

전력 케이블의 수트리 발생여부 추정에 관한 연구

이정우, 오용택*

한국기술교육대학교 전기공학과

A Study on Estimation of Water_tree Occurrence in Power Cables

Jung-Woo Lee, Yong-Taek Oh*

Department of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education

요약 본 논문에서는 케이블의 수트리 발생여부 및 확산 정도를 추정하는 시뮬레이션을 위해서, VHF(Very High Frequency) 기법을 적용하여 전력 케이블에 고주파수의 서지펄스 전류원을 인가할때 응답되는 전압파형을 분석하였다. 시뮬레이션은 PSCAD/EMTDC를 사용하여 진행하였고, 수트리가 발생한 XLPE 케이블을 구현하고자 Matlab으로 계산된 수트리의 회로정수를 적용하였다. 모델링된 케이블에 10 [kA] 크기의 서지 전류원을 연결하여 고주파수의 서지 펄스를 인가하였을 때, 정상 케이블에서의 응답되는 전압파형과 수트리가 포함된 케이블의 응답 전압파형을 비교하였다. 그 결과, 전압의 크기가 차이나는 포인트들을 확인할 수 있었고, 서지펄스의 주파수 크기에 따라 전압 편차의 크기가 변화됨을 확인할 수 있었다. 그중에서 360[kHz]의 서지펄스에서 가장 큰 차이가 확인되어 시뮬레이션을 위한 기준 VHF로 선정하였고 케이블의 수트리 확산정도를 5[%]에서 95[%]까지 변경하며 인가하였을 경우, 응답되는 전압파형에서 정상 케이블 대비 발생하는 전압 편차 추이를 분석할 수 있었다. 그리고 이러한 전압 편차 추이를 Matlab의 Curve Fitting Function에 대입하여 최대 편차값이 확인 될 경우 케이블에 발생된 수트리의 확산정도를 추정할 수 있는 함수를 도출하였다.

Abstract In this study, a very-high-frequency (VHF) technique was applied to analyze the voltage waveform response to a high-frequency surge pulse current source for a simulation to estimate the occurrence and progress of the water treeing in a power cable. Simulation was performed using PSCAD/EMTDC, and the circuit constant of water treeing was calculated by Matlab and applied to implement an XLPE cable in which water treeing occurs. A high-frequency surge pulse was applied by connecting a surge current source of 10 kA to the modeled cable. The response voltage waveform of a normal cable and a cable with water treeing were compared. As a result, it was possible to check the points where the magnitude of the voltage was different, and it was confirmed that the magnitude of the voltage deviation was changed according to the magnitude of the frequency of the surge pulse. The biggest difference was found in the surge pulse of 360 kHz, so it was selected as the reference VHF for simulation. It was possible to analyze the voltage deviation trend that occurred in the waveform compared to the normal cable. By substituting this voltage deviation trend into Matlab's curve fitting function, a function that can estimate the progress of the water treeing in a cable was produced when the maximum deviation value was confirmed.

Keywords : Water Tree, XLPE Cable, Surge Generator, VHF, PSCAD/EMTDC

본 논문은 2020학년도 한국기술교육대학교 교육연구진흥과제 연구비 지원에 의하여 연구되었음

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

email: ytoh@koreatech.ac.kr

Received February 3, 2022

Revised March 11, 2022

Accepted April 1, 2022

Published April 30, 2022

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].

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 시작하지 30년이 넘었으며, 이미 2000년을 기준으로 지중 케이블의 포설 후 10~20년 경과되어 일어난 케이블 열화 사고가 급증한 사례가 있었다[2].

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]. 수트리의 확산으로 인한 전력 케이블의 절연파괴는 결국 계통의 정전을 야기하며, 이는 수리 및 복구에 큰 경제적인 비용을 초래한다. 따라서 전력케이블의 절연체 내에 형성되는 수트리의 발생여부 및 확산 정도를 검출할 수 있는 효율적이고 정확한 케이블 진단 기술의 개발이 요구된다[3].

본 논문에서는 이전에 진행된 Matlab 기반 Water_tree 수학적 모델링 결과[4]를 PSCAD/EMTDC에 적용하여, 수트리가 포함된 XLPE 케이블의 특성을 분석하였다. VHF (Very High Frequency) 기법을 활용하여 특정 고주파수의 서지 전류를 인가할 때 발생하는 정상 케이블과 수트리가 포함된 케이블의 전압 응답파형 차이를 확인하였다. 또한 수트리의 확산정도에 따른 정상 케이블과의 편차 추이를 분석하여 케이블에 수트리가 발생할 경우 그 확산 정도를 추정할 수 있는 함수를 도출하였다.

2. 본론

2.1 수트리 회로정수 계산

본 연구에서는 수트리가 포함된 XLPE 케이블의 특성 분석을 위해 PSCAD/EMTDC를 사용한 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션에 사용된 케이블의 수트리에 대한 회로정수는 Matlab을 이용하여 계산하였으며 적용한 케이블 데이터는 다음 Table 1과 같다. Prysmian 사의 15[kV] 750[kcmil] Tape shield XLPE 케이블 데이터를 적용하였으며, 이 케이블의 도선층 반경은 12.37[mm] 이고, 절연층의 반경은 17.65[mm] 이다[5]. 수트리의 내부 기저면 비유전율은 6.9이고, 케이블의 정상 절연층의 비유전율은 2.3이다[6].

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}

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 증가회로로 표현하면 Fig. 1과 같이 수트리가 포함된 절연층 영역의 캐패시턴스 값 C_{water} 와 정상 절연층 영역의 캐패시턴스 값 C_{normal} 의 직렬 회로와 같다[6].

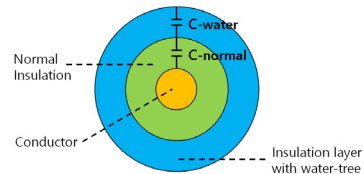


Fig. 1. Equivalent Circuit of Simulated Capacitance

상기와 같은 과정을 통해 수트리가 포함된 케이블 절연층의 전체 캐패시턴스 값을 계산하면 그 결과는 Fig. 2과 같다.

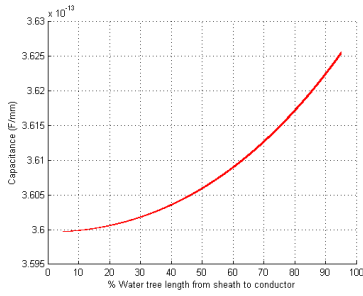


Fig. 2. 750kcmil tape shield cable capacitance with water tree growth by using Matlab

이를 토대로 Fig. 3과 같이 수트리가 포함된 케이블의 회로를 모델링하면, 변화가 거의 없는 기가옴 이상의 병렬저항과 수트리의 확산정도에 따라 서로 상반되게 가변되는 직렬 캐패시턴스 요소로 구성할 수 있다.

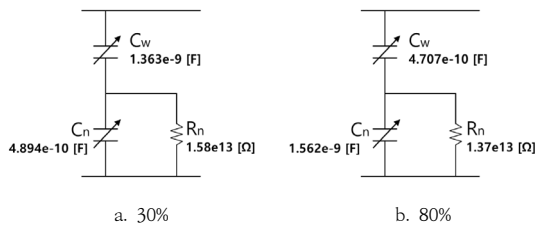


Fig. 3. Model of cable insulation with water_tree

Fig. 3은 수트리가 케이블 절연층에 발생하여 확산된 정도가 30%, 80% 일때를 비교한 것으로 C_w 는 수트리가 포함된 절연층의 영역의 캐패시턴스 정수이고 C_n 과 R_n 은 수트리가 침범하지 못한 정상 절연층의 캐패시턴스 정수와 레지스턴스 정수를 나타낸다[4].

본 논문에서는 이와 같이 수트리가 차지하는 절연층의 면적, 즉 수트리의 확산정도 [%]에 따른 각각의 회로 정수들을 계산하여 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 회로 모델링에 적용하였다.

2.2 PSCAD 모델링

케이블 절연층에서 수트리의 면적이 확장됨에 따라 케이블 전체의 캐패시턴스 값은 아주 미세하게 증가하는 변화를 보인다. 본 논문에서는 이러한 미세한 변화의 크기에 따른 수트리의 확산정도를 분석하기 위해 VHF(Very High Frequency)를 적용하였다. 케이블에 고주파수 서지전류원을 인가하여 응답되는 전압파형을 확인하였고, 수트리가 없는 정상 케이블과 수트리가 포

함된 열화 케이블 간의 차이를 분석하였다. 아래 Fig. 4와 같이 PSCAD/EMTDC를 사용하여 케이블에 서지 전류원을 인가하는 회로를 모델링하였고 수트리의 확산정도에 따른 캐패시턴스 값을 변경하며 시뮬레이션을 실시하였다.

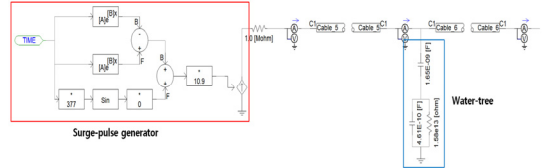


Fig. 4. VHF Surge Pulse Generator System

서지펄스 발생기는 PSCAD의 표준 서지 파형(Standard Surge Waveforms)을 참고하여 구성하였으며[7], 아래 Eq (1)과 같이 서지펄스를 모델링하는 공식의 파라미터 α , β , k 값을 조정하여 10[kA]의 크기를 가진 서지펄스 전류원의 주파수 크기를 변경하며 시뮬레이션에 적용하였다[8].

$$I(t) = k(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (1)$$

where, k is controls the magnitude of the pulse, α , β is controls the frequency of the pulse.

서지펄스는 0부터 시작하도록 설정하였으며, 전류원으로 인해 응답되는 케이블의 전압파형을 측정하도록 구성하였다.

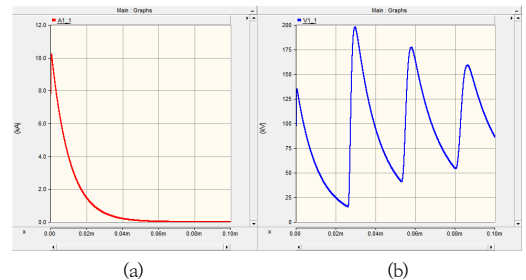


Fig. 5. 360kHz Surge pulse and voltage response waveform without Water_tree
(a) 360kHz surge pulse, (b) Voltage response waveform

케이블은 2.1절에 제시한 Table 1의 데이터를 적용하여 모델링하였으며, 케이블을 2구간으로 나누어 수트리의 발생지점 거리를 조정할 수 있도록 하였다.

상단의 Fig. 5 (a)는 360[kHz] 주파수를 적용한 10[kV]의 서지 전류원 파형이고, 이를 정상 케이블에 인가하였을 때 응답되는 전압파형을 Fig. 5 (b)와 같이 확인할 수 있다.

2.3 시뮬레이션을 위한 VHF 선정

수트리가 진행된 열화 케이블의 캐패시턴스 값은 정상 케이블의 캐패시턴스 값과 나노보다 작은 10^{-13} 단위로 미세한 차이이지만, 고주파수 서지펄스를 인가하면 임피던스 값의 변화로 인해 수트리가 있는 케이블과 정상 케이블에서 각각 응답되는 전압파형을 비교할 수 있다. 아래 Fig. 6은 정상 케이블(V1_1)과 수트리 30[%]를 적용한 케이블(V2_1)에 1300[kHz]의 고주파수 서지펄스를 인가하였을 때 결과를 나타낸 것으로, Fig. 6(b)는 Fig. 6(a)의 동그라미로 표시한 부분을 확대한 그래프이다. 이와 같이 정상 케이블과 수트리를 적용한 케이블에 서지펄스를 인가하였을 때 응답되는 전압파형을 비교하면 전압크기의 차이가 존재하는 시간대들이 존재하며 Fig. 7은 가장 큰 차이를 가진 구간을 나타낸 것이다.

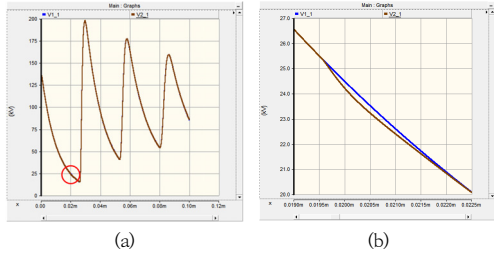


Fig. 6. Voltage response waveform to 1300[kHz] surge pulse

- (a) Overall shape of the voltage response waveform.
- (b) Zoomed in the voltage response waveform

본 논문에서는 상기와 같이 정상 케이블의 응답파형과 수트리가 적용된 케이블의 응답파형을 비교하여 가장 큰 편차가 나타나는 주파수를 선정하기 위해 Fig. 7과 같이 동일한 조건에서 주파수의 크기만을 변경하며 시뮬레이션을 진행하였다. 그 결과, Table 2와 같이 360[kHz]의 서지펄스에서 가장 큰 차이값을 나타내어, 본 연구에서는 수트리의 확산정도를 분석하기 위한 서지펄스의 주파수를 360[kHz]로 선정하였다.

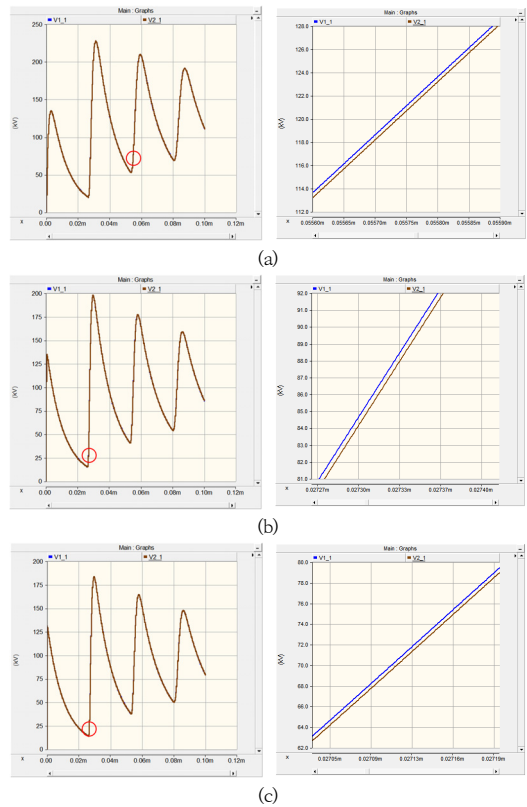


Fig. 7. Voltage response waveforms to different surge pulse

- (a) Response to 90[kHz] surge pulse, (b) Response to 360[kHz] surge pulse, (c) Response to 25000[kHz] surge pulse

Table 2. Maximum difference in voltage according to VHF

VHF [kHz]	Time_Domain [ms]	Max Difference [kV]
45	0.0842	0.35582
90	0.0837	0.39400
70	0.0557	0.43346
210	0.0552	0.47031
360	0.0273	0.49686
495	0.0271	0.42490
1300	0.0272	0.47524
2330	0.0272	0.47183
3290	0.0272	0.46750
9250	0.0272	0.46792
16666	0.0272	0.46801
25000	0.0272	0.46803

2.4 수트리 면적에 따른 전압응답파형의 변화

앞서 살펴본 바와 같이, 수트리를 적용한 케이블에 고주파 서지펄스를 인가할 경우 정상 케이블과 비교하여 전체적으로 동일한 전압파형으로 응답하지만 매우 극히 짧은 시간대에 전압크기의 차이가 발생하는 구간이 존재하는 것을 확인할 수 있었다. 본 논문에서는 이러한 부분을 이용하여 동일한 조건에서 케이블 내부의 수트리 확산정도 [%]만을 증가시킬 때, 발생하는 정상 케이블과의 전압차이를 분석하여 그 변화량을 확인하고자 하였다. Fig. 4의 회로에 10[kA], 360[kHz] 서지펄스를 0.1[ms] 동안 인가하도록 설정하고, 케이블의 길이는 2[km]로 설정하였다. 수트리가 발생한 위치는 1.5[km]로 지정하였으며, 수트리의 확산정도는 Fig. 3과 같이 케이블 절연층 면적에서 수트리가 차지하는 [%]정도에 따른 케이블 전체의 캐패시턴스 값을 Fig. 4의 수트리 회로에 적용하여 시뮬레이션을 실시하였다.

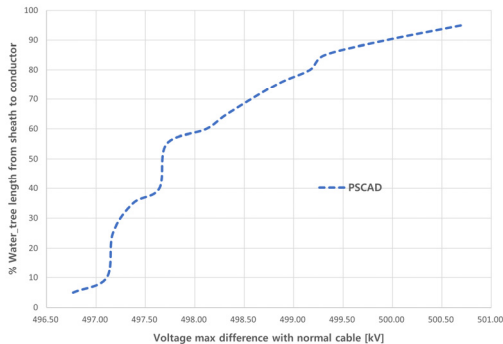


Fig. 8. Maximum difference in voltage according to Water-tree growth

시뮬레이션 결과, Fig. 8과 같이 수트리의 확산정도가 증가됨에 따라 정상 케이블의 전압 응답파형과 비교했을 때 발생하는 전압차이 값이 증가됨을 확인할 수 있었다. 수트리가 진행된 케이블과 정상 케이블간의 전압차이는 기본적으로 수트리의 확산정도와 별개로 약 400[V]정도 되지만, 세부적인 확산정도에 따른 전압차이의 증가량은 0.5[V] ~ 1[V] 내외로 매우 작은 변화량임을 알 수 있다.

2.5 수트리 확산정도 판별을 위한 함수 도출

상기의 시뮬레이션 결과, 수트리의 확산정도를 5[%]에서 95[%]까지 증가시키면 정상 케이블과의 최대 전압편차 추이는 약 496[V]에서 500[V]까지 증가됨을 확인할 수 있다. 이러한 최대 전압편차 추이를 이용하면 열화

케이블의 수트리 확산정도를 판별할 수 있으므로 최대 전압편차의 크기가 확인 될 경우 이를 이용한 수트리의 확산정도 [%]를 계산할 수 있는 함수를 Matlab의 Curve Fitting Function을 사용하여 Eq (2)와 같이 도출하였다[7].

$$f(x) = finverse(p_1x^4 + p_2x^3 + p_3x^2 + p_4x) \quad (2)$$

where, $p_1 = 7.917e-08$, $p_2 = -7.707e-06$, $p_3 = 0.0002901$, $p_4 = 0.01432$, $p_5 = 496.8$, x is Maximum difference in voltage according to Water-tree growth

하단의 Table 3은 Eq (2)에 PSCAD로 시뮬레이션한 Fig. 8의 전압편차 값들을 입력하여 수트리의 확산정도 [%]를 Matlab으로 계산한 결과를 정리한 것이다. 55[%] 이하에서는 계산결과의 오차가 커서 신뢰성이 떨어지지만 그 이상치에서는 오차율이 낮아 정확도가 높은편임을 알 수 있다.

Table 3. Maximum difference in voltage according to VHF

Water-tree depth [%]	Max Difference [kV]	Matlab [%]	Error [%]
5	0.4968	4.11	17.77
10	0.4971	15.08	-50.75
25	0.4972	17.66	29.37
35	0.4974	28.25	19.29
40	0.4976	43.93	-9.82
55	0.4977	47.49	13.66
60	0.4981	61.53	-2.55
65	0.4983	66.59	-2.45
75	0.4988	75.62	-0.82
80	0.4992	80.36	-0.45
85	0.4993	82.23	3.26
90	0.4999	89.00	1.12
95	0.5007	95.68	-0.72

Fig. 9는 PSCAD 시뮬레이션 결과와 Matlab 계산 결과를 비교하기 위한 그래프로서, 수식으로 계산한 결과의 값이 시뮬레이션 데이터와 유사하지만 더욱 선형적인 증가량을 보여주고 있음을 확인할 수 있다. 이는 Eq (2)가 시뮬레이션 데이터양에 따라 도출된 4차 다항식으로서, Curve Fitting에 사용된 데이터의 양이 작아 비교적 작은 차수의 수식으로 도출이 되었기 때문이다.

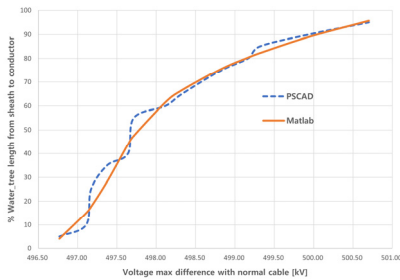


Fig. 9. Maximum difference in voltage according to Water-tree growth

3. 결론

전력 케이블의 열화현상인 수트리의 발생여부를 확인하고 그 확산정도를 파악할 수 있다면, 해당 케이블의 유지보수 시기를 효율적으로 선정할 수 있을 것이며 이는 곧 시간과 비용의 절감이라는 효과를 가져올 것이다.

본 논문에서는 VHF 기법을 적용하여 전력 케이블에 고주파수의 서지 전류 인가 시 응답되는 전압파형을 분석하여 케이블 내부에 수트리 발생여부 및 확산정도를 추정하는 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션은 PSCAD/EMTDC를 사용하여 진행하였고, 수트리가 발생한 XLPE 케이블을 구현하고자 Matlab으로 계산된 수트리의 회로정수를 적용하였다. 모델링된 케이블에 서지 전류원을 연결하여 10 [kA] 크기의 고주파수 서지를 인가하였을 때, 응답되는 전압파형에서 정상 케이블과 수트리가 포함된 케이블간에 차이가 발생하는 것을 확인하였다. 그 중 360[kHz]의 서지펄스에서 가장 큰 차이가 확인되어 시뮬레이션 기준 주파수로 선정하였고 케이블의 수트리 확산정도를 5[%]에서 95[%]까지 변경하며 인가하였을 경우, 응답되는 전압파형에서 정상 케이블 대비 발생하는 전압 편차 추이를 분석할 수 있었다. 그리고 이러한 전압 편차 추이를 활용하여 최대 편차값이 확인 될 경우 케이블에 발생한 수트리의 확산정도를 추정할 수 있는 함수를 도출하였다.

차후, 본 연구에서는 수트리의 확산정도를 세밀한 단위로 변경하며 시뮬레이션을 수행하고 그에 따라 얻어지는 전압편차 데이터의 양을 매우 증가시켜서 고차식의 다항식을 도출하여 수트리의 확산정도를 계산함에 있어 그 정확도를 높이고자 한다. 또한, 수트리의 확산정도를 파악할 수 있는 다른 기법들을 PSCAD/EMTDC 모델링에 적용하여 시뮬레이션을 진행하고, 그 결과를 비교분석하여 각각의 기법들에 대한 정확성을 확인하고자 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] Korea Electric Power Corporation, "Analysis and Countermeasures of the Fault on Underground Distribution Line", 1999
- [3] J. Wang, P.E.C. Stone, Y-J. Shin, and R.A. Dougal, IET Singnal Processing 4, 395 (2010)
- [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.2020.21.5.516>
- [5] Catalog of PRYSMIAN, "5-35kV 1/C TRXLE MV-90 POWER (Tape Shield), Medium Voltage Commercial & Industrial Cables", B111 2013-07-10 (2013)
- [6] 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>
- [7] IEC 61000-4-5, Electromagnetic compatibility (EMC), Testing and measurement techniques - Surge immunity test, pp. 8~11, 2005.
- [8] C62.41.2-2002 - IEEE Recommended Practice on Characterization of Surges in Low-Voltage (1000 V and Less) AC Power Circuits, 2003
DOI: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2003.94254>
- [9] MathWorks, Curve Fitting Toolbox, Available From: <https://kr.mathworks.com/help/curvefit/getting-started-with-curve-fitting-toolbox.html>

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 : ㈜이션이엔지 교육개발팀 선임 연구원

<관심분야>

전력계통, 전력품질해석, 보호협조

오 용 택(Yong-Taek Oh)

[정회원]



- 1980년 8월 : 숭실대학교 전기공학
학과 (공학사)
- 1982년 2월 : 연세대학교 대학원
전기공학과 (공학석사)
- 1987년 8월 : 동대학원 전기공학
과 (공학박사)
- 1987년 10월 ~ 1991년 3월 :
한국전력공사 정보처리처 과장
- 1991년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신
공학부 교수

<관심분야>

전력/배전 계통, 전력품질해석, 보호협조