


전력케이블 열화진단을 위한 극저주파 탄델타 판정기준의 통계적 해석

정우성¹ , 김성민², 임장섭³, 이진¹

¹ 목포대학교 전기공학과

² 한국전력공사 전력빅데이터센터

³ 목포해양대학교 해양메카트로닉스학부

A Statistical Analysis to the VLF Tan δ Criteria for Aging Diagnosis in Power Cables

Woosung Jung¹, Seongmin Kim², Jangseob Lim³, and Jin Lee¹

¹ Department of Electrical Engineering, Mokpo National University, Muan 58554, Korea

² Power Big-data Center, Korea Electric Power Corporation (KEPCO), Seoul 06732, Korea

³ Division of Marine Mechatronics, Mokpo National Maritime University, Mokpo 58729, Korea

(Received September 8, 2019; Revised September 19, 2019; Accepted September 23, 2019)

Abstract: In this study, the objective is to improve the criteria used for statistical comparison of the VLF tan δ (TD) database and failure rate according to water-tree degradation in underground distribution power cables. The aging condition of the KEPCO criteria is divided into 6 levels using the Weibull distribution, and the “failure imminent” condition is quantified by using the statistical end-point of the lifetime parameter of the VLF big-data group obtained from KEPCO. Moreover, new criteria with a 2-dimensional combination of TD, DTD, and a statistical normalized factor are suggested. These criteria exhibit high reproducibility for the detection of cables in an imminent failure state. Consequently, it is expected that the adoption of the extended VLF-2019 criteria will reduce the asset management cost of cable replacement compared to the VLF-2012 criteria of KEPCO.

Keywords: VLF tan δ , Underground cables, Weibull distribution, Normalized factor, 2 Dimensional combination

1. 서론

산업화와 선진화의 단계에서 수반되는 전력수요의 증대는 전력설비의 고전압과 대용량화, 전력설비의 사고를 예방할 수 있는 새로운 절연재료의 개발, 제조공정의 개선 및 전력시스템의 탄력적인 운영 등을 필요로 하게 되었다 [1].

✉ Woosung Jung; ws-jung@hanmail.net

Copyright ©2020 KIEEME. All rights reserved.
 This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

배전용 지중 전력케이블의 수명을 단축시키는 대표적인 열화현상은 수트리(water tree) 현상이다. IEEE는 2001년 최초로 고장의 예방을 위한 수트리 진단기술로 VLF tan δ (TD) 진단기술을 제정하였으며, 한국전력은 운용 중인 전력케이블의 진단에 이 방법을 적용하였다. 그러나 이 기술은 20년 이상 운전된 국내 전력케이블의 상태판정에 적합하지 않으며, 진단의 신뢰성 등의 문제를 가지고 있다. 따라서 한국전력은 이를 보완하기 위한 KEPCO VLF-2012 버전을 제시하고, 이 진단기술을 현재까지 운영하고 있다 [2].

본 연구는 전력케이블의 정확한 상태판정과 측정결과의 신뢰성 향상을 위한 것으로, 현장 운용되는 배전

급 전력케이블의 VLF $\tan\delta$ (TD) 누적 특성값을 통계적으로 재해석한 다음, 그 기존 기준레벨의 판정인자 확장 및 레벨 수정을 하고자 하였다. 와이블 분포함수를 이용한 통계적 접근 방법이 수행되었고, 분석의 결과를 통하여 상대적인 정량적 평가와 열화진행 예측을 위한 영역별 모델링을 수행하여 판정 신뢰도의 향상을 목표로 한다.

2. 실험 방법

2.1 국외 VLF 기준(IEEE Std 4002-2013)

독일과 오스트리아 등 몇몇 유럽 국가들은 1988년부터 1995년까지 플라스틱 절연체를 가진 케이블의 내전압 시험법에 많은 연구를 수행하였다. 그 결과, 1995년 독일은 0.1 Hz의 초저주파 전원을 사용하는 3 U₀의 내전압시험법을 케이블시험의 표준으로 채택하였고, 1996년부터는 유럽에서 상시시험을 전시기험 표준으로 채택하였다 [3].

IEEE는 2013년에 개정된 판정기준을 공표하였고, 현재까지 사용되는 기준은 표 1과 같다 [3]. 개정된 판정 기준은 측정전압으로 0.5 U₀와 1.0 U₀ 및 1.5 U₀를 사용함으로써 2001년의 판정 기준보다 낮은 전압을 사용하고 있으며, 판정의 기준 항목으로 U₀에서의 VLF TD 평균치와 표준편차 및 1.5 U₀와 0.5 U₀에서 측정된 VLF TD 값의 차이(DTD) 값 등 3가지를 사용하고 있다.

Table 1. Criteria of VLF TD (IEEE Std. 400.2-2013).

Condition assessment	[$\times 10^{-3}$]				
	Time atability (STD at U ₀)		DTD		VLF TD (at U ₀)
No action required	<0.1	and	<5	and	<4
Further study advised	0.1 to 0.5	or	5 to 80	or	4 to 50
Action required	>0.5	or	>80	or	>50

2.2 국내 VLF 기준(KEPCO-2012)

한국전력은 2009년에 1983년부터 1999년까지 포설된 CNCV 325SQ 노후 케이블에 대한 열화진단을 수행하기 시작하였으며, VLF TD의 판정기준을 적용하고 BAUR사의 측정 장비(PHG TD/PD 80)를 이용한 진단

Table 2. VLF TD criteria (KEPCO-2012).

Condition assessment	TD (1.0)	DTD	STD (1.0)	Max Dev (1.0)	STD (1.5)	Max Dev (1.5)	[$\times 10^{-3}$]
							Down grade
A	≤ 1.0	≤ 0.5					
B	≤ 2.0	≤ 1.2					
C	≤ 6.0	≤ 6.0	≥ 0.1	≥ 0.3	≥ 0.2	≥ 0.5	D
D	≤ 10.0	≤ 12.0	≥ 0.2	≥ 0.6	≥ 0.3	≥ 1.0	E
E	≤ 27.0	≤ 60.0	≥ 0.7	≥ 2.2	≥ 1.4	≥ 4.2	F
F	>27.0	>60.0					
1 st	OR		OR				2 nd
Con.	AND						Con.

이 이루어졌다. 그러나 이 방법은 너무 많은 케이블의 불분명한 판정 단계가 존재하여, 세분화 분류의 요구와 각각의 인자에 대한 통계적인 분포 해석을 필요하게 되었다. 따라서 한국전력은 새로운 판정 기준을 수립하여 사용하고 있으며, 이 방법은 기존의 한국전력의 VLF TD 데이터베이스에 와이블 통계분포를 이용하였다.

표 2는 1.5 U₀에서의 표준편차(STD)에 최대편차(max Dev)를 추가하여 1차원의 UCD (used cable diagnosis) 매트릭스 판정기준을 확장한 결과이다. 이 VLF 판정기준은 열화의 등급을 TD와 DTD의 값에 따라 A등급부터 F등급까지 판정하는 것으로, 등급의 판정이 F에 접근할수록 열화의 상태가 나빠지는 것을 의미한다.

KEPCO-2012 VLF 상태판정 기준에는 1차원 상태판정 구간과 2차원 상태판정 구간이 존재한다. 1차원 상태판정 구간은 1.0 [U₀]에서 측정된 TD와 1.5 [U₀]의 TD에서 0.5 [U₀]에서의 TD를 감한 DTD로 구성되어 있고, 열화 판정에 논리적 'OR' 조건을 적용하여 두 인자 중 더 가혹한 등급을 채택한다.

2차원 상태판정 구간은 1.0 [U₀]에서 측정된 데이터의 시간안정도 개념인 표준편차(STD)와 편차(DEV)로 구성되어 논리적 'OR' 조건을 적용한다.

최종 판정은 1차원 상태판정 구간 판정 결과와 2차원 상태판정 구간 판정 결과를 논리적 'AND' 조건을 적용하여 열화 상태를 1단계 등급하락 시키는 복합판정으로 이루어진다 [4,5].

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 기존 VLF 2012 기준에 따라 측정된 데이터베이스를 기반으로 판정 기준값의 개선, 추가 판

정인자의 개발 및 비적합 인자에 대한 보류 등을 고찰하였다. 본 연구에 사용된 데이터는 수트리의 열화로 인하여 1999년 상용화가 중지된 CNCV 지중배전 케이블로서 현장의 운전기간이 20년 이상 운용된 케이블의 VLF TD 측정데이터이다.

3.1 VLF 판정기준 개선(2019)

현재 사용하는 케이블의 'KEPCO-2012 VLF 상태판정 기준'은 1.5 U₀ 단계 편차 기울기(skirt)를 적용하지 않고 있다. 그러나 케이블은 상태 판정을 위하여 인가한 측정전압이 높아지면, TD값의 편차와 반복 시간의존성이 증가하고, 케이블의 열화 진행에 따라 이 값들의 변화가 가속될 것으로 추정된다. 따라서 1.5 U₀에서 측정한 편차 기울기와 DTD를 판정에 추가하는 것이 판정의 신뢰도를 더 높일 수 있을 것으로 판단된다.

데이터베이스의 TD의 값과 skirt 및 DTD의 값을 고찰한 결과, 운전 중 파괴가 발생할 확률이 급격히 증대되는 구간을 확인할 수 있었으며, 동일한 극저주파 탄델타 값일지라도 측정반복에 따른 시간 안정성이 케이블 신뢰도에 중요한 요소로 관측되었다. 따라서 TD 값과 skirt 및 DTD 값을 조합하여 판정요소로 활용하는 것이 판정의 신뢰도 향상에 도움이 될 것으로 판단된다. 또한 6.6 kV급 민수 배전케이블이나 3코어 같은 케이블 적용에 확대하기 위해 DTD2 및 DTD3을 새로운 기준에 추가로 적용하였다.

표 3에서는 판정 파라미터를 추가한 새로운 판정기준치와 등급조정 조건을 나타낸 것이다.

3.2 케이블 열화등급 및 운전 중 절연 파괴

그림 1~4는 파괴영역을 확인하기 위하여 케이블의 운전기간 중 절연 파괴가 발생한 19개 선로와 측정데이터를 비교 고찰한 것으로, 와이블 함수의 누적확률분포를 적용한 표 3과 같이 케이블 상태를 각각 A부터 F까지의 열화등급으로 나타내었다.

상기 기준표의 왼쪽 첫 번째 조건으로 그림의 수직축이 결정되었고, 오른쪽 두 번째 조건으로 등급을 1단계 하락시키는 2단계 판정을 하였다. 그림 1에서 열화단계 C와 D 등급에서는 표준편차의 통계적 분포가 비슷하지만 E 등급부터는 분포가 급격히 커지는 결과가 고찰된다. 따라서 같은 TD 값이더라도 시간안정도 개념이 도입된 표준편차는 케이블의 운전 중 파괴확률이 증대되는 특성이 확인되었다.

그림에서 선로의 길이가 1,500 m 미만인 선로는 정삼각형(△), 1,500 m 이상은 역삼각형(▽)으로 표시되었으며, 길이에 따른 BD의 분류 이유는 다음과 같다.

일반적으로 TD의 수치는 케이블 선로길이 증가와 반비례 특성을 가진다. 특히 해저케이블 등과 같은 장거리 선로에서는 고밀도의 수트리가 존재하더라도, 극소의 TD 값이 관측될 수 있다 [6]. 따라서 한국전력과 장비의 제조업체들은 상기 상황을 인지하고, VLF TD 측정 범위를 1,200 m 이하로 제한하고 있다.

그림 2는 skirt에 대한 분포를 2차원적으로 표현한 것으로, 이 결과는 기존 표준편차보다도 더 좋은 선형 특성을 가지고 있다. BD (breakdown) 발생 분포는 X축과 Y축의 상승에 따라 정 비례적 관계를 고찰할 수 있었다. 따라서 skirt [1.5 U₀]는 3차원 VLF 매트릭스에 열화성장 속도 개념을 도입한 케이블의 열화 진행

Table 3. VLF TD criteria (KEPCO-2019).

[unit: ×10⁻³]

Cable grade	1.0 U ₀	1.5 U ₀	DTD	DTD2	DTD3	STD (1.5 U ₀)	Skirt (1.5 U ₀)	DEV (1.5 U ₀)	Down grade
A	≤1.0	≤1.4	≤0.6	≤0.3	≤0.2				
B	≤2.0	≤2.8	≤1.2	≤0.6	≤0.4				
C	≤5.5	≤8.8	≤5.5	≤3.0	≤2.2	≥0.3	≥0.10	≥0.5	D
D	≤9.0	≤15.0	≤12.0	≤6.0	≤4.5	≥0.4	≥0.45	≥1.2	E
E	≤25.0	≤50.0	≤45.0	≤25.0	≤20.0	≥1.0	≥4.5	≥3.0	F
F	>25.0	>50.0	>45.0	>25.0	>20.0				
1 st Con.	OR					OR			2 nd Con.
	AND								

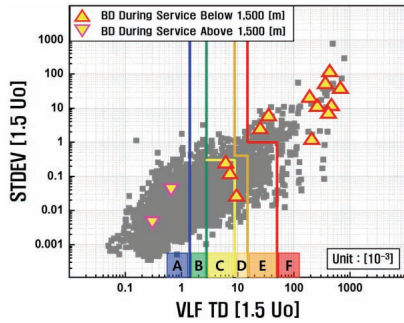


Fig. 1. STD [1.5 Uo] vs VLF TD [1.5 Uo].

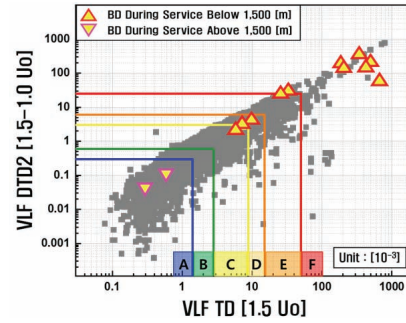


Fig. 3. DTD2 vs VLF TD [1.5 Uo].

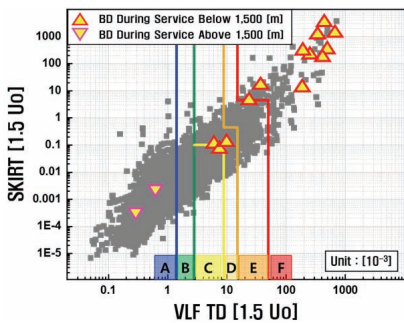


Fig. 2. Skirt [1.5 Uo] vs VLF TD [1.5 Uo].

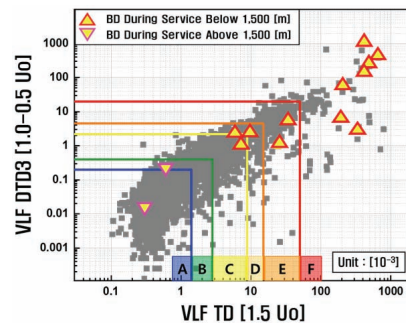


Fig. 4. DTD3 vs VLF TD [1.5 Uo].

및 교체 시점에 가장 효율적인 3가지 인자 중 하나로 채택되었다.

Skirt는 2012년 2차원 UCD-메트릭스 기반의 12가지 조합에 기초하여 독자적인 개발된 개념이고 [6] 2014년 DTD2 (1.5~0.5 Uo), 2017년에는 DTD3 (1.0~0.5 Uo)가 추가되어 현재까지 총 18개의 모델이 개발되어 적용되고 있다.

그림 1과 2, 3 및 4는 VLF TD [1.5 Uo]에 따른 데이터 분포에서 운전 중에 발생하는 절연 파괴사고와 어떠한 상관관계를 가지고 있는지 잘 보여주고 있다. 이 결과에 의하면 운전 중 발생하는 케이블의 절연 파괴는 판정등급 E와 F에 60%가 집중해 있으며, E등급의 경우는 경제성을 고려한 교체 우선순위 선정에 있어서 가장 중요한 연구영역으로 남아 있다.

UCD 배열에 skirt와 DTD2가 추가되는 이유는 측정 데이터분포와 파괴 관측점과의 선형적 상관관계가 고찰되기 때문이다.

최근에는 민수분야에 있어서, 6.6 kV급 등의 다른 운전조건의 소규모 VLF TD 데이터는 절연구조 및 사용 전압에 다르기 때문에 이질적인 분포가 관측된다. 따라서 케이블 수트리 열화상태 판정하는 데 기존의 한국전력의 빅데이터 그룹과 제안된 DTD2 및 DTD3

는 타 등급 케이블에서의 확장 해석이 가능한 상호간의 분포해석 측면에서 추가적인 보상기법 및 인자개발과 같은 통계적 해석방법이 진행되고 있다.

그림 4의 DTD3는 전압안정성의 개념으로서 기존 DTD와 DTD2와 구별되어 1.0 Uo 이하의 TD 값만으로 사전 진단이 필요한 6.6 kV급 중요선로에서 논의가 필요하다. DTD3는 측정 재현성이나 정확도가 떨어지는 단점을 가지고 있지만, 1.0 Uo 이하에서 진단이 가능하기 때문에 측정 중 파괴확률을 줄일 수 있는 장점을 가지고 있다. 극히 낮은 파괴 가능성도 허용하기 어려운 해저케이블과 측정전압을 1.5 Uo까지 상승할 수 없는 민수사업의 중요선로에서는 측정 전압을 감소하려는 개발요구가 필연적이고, 한국전력과 다른 별도의 시험절차 및 판정기준이 요구된다.

본 연구에서 추가된 통계적 요소는 운용국가별로 사용하는 전압레벨과 또는 운전환경의 차이로 인하여, 데이터 분포가 국내와 상이할 수 있다. 따라서 국내외 실정에 부합하는 UCD 요소를 준용하여, 전력설비 운용의 경제성과 신뢰성을 고려하여야 한다.

현재, UCD 판정기준에서 중요인자 3개(TD, DTD, skirt)를 주된 수명관련 열화속도 예측 파라미터로 쓰고 있지만, 본 연구에서 제안된 네 번째 파라미터

(DTD2)를 추가로 적용하여 열화 판정등급에서 애매한 경계치 등에서 보완이 가능하며, 판정 정확도 및 재현성을 향상시키는 것으로 판단된다.

4. 결론

XLPE 전력케이블의 열화상태 진단을 위하여 측정된 VLF TD의 값을 와이בל 분포함수로 해석하고 새로운 판정기준을 제안하고자 한다.

- 1) 새로운 판정인자로서 DTD2, DTD3, skirt [1.5 U₀]를 추가하여 보다 정확한 상태등급의 판정이 가능함을 확인하였다.
- 2) 표준편차(STD), 최대편차(DEV) 및 skirt 값의 등급변환에서는 1.0 U₀ 판정보다 1.5 U₀ 판정조건이 운전 중 파괴확률 예측에 더 우수함을 확인하였다.
- 3) 상기의 결과로부터 제안된 판정기준은 재현성이 우수하고, 기존의 기준과 비교하여 열화등급 판단에 대한 신뢰성이 향상되었다.

상태판정요소를 추가하여 새롭게 제안된 2-D UCD Matrix를 사용하여 케이블 열화상태를 판정할 경우 케이블의 고장예방 등의 전력신뢰성 향상에 많은 기여를 할 것으로 사료된다.

ORCID

Woosung Jung

<https://orcid.org/0000-0003-1893-973X>

REFERENCES

- [1] IEEE Guide for Field Testing and Evaluation of the Insulation of Shielded Power Cable Systems, IEEE Standard 400-2001, 2002. [DOI: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2002.93394>]
- [2] D. Kim, Y. Cho, and S. M. Kim, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **21**, 940 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2014.6832235>]
- [3] IEEE Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF) (less than 1 Hz), IEEE Std. 400.2-2013. [DOI: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2013.6517854>]
- [4] S. Kim and T. Kwon, "VLF Tan δ Criteria for XLPE Insulated Power Cables in KEPCO," Presented at the 8th JICABLE, E.5.2.8, 2011.
- [5] S. M. Kim, B. S. Kim, W. S. Choi, Y. H. Jung, J. S. Lim, J. Lee, K. H. Lee, and T. W. Kim, *Proc. 2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (IEEE, Bali, Indonesia, 2012)* p. 1223. [DOI: <https://doi.org/10.1109/CMD.2012.6416382>]
- [6] J. C. Hernandez-Mejia, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **16**, 862 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2009.5128527>]