

An Application of the On Line Partial Discharge Measurement Method in Transformer

權 東 震*
(Dong-Jin Kweon)

Abstract - This paper describes an application of the on line partial discharge measurement method in operating transformer. In the operating transformer, the partial discharge signal may be superimposed by radio interference voltage(RIV) and pulse shaped noise signals generated by external corona. The partial discharge quantity showed about 3,800pC due to very high sinusoidal interferences at the measuring impedance terminal of the transformer bushing tap. In order to reject these noises, this paper applied RIV filter, band-pass filters and noise gating method. The resulting measuring sensitivity was improved from 3,800pC to 160pC.

Key Words : Transformer, Partial discharge, RIV, Corona, On line monitoring, Noise gating method

1. 서 론

최근 대용량 변압기의 운전 신뢰성을 확보하기 위하여 예방 진단시스템을 적용하고 있다.[1,2] 예방진단시스템은 변압기의 운전 중에 열화와 관련된 신호를 상시로 측정하여 변압기의 사고방지는 물론, 최적의 유지보수 계획을 수립하기 위한 것으로, 변압기의 열화를 측정하는 센싱 항목으로는 절연유 분석기술, 초음파 측정기술, 전기적인 부분방전 측정기술 및 온도 측정기술이 대표적이다.[3,4] 변압기의 중대사고 요인인 내부절연 이상은 대부분 부분방전을 수반하므로 부분방전과 절연수명은 깊은 상관관계가 있다고 인정되어 왔다. 특히 부분방전은 이상상태 발생시 응답이 빠른 특성을 지니고 있으므로 부분방전을 측정하면 변압기 사고를 미연에 방지할 수 있는 유효한 방식이다.[5]

변압기에서 부분방전을 측정하기 위한 전기적인 측정기법은 현재 공장시험에 적용되고 있다. 그러나 현장에서 운전되고 있는 변압기에는 수천[pC]에 달하는 외부잡음을 제거할 기법을 제시하지 못하여 아직까지 효과적으로 적용되지 못하고 있다.

일본에서는 이러한 단점을 보완하기 위하여 변압기 접지선으로 고우스키 코일을 설치하여 전기적인 신호를 측정하고, 변압기 외함에 초음파 센서를 설치하여, 부분방전에 의한 초음파 신호를 측정하는 기법을 혼합하여 사용하고 있다.[6,7]

이때 적용되는 전기적인 신호는 외부 노이즈를 제거하지 못

한 신호로, 가공선로나 부싱 등에서 발생하는 전기적인 노이즈 신호가 중첩되어 나타나는 단점을 가지고 있으므로, 전기적인 신호와 초음파 신호가 동시에 발생될 경우에는 변압기 내부의 부분방전으로 판단하고, 전기적인 신호나 초음파 신호가 개별적으로 측정될 경우에는 변압기 외부에서 발생하는 노이즈로 판단한다. 그러나 변압기 내부에서 부분방전이 발생할 경우, 초음파 신호가 변압기 구조물에 의해 감쇄되어 측정되지 않거나, 변압기 외부에서의 코로나 노이즈로 인하여 전기적인 펄스와 초음파 신호가 동시에 측정될 경우에는 유효하지 못한 단점이 있다.

본 연구에서는 부분방전에 의한 전기적 측정기법을 현장에서 운전중인 345kV 변압기에 시범 적용하여, radio interference voltage(RIV)와 외부 코로나 노이즈를 제거하고 변압기 내부 부분방전에 의한 신호만을 감시하는 기법에 관하여 연구하였다.

2. 실험장치 및 측정방법

그림 1은 운전중인 변압기에서 부분방전을 측정하기 위한 실험장치의 구성도를 나타낸 것이다. 실험장치는 크게 운전중인 345kV 변압기, 매칭 임피던스, 부분방전 측정장치 및 오실로스코프로 구성하였다. 운전중인 변압기에서는 콘덴서 부싱의 시험단자, 변압기 중성점의 접지선 또는 변압기 외함 접지선에서 부분방전을 측정할 수 있다. 그러나 본 연구에서의 시험대상 변압기는 345kV급 단상 변압기로, 이 경우에 중성점 접지선은 보조 모선을 통하여 3상이 연결되어 방화격벽 사이로 접지되어 있으므로 사용이 불가능하다. 또한 변압기 외함의 접지선은 감도가 낮은 단점이 있으므로, 본 연구에서는 변압기의 제작과정

* 正 會 員 : 電力研究員 電力系統研究室 先任研究員 · 工博
接受日字 : 2001年 4月 27日
最終完了 : 2001年 7月 12日

에서 부싱의 시험단자에 매칭 임피던스를 설치하여 부분방전과 인가전압을 측정하였다.

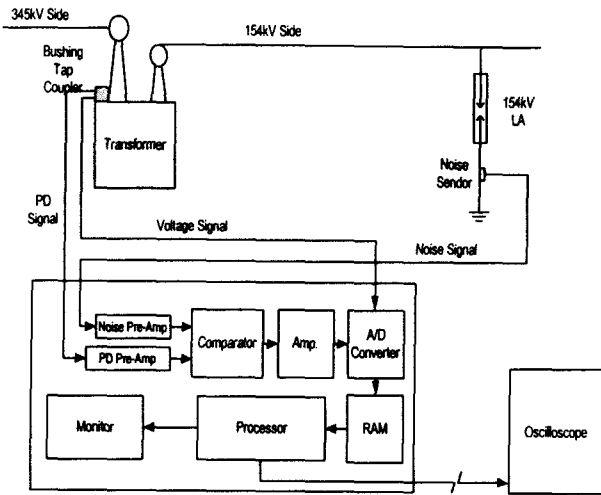


그림 1 실험장치의 구성도
Fig. 1 Configuration of the experimental apparatus

일반적으로 154kV 이상의 변압기에는 콘덴서형 부싱이 사용되고 있다. 콘덴서형 부싱은 도체 주위에 절연지를 원통 형태로 감고, 정해진 직경마다 커패시터 박판을 절연지 층 사이에 삽입한다. 따라서 각 층의 절연지에 걸리는 전압은 균등하며, 동일한 용량의 커패시터가 도체를 중심으로 직렬로 연결된 형상이다. 이 콘덴서형 부싱의 최외층 금속박판은 접지되어 있으며 최외2층과의 사이에는 고전압 도체에 걸리는 전압에 비례하는 콘덴서 분압비에 따른 전압이 측정 가능하므로, 취부 후렌지 바로 위에 시험단자를 인출하여 역률 또는 부분방전을 측정할 수 있도록 되어 있다. 이 방법은 공장에서의 부분방전 펄스 검출방법과 같이 감도적으로 아주 우수하다.

부싱의 시험단자에 설치한 매칭 임피던스에는 변압기 내부 결함에 의해 발생하는 부분방전 신호와 외부 노이즈가 동시에 측정된다. 따라서 본 연구에서는 매칭 임피던스에서 측정된 신호에서 외부 노이즈를 제거하기 위하여 변압기 외부에서 발생하는 코로나 노이즈를 별도로 측정하였다. 외부 노이즈는 시험대상 변압기에 연결된 선로 중에서 시험대상 변압기에서의 신호 형태와 가장 유사한 위치의 접지선에 인덕턴스 센서(L 센서)를 이용하여 측정하였다. 인덕턴스 센서는 감도적으로는 부싱을 이용하는 방법에 비하여 떨어지지만, 접지선을 분리하지 않고 적용할 수 있으므로 현장 적용의 관점에서 편리하다.

부분방전 측정장치는 변압기의 부싱 탭에서 부분방전에 의한 과도전류를 변압기의 운전 중에 상시 측정하고, 부분방전 전하량에 비례하는 신호의 변화경향으로 변압기 내부의 부분방전 발생여부를 판단한다. 또한 변전소에는 가공 송전선이나 부싱 등에서 전기적인 코로나 노이즈가 많이 발생하므로, 변압기 외부에서 발생하는 코로나는 노이즈 측정센서를 이용하여 별도로 측정하여 부싱 탭에서 측정된 신호로부터 외부 노이즈를 제거한다.

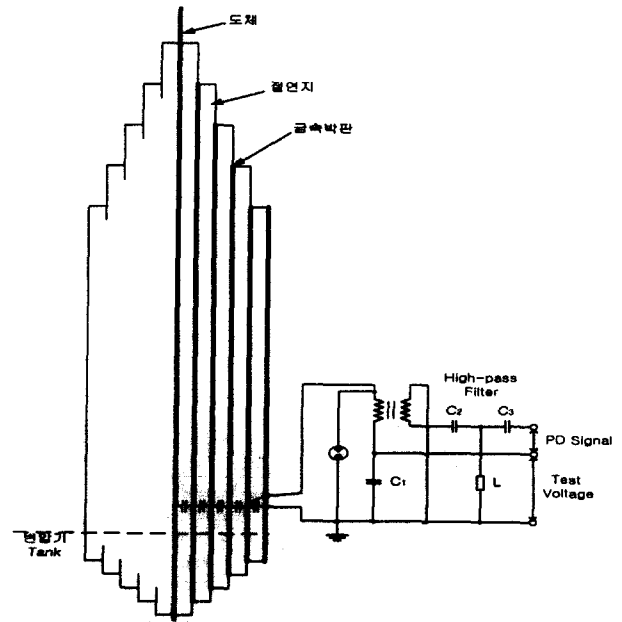


그림 2 부싱 시험단자 및 매칭 임피던스
Fig. 2 Bushing test terminal and matching impedance

부분방전 측정장치의 하드웨어는 부싱 탭에서의 부분방전 측정센서, 노이즈 측정센서, 부분방전 및 노이즈 센서에서의 신호를 신호처리기에 필요로 하는 레벨로 증폭하기 위한 프리앰프, 부분방전에 의한 과도전류와 노이즈 측정센서에서 측정된 노이즈를 비교하여, 변압기 내부 권선에서 발생한 부분방전 신호만을 측정하기 위한 부분방전-노이즈 비교기, A/D Converter에서 처리할 수 있는 수준으로 증폭하기 위한 최대 93dB(3dB step)의 증폭기, 측정된 부분방전 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하는 12bit resolution의 A/D Converter 및 신호처리기로 구성되어 있다. 부분방전 측정장치의 측정 가능한 전하량은 최소 1pC, 최대 5nC 이상이며, 측정감도는 1pC 이상이다. 또한 부분방전 측정장치는 부분방전에 의한 결보기 방전 전하량뿐만 아니라, 단위시간당의 평균 방전전류로 환산하여 변압기 예방진단시스템(host computer)으로 전송하며, 부분방전 신호의 경향이 설정된 레벨을 초과할 경우에는 변압기 예방진단시스템으로 경보를 발송한다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 부싱 시험단자에서의 신호 분석

그림 3은 부싱의 시험단자에 연결한 매칭 임피던스에서 측정된 신호로, 그림 3을 비롯한 본 연구에서의 데이터는 부분방전 신호를 60[sec] 동안 누적시켜 나타낸 것이다. 그림에서 수직 축은 부분방전 전하량[pC]을 표시하며, 수평 축은 AC 시험전압의 위상을 나타낸다. 또한 각각의 점(point)은 위상각에 대한 부분방전 펄스의 결보기 전하량을 나타낸다. 따라서 그림에서 점의 밀도는 부분방전의 발생빈도를 나타낸다. 그림 3과 같이 부싱 시험단자에서 측정되는 신호는 전 위상각에 걸쳐 약 3,800[pC] 정도의 신호가 지속적으로 발생하고 있다. 이는 부싱

시험단자에는 변압기 내부의 부분방전 뿐만 아니라, Radio Interference Voltage(RIV) 등의 방송파 노이즈와 가공선로나 금구류 등에서의 코로나 노이즈가 모두 측정되기 때문이다. 운전중인 변압기에서 부분방전을 측정하고자 할 경우의 가장 큰 문제점은 이와 같이 측정 시스템 주위에서 발생하는 기본 노이즈(back ground noise) 레벨이 높아 변압기 내부에서 발생하는 부분방전 신호와 노이즈 신호의 구별이 곤란한 경우이다.

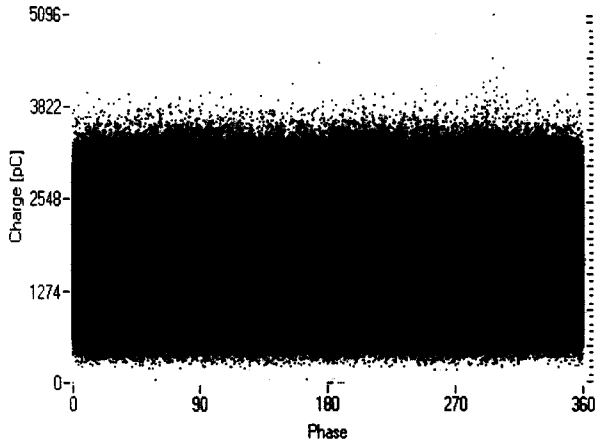


그림 3 부심 시험단자에서의 신호
Fig. 3 Signal at the bushing test terminal

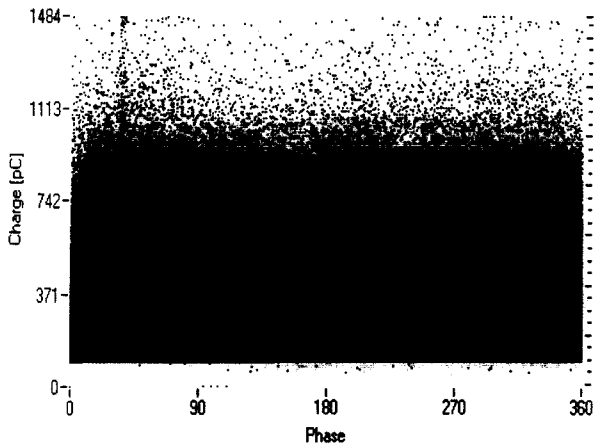


그림 4 RIV 노이즈를 제거한 신호
Fig. 4 Signal removed RIV noise

그림 4는 그림 3의 상태에서 RIV 등의 방송파 노이즈를 제거한 신호로, 전 위상각에 걸쳐 약 1,500[pC]까지 신호가 저감되었음을 보여 주고 있다. 그림 4에서 100[pC] 이하의 신호가 나타나지 않는 것은 측정 한계레벨을 100[pC]으로 설정하였기 때문으로, 100[pC] 이하의 신호는 기본 노이즈로 처리하여 부분방전 측정장치에서 데이터 처리를 하지 않는다. 이는 미소한 노이즈에 의한 측정장치의 데이터 처리 부담을 경감하기 위한 것이다. 그림 4에서와 같이 방송파 노이즈를 제거하여도 아직

까지 상당히 큰 노이즈가 남아 있으며, 신호의 발생 위상각이 전대역에 걸쳐 지속적으로 발생하고 있으므로, 변압기 내부의 부분방전으로 보기 어려운 형태이다.

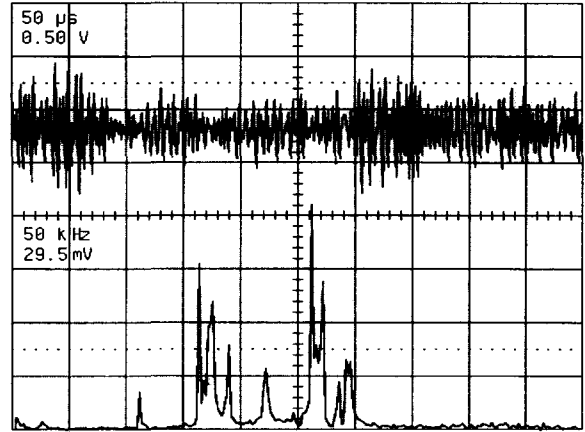


그림 5 부심에서의 신호 FFT
Fig. 5 FFT of the signal at the bushing

그림 5는 그림 4의 신호를 시간과 주파수로 분석(FFT)한 것으로, 상단의 신호는 시간에 따른 신호이며, 하단의 신호는 이를 주파수 분석한 것이다. 발생신호는 사인파 형태의 기본 노이즈로 주파수는 160[kHz] 대역 부근과 260[kHz] 대역 부근에서 크게 나타났다.

3.2 Sine Wave 노이즈 제거

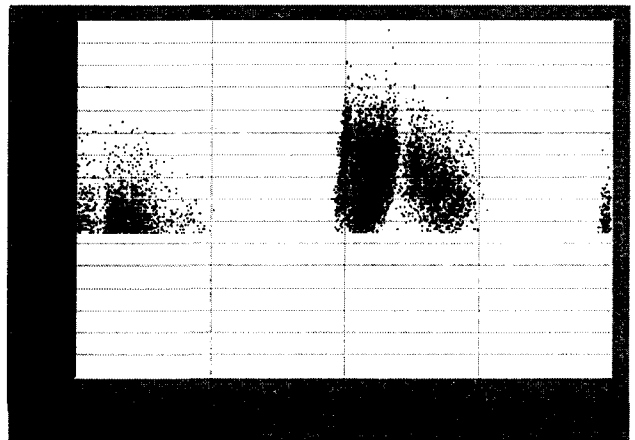


그림 7 필터를 사용한 후의 신호
Fig. 6 Signal after using of the filter

그림 5와 같은 신호는 측정 대상물 주위에서 지속적으로 발생하는 방송파 등으로 100~400[kHz] 이외 대역의 신호를 제거하는 RIV 기능으로는 제거되지 않는 노이즈이다. 이와 같이 sine wave 형태로 전 위상각에 걸쳐 지속적으로 나타나는 노

이즈는 특정 대역의 band-pass 필터를 사용하여 제거하는 것이 바람직하다.

그림 6은 노이즈 신호의 주파수 대역에 맞는 필터를 사용하였을 경우에 측정되는 신호이다. 그림 6은 그림 4에서 전 위상 각에 걸쳐 지속적으로 나타나는 노이즈가 제거되고 특정 위상 각에서의 신호만이 측정됨을 보여 주고 있다. 그림 6에서 측정된 신호는 위상각 350~80도에서 약 175[pC], 위상각 175~270도 사이에서 약 200[pC]의 전하량이 나타났다.

3.3 변압기 외부 노이즈 신호 측정

변전소의 경우 변압기와 연결된 가공선 및 금구류 등에서 코로나가 발생하며, 이러한 코로나는 전기적으로 연결된 부분에는 동시에 측정되어 진다. 따라서 그림 6의 신호는 변압기 내부에서 발생하는 부분방전 신호와 변압기 외부에서 발생하는 펄스형태의 노이즈 신호가 중첩된 것으로 보아야 하며, 변압기 외부에서 발생하는 코로나 노이즈를 측정하여 제거하여야 한다.

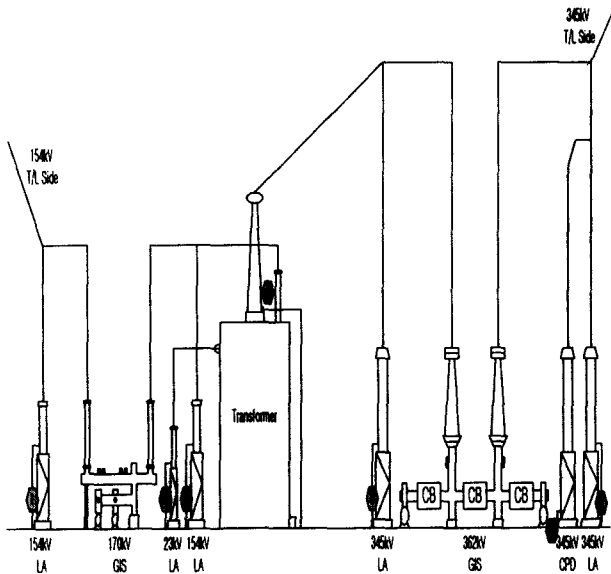


그림 7 노이즈 신호 측정위치
Fig. 7 Noise signal measurement positions

그림 6의 신호에서 변압기 외부에서 발생하는 노이즈를 제거하기 위하여, 그림 7과 같이 시험대상 변압기에 연결된 선로에서 접지선이 인출되어 있는 154kV T/L측 피뢰기, 23kV 구내 선로용 모선의 피뢰기, 154kV 변압기측 피뢰기, 345kV 변압기측 피뢰기, 345kV CPD, 345kV T/L측 피뢰기의 접지선에서 노이즈 신호를 측정하였다.

노이즈 신호의 측정에는 로고우스키 코일(Rogowski Coil), 커패시턴스(C) 센서 및 인덕턴스(L) 센서 등을 사용할 수 있다. 기존에는 로고우스키 코일을 많이 사용하였으나, 로고우스키 코일은 접지선을 관통해야 하므로, 접지선을 분리하거나 로고우스키 코일 자체를 분리해야 하는 어려움이 있다. 또한 커패시턴스 센서는 측정물의 어느 부분에도 센서가 직접 접촉하지 않으므로, 가공송전선로 등과 같은 외부환경(공기)에서의 코로

나 노이즈를 측정하는데 편리하나, 고전압 단말과 커패시턴스 센서 사이의 표유용량이 작을 수록, 센서의 면적이 작을 수록, 도체와의 거리가 멀 수록 측정감도는 감소하는 등 센서의 장기설치에 문제가 있다. 인덕턴스 센서는 접지선을 분리하지 않고 적용할 수 있으므로, 접지선에서 노이즈 전류 펄스를 측정하는데 유용하다. 본 연구에서는 변압기의 운전중에 상시로 부분방전을 감시하기 위하여 상시 설치가 용이한 인덕턴스 센서를 이용하였다.

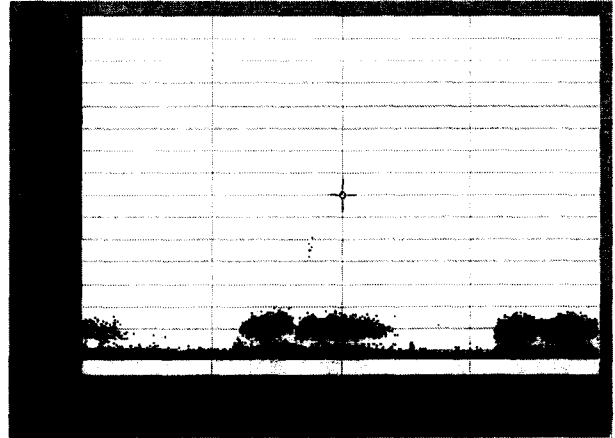


그림 8 154kV T/L측 피뢰기에서의 노이즈 신호(RIV Off)
Fig. 8 Noise signal at the 154kV T/L side LA(RIV Off)

그림 8은 변압기와 연결된 선로 중에서 154kV T/L측 피뢰기 접지선에서의 노이즈 신호를 측정한 것으로, 이때 RIV 제거기능은 Off한 상태이다. 그림 8과 같이 노이즈는 위상각 전대역에 걸쳐 1[pC] 이하의 미약한 신호가 측정되었으며, 위상각 290~30도 및 위상각 115~205도 사이에서 약 2[pC]의 미약한 전하량이 나타났다.

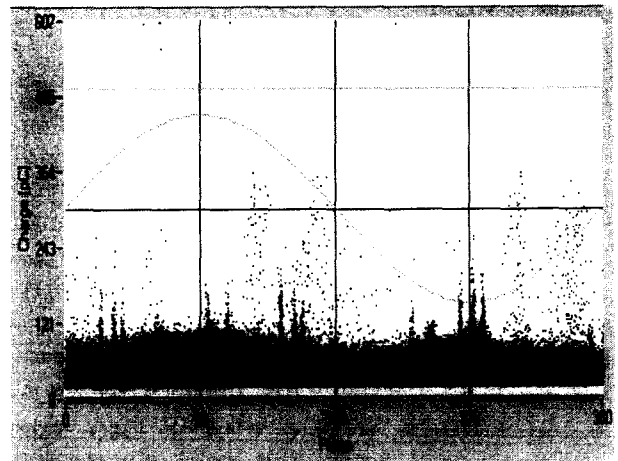


그림 9 22.9kV 피뢰기의 노이즈 신호(RIV Off)
Fig. 9 Noise signal at the 22.9kV LA(RIV Off)

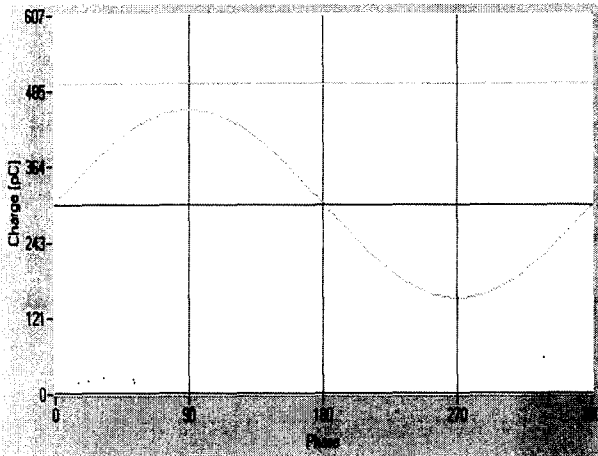


그림 10 22.9kV 피뢰기의 노이즈 신호(RIV On)
Fig. 10 Noise signal at the 22.9kV LA(RIV On)

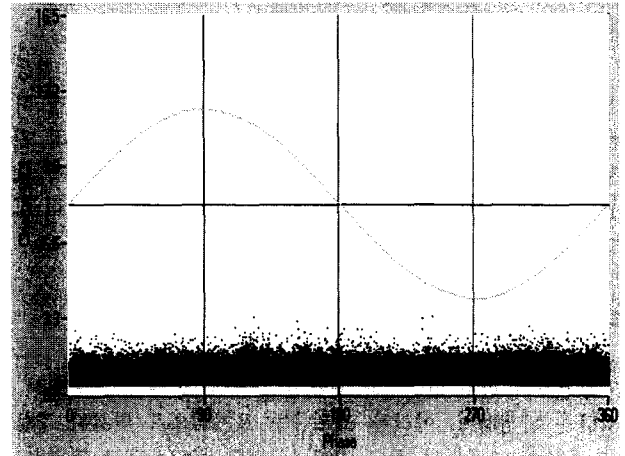


그림 12 345kV Tr측 피뢰기의 노이즈 신호(RIV Off)
Fig. 12 Noise signal at the 345kV Tr side LA(RIV Off)

그림 9와 그림 10은 23kV 구내선로용 피뢰기에서 측정된 노이즈 신호로, 그림 9와 같이 RIV 제거기능을 Off하였을 경우에는 전대역에 걸쳐 약 350[pC]의 신호가 측정되나, 그림 10과 같이 RIV 제거기능을 On하였을 경우 노이즈 신호는 거의 측정되지 않았다.

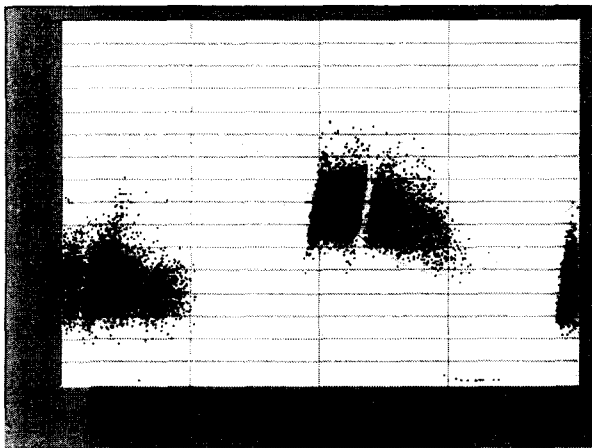


그림 11 154kV Tr측 피뢰기에서의 노이즈 신호(RIV On)
Fig. 11 Noise signal at the 154kV Tr Side LA(RIV On)

그림 11은 154kV 변압기측 피뢰기의 접지선에서 측정된 노이즈 신호이다. 154kV 변압기측 피뢰기에서는 위상각 345~90도와 175~280도에서 약 20[pC]의 노이즈가 측정되었으며, 크기는 작으나 신호의 패턴이 부싱의 시험단자에서의 신호와 거의 유사하게 나타났다. 따라서 본 연구에서는 154kV 변압기측 피뢰기의 접지선에서 측정된 신호를 변압기 부싱 탭에서의 노이즈 신호를 제거하는 용도로 사용하였다. 그림 12는 345kV 변압기측 피뢰기에서 측정된 노이즈 신호로, 전대역에 걸쳐 3[pC] 정도로 아주 미약한 노이즈 신호가 측정되었다.

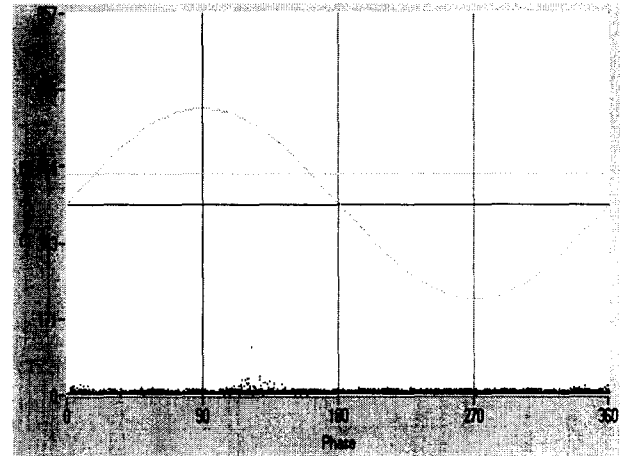


그림 13 345kV T/L측 CPD의 노이즈 신호(RIV On)
Fig. 13 Noise signal at the 345kV T/L side CPD(RIV On)

그림 13은 345kV T/L측 CPD에서 측정된 노이즈 신호로, 345kV T/L측 CPD에는 도체의 접촉을 위한 단말 코로나 링이 없어 코로나 가청음이 변전소 중에서 가장 심하게 발생하였고, 전대역에 걸쳐 30[pC], 위상각 110~140도에서 100[pC]이 발생하였다. 그러나 345kV T/L측 CPD에서의 신호는 변압기 부싱 시험단자에서의 신호패턴과 상당히 다르게 나타났다. 또한 변압기까지의 거리가 약 150[m] 정도로 멀고, 중간에 362kV용 GIS가 있으므로, CPD에서의 코로나는 임피던스에 의한 감쇄로 변압기 부싱 탭에서의 부분방전 신호에는 영향을 미치지 않을 것으로 판단되어 코로나 노이즈의 측정 포인트로 이용하지 않았다.

그림 14는 345kV T/L측 피뢰기에서 측정된 노이즈 신호로 전대역에 걸쳐 약 6[pC] 정도로 미약한 노이즈 신호가 발생하였다.

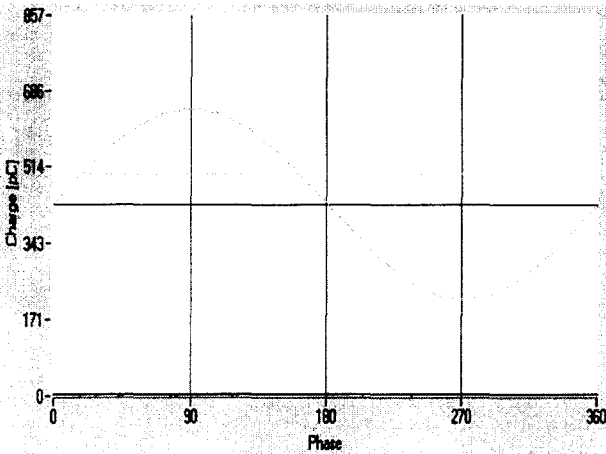


그림 14 345kV T/L측 피뢰기의 노이즈 신호(RIV On)
 Fig. 14 Noise signal at the 345kV T/L side LA(RIV On)

3.4 펄스 형태의 외부 노이즈를 제거한 부분방전 신호

본 연구에서는 부싱의 시험단자에서 그림 5와 같이 부분방전 신호와 노이즈 신호가 중첩되어 측정되었을 경우에, 그림 11과 같은 노이즈 신호를 제거하기 위하여, 노이즈 신호가 발생될 경우에 부싱의 시험단자에서 측정되는 신호의 전달을 일시(약 70[μs]) 차단하는 방법을 사용하였으며, 이를 노이즈 게이팅(noise gating) 기법이라 하였다. 이와 같은 노이즈 게이팅 기법은 전대역에 걸쳐 지속적으로 발생하는 sine wave 형태의 노이즈 신호에서는 게이트가 계속 동작하여 부분방전 신호가 전혀 나타나지 않을 수 있으므로 적용이 어려우나, 코로나 노이즈와 같이 위상각에 걸쳐 일시적으로 발생하는 펄스 형태의 노이즈 제거에는 적용이 유용하다.

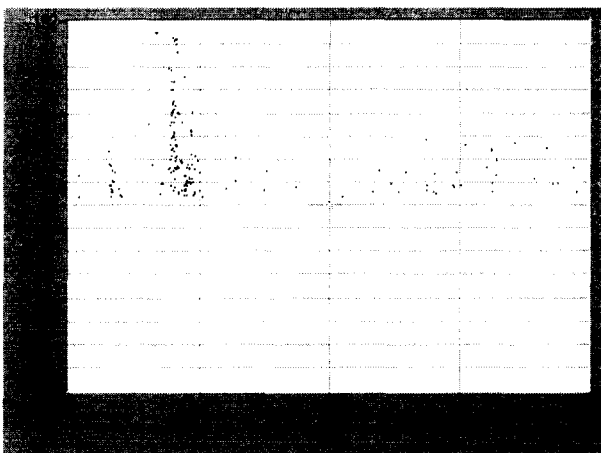


그림 15 펄스 형태의 노이즈를 제거한 부분방전 신호
 Fig. 15 Partial discharge signal removed pulse shaped noise

그림 15는 변압기 외부에서 발생하는 코로나 노이즈를 154kV 변압기측 피뢰기의 접지선에서 인덕티브 센서를 이용하

여 측정하고, 부싱의 시험단자에서 측정된 신호에서 이 외부 노이즈를 제거한 것이다. 그림 15와 같이 노이즈를 제거한 후의 신호는 전대역에 걸쳐 약 90[pC]의 전하가 가끔 발생하며, 위상각 80도 부근에서 약 180[pC] 정도의 신호가 많이 발생하고 있다.

3.5 부분방전 상시 감시기법

변압기에서 부분방전 상시 감시의 주요 관점은 부분방전에 의한 위험한 정도를 판별하는 것이며, 이때 부분방전 측정회로의 결합상태에 따라 부분방전 전하량의 절대적인 크기는 상당히 영향을 받을 수 있으므로, 측정되는 부분방전 전하량의 절대치를 평가하는 것보다는 절연 열화의 경향(trend)을 지속적으로 감시하는 것이 열화상태에 대한 더욱 중요한 정보가 된다. 그림 16은 그림 15와 같은 상태에서 44분 동안 부분방전을 모니터링한 것으로, 부분방전 신호는 약 80~160[pC]의 범위에서 발생하고 있다. 따라서 이러한 부분방전 전하량은 현장에서 운전중인 변압기에서는 발생할 수 있고, 알람 레벨을 1,000[pC] 이상으로 설정한다고 볼 때 무시할 수 있는 정도로 생각되며, 향후 부분방전의 추이를 지속적으로 감시하는데 무리가 없는 것으로 판단된다.

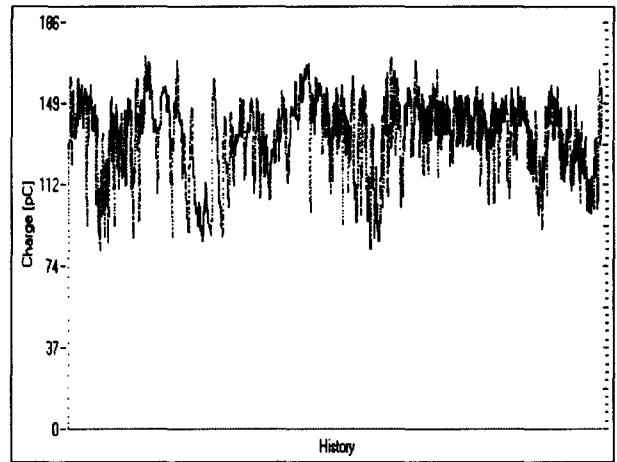


그림 16 상시 모니터링 화면
 Fig. 16 On-line monitoring picture

4. 결 론

본 연구에서는 현재까지 가장 큰 문제점으로 지적되어 온 외부 코로나에 의한 노이즈 신호를 제거하고, 변압기 내부의 부분방전에 의한 신호만을 측정하는 기법을 현장에서 운전중인 변압기에 시험 적용하였다.

현장에서 운전중인 변압기 부싱의 시험단자에서는 방송파 등으로 인해 약 3,800[pC]의 노이즈가 상시 발생하여 변압기 내부에서 부분방전이 발생한다고 하여도 구별이 불가능한 상태였다. 그러나 RIV 신호를 제거하였을 경우에는 약 1,500[pC]으로 저감되었으며, 주파수 분석에 따른 필터를 적용하여 sine wave 형태의 노이즈를 제거하고, 펄스 형태의 노이즈를 154kV 피뢰기

접지선에서 측정하여 제거한 결과, 약 80~160[pC] 정도의 부분 방전량을 상시 감시할 수 있음을 보였다. 따라서 향후 이 변압기에서의 부분방전 발생추이를 장기간 관찰하면 부분방전의 현상 측정기법에 상당한 신뢰성이 제시될 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

[1] 권동진 외, "765kV 변전기기 예방진단시스템 개발," 한전 전력연구원 보고서, pp.1~127, 2000

[2] 권동진 외, "전력용 변압기 예방진단시스템 센서 적용기법," 한전 전력연구원 보고서, pp.1~29, 1998

[3] 권동진 외, "변전설비 진단기술 개발 연구," 한전 전력연구원 보고서, pp.1~159, 1998

[4] 광희로 외, "초음파 신호 수의 이동평균에 의한 전력용 변압기의 예방진단," 대한전기학회 논문지, Vol.45, No.3, pp.432~437, 1996

[5] H. Kaward et. al., "Partial Discharge Automatic Monitor for Oil-Filled Power Transformer," IEEE Trans. PAS, Vol. 103, No. 2, pp.422~428, 1984.

[6] 田中-郎 外, "變壓器の豫防保全技術の現況とその動向," 電氣學會, pp.3~48, 1990.

[7] 久保義昭 外, "變壓器部分放電自動監視裝置の開発とフィールド試驗," 電氣學會, Vol. 26, No. 3, pp.10~18, 1982.

저 자 소 개



권 동 진 (權 東 震)
 1963년 1월 20일 생. 1986년 서울산업대 공대 전기공학과 졸업. 1992년 숭실대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 전력연구원 전력계통연구실 선임연구원

Tel : 042-865-5974
 E-Mail : djkwon@kepri.re.kr