브릿지 회로를 구성하여 차동입력으로 측정한 것으로 임의의 조건에서 자동 측정이 가능하다. 이 두 가지 방법은 활선, 정전상태에서 상관없이 측정할 수 있다. 활선 측정 시 저주파 전압은 브릿지 방식의 경우, GPT 중성점으로 중첩 등 여러 가지 중첩방식에 의해 측정할 수 있다. 그러나 보통 콘덴서를 Y결선하여 그 중성점으로 부터 3상에 중첩하기 때문에 고전압 선로의 중첩용 케이블의 접속에 대해 간접 활선공사를 시행한다. 저주파 중첩법의 특징으로는 첫번째 진단결과의 신뢰성이 높다. 두번째, 저주파, 저전압 으로 전원부의 용량을 작게 할 수 있다. 세번째, 관통 수트리 열화에 국한되지 않고, 미관통 수트리 열화의 검출도 가능하다.

진단 시 유의할 부분으로는 첫번째 관통과 미관통 수트리 모두를 검출 가

능하지만 현재까지는 명확하게 관통 수트리 인지, 미관통 수트리인지 파악할 수가 없다. 따라서 현장에서의 활선진단의 결과가 요주의 및 불량으로 판정된 케이블은 별도로 직류누설전류법에 의한 정전 진단을 병행하여 시행 하고 있다. 두번째, 측정원리 상 손실전류가 클수록 열화가 진행되고 있다는 결과가 나오기 때문에 열화가 진행되지 않는 상태라도 손실전류가 큰 것은 활선진단 만으로는 요주의 또는 불량으로 판정될 여지가 있기 때문에 주의가 필요하다. 특히 케이블의 단말 종류에 따라 측정값이 크게 변동할 요인이 있으므로 진단 전 단말 사양을 반드시 확인하여야 한다. [10]

교류전압중첩법은 케이블의 차폐층에 상용주파수의 2배+1Hz의 교류전압을 중첩하여, 수트리 열화에 기인한 1Hz의 열화 신호를 검출하는 방법이다. 수트리 열화 케이블에서는 사용주파수 +1Hz 부근의 전압을 중첩할 때 측정된 열화 신호가 가장 크게 된다. 이것 때문에 교류중첩법 에서는 상용주파수+1Hz의 전압을 중첩하여, 1Hz의 열화 신호를 검출하고 있다

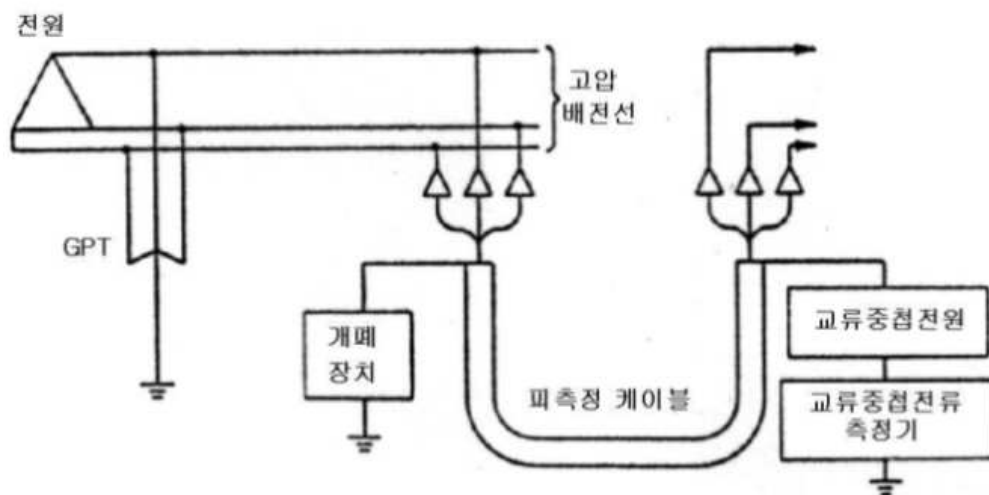


그림 3-10. 교류전압중첩법의 회로도.

그림 3-10은 기본적인 교류전압중첩법의 측정회로를 표시하였다. 교류전압 중첩법에서는 케이블 차폐층에 교류전압을 중첩하기 때문에 고압부로의 연결 접착작업이 필요하지 않아 활선상태에서도 간편하게 측정할수 있다. 교류전압중첩법의 특징으로는 첫째 케이블의 접지선으로부터 전압을 중첩할 수 있어서 측

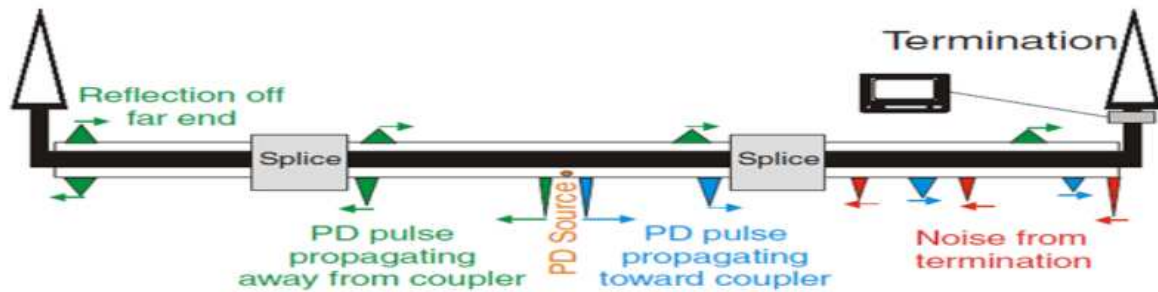


그림 3-11. 시간 측정을 이용한 PD 진단.

주파수 측정을 이용한 방법은 PD에서 발생한 펄스 없이 탐지가 가능하며, 케이블에 유입되는 배경잡음(Noise)을 이용하여 측정이 가능하다. 공극 및 수트리에 배경잡음이 접촉되면 작고 많은 반사파가 발생하고 배경잡음들이 케이블 배경잡음과 중첩되어 잡음 수준을 증폭한다. 증폭된 잡음을 센서에 감지하여 공극 및 수트리를 진단한다. PD의 경우는 자체에서 넓은 주파수 대역이 발생하기 때문에 공극 또는 수트리 보다는 더 감도가 높다. 또한 단말에서 측정할 필요가 없어 해당 구간 어디에서든 측정이 가능하며 PD 발생점 가까이에 측정할수록 감도가 높다[2].

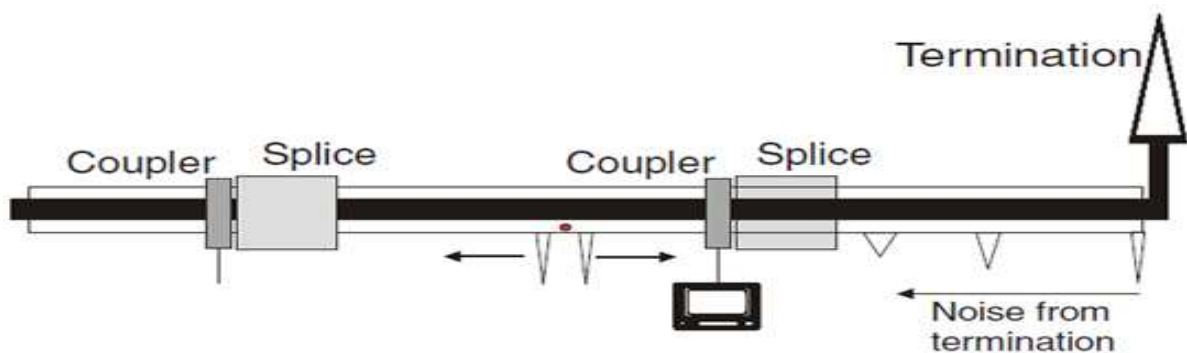


그림. 3-12 주파수 측정을 이용한 PD 진단

본 논문에서 제안하고 시험으로 활용한 활선진단법인 Cable Wise 기법은 주파수 측정을 이용한 측정방법이다. [2]

제2절 전력케이블 고장사례 및 분석

1. 한국철도공사 광주지역관리단 고압배전선로 구성

한국철도공사의 급배전계통은 크게 송전선로, 전차선로, 배전선로 등의 3가지로 분류할 수 있다. 첫째, 송전선로는 한전변전소로부터 특고압(6.6kV 또는 154kV) 수전 받아 전철변전소로 공급하는 선로를 말하며, 전철변전소는 이를 변압하여 전차선로에 전원을 공급한다. 둘째, 전차선로는 열차가 동력원으로 사용하는 전원을 공급하는 전선로로 이 중 교류방식은 공칭전압이 25kV이며 열차는 상부의 팬터그래프라는 집전장치로 전원을 공급받아 전기모터를 가동하여 열차를 운행한다. 셋째, 배전선로는 각 역사 및 각종 통신, 신호기기 등에 전등, 전열, 동력으로 사용할수 있게 고압(6.6kV) 및 특고압(22.9kV)으로 공급하는 선로로 철도 내에서는 열차의 동력원으로 사용하는 전차선로 전원과는 따로 구분하고 있다.

철도현장의 송전선로, 전차선로, 배전선로 모두 가공과 지중선로를 장소에 따라 사용하고 있으며, 송전선로 및 전차선로는 선로 특성상 가공전선의 비율이 높지만, 배전선로는 지중 비율이 높다.

한국철도공사 광주지역관리단 내 고압 배전선로는 고속구간인 호남고속선을 제외하고 공칭전압이 6.6kV이다. 철로가 단선인 광주선, 경전선, 대불선은 배전선로가 1회선으로 구성되어 있으며, 복선인 호남선, 호남고속선은 주·예비 2회선으로 구성되어 있다. 그림 3-13은 한국철도공사 광주지역관리단의 고압 배전선로 계통을 나타내었다. 일정 거리 간격마다 수전점을 두고 한전에서 3상 22.9kV를 수전 받아 6.6kV로 변압한 후 고압 배전선로를 통해 각 중간역사에 전원을 공급하고 있다. 해당 구간마다 해당 선구의 특성에 따라 다소 차이는 있지만, 기본은 2회선 중 1회선은 지중, 2회선은 가공으로 구성되어 있다.

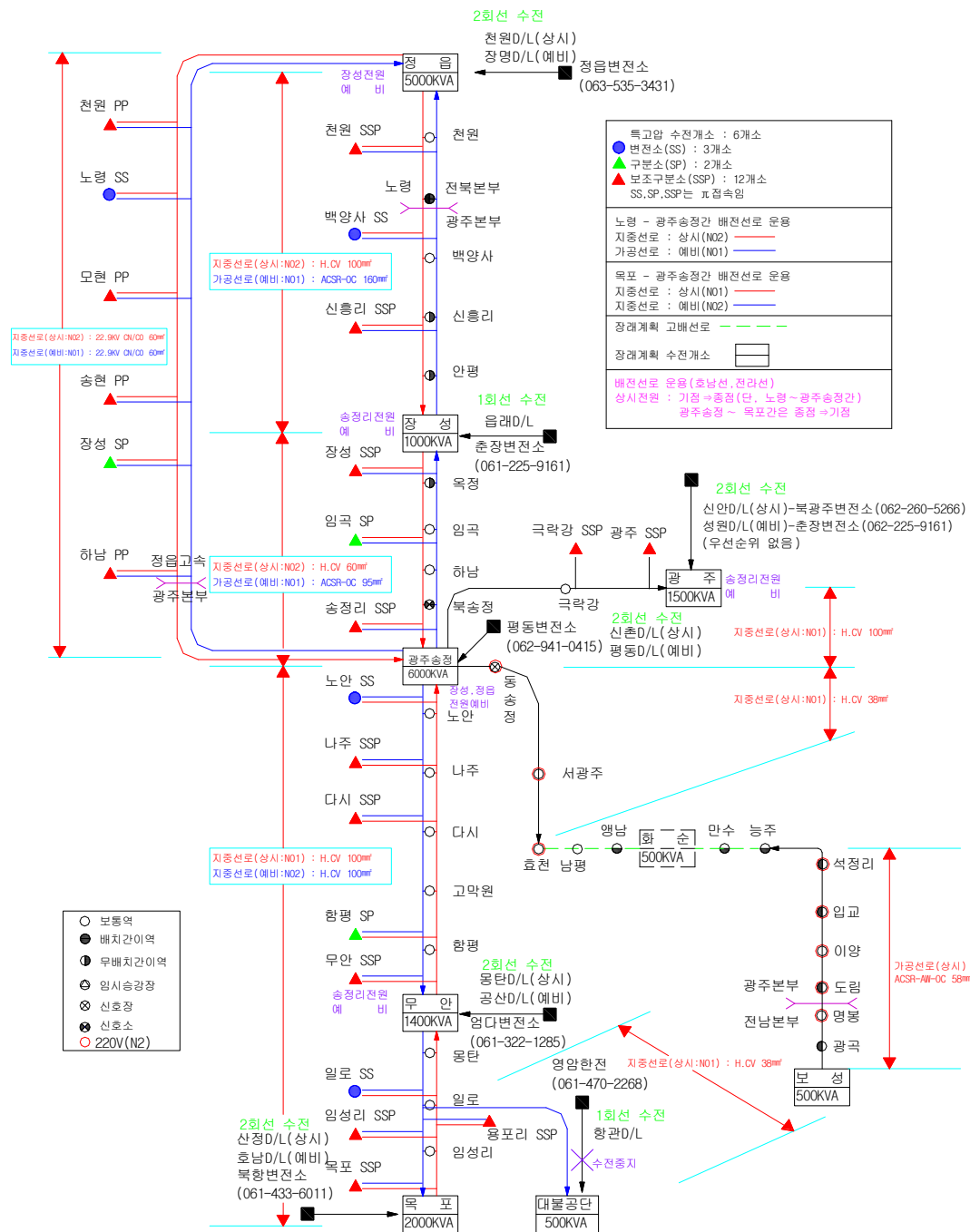


그림 3-13. 한국철도공사 광주지역관리단 관내 고압 배전선로 계통도.

2. 지중 배전선로 고장 및 장애 원인별 분석

지중 고압케이블 고장·장애분석은 지중케이블 비중이 높아 고장 이력이 많은 배전선로를 기준으로 분석한 것이며, 활선진단 시험은 예비선로가 없어 장애 발생 시 파급효과가 높은 전차선로 급전케이블을 대상으로 하였다.

한국철도공사 광주지역관리단의 고압 배전선로 신설 및 개량은 경전선 2000년도에 준공, 호남고속선을 제외한 다른 선구는 2004년도 준공되어 이후의 장애 이력이 모두 기록되어 장애 분석이 가능하였다.

XLPE 케이블의 내용연수는 환경에 따라 다르지만 통상 20~30년을 기준으로 하고 있으나, 한국철도공사와 국가철도공단에서는 30년을 기준으로 하고 있다. 2005년부터 2021년 현재까지의 지중케이블 고장·장애는 송전선로 경우는 없으며, 전차선로 경우는 1건, 고압 배전선로 경우는 29건이다.

송전선로는 대부분 철탑을 이용한 가공전선로로 되어 있지만, 도심지의 경우 지중케이블로 구성되었다. 전차선로는 터널이 있는 개소에만 일반적으로 케이블로 구성되어 있으나, 1개 구간은 특수한 경우라 지중케이블로 구성되어 있다. 배전선로는 가공과 지중의 혼합이며 지중케이블의 비중이 높다.

표 3-5. 한국철도공사 광주지역관리단 지중케이블 현황.

분야	연장(m)	전압	선종	준공년도	비 고
송전선로	48,402	154kV	CNCV 400mm ²	2003	
전차선로	36,006	25kV	CV 200mm ²	2004	
배전선로	745,507	6.6kV	CV 100mm ² 등	2000년도 등	

표 3-6. 광주지역관리단 년도 및 선구별 고압 배전선로 장애현황.

발생년도	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	계
호남선	1		1	2		1	3	3	1	2			1	2		2	200
경전선								2	2		1		1	1		2	19
광주선								1			1						9
대불선																	2
계	6	6	8	10	9	11	14	18	16	16	17	16	19	21	19	24	0

가장 연장이 긴 호남선에 가장 많이 발생하였고, 고압 배전선로 연장 순으로 발생하였다. 비율로 보았을 때는 경전선과 광주선은 많은 차이가 없지만, 경전선의 지중케이블이 광주선보다 4년 정도 먼저 포설된 이유와 광주선에 비해 교량구간 다수 등 취약요인이 상대적으로 많은 이유로 판단된다.

표 3-7. 광주지역관리단 원인별 고압배전선로 장애현황.

년도	내부요인		외부요인			계
	접속점 파괴	케이블 본체	시공불량	작업자 부주의	기타	
05			1			1
06						0
07			1			1
08	1	1				2
09						0
10				1		1
11		1		2		3
12		5		1		6
13	3					3
14	1			1		2
15				1	1	2
16						0
17	1	1				2
18	1	1		1		3
19						0
20		2		2		4
계	7	9	2	7	1	26

표 3-7을 분석하였을 때, 외부요인을 제외한 내부요인의 경우 베쓰튜브(Bath Tube) 형태로는 나타나진 않는다. 자료 자체가 한국철도공사 광주지역관리단에 한정된 자료이기 때문으로 판단된다. 외부요인은 작업자 부주의로 인한 건수가 9건으로 선로 주변에서 많은 공사가 진행되기 때문에 발생이 되었다. 그 외에 시공불량으로 인한 장애가 발생하였는데, 그 사유로는 중간 접속함 내부 모서리 마감이 불량하여 케이블이 장기적인 스트레스를 받아 발생하였다.

기타 1건은 토공구간과 교량구간이 만나는 지점에 교량이 침하되어 단차로 인한 것이다.

내부요인은 케이블 본체의 절연파괴가 많으나 전체의 연장으로 판단하였을 때는 중간 접속점의 절연파괴의 비중이 압도적으로 많다. 장애지점의 케이블을 해체하여 분석한 결과, 수트리에 의한 열화진행으로 판명되었다.



그림 3-14. 외부요인으로 발생한 지중케이블 절연파괴.



그림 3-15. 내부요인으로 발생한 지중케이블 절연파괴.

고장이 발생한 지중케이블의 다년간의 절연저항 측정기록부의 측정값을 살펴해보았으나, 매년 큰 변화가 없어 고장발생을 예측할 수 없었다.

제3절 기존 유지보수 방법

앞서 한국철도공사 급배전계통을 3가지로 구분하였듯이 전기설비도 3가지로 분류하여 유지보수를 시행하고 있으며, 그에 따라 유지보수 매뉴얼도 3종류(송변전설비, 전차선설비, 전력설비)이다. 기본적으로 철도의 전기설비 판정기준은 4단계로 구분하며, 판정기준에 대한 해석은 다음과 같다.

1. 판정기준

목표값(Target Value, TV)은 설비 최초 시공 후 또는 유지보수 작업 후 상태 값을 말한다. 허용값(No Intervention Value, NIV)은 유지보수는 필요 없으나 설비 변화상태의 관찰이 필요한 상태 값을 말한다. 경고값(Alert Value, AV)은 즉각적인 조치는 필요하지 않지만 유지보수에 필요한 자재, 시간이 확보되었다면 유지보수를 시행하고 그렇지 못한 경우 변화상태를 관찰하고 가까운 시간 내에 조치해야 하는 상태 값을 말하며 유지보수 작업 이후에는 목표값이 되어야 한다. 조치값(Intervention Value, IV)은 열차안전에 직접적인 영향을 주는 상태 값을 말하며, 유지보수 작업 중 최우선적으로 조치되어야 하고 유지보수 작업 이후에는 목표값이 되어야 한다 [1].

각 분야의 유지보수 매뉴얼에는 점검 및 측정항목, 판정기준이 기술되어 있지만, 큰 틀로 3가지 측정방법(절연저항, 접지저항, 온도측정)으로 요약할 수 있다. 이 외에 모든 매뉴얼에서 케이블의 경고값(AV) 이상 측정되거나 직전 측정값과 비교하여 현재 측정값에 현격한 차이가 발생한 경우 직류내전압시험 및 외부전문기관 절연진단 의뢰하라는 문구가 명시되어 있다. 하지만 실제 고장·장애 사례를 살펴보면 경고값(AV) 이상이 되지 않았거나 측정값의 현격한 변화가 없어도 갑작스러운 절연파괴에 의한 장애가 발생하는 경우가 대부분이다. 현재의 유지보수 방법으로는 장애 발생시기를 예측 할 수가 없다. 다음은 각 분야의 유지보수 매뉴얼에 대한 점검 및 측정항목을 열거한 것이다 [1].

2. 전력설비 유지보수 매뉴얼 [고압 및 특고압케이블(K723-4-B101)]

점검방법은 육안점검과 측정점검으로 구분되어 있으며, 측정점검은 3가지(절연저항, 접지저항, 접속개소 적외선 온도측정)로 되어 있다.

표 3-8. 절연저항 측정 4단계 판정기준.

구 분	TV(목표값)	NIV(허용값)	AV(경고값)	IV(조치값)
절연저항[MΩ]	5,000이상	5,000미만~500이상	500미만~300이상	300미만
비고	- 기상상태 양호한 날에 측정 - 5,000V 절연저항계(메거)로 측정 - 측정 전 건전지 체크, 리드선 도통시험, 영점조정 시행			

표 3-9. 접지저항 측정 4단계 판정기준.

구 분	TV(목표값)	NIV(허용값)	AV(경고값)	IV(조치값)
접지저항[Ω]	8Ω이하	8Ω초과~9Ω이하	9Ω초과~10Ω이하	10Ω초과

표 3-10. 적외선 열화상 측정 4단계 판정기준

측정항목		TV(목표값)	NIV(허용값)	AV(경고값)	IV(조치값)
온도[℃]	절대평가	40이하	40초과~60이하	60초과~90이하	90초과
	상대평가	3이하	4초과~10이하	10초과~15이하	15초과
비고		○ 절대평가 기준(케이블 열화온도 - 대기온도) - 바람이 없을 때 최대부하 상태(시간)에서 측정 ○ 상대평가 기준(케이블 최대온도 - 케이블 최소온도) - 측정대상 케이블의 최대온도 - 최소온도를 비교하고 동일한 급전구간에 설치된 케이블과 상대 비교			

3. 송변전설비 유지보수 매뉴얼 [송변전설비 지중선로(K724-4-C014)]

점검항목에 의한 측정은 전력설비 유지보수 매뉴얼과 그 궤를 같이하고 있다.

표 3-11. 지중송전선로 점검항목.

순번	점검항목	점검방법	판정기준	비고
1	맨홀, 부속품 침하 및 파손여부	<ul style="list-style-type: none"> - 맨홀 뚜껑의 균열, 주변 포장 파손 및 침하 등 맨홀 외부 점검 - 맨홀 내부의 부식, 나무뿌리 등의 침투여부 점검 	<ul style="list-style-type: none"> - 맨홀 뚜껑의 균열, 주변 포장 파손 및 침하가 없을 것 - 맨홀 내부의 부식이 없고, 나무뿌리 등의 침투가 없을 것 	
2	지중선로 경과지 이상여부	<ul style="list-style-type: none"> - 지중선로 경과지 침하 여부, 경과지 주변 굴착 등 공사시행 여부 점검 	<ul style="list-style-type: none"> - 지중선로 경과지 침하가 없을 것 - 지중선로 경과지 주변 공사개소 순회 점검 	
3	케이블 표지류 적정 취부 및 이상여부	<ul style="list-style-type: none"> - 케이블 표지류 육안점검 	<ul style="list-style-type: none"> - 표지류의 훼손이 없을 것 - 표지류 내용의 적정 	
4	접속개소 열화 및 이상여부	<ul style="list-style-type: none"> - 적외선진단장비를 이용한 접속개소 열화 점검 	<ul style="list-style-type: none"> - 접속개소의 이상과열이 없을 것 - 각 상의 온도차가 10℃이하 일 것(3상 비교법) 	
5	절연저항 측정	<ul style="list-style-type: none"> - 유지보수 표준화 매뉴얼의 절연저항 점검방법에 따라 점검 	<ul style="list-style-type: none"> - 특고압케이블 절연저항 기준값에 의거 판정 	
6	접지저항 측정	<ul style="list-style-type: none"> - 유지보수 표준화 매뉴얼의 접지저항 점검방법에 따라 점검 	<ul style="list-style-type: none"> - 접지저항 기준값에 의거 판정 	

4. 전차선로 유지보수 매뉴얼 [급전선 및 보호선(K722-4-C101-4)]

표 3-12. 전차선로 급전케이블 측정 항목.

구분	주기	대상	측정항목	비 고
인수점검	준공검사	전량	1. 누설전류	○ 항목 #1 : 개통시 내전압시험 준용 ○ 항목 #2 : 심선⇔차폐층, 차폐층⇔대지
			2. 절연저항	
			3. 접지저항	
초기점검	개통 6개월 ~1년 이내	전량	1. 절연저항	○ 항목 #1 : 항목 #2 측정결과 IV(조치값) 이상일 때 측정
			2. 열화상	
보통점검	순회점검	전량	외형상태	
	차상점검	전량	외형상태	
정밀점검	1년1회	전량	1. 누설전류	○ 항목 #1 : 필요시 항목 #2 및 항목 #4 측 정결과 IV(조치값) 이상일 때 측정 ○ 항목 #2 : 항목 #4 측정결과 IV(조치값) 이상일 때 측정 ○ 항목 #5 : 필요시 항목 #4로 측정한 열 화상이 IV(조치값) 이상일 때 측정
			2. 절연저항	
			3. 접지저항	
			4. 열화상	
			5. 코로나	
안전진단	필요시	필요량	정밀점검 항목 외	-

제4장 결과 및 고찰

제1절 측정방법

1. 케이블와이즈(Cable Wise) 진단

활선진단인 케이블와이즈(Cable Wise) 진단은 앞서 설명한 주파수를 이용한 PD 측정방법이다. 절연체의 공극은 RF(Radio Frequency) 신호를 방출하여 전자의 흐름을 변경한다. 케이블와이즈 진단은 공극에서 나오는 미세한 RF 노이즈 신호 감지하여 신호를 분리하는 방법을 사용한다.

케이블와이즈 진단은 다른 PD 신호에 대해서는 정확도가 높다. 또한 다른 활선진단에서는 전기트리 변화 이전 수트리를 파악할 수 없지만 수트리 포함여부를 파악할 수 있다. 다만 수트리가 얼마나 많이 포함되어 있는지는 알 수 없다. 수트리의 발생지점은 측정위치를 변경하여 다(多)회 시행하면 비교적 정확하게 파악할 수 있다. 그림 3-13은 케이블 진단위치에 따라 결과가 어떻게 출력되는지 나타내고 있다. 이로써 PD 및 수트리 발생위치를 파악할 수 있다.

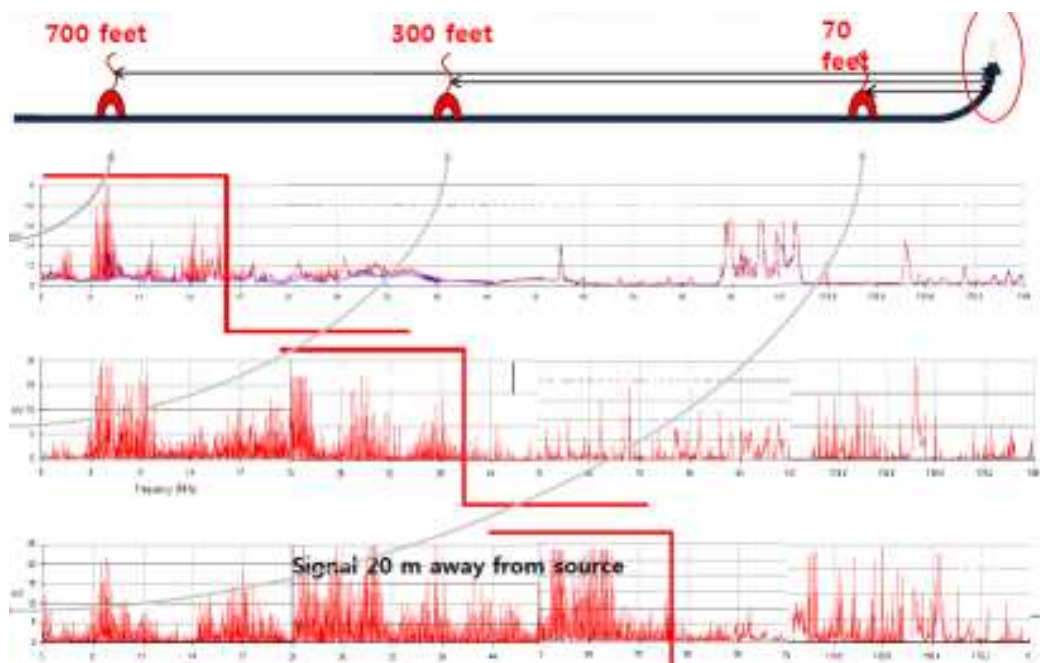


그림 4-1. 고장점 대비 측정위치 따른 분석 파형.

측정방법은 그림 4-2에 나타내었듯이 측정장비와 전선으로 연결된 U자형 센서가 케이블 감싼 후 약 5분여간 측정을 시행한다. 측정장비는 PC로 데이터를 전송하고 수집된 데이터로 분석을 시행한다. 판정기준은 총 5단계로 나뉘며 판정기준에 대한 해석 및 조치사항은 표 4-1과 같다.



그림 4-2 활선진단(Cable wise) 측정방법.

표 4-1. 케이블와이즈(Cable Wise) 진단 판정기준.

판정등급	조치사항	비고
Level 1 (매우양호)	<ul style="list-style-type: none"> - 열화되지 않은 설비. - 취해야 할 즉각적인 조치사항 없음 	
Level 2 (양호)	<ul style="list-style-type: none"> - 열화요소가 적고 향후 2년 이내로 재진단 추천 	
Level 3 (요주의)	<ul style="list-style-type: none"> - 향후 2년 이내 사고율이 보통 - 1년 이내로 절연보강 (불가능시 1년이내로 재진단 추천) 	
Level 4 (불량)	<ul style="list-style-type: none"> - 향후 2년 이내 사고율이 높은편. · 케이블 : 교체 또는 절연보강 · 접속재 : 교체 	
Level 5 (매우불량)	<ul style="list-style-type: none"> - 향후 2년 이내 사고율이 매우 높은편. · 케이블 : 즉각 교체 · 접속재 : 교체 	

2. 대상개소 선정

호남선 노안전철변전소(SS)~광주차량기지 사이 전차선로 급전케이블(단상 25kV)에 절연파괴가 발생하여 활선진단기법인 케이블와이즈 진단을 도입하여 전반적인 케이블 상태 측정을 시행하였다. 이 구간의 전원은 예비선로가 구성되지 않았으며 접속점 대부분이 직선으로 구성되어 있고, 또한 케이블 포설구간이 열차운행선로로서 열차접촉 사고우려가 있으며 차량이 접근할 수 없는 곳에 위치한다. 또한 케이블 경과지 상당 부분이 지중매입이 아닌 노출 강제전선관과 덕트로 구성되어 있어 측정결과가 좋지 않은 구간을 개봉하여 쉽게 찾을 수 있는 점이 주효하였다.

차량기지라는 특수성으로 인해 열차 출고 및 정비 등을 시행하기 위해 전차선로 전원이 상시 급전이 필요한 상황이라 사선진단 방법보다는 활선진단 방법을 채택하였다. 더불어 정확도를 높이기 위하여 1차 진단에는 활선진단인 케이블와이즈 진단 적용 후 케이블 접속부분 불량으로 판명된 개소에 대하여 보조진단 방법으로 부분방전(PD) 음향탐지, 적외선 온도측정을 병행하였다.

대상개소에 대한 정보를 요약하면 진단구간은 호남선 노안전철변전소~광주차량기지이고, 전력케이블 선종은 66kV F-CV 200mm² × 1C이며, 사용전압은 단상 2.5kV이고, 선로길이 및 구간은 9,072m (총 22구간) 등과 같다. 해당구간의 활선진단은 시험측정 결과를 도출하기 위해 2017년(1회)과 2020년(2회) 두 번 측정하였고, 2021년에 1회 측정이 예정되어 있다.



그림 4-3. 노안SS~광주차량기기간 전차선로 급전케이블.

제2절 측정결과

1. 1차 진단

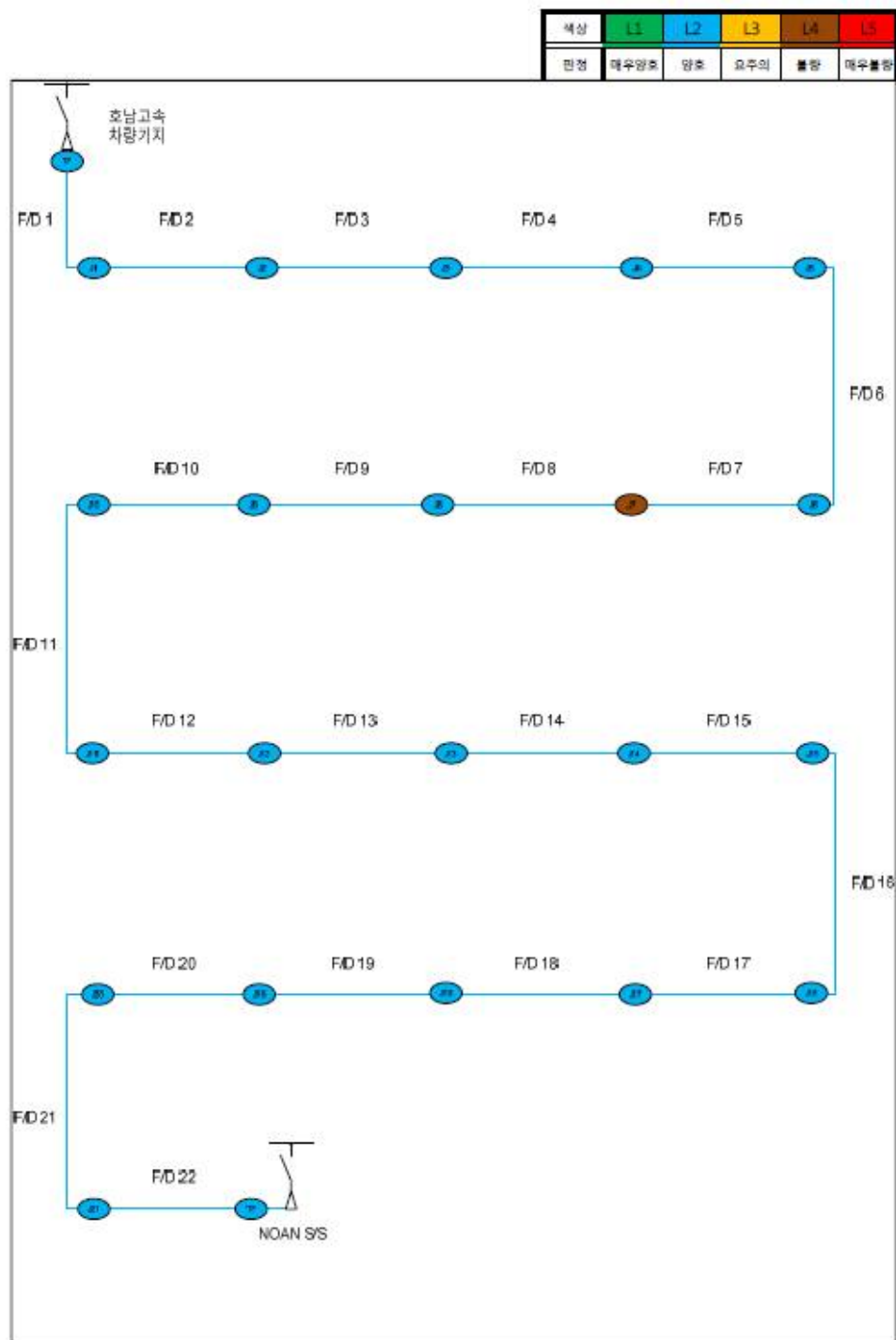


그림 4-4. 광주차량기지 전차선로 급전케이블 활선진단결과 요약도(1차).

표 4-2. 1차 케이블와이즈 진단 케이블 판정결과.

구 분	판정	개소	비고
Level 1	매우양호	0	
Level 2	양호	22	
Level 3	요주의	0	
Level 4	불량	0	
Level 5	매우불량	0	
계		22	

케이블와이즈 진단으로 케이블에 대한 측정을 시행한 결과, 특고압 케이블을 터널이 아닌 토공구간에 지중매입이 아닌 노출 전선관과 덕트로 시공한 것이 철도에서는 처음 시행한 것으로 우려가 많았지만 1차 측정시(2017년도)에는 모든 구간이 Level 2(양호)로 판정되었다.

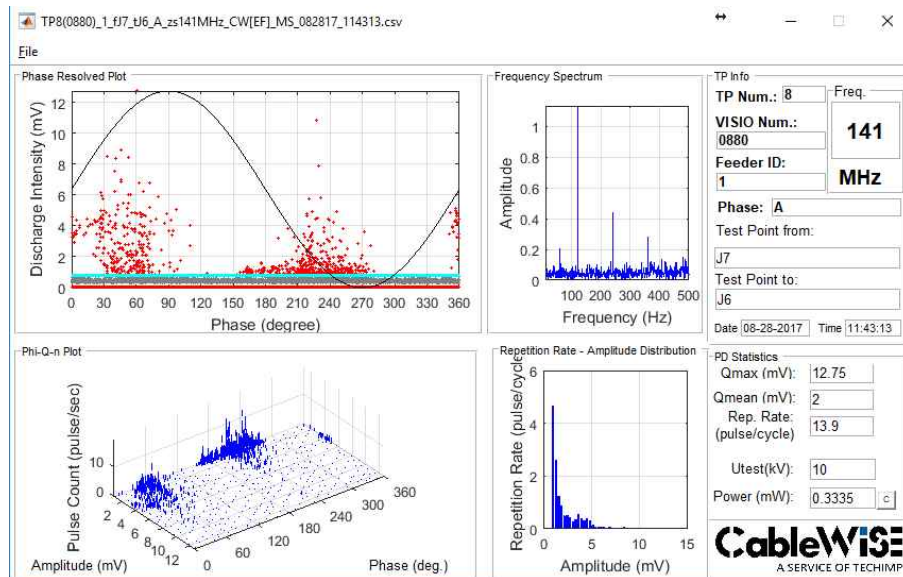
케이블와이즈 진단으로 접속재 등(Accessory)에 대한 측정을 시행한 결과, Level 4(불량)로 판정된 접속개소는 그 즉시 접속을 분리하고 재접속 처리를 하였다. 원인으로서는 접속시공 불량으로 확인이 되었고 최초 장애가 발생한 지점과 같은 접속자가 시공하였다. Level 4(불량)로 2개소가 판정되었지만, 접속점 중간을 기준으로 양쪽으로 구간을 설정하여 실제 불량은 1개 접속점이다. 해당 개소는 최초 장애가 발생한 지점인 접속점(J8)에 인접한 접속점(J7) 이었다.

표 4-3. 1차 케이블와이즈 진단 접속재 판정결과.

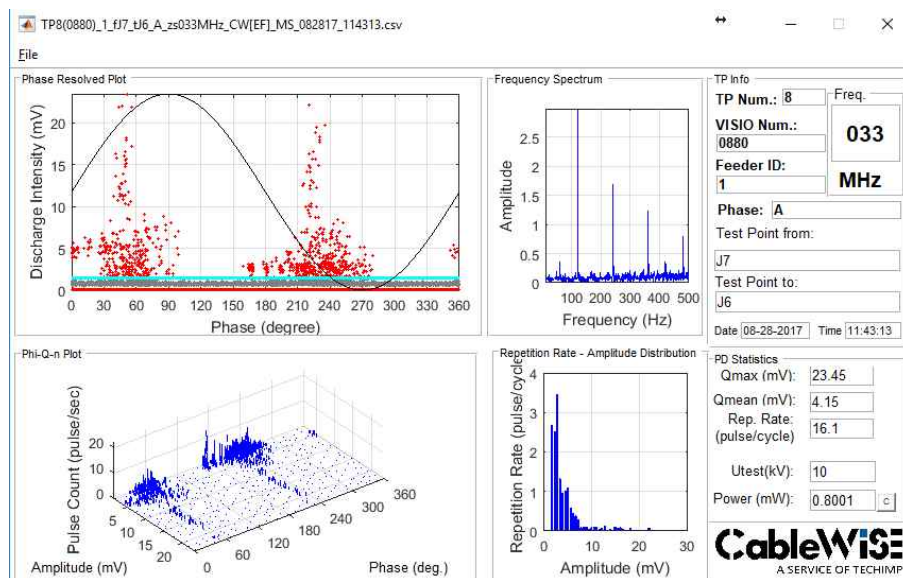
구 분	판정	개 소	비고
Level 1	매우양호	0	
Level 2	양호	42	
Level 3	요주의	0	
Level 4	불량	2	
Level 5	매우불량	0	
계		44	

Level 4(불량)으로 판정된 접속함(J7)에 대한 케이블와이즈 진단 측정 결과, 그림 4-5와 같이 열화가 빠르게 진행되고 있었다. 직선접속재에서 방전신호가

검측되고, 방전특성은 141MHz, 2.0mV, 13.9 pulses/cycle이다. 고장발생 확률은 2년 이내에 18% 정도이고, 긴급점검이 필요하다.



(a) 좌(左)



(b) 우(右)

그림 4-5. 접속함(J7) 접속재 케이블와이즈 진단 측정 결과.

보조진단 으로 부분방전(PD) 음향탐지, 적외선 온도측정을 병행하였다. 표 4-4와 같이 PD 음향진단 및 그림 4-7과 같이 열화상 진단에서도 다른 접속재

소와 비교하여 특이사항이 관측되어 해당 접속점은 불량으로 판정되었다.

표 4-4. 접속함(J7) 부분방전 음향진단 측정결과.

구 간	진단결과			비 고
	TF (POINT)	음량 [dB]	판정	
J7	A	40	불량	0 ~ 15[dB] : 양호 16 ~ 25[dB] : 관심 26 ~ 34[dB] : 요주의 35[dB] ~ : 위험
	B	39	불량	
	C	37	불량	
	D	29	요주의	
	E	19	요주의	



그림 4-6. 부분방전 음향진단 장비.

	개소	J7
	측정일	2017.08.29
	주변온도	20 °C
	평균온도	41 °C
	최고온도	47.1 °C
	비 고	

그림 4-7. 접속함(J7) 적외선 열화상 측정결과.

2. 2차 진단

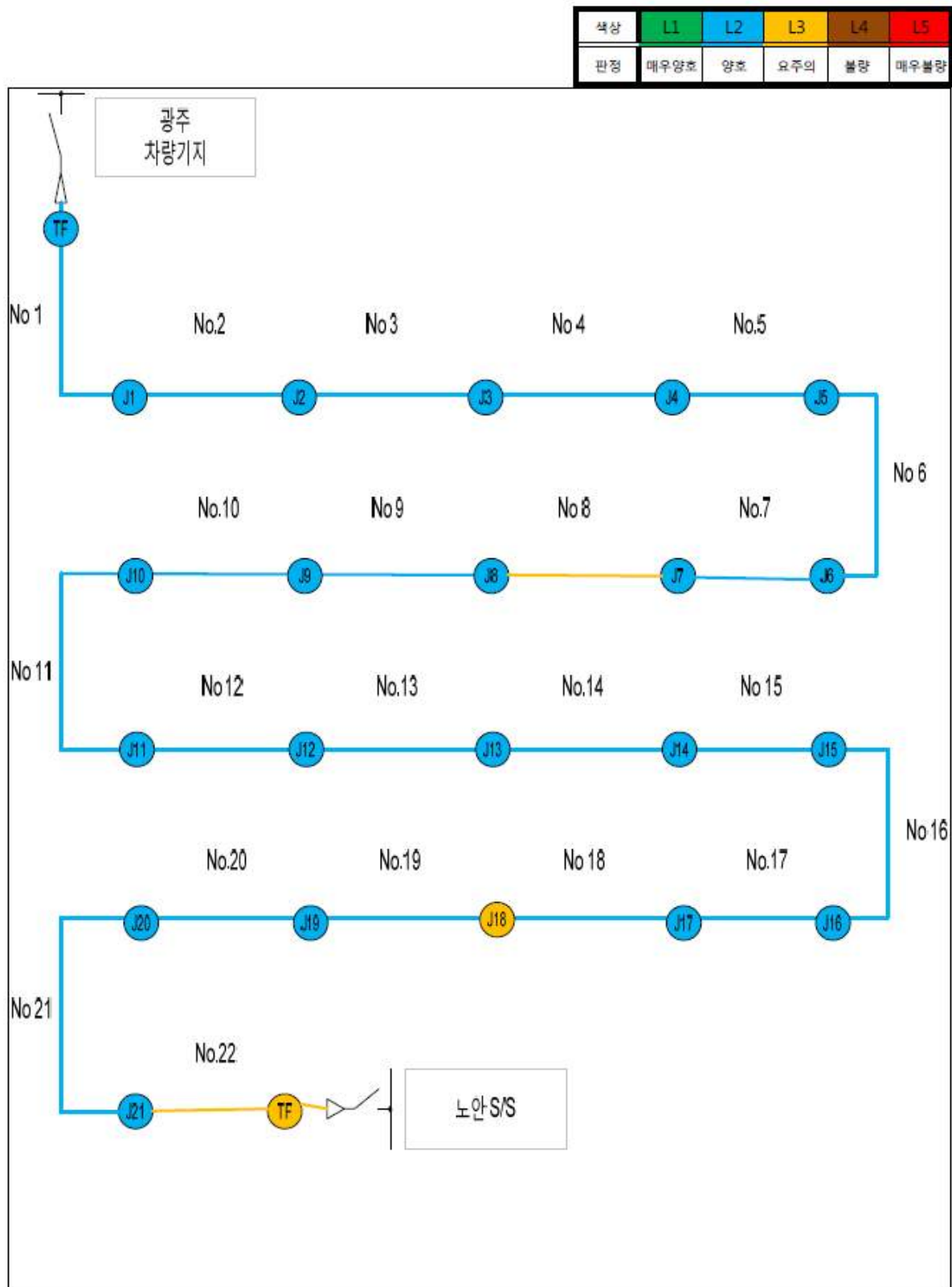


그림 4-8. 광주차량기지 전차선로 급전케이블 활선진단결과 요약도(2차).

표 4-5. 2차 케이블와이즈 진단 케이블 판정결과.

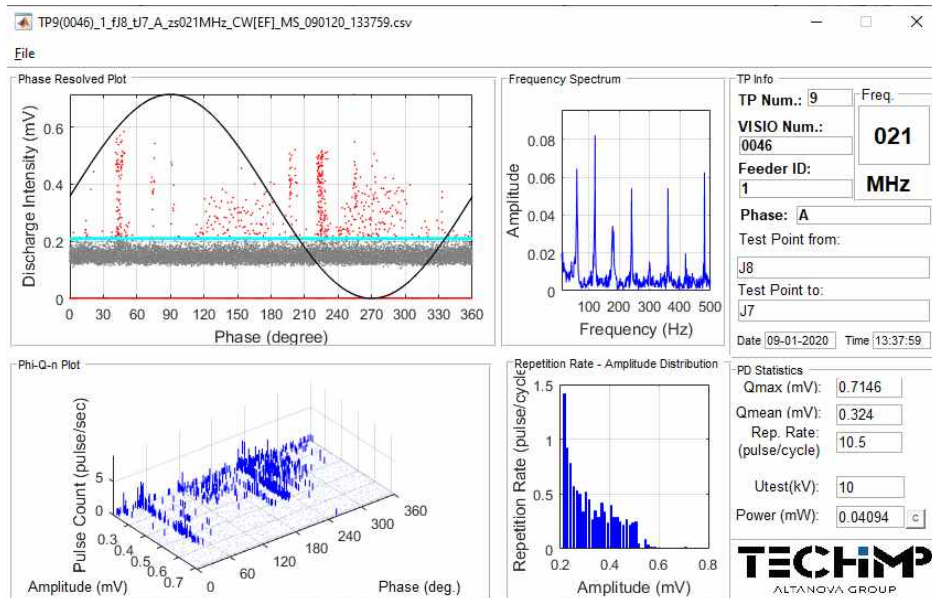
구 분	판정	개소	비고
Level 1	매우양호	0	
Level 2	양호	20	
Level 3	요주의	2	
Level 4	불량	0	
Level 5	매우불량	0	
계		22	

케이블와이즈 진단으로 케이블에 대한 측정을 시행한 결과, 2개소에서 Level 3(요주의)로 판정되어 열화가 진행되고 있다. 2개소 중 J7~J8 접속함 사이 케이블은 두종류의 신호가 검출된다. 첫번째 신호는 케이블 방전으로 의심되며, U-cap 센서로 검출되었다. 방전근원지는 케이블 외피로 보이며, 케이블의 신호가 매우 약하여(0.5mV 미만), 회로의 양측에서 신호 확인이 불가하다. Level 3로 판정되나 즉각적인 조치는 필요하지 않으며, 트렌드 관리를 위해 재진단을 권고한다. 두번째 신호는 외부 트래킹신호로 다수의 장소에서 검출될 수 있으므로 염려할 필요가 없다.

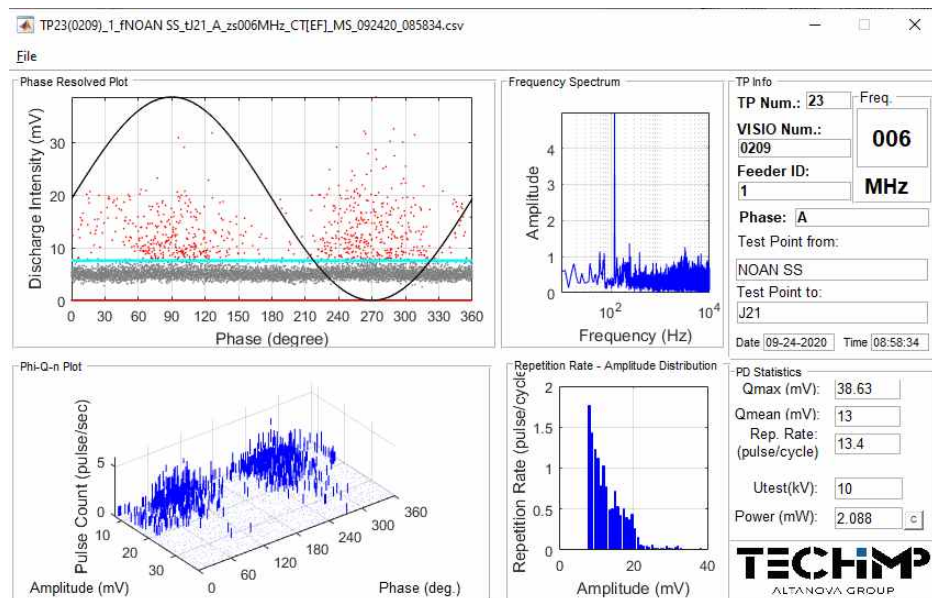
2020년 요주의로 나타난 2개소 중 J7~J8 접속함 사이 케이블은 2017년 절연파괴 장애가 발생한 J7 접속함과 접속불량이 판명되어 재접속을 시행하였던 J8 접속함 사이 케이블로서 재접속에 의해 걱정이도가 부족하여 케이블 외피가 함체에 접촉되어 손상이 발생한 것으로 판단된다. 지속적인 열화변화 추이를 관찰하여 Level 4(불량)가 되었을 경우 교체보수를 시행하기로 하였다.

J21 접속함과 노안전철변전소 사이 케이블은 해당 신호의 진원지가 노안전철변전소에 가까우므로 여러 변전기기에 의한 전파 노이즈 영향을 배제할 수가 없으며, 측정결과가 Level 3(요주의)임을 감안하여 장기적으로 관찰하기로 하였다. 케이블 구간에서 매우 낮은 대역의 방전신호가 검출 되었으며, 낮은 주파수 범위에서 집중적인 방전신호가 J21과 노안전철변전소에서 동일하게 검출되었

다. 신호는 노안전철변전소에서 더 높은 대역폭과 크기가 검측 되므로 방전소스는 노안전철변전소에 더 가까울 것으로 판단된다. 방전근원지는 변전소에 연결된 기기, 케이블 종단의 변압기 등에서 왔을 가능성이 높으며, 모니터링과 재진단을 권장한다. 또한 변전소에 연결된 기기도 같이 진단할 것을 권고한다.



(a) J7~J8 구간



(b) J21~노안전철변전소

그림 4-9. 접속함(J7~J8, J21~노안SS)간 케이블 케이블와이즈 진단 측정결과.

표 4-6. 2차 케이블와이즈 진단 접속재 판정결과.

구 분	판정	개 소	비고
Level 1	매우양호	0	
Level 2	양호	41	
Level 3	요주의	3	
Level 4	불량	0	
Level 5	매우불량	0	
계		44	

케이블와이즈 진단으로 접속재 등(Accessory)에 대한 측정을 시행한 결과, Level 3(요주의)가 3개소가 발생하였다. 1개소는 노안전철변전소로 변전기기의 노이즈 발생에 의한 것으로 추측되며, 2개소는 접속점을 중심으로 하여 양쪽에 발생하여서 J18 접속점이다. 접속점에서 약한 방전이 검출된다. 방전은 표면방전으로 접속점의 불순물에 의한 것으로 판단된다. 방전의 크기와 반복률이 매우 낮으므로 즉각적인 조치는 필요하지 않다. 접속점의 트렌드 분석을 위해 1년 이내 재진단을 권장한다. 미소공극이 생성·확대되어 내부방전으로 변경되는 위험을 배제할 수 없어 지속적인 관찰을 하여야 한다.

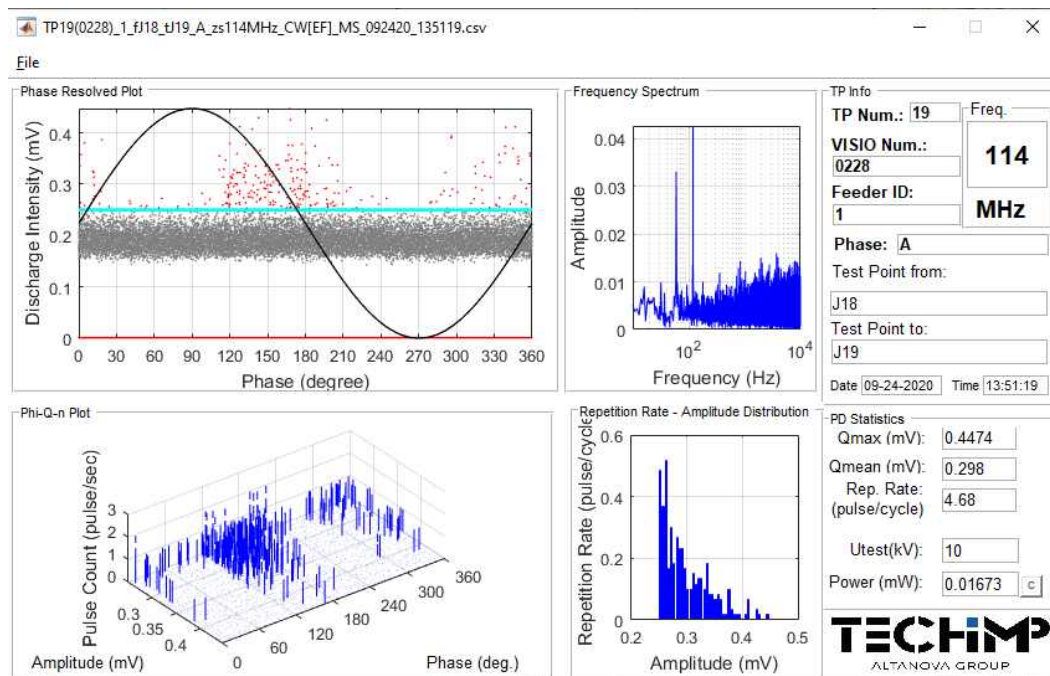


그림 4-10. 접속함(J18) 접속재 케이블와이즈 진단 측정결과.

3. 진단 종합의견

두 차례에 걸친 활선진단으로 전력케이블 열화상태 변화 진행에 대해 유의미한 결과를 얻었다. 케이블 내부 부분방전에서 발생하는 노이즈를 이용한 측정방법으로 전파 발생이 많은 변전소 주변에서의 진단에 한계를 보이긴 하였지만 대부분 개소의 진단에 높은 정확도를 보여 주었다. Level 3(요주의) 이상 판정을 받은 개소에 대하여 향후 지속적인 관찰이 필요하다.

활선진단 케이블와이즈 진단 측정장비가 절연저항계 보다는 간편하진 않지만 다른 측정장비(VLF tan δ) 보다는 간편하고 단전없이 철도 운행선로 진단이 가능하여 철도 현장의 상황에 가장 적합하다고 할 수 있다. 주기적으로 활선진단을 시행하여 지중 전력케이블의 열화상태 변화 추이 등 더 많은 데이터를 취득하고 연구 분석하여 적합성이 검증되면 효율적인 유지보수를 위해 매뉴얼에 반영할 필요가 있다.

< 참 고 문 헌 >

- [1] 한국철도공사, “전기분야 유지보수매뉴얼”. 2013
- [2] (주)한우테크, “활선열화 진단 Cable wise”, 2016
- [3] (주)피디엔에스, “전력케이블 활선 PD(부분방전) 진단기술”, 2019
- [4] Nam, Young-Hee. "A Study on Improvement of Diagnosis Method for Electric Railway Power Cable with Considering Cable Aging Index." Engineering master's degree, Graduate School of Railway Seoul National University of Science and Technology, 2015.
- [5] Park, Ji-Sung. "Influence of Immersion Mediums on Electrical Breakdown Strength of Solid Insulators." Engineering master's degree, Graduate School of Chungbuk National University, 2016
- [6] Byun, Doo-Gyoon. "A Study on the Analysis of Insulation Degradation Mechanisms for Electrical Installation Equipments." Engineering master's degree, Graduate School of Kwangwoon University, 2006.
- [7] 김보경 외 3인, ‘고압 및 특고압 전력케이블의 절연진단 및 유지보수 관리방법’, 월간 전력기술인, PP. 25-26, 2003.
- [8] Jung, Woo-Sung. "A Study on VLF $\tan\delta$ Status Criteria for Power Cables." Ph.D. in Engineering, Graduate School of Mokpo National University, 2020.

- [9] 김성민 외 3인, “KEPCO의 지중배전케이블 열화진단기술 적용 방향”, 대한 전기학회, PP. 2093-2094, 2011
- [10] Seo, Kyung-Woon. "A Study on the On-line Diagnosis in order to Analyze the Status of Insulating Deterioration in the XLPE Power Cable and Cable joint." Engineering master's degree, Graduate School of Industry & Technology Chonnam National University, 2004.
- [11] F.H.Kreuger, "Partialdischargedetectionin high-voltageequipment", Butterworths, High-voltage engineering at the technical university, Delft, pp.29-67.95-152, 1989.
- [12] Choong-Sik Kim, Teruyoshi Mizutani, "Correlation between Change in PD Current Shapes and Ageing by the Oxidation of Void Surface", T.IEE, Japan, Vol.122-A, No.11, pp.983-986, 2002