

지중 케이블의 수트리에 대한 수학적 모델링 및 분석

이정우, 오용택*

한국기술교육대학교 전기공학과

Mathematical Modeling and Analysis for Water_ Tree of Underground Cables

Jung-Woo Lee, Yong-Taek Oh*

Department of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education

요약 수트리의 진행과정은 십수년이 걸리며 보통 매우 오래된 지중케이블에서 발견된다. 이러한 지중케이블들은 이미 접근이 어려운 곳에 있어 수트리를 검출하기 위해서는 많은 비용과 시간이 소요된다. 이러한 지중케이블의 유지보수 비용과 시간을 절감하기 위해서는 수트리가 진행된 지중케이블이 전력망에 미치는 영향을 분석할 수 있는 수학적 모델링이 필요하고, 이를 이용한 수트리 탐지 기술개발이 매우 필요한 실정이다. 본 논문에서는 수트리가 포함된 XLPE 케이블 대한 수학적 모델링을 하고자 수트리의 복잡한 구조를 Vented tree의 확인된 특정 패턴 2가지를 기준으로 가정하여 단순화 하였다. 그리고 수트리의 발달에 따른 케이블 절연층의 캐패시턴스 및 레지스턴스를 계산 및 분석하기 위해 matlab으로 시뮬레이션을 실시하였으며, 모델링의 유용성을 검증하기 위해서 참고문헌 Burkes 논문의 케이블 데이터를 동일하게 적용하였다. 시뮬레이션 결과, 캐패시턴스 크기의 변화는 케이블에 수트리 영역이 절연층에 95%까지 진행 되었을 때 정상대비 약 0.025×10^{-13} [Farads/mm] 증가됨을 확인하였다. 레지스턴스 값의 경우 정상대비 약 0.5×10^{16} [ohm/m] 정도 감소되는 것을 확인하였다. 따라서, Burkes 논문의 물리적 모델링 시뮬레이션 결과와 비교하였을 때 그 변화값이 매우 유사하여 본 논문에서 제시한 수학적 모델링의 유용성을 검증하였다.

Abstract Water trees can cause considerable damage to the performance of underground cables. They may form within the dielectric used in buried or water-immersed high voltage cables. They grow in a bush-like or tree-like form, often taking decades before causing damage to a cable's performance. They are usually found on very old underground cables, often in an inaccessible place. It is costly and time-consuming to detect water trees in underground cables. Tree detection technology, including mathematical modeling, can reduce the maintenance cost and time necessary for detecting these trees. To simulate detection of water trees in this study, a mathematical model of an XLPE cable and a water tree were developed. The complex water tree structure was simplified, based on two identified patterns of a vented tree. A Matlab simulation was performed to calculate and analyze the capacitance and resistance of a cable insulation layer, based on growth of a water tree. Capacitance size increased about 0.025×10^{-13} [Farads/mm] compared to normal when the tree area of the cable was advanced to 95% of the insulation layer. The resistance value decreased by about 0.5×10^{16} [ohm/m]. These changes and changes shown in a Burkes paper physical modeling simulation are similar. The value of mathematical modeling for detecting water trees and damage to underground cables has been demonstrated.

Keywords : Water-tree, Vented-tree, Matlab, Underground Cable, XLPE

본 논문은 2018학년도 한국기술교육대학교 교육연구진흥과제 연구비 지원에 의하여 연구되었음

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

email: yttoh@koreatech.ac.kr

Received January 30, 2020

Revised March 11, 2020

Accepted May 8, 2020

Published May 31, 2020

1. 서론

도시 기능의 고도화 및 다양화에 수반하여 전력공급의 신뢰도 향상은 매우 중요하다. 그러나 때때로 전력공급 설비의 사고는 정전사고로 이어지며, 이는 도시 기능을 마비시켜 사회적 물의를 발생시키기도 한다. 이런 관점에서 볼 때 가공 선로는 전력 공급의 신뢰성 면에서 그 한계가 노출되어 있는 반면에 지중 선로는 기상조건 및 주변 환경의 영향을 거의 받지 않아서 신뢰성이 높은 장점을 가지고 있다[1].

우리나라에서는 86년 아시안 게임, 88년 올림픽을 기점으로 약 30여 년간 전선 지중화 사업을 송전선로와 배전선로로 나누어 실시하고 있으며 2018년 기준으로 송전선로의 지중화율은 13.4%, 배전선로의 지중화율은 11.36% 이다[2].

그러나 신뢰성이 높은 지중 선로라도 케이블의 결함은 발생하며 이는 장기간의 전기적, 기계적, 열적, 그리고 화학적 스트레스로 인한 케이블의 열화현상 때문이다. 대표적인 열화요인인 수트리(water-tree)의 발생이유에는 케이블 제조결함, 시공결함, 환경적 요인 등이 있으며, 특히 환경적 요인은 장기간의 운전기간으로 인한 불가피한 수트리 발생의 주요 원인으로 볼 수 있다. 특히, 우리나라에서는 송배전용 케이블로 XLPE 케이블을 포설하기 시작한지 30년이 넘었으며, 이미 2000년을 기준으로 지중 케이블의 포설 후 10~20년 경과되어 일어난 케이블 열화 사고가 급증한 사례가 있었다[3].

수트리는 일반적으로 습도가 높은 환경(>65%)에 장기간 노출된 케이블에서 발생되며, 그 진행과정은 매우 느리고 길게는 십수년이 걸린다. 즉, 수트리는 시공 된지 매우 오래된 지중케이블에서 발견되며 이러한 지중케이블들은 이미 접근이 어려운 곳에 있어 이를 검출하기 위해서는 많은 비용과 시간이 소요된다. 그러므로 이러한 지중케이블의 유지보수 비용을 절감하기 위해서는 수트리가 진행된 지중케이블이 전력망에 미치는 영향을 분석할 수 있는 수학적 모델링이 필요하고, 이를 이용한 수트리 탐지 기술개발이 매우 필요한 실정이다.

본 논문에서는 수트리가 포함된 XLPE 케이블에 대한 수학적 모델링을 하고, 시뮬레이션하기 위해 Matlab 소프트웨어로 구현하였다. 시뮬레이션 결과를 COMSOL 소프트웨어의 물리적 모델링 시뮬레이션 결과와 비교하여 수학적 모델링의 유용성을 검증하였고, 수트리 영역의 증가에 따른 XLPE 케이블 절연층의 전기적 특성변화를 분석하였다.

2. 수트리(water-tree) 특성

수트리는 XLPE 케이블의 주요 열화 요인으로 알려져 있으며, 물과 전기의 복합작용에 의해서 발생한다. 케이블 절연층 내부에 유입된 잔유수분이 가압 운전상태에서 이온화 되고 이 이온에 전계가 가해져 진동을 하여 절연체 내부에 미세한 틈이 만들어지고 그 틈으로 수분이 표면장력으로 계속 스며들게 된다. 이러한 과정이 장시간 천천히 진행되면서 결국 절연층이 약화되어 절연파괴에 이르게 된다[1].

절연층에 수분이 존재하는 주된 원인으로는 절연체의 제작 시 내부에 잔유수분이 남게 되는 경우와 지중선로 운영 중 케이블 외부에서 내부로 침투하는 경우가 있다. 최근에는 폴리에틸렌 절연체를 가교하는 방법이 습식가교방법에서 건식가교방법으로 교체되어 제작과정에서 수분이 내부에 침투될 문제점은 해결되었다.

수트리는 진행되는 형상에 따라 아래와 같이 2가지로 나뉜다[1].

- ① Vented Tree : 트리의 시작점이 절연체의 내부 및 외부 절연층의 경계면이고 방향성이 있는 부채꼴 형태로 발전한다.
- ② Bow Tie Tree : 절연체 내부에 있는 금속입자와 같은 불순물이 있는 곳으로부터 양방향으로 나비넥타이 형태로 발전한다.

위 2가지 중 Vented Tree는 한쪽 방향으로 발전하기 때문에 케이블의 절연 수명에 가장 큰 영향을 끼친다. 즉, 수트리의 길이가 증가할수록 절연강도는 감소한다. 본 연구에서는 Vented Tree를 기준으로 수트리에 대한 수학적 모델링을 구현하였다.

3. 수트리 모델링을 위한 가정

수트리를 모델링함에 있어 가장 큰 어려운 점은 수트리 구조의 정확한 구조를 파악하기 어렵다는 것이다. 다수의 XLPE케이블에 수트리를 발생시키고자 동일한 실험 조건을 갖추어도 각각의 케이블마다 수트리는 서로 다른 구조로 진행된다[4]. 그래서 본 연구에서는 2가지의 확인된 Vented Tree의 패턴을 수트리 모델링에 적용하고자 가정하였다.

첫 번째 패턴은 Vented Tree의 발생점과 진행방향이 다. Vented Tree는 Fig. 1과 같이 케이블의 내부 및 외부 반도전층과 절연층의 경계점을 기점으로 발생하고 어

떠한 지점까지 직선적으로 진행된다. 이를 외도 트리와 내도 트리로 구분할 수 있으며 본 연구에서는 케이블의 절연층 최외곽 지점에서 외도 트리가 발생하여 케이블의 도체부 중심방향으로 진행된다는 가정을 모델링에 적용하였다.

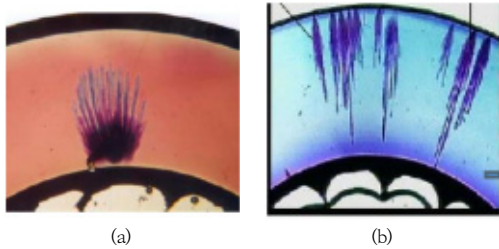


Fig. 1. Vented trees
(a) Growing from conductor to sheath [5], (b) Growing from sheath to conductor [6]

두 번째 패턴은 Vented Tree로 진행되는 다양한 수트리 중에 정상주파수(50-60Hz)의 전력망에서 발생하는 수트리 분포가 Fig. 2와 같이 타원형 구조로 표현할 수 있다는 것이다. 수트리는 말 그대로 발생지점으로부터 수분이 침투할 수 있는 미세한 가지들이 한 지점을 향해 장기간동안 진행되는 것을 말한다. 이러한 수트리의 수많은 가지들을 수학적 모델링에 적용하기에는 어려움이 있으므로 이를 해결하기 위해 수트리의 전체적인 모양을 유한요소법을 적용함으로써 단순한 타원형 구조의 경계 영역으로 표현하고 영역의 중심축을 따라 선형적으로 유전율이 변화한다고 가정하였다[7].

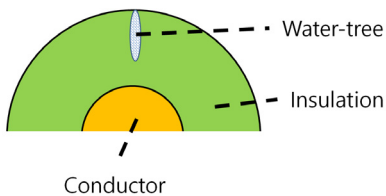


Fig. 2. Vented tree(Surfaced originated) Structure assumption

상기와 같은 2가지의 가정을 적용하여 수트리의 진행 면적에 따른 케이블 절연층의 캐패시턴스 및 레지스턴스의 변화값을 추정함으로써 수트리가 발생한 케이블의 전체 캐패시턴스 값과 레지스턴스 값을 계산하였다.

케이블의 임피던스 관점에서 수트리는 정상 케이블의 절연층에 병렬로 구성되는 캐패시턴스와 레지스턴스로서 정상 절연층과 다른 전기적인 유전율을 갖는 재질로 구성된다. 그러므로 그 값들은 Fig. 3과 같이 주 선로의 연결된 병렬 요소로 표현할 수 있다[8]. C_n 과 R_n 은 케이블

의 정상 절연층의 캐패시터와 레지스턴스를 의미하고, C_w 와 R_w 는 수트리의 캐패시턴스와 레지스턴스이다.

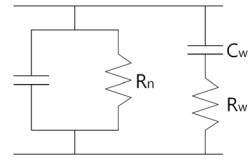


Fig. 3. The equivalent circuit of cable insulation with a water tree degradation

4. 수트리 캐패시턴스 계산 및 결과 분석

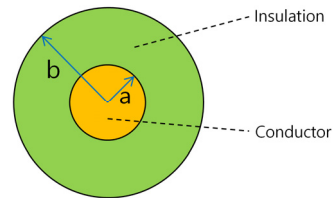


Fig. 4. Ring type Capacitor model of cable

케이블을 Fig. 4와 같이 2차원적인 단순한 원형 구조의 캐패시터로 표현하면 가우스 법칙을 이용하여 절연층의 캐패시턴스는 아래 Eq. (1)과 같이 계산할 수 있다.

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\lambda L}{\frac{\lambda}{2\pi\epsilon\epsilon_0} \ln \frac{b}{a}} = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 L}{\ln \frac{b}{a}} \quad (1)$$

where,

a is the radius of the conductor

b is the radius of the insulation

L is the length of the capacitor

ϵ is the relative permittivity of the insulation

ϵ_0 is the permittivity of the air

이를 응용하여 수트리가 포함된 케이블을 Fig. 5와 같이 두 개의 다른 비유전율을 가진 원형 캐패시터로 표현하면 캐패시턴스를 아래 Eq. (2)와 같이 계산할 수 있다.

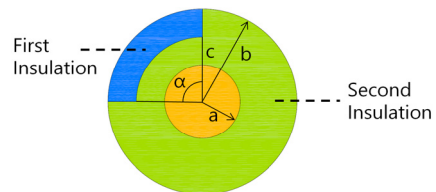


Fig. 5. Ring type Capacitor model of cable with two different permittivity

$$C_{total} = \frac{2\pi L}{\frac{\ln(\frac{c}{a})}{\epsilon_1 \epsilon_0} + \frac{\ln(\frac{b}{c})}{\epsilon_1 \epsilon_0 (1 - \frac{\alpha}{2\pi}) + \epsilon_2 \epsilon_0 \frac{\alpha}{2\pi}}} \quad (2)$$

where,

c is the radius of the layer, which the two different permittivity begins

ϵ_1 is the relative permittivity of the first insulation

ϵ_2 is the relative permittivity of the second insulation with water-tree

α is the angle of the range second insulation with water-tree

위와 같이 수트리가 포함된 케이블의 절연층 전체 캐패시턴스 값을 계산하기 위해서는 수트리의 비유전율을 결정할 필요가 있다. 수트리가 진행된 부분을 단순한 타원형구조로 표현함으로써 일정한 분포 밀도를 가지고 있다면 타원형 수트리 부분을 테두리 경계면과 내부 기저면으로 나눌 때, 테두리 경계면의 비유전율은 정상 XLPE 케이블의 절연층 비유전율 2.3과 같다고 할 수 있다. 그러므로 테두리 경계면의 비유전율은 2.3으로, 내부 기저면의 비유전율은 6.9로 결정하였다. 내부 기저면 비유전율 6.9는 Burkes의 논문을 참고하였다[9, 10].

수트리가 포함된 케이블의 캐패시턴스 및 레지스턴스를 계산하기 위해 적용한 케이블 데이터는 다음 Table 1과 같다.

Table 1. Properties of power cable model

Parameters	
XLPE conductor radius	12.37mm
XLPE insulation radius	17.65mm
XLPE relative permittivity	2.3
Water-tree relative permittivity	6.9
Water-tree conductivity	5×10^{-2}
Insulation conductivity	10×10^{-16}

본 연구에서는 참고문헌[13] Burkes 논문의 COMSOL 시뮬레이션 결과와 비교를 위해 동일한 케이블을 적용하였다. Fig. 6과 같이 Prysmian 사의 15kV 750kcmil tape shield XLPE 케이블 데이터를 적용하였으며, 이 케이블의 도선층 반경은 12.37mm 이고, 절연층의 반경은 17.65mm 이다[11]. 앞서 결정한 바와 같이 수트리의 내부 기저면 비유전율은 6.9이고, 테두리 경계면의 비유전율은 2.3이다.

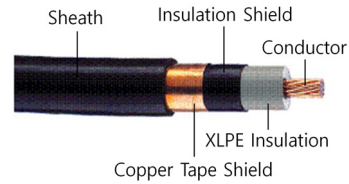


Fig. 6. Prysmian 15kV 750kcmil tape shield XLPE 1C cable [11]

수트리의 진행에 따른 케이블 캐패시턴스 값의 변화를 확인하고자 Eq. (2)를 Matlab으로 구현하였고 Table 1의 데이터를 적용하였다. 수트리의 증가는 절연층 면적의 5%부터 95%로 적용하였고, 증가폭은 10000 Step으로 적용하여 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션의 알고리즘 차트는 다음 Fig. 7과 같다.

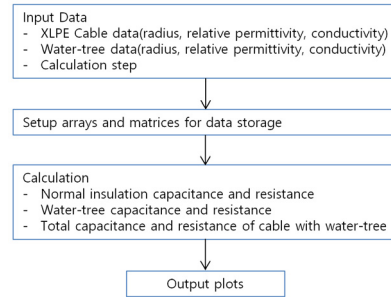


Fig. 7. Disposal diagnosis algorithm of simulation with Matlab

그런데 식 Eq. (2)를 이용하여 2개의 서로 다른 비유전율을 가진 수트리가 진행된 케이블 절연층의 캐패시턴스를 계산하기 위해서는 그 구조를 Fig. 8과 같이 보다 정확하게 표현할 필요성이 있다.

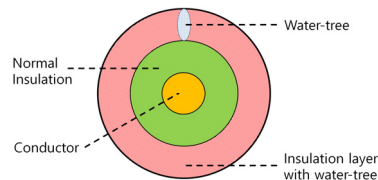


Fig. 8. Structure of Cable with water_tree

상기와 같이 외도트리가 발생한 케이블의 구조는 도체를 중심으로 분포된 정상 절연층과 절연층 최외곽 지점에서 진행된 수트리에 영향을 받는 절연층으로 나누어 표현할 수 있다. 여기서 수트리 자체의 캐패시턴스와 그에 영향을 받는 절연층의 캐패시턴스의 관계는 Fig. 3과

같이 병렬 구조로 볼 수 있다. 그러므로 비유전율이 6.9인 수트리의 타원형 면적에 따른 캐패시턴스 계산값과 그에 영향을 받는 절연층(비유전율 2.3)의 캐패시턴스 계산값은 병렬로 합성 할 수 있다.

그러나 참고문헌 [12]에 따르면 수트리가 진행됨에 따른 수트리와 수트리가 차지한 영역의 절연층과의 병렬합성 된 캐패시턴스 크기의 변화는 Fig. 9와 같이 수트리가 없는 정상케이블 일 때, 그 절연층의 반경이 증가됨에 따른 캐패시턴스 크기의 변화와 매우 유사함을 보여주고 있다[12].

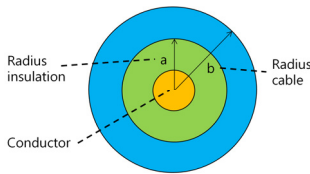


Fig. 9. Increased normal insulation layer over cable radius

그러므로 본 연구에서는 수트리가 진행된 케이블의 구조를 수트리가 포함된 절연층의 원형 영역과 정상 절연층의 원형 영역, 그리고 도체 영역으로 단순하게 표현하고, 수트리가 포함된 절연층의 비유전율을 6.9로 가정하여 계산하였다. 이를 캐패시턴스 등가회로로 표현하면 Fig. 10과 같이 수트리가 포함된 절연층 영역의 캐패시턴스 값 C_{water} 와 정상 절연층 영역의 캐패시턴스 값 C_{normal} 의 직렬 회로와 같다.

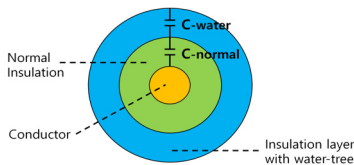


Fig. 10. Equivalent Circuit of Simulated Capacitance

Fig. 11은 정상 절연층 원형 영역의 감소에 따른 캐패시턴스값 변화를 보여주고 있다. Y축은 캐패시턴스 [Farads/m]를 나타내고, X축은 절연층 반경의 감소폭 [%] 정도를 나타낸다. Fig. 9에서 케이블의 반경 'b'를 고정하고 비유전율 2.3을 적용한 정상 절연층의 반경 'a'가 감소될 때 캐패시턴스 값이 증가됨을 확인하였다.

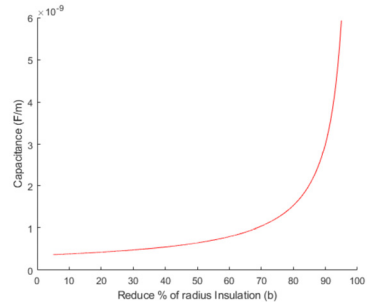


Fig. 11. Capacitance value of decreasing radius of cable insulation layer

Fig. 12는 수트리가 포함된 절연층 원형 영역이 증감됨에 따른 캐패시턴스값 변화를 보여주고 있다. 동일하게 케이블의 반경 'b'를 고정하고 비유전율 6.9를 적용한 절연층의 반경 'a'가 증가될 때 캐패시턴스 값이 감소됨을 확인하였다.

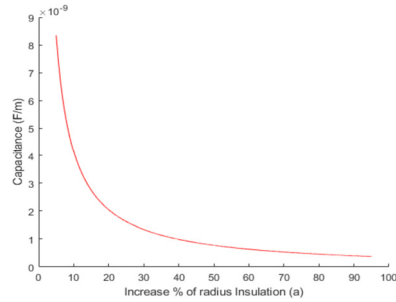


Fig. 12. Capacitance value of increasing radius of cable insulation layer including water_tree

상기와 같은 결과를 직렬 합성으로 케이블 절연층의 전체 캐패시턴스 값으로 계산하면 그 결과는 Fig. 13과 같다.

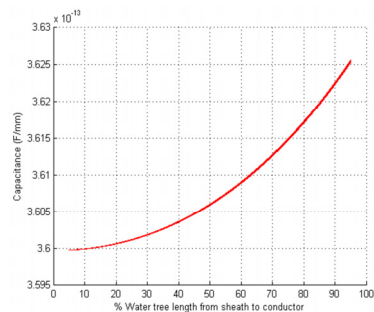


Fig. 13. 750kcmil tape shield cable capacitance with water tree growth by using Matlab

Fig. 13의 Y축은 캐패시턴스 [Farads/mm]를 나타내고, X축은 절연층 전체 면적에서 수트리를 포함한 절연층이 차지하는 [%] 정도를 나타낸다. 시뮬레이션 결과, 수트리가 절연층 면적의 5%부터 95%까지 확장된다고 할 때 케이블 전체의 캐패시턴스 값이 증가하는 변화가 있지만 그 단위가 나노보다 작은 10^{-13} 으로 매우 미세한 변화임을 알 수 있다.

Fig. 14는 참고문헌 Burkes 논문에서 COMSOL 프로그램으로 수트리를 포함한 동일한 케이블의 물리적 모델링을 시뮬레이션한 결과이다[13]. 그래프의 캐패시턴스 변화값을 비교하였을 때 본 연구의 Matlab 시뮬레이션 결과와 동일함을 확인할 수 있다.

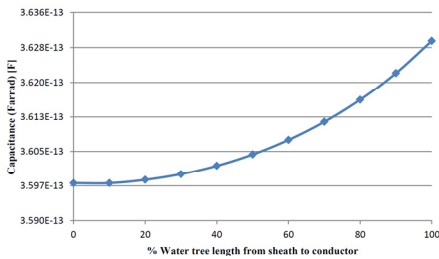


Fig. 14. 750kcmil tape shield capacitance from water tree growth by using COMSOL [13]

5. 수트리 레지스턴스 계산 및 결과

마지막으로 케이블에 수트리가 진행됨에 따라 변화되는 레지스턴스 값을 확인할 필요가 있다. 케이블의 저항값은 Table. 1의 도전율을 적용하여 아래 Eq. (3)와 같이 계산할 수 있다.

$$R = \frac{l}{\sigma A} \tag{3}$$

where,
 l is the length of the conductor
 A is the cross sectional area of the conductor
 σ is the conductivity

계산 결과, 케이블에서 수트리가 진행됨에 따라 Fig. 15와 같이 저항값은 매우 서서히 감소하고 있음을 확인할 수 있고, 만약 수트리가 100%까지 진행되면, 즉 수트리가 케이블의 도체까지 연결된다면 저항값은 0에 근사하도록 급격히 감소될 것으로 보인다.

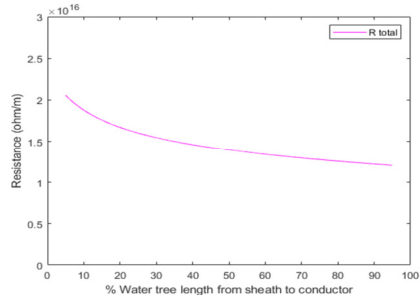


Fig. 15. 750kcmil Tape shield resistance from water tree growth

그러나 수트리가 도체까지 침투되기 전까지는 절연층 전체 저항값의 변화가 매우 미세하고 심지어 그 크기가 매우 크기 때문에 수트리 모델링에서는 레지스턴스 값을 제외한 캐패시턴스 변화 특성을 중심으로 해석하는 것이 타당할 것으로 사료된다.

6. 수트리 회로 모델링

상기와 같은 결과를 토대로 Fig.3에 제시한 수트리가 진행된 지중케이블 회로를 수정하면 다음 Fig. 16과 같이 더욱 단순한게 표현할 수 있다.

Fig. 16은 수트리가 케이블 절연층에 발생하여 진행된 정도가 30%, 80%일때를 비교한 것으로 C_w 는 수트리가 포함된 절연층의 영역의 캐패시턴스 크기이고 C_n 과 R_n 은 수트리가 침범하지 못한 정상 절연층의 캐패시턴스 크기와 레지스턴스 크기를 나타낸다. 즉, 수트리가 포함된 케이블의 회로는 변화가 거의 없는 기가 Ω 이상의 병렬저항과 수트리의 진행 정도에 따라 서로 상반되게 가변되는 직렬 캐패시턴스 요소로 모델링할 수 있다.

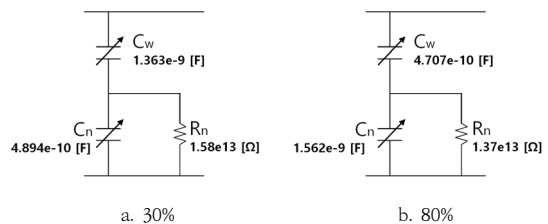


Fig. 16. Model of cable insulation with water_tree

7. 결론

현재 꾸준히 시행되고 있는 전선 지중화 사업으로 지중케이블은 전력망에 더욱 확산 보급되고 있으므로 전력산업의 관점에서 지중케이블에 발생하는 수트리 현상의 사전 검출 기술개발은 전력공급 신뢰도 향상을 위해서 매우 중요한 부분임을 시사하고 있다.

수트리의 발생 사유는 매우 무작위적이며 복잡한 구조를 가지고 있어 검출기술 또한 정형화 하기 어려운 실정이다.

본 논문에서는 수트리로 인해 발생하는 특성을 분석하고자 2개의 확인된 Vented Tree의 패턴을 가정으로 수학적 모델을 제시하고, 이를 Matlab으로 구현하였다. 그 결과, 수트리가 진행됨에 따라 해당 케이블의 캐패시턴스 및 레지스턴스의 변화 특성을 확인할 수 있었다.

차후, 본 연구에서는 PSCAD/EMTDC를 이용하여 수트리가 진행된 정도를 특정할 수 있는 케이블을 모델링하여 계통에 끼치는 영향을 분석하고자 한다.

References

- [1] 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.
- [2] YH. Beak, "Rational Direction of Cable Underground Project", Technical Report, Korea Industrial Development Institute, Korea, pp.1-3.
- [3] Korea Electric Power Corporation, "Analysis and Countermeasures of the Fault on Underground Distribution Line", 1999
- [4] Hwang, B.K. (1990) A New Water Tree Retardant XLPE. IEEE Transactions on Power Delivery, 5, 1617-1627. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/61.58008>
- [5] L. Bayan, "Water Tree in XLPE Cable," Penang, Malaysia, Dec. 28, 2009.
- [6] 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.
- [7] Z. Wang, P. Marcolongo, J. A. Lemberg, B. Panganiban, J. W. Evans, R. O. Ritchie, P. K. Wright, "Mechanical fatigue as a mechanism of water tree propagation in TRXLPE," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol.19, no.1, pp.321-330, February 2012.
- [8] M. Y. Chen, "A nonlinear frequency analysis based approach for power cable insulation fault detection", COMPEL, vol. 31, no. 2, pp. 369-386, 2012.

- [9] K. W. Burkes, E. Makram, and R. Hadidi, Proceedings of the 2016 COMSOL Conference in Boston, 2016.
- [10] M. Alsharif, P. A. Wallace, D. M. Hepburn, and C. Zhou, Proceedings of the 2012 COMSOL Conference in Milan, 2012.
- [11] Catalog of PRYSMIAN, "5-35kV 1/C TRXLE MV-90 POWER (Tape Shield), Medium Voltage Commercial & Industrial Cables", B111 2013-07-10 (2013)
- [12] Q. Chen, "Capacitance of Water Tree Modeling in Underground Cables", Journal of Power and Energy Engineering, 2014, 2, 9-18
DOI: <http://dx.doi.org/10.4236/jpee.2014.211002>
- [13] 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.

이 정 우(Jung-Woo Lee)

[정회원]



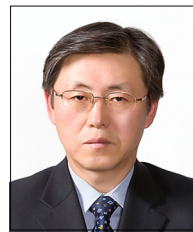
- 2009년 8월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2012년 2월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2017년 8월 ~ 현재 : 동대학원 전기공학과 박사과정 수료
- 2014년 2월 ~ 현재 : ㈜이선이엔지 교육개발팀 선임 연구원

<관심분야>

전력계통, 전력품질해석, 보호협조

오 용 택(Yong-Taek Oh)

[정회원]



- 1980년 8월 : 숭실대학교 전기공학과 (공학사)
- 1982년 : 연세대학교 대학원 전기공학과 (공학석사)
- 1987년 : 동대학원 전기공학과 (공학박사)

- 1987년 ~ 1991년 : 한국전력공사 정보처리처 과장
- 1991년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부 교수

<관심분야>

전력/배전 계통, 전력품질해석, 보호협조