VLF 및 HFCT-PD 장비를 이용한 원자력발전소 고압케이블 진단 방법

하체웅, 주광호
원자력발전기술원

Diagnostic Method of High Voltage Cable for Nuclear Power Plants using VLF and HFCT-PD Devices

Che-wung Ha, Kwang-ho Joo
Nuclear Engineering & Technology Institute

Abstract - 국내 원자력발전소에 설치되어 있는 고압케이블은 장기운전에 따라 열화진단 및 유지보수의 필요성이 증대되고 있으며, 주기적 안전성 평가(Periodic Safety Review) 및 계속운전과 관련하여서도 고압케이블의 관리방안이 지속적으로 요구되고 있다. 본 논문에서는 원자력발전소에서 경년열화로 진단되어 철거된 케이블을 수거하여 VLF(Very Low Frequency) 장비를 사용하여 가압을 한 후 HFCT(High Frequency Current Transformer)를 이용한 부분방전(Partial Discharge ; PD) 측정을 수행하여 향후 원자력발전소 계획예방정비 시 케이블을 대상으로 Off-line 부분방전 진단이 가능한지를 검토하였고, 그 결과를 기술하였다.

1. 서 론

국외 원자력발전소에 설치되어 있는 고압케이블의 사고 유형을 조사하여 분석한 결과 절연체 내부의 초기 결함이나 시공 불량에 의한 초기 고장이 대부분이지만, 사용 년수 증가에 따른 전기적, 기계적, 열적 스트레스 및 방사능 조사에 의해 케이블 경년열화가 증가하고 있어 사고 가능성 또한 증가하고 있다. 국내 원자력발전소에서도 노후 케이블이 증가하는 추세에 있으며 이에 따라 진단에 대한 필요성도 크게 대두되고 있다.

고압케이블의 경우, 열화진단으로서 가장 신뢰할 수 있는 방법은 보이드나 전기트리 개시 또는 진전될 때 발생하는 부분방전 측정이지만, 그동안 원자력발전소 실 선로에서는 발전소 정지 위험, 측정감도 및 설비적인 문제로 적용이 어려웠다. 그러나 최근 산업계에서는 고주파 신호 처리기술과 감지 기술을 적용한 부분방전 측정기술로 측정감도를 획기적으로 향상시켰다. 또한 이러한 HFCT-PD 측정기술은 선진 외국에서는 배전 케이블 진단에도 적용 사례가 증가하는 추세에 있고 국내에서도 송전케이블 진단에 적용했던 측정기술을 배전케이블 및 접속함 진단에 적용하여 수차례 부분방전을 검출하였고 사고를 미연에 예방하였다.

본 논문은 원자력발전소에서 약 30년 동안 사용되다가 케이블이 열화된 것으로 판단되어서 수거된 케이블에 대해서 VLF 장비를 사용하여 가압을 한 후 HFCT를 이용한 부분방전 측정을 수행하여 향후 원자력발전소 계획예방정비 시 케이블을 대상으로 Off-line 부분방전 진단이 가능한지를 검토하였고, 그 결과를 기술하였다.

2. 가동원전의 부분방전 측정 제약사항

원자력발전소의 고압케이블(4.16kV, 6.6kV 및 13.8kV)의 부분방전 진단은 운전 전압이 가해진 상태에서 부분방전을 측정해야 하기 때문에 부분방전 측정 중 고압에 대한 감전 및 고장과 더 나아가 발전소 정지의 문제를 항상 안고 있다. 그리고 원자력발전소의 고압케이블 진단 시 노이즈가 많이 발생되어서 케이블 내 부분방전과 외부 유입 노이즈가 같이 측정되는 문제점이 발생하여 노이즈로부터 부분방전 신호의 분리가 어렵다. 또한 원자력발전소에서 운전 중 고압케이블 부분방전 진단 시 케이블에 전동기 및 로드센터 등 각종 부하가 연결되어 있는 상태에서 진단을 수행해야 하기 때문에, 만약 부분방전 신호가 검출되었을 때 케이블의 열화에 의한 부분방전 신호인지 아니면 전동기 등 다른 부하의 열화에 의한 부분방전 신호인지 구분이 용이하지 않다. 따라서 현재는 High Pass 필터 등을 사용해서 노이즈를 제거하고 있지만 이 역시 쉽지가 않다. 마지막으로, 상용주파수(60Hz)의 내압기를 가지고 전압을 인가하기 위해서는 내압기 용량에 따른 크기 및 무게의 문제로 이동과 현장적용에 어려움이 있다.

3. VLF 와 HFCT-PD 진단 장치를 사용한 부분방전 측정

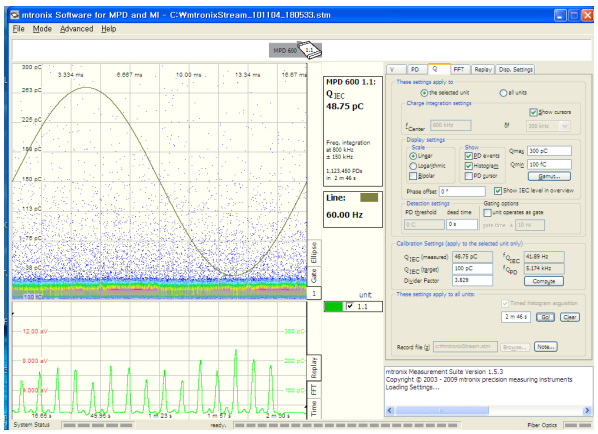
2절에서 나타낸 바와 같이 원자력발전소에서의 부분방전 측정에 있어서 다양한 문제점이 존재한다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해서 고압케이블에 대해서 극저주파 내압기를 사용하여 0.1Hz의 극저주파 신호를 사용하여 $2U_0$까지 가압을 하고 고주파 변류기를 통하여 극저주파수의 신호를 검출한 후 부분방전 진단 장비를 사용하여 부분방전 여부를 판단하는 방법으로 부분방전을 측정하는 방법을 케이블에 적용시켜 진단을 수행하였다.

이번 실험에서 사용된 VLF 내압기는 Uaur(社) 제품으로 그림 1과 같은데 두 장비 중 Viola를 사용하여 가압을 실시하였다. HFCT-PD 측정 장비는 Omicron(社)의 MPD600을 사용하였다. 케이블의 절연 재질은 XLPE이고 운전 전압은 4.16kV 이다. 측정 케이블 전체 길이는 약 100m 정도이다.

<그림 1> 부분방전 측정에 사용된 VLF 내압기

3.1 VLF와 HFCT-PD 측정 결과

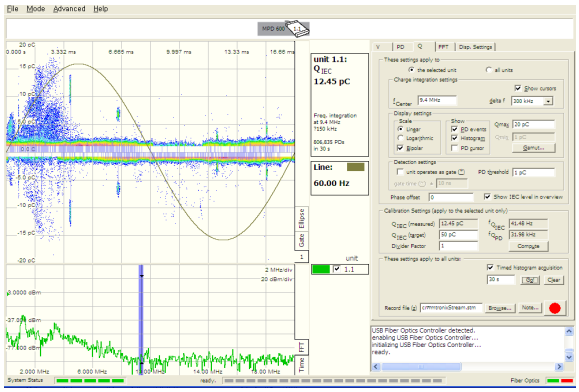
VLF 내압기를 연결한 상태에서 케이블의 부분방전을 측정한 결과는 그림 2와 같으며, 0.1Hz 주기로 방전이 일어나는 것을 관찰할 수 있었다.



<그림 2> 0.1Hz, 1.7Uo에서의 PD 발생 화면

즉 150초동안 15번 방전이 일어나는 것을 확인하였고, 이를 통해 VLF 내압을 통해 부분방전을 측정하는 방안의 실효성을 검증하였다. 부분방전은 약 $1.7U_0$ 이상에서 발생하였으며 그 이하의 전압에서는 확인할 수 없었다. 상용주파수의 경우 주변 노이즈와 함께 지속적으로 부분방전 신호가 유입되면 노이즈와 부분방전 신호의 구별이 난해하나, VLF 내압의 경우 부분방전 신호의 규칙성을 쉽게 찾아낼 수 있는 장점이 있음을 확인하였다. 0.1Hz 교류 전압을 사용하면 시험장치의 용량과 크기를 크게 줄일 수 있으므로 현장 적용에는 효과적이라 볼 수 있다.

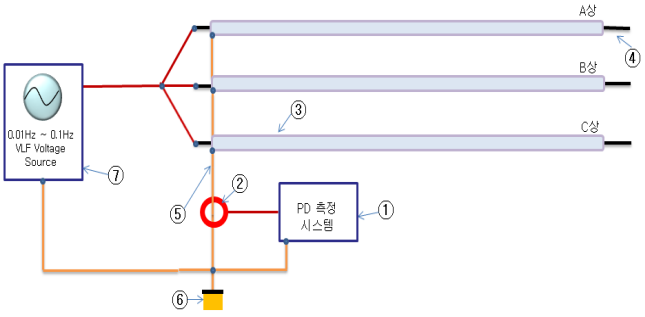
VLF 및 HFPD 측정장비를 통한 부분방전의 정확성 여부를 확인하기 위해 상용주파수인 60Hz 및 $1.5U_0$(4.3kV)에서 부분방전을 측정한 결과 그림 3과 같이 부분방전이 발생하고 있음을 확인하였다.



〈그림 3〉 60Hz, 1.5Uo에서의 PD 발생 화면

3.2 현장(원자력발전소) 적용 시 결선도 및 측정 절차

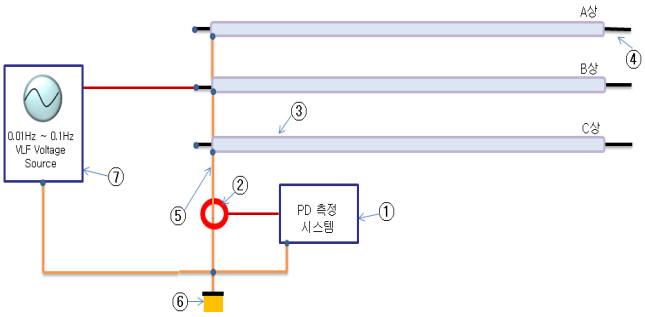
앞 절에서 다룬 바와 같이 VLF 및 HFCT-PD 장비를 사용해서 원자력발전소에서 부분방전을 측정하기 위해서는 우선 케이블의 양 단말에 도체를 노출 시킨 후 그림 4에서 보듯이 한쪽 끝의 도체 3상을 일괄 연결하여 VLF 내압기에 연결한다. 그리고 케이블 쉴드가 3상으로 일괄되어 접지에 연결된 지점에 HFCT를 체결한다. HFCT 케이블은 부분방전 측정 시스템에 연결하여 측정 준비를 마친다. 그리고 VLF 내압기의 주파수 대역을 0.1Hz로 설정 한 후 전압을 $1.5U_0$(EPR 절연재질) 또는 $2U_0$(XLPE 절연재질) 인가하면서 부분방전 측정 시스템에 0.1Hz의 부분방전이 검출되는지 분석을 실시한다.



여기서, ① : PD 시스템, ② : HFCT, ③ : 측정대상 고압케이블, ④ : 케이블 도체, ⑤ : 케이블 쉴드선, ⑥ : 접지, ⑦ : VLF 내압기

〈그림 4〉 VLF와 HFCT-PD 장비를 사용한 PD 측정 결선도(3상 일괄)

만약 부분방전이 검출된다면 그림 4의 케이블 A~C 상 중에 부분방전이 발생하는 케이블이 존재하는 것이므로 그림 5와 같이 도체 3상의 일괄 연결을 해체한 후 각 케이블별 도체에 VLF 내압기를 연결하고 가압한 후 부분방전을 재 측정한다. 참고로 그림 5은 B상 케이블의 측정 방법을 예로 든 것이다.



〈그림 5〉 VLF와 HFCT-PD 장비를 사용한 PD 재 측정 결선도

만약 VLF 대역을 0.1Hz 주기로 가압을 하였을 경우 케이블 내부에서 부분방전이 발생한다면 10초에 1회씩 부분방전이 일어나는 것을 확인할 수 있고 이를 통해 외부 노이즈가 지속적으로 유입된다 하더라도 부분방전 여부를 판단할 수 있다.

4. 결 론

본 논문은 원자력발전소에서 30년간 사용되다가 수거된 케이블에 대해서 VLF(Very Low Frequency) 장비를 사용하여 가압을 한 후 HFCT(High Frequency Current Transformer)를 이용한 부분방전(Partial Discharge ; PD) 측정을 수행하여 향후 원자력발전소 계획예방정비 시 케이블을 대상으로 Off-line 부분방전 진단이 가능한지를 검토하였고, 측정 결과 부분방전에 대해서 진단이 가능하다는 결론에 도달하였고 특히 원자력발전소의 특수성을 감안하였을 경우 다음과 같은 우수성이 있음을 확인하였다.

- ○ 원자력발전소 계획예방정비 중 부분방전 측정이 가능하여 발전소 운전 중 발생할 수 있는 감전 및 고장, 더 나가 발전소 정지의 문제를 해결할 수 있어 인적 사고를 방지하고, 경제적 손실을 최소화 할 수 있다.
- ○ 원자력발전소의 고압케이블 진단 시 케이블 내 부분방전과 외부 노이즈가 같이 측정된다 하더라도 VLF 주파수 대역에 맞게 부분방전 신호가 발생하여 노이즈와의 구별이 용이하므로 정확한 부분방전 진단이 가능하다.

[참 고 문 헌]

[1] U.S. NRC, “Condition Monitoring Program for Electric Cables used in Nuclear Power Plants”, DG-1240, June, 2010.

[2] Gunter Voigt, “New Studies On Site Diagnosis of MV Power Cables by Partial Discharge and Dissipation Factor Measurement at Very Low Frequencies VLF”, International Conference & Exhibition on T & D Asset Management for Electric Utilities, 24 ~ 27 Nov. 2008.

[3] S. Aggarwal, “Condition Monitoring Program for Electric Cables Used in Nuclear Power Plants”, NRC, 2010. 6.

[4] Gary Toman, “Aging Management Program Guidance for Medium-Voltage Cable Systems for Nuclear Power Plants”, 2010.

[5] Gary Toman, “Aging Management Program Guidance for Medium Voltage Cable Systems for Nuclear Power Plants”, Drafe-2, October 14, 2009.