

케이블 수명예측을 위한 수트리 동적해석 모델링에 관한 연구

이정우, 오용택*

한국기술교육대학교 전기공학과

A Study on Water Tree Dynamic Analysis Modeling for Cable Life Prediction

Jung-Woo Lee, Yong-Taek Oh*

Department of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education

요약 지중케이블에서 수트리 열화 과정은 십수년이 걸리며 보통 매우 오래된 지중케이블에서 발견된다. 이러한 지중케이블은 이미 접근이 어려운 곳에 있어 수트리를 검출하기 위해서는 많은 비용과 시간이 소요된다. 따라서 전력케이블의 절연체 내에 형성되는 수트리의 존재여부 및 진행 정도를 검출할 수 있는 효율적이고 정확한 케이블 열화 진단기술이 필요하다. 본 논문에서는 XLPE 지중케이블에 수트리가 발생할 경우 해당 케이블의 절연층이 완전 열화되는 시간을 분석하기 위해 수트리의 성장패턴을 동적으로 모델링하여 매틀랩 시뮬레이션을 통해 검증하고자 하였다. 수트리의 성장 패턴을 모델링하기 위하여 실제로 현장에서 케이블 열화의 주된 원인인 벤티드 외도트리의 길이가 증가하는 형태를 분석하여 포물선으로 근사화 하였고, 시간이 지날수록 수트리의 수평축 성장은 감소하고 도전층을 향한 수직축 성장만 지속되는 시간함수를 도출하였다. 모델링된 수트리의 성장 시간함수 및 정전용량 계산식을 매틀랩으로 구현하여 시뮬레이션 하였다. 그 결과, XLPE 케이블의 절연층 두께 5.28[mm]을 기준으로 절연층에서 수트리의 길이가 0.05%에서 100%까지 증가하는데 23년의 시간이 소요됨을 확인하였고, 수트리의 길이가 증가함에 따라 수트리 영역의 정전용량은 감소하고 케이블 절연층 전체 정전용량은 증가됨을 확인할 수 있었다.

Abstract The process of water tree deterioration of underground cables takes decades and is usually found in very old underground cables. These underground cables are in hard-to-reach locations, making it costly and time-consuming to detect water treeing. Therefore, there is a need for efficient and accurate cable degradation diagnostics that can detect the presence or absence and progression of water tree growth in the insulation of power cables. In this study, the growth pattern of the water tree in an XLPE underground cable was dynamically modeled and verified through Matlab simulation in order to analyze the time for the insulation layer to completely deteriorate. A surfaced-originating vented tree is the main cause of cable deterioration in the field. In order to model the growth pattern of the water tree, the shape of the increase in the length of a surfaced-originating vented tree was analyzed and approximated as a parabola. In addition, a time function was derived, in which the growth of the horizontal axis of the water tree decreased with time, and the vertical axis toward the conductive layer grew. The growth time function and capacitance calculations of the modeled water tree were implemented in Matlab and simulated. As a result, based on an insulation layer thickness of 5.28 mm on an XLPE cable, it was found that it takes 23 years to increase the length of the water tree in the insulation layer from 0.05% to 100%. As the water tree length increased, the capacitance of the water tree area decreased, and the overall capacitance of the cable insulation layer increased.

Keywords : Water-tree, Vented-trees, XLPE Cable, Dynamic Analysis, Permittivity

본 논문은 2022학년도 한국기술교육대학교 교육연구진흥과제 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

*Corresponding Author : Yong-Taek Oh(Korea University of Technology and Education)

email: ytoh@koreatech.ac.kr

Received July 12, 2023

Revised August 16, 2023

Accepted September 1, 2023

Published September 30, 2023

1. 서론

국내에서는 86년도 서울 아시안게임, 88년도 서울 올림픽을 유치하면서 안정된 전력공급 및 도시환경 미화 등을 사유로 대도시의 간선도로를 중심으로 한 배전선로의 지중화가 이루어지기 시작하였다[1]. 한국전력공사에서 관리하는 배전용 지중선로는 2021년 기준으로 특고압 케이블은 약 49,703[C-km]이고, 저압 케이블은 약 11,783[C-km]이며, 1980년 기준 전국의 배전선로 지중화율은 0.30[%]에서 2021년 기준 11.71[%]로 41년 동안 연평균 0.27[%]로 상승하고 있는 추세이다[2].

2003년부터 2020년 기간 동안 발생한 지중케이블 고장 159건의 원인을 분석한 내용에 따르면 케이블 외상 손상으로 인한 고장이 69건, 수트리로 인한 전기적열화로 인한 고장이 44건, 제조결함 27건, 기타사유 19건 등으로 수트리로 인한 지중케이블의 고장은 약 27.7%를 차지하며, 수트리로 케이블이 열화되는 평균 진행시간이 20.6년이라는 것을 확인할 수 있다[3]. 지중케이블에서 수트리 열화 과정은 십수년이 걸리며 보통 매우 오래된 지중케이블에서 발견된다. 이러한 지중케이블은 이미 접근이 어려운 곳에 있어 수트리를 검출하기 위해서는 많은 비용과 시간이 소요된다. 따라서 전력케이블의 절연체 내에 형성되는 수트리의 존재여부 및 진행 정도를 검출할 수 있는 효율적이고 정확한 케이블 열화 진단기술이 필요하다.

기존 논문에서는 벤티드 외도트리의 모양을 타원형으로 단순화하고 그 내부의 유전율은 일정하다고 가정한 물리적 모델링이나 수학적 모델링에 대한 연구가 이루어졌으나[4,5], 이러한 모델들은 단순히 케이블 절연층 내부의 수트리 존재여부 및 크기 정도만을 추정할 수 있어 케이블의 잠재적인 잔여수명 예측을 통한 유지보수 및 교체 계획 수립에는 적합하지 않다.

본 논문에서는 수트리의 성장 특성을 분석하여 케이블에서 수트리가 발생했을 때를 시작으로 절연층을 완전 관통하여 도전층에 도달하기까지의 시간을 추정할 수 있는 시간함수를 이용한 동적 모델링을 하고자 한다. 이를 매티랩으로 구현하고 시뮬레이션하여 시간에 따른 수트리 길이 변화와 케이블의 정전용량 변화를 분석함으로써 수트리가 발생한 케이블의 절연층이 완전 열화되는데 소요되는 시간을 확인하고자 한다.

2. 수트리 성장패턴에 따른 근사화

수트리 모델링의 가장 어려운 부분은 수트리의 성장 특성을 정확하게 정의 내리기 어렵다는 것이다. 그러므로 동적 모델링에 앞서 수트리의 성장패턴을 근사화 할 필요가 있다. 수트리는 케이블 절연층 내 미세한 공극이 발생하고 이 사이로 수분이 유입되면 전압 인가시 잔류수분이 이온화 되어 전계로 인한 진동이 발생함으로써 성장한다[6]. 이러한 성장속도는 십수년 이상으로 매우 느리게 진행되며, 그 성장구조 또한 기하학적 구조로서 전계의 크기, 작동 주파수, 수분 함량에 따라 각각 달라진다[7]. 수트리의 성장 형태는 매우 무작위적이지만 현장에서의 노후 케이블에서 발견된 수트리의 단면은 벤티드 트리의 기하학적 구조를 가지고 있으며 내도 트리와 외도 트리로 구분된다[8,9]. 특히 정상주파수(50-60Hz)의 고전압 전력망에서 발생하는 수트리는 벤티드 외도 트리의 구조를 가지는 것이 일반적이다[10,11].

본 논문에서는 시간에 따른 수트리의 성장 특성을 정의하는 시간함수를 도입하기 위해 벤티드 외도 트리의 단면 구조를 Fig. 1과 같이 단순한 포물선 구조로 근사하여 모델링에 적용하였다.

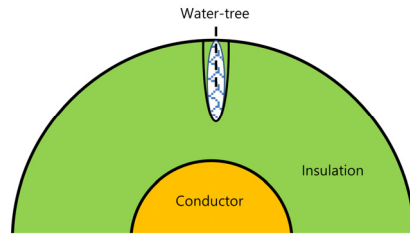


Fig. 1. Vented tree (Surface originated) Structure assumption

3. 시간에 따른 수트리 성장 방정식

외도 트리의 성장패턴을 포물선 구조로 근사화 하면 수트리는 가로축 보다 세로축으로 길게 늘어나는 포물선 모양으로서 이를 Fig. 2와 같이 케이블의 단면을 도식화하여 수트리의 성장 포물선을 좌표계 y축에 표현하면 시간이 지남에 따라 좌우하단으로 확산하는 포물선으로 나타낼 수 있다. t_1 의 시간에서 수트리의 수직축 길이는 C와 D 사이가 되며, A와 B 사이는 수트리의 호길이가 된다. θ_0 는 수트리가 t_1 일 때의 호의 길이에 대응하는 각도이다. ϵ_{pe} 는 케이블 절연층의 유전율이며, ϵ_w 는 수트리 내부의 유전율이다.

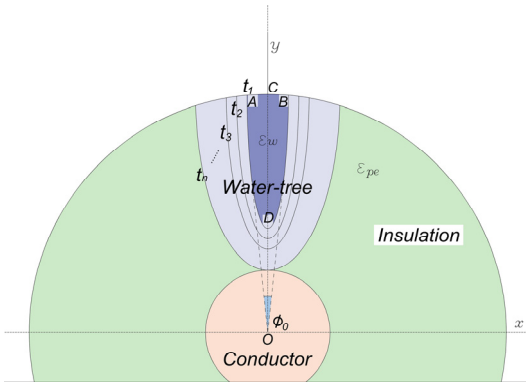


Fig. 2. Structure of water tree growth

시간 t 에 따른 수트리의 성장 방적식을 위해 Eq. (1)과 같이 먼저 포물선의 2차 다항식을 사용하였다.

$$y = ax^2 + bx \pm c \quad (1)$$

여기서 수트리의 영역은 y 축에 대해 대칭이라고 한다면 b 는 0이므로 Eq. (1)은 다음과 같이 변경된다.

$$y = ax^2 \pm c \quad (2)$$

Eq. (2)에서 y 는 수트리의 수직축 성장의 크기를 나타내고 x 가 0일때 y 값은 Fig. 3에서 D 지점이 된다. 계수 a 는 수트리의 호길이, 즉 좌우 성장률을 결정하는 요소이고, 계수 c 는 수트리의 수직축 성장률을 결정한다. 이 두가지 계수를 시간함수로 표현하면 다음과 같다.

$$y(x,t) = a(t)x^2 + c(t) \quad (3)$$

참고문헌 [12]의 케이블의 절연노화 가속시험을 통해 관찰된 수트리 발달 과정과 이미지에 따르면 수트리의 원주 성장률은 점차 감소하고 수직축 성장률은 계속 지속됨을 확인할 수 있다[12]. 수트리의 시작점, 즉 뿌리부분의 수평 인장 전기력이 수트리가 성장할수록 넓어지는 호길이에 따라 감소하여 좌우 성장률이 감소한다. 수트리의 영역이 넓어지면서 수분의 침투가 늘어날수록 케이블 절연층의 정상 유전율이 수트리의 유전율로 증가하기 때문이다. 유전율이 증가하면 해당 영역의 전계 강도가 감소하여 수평 인장 전기력이 감소한다. 반대로 수직축 성장률은 수트리의 진행방향이 뿌리부분과 멀어짐에 따라 수트리의 유전율이 케이블의 정상 유전율로 감소하고

도전층의 전기장과 가까워지며 전계의 강도가 증가하기 때문에 지속적으로 길어지게 된다. 이를 바탕으로 다음과 같이 정리하였다.

$$a(t) = e^{-0.1t} [\mu m] \quad (4)$$

$$c(t) = R - (767.53 \log(t) - 4117.6) [\mu m] \quad (5)$$

where, R is radius of cable.

Eq. (4)는 시간이 갈수록 작아지는 수트리의 수평 성장률을 적용하기 위해 감소하는 지수함수로 정의하였고 Eq. (5)는 참고문헌 [13]의 시간에 따른 수트리의 길이를 측정할 결과를 바탕으로 엑셀 프로그램의 추세선 기능을 사용하여 도출하였다[13]. 이를 Eq. (3)으로 최종정리하면 다음과 같다.

$$y(x,t) = e^{-0.1t}x^2 + (R - (767.53 \log(t) - 4117.6)) \quad (6)$$

where, R is radius of cable.

Eq. (6)은 시간에 따른 수트리의 성장 방적식으로서 특정시간 t (hour)에 따른 수트리의 영역을 포물선으로 표현할 수 있다. 시간이 증가함에 따라 수트리의 수평 성장률 $a(t)$ 와 수직축 성장률 $c(t)$ 의 크기는 작아지므로 이는 결국 시간이 흐를수록 Fig. 3과 같이 수트리의 좌우 영역은 수직축보다 작게 증가하고 도전층 방향으로 길게 늘어지는 포물선 형태를 그린다. 특정시간에서 수트리의 길이를 $L_w(t)$ 라 한다면 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$L_w(t) = R - y(0,t) = R - c(t) \quad (7)$$

where, L_w is the length of water tree.

R is radius of cable.

4. 수트리 성장에 따른 케이블 정전용량 계산

수트리가 발생한 케이블의 정전용량을 계산하기 위해서는 Fig. 3과 같이 케이블의 단면을 3개의 정전용량 영역으로 구분해야 한다.

Fig. 3의 C_w 는 수트리가 성장하는 영역의 정전용량이고, C_{p1} 은 수트리가 포함된 절연층에서 수트리영역을 제외한 영역의 정전용량이며, C_{p2} 는 수트리가 도달하지 못한 정상절연층의 영역의 정전용량이다. 이를 캐패시턴스 등가회로로 표현하면 Fig. 4와 같다.

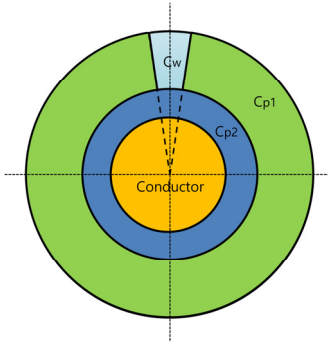


Fig. 3. Classification of capacitance area

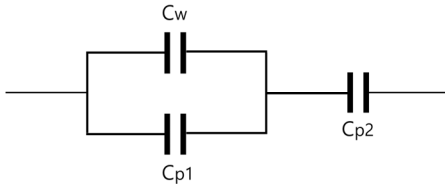


Fig. 4. Equivalent capacitance circuit of a water tree

C_w 와 C_{p1} 은 병렬회로이고 C_{p2} 는 직렬회로로 표현된다. 수트리가 발생한 케이블의 전체 정전용량 C_{total} 은 다음과 같다.

$$C_{total} = \frac{(C_w + C_{p1}) \times C_{p2}}{(C_w + C_{p1}) + C_{p2}} \quad (8)$$

where, C_{total} is the total capacitance of the cable.

C_w is the capacitance of the water tree.

C_{p1} is the capacitance of the insulation with water tree.

C_{p2} is the capacitance of the insulation without water tree.

C_w 와 C_{p1} 의 정전용량을 계산하기 위해서는 Fig. 5와 같이 C_w 수트리 영역에 대응하는 각도 θ_w 를 계산하여야 한다. Fig. 5에서 R 은 케이블의 반지름, r_c 는 케이블 도전층의 반지름, L_w 는 특정시간에서의 수트리 수직축 길이이다. 특정시간에서 C_w 수트리 영역의 대응각도가 $\angle AOB$ 라면, 수트리 영역의 포물선이 y 축에 대칭이므로 그 절반인 θ_w 만으로 계산할 수 있다. θ_w 는 $\angle OBD$ 와 동일하므로 B지점에서의 x, y 좌표를 구하면 θ_w 는 다음과 같다.

$$\theta_w = \tan^{-1} \frac{x}{y} \quad (9)$$

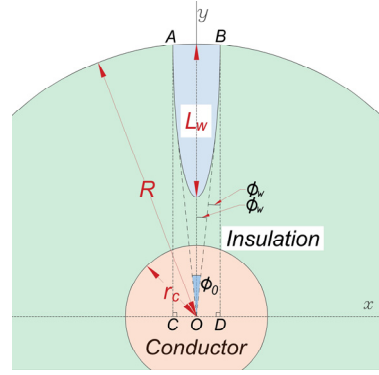


Fig. 5. Corresponding angle to the water tree area

만약, 특정시간에서 B지점의 좌표가 $x, y(x,t)$ 라면 수트리 영역의 대응각도가 $\angle AOB$ 의 $\theta(t)$ 는 다음과 같다.

$$\theta(t) = \tan^{-1} \frac{x}{y(x,t)} \times 2 \quad (10)$$

그러므로 특정시간에서 3개 영역의 정전용량을 각각 계산하면 다음과 같다.

$$C_w = \frac{\epsilon_0 \epsilon_w \theta(t)}{\log_e \frac{R}{R-L_w(t)}} \quad (11)$$

$$C_{p1} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{pe} (2\pi - \theta(t))}{\log_e \frac{R}{R-L_w(t)}} \quad (12)$$

$$C_{p2} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{pe} 2\pi}{\log_e \frac{R}{r_c}} \quad (13)$$

where, ϵ_0 is the permittivity of free space

ϵ_w is the permittivity of the Water-tree

ϵ_{pe} is the permittivity of the insulation

5. 수트리 영역내 유전율 변동

3절에서 수트리 영역내의 유전율이 변동됨을 언급하였다. 수트리의 뿌리부분에 근접할수록 유전율은 수트리의 유전율로 상승하고, 수트리의 진행방향으로 근접할수록 유전율은 케이블 절연층의 유전율로 감소된다[14]. 이를 그림으로 표현하면 다음 Fig. 6과 같다.

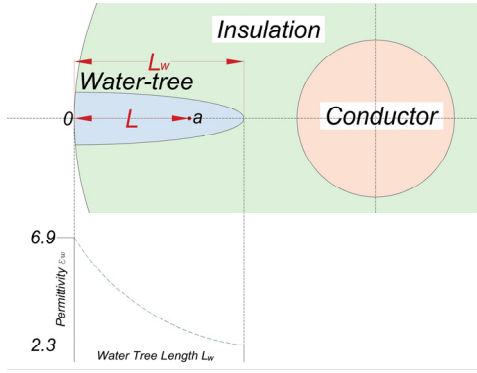


Fig. 6. Variation of water tree permittivity

본 논문에서 적용한 케이블의 절연층 유전율은 2.3이고 수트리의 유전율은 6.9이다. Fig. 6과 같이 수트리의 길이가 L_w 이고 수트리 내부 영역에서 임의점 a 의 길이가 L 이라면, L 이 0에 근접할수록 수트리의 유전율은 6.9로 상승하고 L 이 L_w 에 근접할수록 수트리의 유전율은 2.3으로 감소한다. 이러한 유전율 변동 특성을 Eq. (12)에 적용하여 수트리 영역 정전용량 C_w 를 계산할 필요가 있다. 수트리 영역내에서 임의의 점 a 의 길이 L 의 변화가 $f(L)$ 이라면 C_w 와의 관계는 다음과 같다.

$$C_w \propto \frac{1}{f(L)} \quad (14)$$

$f(L)$ 을 지수함수로 표현하여 정전용량 C_w 와 수트리 유전율 ϵ_w 와 관계를 다시 정리하면 다음과 같다.

$$C_w \propto \epsilon_w \propto e^{-kL} \quad (15)$$

수트리의 유전율 공식은 다음과 같다.

$$\epsilon_w = Ae^{-kL} \quad (16)$$

Eq. (16)의 A 는 공식의 초기값을 나타내는 상수이고 k 는 감쇠계수이다. Eq. (16)을 간편하게 계산하기 위해 L 을 수트리 길이 L_w 에 대한 비율로서 표현할 필요가 있다. 이를 다시 Eq. (16)에 적용하면 다음과 같다.

$$L' = \frac{L}{L_w} \quad (17)$$

$$\epsilon_w = Ae^{-kL'} \quad (18)$$

Eq. (18)의 특성을 정리하면 다음과 같다.

$$\epsilon_w = \begin{cases} 2.3 & L' \rightarrow 1 \\ 6.9 & L' \rightarrow 0 \end{cases} \quad (19)$$

이러한 특성을 Eq. (18)에 적용하면 수트리의 유전율 변동 공식은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\epsilon_w = 6.9e^{-1.10L'} \quad (20)$$

6. 모델링 시뮬레이션 결과

앞서 제시한 함수들을 적용하여 특정시간마다의 수트리 길이, 수트리의 정전용량, 케이블 전체의 정전용량 등을 분석하기 위해 매텔랩으로 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션에 사용된 케이블은 Prysmian사의 15[kV] 750[kcmil] tape shield XLPE(Cross-linkaged Polyethylene) 케이블 데이터를 적용하였으며, 이 케이블의 도전층 반지름은 12.37[mm] 이고, 절연층의 두께는 5.28[mm] 이다[15]. 시뮬레이션 방법은 Eq. (6)을 적용하여 시간당 x 축을 0.001[mm] 단위로 증가시키며 수트리의 길이가 케이블 절연층 두께의 5%부터 100%가 될 때까지 계산 하였다. 동시에 시간당 수트리의 정전용량과 케이블 절연층의 전체 정전용량을 반복 계산하여 그결과를 누적하였다. 시뮬레이션 결과는 다음과 같다.

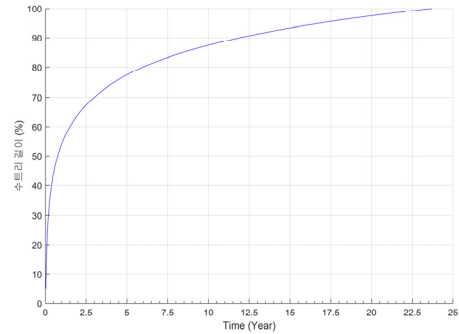


Fig. 7. Relation of time and water tree growth

Fig. 7은 시간에 따른 수트리의 길이를 나타낸다. x 축은 년도이고 y 축은 케이블 절연층 두께에 대한 수트리의 길이를 %로 표현하였다. x 축의 시간은 수트리가 생성되는 시점을 정확히 결정할 수 없으므로 수트리가 이미 생성되었다 가정하고 그 길이가 본 연구에서 적용한 케이블 절연층 두께 5.28[mm]의 5[%]부터 100[%]가 되는 경과시간을 나타낸 것이다. 2.5년 이내에는 수트리의 길

이가 절연층 두께 60[%] 만큼 급속히 성장하고 이후에는 그 성장율이 감소됨을 확인할 수 있다. 이는 수트리가 도전층에 가까워질수록 외부로부터의 수분공급 통로가 길어짐으로써 그 진행속도가 점차 느려진다고 볼 수 있다. 23년 후에는 수트리가 절연층을 관통하여 도전층에 도달하며 수트리 평균 열화 진행시간 20.6년과 유사한 결과임을 알 수 있다.

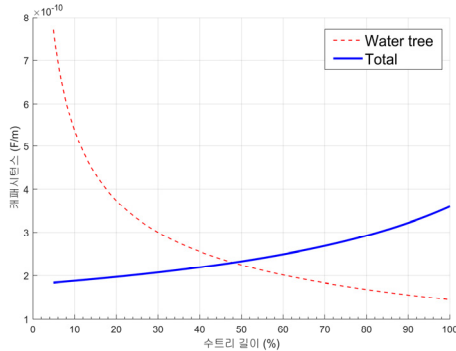


Fig. 8. Water tree capacitance and cable total capacitance against water tree growth

Fig. 8은 수트리 길이에 따른 수트리 영역의 정전용량과 케이블 절연층의 전체 정전용량을 나타낸 것이다. 수트리 영역이 증가함에 따라 해당 정전용량은 감소하고 전체 정전용량은 증가됨을 확인하였다.

7. 결론

본 논문에서는 수트리가 발생한 XLPE 지중케이블의 수명을 예측하기 위해 수트리의 성장 특성을 시간함수를 도입하여 동적 모델링하였고, 이를 Matlab으로 시뮬레이션하여 시간에 따른 수트리의 길이 증가와 정전용량의 변화를 분석하였다. 본 논문에서 수행한 내용은 다음과 같다.

첫째, 수트리의 성장 특성을 시간함수로 모델링하기 위하여 수트리의 구조를 포물선으로 근사화 하였고, 그 모양은 시간이 지날수록 수트리의 수평축 성장은 감소하고, 수직축 성장만 진행되는 Vented 외도 트리의 형태를 적용하였다.

둘째, 수트리가 발생한 케이블의 절연층 내부를 수트리 영역, 수트리 영역과 겹치는 절연층 영역, 수트리가 없는 절연층 영역 등 3개의 구역으로 구분하였고 수트리 영역 내부에서는 유전율이 변화되는 특성을 적용하여 케

이블의 정전용량을 계산하였다.

셋째, 모델링된 수트리의 성장 시간함수를 Matlab으로 구현하여 시뮬레이션하였고 그 결과, 케이블의 절연층 두께 5.28[mm]을 기준으로 수트리의 길이가 0.05%에서 100%까지 증가하는데 23년의 시간이 소요됨을 확인하였다.

차후, 본 연구에서는 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션을 사용하여 제시한 수트리의 동적 모델을 적용한 케이블이 계통에 미치는 영향을 확인하고, 케이블의 잔여수명에 따른 특성을 분석하고자 한다.

References

- [1] YH. Beak, "Rational Direction of Cable Underground Project", Technical Report, Korea Industrial Development Institute, Korea, pp.1-3. 2011.
- [2] Korea Electric Power Corporation, Korea Electric Power Statistics Distribution Facility Status 1979~2021, <https://kosis.kr/search/search.do>
- [3] CE. Cho, OY. Lee, SB. Kim, KS. Kim, "MV Cable Failure Statistics Analysis and Failure Rate Utilization Method of Prioritization of Diagnosis Targets", *KEPCO Journal on Electric Power and Energy*, Volume 7, Number 2, pp. 263-268, 2021.
- [4] JW. Lee, YT. Oh, "Mathematical Modeling and Analysis for Water Tree of Underground Cables", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 21, No. 5, pp. 516-522, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2020.21.5.51>
- [5] K. W. Burkes, "Modeling the Effect of a Water Tree Inside a Tape Shield and Concentric Neutral Cables", *Excerpt from the Proceedings of the 2014 COMSOL Conference in Boston*, 2014.
- [6] HS. Yoon, "A Study on the Water Tree Argeing Analysis of Undergrounding Cable and Application of New Method to Efficiency Restoration", Master's thesis, Seoul National University of Science & Technology, Seoul, Korea, pp.1, 2000.
- [7] S. Hvidsten, E. Ildstad, J. Sletbak, and H. Faremo, "Understanding Water Tree Mechanism in the Development of Diagnostic Test Methods", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 5, No. 5, pp. 754-760, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1109/94.729699>
- [8] L. Bayan, "Water Tree in XLPE Cable". Penang, Malaysia, <http://tnbelectricaleng.blogspot.com/2009/12/water-tree-in-xlpe-cable.html>, Dec. 28, 2009.
- [9] S. Mohammadi, R. K. Far, "Failures detection in high voltage line by image processing," *World Academy of Science, Engineering and Technology 2012*, pp.

2055-2057, 2012.

- [10] K.W. Burkes, "Water Tree Analysis and On-Line Detection, Algorithm Using Time Domain Reflectometry", *Master's thesis*, Clemson University, [9], 2014.
- [11] V. Dubickas, "On-line time domain Reflectometry diagnostics of medium voltage XLPE power cables" (2006). *Licentiate Thesis, Royal Institute of Technology*, Stockholm, Sweden, [3], 2006.
- [12] W. Tao, K. Zhou, "The mechanism of water tree growth in XLPE cables based on the finite element method", *2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, pp. 1-4, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1109/ICHVE.2016.7800764>
- [13] Y. Sun, Y. Xu, W. Yang, J. Jin, X. Cao, "A study of water trees in polymers under different conditions", *2009 IEEE 9th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials*, pp. 224-227, 2009.
DOI: <https://doi.org/10.1109/ICPADM.2009.5252465>
- [14] J. Wang, X. Zheng, J. Wu, Y. Li, Z. Zhang, "Study on the transformation of electrical tree from water tree degradation in XLPE", *2012 IEEE 10th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials*, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.1109/ICPADM.2012.6318902>
- [15] Catalog of PRYSMIAN, "5-35kV 1/C TRXLE MV-90 POWER (Tape Shield), Medium Voltage Commercial & Industrial Cables", B111 2013-07-10 (2013)

오 용 택(Yong-Taek Oh)

[정회원]



- 1980년 8월 : 숭실대학교 전기공학과 (공학사)
- 1982년 2월 : 연세대학교 대학원 전기공학과 (공학석사)
- 1987년 8월 : 동대학원 전기공학과 (공학박사)
- 1987년 10월 ~ 1991년 3월 : 한국전력공사 정보처리처 과장
- 1991년 3월 ~ 2023년 8월 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부 교수

<관심분야>

전력/배전 계통, 전력품질해석, 보호협조

이 정 우(Jung-Woo Lee)

[정회원]



- 2009년 8월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2012년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2023년 8월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학박사)
- 2014년 2월 ~ 현재 : ㈜이선이엔지 교육개발팀 선임 연구원

<관심분야>

전력계통, 전력품질해석, 보호협조