

VLF를 활용한 전력케이블 진단 시뮬레이터 구현

김국* **, 어익수*

*호남대학교, **한국전기안전공사
e-mail:soup@kesco.or.kr

Implementation of Power Cable Diagnostic Simulator using VLF

Kuk Kim* **, Ik-Soo Eo*

*Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Honam University
**Korea Electrical Safety Corporation

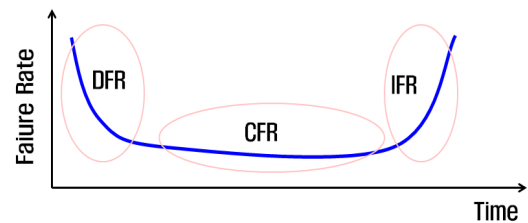
요약

최근, 국내 공장이나 지중에 설치되어 있는 전력 케이블은 제조과정, 설치, 사용 중의 환경여건에 따라 사고가 발생할 수 있는 필연성을 갖고 있다. 전력 케이블에서 사고가 일어났을 때 막대한 경제적 손실과 사회적 혼란을 야기할 수 있어 이를 미연에 방지하고자 진단을 통한 케이블의 예방관리의 중요성이 증대되고 있다. 이에 본 논문에서는 현장에서 발생 될 수 있는 케이블의 설치나 제조결함, 경년열화로 문제가 될 수 있는 부분을 모의하여 진단시료 케이블을 제작하였고, 최근 도입되어 적용되고 있는 VLF(Very Low Frequency)장비를 사용하여 유전정접(tan δ ; TD), 부분방전(Partial Discharge ; PD)시험을 실시하였고, 0.1Hz 주파수를 갖는 VLF전원을 가압한 후 HFCT(High Frequency Current Transformer)를 이용한 부분방전과 AC(상용주파)내압 장비를 이용하여 가압한 후 PD측정을 수행하였다. 그 결과, VLF를 통한 2.0U₀ 전압에서 B, C상 결함시료에서는 내부 부분방전을 측정할 수 있었으며 A상 정상시료에서는 0.5~2.0U₀ 전압에서 모두 노이즈로 측정되었다. 또한, 상용주파수의 AC(60Hz) 내압장비를 통한 1.5U₀전압에서 측정하여 그 실효성을 검증하였다.

1. 서론

최근, 산업의 고도화로 전력수요가 급증하고 있으며, 이러한 수요를 감당할 수 있는 각종 대전력설비도 늘어나고 있다. 그런데 이러한 대전력설비들은 사고가 일어났을 때 큰 사회적 혼란과 막대한 경제적 손실을 초래할 수 있다. 이에 따라 전력을 안정적으로 공급할 수 있도록 전력 케이블에 대한 예방점검·진단은 필수적인 부분이 되었다. 이에 본 논문에서는 전력 케이블에서 예상되는 사고의 종류와 원리를 알아보고, 점검할 수 있는 진단방법을 소개하였으며 그 중, 최근 도입되어 사용되고 있는 VLF와 HFCT-PD를 통한 진단방법에 대해서 케이블 진단시료를 통한 시뮬레이터를 구현, 측정하여 DATA를 분석하여 비교해 보았다.

등 우발적으로 발생하는 결함으로 볼 수 있다. 대부분 케이블이 포설된 곳에서 지하의 상하수도 등의 공사가 이루어지는 경우, 부주의로 인하여 전력케이블에 물리적으로 손상을 발생시킨 경우가 전체 전력케이블 고장의 60% 정도를 차지하고 있다. 세 번째, IFR (Increasing Failure Rate)은 열화고장으로 케이블이 포설된 주변의 환경 및 운전조건에 관한 영향을 받는다[1].

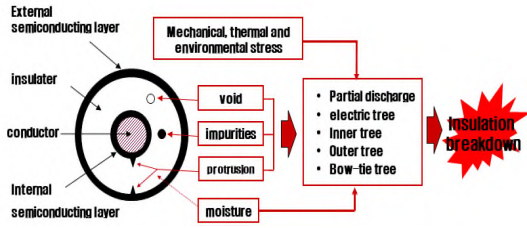


[그림 1] 케이블 수명 및 고장 분류

2. 전력 케이블의 열화 메커니즘

그림 1은 케이블의 사용기간과 이에 따른 고장현황을 보여주고 있다. 첫 번째, DFR(Decreasing Failure Rate)은 초기고장으로 케이블의 제작결함이나 시공불량이 주요한 원인이다. 두 번째, CFR(Constant Failure Rate)은 과부하나 자연재해

그림 2는 케이블의 절연과피의 과정을 보여주고 있다. 절연체 내의 공극, 내·외부 반도전층의 돌기가 형성되었을 때 절연체 내에 수분이 존재하면 전계차에 의해 수트리가 발생된다. 수트리가 성장하여 절연체를 관통하면 시간 경과에 따라 전도성 경로가 형성되고 마침내 전도성 전류가 이 경로를 통하여 흐르게 되면 발열과 함께 절연과피에 이르게 된다[2].



[그림 2] 절연과피 프로세스

3. VLF 절연열화 진단방법

VLF는 0.1Hz 극 저주파 특성을 갖는 AC 전원을 이용한 것으로 내전압(High Voltage Test), 유전정접(TD), 부분방전(PD) 진단이 있다. VLF TD는 절연체의 내부에 슈트리가 발생하면 절연저항이 감소되어 손실전류가 증가하게 되고, 이것은 $\tan\delta$ 의 증가로 나타나며, 이 변화의 측정을 통하여 절연체의 이상 징후를 진단한다. 그리고, VLF PD는 케이블 절연체 내부에 발생한 국부적 결함(절연체 내부 및 계면의 공극, 절연체 내부의 이물질, 절연체 표면 상처)에서 발생하는 부분방전량을 측정하여 결함 정도를 판단하는 것을 말한다[3].

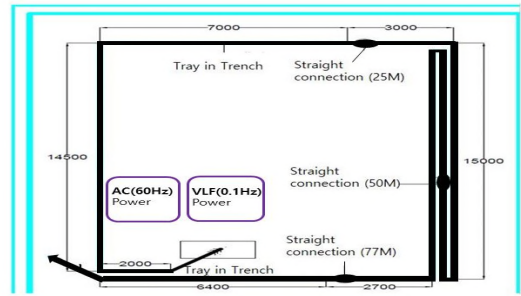
4. 시뮬레이터 구현 및 실험방법

4.1 시뮬레이터 구현

TEST용 시뮬레이터는 가로, 세로(10x15m)인 실험실에 케이블 시료를 A, B, C상 3가닥으로 XLPE 절연체를 갖는 FR CN/CO-W 60mm를 90m 이상으로 제작하였고, 그림 4와 같이 바닥 및 벽면 Tray를 이용한 공사방법으로 시공하였다. A상 케이블 정상시료이고, B상 시료는 케이블 헤드(CH ; Cable Head) 끝점에 외부 반도체층을 균일하지 않게 절개하여 자기용착 테이프 미처리하고 절연테이프로 처리하여 물에 침수시켜 놓고 접착력 떨어트려서 비정상적으로 구현하였다. C상 시료는 중간접속재를 이용하여 그림 3과 같이 제조결함을 모의 구현하였다. 25m지점은 중간접속재 접속 시, XLPE 절연체 6.6mm 중 2.2mm 남기고 칼로 손상시켜 자기용착테이프를 사용하지 않았으며, 구리침(Metal Needle)을 절연물에 삽입하고 약간 풀어내어 공극(Void)을 구현하였다. 50m, 77m지점은 중간접속재 접속 시, XLPE 절연체를 칼로 손상시키고, 구리침(Metal Needle), 철가루를 절연물에 삽입하고 자기용착테이프를 사용하여 접속하였다.



(a) 절연층 결함(25m) (b) 구리침 결함(50m) (c) 철가루 결함(77m)
[그림 3] 케이블 시료 결함

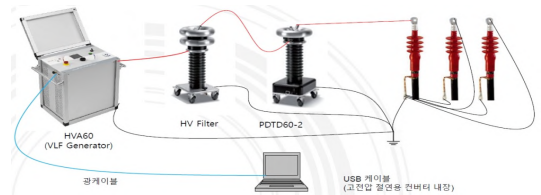


[그림 4] 실험 시뮬레이터 설치도

4.2 실험방법

(1) VLF TD, PD 측정

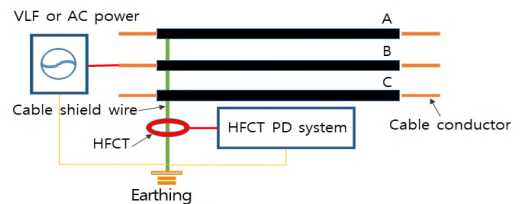
그림 5는 케이블의 VLF 측정방법이다. VLF 내전압장비에 HV Filter를 연결하고, PDTD 커플링 커패시터를 연결하고 측정하고자 하는 케이블에 진단케이블을 연결하여 전원을 인가한다.



[그림 5] VLF 진단 결선(b2 electronic GmbH)

(2) VLF를 통한 HFCT-PD 측정

케이블 시료에 대해서 VLF(0.1Hz)를 사용하여 $1.0U_0$, $1.5U_0$, $2U_0$ 까지 각각 가압을 하고 HFCT를 통하여 신호를 검출한 후 PD장비를 사용하여 부분방전 여부를 판단하는 방법으로 측정방법은 그림 6과 같다.



[그림 6] VLF or AC 전원을 통한 HFCT-PD 결선도

(3) AC내전압장비를 통한 HFCT-PD 측정

케이블에 VLF(0.1Hz)에서 그림 7의 AC(60Hz) 내전압장비로 변경하여 전압을 $0.5U_0$ 부터 서서히 인가하여 HFCT로 부분방전 측정하여 $2U_0$ 까지 실시한다.



[그림 7] AC 내전압 장비

5. 실험결과

5.1 VLF TD 실험결과

표 2는 VLF TD 측정 Data, 표 3은 판정 내용이다. 표 1의 한전기준으로 검토결과, B, C상 케이블은 DTD(1.5U₀-0.5U₀) 값이 1.10, 0.81로 분석되어 관심단계인 B로 최종 판정하였다.

[표 1] 케이블 tanδ 판정기준

| 판정기준 | TD [1.0U ₀] | DTD [1.5-0.5U ₀] | SIDEV [1.0U ₀] | Skirt [1.0U ₀] | 최종 판정구분 |
|--------|-------------------------|------------------------------|----------------------------|----------------------------|---------|
| A(정상) | ≤1.0 | ≤0.5 | | | |
| B(관심) | ≤2.0 | ≤1.2 | | | |
| C(요주의) | ≤6.0 | ≤6.0 | ≥0.10 | ≥0.30 | D(이상) |
| D(이상) | ≤10.0 | ≤12.0 | ≥0.20 | ≥0.60 | E(불량) |
| E(불량) | ≤27.0 | ≤60.0 | ≥0.70 | ≥2.20 | F(입박) |
| F(입박) | >1.0 | >60.0 | | | |
| 1차판정 | OR | | OR | | |
| | AND | | | | 2차판정 |

[표 2] 케이블 A, B, C tanδ Data

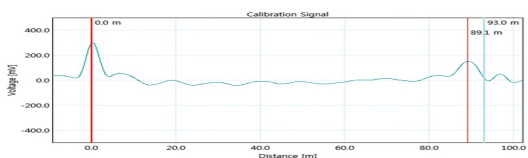
| 상 | TD[E-3] | V[kV] | I[μA] | C[nF] |
|---|---------|-------|-------|-------|
| A | 0.05 | 6.60 | 58.0 | 14.15 |
| | 0.15 | 13.19 | 117.0 | 14.15 |
| | 0.52 | 19.79 | 175.0 | 14.15 |
| B | 0.09 | 6.60 | 58.0 | 14.14 |
| | 0.22 | 13.19 | 117.0 | 14.14 |
| | 1.19 | 19.79 | 175.0 | 14.13 |
| C | 0.24 | 6.60 | 59.0 | 14.25 |
| | 0.29 | 13.19 | 118.0 | 14.25 |
| | 1.05 | 19.79 | 177.0 | 14.25 |

[표 3] 케이블 A, B, C tanδ Data 분석

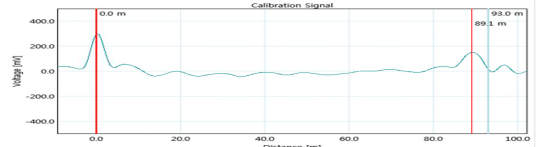
| 상 | TD [1.0U ₀] | DTD [1.5-0.5U ₀] | SIDEV [1.0U ₀] | Skirt [1.0U ₀] | 최종판정 |
|---|-------------------------|------------------------------|----------------------------|----------------------------|------|
| A | 0.15 | 0.47 | 0.005 | 0.001 | A |
| | A | A | - | - | |
| B | 0.22 | 1.10 | 0.005 | 0.001 | B |
| | A | B | - | - | |
| C | 0.29 | 0.81 | 0.016 | 0.007 | B |
| | A | B | - | - | |

5.2 VLF PD 측정결과

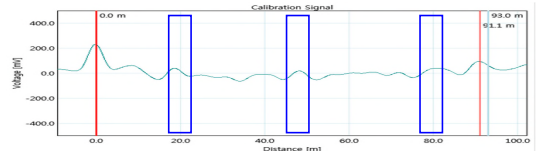
그림 8은 시뮬레이터 케이블의 VLF calibration 내용이다. 500pC로 케이블에 인가하여 조정하였고, A·B상은 89.1m, C상은 91.1m로 시료와 거의 오차가 없었으며 중간접속 부분은 20m, 45m, 80m로 실제 중간접속재의 위치와는 3~5m 정도의 오차를 보였다.



(a) A상 케이블 Calibration(89.1m)



(b) B상 케이블 Calibration(89.1m)



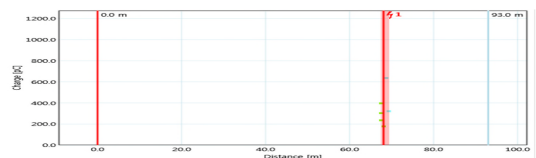
(c) C상 케이블 Calibration(91.1m)

[그림 8] A, B, C상 Calibration

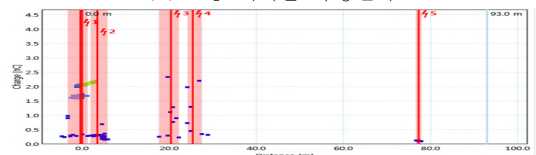
표 4와 그림 9는 VLF PD 측정결과로 C상은 접속재 부근(4,5,6)에서 B상은 (1)에서 내부 부분방전의 신호가 검출되었고, A상은 분석결과 Noise로 확인되었다.

[표 4] 케이블 PD 결함 data

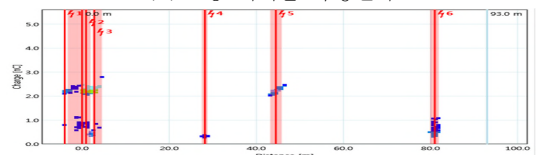
| 구분 | 거리[m] | 오차[m] | 방전량 | V[kV] | 결함종류 | |
|----|-------|-------|------|---------|------|----------|
| A | 1 | 68.1 | 1.97 | 344 pC | 13.2 | Noise |
| | 1 | 4.0 | 4.59 | 1.87 nC | 26.4 | Internal |
| | 2 | 3.5 | 3.93 | 1.02 nC | 26.4 | Corona |
| B | 3 | 20.4 | 4.59 | 900 pC | 26.4 | Noise |
| | 4 | 25.4 | 3.28 | 1.17 nC | 26.4 | Noise |
| | 5 | 77.3 | 1.31 | 112 pC | 26.4 | Noise |
| C | 1 | 4.0 | 1.42 | 1.99 nC | 19.8 | Corona |
| | 2 | 9.0 | 5.24 | 1.69 nC | 19.8 | Corona |
| | 3 | 2.8 | 1.97 | 1.80 nC | 19.8 | Corona |
| | 4 | 28.2 | 1.31 | 324 pC | 19.8 | Internal |
| | 5 | 44.5 | 2.62 | 2.2 nC | 26.4 | Internal |
| | 6 | 81.0 | 1.97 | 579 pC | 13.2 | Internal |



(a) A상 케이블 측정결과



(b) B상 케이블 측정결과



(c) C상 케이블 측정결과

[그림 9] A, B, C상 PD 측정결과

5.3 VLF를 통한 HFCT-PD 실험결과

VLF 내압장비를 연결한 상태에서 2.0U₀ 인가하여 C상 케

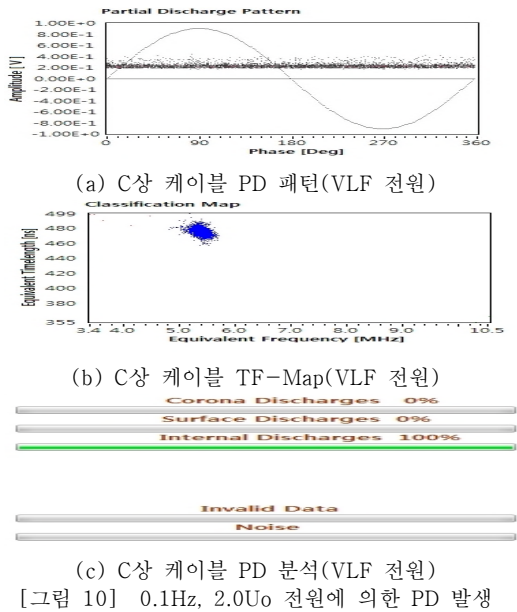
이들의 부분방전을 측정된 결과는 그림 10과 같다.

6. 결 론

본 논문은 현장모사형 케이블 진단시료를 통한 시뮬레이터를 제작하여 전력 케이블에서 발생할 수 있는 사고를 구현하여 VLF TD-PD와 VLF와 HFCT-PD 장비, AC 내압과 HFCT-PD 장비를 통하여 부분방전도 측정 하였다.

1) VLF TD는 A, B, C상 케이블 모두 TD(1.0U₀)는 정상, DTD(1.5U₀-0.5U₀)는 B상 1.10, C상 0.81로 분석되어 관심단계인 B로 최종 판정하였다. 이는 TD 값 만으로 판정해서는 안되며, DTD 등의 기준을 종합 분석하여 판정하는 것이 필요함을 알 수 있었다. VLF PD는 시료의 길이는 A·B상 89.1m, C상 91.1m로 제작 시료에 오차가 거의 없었으나, 중간 접속재의 위치와는 3~5m의 오차가 발생하는 것을 알 수 있었다. 또한, 0.5~2.0U₀까지 단계적으로 전원을 인가하여 A상은 1개의 결함 Cluster가 측정되었으나 분석결과 Noise, B상은 5개의 결함 Cluster 중 1번이 내부 부분방전, C상은 6개의 결함 Cluster 중 4,5,6번을 내부 부분방전으로 각각 판정하였고, 이는 시료 결함에 약 5m 이내로 VLF PD를 통한 케이블의 결함 위치를 찾는 데 실효성이 있음을 알 수 있었다.

2) 그리고, 각 케이블에 1.0, 1.5, 2.0U₀를 VLF를 통하여 인가하고 HFCT를 사용 부분방전 측정을 한 결과, B, C상 케이블은 2.0U₀에서 내부 부분방전이 발생하였고, AC 내전압으로 1.5U₀를 인가하여 내부 부분방전의 결과를 얻어 VLF를 이용하는 것에 대한 실효성을 검증하였다. 활선상태에서는 1.0U₀ 고정전원에 의해서만 부분방전을 측정하는 점(내부 결함에 대한 부분방전이 발생되지 않을 수 있음)과 장비 연결 시의 감전, 정전 등의 위험성 등이 존재한다. 이 때문에 사선상태에서 부분방전을 실시하고자 할 때 AC(60Hz) 내전압이 가지고 있는 전원용량, 장비 무게 등의 제약성을 VLF(0.1Hz)를 전원으로 사용하여 효과적으로 극복할 수 있음을 알 수 있었다.

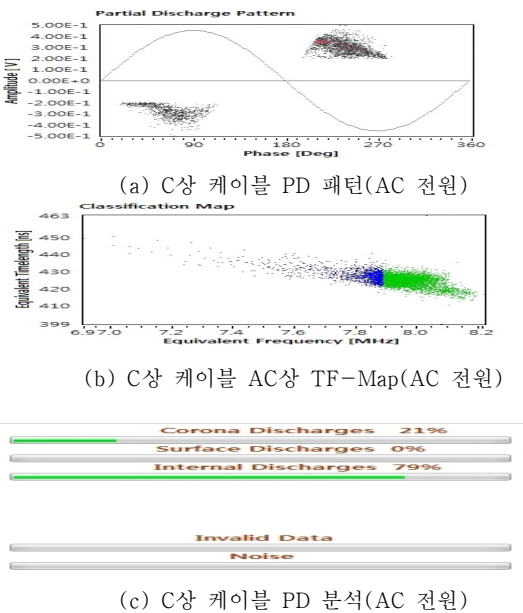


[그림 10] 0.1Hz, 2.0U₀ 전원에 의한 PD 발생

그림 10(b) TF-map의 5~6MHz 대역에서 내부 부분방전(Internal Discharge)으로 확인하였고, VLF 내압장비를 통해 HFCT 부분방전을 측정하는 방안의 실효성을 검증하였다.

5.4 AC내압을 통한 HFCT-PD 실험결과

VLF 내압장비와 HFCT-PD 측정장비를 통한 부분방전의 정확성 여부를 확인하기 위해 상용주파수인 60Hz 1.0, 1.5U₀의 전압을 인가하고, 부분방전을 측정된 결과 그림 18과 같이 1.5U₀의 전압에서 부분방전이 발생하고 있음을 확인하였다. 이를 통해 전원을 AC 내압장비가 아닌 VLF 내압장비로 인가하여도 부분방전을 측정 할 수 있음을 알 수 있었다.



[그림 11] 60Hz, 1.5U₀전원에 의한 PD 발생

참고문헌

[1] Introduction to underground cable deterioration and diagnosis, Korea Electric Power Corporation distribution center, 2010.
 [2] S. M. Kim, "The Influence Estimation of Aging Factor in MV Cable Using Weibull Distribution and Neural Networks", IEEE Condition Monitoring and Diagnosis, 2012.
 [3] Jung Woo-Sung, "A Study on VLF tanδ Status Criteria for Power Cables", 2020