creative commons

COMMONS DEED

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

dCollection

공학전문석사학위 연구보고서

배전용 해저케이블 Very Low Frequency 진단 열화판단 기준개선을 위한 연구

A Study on the Improvement of Very Low Frequency diagnostic criteria for Middle Voltage submarine cable

2023년 2월

서울대학교 공학전문대학원

응용공학과 응용공학전공

장 병 한

배전용 해저케이블 Very Low Frequency 진단 열화판단 기준개선을 위한 연구

지도교수 서 은 석

이 프로젝트 리포트를 공학전문석사 학위
연구보고서로 제출함

서울대학교 공학전문대학원
응용공학과 응용공학전공
장 병 한

장병한의 공학전문석사 학위 연구보고서를 인준함
2023년 2 월

위 원 장 윤 용 태 (인)
부위원장 서 은 석 (인)
위 원 김 희 집 (인)
위 원 김 국 헌 (인)
위 원 김 용 권 (인)

국문초록

주요어 : 해저케이블, VLF(Very Low Frquency), TD(Tanδ), VLF PD(Pirtial Discharge), VLF진단 주기, VLF진단 전압, Index R
학 번 : 2021-21111

배전용 지중케이블 및 해저케이블 열화상태를 진단하기 위해 VLF(Very Low Frequency)진단을 시행하고 있으며 각각 다른 진단주기와 판단기준을 적용하고 있지만 모두 동일한 절연재를 사용한 케이블로써 진단주기와 판단기준을 동일하게 운영할 필요가 있다.

또한 진단전압은 계통전압인 13.2kV보다 높은 최대 23.1kV까지 인가를 하고 있어 진단으로 케이블 절연체에 스트레스를 가하고 있으며 진단중 또는 진단후 케이블의 절연파괴도 발생되고 있어 진단주기 조정에 대한 검토도 필요하다.

본 연구에는 한국전력의 VLF진단실적 및 고장실적을 근거로 엑셀, 미니탭, R을 활용한 통계기법으로 총 4개 부분 ① 해저케이블 최초 진단시기 선정, ② 1㎞ 이상 케이블에 대한 TD(Tanδ) 보정방안, ③ VLF 진단전압 저감방안, ④ 머신러닝을 통한 판단 분류모델 선정에 대한 검토를 하였으며 배전용 지중케이블 통계자료 분석결과를 해저케이블에 적용하고 그 결과를 검증하는 방법으로 연구를 진행하였으며 현재의 방법을 개선 가능한 유의미한 결과를 얻을 수 있었다.

연구결과를 근거로 ”배전용 해저케이블유지보수업무 절차서“의 열화진단 부분에 대한 개정(안)을 제시하였으며 추후 본 연구의 검증을 통해 절차서 개정도 가능해 보인다.

절차서 개정에 따른 진단주기조정 및 진단전압하향은 배전선로 유지보수 비용을 직간접적으로 줄일수 있으며 잦은 진단에 따른 배전용 해저케이블 절연체에 가해지는 스트레스 줄여 수명감소를 예방할 수 있다.

목 차

제 1 장 서론 ····· 1
제 1 절 연구배경 및 목적 ····· 1
제 2 절 논문의 개요 및 구성 ····· 4

제 2 장 배전용 해저케이블 최초진단시기 ····· 6
제 1 절 선행연구 및 이론적배경 ····· 6
제 2 절 배전용 지중케이블의 통계수명 분석 ····· 7

제 3 장 VLF TD진단 거리보정 방안 ····· 12
제 1 절 선행연구 및 이론적배경 ····· 12
제 2 절 TD 판단기준 ····· 14
제 3 절 TD 거리보정 방안 ····· 17

제 4 장 VLF 진단전압 하향 방안 ····· 45
제 1 절 선행연구 및 이론적배경 ····· 45
제 2 절 VLF 진단으로 인한 절연파괴 사례 ····· 48
제 3 절 VLF 진단전압 하향 방안 ····· 51

제 5 장 VLF TD진단 분류모델 ····· 73
제 1 절 이론적배경 ····· 73
제 2 절 TD 판단인자 비교 ····· 74
제 3 절 해저케이블 머신러닝 분류모델 ····· 77

제 6 장 결론 ····· 89
제 1 절 해저케이블 최조진단시기 선정 ····· 89
제 2 절 VLF TD진단 거리보정 방안 ····· 90
제 3 절 VLF 진단전압 하향 방안 ····· 91
제 4 절 VLF TD진단 분류모델 ····· 93

참고문헌 ····· 94
Abstract ····· 95

표 목 차

[표 1-1] 배전용케이블 VLF진단 주기 ····· 1
[표 2-1] 배전용 지중케이블 변천 ····· 6
[표 2-2] 배전케이블 수명자료 ····· 7
[표 2-3] 기간별 와이블분포 모수 ····· 8
[표 2-4] 모수비교 ····· 9
[표 2-5] 국내 배전용 해저케이블 사용연도 ····· 10
[표 2-6] 30년 경과 배전용 해저케이블 TD진단 결과 ····· 11
[표 2-7] 배전용 해저케이블 최초진단시기 ····· 11
[표 3-1] 장비종류 및 성능 ····· 12
[표 3-2] 23.1kV에서 VLF장비별 최대진단거리 ····· 12
[표 3-3] 해저케이블 거리구간별 운영현황 ····· 14
[표 3-4] VLF 판단기준(2011년) ····· 14
[표 3-5] VLF 판단기준(2012년~2015년) ····· 15
[표 3-6] TD보정계수 산출 절차 ····· 17
[표 3-7] 진단거리별 수량 ····· 17
[표 3-8] 2012년~2020년 진단설적 기술통계 ····· 18
[표 3-9] 0.5Uo TD 거리구간별 통계 ····· 19
[표 3-10] 1.0Uo TD 거리구간별 통계 ····· 21
[표 3-11] 1.5Uo TD 거리구간별 통계 ····· 21
[표 3-12] 거리구간별 TD 보정계수 ····· 22
[표 3-13] 거리구간별 TD 27 이하 보정계수 ····· 25
[표 3-14] 스테이지식에 따른 구간 ····· 27
[표 3-15] 거리기준 전압별 통계 ····· 28
[표 3-16] 거리기준 보정계수 ····· 30
[표 3-17] 거리기준 평균보정계수 및 편차 ····· 31

[표 3-18] 수량기준 전압별 통계 ····· 32
[표 3-19] 수량기준 보정계수 ····· 33
[표 3-20] 수량기준 평균보정계수 및 편차 ····· 34
[표 3-21] 거리구간별 TD 보정계수 ····· 36
[표 3-22] 연도별 TD 모수분포 ····· 37
[표 3-23] 연도별 1,000미터 이상 TD 모수분포 ····· 38
[표 3-24] 보정전후 TD 및 판단결과 ····· 39
[표 3-25] 잔존수명 및 진단주기 ····· 42
[표 3-26] 해저케이블 열화측정 대상 및 주기 ····· 42
[표 3-27] 판단기준별 진단주기 ····· 43
[표 3-28] 해저케이블 진단주기(안) ····· 44
[표 4-1] VLF진단 전압 ····· 45
[표 4-2] 전압-주파수에 따른 트리성장률 ····· 46
[표 4-3] 진단중 및 진단후 절연파괴 실적 ····· 49
[표 4-4] 진단중 및 진단후 고장케이블 TD 분포 ····· 49
[표 4-5] 해저케이블 사용기간 ····· 51
[표 4-6] 0.5Uo TD 구간별 기술통계 ····· 52
[표 4-7] 0.5Uo TD 이상치 제외 구간별 기술통계 ····· 54
[표 4-8] 동일형상모수가정 TD 모수 ····· 56
[표 4-9] 동일형상모수가정 1.5Uo TD 예측 ····· 56
[표 4-10] Stdev 80% 이상 기술통계 ····· 59
[표 4-11] 1.5Uo TD 예측 계수 ····· 60
[표 4-12] 1.5Uo TD 오차내 예측율 ····· 63
[표 4-13] 1.5Uo TD 오차내 예측율 비교 ····· 64
[표 4-14] 해저케이블 1.5Uo TD 예측 ····· 65
[표 4-15] PD 발생건수 ····· 66
[표 4-16] PD 방전개시전압 비율 ····· 68

[표 4-17] 해저케이블 PD 발생 현황 ····· 71
[표 4-18] 배전용 해저케이블 진단전압(안) ····· 72
[표 5-1] 머신러닝 절차 ····· 73
[표 5-2] 머신러닝 알고리즘 ····· 74
[표 5-3] VLF TD 판단항목 ····· 74
[표 5-4] VLF 판단기준 ② (2012~2015년) ····· 75
[표 5-5] Index R Vs 판단기준 ② 비교 ····· 76
[표 5-6] TD 배수별 변동계수 ····· 77
[표 5-7] 머신러닝 분석위한 TD 분류 ····· 78
[표 5-8] 학습자료 분류결과 ····· 79
[표 5-9] 인공신경망 TD 분석결과 ····· 79
[표 5-10] 인공신경망 선정모델 해저케이블 적용결과 ··· 80
[표 5-11] 수작업판단 Vs 인공신경망 분류결과 비교 ···· 81
[표 5-12] 가공된 TD 분석결과 ····· 82
[표 5-13] TD 24개 Vs 17개 분류결과 비교 ····· 82
[표 5-14] TD 24개 의사결정트리 분석결과 ····· 83
[표 5-15] TD 17개 의사결정트리 분석결과 ····· 84
[표 5-16] 수작업판단 Vs C50 모델 분류결과 비교 ····· 85
[표 5-17] 수작업판단 Vs 머신러닝 분류결과 비교 ····· 86
[표 5-18] 판단결과 상이구간 비교 ····· 86
[표 5-19] 능산도구간 세부분석 ····· 87
[표 5-20] 마삭도구간 세부분석 ····· 88
[표 6-1] VLF 최초진단시점 ····· 89
[표 6-2] 배전용 해저케이블 최초진단시기 ····· 89
[표 6-3] TD 보정계수 ····· 90
[표 6-4] 배전용 해저케이블 VLF진단주기(안) ····· 90
[표 6-5] 1.5Uo TD 예측계수 ····· 91

[표 6-6] 해저케이블 PD 발생 현황 ····· 92
[표 6-7] 배전용 해저케이블 진단전압(안) ····· 92
[표 6-8] 해저케이블 분류결과 ····· 93

그 림 목 차

[그림 2-1] 수트리 및 전기트리 ····· 6
[그림 2-2] 검정결과 및 ① 기간 확률도 ····· 8
[그림 2-3] 검정결과 및 ②,③ 기간 확률도 ····· 9
[그림 2-4] 배전용 해저케이블 수명분포 ····· 10
[그림 3-1] 케이블등가회로 및 측정전류 ····· 13
[그림 3-2] 케이블 잔존수명 산출방법 ····· 16
[그림 3-3] TD 및 Index R 분포 ····· 18
[그림 3-4] TD 및 Index R 분포특성 검정 ····· 19
[그림 3-5] 진단전압별 TD 분포 ····· 22
[그림 3-6] TD보정계수 분포 ····· 27
[그림 3-7] 거리기준 전압별 TD변화 ····· 29
[그림 3-8] 거리기준 보정계수 변화 ····· 31
[그림 3-9] 수량기준 전압별 TD 변화 ····· 33
[그림 3-10] 수량기준 보정계수 변화 ····· 35
[그림 3-11] 진단전압별 TD 분포 ····· 36
[그림 4-1] 케이블 결함별 VLF 검출방법 ····· 46
[그림 4-2] 절연체내 수트리 및 초기전기트리 ····· 50
[그림 4-3] 전압증가에 따른 TD 와이블분포 ····· 55
[그림 4-4] 1.5Uo 예측(척도모수 비)오차내 예측률 ····· 57
[그림 4-5] TD 상관분석결과 ····· 58
[그림 4-6] Stdev Vs TD 와이블분포 ····· 58
[그림 4-7] Stdev 80% 이상 와이블분포 ····· 59
[그림 4-8] Stdev 80% Vs TD 상관분석 ····· 60
[그림 4-9] Stdev 및 TD 비선형 시작점 ····· 61

[그림 4-10] Stdev 1.0 이상 기울기 ····· 62
[그림 4-11] 1.5Uo 예측(STD비) 오차내 예측률 ····· 63
[그림 4-12] 1.5Uo 10% 오차내 예측률비교 ····· 64
[그림 4-13] 1.5Uo 20% 오차내 예측률비교 ····· 65
[그림 4-14] PD 종류 ····· 67
[그림 4-15] PD 방전개시전압별 누적비율 ····· 68
[그림 4-16] 시료별 방전개시 전압 ····· 69
[그림 4-17] 시료별 부분방전 VLF PD파형 ····· 70
[그림 4-18] 케이블 설치방법 ····· 71
[그림 4-19] 주파수에 따른 방전개시전압 비교 ····· 72
[그림 5-1] Index R 특이값 사례 ····· 76
[그림 5-2] R nnet 분석모델 ····· 80

제 1 장 서론

제 1 절 연구배경 및 목적

한국전력은 도서지역 전력공급을 위해 1978년 배전용 해저케이블 건설계획을 수립하여 1979년부터 전라남도 신안지역을 시작으로 2021년 현재 총 39구간을 설치하였으며, 안정적인 전력공급을 위해 케이블 열화상태 점검을 위해 VLF[1)]진단을 2011년부터 도입하여 시행중에 있다.

VLF진단은 0.1㎐의 저주파 고전압을 심선에 인가하여 케이블 전체구간에 대한 열화정도를 측정하는 TD(Tanδ)진단과 국부적 결함을 찾기 위한 PD(Partial Discharge)진단으로 나뉜다.

배전용 지중케이블의 VLF 판단기준은 최초도입 후 2차례 개정을 통해 진단결과에 따른 케이블 절연체의 잔존수명에 따라 진단주기를 달리 선정하고 있으나, 배전용 해저케이블의 경우 한국전력 내부 절차서인 “배전용 해저케이블 유지보수업무절차서”의 열화진단주기에 따라 사용기간에 따라 정기적으로 진단을 시행하고 있어 배전용 지중케이블 보다 잦은진단에 따른 진단비용 증가와 케이블 절연체 스트레스 가중에 따른 장기사용 해저케이블의 진단 중 절연파괴 사고의 위험성도 높아지고 있다.

또한 케이블에 대한 VLF최초 진단시점도 배전용 지중케이블의 경우 18년 경과시점, 배전용 해저케이블의 경우 10년 경과시점으로 서로 상이하게 운영되고 있어, 일반적인 운영환경에서는 수트리가 발생되지 않는 해저케이블의 최초진단 시점을 연장할 필요성도 있다.

---

1) VLF(Very Low Frequency)진단 : 0.01~0.1㎐의 저주파 고전압으로 케이블 열화상태를 확인하는 기술

표 1-1. 배전용케이블 VLF진단 주기.

지중케이블	18년(최초) → 최초진단 결과 반영 5~10년 주기
해저케이블	10년(최초), 15~20년 5년 주기, 20년 초과 3년 주기 전년도 정전 및 요주의 진단케이블 1년후 진단

배전용 지중케이블 최초 진단시기는 2018년 까지 13년 경과, 2022년 까지 15년 경과, 2022년 4월 이후 18년 경과시점부터 VLF진단을 시행하는 것으로 연장되었으며, 이러한 사유는 케이블 제조기술의 발전으로 수분에 의한 케이블 절연능력 저하되는 것을 감소시킨 결과이며, 최초 VLF진단기술 도입을 위해 2009년에 수행된 연구보고서에서는 당시 주로 사용된 CN-CV 및 CN-CV/W 계열의 케이블은 약 15년부터 수트리[2]에 의한 고장이 발생되는 것으로 판단하여 최초진단시점을 13년으로 권고를 하였다.

따라서 배전용 지중케이블과 달리 내부를 방수층으로 둘러싼 해저케이블의 경우 외부요인에 의한 케이블외피에 손상이 없다면 수트리로 인한 고장사례가 없으며, 수트리 발생여부를 진단하는 VLF TD진단 최초시점을 10년 보다 더 연장이 가능한지에 대해 검토하고자 한다.

배전용 지중케이블의 경우 2015년부터 VLF TD진단으로 취득한 3가지 측정값으로 3차원 평면에 정규화한 Index R[3]로 차기진단 주기와 잔존수명을 예측하고 있으나, 판단요소 인자값의 Scale 차이로 진단유효거리를 1.5㎞로 제한하여 평균거리가 약 4㎞인 해저케이블에 적용이 어려워 Index R 도입 이전 와이블 통계분포 기반의 판단기준을 사용하고 있어 현장에 혼선이 있어 판단기준 일원화도 필요하다.

---

2) 수트리 : 가교폴리에틸렌 절연물이 수분과 결합한 전기화학적 반응으로 나무 모양의 형상으로 절연체가 열화되는 현상

3) TD : Index R : $\sqrt{(norm.Tan\delta)^2 + (norm.\triangle Tan\delta)^2 + (norm.Skirt)^2}$

VLF진단 거리는 진단장비의 출력 및 전압과 케이블의 정전용량에 따라 결정됨에도 1.5㎞로 제한한 판단기준에 의해 진단을 담당하는 현장직원 및 진단전문회사의 기술자들도 진단장비로 1.5㎞ 이상의 진단이 불가능한 것으로 잘 못 알고 있다.

VLF진단을 위해 배전선로 계통상전압(13.2㎸)의 0.75배(6.6kV) ~ 1.75배(23.1kV) 전압을 케이블 심선에 인가하여 TD(Tanδ)측정 및 PD(부분방전, Partial Discharge)측정 과정에서 진단중 또는 진단후 케이블 절연체의 손상으로 인한 고장이 발생되는 사례도 있으며, 고장난 구간은 즉시 계통에서 분리 후 교체를 한다.

하지만 해저케이블의 경우 해상작업의 특성상 복구에 최소 1개월 이상 소요되며 새로운 케이블로 교체를 위해서는 인허가, 어업권보상, 설계, 자재구매, 시공까지 약 5년 이상의 기간이 소요된다.

케이블 진단으로 인한 고장은 수트리로 인하여 절연체가 진단전압을 견디지 못할 정도로 열화되었거나, 파괴시험에 해당되는 시험전압으로 절연체에 스트레스가 가해진 상황에서 전원 투입시 개폐서지에 의해 발생될 수 있어 해저케이블 VLF진단 전압을 최대 1.75배(23.1kV)에서 하향가능한지에 대한 검토가 필요해 보이며, 최근들어 사용전압과 동일한 VLF진단 전압으로 케이블열화상태 판단을 위한 연구도 이루어지고 있다.

VLF TD진단의 경우 진단과정에서 측정된 24개의 값의 평균, 표준편차 등 다양한 조합을 통해 판단에 활용하기도 하지만 측정되는 24개의 값의 변화 패턴으로 케이블 상태를 알수도 있어, 다년간 축적된 진단 Data를 활용 머신러닝을 통해 판단결과를 분류하여 판단오류 방지를 위한 보조자료로 활용하고자 한다.

제 2 절 논문의 개요 및 구성

본 연구에서는 2012년 ~ 2021년간 진단데이터 및 고장데이터를 근거하여 엑셀, 미니탭, R을 활용하여 배전용 해저케이블의 최초진단시점, 장거리선로의 VLF TD보정방안, VLF진단전압 하향방안 및 머신러닝을 활용한 판단모델에 대해 통계적 기법으로 배전용 해저케이블에 적용가능한 VLF진단 열화판단기준을 제시하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다.

제 1장에서는 본 연구의 배경과 목적 그리고 논문의 개요 구성에 대해 살펴보았다.

제 2장에서는 외부요인으로 인한 고장을 제외한 케이블 절연체 열화로 인한 고장데이터를 활용하여 통계수명에 따른 배전용 해저케이블의 최초진단시점 선정하였다.

제 3장에서는 약 12만개의 VLF진단 데이터를 활용하여 거리증가에 따른 TD 감소경향 분석과 와이블모수를 활용 보정계수를 산출하여 1㎞ 이상 선로에 대한 보정된 TD값을 활용 판단기준 일원화에 대해 검토를 하였다.

제 4장에서는 VLF 진단전압 하향을 위해 제3장과 동일한 데이터를 활용하여 진단결과값 예측을 위한 계수표를 유도하고 예측값과 실제측정값에 대한 검증 및 시료별 부분방전 특성실험과 해저케이블 설치환경 특성을 감안한 진단전압 하향 가능성에 대해 검토를 하였다.

제 5장에서는 축적된 진단데이터를 활용한 머신러닝 통해 판단모델을 선정하여 진단 후 판단자의 판정 보조자료로 활용할 수 있도록 모델을 만들어 보았다.

마지막 제 6장에서는 수행한 연구결과 토대로 “배전용 해저케이블 유지보수업무절차서” 열화진단부분 개정방안에 대해 기술을 하였다.

제 2 장 배전용 해저케이블 최초진단시기

제 1 절 선행연구 및 이론적 배경

XLPE 케이블은 제작과정에서 절연체 내부에 포함된 불순물이 운영환경에서 침투한 수분과 결합하여 전계집중 개소에서 수트리가 발생, 지속적인 성장 후 절연체를 관통하는 전기트리 고장으로 진전된다고 알려져 있다.

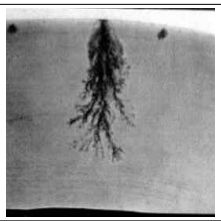
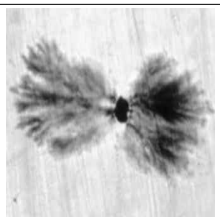
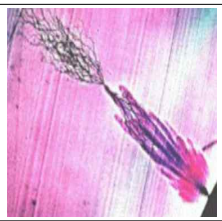
수 트 리(water tree)		전 기 트 리(electric tree)	
			

그림 2-1. 수트리 및 전기트리[1].

케이블 열화고장은 제조 및 시공기술 발전에 따라 점차 줄어들고 있으며, 케이블 수밀처리 방법 개선에 의해 수명 또한 함께 개선되고 있다.

표 2-1. 배전용 지중케이블 변천.

사용기간	케이블약호	케이블주요특성 및 개선내용
1971～1983	CV[1)]	비접지 계통에 사용
1983～1999	CNCV[2)]	중성선 수밀특성 강화, 건식가교 적용
1999～2007	CNCV-W[3)]	도체내 수분유입 차단, 예상수명 약 23년
2001～2011	TR CNCV-W[4)]	절연체 수트리 억제, 예상수명 약 33년
2005～현재	TR CNCE-W[5)]	외피 방수성능 개선, 예상수명 약 35년

케이블 수밀특성 개선으로 2005년 이후 사용된 TR CNCE-W의 경우 제조사 제시 수명이 약 35년으로 약 23년인 CNCV-W 대비 12년이 증가 되었으며 수명증가는 케이블 수트리발생 억제와 상관관계가 있다.

또한 한국전력에서는 케이블 수트리 열화 진단을 위해 2011년 VLF 진단장비를 도입하여 13년 경과 케이블에 대해 선별적 진단을 하고, 20년 경과 케이블을 대상으로는 전 구간을 진단하도록 제시한 최초도입을 위한 연구결과를 토대로 진단을 시행하였다[1].

케이블 절연체 열화로 인한 고장 감소에 따라 VLF 최초진단 시점은 2012~2018년 13년 경과, 21년까지 15년 경과, 2021년 4월 이후 18년 경과시 진단하는 것으로 연장되었고, 이는 케이블 제작기술발전 및 VLF 진단도입에 따른 절연체 열화 케이블 조기교체에 따른 결과이다.

2008년 이후 케이블고장 자료를 활용 케이블 통계수명 특성을 알아보고 해저케이블의 VLF최초진단시점 연장이 가능한지에 대해 고찰해보고자 한다.

제 2 절 배전용 지중케이블의 통계수명 분석

2.1 배전선로 수명자료

배전케이블 평균수명 산출을 위해 2008년~2021.4월까지 고장자료 중 외부요인에 의한 원인을 제외한 고장실적을 추출하였다.

표 2-2. 배전케이블 수명자료.

5년 이하	10년 이하	15년 이하	20년 이하	25년 이하	30년 이하	40년 이하	합 계
21건	52건	68건	117건	127건	63건	26건	474건

2.2 배전선로 수명자료 통계분석

평균수명 산출을 위해 경험적 분포함수 메디안랭크순으로 정렬 후 회귀분석으로 형상모수와 척도모수를 도출하였다.

케이블 평균수명은 와이블분포를 따른다고 가정하고 총 3개 기간에 대해 척도모수 및 MTTF를 산출하였다.

표 2-3. 기간별 와이블분포 모수.

① 2008~2021.4	② 2008~2012	③ 2013~2021.4
형상모수 : 2.39 척도모수 : 21.2 MTTF : 18.79	형상모수 : 2.25 척도모수 : 17.9 MTTF : 15.85	형상모수 : 2.51 척도모수 : 22.8 MTTF : 20.23

VLF진단 도입 후 ③ 기간의 척도모수 및 MTTF는 ② 기간보다 약 1.27배로 증가되었으며 케이블 수밀특성 개선 및 VLF 진단도입으로 케이블 절연체 열화로 인한 고장요소 제거에 따른 증가로 판단된다.

회귀분석 방법으로 산출된 모수 검증을 위해 수명분석에 사용되는 미니탭을 활용 Anderson-Darling 검정통계결과 와이블 분포를 적용하여 확률도 및 형상모수와 척도모수를 산출하였다.

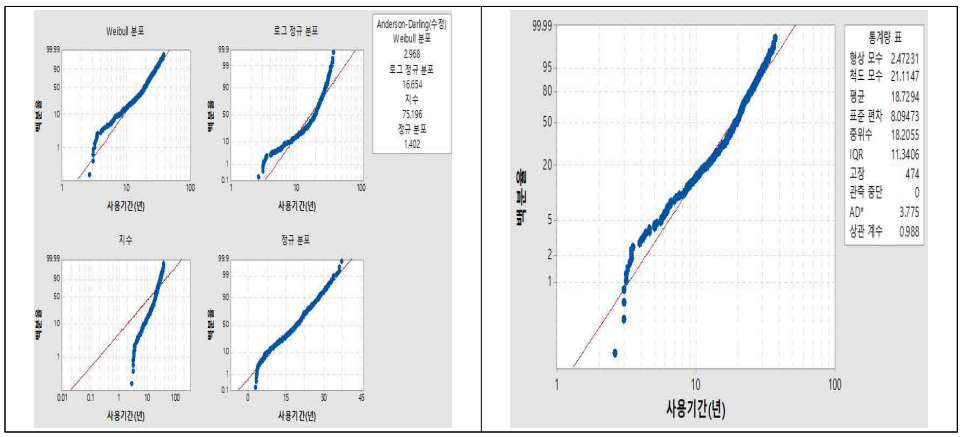


그림 2-2. 검정결과 및 ① 기간 확률도.

① 기간의 형상모수 2.47, 척도모수 21.11로 수작업으로 계산한 형상모수 2.39, 척도모수 21.2와 동일한 값으로 볼 수 있는 범위에서 산출되었으며 동일한 방법으로 ② 기간, ③ 기간에 대해 모수산출을 반복하였다.

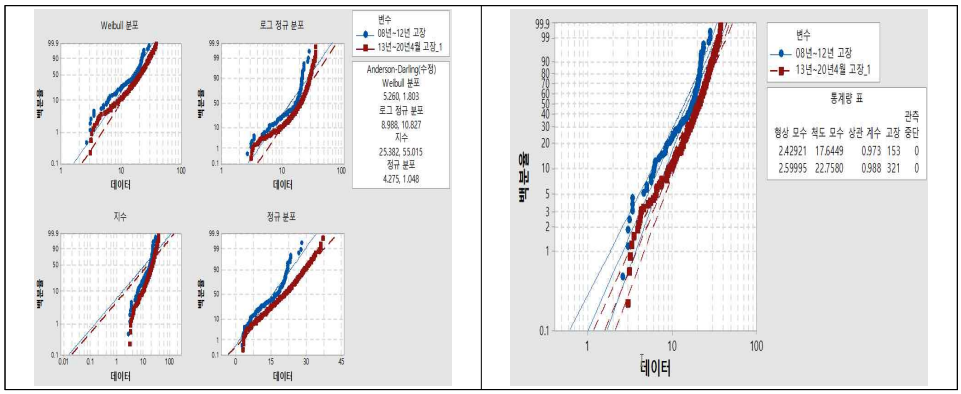


그림 2-3. 검정결과 및 ②, ③ 기간 확률도.

표 2-4. 모수비교.

구 분		① 2008~2021.4	② 2008~2012	③ 2013~2021.4
회귀 분석 방법	형상	2.39	2.25	2.51
	척도	21.2	17.9	22.8
	MTTF	18.79	15.85	20.23
미니탭 분석	형상	2.47	2.42	2.59
	척도	21.11	17.64	22.75
	MTTF	18.72	15.64	20.21

표 (2-4)는 배전용 지중케이블 열화고장에 대한 수명분포이며, ③ 기간의 척도모수 및 MTTF가 ② 기간보다 증가됨에 따라 평균수명 또한 증가 되었음을 알 수 있다. 배전 지중케이블의 경우 최초 진단시기를 18년으로 증가하여 운영하는 것이 가능하며, 배전용 해저케이블에 대해서도 동일하게 적용 가능한지에 대해 검토하고자 한다.

하지만 해저케이블의 경우 절연체 열화로 인한 고장 실적은 없으며 현재까지 총 2건의 고장중 1건은 외상 나머지 1건은 해저에 있어 원인을 알 수 없다. 따라서 2건의 고장에 대해 열화고장으로 가정하고 평균수명을 산출하였다.

표 2-5. 국내 배전용 해저케이블 사용연도.

10년이하	10~20년	20~30년	30~40년	41년이상	합 계	비고
10개소	14개소	2개소	5개소	8개소 (3개소)	39개소	36개소 (예비선로)

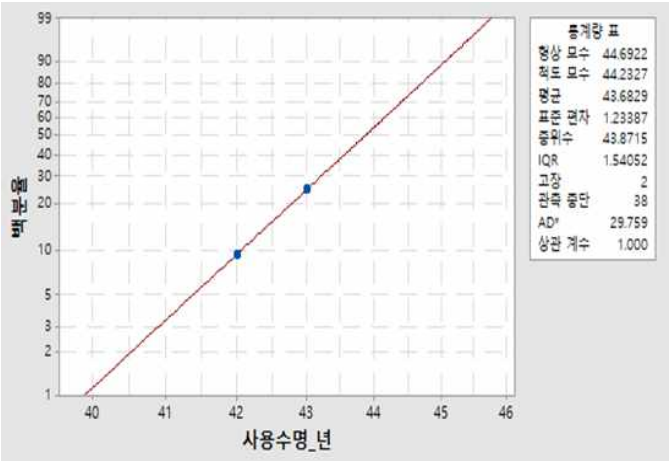


그림 2-4. 배전용 해저케이블 수명분포.

평균수명이 43.68년이며 45년이후 고장발생 확률이 99%가 되는 것으로 산출되었으나 낮은 주위온도에서 운전되는 해저케이블의 경우 부하량에 따라 예측된 수명보다 오랜기간 사용이 가능할 수 있다.

또한 해저케이블 절연두께는 6.6㎜로써 30년 수명을 위한 절연두께인 3.3㎜ 2배 조건의 안전율을 고려하여 제작되었으며, 수중에 설치되어 열발산이 유리하고 제조사가 시공을 같이하여 배전용 지중케이블과 달리 제조 및 시공과정에서 결함으로 인한 고장 사례가 없다.

따라서 배전용 지중케이블과 달리 배전용 해저케이블의 경우 외부손상만 없다면 완전한 방수를 위해 설치된 납외장층 보호로 인하여 수트리로 인한 전기트리 전이에 따른 고장발생 사례가 없으며, 30년이상 사용된 케이블의 TD값 또한 외피손상으로 인한 고장케이블을 제외하면 판단기준에 따른 정상범위를 유지하고 있다.

이러한 진단 Data는 수트리 발생확률이 극히 낮은 구조임을 확인할 수 있는 중요한 자료이며, 최초진단 시점을 배전용 지중케이블과 동일하게 18년으로 운영 가능한 근거이다.

표 2-6. 30년 경과 배전용 해저케이블 TD진단 결과.

구간	제조 연도	사용 기간	긍장	직전진단 TD값			Index R	비고
				0.5Uo	1.0Uo	1.5Uo		
능산	1979	43	1640	24.147	17.958	12.364	0.777	고장
비금	1979	43	2141	1.634	1.594	1.889	0.282	
상수	1979	43	1746	0.100	0.100	0.100	0.000	
자라	1979	43	1592	0.31	0.329	0.358	0.023	
남성	1980	42	1658	0.223	0.220	0.220	0.000	
사량	1980	42	4233	0.35	0.399	0.44	0.000	
보길	1983	39	2663	0.24	0.236	0.258	0.000	
종달	1983	39	3256	0.761	0.765	0.774	0.075	

표 2-7. 배전용 해저케이블 최초진단시기.

변경전	변경후
10년	18년

제 3 장 VLF TD진단 거리보정 방안

제 1 절 선행연구 및 이론적 배경

VLF진단은 수트리 열화 및 부분방전 여부를 측정하는 기술로 진단장비의 출력에 따라 최대측정거리가 정해지며, 한국전력에서는 2개 기종을 배전용 해저케이블 진단에 사용한다.

표 3-1. 장비종류 및 성능.

PHG-80(차량탑재형)	Viola(포터블형)
- 최대출력 : 57kVrms 80kV$_{max}$ - 0.1Hz, 24kV에서 용량 : 5900nF	- 최대출력 : 42.5kVrms 60kV$_{max}$ - 0.1Hz, 24kV에서 용량 : 2800nF

VLF장비의 최대진단거리는 케이블규격 및 긍장에 비례한 정전용량, 진단전압 및 진단주파수에 따른 장비출력에 따라 결정된다.

$$\text{진단장비최대측정거리}[m] = \frac{\text{진단장비출력}}{\text{케이블정전용량}} \tag{3.1}$$

표 3-2. 23.1kV에서 VLF장비별 최대진단거리.

구 분		장비용량	60㎟	200㎟	325㎟	400㎟
		정전용량	0.172nF	0.22nF	0.29nF	0.32nF
진단거리	Viola	3,047nF	17.7㎞	13.8㎞	10.5㎞	9.5㎞
	PHG80	6,485nF	37.7㎞	29.4㎞	22.3㎞	20.2㎞

VLF TD진단은 케이블심선에 0.1Hz 저주파 전압을 인가하여 충전되는 전류와 절연내에서 손실되는 전류의 비를 산출하며, 접속재를 포함한 전 구간의 값으로 열화정도를 판단하는 진단방법이다.

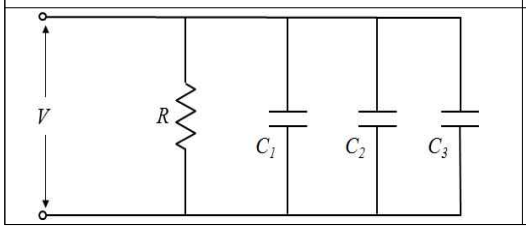
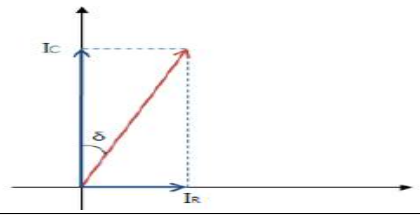
케이블 등가회로	충전전류(I_C)와 손실전류(I_R)
	

그림 3-1. 케이블등가회로 및 측정전류[2].

$$C_{eq} = \sum_{n} C_n = C_1 + C_2 + ... + C_n \tag{3.2}$$

$$Tan\delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{true\,power}{reactive\,power} = \frac{V^2/R}{V^2 wC_{eq}} = \frac{1}{wC_{eq}R} \tag{3.3}$$

케이블의 길이가 길어지면 케이블 충전용량인 C_{eq}의 증가로 TD값이 감소되며 이러 특성을 반영하여 2015년 판정기준 개정시 VLF TD진단 권장거리를 1.0㎞, 최대 1.5㎞ 이내로 제한하였다[2].

“서지에 의한 지중배전케이블 및 변압기 수명단축 특성 연구”에서 케이블 길이에 따라 분류한 후에 구간별 와이블 분포 20%, 30%, 50%, 63.2%, 80%, 99%를 도출하여 보정계수를 산출하였다[3].

$$k(\text{보정계수}) = \frac{Mean_{50\%}}{50\%\,Value_{\text{단위길이}}} \tag{3.4}$$

여기서, $Mean_{50\%}$ = 보정 전 각 구간의 50% 값들의 평균

$50\%Values_{\text{단위길이}}$: 단위길이[m] 미만의 50%

보정계수를 적용 전압별 분석결과 동일 길이에서는 전압이 높을수록 TD변동이 크며, 보정계수는 1과 차이가 클수록 길이보상이 필요하다는 연구결과를 제시를 하였다[3].

기준 개정 후 1.0㎞ 이하에 대해 VLF진단과 판단에 적용하도록 권장을 하였으나 장거리 해저케이블에 적용하기 곤란하여 거리 증가에 따른 TD감소를 고려한 열화판단 기준에 대한 재정립이 필요하다.

표 3-3. 해저케이블 거리구간별 운영현황.

긍장구간 (C-㎞)	1 미만	5 미만	10 미만	10 이상	합 계
설치개소 (구간)	1	29	6	3	39

제 2 절 TD 판단기준

배전케이블 VLF TD진단 판단기준은 2011년 도입시 “지중배전케이블 최적 열화진단기술 선정 및 운영방안에 관한 연구”[1]에서 제시한 기준으로 운영 후 2012년과 2015년에 판단기준이 변경되었다.

표 3-4. VLF 판단기준(2011년).

판정구분	TD(1.0Uo)	△TD(1.5Uo-0.5Uo)
정상	< 1.0	< 0.5
요주의	1.0 ~ 2.0	0.5 ~ 1.0
불량	2.0 <	1.0 <
※ TD, △TD 판정구간이 상이한 경우 OR 조건으로 최종 판정		

2011년에 측정된 7,863개의 진단 Data 와이블통계 분포를 통해 2012년에 판단기준을 개정하였다[4].

표 3-5. VLF 판단기준(2012~2015년).

구 분 (와이블분포)	TD (1.0Uo)	△TD (1.5-0.5Uo)	구 분 (와이블분포)	Stdev (1.0Uo)	Skirt-1 (1.0Uo)
정상(20%)	≤ 1.0	≤ 0.5			
관심(30%)	≤ 2.0	≤ 1.2			
요주의(63%)	≤ 6.0	≤ 6.0	요주의(63%)	≥ 0.1	≥ 0.3
이상(80%)	≤ 10.0	≤ 12.0	이상(80%)	≥ 0.2	≥ 0.6
불량(99%)	≤ 27.0	≤ 60.0	불량(99%)	≥ 0.7	≥ 2.2
임박(100%)	> 27.0	> 60.0			

※ (TD or △TD) AND (Stdev or Skirt-1)의 조건으로 최종판정
- 정상 : 양호 상태로 특별한 조치가 요구되지 안는 케이블
- 관심 : 중기계획에 의한 관심대상 케이블
- 요주의 : 초기 열화단계에 진입한 케이블
- 이상 : 열화 진행상태 케이블로 2년 이내 재측정
- 불량 : 여건에 따라 절연파괴 가능, 1년 이내 재측정
- 임박 : 단기간 내 절연파괴 우려로 즉시 케이블 교체

2012년 판단기준 개정 후 장긍장 케이블에 대한 판단기준 부적정, 측정불량에 따른 상태판정 오류, Skirt-1의 변별력 미흡, 판정인자의 독립적인 분석으로 열화상태 해석의 어려움이 있어, TD 판정인자 정규화를 통해 잔존수명 산출방법으로 판단기준을 변경하였으며, 2012년 VLF진단 실적 5,969건 중 고장발생확률 5% 지점의 Index R 값인 0.751 도달까지 한계로 설정하여 잔존수명 산출방법으로 판단방법을 변경하였다[2].

$$norm.TD = \frac{\log_{10}(TD)}{3} \tag{3.5}$$

$$norm.DTD = \frac{[\log_{10}(DTD)+1]}{4} \tag{3.6}$$

$$norm.Skirt = \frac{[\log_{10}(skirt)+3]}{7} \tag{3.7}$$

$$\text{Index R} = \sqrt{(norm.Tan\delta)^2 + (norm.\triangle Tan\delta)^2 + (norm.Skirt)^2} \tag{3.8}$$

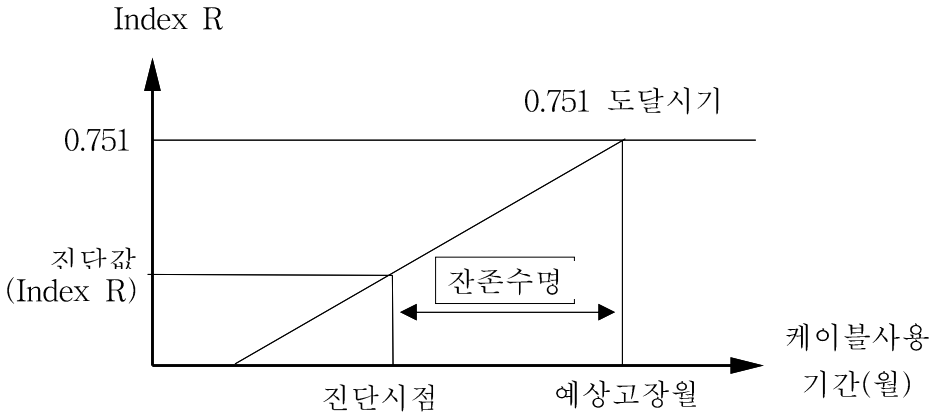


그림 3-2. 케이블 잔존수명 산출방법.

제 3 절 TD 거리보정 방안

3.1 연구방법

거리증가에 따른 TD감소 특성을 비교하기 위해 2012년 ~ 2020년간 측정된 약 12만건의 진단자료를 활용하여 거리구간별 통계 및 와이블분포모수로 보정계수를 산출하여 거리증가에 따른 보정방안 고찰하였다.

표 3-6. TD보정계수 산출 절차.

순 서	내 용
1. 적합분포분석	적합분포분석(Anderson-Darling 검정)
2. Data 구간선정	구간 수 임의분할 Vs 스테이지 제안식 분할
3. 통계분석	기술통계 및 와이블분포 모수
4. 보정계수 산출	거리구간별 TD 및 DTD 보정계수 산출

3.2 테이터 정제 및 분석

통계분석에 사용된 진단데이터 수량은 126,041개이며, TD측정값이 음수로 인하여 Index R 값이 결측된 자료를 제외후 41개 변수와 121,466개의 자료를 1차로 추출하여 0~4㎞는 100m 단위, 6㎞는 500m 단위, 6㎞ 초과는 1000m 단위로 구분하였다.

표 3-7. 진단거리별 수량.

구간 (m)	100 이하	200 이하	300 이하	500 이하	1,000 이하	1000 초과	합 계
수량 (건,%)	31,844 26.2%	34,433 28.3%	19,052 15.7%	16,107 13.3%	11,763 9.7%	8,267 6.8%	121,466

진단데이터의 70%가 300m 이내로 배전선로 진단구간이 개폐기와 개폐기 또는 변압기 구간에 대해 주로 진단이 이루어진 것으로 볼 수 있으며, 이러한 이유는 배전계통 구성방식인 3분할 3연계에 따라 간선이라 할지라도 구간을 나누어 진단할 수 있게 선로를 분리할 수 있기 때문이며 1㎞ 초과 진단실적은 8,267개로 전체의 6.8% 정도이다.

표 3-8. 2012~2020년 진단실적 기술통계.

구분	진단구간	0.5Uo	1.0Uo	1.5Uo	Index R
Min	100	0.00	0.00	0.00	0.000
1st	100	0.289	0.313	0.373	0.007
Median	200	0.380	0.435	0.588	0.890
Mean	375	0.132	1.678	2.383	0.158
3rd	400	0.590	0.738	1.212	0.239
Max	11,000	1,258	2,184	2,547	1.732

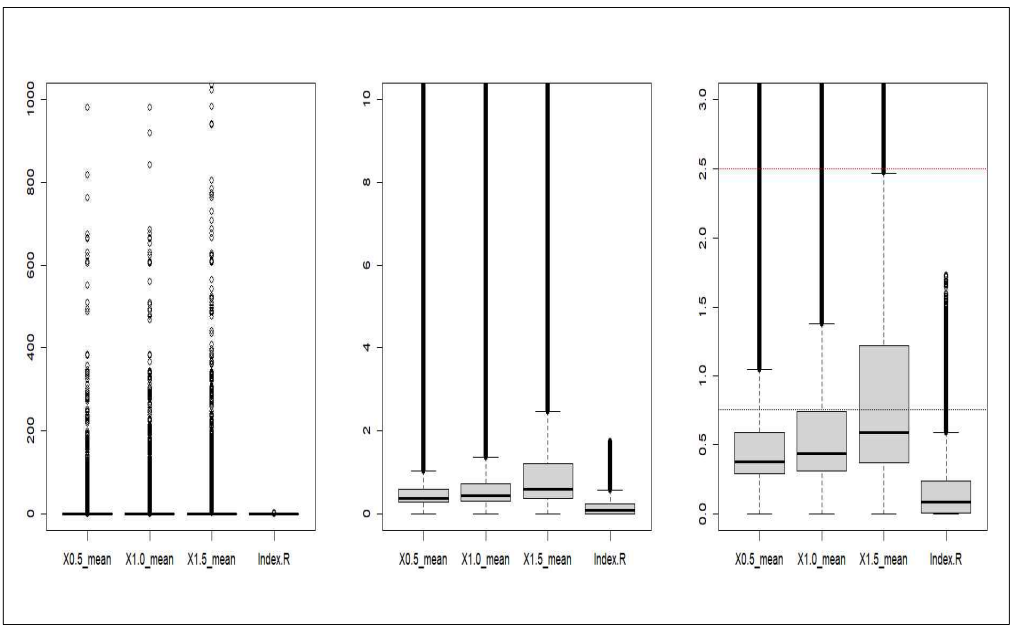


그림 3-3. TD 및 Index R 분포.

전체 진단데이터에는 절연체 수트리 열화로 높은 TD값이 포함되어있어 중앙값 및 평균값과 최대값간 상당한 차이가 있으며 1.5Uo TD에서 이상치 구간값인 1.5배의 IQR TD값은 약 2.5로써 전체 161,466개 중 106,646개로 약 66%의 케이블은 절연체가 양호한 수준임을 알 수 있으며, TD와 IndexR 적합분포분석결과 와이블분포를 따름을 알 수 있었다.

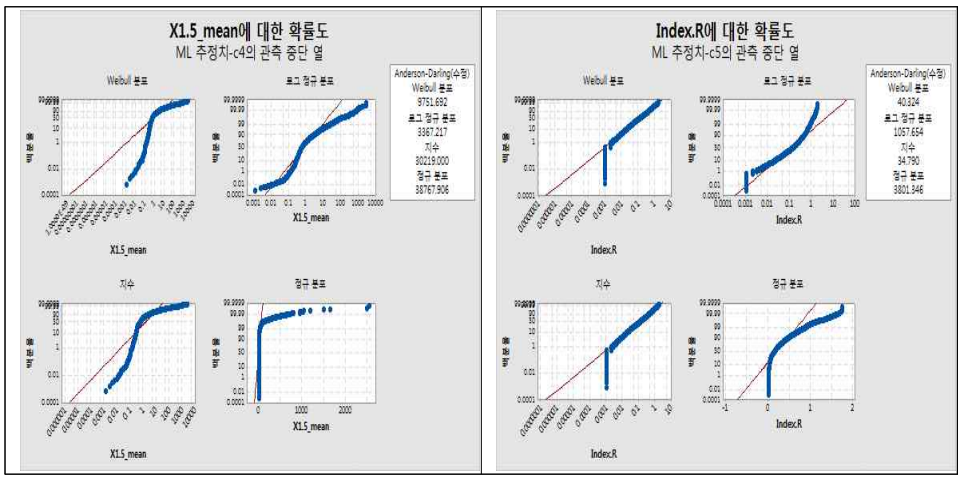


그림 3-4. TD 및 Index R 분포특성 검정.

거리구간별 TD 통계로 거리증가에 따른 감소 경향성을 확인하였다.

표 3-9. 0.5Uo TD 거리구간별 통계.

거리(m)	Min	1st	Median	3rd	Max	수량(개)
100	0.008	0.423	0.561	0.870	1185.56	31,844
200	0.012	0.320	0.398	0.567	1258.62	34,433
300	0.001	0.282	0.334	0.438	340.71	19,052
400	0.005	0.261	0.308	0.396	345.86	10,524
500	0.023	0.252	0.300	0.382	818.39	5583
600	0.002	0.244	0.287	0.383	223.60	3,821
700	0.008	0.239	0.281	0.372	69.07	2,788
800	0.022	0.235	0.280	0.351	123.56	1,979
900	0.003	0.230	0.280	0.380	69.33	1706
1,000	0.010	0.228	0.276	0.358	67.34	1,469

거리(m)	Min	1st	Median	3rd	Max	수량(개)
1,100	0.035	0.240	0.281	0.371	50.46	1,217
1,200	0.010	0.228	0.267	0.350	34.70	1,141
1,300	0.047	0.223	0.260	0.328	36.13	1,084
1,400	0.002	0.220	0.269	0.337	11.97	718
1,500	0.070	0.224	0.267	0.331	183.82	757
1,600	0.013	0.233	0.277	0.352	48.15	543
1,700	0.122	0.200	0.241	0.292	35.21	345
1,800	0.007	0.210	0.261	0.323	4.961	381
1,900	0.080	0.222	0.267	0.326	9.248	282
2,000	0.020	0.207	0.242	0.332	3.300	288
2,100	0.070	0.210	0.253	0.318	30.16	213
2,200	0.100	0.188	0.249	0.309	2.091	145
2,300	0.090	0.225	0.256	0.324	4.123	129
2,400	0.042	0.209	0.247	0.318	5.611	155
2,500	0.100	0.213	0.250	0.280	0.705	90
2,600	0.138	0.214	0.261	0.299	2.861	99
2,700	0.100	0.213	0.269	0.295	2.281	63
2,800	0.100	0.180	0.228	0.280	3.942	56
2,900	0.020	0.141	0.249	0.295	0.342	57
3,000	0.127	0.197	0.248	0.287	4.272	46
3,100	0.060	0.199	0.254	0.361	0.800	68
3,200	0.120	0.208	0.235	0.263	3.830	42
3,300	0.103	0.234	0.253	0.298	0.548	48
3,400	0.120	0.186	0.217	0.298	0.500	24
3,500	0.057	0.146	0.226	0.267	0.428	45
3,600	0.180	0.260	0.270	0.299	0.540	33
3,700	0.137	0.210	0.239	0.258	0.640	24
3,800	0.070	0.228	0.252	0.276	0.420	15
3,900	0.122	0.130	0.140	0.256	0.280	9
4,000	0.206	0.207	0.209	0.233	0.258	3
4,500	0.100	0.199	0.214	0.250	0.949	43
5,000	0.142	0.190	0.201	0.261	0.530	28
5,500	0.140	0.191	0.219	0.266	0.369	39

거리(m)	Min	1st	Median	3rd	Max	수량(개)
6,000	0.198	0.209	0.234	0.240	0.324	13
7,000	0.205	0.209	0.225	0.256	0.695	15
8,000	-	-	-	-	-	0
9,000	0.261	0.264	0.268	0.274	0.280	3
10,000	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300	3
11,000	1.866	2.301	2.737	2.775	2.813	3

표 3-10. 1.0Uo TD 거리구간별 통계.

거리(m)	Min	1st	Median	3rd	Max	수량(개)
100	0.000	0.462	0.650	1.111	1437.84	31,844
200	0.011	0.350	0.457	0.721	1185.18	34,433
300	0.000	0.3025	0.371	0.550	841.37	19,052
400 ~ 9,000 구간 생략						
9,000	0.367	0.370	0.373	0.378	0.383	3
10,000	0.291	0.294	0.297	0.298	0.298	3
11,000	1.721	1.922	2.123	2.197	2.271	3

표 3-11. 1.5Uo TD 거리구간별 통계.

거리(m)	Min	1st	Median	3rd	Max	수량(개)
100	0.000	0.566	0.922	1.905	1488.26	31,844
200	0.000	0.420	0.636	1.242	2547.58	34,433
300	0.000	0.355	0.497	0.917	1632.52	19,052
400 ~ 9,000 구간 생략						
9,000	0.420	0.421	0.422	0.426	0.430	3
10,000	0.290	0.291	0.292	0.295	0.297	3
11,000	1.512	1.555	1.597	1.716	1.835	3

거리구간별 TD 통계결과 거리증가에 따라 감소되며, Boxplot으로 거리 증가에 따라 감소폭이 점차 줄어드는 경향 또한 확인할 수 있다.

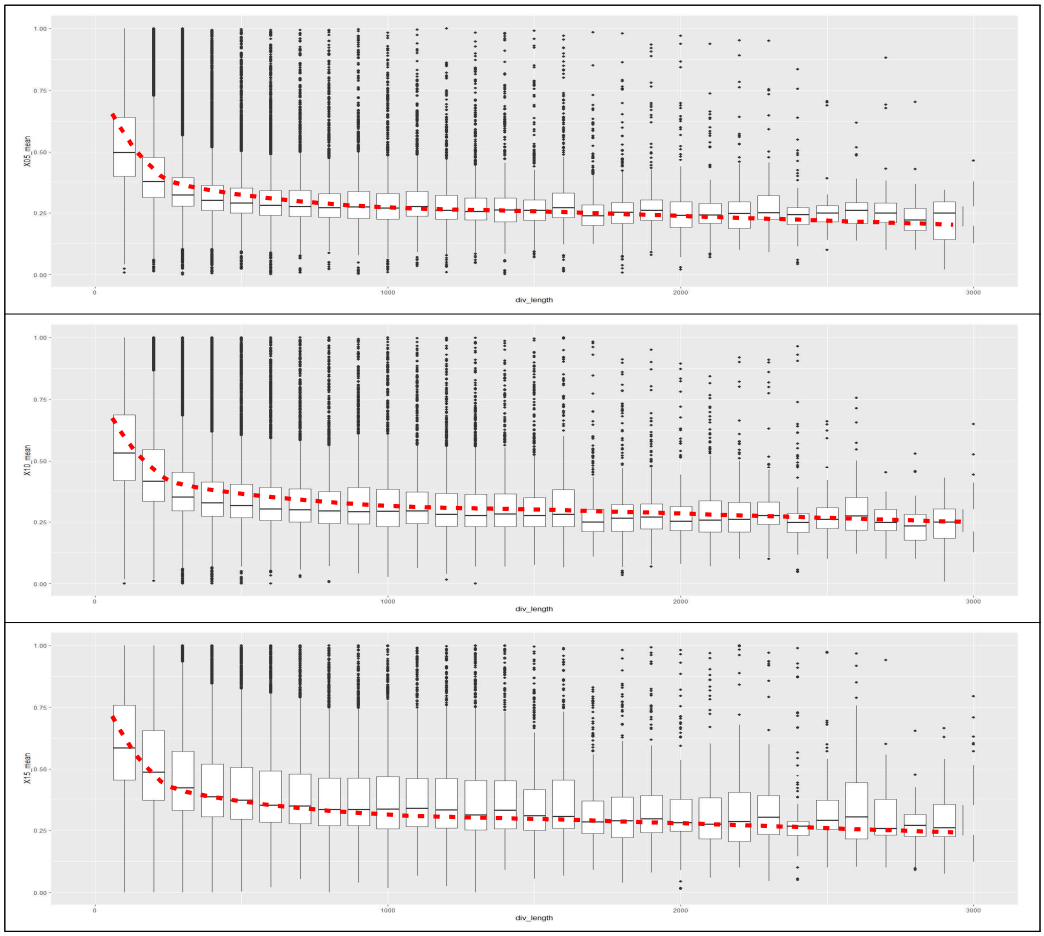


그림 3-5. 진단전압별 TD 분포.

거리증가에 따른 TD 감소를 보정하기 위해 식 (3.4)로 보정계수를 산출하였다.

표 3-12. 거리구간별 TD 보정계수.

거리 (m)	TD 중앙값			TD 보정계수			수량 (개)	점유율	누적 점유율
	0.5Uo	1.0Uo	1.5Uo	0.5Uo	1.0Uo	1.5Uo			
100	0.561	0.650	0.921	0.562	0.497	0.392	31,844	26.2%	26.2%
200	0.399	0.457	0.635	0.792	0.707	0.568	34,433	28.3%	54.6%
300	0.334	0.371	0.498	0.944	0.870	0.725	19,052	15.7%	70.2%
400	0.309	0.341	0.440	1.023	0.947	0.821	10,524	8.7%	78.9%
500	0.300	0.332	0.421	1.053	0.972	0.857	5,583	4.6%	83.5%

거리 (m)	TD 중앙값			TD 보정계수			수량 (개)	점유율	누적 점유율
	0.5Uo	1.0Uo	1.5Uo	0.5Uo	1.0Uo	1.5Uo			
600	0.288	0.319	0.409	1.098	1.014	0.883	3,821	3.1%	86.7%
700	0.281	0.314	0.390	1.122	1.030	0.925	2,788	2.3%	89.0%
800	0.280	0.310	0.368	1.127	1.042	0.982	1,979	1.6%	90.6%
900	0.280	0.309	0.375	1.127	1.047	0.962	1706	1.4%	92.0%
1,000	0.276	0.313	0.393	1.143	1.033	0.919	1,469	1.2%	93.2%
1,100	0.282	0.310	0.383	1.121	1.042	0.943	1,217	1.0%	94.2%
1,200	0.268	0.293	0.368	1.180	1.104	0.982	1,141	0.9%	95.1%
1,300	0.260	0.285	0.343	1.214	1.134	1.054	1,084	0.9%	96.0%
1,400	0.269	0.298	0.368	1.174	1.086	0.982	718	0.6%	96.6%
1,500	0.267	0.286	0.346	1.184	1.129	1.042	757	0.6%	97.2%
1,600	0.277	0.298	0.340	1.140	1.086	1.061	543	0.4%	97.7%
1,700	0.241	0.251	0.290	1.310	1.285	1.244	345	0.3%	98.0%
1,800	0.261	0.270	0.299	1.209	1.197	1.206	381	0.3%	98.3%
1,900	0.268	0.280	0.320	1.180	1.153	1.128	282	0.2%	98.5%
2,000	0.242	0.259	0.299	1.303	1.247	1.205	288	0.2%	98.8%
2,100	0.250	0.266	0.296	1.261	1.216	1.218	213	0.2%	98.9%
2,200	0.249	0.261	0.289	1.268	1.237	1.249	145	0.1%	99.1%
2,300	0.256	0.280	0.310	1.232	1.154	1.164	129	0.1%	99.2%
2,400	0.247	0.251	0.271	1.278	1.286	1.334	155	0.1%	99.3%
2,500	0.250	0.260	0.290	1.263	1.243	1.244	90	0.1%	99.4%
2,600	0.261	0.279	0.330	1.209	1.159	1.095	99	0.1%	99.4%
2,700	0.269	0.253	0.288	1.173	1.276	1.255	63	0.1%	99.5%
2,800	0.233	0.238	0.276	1.358	1.359	1.306	56	0.0%	99.5%
2,900	0.249	0.250	0.260	1.268	1.292	1.388	57	0.0%	99.6%
3,000	0.248	0.250	0.284	1.273	1.292	1.270	46	0.0%	99.6%
3,100	0.254	0.264	0.293	1.243	1.225	1.232	68	0.1%	99.7%
3,100	0.254	0.264	0.293	1.243	1.225	1.232	68	0.1%	99.7%
3,200	0.235	0.247	0.264	1.343	1.310	1.365	42	0.0%	99.7%
3,300	0.254	0.270	0.280	1.244	1.197	1.288	48	0.0%	99.8%
3,400	0.217	0.245	0.294	1.454	1.319	1.226	24	0.0%	99.8%
3,500	0.227	0.253	0.285	1.392	1.276	1.266	45	0.0%	99.8%
3,600	0.270	0.300	0.340	1.169	1.077	1.061	33	0.0%	99.8%

거리 (m)	TD 중앙값			TD 보정값			수량 (개)	점유율	누적 점유율
	0.5Uo	1.0Uo	1.5Uo	0.5Uo	1.0Uo	1.5Uo			
3,700	0.240	0.262	0.294	1.316	1.235	1.227	24	0.0%	99.9%
3,800	0.252	0.269	0.320	1.253	1.200	1.128	15	0.0%	99.9%
3,900	0.140	0.133	0.166	2.255	2.438	2.171	9	0.0%	99.9%
4,000	0.209	0.220	0.217	1.510	1.468	1.661	3	0.0%	99.9%
4,500	0.215	0.235	0.224	1.469	1.374	1.609	43	0.0%	99.9%
5,000	0.201	0.203	0.223	1.569	1.590	1.616	28	0.0%	99.9%
5,500	0.220	0.214	0.225	1.437	1.513	1.602	39	0.0%	100%
6,000	0.234	0.243	0.260	1.349	1.332	1.388	13	0.0%	100%
7,000	0.226	0.224	0.224	1.399	1.445	1.611	15	0.0%	100%
9,000	0.268	0.374	0.423	1.178	0.865	0.854	3	0.0%	100%
10,000	0.300	0.298	0.293	1.052	1.086	1.234	3	0.0%	100%
11,000	2.738	2.124	1.598	0.115	0.152	0.226	3	0.0%	100%
							121,466 건		

TD값은 보정계수 1을 기준으로 보정하며 전압별로 계수가 1이 되는 구간은 상이하고 1.5Uo TD에서는 1,300미터로 낮은 전압보다는 높은 전압에서 보정값이 큰 것을 확인할 수 있었다.

진단거리 보정이 필요한 1,400미터 이상 구간의 평균보정값은 1.26배, 1,300미터 이하 구간의 평균 보정값은 0.847로 두 구간 모두 1과의 편차는 비슷하게 나타나지만 300미터 이하 구간에서는 측정된 값보다 약 2.5배를 차감해야 되는 문제가 발생된다.

이러한 이유는 배전선로 특성상 300미터 이하의 구간내 개폐기 설치 등으로 짧은 진단구간이 많아 불량으로 판정될 수 있는 높은 TD값이 반영되어 나타난 현상으로 판단되며 정확도를 높이기 위해 와이블분포 99%이상에 해당되는 1.0Uo TD값 27이상을 제외하여 추출 후 동일한 방법으로 산출하였다.

표 3-13. 거리구간별 TD 27 이하 보정계수.

거리 (m)	TD 중앙값			TD 보정계수			수량 (개)	점유율	누적 점유율
	0.5Uo	1.0Uo	1.5Uo	0.5Uo	1.0Uo	1.5Uo			
100	0.558	0.643	0.911	0.566	0.502	0.395	31,435	26.2%	26.2%
200	0.396	0.453	0.628	0.797	0.713	0.574	33,959	28.3%	54.5%
300	0.333	0.370	0.494	0.948	0.872	0.729	18,860	15.7%	70.2%
400	0.308	0.340	0.436	1.026	0.949	0.826	10,406	8.7%	78.8%
500	0.299	0.331	0.419	1.056	0.976	0.860	5,513	4.6%	83.4%
600	0.286	0.318	0.406	1.102	1.016	0.886	3,777	3.1%	86.6%
700	0.280	0.311	0.388	1.126	1.037	0.929	2,762	2.3%	88.9%
800	0.280	0.309	0.368	1.126	1.044	0.980	1,967	1.6%	90.5%
900	0.280	0.308	0.374	1.126	1.049	0.964	1,693	1.4%	91.9%
1,000	0.275	0.311	0.390	1.147	1.037	0.923	1,455	1.2%	93.1%
1,100	0.281	0.310	0.380	1.123	1.041	0.948	1,209	1.0%	94.1%
1,200	0.267	0.292	0.366	1.182	1.104	0.984	1,138	0.9%	95.1%
1,300	0.260	0.285	0.342	1.213	1.133	1.052	1,082	0.9%	96.0%
1,400	0.269	0.299	0.369	1.172	1.080	0.977	717	0.6%	96.6%
1,500	0.267	0.286	0.347	1.180	1.128	1.037	756	0.6%	97.2%
1,600	0.277	0.297	0.339	1.140	1.088	1.061	541	0.5%	97.7%
1,700	0.241	0.251	0.290	1.310	1.284	1.242	341	0.3%	98.0%
1,800	0.261	0.270	0.299	1.208	1.195	1.203	381	0.3%	98.3%
1,900	0.268	0.280	0.320	1.179	1.151	1.125	282	0.2%	98.5%
2,000	0.243	0.259	0.299	1.298	1.247	1.206	287	0.2%	98.7%
2,100	0.250	0.266	0.296	1.259	1.215	1.216	210	0.2%	98.9%
2,200	0.249	0.261	0.289	1.266	1.235	1.247	145	0.1%	99.0%
2,300	0.256	0.280	0.310	1.231	1.153	1.162	129	0.1%	99.1%
2,400	0.247	0.251	0.271	1.277	1.285	1.331	155	0.1%	99.3%
2,500	0.250	0.260	0.290	1.261	1.241	1.242	90	0.1%	99.4%
2,600	0.261	0.279	0.330	1.208	1.158	1.093	99	0.1%	99.4%
2,700	0.269	0.253	0.288	1.172	1.275	1.252	63	0.1%	99.5%
2,800	0.228	0.244	0.280	1.382	1.322	1.286	56	0.0%	99.5%
2,900	0.249	0.250	0.260	1.266	1.291	1.385	57	0.0%	99.6%
3,000	0.248	0.250	0.284	1.272	1.291	1.267	46	0.0%	99.6%

거리 (m)	TD 중앙값			TD 보정계수			수량 (개)	점유율	누적 점유율
	0.5Uo	1.0Uo	1.5Uo	0.5Uo	1.0Uo	1.5Uo			
3,100	0.254	0.264	0.293	1.242	1.224	1.229	68	0.1%	99.7%
3,200	0.235	0.247	0.264	1.341	1.308	1.362	42	0.0%	99.7%
3,300	0.254	0.270	0.280	1.243	1.195	1.286	48	0.0%	99.8%
3,400	0.217	0.245	0.294	1.453	1.317	1.223	24	0.0%	99.8%
3,500	0.227	0.253	0.285	1.391	1.275	1.263	45	0.0%	99.8%
3,600	0.270	0.300	0.340	1.168	1.076	1.059	33	0.0%	99.8%
3,700	0.240	0.262	0.294	1.314	1.234	1.224	24	0.0%	99.9%
3,800	0.252	0.269	0.320	1.251	1.198	1.125	15	0.0%	99.9%
3,900	0.145	0.133	0.166	2.175	2.436	2.167	8	0.0%	99.9%
4,000	0.209	0.220	0.217	1.508	1.466	1.657	3	0.0%	99.9%
4,500	0.215	0.235	0.224	1.468	1.372	1.605	43	0.0%	99.9%
5,000	0.201	0.203	0.223	1.567	1.589	1.613	28	0.0%	99.9%
5,500	0.220	0.214	0.225	1.436	1.512	1.598	39	0.0%	100%
6,000	0.234	0.243	0.260	1.348	1.331	1.385	13	0.0%	100%
7,000	0.226	0.224	0.224	1.398	1.444	1.608	15	0.0%	100%
9,000	0.268	0.374	0.423	1.177	0.864	0.852	3	0.0%	100%
10,000	0.300	0.298	0.293	1.051	1.085	1.231	3	0.0%	100%
11,000	2.738	2.124	1.598	0.115	0.152	0.225	3	0.0%	100%
							120,068		

TD진단 보정기준인 계수값 1인 구간이 진단전압에 따라 0.5Uo 400미터, 1.0Uo 600미터, 1.5Uo 1,300미터로써 전압의 상승에 따라 TD 수준도 함께 높아 짐에 따라 보정계수 산출시 진단전압별로 적용할 필요가 있으며, 거리가 증가 될수록 보정값이 증가됨을 알 수 있다.

하지만 구간별 자료편차(최대 33,433개, 최소 3개)로 인한 통계값 편중으로 인하여 보정값의 선형성이 구분되지 않아 자료수에 의한 통계의 오차를 줄여보고자 데이터수에 따라 구간을 재분류하여 보정계수를 산출해 보기로 하였다.

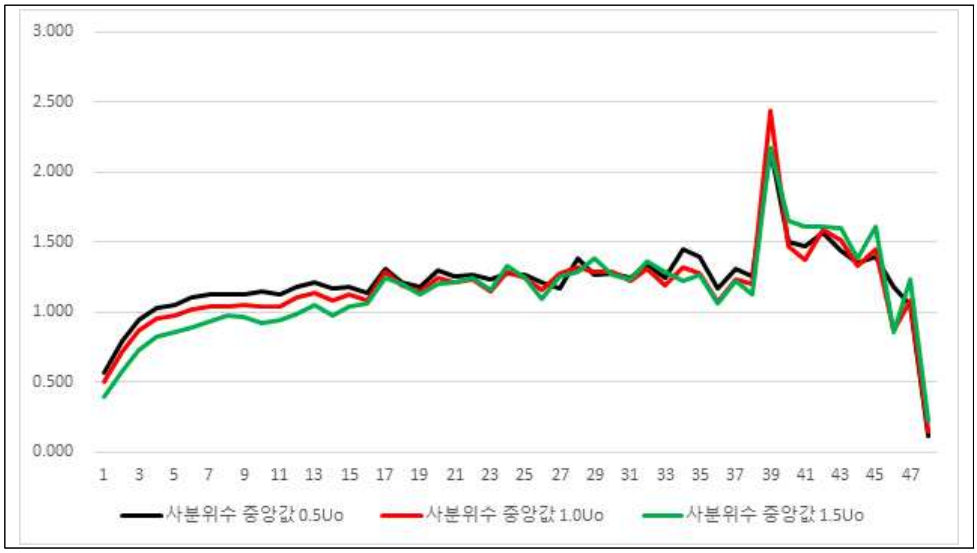


그림 3-6. TD보정계수 분포.

거리구간 재분류를 위해 스테이지 제안식(3.9)을 사용하여 18개 구간으로 나누어 각 구간별로 최대한 동일한 자료가 분포될 수 있도록 거리구간 및 자료수량 기준으로 사분위 중앙값 및 와이블함수 척도모수의 증가비율 4가지 경우를 검토하였다.

$$\text{구간의 수} : 1 + 3.3\log_{10}(\text{자료의크기}) \tag{3.9}$$

거리기준은 10미터 단위, 최소 4천개 이상, 수량기준은 6천~7천개 범위에서 구분을 하였다.

표 3-14. 스테이지식에 따른 구간.

거 리 기 준				수 량 기 준			
구간	자료수	점유율	누적점유율	구간	자료수	점유율	누적점유율
50	6,138	5.1%	5.1%	50	6,138	5.1%	5.1%
60	5,123	4.3%	9.4%	65	7,466	6.2%	11.3%
80	10,211	8.5%	17.9%	78	6,672	5.6%	16.9%

90	5,093	4.2%	22.1%	90	6,289	5.2%	22.1%
110	9,418	7.8%	30.0%	105	7,264	6.0%	28.2%
130	7,617	6.3%	36.3%	120	6,420	5.3%	33.5%
140	4,012	3.3%	39.7%	140	6,959	5.8%	39.3%
170	9,292	7.7%	47.4%	160	6,595	5.5%	44.8%
190	5,874	4.9%	52.3%	181	6,472	5.4%	50.2%
220	7,167	6.0%	58.3%	210	7,420	6.2%	56.4%
250	6,328	5.3%	63.5%	240	6,192	5.2%	61.5%
300	7,983	6.6%	70.2%	275	6,543	5.4%	67.0%
350	5,930	4.9%	75.1%	305	6,813	5.7%	72.7%
430	6,447	5.4%	80.5%	393	6,786	5.7%	78.3%
590	7,038	5.9%	86.3%	515	6,831	5.7%	84.0%
950	7,444	6.2%	92.5%	720	6,248	5.2%	89.2%
1600	6,144	5.1%	97.7%	1,150	6,501	5.4%	94.6%
1600 초과	2,815	2.3%	100.0%	1,150 초과	6,465	5.4%	100.0%

거리기준 자료의 전압별 와이블모수와 중앙값을 산출 하였다.

표 3-15. 거리기준 전압별 통계

구간	0.5Uo			1.0Uo			1.5Uo		
	형상	척도	중앙	형상	척도	중앙	형상	척도	중앙
50	1.119	1.105	0.665	1.048	1.344	0.767	0.964	2.022	1.068
60	1.045	1.057	0.605	0.993	1.316	0.700	0.949	1.994	1.021
80	1.017	0.989	0.540	0.962	1.218	0.628	0.926	1.818	0.895
90	0.996	0.921	0.504	0.952	1.125	0.580	0.941	1.634	0.814
110	0.954	0.853	0.460	0.919	1.043	0.534	0.906	1.525	0.751
130	0.947	0.769	0.421	0.918	0.933	0.483	0.908	1.364	0.674
130	0.947	0.769	0.421	0.918	0.933	0.483	0.908	1.364	0.674
140	0.950	0.732	0.403	0.910	0.898	0.458	0.892	1.314	0.636
170	0.886	0.733	0.385	0.859	0.891	0.436	0.861	1.276	0.609
190	0.917	0.647	0.360	0.899	0.778	0.412	0.896	1.102	0.551
220	0.938	0.622	0.350	0.898	0.750	0.388	0.879	1.092	0.520

250	0.893	0.642	0.340	0.856	0.772	0.380	0.860	1.083	0.516
300	0.864	0.600	0.322	0.836	0.715	0.358	0.837	1.007	0.471
350	0.869	0.576	0.310	0.842	0.679	0.344	0.840	0.946	0.446
430	0.889	0.528	0.300	0.852	0.633	0.332	0.842	0.875	0.420
590	0.859	0.547	0.291	0.825	0.661	0.324	0.823	0.902	0.412
950	0.906	0.503	0.280	0.868	0.618	0.310	0.842	0.830	0.381
1600	0.893	0.483	0.270	0.858	0.599	0.298	0.837	0.789	0.364
1600 초과	1.030	0.400	0.250	0.912	0.459	0.261	0.899	0.554	0.290

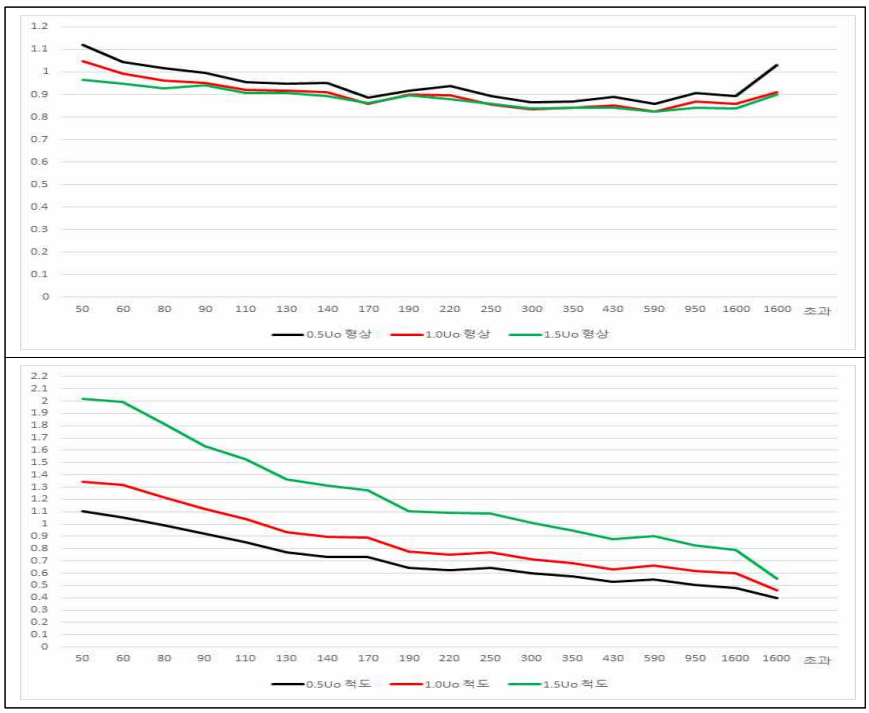


그림 3-7. 거리기준 전압별 TD 변화.

식 (3.4)로 보정계수를 산출하였다.

표 3-16. 거리기준 보정계수.

구간	척도모수			사분위수 중앙값		
	0.5Uo	1.0Uo	1.5Uo	0.5Uo	1.0Uo	1.5Uo
50	0.639	0.638	0.608	0.589	0.579	0.564
60	0.668	0.651	0.616	0.648	0.634	0.590
80	0.714	0.704	0.676	0.726	0.707	0.673
90	0.766	0.762	0.752	0.777	0.765	0.740
110	0.828	0.822	0.806	0.852	0.832	0.802
130	0.918	0.919	0.901	0.931	0.920	0.894
140	0.964	0.955	0.936	0.973	0.969	0.947
170	0.963	0.962	0.963	1.018	1.018	0.989
190	1.091	1.102	1.115	1.089	1.077	1.093
220	1.135	1.143	1.126	1.120	1.146	1.157
250	1.100	1.111	1.135	1.152	1.168	1.168
300	1.177	1.199	1.221	1.219	1.242	1.278
350	1.226	1.263	1.299	1.264	1.292	1.350
430	1.337	1.354	1.405	1.307	1.336	1.434
590	1.291	1.297	1.363	1.346	1.371	1.460
950	1.403	1.387	1.481	1.400	1.432	1.580
1,600	1.462	1.431	1.558	1.452	1.492	1.656
1,600 초과	1.765	1.868	2.219	1.568	1.700	2.075
최대/최소비	2.762	2.928	3.649	2.660	2.936	3.678

와이블 척도모수와 중앙값의 표준편차가 대부분 ± 0.05 이하로 두 개의 값은 각 구간별로 차이는 있지만, 비슷한 분포특성이 있어 두 값의 평균으로 보정비를 산출하였으며, 1,600미터 초과 구간은 거리 증가에 비례하여 보정비도 함께 높아짐을 알 수 있다.

표 3-17. 거리기준 평균보정계수 및 편차.

구간	평 균			표준편차		
	0.5Uo	1.0Uo	1.5Uo	0.5Uo	1.0Uo	1.5Uo
50	0.614	0.608	0.586	0.025	0.030	0.022
60	0.658	0.643	0.603	0.010	0.009	0.013
80	0.720	0.706	0.675	0.006	0.002	0.002
90	0.772	0.764	0.746	0.005	0.002	0.006
110	0.840	0.827	0.804	0.012	0.005	0.002
130	0.925	0.919	0.898	0.007	0.000	0.004
140	0.969	0.962	0.941	0.004	0.007	0.006
170	0.991	0.990	0.976	0.028	0.028	0.013
190	1.090	1.089	1.104	0.001	0.012	0.011
220	1.127	1.144	1.142	0.007	0.001	0.016
250	1.126	1.139	1.151	0.026	0.029	0.016
300	1.198	1.220	1.249	0.021	0.021	0.029
350	1.245	1.277	1.325	0.019	0.015	0.025
430	1.322	1.345	1.419	0.015	0.009	0.014
590	1.318	1.334	1.412	0.028	0.037	0.049
950	1.402	1.410	1.530	0.002	0.022	0.049
1600	1.457	1.462	1.607	0.005	0.030	0.049
1600 초과	1.666	1.784	2.147	0.098	0.084	0.072

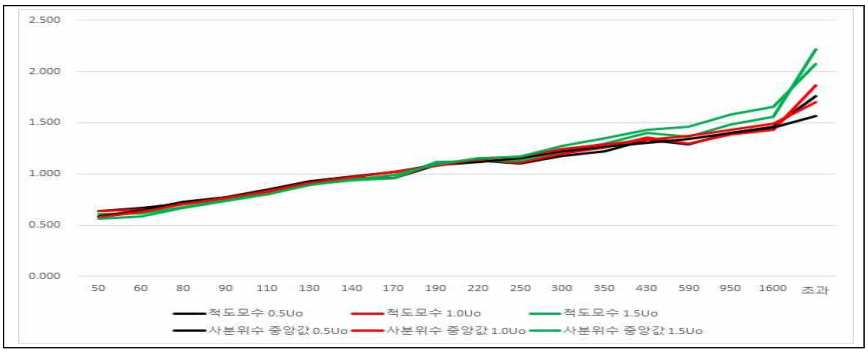


그림 3-8. 거리기준 보정계수 변화.

수량기준 자료의 전압별 와이블모수와 중앙값을 산출 하였다.

표 3-18. 수량기준 전압별 통계.

구간	0.5Uo			1.0Uo			1.5Uo		
	형상	척도	중앙	형상	척도	중앙	형상	척도	중앙
50	1.119	1.105	0.665	1.048	1.344	0.767	0.964	2.022	1.068
65	1.058	1.034	0.594	0.997	1.285	0.685	0.947	1.945	0.990
78	0.999	0.994	0.536	0.946	1.230	0.620	0.912	1.831	0.885
90	0.995	0.929	0.509	0.955	1.129	0.587	0.947	1.640	0.835
105	0.952	0.850	0.462	0.917	1.040	0.534	0.898	1.528	0.750
120	0.957	0.799	0.435	0.929	0.972	0.501	0.929	1.414	0.711
140	0.952	0.751	0.411	0.915	0.917	0.470	0.897	1.340	0.651
160	0.886	0.746	0.388	0.857	0.902	0.438	0.854	1.275	0.600
181	0.886	0.676	0.369	0.874	0.851	0.420	0.880	1.179	0.583
210	0.951	0.632	0.355	0.909	0.765	0.399	0.893	1.104	0.535
240	0.908	0.627	0.342	0.870	0.754	0.379	0.861	1.077	0.508
275	0.873	0.625	0.329	0.842	0.745	0.369	0.847	1.047	0.495
305	0.868	0.589	0.318	0.840	0.700	0.350	0.839	0.989	0.460
393	0.889	0.540	0.304	0.855	0.646	0.339	0.845	0.890	0.430
515	0.836	0.559	0.298	0.805	0.673	0.330	0.806	0.920	0.419
720	0.915	0.509	0.281	0.877	0.613	0.310	0.857	0.835	0.391
1,150	0.883	0.505	0.279	0.848	0.634	0.276	0.827	0.843	0.379
1,150 초과	0.963	0.436	0.260	0.892	0.518	0.276	0.870	0.652	0.320

그림 3-9. 수량기준 전압별 TD 변화.

거리기준과 동일한 방법으로 수량기준 보정계수를 산출하였다.

표 3-19. 수량기준 보정계수.

구간	척도모수			사분위수 중앙값		
	0.5Uo	1.0Uo	1.5Uo	0.5Uo	1.0Uo	1.5Uo
50	0.649	0.650	0.619	0.596	0.586	0.573
65	0.693	0.680	0.644	0.668	0.656	0.618
78	0.721	0.710	0.684	0.740	0.724	0.691
90	0.772	0.773	0.763	0.779	0.765	0.733
105	0.844	0.840	0.819	0.857	0.841	0.815
120	0.897	0.898	0.885	0.912	0.896	0.860
140	0.955	0.952	0.934	0.964	0.955	0.939
160	0.961	0.968	0.982	1.021	1.026	1.019
181	1.061	1.026	1.062	1.075	1.069	1.050
210	1.134	1.141	1.134	1.116	1.126	1.143

240	1.144	1.158	1.162	1.159	1.186	1.205
275	1.147	1.172	1.196	1.206	1.218	1.236
305	1.217	1.247	1.266	1.248	1.283	1.330
393	1.328	1.352	1.406	1.303	1.326	1.423
515	1.283	1.298	1.361	1.329	1.361	1.461
720	1.409	1.425	1.499	1.409	1.449	1.563
1,150	1.420	1.377	1.485	1.419	1.449	1.613
1,150 초과	1.644	1.686	1.920	1.527	1.626	1.911
최대/최소비	2.534	2.595	3.101	2.563	2.776	3.336

와이블 척도모수와 중앙값의 표준편차가 전구간 ± 0.05 이하로 거리 기준 보다 좀더 균일한 데이터의 분포를 나타내며, 이러한 이유는 분석 대상 데이터 분포가 균일하여 통계의 오차를 줄여 대표성을 가진 값으로 사용할 수 있다고 볼 수 있다.

표 3-20. 수량기준 평균보정계수 및 편차.

구간	보정계수			표준편차		
	0.5Uo	1.0Uo	1.5Uo	0.5Uo	1.0Uo	1.5Uo
50	0.622	0.618	0.596	0.026	0.032	0.023
65	0.680	0.668	0.631	0.013	0.012	0.013
78	0.730	0.717	0.687	0.009	0.007	0.004
90	0.775	0.769	0.748	0.004	0.004	0.015
105	0.850	0.841	0.817	0.007	0.001	0.002
120	0.905	0.897	0.873	0.007	0.001	0.013
140	0.959	0.954	0.937	0.005	0.002	0.002
160	0.991	0.997	1.001	0.030	0.029	0.019
181	1.068	1.048	1.056	0.007	0.021	0.006
210	1.125	1.134	1.138	0.009	0.008	0.005
240	1.151	1.172	1.184	0.008	0.014	0.021
275	1.176	1.195	1.216	0.029	0.023	0.020
305	1.233	1.265	1.298	0.015	0.018	0.032
393	1.316	1.339	1.415	0.012	0.013	0.008

515	1.306	1.329	1.411	0.023	0.032	0.050
720	1.409	1.437	1.531	0.000	0.012	0.032
1,150	1.419	1.413	1.549	0.000	0.036	0.064
1,150 초과	1.586	1.656	1.916	0.059	0.030	0.004

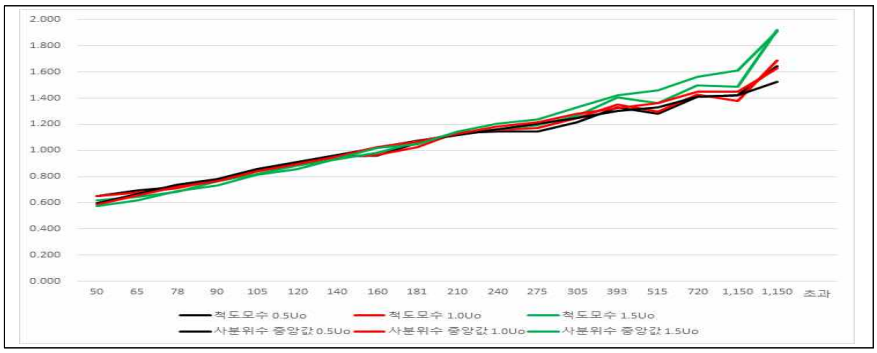


그림 3-10. 수량기준 보정계수 변화.

진단데이터를 48개 구간으로 구분하여 산출된 보정계수는 선형성이 나타나지 않아 진단거리에 따른 보정값 산출이 어려워 스테이지식을 활용 18개 구간으로 거리 및 수량기준 보정값 산출결과 거리증가에 따라 선형적으로 증가됨을 확인할 수 있었으며, 거리 증가에 따른 보정값 기울기를 식 (3.10)로 산출하였다.

$$Y = \frac{\text{최대}/\text{기준} - \text{기준}/\text{기준}}{10{,}000[m]/10\text{구간}} \tag{3.10}$$

※ 최대 : 0.5Uo~1.5Uo에서 1,150미터 초과 보정계수

※ 기준 : 0.5Uo~1.5Uo에서 1,150미터 이하 보정계수

표 3-21. 거리구간별 TD 보정계수.

거리구간별 TD 보정계수	보정값		
	0.5Uo	1.0Uo	1.5Uo
기울기	0.014	0.022	0.034
1,000 이하	1	1	1
2,000 이하	1.015	1.023	1.034
3,000 이하	1.029	1.045	1.068
4,000 이하	1.044	1.067	1.101
5,000 이하	1.058	1.089	1.135
6,000 이하	1.072	1.111	1.169
7,000 이하	1.087	1.133	1.202
8,000 이하	1.101	1.155	1.236
9,000 이하	1.115	1.177	1.269
10,000 이하	1.130	1.199	1.303
11,000 이하	1.144	1.221	1.337

VLF진단에서 측정된 TD값 중 1.5Uo에서 0.5Uo를 차감한 DTD(delta tan delta)는 절연체가 시험시간 동안 전압상승에 대한 안정도를 평가하는 요소이며, 전압의 상승에 따라 DTD도 함께 증가하는 경향이 있다.

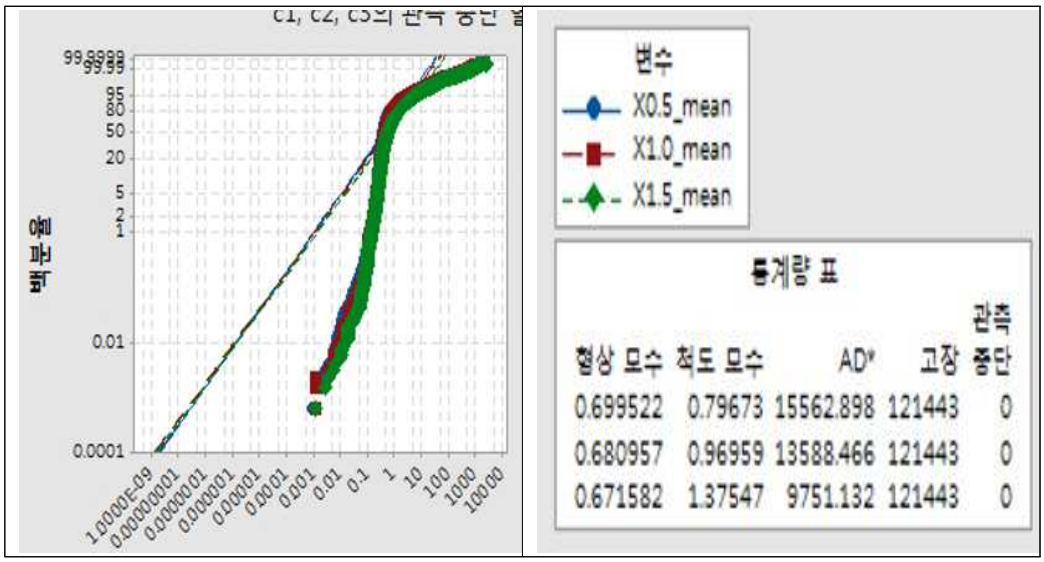


그림 3-11. 진단전압별 TD 분포.

VLF진단 전압증가시 TD 와이블분포에서 척도모수도 함께 증가하며, 0.5Uo 0.796에서 1.5Uo 1.375로써 약 1.72배가 증가됨을 알 수 있다. 또한 형상모수 동일성 검정결과 동일한 분포로 척도모수의 경우 진단전압의 증가에 따라 비례됨을 확인하였다.

그림 (3-7, 3-9)에서 거리가 증가시 0.5Uo와 1.5Uo TD 차이가 줄어들며, 특히 1,000미터 이상에서는 DTD가 크게 낮아지는 경향이 있어 TD의 경우와 같이 보정이 필요하며, 연도별로 측정된 VLF 진단값의 평균범위 내에서 보정이 가능하도록 전체데이터와 1,000미터이상 데이터의 척도모수 평균의 비로서 구하고자 한다.

표 3-22. 연도별 TD 모수분포.

연 도	진단 건수	전체 진단자료 DTD(TD1.5Uo - 0.5Uo)					
		형상모수		척도모수			
		0.5Uo	1.5Uo	0.5Uo	1.5Uo	DTD	1.5÷0.5Uo
전체연도	121,443	0.699	0.671	0.796	1.375	0.579	1.727
2012년	6,144	0.692	0.630	0.865	1.594	0.729	1.842
2013년	5,914	0.589	0.591	1.122	2.049	0.927	1.826
2014년	14,892	0.676	0.645	0.862	1.550	0.688	1.798
2015년	6,774	0.598	0.567	1.148	2.050	0.902	1.785
2016년	16,046	0.681	0.668	0.806	1.398	0.592	1.734
2017년	17,176	0.743	0.717	0.688	1.199	0.511	1.742
2018년	16,856	0.715	0.690	0.717	1.242	0.525	1.732
2019년	19,336	0.781	0.755	0.725	1.196	0.471	1.649
2020년	18,260	0.805	0.765	0.735	1.204	0.469	1.638

연도별 형상모수는 동일한 분포, 척도모수의 경우 전연도 및 각 연도별 동일성 검정결과 P값이 0.000으로 진단 전압별 척도모수는 동일하지 않아 전압이 증가 될수록 비례됨을 알 수 있어 DTD 척도모수 값은 연도별 차이는 있지만 1.5Uo에 대한 0.5Uo의 비는 평균 1.75에서 ± 0.1의 편차내에서 비슷한 비율 범위에 있다.

표 3-23. 연도별 1,000미터 이상 TD 모수분포

연 도	진단 건수	1,000미터 이상 DTD(TD1.5Uo - 0.5Uo)					
		형상모수		척도모수			
		0.5Uo	1.5Uo	0.5Uo	1.5Uo	DTD	1.5÷0.5Uo
전체연도	9,735	0.790	0.760	0.480	0.753	0.273	1.568
2012년	879	0.850	0.786	0.448	0.682	0.234	1.522
2013년	838	0.859	0.771	0.535	0.832	0.297	1.555
2014년	792	0.701	0.626	0.484	0.798	0.314	1.648
2015년	1,107	0.726	0.742	0.558	0.881	0.323	1.578
2016년	1,141	0.856	0.844	0.483	0.792	0.309	1.639
2017년	1,153	0.757	0.758	0.459	0.729	0.270	1.588
2018년	1,160	0.764	0.758	0.471	0.795	0.324	1.687
2019년	1,197	0.764	0.740	0.514	0.734	0.220	1.428
2020년	1,468	1.044	0.940	0.403	0.604	0.201	1.498

동일성 검정결과 척도모수의 P값이 0.000으로 전압의 증가에 비례하며, 1.5Uo에대한 0.5Uo의 비는 평균 1.57에서 ± 0.15의 편차내에서 동일한 비율을 보이고 있다.

DTD 보정은 전체연도 평균비 1.75와 1,000미터 이상 평균비 1.57의 차이만큼을 보정하였다.

$$DTD\text{보정계수} = \frac{0.5Uo/1.5Uo_{(\text{전체연도 척도모수 평균})}}{0.5Uo/1.5Uo_{(1,000\text{미터 이상 척도모수 평균})}} \tag{3.11}$$

척도모수 보정값은 1.114배로 1,000미터 이상구간에 대해 표 (3-21)에 따라 거리보정된 TD값의 DTD에 척도모수 보정값을 곱하여 최종 DTD를 산출하였다.

2015년 Index R의 판단기준 개정시 측정가능한 Scale의 보증거리를 1,000미터로 권장하였고, 최대 1,500미터로 제한하였다.

하지만 해저케이블의 경우 모든 구간이 1,000미터 이상으로 Index R 적용이 어려워 개정전의 판단기준을 적용하고 Index R은 참고로 활용하고 있어 판단기준 적용에 혼선이 발생되고 있다.

새롭게 산출된 TD 및 DTD 보정계수 적용하여 최근 3년간 진단한 10개 구간을 Index R로 재산정하여 표 (3-5)의 기준과 비교를 하였다.

표 3-24. 보정전후 TD 및 판단결과

해저케이블		Index R < 0.751 정상			표 3-5 판정기준(보정전)			측정 연도
		보정전	보정후	판정 결과	TD& DTD	Stdev& Skirt	최종 판정	
1	흑일A	0.587	0.596	정상	이상	불량	불량	2015
	흑일A	0.167	0.178	정상	정상	정상	정상	2016
	흑일A	0.442	0.458	정상	요주의	불량	불량	2017
	흑일A	0.552	0.569	정상	이상	불량	임박	2018
	흑일A	0.557	0.572	정상	요주의	불량	불량	2020
	흑일A	0.054	0.065	정상	정상	정상	정상	2021
2	소안A	0.292	0.343	정상	요주의	정상	요주의	2019
	소안B	0.495	0.599	정상	이상	불량	불량	2019
	소안C	0.407	0.494	정상	요주의	불량	불량	2019
	소안A	0.051	0.109	정상	정상	정상	정상	2020
	소안B	0.000	0.012	정상	정상	정상	정상	2020
	소안C	0.000	0.000	정상	정상	정상	정상	2020
3	국화A	0.412	0.435	정상	요주의	정상	요주의	2019
	국화B	0.380	0.404	정상	요주의	정상	요주의	2019
	국화C	0.296	0.321	정상	관심	정상	관심	2019
	국화A	0.211	0.238	정상	관심	정상	관심	2021
	국화B	0.249	0.276	정상	관심	정상	관심	2021
	국화C	0.206	0.232	정상	관심	정상	관심	2021

4	비금A	0.000	0.004	정상	정상	정상	정상	2019
	비금B	0.000	0.006	정상	정상	정상	정상	2019
	비금C	0.000	0.005	정상	정상	정상	정상	2019
	비금N	0.021	0.028	정상	정상	정상	정상	2019
	비금A	0.000	0.000	정상	정상	정상	정상	2020
	비금B	0.000	0.000	정상	정상	정상	정상	2020
	비금C	0.000	0.000	정상	정상	정상	정상	2020
5	청산A	0.282	0.378	정상	관심	정상	관심	2019
	청산B	0.277	0.310	정상	요주의	이상	요주의	2019
	청산C	0.171	0.206	정상	정상	이상	이상	2019
	청산N	0.138	0.196	정상	정상	이상	이상	2019
	청산A	0.043	0.076	정상	정상	정상	정상	2021
	청산B	0.000	0.004	정상	정상	정상	정상	2021
	청산C	0.000	0.000	정상	정상	정상	정상	2021
	청산N	0.209	0.243	정상	정상	정상	정상	2021
6	장산A	0.000	0.004	정상	정상	정상	정상	2020
	장산B	0.164	0.180	정상	정상	정상	정상	2020
	장산C	0.125	0.129	정상	정상	정상	정상	2020
7	보길A	0.012	0.019	정상	정상	정상	정상	2019
	보길B	0.000	0.000	정상	정상	정상	정상	2019
	보길C	0.000	0.000	정상	정상	정상	정상	2019
	보길N	0.000	0.000	정상	정상	정상	정상	2019
8	망석A	0.074	0.095	정상	정상	정상	정상	2020
	망석B	0.122	0.144	정상	정상	정상	정상	2020
	망석C	0.046	0.089	정상	정상	정상	정상	2020
9	상수A	0.015	0.019	정상	정상	정상	정상	2019
	상수B	0.000	0.000	정상	정상	정상	정상	2019
	상수C	0.074	0.078	정상	정상	정상	정상	2019
	상수N	0.000	0.012	정상	정상	정상	정상	2019

10	대아A	0.146	0.152	정상	정상	정상	정상	2015
	대아A	0.566	0.566	정상	불량	불량	불량	2018
	대아A	0.737	0.749	불량	불량	불량	불량	2020
	대아B	0.283	0.287	정상	정상	이상	이상	2015
	대아B	0.499	0.508	정상	요주의	이상	이상	2018
	대아B	0.777	0.789	불량	불량	임박	임박	2020
	대아C	0.192	0.198	정상	관심	이상	이상	2015
	대아C	0.507	0.516	정상	요주의	이상	이상	2018
	대아C	0.522	0.533	정상	요주의	불량	불량	2020
	대아N	0.212	0.225	정상	정상	정상	정상	2015
	대아N	0.338	0.337	정상	요주의	이상	이상	2018
	대아N	0.495	0.507	정상	요주의	불량	불량	2020

거리보정 후 고장실적이 있는 10번 해저케이블을 제외한 나머지 구간들의 해저케이블은 두 판정기준 모두 일치하며 Index R은 정상이지만, 표 (3-4) 기준 “요주의” 이상인 1, 2, 3, 5번 구간의 판정결과는 서로 상이하며, 한전의 “해저케이블 유지보수업무절차서”에 따라 “요주의” 이상은 1년 후 재진단을 하게 되어 있어 Index R 기준으로 정상임에도 재진단을 시행한 사례이다.

Index R은 그림 (3-4)에서 고장확률 5%인 0.751까지 추세선이 도달하는 경년열화의 기간으로 잔존수명을 산출하고, 수명한계 시점 도달 전 재진단 또는 교체를 한다. 해저케이블 10개 구간 중 판단결과 불일치 5개 구간에 대해 TD 및 DTD 보정후 식 (3.12), (3.13), (3.14), (3.15)에 따라 산출하여 표 (3-25), 기존판정기준 표 (3-5), 해저케이블유지보수업무절차서 표 (3-26)에 따라 진단주기를 비교를 해보았다.

$$\text{열화속도(최초)} = \frac{Index\,R_{(\text{최근진단})}}{\text{설치후 최근진단까지기간}_{(\text{개월})} - 152_{(\text{개월})}} \qquad 3.12$$

※ 152개월은 일반배전케이블의 수트리열화 평균시점

$$\text{잔존수명(최초)} = \frac{0.751 - Index\,R_{(\text{최근진단})}}{\text{열화속도(최초)}} \qquad 3.13$$

$$\text{열화속도(재진단)} = \frac{Index\,R_{(\text{최근진단})} - Index\,R_{(\text{직전진단})}}{\text{직전진단후 최근진단까지기간}_{(\text{개월})}} \qquad 3.14$$

$$\text{잔존수명(재진단)} = \frac{0.751 - Index\,R_{(\text{최근진단})}}{\text{열화속도}} \qquad 3.15$$

표 3-25. 잔존수명 및 진단주기.

- 잔존수명 1년 이하시 : 불량교체 - 잔존수명 3년 이하시 : 1년 후 재진단 - 잔존수명 7년 이하시 : 잔존수명 2년전 재진단 - 잔존수명 7년 초과시 : 잔존수명 2년전과 아래표와 비교 빨리 도래하는 시기에 재진단						
경과년	26년미만	28년미만	30년미만	32년미만	34년미만	34년이상
차기 진단	10년	9년	8년	7년	6년	5년

표 3-26. 해저케이블 열화측정 대상 및 주기.

구 분	진단주기
고장실적이 있는 케이블	고장일로 1년이내
설치 후 10년 ~ 20년 까지	1회/5년
설치 후 20년 경과	1회/3년
측정결과 요주의 이상 판정	1회/1년

표 3-27. 판단기준별 진단주기.

해저케이블		제조 연도	진단 연도	표 3-25			표 3-5		표 3-26
				Index R	잔존 수명	차기 진단	최종 판정	차기 진단	차기 진단
1	흑일A	1997	2015	0.596	18	10년	불량	1년	1년
	흑일A	1997	2016	0.178	∞	10년	정상	-	3년
	흑일A	1997	2017	0.458	10	10년	불량	1년	1년
	흑일A	1997	2018	0.569	20	10년	임박	교체	1년
	흑일A	1997	2020	0.572	926	10년	불량	1년	1년
	흑일A	1997	2021	0.065	∞	10년	정상	-	3년
2	소안A	2008	2019	0.343	∞	10년	요주의	-	1년
	소안B	2008	2019	0.599	∞	10년	불량	1년	1년
	소안C	2008	2019	0.494	∞	10년	불량	1년	1년
	소안A	2008	2020	0.109	∞	10년	정상	-	5년
	소안B	2008	2020	0.012	∞	10년	정상	-	5년
	소안C	2008	2020	0.000	∞	10년	정상	-	5년
3	국화A	2004	2019	0.435	27	2년	요주의	-	1년
	국화B	2004	2019	0.404	32	2년	요주의	-	1년
	국화C	2004	2019	0.321	50	4년	관심	-	5년
	국화A	2004	2021	0.238	∞	10년	관심	-	5년
	국화B	2004	2021	0.276	∞	10년	관심	-	5년
	국화C	2004	2021	0.232	∞	10년	관심	-	5년
4	청산A	1985	2019	0.378	263	5년	관심	-	3년
	청산B	1985	2019	0.310	∞	5년	요주의	-	1년
	청산C	1985	2019	0.206	378	5년	이상	2년	1년
	청산N	1985	2019	0.196	∞	5년	이상	2년	1년
	청산A	1985	2021	0.076	705	5년	정상	-	3년
	청산B	1985	2021	0.004	∞	5년	정상	-	3년
	청산C	1985	2021	0.000	752	5년	정상	-	3년
	청산N	1985	2021	0.243	272	5년	정상	-	3년

5	대아A	1979	2015	0.152	1,127	5년	정상	-	3년
	대아A	1979	2018	0.566	17	1년	불량	1년	1년
	대아A	1979	2020	0.749	0	교체	불량	1년	1년
	대아B	1979	2015	0.287	463	5년	이상	2년	1년
	대아B	1979	2018	0.508	42	2년	이상	2년	1년
	대아B	1979	2020	0.789	0	교체	임박	교체	1년
	대아C	1979	2015	0.198	796	5년	이상	2년	1년
	대아C	1979	2018	0.516	28	1년	이상	2년	1년
	대아C	1979	2020	0.533	222	5년	불량	1년	1년
	대아N	1979	2015	0.225	669	5년	정상	-	3년
	대아N	1979	2018	0.337	141	5년	이상	2년	1년
	대아N	1979	2020	0.507	26	1년	불량	1년	1년

2015년 Index R의 판단기준 도입시 진단거리를 1,000미터로 권장하였으며 이는 진단기준 변경시 사용된 통계자료 다수가 1,000미터 미만의 값들을 사용하였기 때문이다.

따라서 1,000미터 이상 구간의 해저케이블에 대해 거리보정을 통해 Index R 판단 방법으로 일원화시 표 (3-27)의 1번의 경우 현행 3년 → 10년, 2번의 경우 5년 → 10년, 3번의 경우 5년 → 10년으로 진단주기를 연장할 수 있으며, 4번의 경우 30년 이상 사용한 케이블은 3년 → 5년으로 연장할 수 있다.

거리증가에 따른 TD보정계수를 활용하여 Index R로 해저케이블 판단기준 일원화시 진단주기(안)을 도출하였다.

표 3-28. 해저케이블 진단주기(안).

구 분	진 단 주 기
차기진단	Index R 잔존수명에 따름(최대 10년 주기)

제 4 장 VLF 진단전압 하향 방안

제 1 절 선행연구 및 이론적 배경

VLF진단은 계통전압보다 높은 수준의 전압을 인가하여 전압상승에 따른 측정값 변화를 측정하는 기술로 3가지 진단방법이 있다.

표 4-1. VLF진단 전압.

구 분	진단전압(Uo=13.2kV)	시험(진단)시기
내전압시험	3Uo 30분~60분	신설 후 전력공급 전
TD진단	0.5Uo, 1.0Uo, 1.5Uo (1상 기준 약 5분 인가)	해저케이블 10년 이상 일반케이블 18년 이상
PD진단	1.0Uo, 1.25Uo, 1.5Uo, 1.75Uo (1상 기준 약 10분, PD 발생 및 외부잡음 여부에 따라 유동적)	내전압, TD시험시 병행

계통전압보다 높은 전압시험은 파괴시험으로 간주되며 작은 결함에 대해 가속열화의 개념으로 내전압시험 또는 진단 중 절연이 파괴되거나 절연체와 부속설비의 열화를 가속하여 미래에 발생될 수 있는 결함을 현재의 시점으로 당기는 것이다.

케이블 신설 후 제작, 운반, 보관, 설치까지 과정에서 발생될 수 있는 결함을 발견하기 위해 전력공급전 내전압시험을 시행하며 사용중인 케이블은 열화정도를 점검하기 위해서 주기적으로 진단을 시행하고 있다.

하지만 진단시 인가되는 높은 전압으로 절연체가 스트레스를 받을 수 있으며 최악의 경우 진단중 절연파괴가 발생되기도 한다.

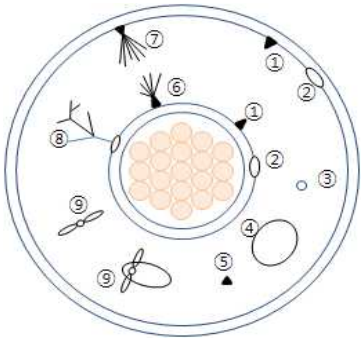
결함구조	결함명칭	검출방법
	① 내·외부 반도전층 돌기	내전압, PD
	② 반도전층 계면 Air Gap	내전압, PD
	③, ④ Void, 수분	내전압, PD
	⑤ 이물질(Amber, Black Metal)	내전압, PD
	⑥ 내부 반도전층 진전수트리	TD
	⑦ 외부 반도전층 진전수트리	TD
	⑧ 수트리에 의한 전기트리	TD, PD
	⑨ 보우타이트리	내전압, PD
절연체 손상	⑩ 절연체 손상 (피복 제거 중 칼집)	PD
삼각공극	⑪ 외부반도전층 접촉불량 (삼각공극 및 피박불량)	PD

그림 4-1. 케이블 결함별 VLF 검출방법.

표 4-2. 전압-주파수에 따른 트리성장률(IEEE Std 400-2001)[5].

전압비(U/Uo)	0.1Hz VLF 정현파 전압비 성장률(㎜/h)
2배(26.4kV)	2.3
3배(39.6kV)	10.9~12.6
4배(52.8kV)	58.3 ~ 64.2
5배(66.0kV)	336
- U : 시험전압, Uo(13.2kV) : 상용상전압 - XLPE 케이블 15,000개소의 현장시험 결과 12분내 68% 절연파괴, 30분내 89%, 45분내 95%, 60분 경과시 100%의 절연파괴가 발생함 - 배전용 지중케이블 및 해저케이블 절연체 두께 : 6.6㎜	

정상적인 신규 케이블의 경우 3Uo(39.6kV)에서 30~60분 동안 절연파괴가 되지않지만, 절연체에 결함 존재시 표 (4-2)의 전기트리 성장률인

10.9~12.6㎜/h의 속도로 성장하여 절연체 두께 6.6㎜를 관통하기까지 약 31~36분내 절연이 파괴가 된다[5].

계통전압보다 높은 전압을 인가하는 방법의 시험은 파괴전압시험으로 볼 수 있으며, 높은 전압은 케이블의 고장을 촉진 시키게 되어 높은 배율의 전압은 낮은 배율의 또는 계통전압에서의 수명보다 급속하게 줄어든다.

케이블의 가속시험은 온도, 전압, 습도 3가지의 가속 스트레스에서 수명을 예측하며 가속모형은 온도에 따른 화학적 반응률에 대한 아레니우스 법칙에 기초한 모형과 인가되는 전압에 비례하는 역누승 모형있다.

$$\ln L = \ln\alpha + (\frac{E_a}{k})\frac{1}{T} \qquad 4.1$$

$$\ln L = \ln\alpha - \beta \ln V \qquad 4.2$$

$$AF = \frac{L_1}{L_2} = \exp\frac{E_a}{k}(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}) \text{ or } (\frac{V_2}{V_1})^{\beta} \qquad 4.3$$

L : 명목수명

α, β : 시험대상의 고장메커니즘 및 특성에 따른 상수

E_a : 활성화에너지(eV)

k : 볼쯔만상수(8.6171×10^{-5}eV/K)

T : 절대온도 , V : 스트레스 시험전압

AF : 가속계수

두 식은 L의 대수값과 T의 역수 및 V와 선형관계를 가짐을 알 수 있으며, 시험조건에 따라 취득한 값들이 온도 또는 전압의 조건별로 선형관계에서의 기울기가 동일하다면, 스트레스 수준별 시험조건에서의 값으로 가속계수를 산출하여 낮은 스트레스 수준에서의 수명 또는 고장확률을 산출할 수 있게 된다[6].

계통전압보다 높은 전압시험을 통과한 케이블이라도 높은 전압으로 인하여 절연체는 스트레스를 받게 되며, VLF 진단의 경우 신설케이블은 최대 3.0Uo(39.6kV), 18년 경과 진단케이블은 최대 1.75Uo(23.1kV)의 전압이 인가되어 시험 또는 진단 중 절연이 파괴되는 경우 발생하게 된다.

신설케이블의 경우 시험 또는 진단 중 절연이 파괴된다면 제조, 운반, 시공 등에서 발생된 결함을 사전에 발견하여 초기 고장을 예방하는 이점이 있지만, 18년이상 경과된 케이블에 대한 진단 중 절연이 파괴되거나 진단 이후 절연이 파괴되는 고장이 발생하기도 하며, 이는 케이블절연이 사용기간 동안 경년열화가 된 상태에서 파괴전압을 인가하여 수명을 단축시킨 경우이다.

하지만 시험 중 절연파괴는 케이블 수명을 단축시킨 점은 있지만, 건전한 계통에서 분리하여 교체를 할 수 있어, 정전으로는 이어지진 않지만 진단 후 높은 전압에서 절연체 열화를 가속시킨 후 일정시간 운전하다 절연파괴로 이어지는 고장이 발생되는 사례도 있다.

제 2 절 VLF 진단으로 인한 절연파괴 사례

케이블 절연파괴는 교류 내전압 인가 시 절연체 내 결함부는 인가전압의 반대극성으로 분극현상 발생되고, 내전압이 증가할수록 분극 전하량이 비례적으로 증가하여 공극 내 전위차 유기되 후, 공극 내 전위차가 공극 내부의 절연내력보다 충분히 높을 경우 공극 내부에서 내전압 극성의 반대방향으로 부분방전 발생, 교류 내전압 정현파 곡선의 반주기마다 반복되는 부분방전은 절연체 계면을 탄화시키며 절연체 수직방향으로 탄화채널을 진전, 일정 시간동안 내전압을 유지하면 방전으로 탄화채널이 절연체 전체를 관통하여 심선과 중성선간 단락회로를 구성하며 케이블 절연체가 파괴된다[5].

표 4-3. 진단중 및 진단후 절연파괴 실적.

진단중		진단후 2년내	
제조후 경과기간	실적(건)	진단후 경과기간	실적(건)
12~15년	2	1주일내	14
16~20년	9	1개월내	6
21~25년	60	6개월내	9
26~30년	15	1년내	4
31~32년	2	2년내	9
합 계	88	합 계	42

총 130건 중 1983년~1999년 기간동안 사용된 CNCV케이블이 123건 및 1999년~2008년까지 사용된 CNCV-W 7건으로 사용기간이 20년이상 시점부터 계통전압보다 높은 진단전압에서 절연이 파괴되는 것을 알 수 있으며, 진단 후 고장 42건 중 약 50%에 해당되는 고장이 진단 후 1개월이내 발생하였다.

표 4-4. 진단중 및 진단후 고장케이블 TD 분포.

진단중		진단후 2년내	
TD_Max	실적(건)	TD_Max	실적(건)
1이하	4	1이하	10
2이하	1	2이하	3
6이하	3	6이하	9
10이하	5	10이하	10
27이하	18	27이하	5
27초과	57	27초과	5
합 계	88	합 계	42

높은 수치의 TD값은 수트리가 상당히 진전된 경우에 해당되고 수트리가 절연체 두께의 약 80%까지 성장한 경우 절연파괴 전압은 7kV/㎜

로써 배전케이블의 절연체 두께인 6.6㎜로 환산하면 약 46kV 정도가 되고, 절연체를 완전히 관통하여 100%가 되면 약 25~28kV 정도로 환산할 수 있으며, 계통전압 13.2kV 수준에서는 공급가능하나 피뢰기제한 전압 65kV 이하의 서지에서는 절연이 파괴되는 수준으로 볼 수 있다[1].

또한 수트리 성장길이가 절연체의 절연파괴에 영향을 줄 수 있으나 100% 성장된 수트리라 할지라도 케이블의 절연능력만 감소시키며, 반드시 절연파괴로 이어지는 것이 아니다. 다만 전기트리 발생 또는 성장을 촉진시킬 수 있으며, 수트리에서 전기트리로 변이되는 과정에 대한 명확한 메커니즘은 아직까지 규명되지 못하였다[7].

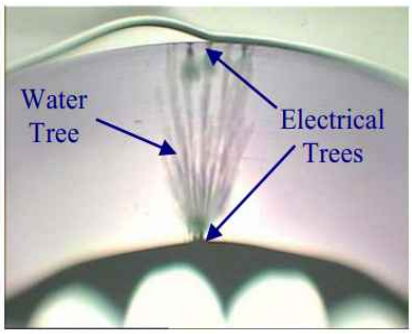
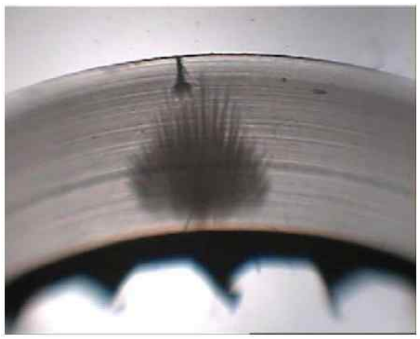
100% 수트리 및 초기 전기트리	수트리 및 초기 전기트리
	

그림 4-2. 절연체내 수트리 및 초기전기트리[7].

18년 이상 경과된 케이블 VLF진단시 인가전압은 1.75Uo(23.1kV)이하이며 절연체를 완전히 관통한 수트리의 전압범위인 25~28kV 보다 낮은 전압임에도 불구하고 절연이 파괴되는 것은 케이블 진단전 이미 수트리가 100% 성장된 후 전기트리로 발전되는 임박한 상태에서 높은 진단 전압으로 절연파괴가 되었으리라 추론을 할 수 있으며, 진단중 또는 진단 후 짧은 기간내 절연파괴된 케이블에 대한 해체분석 및 절연파괴 원인에 대한 규명을 위한 연구가 필요한 부분이다.

진단중 절연파괴된 케이블의 사용기간은 20년 이상이 대부분이며, 배전용 지중케이블의 경우 진단중 절연파괴가 되더라도 고장구간을 계통분리 후 연계선로에서 전력공급 후 약 1주일내 긴급복구가 가능하지만, 해

저케이블의 경우 진단에 의한 절연파괴 발생시 복구에 상당한 시간이 소요되며, 1998년 고장난 해저케이블의 경우 진단에 의한 고장은 아니지만 긴급복구에 약 1개월이 소요되었고, 복구 후 2012년 2, 3차 고장으로 발생하여 대체선로를 신설하게 된 사례도 있다.

배전용 해저케이블은 1979년 최초 설치 후 시간이 경과됨에 따라 점차 노후화 되어가고 있으며, 진단전압에 의한 절연체 스트레스를 경감할 필요가 있다.

표 4-5. 해저케이블 사용기간.

사용기간	10년이하	10~20년	20~30년	30~40년	41년이상	합계
설치구간	10개소	14개소	2개소	6개소	8개소	39개소

제 3 절 VLF 진단전압 하양 방안

3.1 연구방법

VLF진단(TD,PD)은 계통전압의 1.25Uo ~ 1.75Uo의 전압을 케이블에 인가하며, 진단전압이 높을수록 두 값은 비례하여 높아지는 경향이 있다. 전압에 비례한 VLF TD 및 PD값들의 선형적 연관성을 확인하기 위해 2012년~2020년간 측정된 약 12만건의 진단자료 통계분석을 통해 1.0Uo 이하에서 측정된 TD값으로 1.5Uo TD값을 예측하고 정확도 검증 및 PD 방전개시전압 특성과 실험을 통해 전압하향 가능 여부에 대해 고찰하였다.

3.2 데이터 정제 및 분석

통계분석에 사용된 진단데이터는 한국전력에서 2012년부터 전국사업소에서 직영 및 용역으로 시행한 진단결과로 총 122,401건이며 결측치 및 입력오류를 제외한 121,493개를 활용하였다.

VLF TD진단에서 가장 낮은 전압인 0.5Uo(6.6kV) 기준으로 총 20구간으로 구분을 하여 각 구간별 기술통계량을 검토하였다.

표 4-6. 0.5Uo TD 구간별 기술통계.

구간	TD 범위	수량	전압	최소	중앙	평균	최대
1	1 이하	105,826	0.5Uo	0.007	0.353	0.400	1.000
			1.0Uo	0.008	0.400	0.514	380.759
			1.5Uo	0.009	0.522	0.935	940.795
2	1~2이하	7,365	0.5Uo	1.001	1.309	1.396	2.000
			1.0Uo	0.121	1.703	1.964	157.281
			1.5Uo	0.130	2.279	3.407	504.908
3	2~3이하	2,495	0.5Uo	2.001	2.423	2.446	3.000
			1.0Uo	0.260	3.061	3.635	505.148
			1.5Uo	0.230	3.904	5.495	770.618
4	3~4이하	1,428	0.5Uo	3.001	3.477	3.478	4.000
			1.0Uo	0.221	4.340	5.088	196.954
			1.5Uo	0.294	5.433	7.669	491.050
5	4~5이하	839	0.5Uo	4.001	4.411	4.438	5.000
			1.0Uo	0.290	5.714	6.976	320.744
			1.5Uo	0.372	7.172	11.695	564.496
6	5~6이하	549	0.5Uo	5.001	5.434	5.475	6.000
			1.0Uo	0.290	7.095	7.843	47.924
			1.5Uo	0.370	8.773	11.579	293.769
7	6~7이하	373	0.5Uo	6.005	6.469	6.48	7.000
			1.0Uo	0.191	8.089	8.713	41.691
			1.5Uo	0.250	9.571	11.403	79.700
8	7~8이하	301	0.5Uo	7.002	7.479	7.477	8.000
			1.0Uo	0.318	9.449	10.255	80.186
			1.5Uo	0.380	10.863	12.701	86.146

9	8~9이하	254	0.5Uo	8.003	8.484	8.504	8.995
			1.0Uo	2.495	10.755	11.691	49.360
			1.5Uo	3.855	12.71	18.651	729.708
10	9~10이하	214	0.5Uo	9.001	9.461	9.479	10.000
			1.0Uo	0.180	11.557	11.962	34.569
			1.5Uo	0.350	13.676	15.026	124.669
20	10~20이하	1,014	0.5Uo	10.006	13.761	14.208	20.000
			1.0Uo	0.100	17.182	18.811	249.470
			1.5Uo	0.100	19.709	25.316	518.620
30	20~30이하	338	0.5Uo	20.003	24.117	24.436	29.998
			1.0Uo	0.250	28.450	33.183	480.553
			1.5Uo	0.259	31.438	39.146	688.794
40	30~40이하	203	0.5Uo	30.101	33.756	34.38	39.967
			1.0Uo	0.335	38.340	39.639	328.056
			1.5Uo	0.356	40.785	44.658	440.204
50	40~50이하	98	0.5Uo	40.033	44.790	44.816	49.954
			1.0Uo	0.519	50.774	52.493	261.366
			1.5Uo	4.241	52.435	62.55	490.760
60	50~60이하	80	0.5Uo	50.039	55.103	54.901	59.977
			1.0Uo	22.654	59.363	75.01	686.670
			1.5Uo	17.985	60.474	79.95	543.599
70	60~70이하	62	0.5Uo	60.110	64.198	64.693	69.724
			1.0Uo	3.054	68.365	78.032	466.363
			1.5Uo	5.793	67.913	86.51	938.253
80	70~80이하	24	0.5Uo	70.074	73.758	74.237	79.596
			1.0Uo	0.245	87.341	88.471	202.053
			1.5Uo	0.280	95.455	101.30	305.146
90	80~90이하	11	0.5Uo	80.312	82.581	83.844	89.819
			1.0Uo	41.601	85.683	143.23	653.009
			1.5Uo	32.515	87.034	116.51	396.803
100	90~100이하	19	0.5Uo	90.682	94.688	94.777	98.287
			1.0Uo	0.254	94.705	95.037	274.395
			1.5Uo	0.300	94.391	85.103	126.773
		121,493					

VLF 진단결과 케이블열화 상태 불량 구간인 TD값 30 초과 및 전압 상승에 따라 기울기가 없거나 마이너스인 경우를 제외하고 94,496개의 데이터로 전압증가에 따른 TD 증가비를 구하였다.

표 4-7. 0.5Uo TD 이상치 제외 구간별 기술통계.

구간	TD 범위	수량	전압	최소	중앙	평균	최대
1	1 이하	80,723	0.5Uo	0.007	0.366	0.418	1.000
			1.0Uo	0.028	0.440	0.555	380.759
			1.5Uo	0.051	0.613	1.050	940.795
2	1~2이하	6,855	0.5Uo	1.001	1.308	1.370	2.000
			1.0Uo	1.005	1.743	1.940	51.553
			1.5Uo	1.031	2.365	3.438	504.908
3	2~3이하	2,296	0.5Uo	2.001	2.418	2.442	3.000
			1.0Uo	2.041	3.118	3.458	41.255
			1.5Uo	2.088	4.019	5.280	179.566
4	3~4이하	1,320	0.5Uo	3.001	3.478	3.476	4.000
			1.0Uo	3.029	4.408	4.892	24.901
			1.5Uo	3.068	5.612	7.731	491.050
5	4~5이하	752	0.5Uo	4.001	4.431	4.446	5.000
			1.0Uo	4.094	5.809	6.405	41.950
			1.5Uo	4.190	7.330	10.480	564.500
6	5~6이하	510	0.5Uo	5.001	5.454	5.481	6.000
			1.0Uo	5.173	7.167	7.892	47.924
			1.5Uo	5.240	8.882	11.123	107.236
7	6~7이하	322	0.5Uo	6.005	6.477	6.481	7.000
			1.0Uo	6.064	8.270	9.119	38.579
			1.5Uo	6.216	9.871	12.148	79.700
8	7~8이하	261	0.5Uo	7.002	7.489	7.478	8.000
			1.0Uo	7.139	9.619	10.304	80.186
			1.5Uo	7.182	11.209	13.070	86.146
9	8~9이하	219	0.5Uo	8.003	8.488	8.507	8.995
			1.0Uo	8.099	10.891	11.541	25.380
			1.5Uo	8.200	13.030	16.020	275.71

구간	TD 범위	수량	전압	최소	중앙	평균	최대
10	9~10이하	185	0.5Uo	9.001	9.458	9.477	10.000
			1.0Uo	9.286	11.959	12.569	34.569
			1.5Uo	9.612	13.998	16.042	124.669
20	10~20이하	830	0.5Uo	10.006	13.625	14.151	20.000
			1.0Uo	10.390	17.758	18.702	97.153
			1.5Uo	11.084	20.589	24.302	497.950
30	20~30이하	241	0.5Uo	20.003	23.761	24.125	29.998
			1.0Uo	20.668	29.500	30.430	102.323
			1.5Uo	21.720	33.380	36.440	238.750
		94,496					

VLF TD진단은 계통전압보다 최대 1.5배 높은 전압(19.8kV)을 인가하여 케이블의 절연상태를 측정하는 방법으로 전압이 높아짐에 따라 정상적인 절연케이블의 경우 TD값은 전압에 비례해서 증가하게된다.

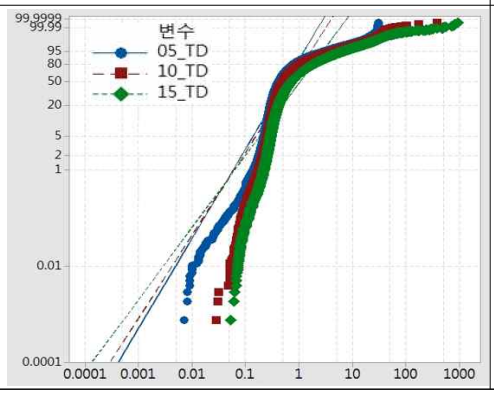
0.5Uo, 1.0Uo, 1.5Uo(Uo=13.2kV)	모수검정 결과
	분포 분석: 05_TD, 10_TD, 15_TD 동일 형상 및 척도 모수에 대한 검정 카이-제곱 DF P 1594507 4 0.000 동일 형상 모수에 대한 검정 카이-제곱 DF P 102088 2 0.000 동일 척도 모수에 대한 검정 카이-제곱 DF P 58715.5 2 0.000 Bonferroni 95.0%(개별 99.17%) 동시 CI

그림 4-3. 전압증가에 따른 TD 와이블분포.

그림 (4-3)은 94,496개의 0.5Uo, 1.0Uo, 13.2Uo TD진단값에 대한 와이블 분포로 동일 형상모수에 대한 검정결과 P값이 0으로 모든 전압에서

의 TD값은 동일한 형상모수를 가지며, 척도모수는 전압증가에 비례하여 함께 증가됨을 알 수 있다.

표 4-8. 동일형상모수가정 TD모수.

구 분	형상모수			척도모수		
	0.5Uo	1.0Uo	1.5Uo	0.5Uo	1.0Uo	1.5Uo
검정전	1.865	1.726	1.503	0.686	0.875	1.330
검정후	1.684(동일형상모수 가정)			0.709	0.882	1.276

진단전압 증가비는 1.5Uo와 1.0Uo의 척수모수비인 1.4467배를 1.0Uo에서 곱하여 1.5Uo의 TD값을 예측해 보았다.

표 4-9. 동일형상모수적용 1.5Uo TD 예측.

구간	TD 범위	수량	예측오차 ±10%		예측오차 ±20%		오차내 예측율	
			이내	초과	이내	초과	±10%	±20%
1	1 이하	80,723	32,685	48,038	58,375	22,348	40.5%	72.3%
2	1~2이하	6,855	1,298	5,557	3,051	3,804	18.9%	44.5%
3	2~3이하	2,296	368	1,928	854	1,442	16.0%	37.2%
4	3~4이하	1,320	165	1,137	400	902	12.7%	30.7%
5	4~5이하	752	111	641	247	505	14.8%	32.9%
6	5~6이하	510	77	433	149	361	15.1%	29.2%
7	6~7이하	322	17	305	60	262	5.3%	18.6%
8	7~8이하	261	16	245	39	222	6.1%	14.9%
9	8~9이하	219	17	202	34	185	7.8%	15.5%
10	9~10이하	185	13	172	26	159	7.0%	14.1%
20	10~20이하	830	63	767	222	608	7.6%	26.8%
30	20~30이하	241	17	224	43	198	7.1%	17.8%
합 계		94,496	34,847	59,649	63,500	30,996	36.9%	67.2%

전체 94,496개의 TD값 ±10% 오차내 예측율이 36.9%, ±20%오차내 예측률이 67.2%이며 각 구간별 예측값은 TD값이 높아짐에 따라 함께 낮아지며, 정확도가 떨어짐을 알 수 있다. 이는 척도모수비의 증가비외 TD값 예측에 필요한 요소를 추가하여 검토할 필요가 있다는 결과이다.

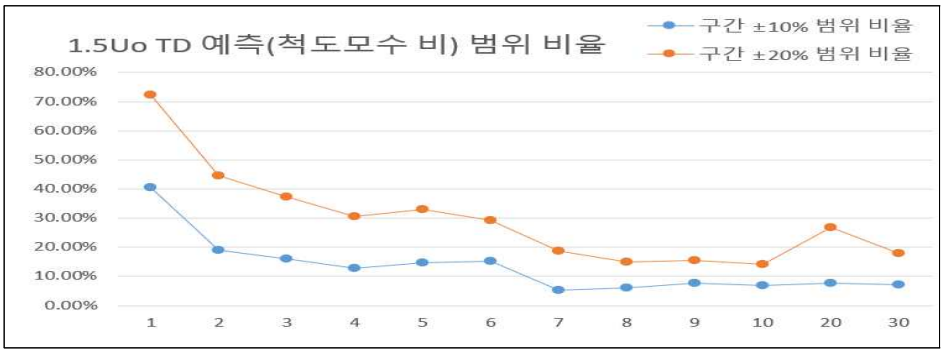
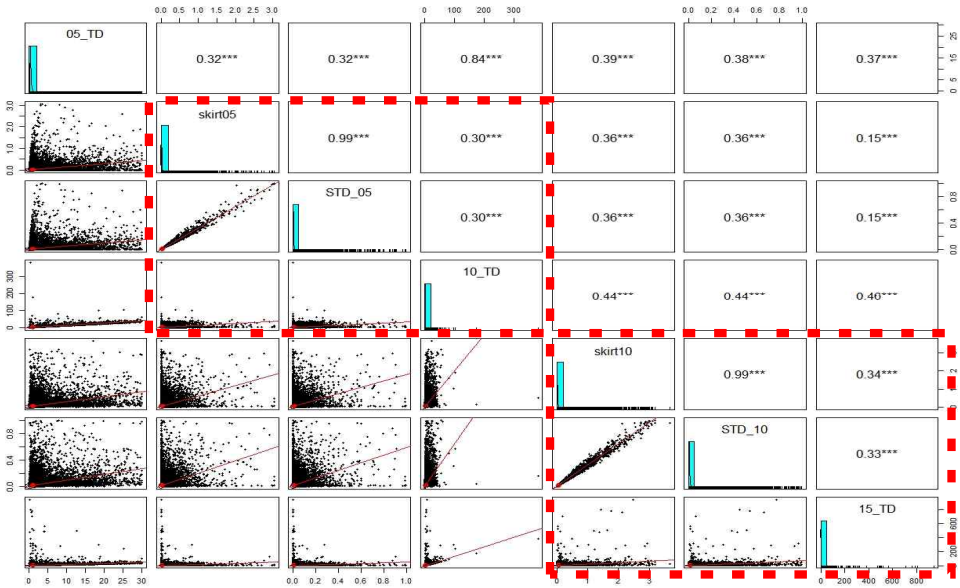


그림 4-4. 1.5Uo 예측(척도모수 비)오차내 예측률.

0.5Uo와 1.0Uo의 최대최소값(skirt), 표준편차(Stdev)가 전압증가에 따른 예측요소로 사용가능여부에 대한 상관분석을 해보았다.

0.5TD(Skirt, Stdev), 1.0UoTD(Skirt, Stdev), 1.5Uo TD 상관관계



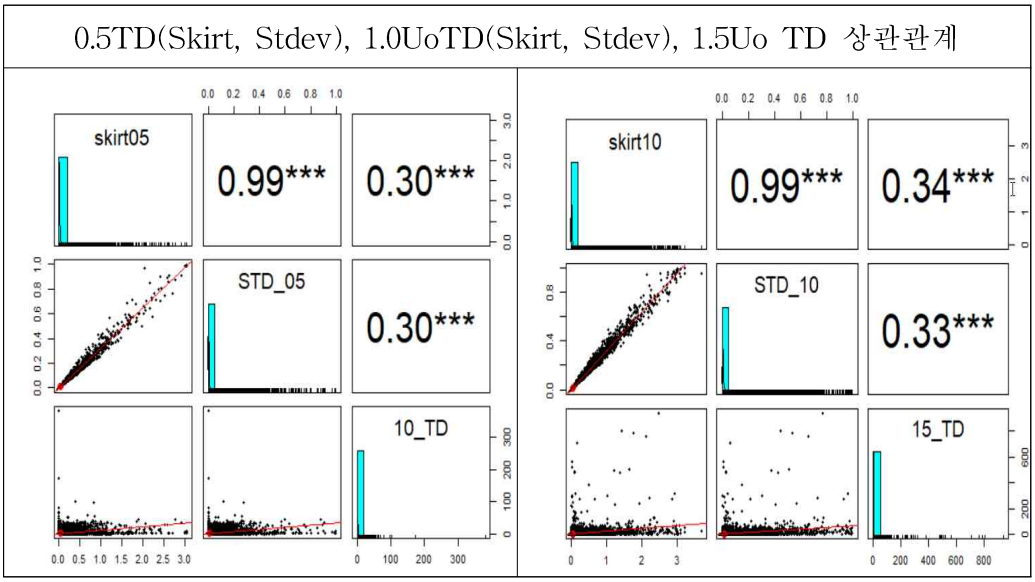


그림 4-5. TD 상관분석결과.

VLF TD 상관분석결과 Skirt는 0.5Uo 및 1.0Uo에서 기록된 8개 TD 값의 최대값과 최소값의 차이이며, Stdev는 8개의 값에 대한 표준편차로 상호 0.99로 강한 상관관계임을 알 수 있다. 또한 두 가지중 하나를 예측 요소로 활용할 수 있음을 알 수 있어, IEEE 4002-2013에서 TD판단의 요소 활용되는 Stdev을 예측요소로 선정하여 추가 분석을 시행하였다.

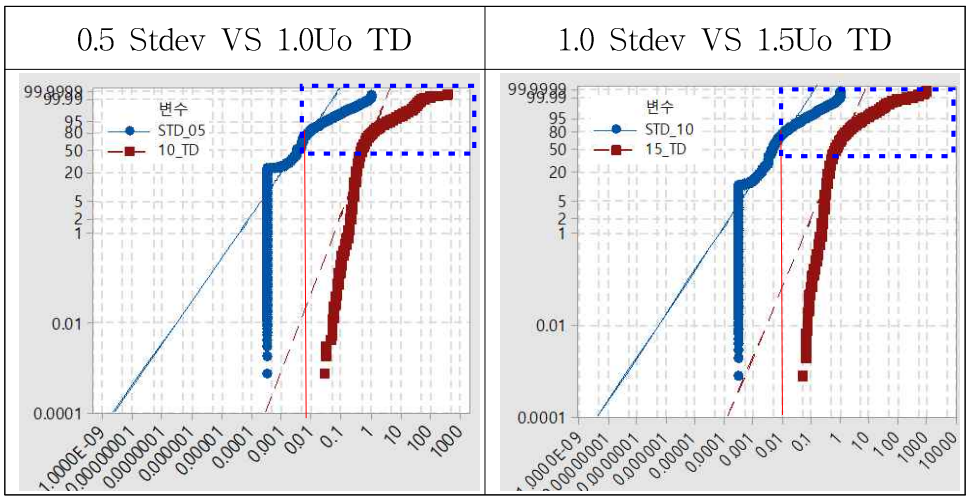


그림 4-6. Stdev Vs TD 와이블분포.

TD 및 Stdev 와이블분포는 비슷하며, 특히 80% 이상 구간에서 두 값 모두 변별이 가능한 변화 확인되었다. 변화가 시작되는 80% 이상구간에서 추출한 39,992개의 자료로 0.5Uo TD 구간별로 재분류하여 와이블분포 및 상관분석을 시행하였다.

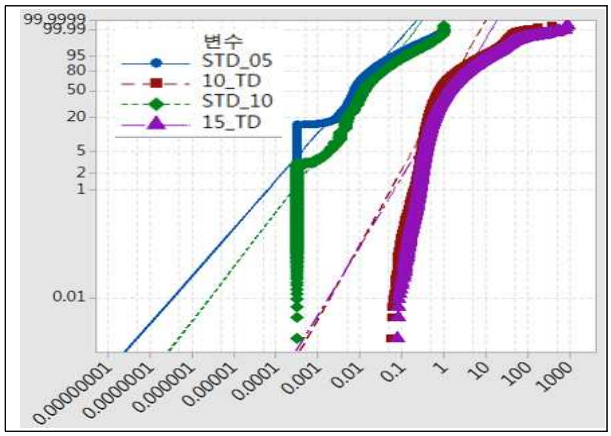


그림 4-7. Stdev 80% 이상 와이블분포.

표 4-10. Stdev 80% 이상 기술통계.

구간	수 량	중앙값(백분율 50%)				
		0.5Uo		1.0Uo		1.5Uo
		Stdev	TD	Stdev	TD	TD
1	28,642	0.0066	0.438	0.0100	0.579	0.896
2	5,079	0.0085	1.334	0.0168	1.856	2.569
3	1,919	0.0111	2.423	0.0217	3.214	4.230
4	1,149	0.0141	3.486	0.0280	4.515	5.820
5	716	0.0156	4.430	0.0341	5.838	7.370
6	490	0.0203	5.464	0.0402	7.212	9.017
7	311	0.0224	6.479	0.0453	8.279	9.883
8	239	0.0250	7.491	0.0463	9.638	11.23
9	209	0.0233	8.509	0.0556	10.923	13.04
10	184	0.0344	9.454	0.0502	11.924	14.029
20	814	0.0354	13.594	0.0668	17.700	20.642
30	240	0.0513	23.793	0.0969	29.504	33.390
합계	39,992					

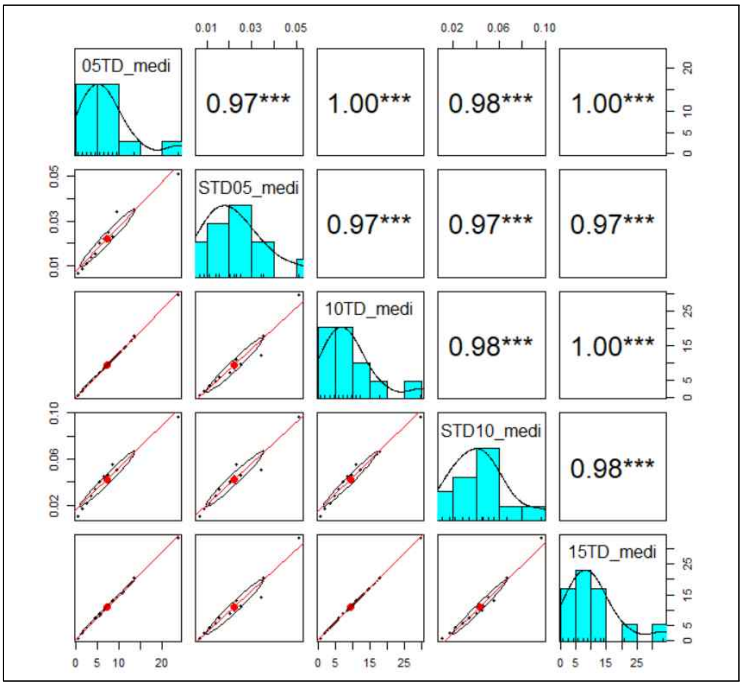


그림 4-8. Stdev 80% Vs TD 상관분석.

상관분석결과 각 구간별 Stdev과 TD값은 0.99로서 아주강한 상관관계를 보여주고 있으며, TD값 예측에는 Stdev의 백분율 값을 활용하여 백분율 위치에 따른 1.5Uo TD값 예측 계수표를 만들었다.

표 4-11. 1.5Uo TD 예측 계수.

구간	Stdev(8개 측정값의 표준편차)				1.5Uo TD예측 계수			
	0.5Uo	1.0Uo						
	최소	최소	중앙	평균	①	②	③	④
1	0.00031	0.00031	0.01	0.0209	1	1.2737	1.5475	2.2791
2	0.00031	0.00031	0.0168	0.0387	1	1.1921	1.3842	1.8733
3	0.00031	0.00031	0.0217	0.0519	1	1.1581	1.3161	1.5637
4	0.00031	0.00031	0.028	0.0676	1	1.1445	1.2890	1.6160
5	0.00031	0.0016	0.0341	0.0701	1	1.1312	1.2624	1.6545
6	0.00031	0.0029	0.0402	0.0753	1	1.1251	1.2503	1.4208
7	0.00031	0.0033	0.0453	0.0797	1	1.0969	1.1937	1.3378

8	0.00031	0.0056	0.0463	0.0896	1	1.0826	1.1652	1.2745
9	0.00031	0.006	0.0556	0.0917	1	1.0969	1.1938	1.3986
10	0.00031	0.0043	0.0502	0.0911	1	1.0883	1.1765	1.2770
20	0.00031	0.0003	0.0668	0.1231	1	1.0831	1.1662	1.3028
30	0.00031	0.0043	0.0969	0.1659	1	1.0659	1.1317	1.1983
① 조건 : x ≤ Stdev0.5Uc최소 and x ≤ Stdev1.0Uo최소 and x 〈 TD 1.0Uo/0.5Uc중앙 ② 조건 : x ≤ Stdev1.0Uo중앙, ③ 조건 : x ≤ Stdev1.0Uo평균 ④ 조건 : x 〈 Stdev1.0Uo 0.2 ⑤ 조건 : x 〉 Stdev1.0Uo 0.2 0.084exp(2.5753×Stdev 1.0Uo)×100-8.61								

1.5Uo TD예측 계수표의 조건 ① ~ ④는 와이블분포에서 선형성이 있는 구간에 해당되며, 조건 ⑤는 비선형적구간이며 진단결과 케이블 절연파괴 임박에 해당되는 값으로서 실제 측정된 데이터에서도 변화율이 아주 심한 상태로 ⑤의 구간에서는 1.0Uo에서 측정된 값으로 케이블 불량을 판정할 수 있으며, 예측한 값은 변화추이를 참고하기 위함이다.

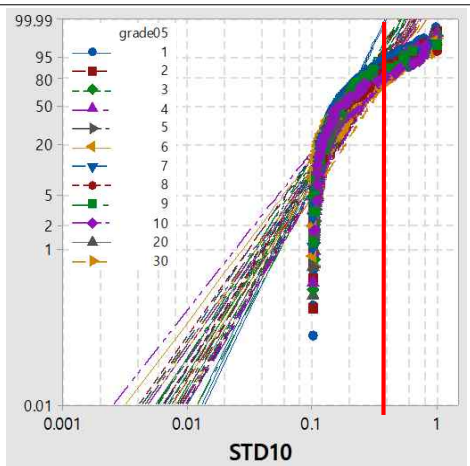
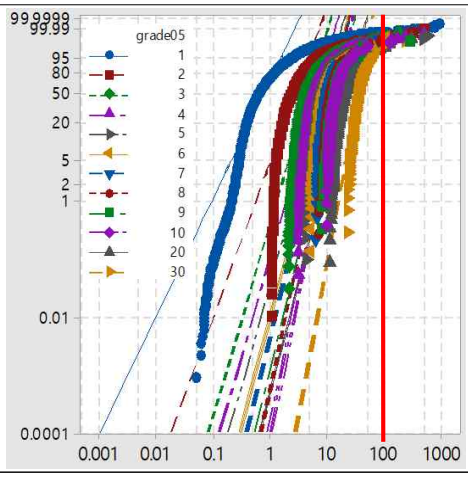
1.0Uo Stdev	1.5Uo TD
	

그림 4-9. Stdev 및 TD 비선형 시작점.

1.0Uo Stdev값은 0.2 에서에 1.5Uo TD값은 100에서 급격한 변화를 보이는 것을 알 수 있으며, Stdev값 0.1 이상의 백분율 분포로 1.5Uo의 비선형구간에서의 값을 유추하기 위해 기울기를 산출하였다.

백분율	Stdev
20	0.12
30	0.13
40	0.15
50	0.17
60	0.2
70	0.23
80	0.3
90	0.49
95	0.57
97	0.69
98	0.76
99	0.92
100	1.00

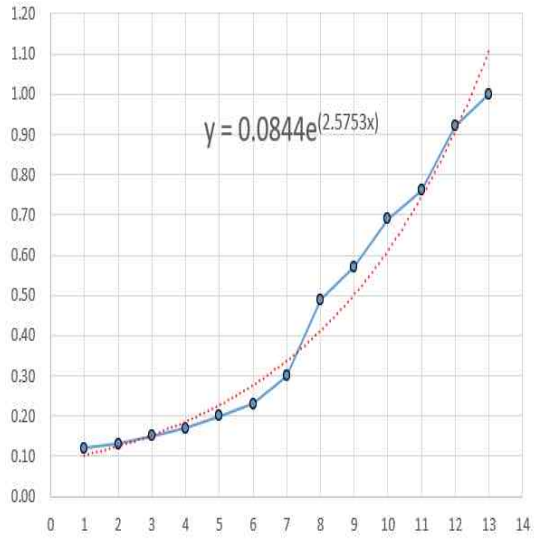


그림 4-10. Stdev 1.0 이상 기울기.

그림 (4-9)에서 1.5Uo TD값 100이상에서 급격하게 증가하는 경향성이 있어 1.0Uo의 값으로 100이상의 값을 유추하기에는 무리가 있으며, 1.5Uo의 값은 최대 200으로 제한을 하여 조건 ⑤의 식을 유추하였다.

$$1.5Uo\ TD(\text{비선형예측}) = 0.884\exp(2.5753 \times 1.0Uo\,stdev) \times 100 - 8.61 \qquad 4.5$$

※ 0.5Uo TD 1~10에 적용

$$1.5Uo\ TD(\text{비선형예측}) = 0.884\exp(2.5753 \times 1.0Uo\,stdev) \times 150 \qquad 4.6$$

※ 0.5Uo TD 20에 적용

$$1.5Uo\ TD(\text{비선형예측}) = 0.884\exp(2.5753 \times 1.0Uo\,stdev) \times 200 \qquad 4.7$$

※ 0.5Uo TD 30에 적용

표 (4-11)의 조건 ① ~ ⑤에 따라 예측계수를 적용하여 산출된 1.5Uo TD의 구간별 오차내 예측율 검토하였다.

표 4-12. 1.5Uo TD 오차내 예측율.

구간	TD 범위	수량	예측오차 ±10%		예측오차 ±20%		오차내 예측율	
			이내	초과	이내	초과	±10%	±20%
1	1 이하	80,723	43,677	37,046	57,795	22,928	54.11%	71.60%
2	1~2이하	6,855	2,800	4,055	4,006	2,849	40.85%	58.44%
3	2~3이하	2,296	931	1,365	1,426	870	40.55%	62.11%
4	3~4이하	1,320	543	759	823	479	41.71%	63.21%
5	4~5이하	752	197	555	427	325	26.20%	56.78%
6	5~6이하	510	217	293	337	173	42.55%	66.08%
7	6~7이하	322	145	177	225	97	45.03%	69.88%
8	7~8이하	261	109	152	176	85	41.76%	67.43%
9	8~9이하	219	103	116	151	68	47.03%	68.95%
10	9~10이하	185	82	103	134	51	44.32%	72.43%
20	10~20이하	830	482	348	652	178	58.07%	78.55%
30	20~30이하	241	137	104	181	60	56.85%	75.10%
합 계		94,496	49,423	45,073	66,333	28,163	36.9%	67.2%

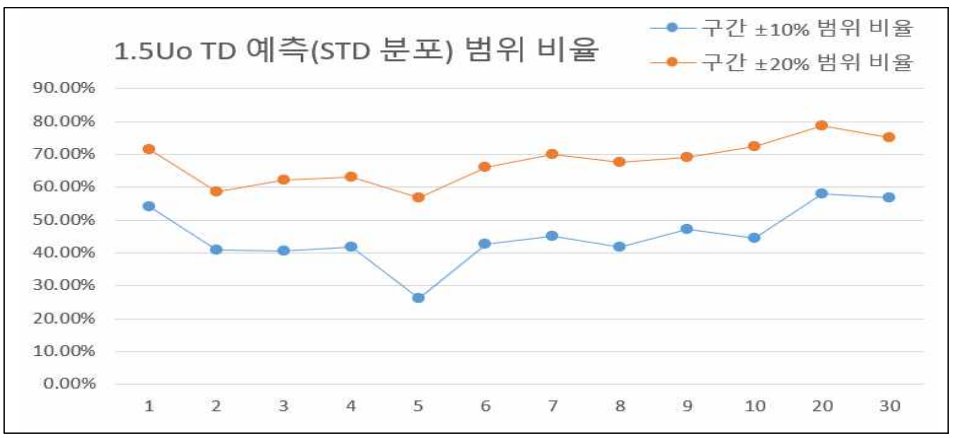


그림 4-11. 1.5Uo 예측(STD비) 오차내 예측률.

1.5Uo TD 예측결과 척도모수 보다 Stdev로 유도한 계수에 따라 산출된 값이 좀더 정확한 것을 알 수 있다.

표 4-13. 1.5Uo TD 오차내 예측율 비교.

구간	TD 범위	수량	오차(±10%~±20%)내 예측율			
			척도모수		Stdev	
			±10%	±20%	±10%	±20%
1	1 이하	80,723	40.5%	72.3%	54.11%	71.60%
2	1~2이하	6,855	18.9%	44.5%	40.85%	58.44%
3	2~3이하	2,296	16.0%	37.2%	40.55%	62.11%
4	3~4이하	1,320	12.7%	30.7%	41.71%	63.21%
5	4~5이하	752	14.8%	32.9%	26.20%	56.78%
6	5~6이하	510	15.1%	29.2%	42.55%	66.08%
7	6~7이하	322	5.3%	18.6%	45.03%	69.88%
8	7~8이하	261	6.1%	14.9%	41.76%	67.43%
9	8~9이하	219	7.8%	15.5%	47.03%	68.95%
10	9~10이하	185	7.0%	14.1%	44.32%	72.43%
20	10~20이하	830	7.6%	26.8%	58.07%	78.55%
30	20~30이하	241	7.1%	17.8%	56.85%	75.10%
합 계		94,496	36.9%	67.2%	52.3%	70.1%

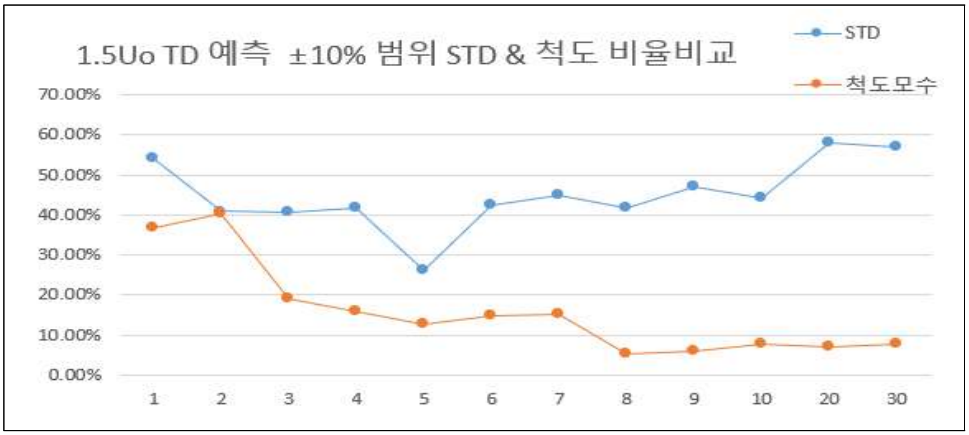


그림 4-12. 1.5Uo 10% 오차내 예측률비교(STD&척도모수)

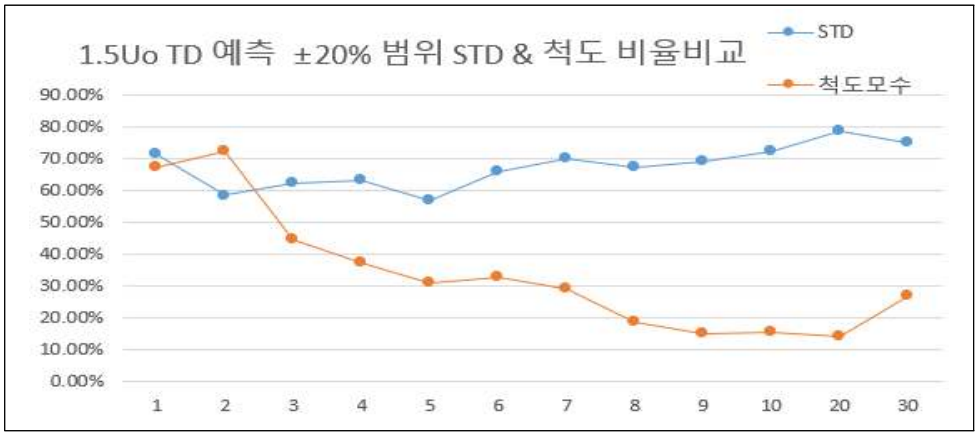


그림 4-13. 1.5Uo 20% 오차내 예측률비교(STD&척도모수)

예측 계수표의 조건으로 해저케이블에 적용을 해보았다.

표 4-14. 해저케이블 1.5Uo TD 예측.

구간	TD 범위	수량	예측오차 ±10%		예측오차 ±20%		오차내 예측율	
			이내	초과	이내	초과	±10%	±20%
1	1 이하	79	66	13	68	11	83.54%	86.08%
2	1~2이하	9	4	5	8	1	44.44%	88.89%
3	2~3이하	4	2	2	2	2	50.00%	50.00%
4	3~4이하	5	3	2	3	2	60.00%	60.00%
6	5~6이하	1		1	1		- %	100%
8	7~8이하	1		1		1	- %	- %
합 계		99	75	24	82	17	75.76%	82.83%

적용결과 1.5Uo TD ±10%, ±20% 오차내 예측률 75.76%, 82.83%의 오차범위에서 계통전압 1.0Uo(Uo=13.2kV)에서 측정된 TD값으로 약 70 ~ 80% 범위내에서 예측 가능하며 1.0Uo에서 측정된 TD 값으로 진단전압 증가에 따른 경향성을 충분히 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

VLF PD 진단은 계통전압인 1.0Uo(13.2kV)부터 0.25Uo(3.3kV)씩 증가하여 최대 1.75Uo(23.1kV)배의 전압을 케이블에 가압하여 케이블 절연체 및 접속부에서 발생되는 부분방전을 측정하는 기술이다.

VLF PD 진단전압은 지중배전케이블 최적 열화진단기술 선정 및 운영방안에 관한 연구에서 1.75Uo(23.1kV)까지 상승 진단하도록 기준을 제시하였으며, TD의 경우는 1.5Uo(19.8kV)로 제한 하였으며 제한배경은 IEEE Std. 400-2001의 판단기준에서 2.0Uo(26.4kV)로 진단 후 단시간 내에 고장이 발생하는 사례가 많아 TD진단 전압을 1.5Uo로 제한하고, PD진단은 1.75Uo(23.1kV)에서 500 pC 이상의 부분방전 발생시 케이블 고장이 임박한 것으로 판단하여 해당선로를 계통분리 후, 현장에서 3.0Uo(39.6kV)의 전압으로 내전압시험을 실시하여 PD발생지점을 절연파괴시켜 케이블교체 하도록 하였다.[1]

하지만 해저케이블의 경우는 배전용 지중케이블과 동일한 방법으로 인위적인 절연파괴 후 케이블을 교체할 수 없으며, 또한 20년 이상 사용한 해저케이블의 경우 진단 주기가 3년으로 잦은 진단으로 절연체에 스트레스를 가하고 있어 TD진단 전압하향과 함께 PD진단 전압하향 가능성에 대해서도 검토를 하고자 한다.

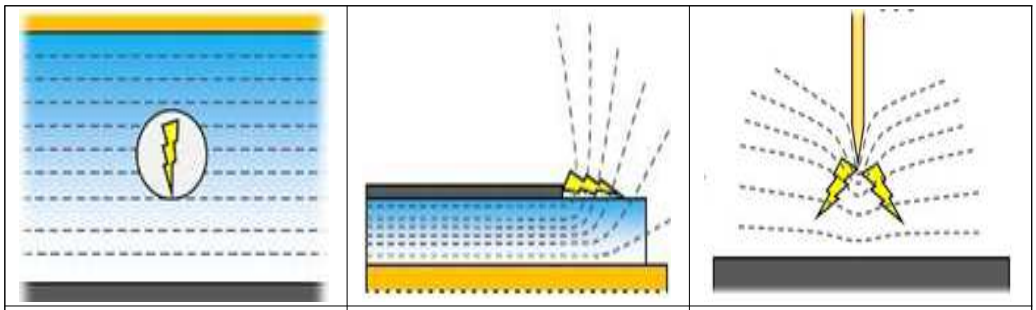
TD 전압하향에 사용된 데이터는 2012년~2020년간 측정된 약 12만건의 진단자료 중 PD가 발생된 8,703개의 자료를 추출하여 검토하였다.

표 4-15. PD 발생건수.

직선접속부	종단접속부	케이블내부	합계
8,247건(94.8%)	258건(3.0%)	198건(2.3%)	8,703건

VLF PD진단 결과 직선접속부가 전체 발생건수 중 94.8%로 자치하며 대부분 시공불량에 의한 것이며, 케이블내부 발생건수는 2.3%로 발생비율은 낮으나 제작불량 및 고장임박조건에 해당되는 아주 심각한 경우에 해당되어 즉시 전원공급 차단 후 케이블을 교체해야되는 경우이다.

직선접속부와 케이블내부에서 발생되는 부분방전은 공극 및 수트리에 의한 방전현상에 국한되지만, 종단접속부는 공극에 의한 방전뿐만 아니라 표면 및 코로나방전 등 다양한 방전이 발생되는 부분이며, 전체방전의 3% 정도만 측정되었다.



내부방전	표면방전	코로나방전

그림 4-14. PD 종류[8].

공극에서 일어나는 방전은 절연체 결함 내부에서 발생할 수 있으며, 케이블 절연파괴로 이어지는 전기트리로 진전되기도 하지만, 절연체 표면에서 일어나는 표면방전의 경우 전계가 높으면 발생할 수 있으며, 절연체 표면에 트래킹을 유발시키고, 날카로운 도체나 돌기 또는 접속부에서 발생되는 코로나 방전은 전력설비에 해롭지 않다고 알려져 있다.

이러한 이유는 케이블 및 접속재 등 고체 절연체 내부에서 발생되는 방전현상은 절연회복 없이 지속적인 절연열화에 의해 절연파괴가 되는 반면, 종단접속 부분의 연결단자와 같이 공기중에 노출된 곳의 돌기나 이물에서 발생되는 기체방전인 코로나 방전으로 방전 후 절연이 회복되므로 절연파괴와의 상관성이 적으므로 방전의 특성에 따라 판단 방법을 달리할 필요가 있다.

케이블 각 부위에서 부분방전이 검출되기 시작하는 전압과 그 비율에 대해 알아보았다.

표 4-16. PD 방전개시전압 비율

구 분		1.0Uo (13.2kV)	1.25Uo (16.5kV)	1.5Uo (19.8kV)	1.75Uo (23.1kV)	합 계
직선접속부	발생횟수	241	713	1,825	5,468	8,247
	발생비율	2.9%	8.7%	22.1%	66.3%	100%
	누적비율	-	11.6%	33.7%	100%	-
종단접속부	발생횟수	89	64	44	61	258
	발생비율	34.5%	24.8%	17.1%	23.6%	100%
	누적비율	-	59.3%	76.4%	100%	-
케이블내부	발생횟수	32	20	38	108	198
	발생비율	16.2%	10.1%	19.2%	54.5%	100%
	누적비율	-	26.3%	45.5%	100%	-

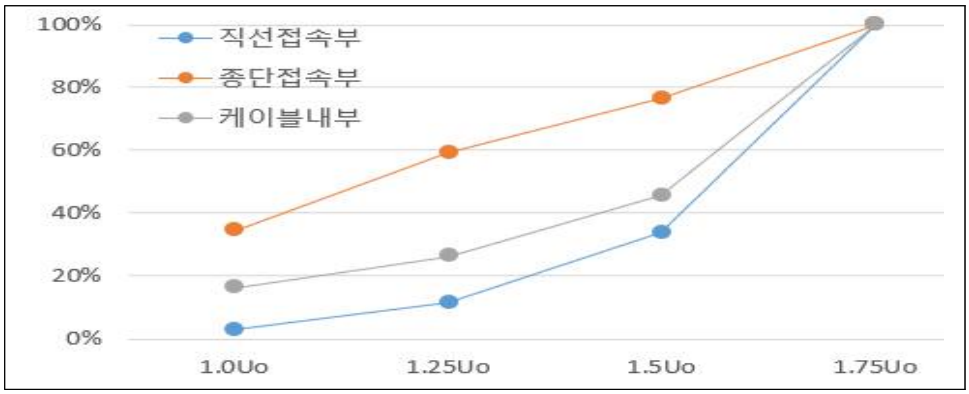


그림 4-15. PD 방전개시전압별 누적비율.

1.0Uo 진단전압에서 종단접속부 PD방전 개시전압 비율이 타 부위보다 발생빈도가 높은 이유는 가공선로와 케이블을 접속하기 위한 종단접속부는 항상 노출된 상태에서 다양한 이물질(염분, 먼지, 습기)이 접속부 표면에 침착되어 낮은 전압에서도 도전성 경로가 형성되는 트래킹에 의한 연면방전과 케이블말단 터미널의 뾰족한 끝에서 발생되는 코로나방전 및 연면방전으로 케이블 내부에서 발생되는 내부(공극)방전보다 낮은 전압에서 측정되기가 용이하기 때문이다.

실험을 통해 부분방전 유형별로 VLF PD 방전량과 진단파형을 비교하기 위해 4개(보이드, 코로나, 표면)의 모의결함 Test셀로 동일방전량별 방전개시전압과 VLF PD 파형을 측정하였다.

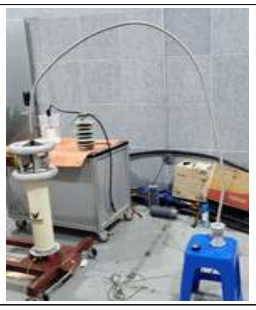
구분		보이드	코로나	표면
방전 개시 전압	10pC	12.6kV	8.3kv	4.2kV
	100pC	17.6kV	13.4kV	5.47kV
측정사진				

그림 4-16. 시료별 방전개시 전압

실험결과 동일방전량을 기준으로 방전개시전압은 보이드 > 코로나 > 표면 방전순으로 측정이 되는 것을 확인 할 수 있었다.

보이드 방전은 케이블내부 또는 접속재와 케이블사이의 공극에서 발생되며, 공극사이에서는 방전을 위해 전자가 충전되기까지 전압이 인가된 후 방전이 일어나기 때문으로 연구되었다[9].

보이드방전	

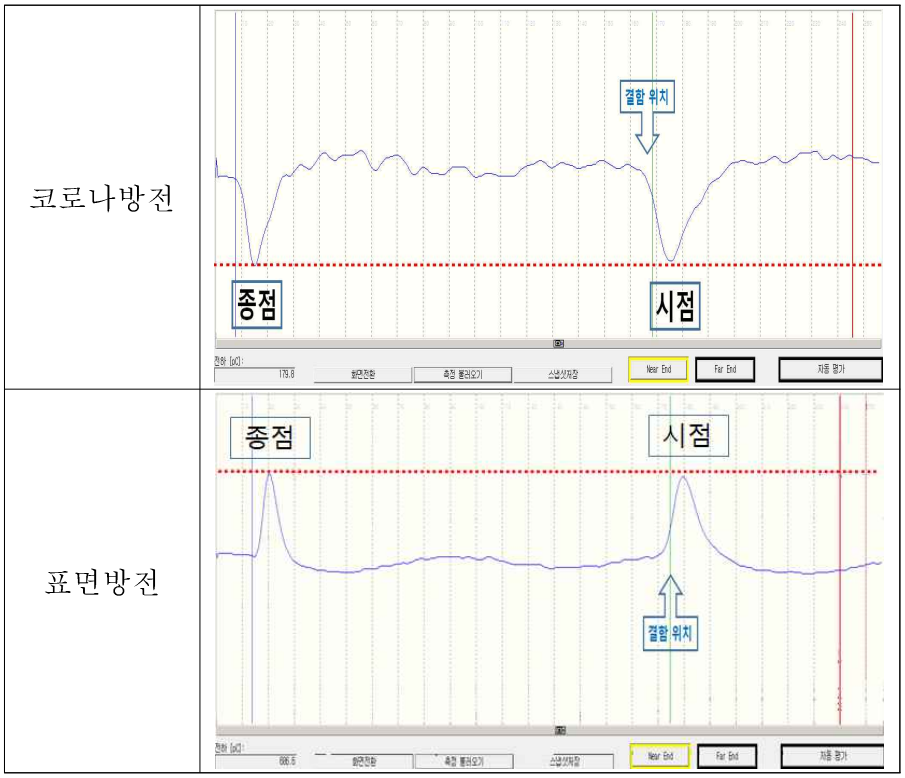


그림 4-17. 시료별 부분방전 VLF PD파형

실험결과 코로나 방전은 다른 방전과 달리 마이너스 방전만 발생되는 것을 확인 할 수 있었다.

해저케이블과 배전용 지중케이블의 구조 및 설치환경에 대한 비교를 통해 VLF PD진단 전압하향이 가능한지에 대해서도 검토를 하였다.

해저케이블의 경우 케이블심선을 둘러산 연피층과 차수층이 수분 침투를 막아주는 구조로 외상 손상이 없다면 수분으로 인한 수트리가 발생되지 않는 구조이나, 배전용 지중케이블의 경우 PVC외피를 사용하여 장기간 침수된 구간에 설치된 곳에서는 케이블외피 및 접속부위로 침투한 수분에 의해 수트리가 다수 발생되고 있으며, 최악의 경우 수트리에서 진전된 전기트리로 인하여 절연파괴로 이어지는 고장이 발생하기도 한다.

해저케이블은 대부분 직선접속재 없이 하나의 구간으로 시공을 하며 운영중 가공전선과 연결을 하기위한 입상부분의 위치변경 등으로 접속부위가 발생되수 있으나, 극히 드물며 배전용 지중케이블의 경우 200~250m 마다 설치된 맨홀, 굴곡이나 높낮이 차이 및 전력공급을 위한 분기개소에 접속점이 필요하며, 이에 따라 접속개소의 수도 함께 늘어난다.

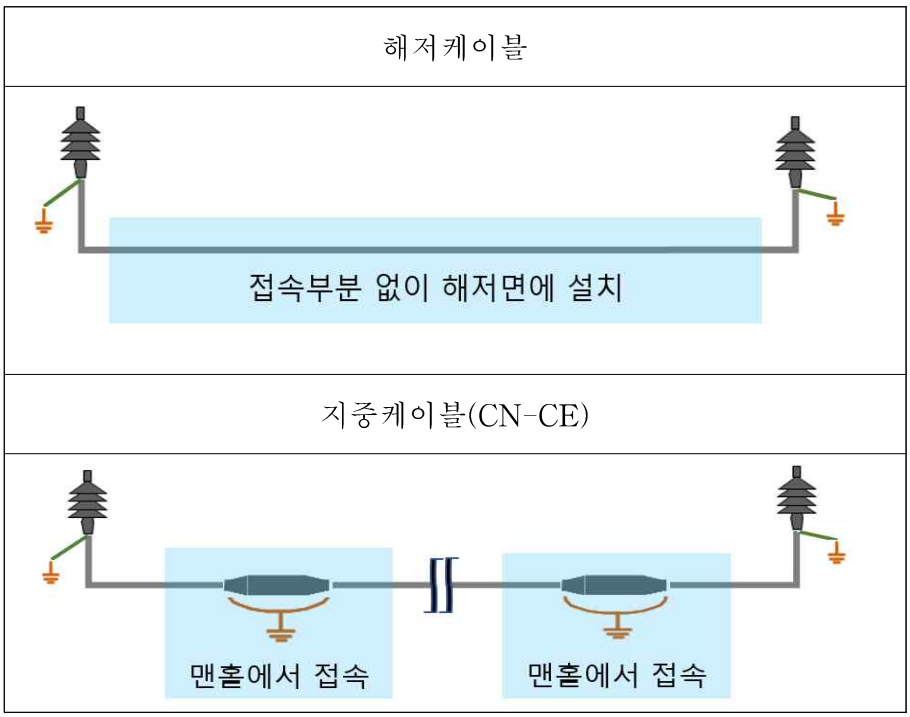


그림 4-18. 케이블 설치방법.

이러한 설비특성으로 해저케이블 VLF PD 측정시 종단접속재에서만 PD가 발생하였다.

표 4-17. 해저케이블 PD 발생 현황.

종단접속부	진단전압별 발생개소 수 및 비율			
	1.0Uo	1.25Uo	1.5Uo	1.75Uo
19개소	9개소 (47.3%)	13개소 (68.4%)	18개소 (94.7%)	19개소 (100%)

또한 부분방전현상은 전압외 주파수의 영향을 받는 것으로도 연구되어 있으며, 주파수가 높아짐에 따라 방전개시전압과 횟수가 증가된다[9].

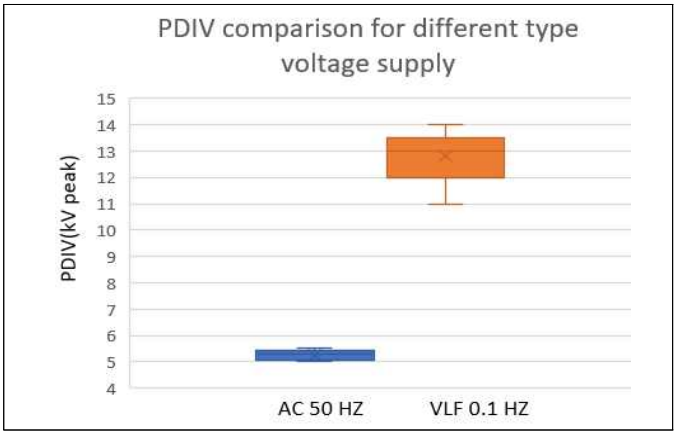


그림 4-19. 주파수에 따른 방전개시전압 비교[12].

VLF PD진단시 종단에서 측정된 방전개시전압이 케이블내부 또는 직선접속재보다 낮게 분포되는 경향을 보았을 때 종단접속만 존재하는 해저케이블 VLF PD진단시 현재 최대 1.75Uo(23.1kV)보다 낮은 전압을 인가하여 진단하여도 유효할 것으로 판단이 되며, VLF 진단 주파수에 따른 방전개시전압의 특성을 감안한다면, 최소 1.0Uo(13.2kV)보다는 높은 전압에서 측정하여야지만 유효한 결과로 활용할 수 있어 1.25Uo인 16.5kV까지 하향이 가능하리라 판단된다.

해저케이블 VLF 진단전압은 TD 1.0Uo(13.2kV), PD 1.25Uo(16.5kV)까지 하향하여 절연체 스트레스를 최소화하며 주기적으로 열화 경향성을 관리하는 방법으로 해저케이블 유지보수 방법에 대한 개선이 필요하다.

표 4-18. 배전용 해저케이블 진단전압(안)

TD	0.5Uo, 1.0Uo
PD	1.0Uo, 1,25Uo

제 5 장 VLF TD진단 분류모델

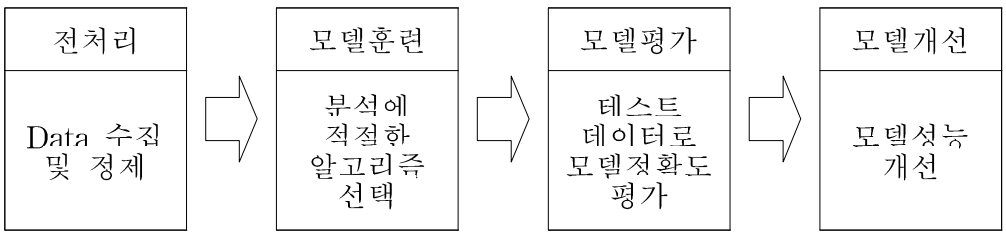
제 1 절 이론적배경

빅데이터를 활용하여 경향성이나 패턴의 변화로 인간의 판단과 유사하게 판단하는 방법들이 연구되었으며, 특히 컴퓨터 데이터베이스의 축적과 함께 머신러닝의 기법을 이용하여 관측된 값을 분류하는 알고리즘도 개발되었다.

머신러닝과 밀접하게 관계된 데이터 마이닝이라는 개념이 있으며 머신러닝은 문제를 해결하고자 컴퓨터에게 데이터의 사용법을 가르치는데 집중하는 반면 데이터 마이닝은 문제를 해결하고자 컴퓨터에게 사람이 사용할 패턴을 찾도록 가르치는 데 집중을 한다.

컴퓨터가 문제를 해결하기 위해 학습하는 과정은 인간과 비슷하며 4단계로 진행된다.

표 5-1. 머신러닝 절차



머신러닝을 위한 학습과정에서 실제 데이터에 대한 머신러닝 분석은 표 (5-1)의 학습과정 중 모델훈련 단계에서 적절한 알고리즘의 선택과 새로운 Data 평가 후 정확도 및 평가모델에 대한 개선작업이 추가된다.

머신러닝으로 데이터분석을 위한 모델훈련의 알고리즘은 분류, 수치예측, 패턴감지, 군집화로 나뉘며 분석 프로젝트에 해당되는 알고리즘을 결정하여 연구모형에 적용되며 지도학습, 비지도학습, 메타학습의 모델로 구분된다.

표 5-2. 머신러닝 알고리즘.

종류	작업종류	알고리즘 종류
지도학습	예측	선형회귀, 회귀트리, 모델트리
	분류	K-최근접, 의사결정트리 등
	겸용	신경망, 서포트 벡터 머신
비지도학습	군집	K-평균 군집화
	패턴감지	연관규칙
메타학습	겸용	배깅, 부스팅, 랜덤 포레스트

제 2 절 TD 판단인자 비교

배전케이블 VLF TD진단 판단기준은 2011년 도입 후 2012년과 2015년에 개정되었다.

표 5-3. VLF TD 판단항목.

연도		판단항목	비 고
①	2011~2012	TD(1.0Uo), DTD(1.5Uo-0.5Uo)	Uo = 13.2kV
②	2012~2015 (2차원판단)	TD(1.0Uo), Stdev(1.0Uo) Skirt-1(1.0Uo), DTD(1.5Uo-0.5Uo)	(TD or △TD) AND (Stdev or Skirt-1)
③	2015~현재 (Index R)	TD(1.5Uo), Skirt(1.5Uo) DTD(1.5Uo-0.5Uo)	3개 인자를 x,y,z 좌표상 정규화 R값

배전용 해저케이블 VLF TD진단 결과 판단시 ②의 기준에 따라 판단을 하며, ③의 기준을 참고하여 최종결정을 하고 있다. 하지만 ③의 기준

도입시 판정을 위한 진단 권장거리를 1㎞로 제한하여 대부분의 구간이 1㎞를 초과하는 해저케이블에는 판단기준으로 활용하기에 적합하지 않아 3장에서 “거리증가에 따른 TD 보정방안”의 보정계수를 산출하였다.

1㎞ 이상 해저케이블 구간에 대해 보정계수를 적용하여도 ②와 ③의 판단기준의 항목이 서로 달라 어느 한쪽의 판단기준에서는 정상이라도 진단 전압 1.0Uo 또는 1.5Uo에서 측정된 TD값이 불량의 영역에 있다면 판단결과가 일치되지 않는 사례가 발생되기도 한다.

비교적 양호한 절연성능을 가진 케이블에 해당되는 Index R 값이 0.2 미만인 진단자료 85,152건 및 불량에는 해당되지 않지만, 열화가 진전된 수준인 Index R값이 0.2 이상 ~ 0.7미만인 진단자료 34,336건을 ②의 판단기준에 의거 요주의, 관심, 불량건으로 분류를 해보았다.

표 5-4. VLF 판단기준 ② (2012~2015년).

판정구분 (와이블분포)	TD (1.0Uo)	△TD (1.5-0.5Uo)	판정구분 (와이블분포)	Stdev (1.0Uo)	Skirt-1 (1.0Uo)
정상(20%)	≤ 1.0	≤ 0.5			
관심(30%)	≤ 2.0	≤ 1.2			
요주의(63%)	≤ 6.0	≤ 6.0	요주의(63%)	≥ 0.1	≥ 0.3
이상(80%)	≤ 10.0	≤ 12.0	이상(80%)	≥ 0.2	≥ 0.6
불량(99%)	≤ 27.0	≤ 60.0	불량(99%)	≥ 0.7	≥ 2.2
임박(100%)	> 27.0	> 60.0			

※ (TD or △TD) AND (Stdev or Skirt-1)의 조건으로 최종판정
- 정상 : 양호 상태로 특별한 조치가 요구되지 안는 케이블
- 관심 : 중기계획에 의한 관심대상 케이블
- 요주의 : 초기 열화단계에 진입한 케이블
- 이상 : 열화 진행상태 케이블로 2년 이내 재측정
- 불량 : 여건에 따라 절연파괴 가능, 1년 이내 재측정
- 임박 : 단기간 내 절연파괴 우려로 즉시 케이블 교체

표 5-5. Index R Vs 판단기준 ② 비교.

Index R	판단기준②						합 계
	정상	관심	요주의	이상	불량	임박	
0.2미만	81,455	3,086	78	334	146	53	85,152
0.2~0.7 미만	2,591	14,394	13,341	2,634	1,260	116	34,336

Index R값이 0.2 미만인 양호한 수준임에도 판단기준 ②에서 요주의 이상 및 0.2~0.7 미만 구간에서도 불량 이상으로 판단되는 자료에 대해서 유효성 검증이 필요하다.

VLF TD진단시 케이블에 수분이 존재하는 경우 측정전압이 증가함에 따라 수분이 증발되며 TD값이 낮아지는 현상이 발생할 때는 접속재 또는 케이블 교체가 필요한 대상이지만, ③의 판단방법인 Index R에서는 마이너스 DTD가 절대치로 계산되어 잔존수명 만큼 현장에서 사용한다.

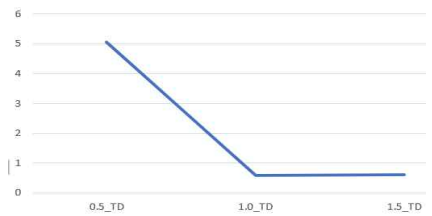
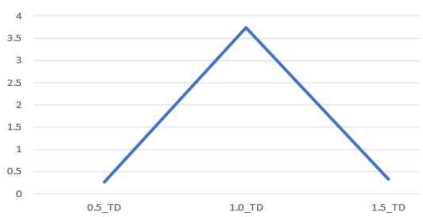
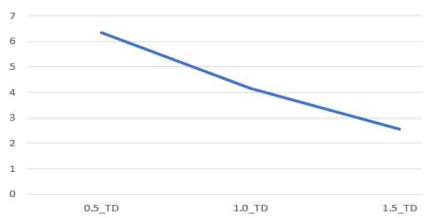
판단기준② "정상", Index R 0.41	판단기준② "임박", Index R 0.02
	
진단전압 인가동안 수분증발 현상	1.0Uo TD 8개 값의 Stdev 높음 착오진단 or 착오기입
판단기준② "요주의", Index R 0.47	판단기준② "관심", Index R 0.27
	
진단전압 인가동안 수분증발 현상	1.5Uo TD 8개 중 1개 착오입력

그림 5-1. Index R 특이값 사례.

제 3 절 해저케이블 머신러닝 분류모델

3.1 연구방법

해저케이블 판정모델 선정은 Index R 기준을 우선적용 하도록 하되 머신러닝 판정 결과가 “양호”, “불량”, “잔존수명”, “수분현상” 으로 분류할 수 있도록 2012년 ~ 2020년간 측정된 약 12만건의 진단자료를 R 프로그램을 이용하여 데이터처리 및 머신러닝을 통해 최적의 분류모델을 선정하고자 한다.

3.2 데이터 정제 및 분석

머신러닝에 사용된 데이터는 2012년부터 직영 및 용역으로 시행한 진단 실적이며, 취합된 원본자료의 변수는 0.5Uo, 1.0Uo, 1.5Uo에서 측정된 TD등 54개, 총 진단건수는 122,401건이며 결측치 및 입력 오류를 제외하고 머신러닝으로 분석하여 최적의 분류모델을 선정하고자 한다.

전압별 TD 진단 8개 중 자리수 착오 입력건 대해서는 변동계수를 활용하여 제외를 하였으며, 변동계수는 관측된 자료와 평균과의 차이에 대한 산포정도이고 그 값이 작을수록 입력된 자료값이 평균에 근접하는 특성을 이용하였다.

$$\text{변동계수}(CV) = \frac{\text{표준편차}}{\text{평균}} \tag{5.1}$$

표 5-6. TD 배수별 변동계수.

TD값	배수	2배	3배	4배	5배	6배	7배	8배	9배	10배
	변동계수	0.29	0.52	0.72	0.88	1.01	1.13	1.23	1.32	1.40

TD 8개 값중 1개가 2배~10배로 착오입력이 되면 TD값의 크기와 관계없이 배수값에 따라 변동계수가 일정함을 이용하여 4배 이상을 제외를 하였고, TD 평균값이 음수로 측정된 진단값은 외부 전류가 유입된 경우로 착오진단으로 분류를 하였으며, 큰 음수값으로 측정되는 경우 VLF진단 중 절연이 파괴되는 사례도 있다.

입력오류 및 착오 진단건에 대한 측정자료를 제외하고 재분류된 121,813건에 대해 “Good”, “IR(잔존수명)”, “Bad”, “Wet”으로 상태를 분류하여 머신러닝을 통해 적용가능한 판단모델을 찾고자 한다.

표 5-7. 머신러닝 분석위한 TD 분류.

Index R 범위	판단기준② 분포	최종상태 판단	자료수량
0.2 미만	정상, 관심	Good	84,434
	요주의, 이상, 불량	IR(잔존수명)	503
0.2 이상 ~ 0.7미만	정상,관심,요주의,이상,불량	IR(잔존수명)	31,837
	정상 ~ 임박 모두포함	Bad	2,117
	정상 ~ 임박 모두포함	Wet	127
0.7 이상	정상 ~ 임박 모두포함	Bad	2,795

※ 최종상태 판정별 해저케이블 조치방안
- Good : 잔존수명 10년 이상 또는 신규케이블과 동일성능
- IR(잔존수명산출) : 잔존수명에 따른 케이블 열화상태 주기진단
- Bad : 절연열화에 따른 케이블 교체검토 및 확정 위한 재진단
- Wet : 접속부위(직선 및 종단) 교체 후 재진단

머신러닝 모델훈련에 적합한 알고리즘을 채택하기 위해 최종적으로 얻고자 하는 목표값이 “Good”, “IR(잔존수명산출)”, “Bad”, “Wet”의 팩터형이며 결과값을 얻기 위해서는 분류 알고리즘인 의사결정트리와 겸용알고리즘인 인공신경망이 적합하며, 두 모델 모두 학습을 위해 표 (5-7)의 방법으로 분류된 자료를 지도학습 후 모델을 평가하였다.

표 5-8. 학습자료 분류결과.

변수명	변수내용	개수
TD	0.5Uo, 1.0Uo, 1.5Uo TD 각 전압별 8개	24개
TD 계산값	평균, 최대최소, 표준편차, 변동계수, 기울기 등	17개

인공신경망을 0.5Uo ~ 1.5Uo 동안 측정된 24개 TD값 및 24개 값의 표준편차, 평균, 기울기 등 수식을 활용하여 가공을 하여야 되는 17개의 값을 R의 “nnet”, “neuralnet”, “rsnns” 3가지 패키지를 활용하여 분석해 본 결과 “nnet”만 결과를 얻을 수 있었으며, “neuralnet”은 정규화된 변수로 분석을 하였으나 다량의 변수 및 자료를 처리하는대 “nnet”에 비해 상당히 늦어 분석도구로 채택을 하지 않았으며, “rsnns”는 연속형자료 분석에 적합하여 최종적으로 “nnet” 패키지를 활용하여 분석을 하였다.

머신러닝 모델링 방법은 ① 자료학습 → ② 모델예측 → ③ 모델평가 ④ 성능개선 → ⑤ 모델예측 → ⑥ 해저케이블 판단 및 평가순으로 작업을 하였으며, 성능개선은 은닉층의 수량, 활성함수의 값, 계산횟수를 조정하며 최적의 분류모델을 찾기 위한 작업을 반복하였다.

첫 번째로 VLF TD 24개의 변수를 활용하여 은닉층, 활성함수, 계산횟수를 조정하며 인공신경망 활용한 머신러닝을 수행하였다.

표 5-9. 인공신경망 TD 분석결과.

은닉층	활성함수 및 계산횟수	분류정확도			
		학습,평가자료		해저케이블	
		100회	200회	100회	200회
1	1exp-1	0.007	0.936	0.057	0.899
3	3exp-3	0.948	0.955	0.834	0.884
6	3exp-6	0.962	0.965	0.906	0.863
6	3exp-7	0.959	0.968	0.863	0.928
9	**3exp-8**	0.963	**0.969**	0.892	**0.956**
9	3exp-9	0.964	0.968	0.935	0.942

인공신경망 분석결과 은닉층의 개수, 활성함수 크기, 계산횟수가 높아질수록 분류의 정확도는 높아지며, 은닉층 6개, 활성함수 3exp-7, 계산횟수가 200회부터 해저케이블의 분류 정확도가 90% 넘어가며, 은닉층이 9, 활성함수 3exp-8, 계산횟수 200회 일때가 해저케이블의 분류정확도가 95.6%로 가장 높고 수작업 판단 결과와도 일치율이 높았다.

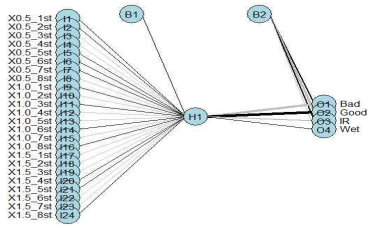
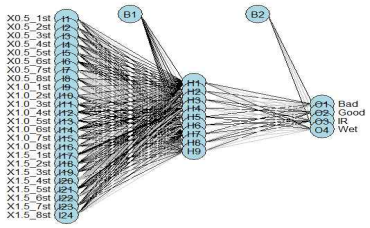
은닉층 1개	은닉층 9개
	

그림 5-2. R nnet 분석모델.

표 5-10. 인공신경망 선정모델 해저케이블 적용결과.

은닉층 9, 활성함수 3e-8, 횟수 100					은닉층 9, 활성함수 3e-8, 횟수 200				
	Bad	Good	IR	Wet		Bad	Good	IR	Wet
Bad	1,359	0	46	2	Bad	1,390	1	46	2
Good	2	24,823	653	2	Good	0	24,922	585	0
IR	92	428	8,980	11	IR	74	329	9,058	2
Wet	22	1	24	14	Wet	11	0	14	25
학습 Vs 평가모델					학습 Vs 평가모델				
	Bad	Good	IR	Wet		Bad	Good	IR	Wet
Bad	10	0	1	5	Bad	14	0	1	1
Good	0	96	1	0	Good	0	94	3	0
IR	1	0	15	6	IR	0	0	22	0
Wet	1	0	0	3	Wet	0	0	1	3
해저케이블 적용결과(정확도 0.892)					해저케이블 적용결과(정확도 0.956)				

24개의 TD값으로 인공신경망 모델을 활용하여 해저케이블 진단결과에 대한 분류결과 총 139건 중 Bad인 값이 IR, Wet으로 각 1건, Good이 IR로 3건, Wet이 IR로 1건으로 95.6% 분류정확도를 가진다.

표 5-11. 수작업판단 Vs 인공신경망 분류결과 비교.

구간정보	05_TD	10_TD	15_TD	indexR	구기준	판단 결과	모델 예측
마삭도#2A	7.891	5.381	5.331	0.557	불량	Bad	Bad
마삭도#2A	0.486	0.504	0.511	0.141	양호	Good	Good
흑일도B	5.763	4.313	4.150	0.474	요주의	Wet	Wet
마삭도#2B	4.853	2.940	2.249	0.436	이상	Wet	Wet
마삭도#2B	0.480	0.515	0.488	0.084	양호	Good	Good
흑일도C	7.338	5.250	7.613	0.661	불량	Bad	Bad
마삭도#2C	3.566	3.131	2.756	0.451	이상	IR	IR
마삭도#2C	0.484	0.511	0.506	0.052	양호	Good	Good
흑일도N	4.025	4.225	3.513	0.426	이상	IR	IR
마삭도#2N	1.225	1.284	1.215	0.173	관심	**Good**	**IR**
마삭도#2N	0.481	0.518	0.514	0.086	양호	Good	Good
신지도A	14.12	11.88	15.80	0.688	임박	Bad	Bad
신지도A	1.635	1.595	1.888	0.281	불량	IR	IR
신지도A	0.208	0.206	0.195	0.043	정상	Good	Good
신지도B	26.700	18.438	22.360	0.786	불량	Bad	Bad
신지도B	2.291	2.021	2.050	0.277	요주의	IR	IR
신지도B	0.204	0.230	0.194	0.000	정상	Good	Good
신지도C	25.829	17.838	19.860	0.795	불량	Bad	Bad
신지도C	0.981	0.896	0.908	0.171	관심	Good	Good
신지도C	0.225	0.250	0.193	0.000	정상	Good	Good
신지도N	23.143	15.863	17.300	0.770	불량	Bad	Bad
신지도N	0.723	0.676	0.779	0.138	관심	**Good**	**IR**
신지도N	0.214	0.240	0.215	0.209	정상	Good	Good

두 번째로 VLF TD 24개값을 조합하여 만든 측정전압별 평균, 최대 최소, 표준편차, 변동계수, 기울기 등 가공된 17개의 변수(표 5-8)를 활용 첫 번째와 동일한 방법으로 은닉층, 활성함수, 계산횟수를 조정하며 인공신경망 활용한 머신러닝을 수행하였다.

표 5-12. 가공된 TD 분석결과

은닉층	활성함수 및 계산횟수	분류정확도			
		학습,평가자료		해저케이블	
		100회	200회	100회	200회
1	1exp-1	0.958	0.958	0.920	0.920
3	3exp-3	0.957	0.976	0.877	0.892
6	3exp-6	0.976	0.977	0.812	0.906
6	3exp-7	0.978	0.977	0.848	0.863
9	**3exp-7**	**0.979**	0.979	**0.913**	0.870
9	3exp-9	0.977	0.978	0.856	0.820

가공된 TD값 17개의 학습 및 평가자료에 대한 분류 결과는 모든 부분에서 95% 이상으로 TD 24개의 값보다 높은 분류 정확도를 보이고 있으며, 은닉층 9개, 활성함수 3exp-7, 계산횟수가 100회 일 때 해저케이블에 대한 가장 높은 분류정확도 확인 할 수 있었다.

표 5-13. TD 24개 VS 17개 분류결과 비교.

TD 24개 값(측정 데이터)	TD 17개 값(평균, 편차 등)
은닉층 9, 활성함수 3e-8, 횟수 200	은닉층 9, 활성함수 3e-8, 횟수 100

	Bad	Good	IR	Wet
Bad	1,390	1	46	2
Good	0	24,922	585	0
IR	74	329	9,058	2
Wet	11	0	14	25

	Bad	Good	IR	Wet
Bad	1,425	0	41	1
Good	0	25,083	391	0
IR	44	265	9,188	2
Wet	4	0	10	36

학습 Vs 평가모델	학습 Vs 평가모델

	Bad	Good	IR	Wet
Bad	14	0	1	1
Good	0	94	3	0
IR	0	0	22	0
Wet	0	0	1	3

해저케이블 적용결과(정확도 0.956)

	Bad	Good	IR	Wet
Bad	10	0	1	5
Good	0	93	4	0
IR	0	0	20	2
Wet	0	0	0	4

해저케이블 적용결과(정확도 0.913)

의사결정트리 알고리즘을 활용하여 분석하기 위해 인공신경망 분석에 사용된 것과 동일한 데이터를 R프로그램의 의사결정알고리즘인 “rpart”, “C50”, 조건부트리 패키지를 활용하여 분석을 하였다.

표 5-14. TD 24개 의사결정트리 분석결과.

<table>
<tr><th rowspan="2">분류
패키지</th><th colspan="2">분 류 정 확 도</th></tr>
<tr><th>학습 및 평가</th><th>해저케이블</th></tr>
<tr><td rowspan="6">rpart</td><td>0.938</td><td>0.928</td></tr>
<tr><td>
<table>
<tr><th></th><th>Bad</th><th>Good</th><th>IR</th><th>Wet</th></tr>
<tr><td>Bad</td><td>1,371</td><td>0</td><td>87</td><td>1</td></tr>
<tr><td>Good</td><td>12</td><td>24,648</td><td>1,384</td><td>13</td></tr>
<tr><td>IR</td><td>96</td><td>625</td><td>8,242</td><td>15</td></tr>
<tr><td>Wet</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr>
</table>
</td><td>
<table>
<tr><th></th><th>Bad</th><th>Good</th><th>IR</th><th>Wet</th></tr>
<tr><td>Bad</td><td>11</td><td>0</td><td>5</td><td>0</td></tr>
<tr><td>Good</td><td>0</td><td>97</td><td>0</td><td>0</td></tr>
<tr><td>IR</td><td>0</td><td>1</td><td>21</td><td>0</td></tr>
<tr><td>Wet</td><td>0</td><td>0</td><td>4</td><td>0</td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td rowspan="6">조건부
트리</td><td>0.961</td><td>0.928</td></tr>
<tr><td>
<table>
<tr><th></th><th>Bad</th><th>Good</th><th>IR</th><th>Wet</th></tr>
<tr><td>Bad</td><td>1,407</td><td>0</td><td>66</td><td>1</td></tr>
<tr><td>Good</td><td>0</td><td>24,825</td><td>802</td><td>1</td></tr>
<tr><td>IR</td><td>62</td><td>448</td><td>8,838</td><td>2</td></tr>
<tr><td>Wet</td><td>10</td><td>0</td><td>7</td><td>25</td></tr>
</table>
</td><td>
<table>
<tr><th></th><th>Bad</th><th>Good</th><th>IR</th><th>Wet</th></tr>
<tr><td>Bad</td><td>12</td><td>0</td><td>1</td><td>3</td></tr>
<tr><td>Good</td><td>0</td><td>96</td><td>1</td><td>0</td></tr>
<tr><td>IR</td><td>0</td><td>0</td><td>18</td><td>4</td></tr>
<tr><td>Wet</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>3</td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td rowspan="6">C50</td><td>0.974</td><td>0.928</td></tr>
<tr><td>
<table>
<tr><th></th><th>Bad</th><th>Good</th><th>IR</th><th>Wet</th></tr>
<tr><td>Bad</td><td>1,411</td><td>0</td><td>14</td><td>0</td></tr>
<tr><td>Good</td><td>0</td><td>25,009</td><td>572</td><td>1</td></tr>
<tr><td>IR</td><td>62</td><td>264</td><td>9,124</td><td>1</td></tr>
<tr><td>Wet</td><td>6</td><td>0</td><td>3</td><td>27</td></tr>
</table>
</td><td>
<table>
<tr><th></th><th>Bad</th><th>Good</th><th>IR</th><th>Wet</th></tr>
<tr><td>Bad</td><td>12</td><td>0</td><td>1</td><td>3</td></tr>
<tr><td>Good</td><td>0</td><td>95</td><td>2</td><td>0</td></tr>
<tr><td>IR</td><td>0</td><td>0</td><td>19</td><td>3</td></tr>
<tr><td>Wet</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>3</td></tr>
</table>
</td></tr>
</table>

표5-15. TD 17개 의사결정트리 분석결과.

분류 패키지	분 류 정 확 도									
	학습 및 평가					해저케이블				
rpart	0.954					0.928				
		Bad	Good	IR	Wet		Bad	Good	IR	Wet
	Bad	1,361	0	93	1	Bad	10	0	6	0
	Good	0	24,708	768	0	Good	0	97	0	0
	IR	112	640	8,769	38	IR	0	0	22	0
	Wet	0	0	0	0	Wet	0	0	4	0
조건부 트리	0.976					0.920				
		Bad	Good	IR	Wet		Bad	Good	IR	Wet
	Bad	1,450	0	58	4	Bad	13	0	0	3
	Good	0	25,023	430	0	Good	0	93	4	0
	IR	19	325	9,135	0	IR	1	0	19	2
	Wet	4	0	7	35	Wet	1	0	0	3
C50	0.980					0.942				
		Bad	Good	IR	Wet		Bad	Good	IR	Wet
	Bad	1,459	0	11	1	Bad	13	0	0	3
	Good	0	25,052	395	0	Good	0	94	3	0
	IR	14	296	9,219	0	IR	0	0	20	2
	Wet	0	0	5	38	Wet	0	0	0	4

의사결정 패키지를 활용하여 24개 TD값과 조합한 17개 값에 대한 분석결과 rpart → 조건부트리 → C50 패키지 순으로 분류의 정확도가 높았으며, 해저케이블 분류시 rpart의 경우 Wet 상태에 대해 분류를 하지 못하였고, C50의 경우는 인공신경망에서 최적의 조건인 분류정확도 95.6%와 조금 낮은 94.2%의 정확도 결과를 얻을 수 있었다.

표 5-16. 수작업판단 Vs C50 모델분류결과 비교.

구간정보	05_TD	10_TD	15_TD	indexR	구기준	판단 결과	모델 예측
백일도A	0.200	0.200	0.000	0.075	정상	Good	Good
백일도B	0.210	0.204	0.000	0.081	정상	Good	Good
백일도C	0.210	0.220	0.000	0.081	정상	Good	Good
백일도4	0.210	0.214	0.000	0.081	정상	Good	Good
흑일도A	9.325	6.663	5.900	0.552	불량	Bad	Bad
마삭도#2A	7.891	5.381	5.331	0.557	불량	**Bad**	**Wet**
마삭도#2A	0.486	0.504	0.511	0.141	양호	Good	Good
흑일도B	5.763	4.313	4.150	0.474	요주의	Wet	Wet
마삭도#2B	4.853	2.940	2.249	0.436	이상	Wet	Wet
마삭도#2B	0.480	0.515	0.488	0.084	양호	Good	Good
흑일도C	7.338	5.250	7.613	0.661	불량	Bad	Bad
마삭도#2C	3.566	3.131	2.756	0.451	이상	IR	IR
마삭도#2C	0.484	0.511	0.506	0.052	양호	Good	Good
흑일도N	4.025	4.225	3.513	0.426	이상	IR	IR
마삭도#2N	1.225	1.284	1.215	0.173	관심	Good	Good
마삭도#2N	0.481	0.518	0.514	0.086	양호	Good	Good
신지도A	14.12	11.88	15.80	0.688	임박	Bad	Bad
신지도A	1.635	1.595	1.888	0.281	불량	IR	IR
신지도A	0.208	0.206	0.195	0.043	정상	Good	Good
신지도B	26.700	18.438	22.360	0.786	불량	Bad	Bad
신지도B	2.291	2.021	2.050	0.277	요주의	IR	IR
신지도B	0.204	0.230	0.194	0.000	정상	Good	Good
신지도C	25.829	17.838	19.860	0.795	불량	Bad	Bad
신지도C	0.981	0.896	0.908	0.171	관심	**Good**	**IR**
신지도C	0.225	0.250	0.193	0.000	정상	Good	Good
신지도N	23.143	15.863	17.300	0.770	불량	Bad	Bad
신지도N	0.723	0.676	0.779	0.138	관심	**Good**	**IR**

인공신경망 및 의사결정트리를 활용한 머신러닝결과 인공신경망에서는 가공되지 않은 24개의 TD 값으로 nnet 패키지를 활용 은닉층 9개, 활성함수 3exp-8, 계산횟수 200회 및 의사결정트리에서는 가공된 17개의 TD 값으로 C50 패키지로 분류하였을 때 높은 정확도를 얻을 수 있었다.

표 5-17. 수작업판단 Vs 머신러닝 분류결과 비교

구 분	Good	Bad	IR	Wet	합 계
① 수작업분류	97	16	22	4	139
② 인공신경망	94	14	27	4	139
③ 의사결정트리	94	13	23	9	139

※ 최종상태 판정별 해저케이블 조치방안
- Good : 잔존수명 10년 이상 또는 신규케이블과 동일성능
- IR(잔존수명산출) : 잔존수명에 따른 케이블 열화상태 주기진단
- Bad : 절연열화에 따른 케이블 교체검토 및 확정 위한 재진단
- Wet : 접속부위(직선 및 종단) 교체 후 재진단

수작업판단과 머신러닝 분류값이 상이한 자료만 발취하여 예측모델의 결과값이 최종판단에 활용가능한지 여부에 대해 알아보고자 한다.

표 5-18. 판단결과 상이구간 비교.

구간정보	TD(Uo=13.2kV)			indexR	구기준	판단결과(표5-17)		
	0.5Uo	1.0Uo	1.5Uo			①	②	③
마삭도#2A	7.891	5.381	5.331	0.557	불량	Bad	Bad	Wet
마삭도#2B	4.853	2.940	2.249	0.436	이상	Wet	IR	Wet
신지도C	0.981	0.896	0.908	0.171	관심	Good	IR	IR
신지도N	0.723	0.676	0.779	0.138	관심	Good	Good	IR
능산도B	6.663	5.488	5.238	0.499	요주의	Bad	Wet	Wet
능산도C	6.363	5.038	4.838	0.507	요주의	Bad	IR	Wet
상수치#1C	0.981	0.896	0.908	0.171	관심	Good	IR	IR
자라도#2B	0.595	0.725	0.834	0.164	불량	Good	IR	Good

판단결과값이 상이한 구간 중 송전용 OF 케이블을 배전용으로 활용하는 당사도 및 상태가 양호한 구간에 대해서는 생략하고 마삭도, 능산도 구간에 대해 분류모델의 결과를 상세 분석하였다.

표 5-19. 능산도구간 세부분석.

<table>
<tr><td>구간명</td><td>능산도(1979년 스미토모 제작, 긍장 1.6km, 이중계장, 비매설)</td></tr>
<tr><td>VLF
측정값
(18,20년)</td><td>
<table>
<tr><td rowspan="2">18년</td><td colspan="3">TD</td><td rowspan="2">R</td></tr>
<tr><td>0.5</td><td>1.0</td><td>1.5</td></tr>
<tr><td>A상</td><td>8.98</td><td>9.86</td><td>8.33</td><td>0.566</td></tr>
<tr><td>B상</td><td>6.63</td><td>5.48</td><td>5.23</td><td>0.499</td></tr>
<tr><td>C상</td><td>6.36</td><td>5.03</td><td>4.83</td><td>0.507</td></tr>
<tr><td>N상</td><td>4.16</td><td>3.77</td><td>3.92</td><td>0.338</td></tr>
</table>
<table>
<tr><td rowspan="2">20년</td><td colspan="3">TD</td><td rowspan="2">R</td></tr>
<tr><td>0.5</td><td>1.0</td><td>1.5</td></tr>
<tr><td>A상</td><td>18.9</td><td>13.8</td><td>10.8</td><td>0.737</td></tr>
<tr><td>B상</td><td>24.1</td><td>17.9</td><td>12.3</td><td>0.777</td></tr>
<tr><td>C상</td><td>7.16</td><td>5.02</td><td>4.06</td><td>0.522</td></tr>
<tr><td>N상</td><td>5.84</td><td>3.71</td><td>2.90</td><td>0.495</td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td>분석
결과</td><td>
'20년 진단시 전회 진단보다 A, B상에서 TD값이 상당하게 높게 측정이 되었으며, 수분에 의한 영향인 TD값이 전압 상승에 따라 낮아지는 경향이 뚜렷하며 진단이후 고장이 발생되어 사용중지됨 케이블상태 불량인 “Wet” 또는 “Bad”로 판단되어야 정확도가 높음
<table>
<tr><td colspan="8">'18년 판단결과(표5-17)</td></tr>
<tr><td>구분</td><td>①</td><td>②</td><td>③</td><td>구분</td><td>①</td><td>②</td><td>③</td></tr>
<tr><td>A상</td><td>Bad</td><td>Bad</td><td>Bad</td><td>C상</td><td>Bad</td><td>IR</td><td>Wet</td></tr>
<tr><td>B상</td><td>Bad</td><td>Wet</td><td>Wet</td><td>N상</td><td>IR</td><td>IR</td><td>IR</td></tr>
</table>
<table>
<tr><td colspan="8">'20년 판단결과(표5-17)</td></tr>
<tr><td>구분</td><td>①</td><td>②</td><td>③</td><td>구분</td><td>①</td><td>②</td><td>③</td></tr>
<tr><td>A상</td><td>Bad</td><td>Bad</td><td>Bad</td><td>C상</td><td>Wet</td><td>Wet</td><td>Wet</td></tr>
<tr><td>B상</td><td>Bad</td><td>Bad</td><td>Bad</td><td>N상</td><td>Wet</td><td>Wet</td><td>Wet</td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td>적용
가능
여부</td><td>'18년 ②의 C상에서 IR로 분류된 인공신경망보다 의사결정트리 분류결과가 보다 정확하며, B상의 경우 ②, ③ 모델이 수분에 의한 영향을 보다 잘 반영하였으며 '18년 및 '20년 분류결과 ②, ③번 모두 적용이 가능</td></tr>
</table>

표 5-20. 마삭도구간 세부분석.

<table>
<tr><td>구간명</td><td>마삭도(1997년 스미토모 제작, 긍장 3.7km, 단일계장, 비매설)</td></tr>
<tr><td>VLF
측정값
(20,21년)</td><td>
<table>
<tr><td rowspan="2">20년</td><td colspan="3">TD</td><td rowspan="2">R</td></tr>
<tr><td>0.5</td><td>1.0</td><td>1.5</td></tr>
<tr><td>A상</td><td>7.89</td><td>5.38</td><td>5.32</td><td>0.557</td></tr>
<tr><td>B상</td><td>4.85</td><td>2.94</td><td>2.24</td><td>0.436</td></tr>
<tr><td>C상</td><td>3.56</td><td>3.14</td><td>2.75</td><td>0.451</td></tr>
<tr><td>N상</td><td>1.27</td><td>1.28</td><td>1.21</td><td>0.173</td></tr>
</table>
<table>
<tr><td rowspan="2">21년</td><td colspan="3">TD</td><td rowspan="2">R</td></tr>
<tr><td>0.5</td><td>1.0</td><td>1.5</td></tr>
<tr><td>A상</td><td>0.48</td><td>0.50</td><td>0.51</td><td>0.141</td></tr>
<tr><td>B상</td><td>0.48</td><td>0.51</td><td>0.48</td><td>0.084</td></tr>
<tr><td>C상</td><td>0.48</td><td>0.51</td><td>0.50</td><td>0.052</td></tr>
<tr><td>N상</td><td>0.48</td><td>0.51</td><td>0.51</td><td>0.086</td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td>분석
결과</td><td>’20년 진단시 TD값이 전압에 상승에 따라 낮아지며, TD값이 높게 측정되어 수분에 의한 불량으로 판단하였으며, 케이블 종단 접속재 교체 후 ’21년 진단시 TD값이 아주 낮게 측정되어 수분에 의한 케이블상태 불량인 “Wet” 또는 “Bad”로 판단되어야 정확도가 높음
<table>
<tr><td colspan="8">’21년 판단결과 표 (5-17)</td></tr>
<tr><td>구분</td><td>①</td><td>②</td><td>③</td><td>구분</td><td>①</td><td>②</td><td>③</td></tr>
<tr><td>A상</td><td>Bad</td><td>Bad</td><td>Wet</td><td>C상</td><td>IR</td><td>IR</td><td>IR</td></tr>
<tr><td>B상</td><td>Wet</td><td>IR</td><td>Wet</td><td>N상</td><td>Good</td><td>Good</td><td>Good</td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td>적용
가능
여부</td><td>②의 B상에서 IR로 분류된 인공신경망보다는 의사결정트리의 분류결과가 보다 정확하며, A,B,C,N상의 전체 분류결과 현장에서는 1개의 상만 교체하는 공사를 하지 않는 상황을 고려한다면 ②, ③번 분류모델 적용이 가능</td></tr>
</table>

인공신경망 및 의사결정트리 모두 해저케이블 상태판정 분류모델로 활용가능하며 특히 전압상승에 따른 TD값 감소는 분류 기준이 없었으나 머신러닝 기법으로 수분에 의한 열화판단도 가능하여 보다 개선할 수 있으며 본 연구에서의 분류 항목 중 IR은 Index R 기법을 적용하여 잔존수명 계산하여야 되지만 향후 잔존수명 예측가능하도록 후속 연구도 필요하다.

제 6 장 결 론

제 1 절 해저케이블 최초진단시기 선정

전력케이블 제조기술 및 진단기술의 발전으로 절연체에서 기인한 고장은 점차 줄어들고 있으며, 이러한 이유로 최초 진단시기를 조정하였다.

표 6-1. VLF 최초진단 시점

2012년 ~ 2018년	2019년 ~ 2021년	2021년 4월 ~
설치후 13년 경과	설치후 15년 경과	설치후 18년 경과

해저케이블의 경우 설치 후 10년이 되는 시기에 최초로 VLF진단을 하도록 진단기준을 운영하고 있으나 케이블 절연체 열화에 의한 고장실적 수명통계결과 평균수명이 2008년~2012년 약 15.6년, 2013년~2021년 약 20.3년으로 증가되었으며, 해저케이블의 경우 통계수명은 약 43.6년으로 배전용 지중케이블보다 수명이 길며, 케이블심선을 둘러산 연피층과 차수층이 수분 침투를 막아주는 구조로 외상 손상이 없다면 수분으로 인한 수트리가 발생되지않는 구조이다.

따라서 일반배전케이블 보다 수트리 발생확률이 현저히 떨어지는 해저케이블의 경우 최초 진단시점을 배전용 지중케이블과 동일하게 조정할 필요가 있다.

표 6-2. 배전용 해저케이블 최초진단시기.

변경전	변경후
설치후 10년 경과	설치후 18년 경과

제 2 절 VLF TD진단 거리보정 방안

VLF장비의 진단거리는 케이블 긍장에 비례한 정전용량과 진단전압별로 출력가능한 장비의 성능에 따라 결정되지만, 2015년 판단기준 개정시 TD진단 권장거리를 1.0㎞, 최대 1.5㎞ 이내로 제한하여 최소 1㎞ 이상인 해저케이블에 적용하기 곤란하여 거리증가에 따른 TD감소를 보정을 통해 판단방법 일원화가 필요하다.

2012년~2020년간 측정된 약 12만건의 진단자료의 거리구간별 통계 및 와이블모수를 활용 1㎞이상 구간에 대한 보정계수를 산출하였다.

표 6-3. TD 보정계수.

거리구간별 TD 보정계수	보정값		
	0.5Uo	1.0Uo	1.5Uo
1~2㎞ 이하	1.015	1.023	1.034
3㎞ 이하	1.029	1.045	1.068
4㎞ 이하	1.044	1.067	1.101
5㎞ 이하	1.058	1.089	1.135
6㎞ 이하	1.072	1.111	1.169
7㎞ 이하	1.087	1.133	1.202
8㎞ 이하	1.101	1.155	1.236
9㎞ 이하	1.115	1.177	1.269
10㎞ 이하	1.130	1.199	1.303
11㎞ 이하	1.144	1.221	1.337

거리증가에 따른 TD보정과 함께 DTD 보정계수를 산출하였으며, TD 보정후 DTD에 1.114배값을 최종적으로 적용하여 Index R 판단기준 적용시 케이블진단주기를 2년~5년 연장시킬 수 있다.

표 6-4. 배전용 해저케이블 진단주기(안)

구 분	진 단 주 기
차기진단	Index R 잔존수명에 따름(최대 10년 주기)

제 3 절 VLF 진단전압 하향 방안

배전용 지중케이블의 경우 VLF진단중 절연파괴가 발생되기도 하지만 해저케이블에서는 진단으로 절연파괴가 되는것은 방지하기위해 진단전압을 낮추어 절연체에 가해지는 스트레스를 완화할 필요가 있다.

VLF진단 데이터 94,496개의 와이블분포 및 상관분석을 통해 0.5Uo, 1.0Uo에서 측정된 TD로 1.5Uo 예측계수표를 도출하였다.

표 6-5. 1.5Uo TD 예측 계수.

구간	Stdev(8개 측정값의 표준편차)				1.5Uo TD예측 계수			
	0.5Uo	1.0Uo						
	최소	최소	중앙	평균	①	②	③	④
1	0.00031	0.00031	0.01	0.0209	1	1.2737	1.5475	2.2791
2	0.00031	0.00031	0.0168	0.0387	1	1.1921	1.3842	1.8733
3	0.00031	0.00031	0.0217	0.0519	1	1.1581	1.3161	1.5637
4	0.00031	0.00031	0.028	0.0676	1	1.1445	1.2890	1.6160
5	0.00031	0.0016	0.0341	0.0701	1	1.1312	1.2624	1.6545
6	0.00031	0.0029	0.0402	0.0753	1	1.1251	1.2503	1.4208
7	0.00031	0.0033	0.0453	0.0797	1	1.0969	1.1937	1.3378
8	0.00031	0.0056	0.0463	0.0896	1	1.0826	1.1652	1.2745
9	0.00031	0.006	0.0556	0.0917	1	1.0969	1.1938	1.3986
10	0.00031	0.0043	0.0502	0.0911	1	1.0883	1.1765	1.2770
20	0.00031	0.0003	0.0668	0.1231	1	1.0831	1.1662	1.3028
30	0.00031	0.0043	0.0969	0.1659	1	1.0659	1.1317	1.1983

① 조건 : x ≤ Stdev0.5Uc최소 and x ≤ Stdev1.0Uo최소 and x 〈 TD 1.0Uo/0.5Uc중앙
② 조건 : x ≤ Stdev1.0Uo중앙, ③ 조건 : x ≤ Stdev1.0Uo평균
④ 조건 : x 〈 Stdev1.0Uo 0.2
⑤ 조건 : x 〉 Stdev1.0Uo 0.2 0.084exp(2.5753×Stdev 1.0Uo)×100-8.61

해저케이블 1.5UoTD 예측값은 ±10%, ±20% 오차내 예측률이 75.76%, 82.83%로 약 70 ~ 80% 범위내에서 예측 가능하며 1.0Uo에서 측정된 TD 값으로 진단전압 증가에 따른 경향성을 충분히 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

VLF PD진단은 최대 23.1kV 까지 인가하여 진단을 하게 되며 케이블에 가장 많은 스트레스를 주게된다.

해저케이블은 배전용 지중케이블과 달린 경간중간에 접속점이 없이 시작과 종점접속재와 가공선로가 접속되는 방식으로 시공이 되어있으며 종점의 접속재에서 발생되는 PD전압은 케이블의 다른 부위 보다 낮은 전압에서 발생되는 것을 통계 및 실험결과로 알 수 있었다.

또한 해저케이블의 경우 종단접속재에서 부분방전 진단사례만 있으며 비교적 낮은 전압에서 측정되며 이는 코로나 또는 표면방전으로 판단된다.

표 6-6. 해저케이블 PD 발생 현황.

종단접속부	진단전압별 발생개소 수 및 비율			
	1.0Uo	1.25Uo	1.5Uo	1.75Uo
19개소	9개소 (47.3%)	13개소 (68.4%)	18개소 (94.7%)	19개소 (100%)

해저케이블 PD진단시 최대 1.75Uo(23.1kV)보다 낮은 전압을 인가하여 진단하여도 유효할 것으로 판단되며, VLF진단 주파수의 방전개시전압 특성을 감안 최소 1.0Uo(13.2kV)보다는 높은 전압에서 측정을 하여야 유효한 부분방전 발생여부를 측정할 수 있다.

표 6-7. 배전용 해저케이블 진단전압(안)

TD	0.5Uo, 1.0Uo
PD	1.0Uo, 1,25Uo

제 4 절 VLF TD진단 분류모델

해저케이블 판정모델 선정은 Index R 기준을 우선적용 하도록 하되 결과가 “Good”, “IR(잔존수명)”, “Bad”, “Wet”으로 분류할 수 있도록 약 12만건의 진단자료를 머신러닝으로 분석하였다.

진단자 경험에 의해 판단되는 수분침투에 의한 TD값 변화를 분류 가능토록 하였으며 이는 해저케이블 구조상 완벽한 방수로 외상이 없다면 수분으로 인한 진단결과는 중요하게 다루어야 되는 부분이기도 하다.

따라서 해저케이블 머신러닝에는 “Bad” 조건에 해당되는 “Wet”이라는 항목을 추가하였으며 실제 선로의 사례에서도 종단부분 접속재의 수분에 의한 진단결과 분석 후 접속재 교체하고 재 진단시 TD값이 정상상태로 회복되는 사례도 있었다.

표 6-8. 해저케이블 분류결과.

구 분	Good	Bad	IR	Wet	합 계
① 수작업분류	97	16	22	4	139
② 인공신경망	94	14	27	4	139
③ 의사결정트리	94	13	23	9	139

※ 최종상태 판정별 해저케이블 조치방안
- Good : 잔존수명 10년 이상 또는 신규케이블과 동일성능
- IR(잔존수명산출) : 잔존수명에 따른 케이블 열화상태 주기진단
- Bad : 절연열화에 따른 케이블 교체검토 및 확정 위한 재진단
- Wet : 접속부위(직선 및 종단) 교체 후 재진단

인공신경망 및 의사결정트리 모두 해저케이블 상태판정 분류모델로 활용가능하며 특히 전압상승에 따른 TD값 감소에 대해서도 머신러닝 분석으로 수분침투 영향에 대한 분류도 가능하게 개선할 수 있다.

참 고 문 헌

[1] 한국전력공사. 2009. 지중배전케이블 최적 열화진단기술 선정 및 운영방안에 관한 연구. P28~30, P131, P185~190.

[2] 한국전력공사. 2015. “지중배전케이블 VLF진단 신 판정기준” P5~9.

[3] 한국전력공사. 2014. 서지에 의한 지중배전케이블 및 변압기 수명 단축 특성 연구. P67.

[4] 한국전력공사. 2012. “지중케이블 VLF TD판정기준 개정” P1~5.

[5] 한국전력공사. 2011. VLF 내전압 시행기준. P5.

[6] 이레테크. 2017. 서순근. 미니탭 신뢰성 분석. P348~359.

[7] Ben Lanz, Wayne J. chatterton. IMCORP. 2018. “How Cable Fail The Myths and Fundamentals to Ensuring Long Cable Life. P413.

[8] 한국전력공사. 2020. 김주식 22.9kV 지중배전선로 지상개폐기 부분 방전 진단 교육자료. P62.

[9] 2017. International Conference on High Voltage Engineering and Power System. Ariefowibowo. Partial discharge measurements in XLPE cables with misplaced grading system under different applied voltage frequencies. P413.

Abstract

A Study on the Improvement of Very Low Frequency diagnostic criteria for Middle Voltage submarine cable

BOYINGHAN,JANG
Graduate School of Engineering Practice
The Graduate School
Seoul National University

keywords : Submarine cable,, VLF(Very Low Frquency), TD(Tanδ), PD(Pirtial Discharge), diagnostic cycle, exciting voltage, Index R
Student Number : 2021-21111

VLF (Very Low Frequency) diagnosis is performed to diagnose the degradation of underground cables and submarine cables for power distribution, and different diagnosis cycles and judgment criteria are applied, but cables using the same insulation need to operate the same diagnosis cycle and judgment criteria.

In addition, since the exciting voltage is applied up to 23.1 kV, which is higher than the system voltage of 13.2 kV, stress is applied to the cable insulator for diagnosis, and insulation breakdown of the cable occurs during diagnosis or after diagnosis, so it is necessary to review the diagnosis cycle adjustment.

Based on KEPCO's VLF diagnosis and failure filed data, four parts were selected using Excel, Mini-Tap, and R. The TD (Tan) correction plan for cables over 1km, and the VLF diagnosis voltage reduction model selection were reviewed.

Based on the results of the study, the revision proposal of the deterioration diagnosis part of the "Procedure for Maintenance of Submarine Cable for Distribution" was presented, and it seems possible to revise the procedure through verification of this study later.

Adjustment of the diagnostic cycle and lowering of the diagnostic voltage according to the revision of the procedure can directly or indirectly reduce the maintenance cost of the distribution line and reduce stress on the submarine cable insulator due to frequent diagnosis.