

UHF 부분방전 진단법에 의한 가스절연 개폐장치의 성능검증

김정배*, 정재룡, 김민수, 송원표, 김맹현**, 고희석***, 최인혁****
 *(주) 효성, **전기연구원, ***경남대학교, ****전력연구원

Performance Verification of the Gas Insulated Switchgear
 using UHF Partial Discharge Diagnosis Method

J.B.Kim*, J.R.Jung, M.S.Kim, W.P.Song, M.H.Kim**, H.S.Ko***, I.H.Choi****
 *Hyosung.co., **KERI, ***Kyungnam National University, ****KEPRI

Abstract - In generally, compared with VHF band, electromagnetic waves of UHF band have a low influence for external noise. We can detect the real abnormality with several pC in GIS using UHF method. Recently, it has applied to use the external UHF sensor attached on spacer to GIS of existing substation. In this paper, we firstly described the technique of the partial discharge measurement using frequency analysis and phase analysis in UHF band. Secondly, we presented the results of sensitivity, the relationship of dBm-pC and diagnosis of the reason of PD source by phase analysis. And then, we report the diagnosis result of partial discharge on 800kV GIS in domestic substation. rge diagnosis of GIS.

1. 서 론

부분방전을 측정하는 방법에는 UHF법과 초음파법이 적용되고 있다. 특히 UHF법은 최근들어 세계각국의 연구그룹들에 의해 검증된 부분방전을 측정하는 기법으로, 외부 잡음의 영향을 상대적으로 적게 받는 UHF대역(300MHz~3000MHz)의 부분방전 펄스를 검출하여, GIS 내부의 이상 원인 및 정도를 예측하는 현재 가장 신뢰성 있는 방법으로 알려져 있다.

부분방전 펄스는 1ns 이하의 급격한 상승시간(rise time)을 가지므로 전파하는 부분방전 펄스의 주파수특성은 거의 모든 주파수 대역에 걸쳐 나타나게 된다. 이러한 부분방전 펄스는 GIS의 동축 부스바를 따라 전파하는 TEM모드와 TE, TM의 여러 고차모드의 전자파로 구성되는데, GIS 내부를 전파하면서 각종 불연속면을 만나 복잡하게 반사 및 굴절하게 되어 원래의 신호보다 훨씬 복잡한 형태를 띄게 된다. 이러한 복잡한 부분방전 신호를 외부에서 측정하기 위해서는, GIS 금속용기를 통과하지 못하는 UHF 대역의 전자파 특성 때문에, GIS 제작초기에 센서를 내장시키는 방식이 감도나 신뢰성면에서 우수하다. 하지만, 국내 GIS에는 UHF 센서가 내장되는 방식이 현재 일부 GIS에 대해서만 도입이 추진되고 있어 내부의 절연상태를 효과적으로 확인할 수 없는 상황이다. 그러나, 최근 들어서는 부분방전에 의해 GIS 내부에서 발생하는 전자파가 유기물을 관통한다는 특성을 이용하여, GIS의 가스구획 및 도체지지 구조목적으로 설치되어 있는 에폭시 스페이스를 통해 감지하는 방법이 제안되고 있다.[1]

본 논문에서는 시험실에서 수행된 UHF 센서의 감도 특성과 UHF 부분방전 진단기법의 신뢰성 검증연구를 기초로 실제 운전중인 변전소의 GIS에 적용한 시험 결과를 보고 하고자 한다. 우선, UHF 부분방전 측정법에

의한 측정 메커니즘을 소개하고, UHF센서의 특성시험을 통해 센서의 감도를 측정하여 부분방전 측정에 적합한 센서인지 판단한 후 부분방전의 원인에 따른 위상 패턴을 분석하여 부분방전 진단의 신뢰성을 입증하였다. 그리고, 외장형 UHF 센서와 측정장비를 이용하여 국내에서 운전중인 765kV 변전소의 800kV GIS에 시험한 결과에 대해 보고한다.

2. 본 론

2.1 UHF법에 의한 부분방전측정 메커니즘

UHF법을 이용한 부분방전 측정 시스템은 크게 센서, 증폭기, 주파수분석기와 같은 하드웨어와 모니터링 프로그램 등의 소프트웨어로 나누어진다. 본 논문에서 이용한 부분방전 측정장치의 구성도는 그림 1와 같다. UHF 센서는 에폭시 스페이스에 취부되는 외장형과 GIS 내부에 취부되는 내장형이 있는데, 본 논문에서는 대상 GIS가 기설치된 GIS이므로 외장형 UHF센서에 대해서만 고려하였다.

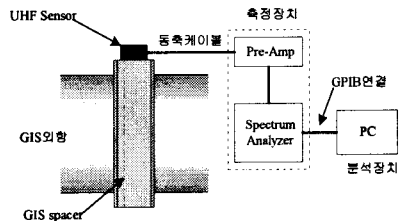


그림 1. 부분방전 측정장치의 블록도

GIS에 부착된 외장형 센서에 의해 검출된 부분방전 전자파 신호는 25dB의 증폭도를 갖는 증폭기(Agilent 8447D)에 의해 증폭된다. 증폭된 신호는 주파수분석기(Spectrum Analyzer : Agilent E4402B)에 의해 주파수 및 위상분석을 하게 된다. 주파수분석기와 노트북 PC는 GPIB로 연결되는데 노트북에 설치된 부분방전측정 프로그램은 센서에서 측정된 신호에 대해 주파수 및 위상분석을 수행하도록 주파수 분석기를 제어하고, 얻어진 신호를 저장하는 기능을 갖는다. 또한, 측정 결과에 의해 GIS 내부의 부분방전의 원인을 예측할 수 있다.

외장형 UHF 센서에 의해 측정된 전자파 신호는 그림 2 (a)와 같이 먼저 주파수 분석을 실시한다. 일반적으로, 변전소내의 기공방전 주파수는 500MHz이하 이므로, 500MHz~1.5GHz 대역에 대해 주파수 분석을 실시한다. 그러나 500MHz~1.5GHz 대역에도 외부노이즈가 존재하므로, 사전에 변전소 노이즈 신호를 측정하여 노이즈 대역을 부분방전 측정 프로그램에 저장시킨후, 이 노이즈

대역은 판단에서 제외시킨다. 상기와 같이, 변전소 노이즈 대역 이외의 대역에서 일정크기 이상의 전자파의 존재유무를 확인하는 주파수 분석을 통해 측정되면, GIS 내부에 부분방전이 발생하고 있음을 판단할 수 있다. 또한 부분방전 신호로 측정된 전자파 신호중 가장 큰 값을 갖는 주파수에 대해 그림 2 (b)와 같이 위상분석을 실시한다. 위상분석은 GIS 운전진압과 동일한 위상을 갖도록 위상보정 후 실시되는데, 이것에 의해 GIS 내부 부분방전신호임을 재확인 할 수 있으며, 2.3 절에 설명되는 바와 같이 부분방전 발생 원인에 대해서도 추정이 가능하다. 센서가 두 대 있을 경우는 GIS 구간별 감쇄율 Data를 이용하여 결합의 위치도 찾아낼 수 있다.

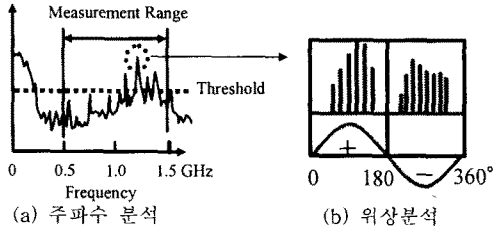


그림 2. 주파수 분석 및 위상분석에 의한 부분방전 측정 메카니즘

2.2 UHF 센서의 감도 특성

UHF 센서로 부분방전을 측정할 경우, UHF 센서에서 측정된 신호는 주파수분석기로 분석되어 각 주파수대역에 대해 dBm의 크기로 표시되어진다. 이렇게 dBm으로 측정된 신호에 대해 일반적인 부분방전량 표시 방법인 pC와의 상관관계를 알 수 있다면, 운전중인 GIS의 위험도 평가의 수단으로 활용할 수가 있다. 또한 UHF 센서 감도 특성의 동일성을 주기적으로 확인하기 위해 다음과 같은 일련의 시험을 수행하여, 변전소 현장에서 사용할 외장형 UHF 센서의 감도 특성에 대한 신뢰도를 확인하였다.

센서 감도특성을 시험하기 위해 그림 3와 같은 시험장치를 구성하였다. AC Power Supply는 Noise-free 변압기를 사용하였으며, ERA PD Detector (Robinson사)를 통해 길보기 부분방전량 단위인 pC으로 부분방전량을 확인하였다. 또한, PD Cell은 10pC, 20pC, 100pC이 발생되는 Rolling Ball 형식으로 각각 수제작되었으며, Pulse Generator는 NoiseKen사의 INS-4001를 사용하였다. 상기시험의 기본방식은 CIGRE TF 15/33.0305에서 제시한 기법을 적용하였다.

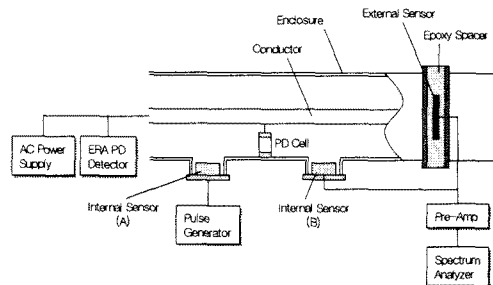


그림 3. UHF 센서 감도특성시험 구성도

2.2.1 UHF 센서로 측정된 부분방전량의 pC 환산

AC Power Supply를 이용하여 Rolling Ball Type의 10pC PD Cell, 20pC PD Cell과 100pC PD Cell에 각각 5~10kV 전압을 인가하여, 10pC, 20pC, 100pC 부분방전을 발생시킨다. 이때 ERA PD Detector로 부분방전량이 각각 10pC, 20pC, 100pC이 발생되는지를 시각적으로 확인 후 인가전압을 고정시켰다. 발생된 부분방전에 대해

그림 3의 Internal Sensor(B)로 부분방전량을 측정하여, 각각의 부분방전에 대해 dBm 출력을 확인하였다. 또한, PD Cell의 측정위치는 UHF센서와 최단거리에 위치시켜 센서와의 거리에 따른 신호감쇄율은 무시하였다.

측정된 UHF 부분방전 신호를 종속으로 ERA PD Detector로 확인한 부분방전량을 횡축에 표현하였으며, 동일한 기법으로 External Sensor에 대해서도 실시하여, 측정된 결과를 그림 4에 나타내었다. 비록 10pC, 20pC, 100pC 세종류의 시험결과를 통해 얻은 Data를 기준으로 약5%의 오차율을 갖는 진선 관계식은 얻었지만, 일반적으로 pC-dBm은 선형관계[2]가 있음이 알려져 있으므로, 신뢰성은 가지고 있다고 볼 수 있다. 상기측정 시스템의 Background Noise가 약 -65dBm 정도이므로, 상기의 측정기법으로는 Internal Sensor로는 최대 약 0.3pC, External Sensor로는 약 2pC까지는 측정이 가능함을 알 수 있다. 또한 그림 4의 측정결과로부터, 변전소 현장에서 측정된 UHF 부분방전신호(dBm)를 부분방전량(pC)으로 환산이 가능하게 되었다.

2.2.2 UHF 센서 감도특성의 동일성

UHF 센서는 제작상의 오차, 다 빈도 사용에 따른 특성변화 등의 이유로, 최초 제작완료후 및 변전소 현장 측정시 마다 감도 특성을 확인할 필요가 있다. 그러나, 그림 3와 같은 시험 구성도로 매번 실시할 경우 소요시간 및 장비 확보의 문제로 다음과 같은 간이적인 방법으로 동일성 시험을 실시 하였다.

그림 3에서, AC Power Supply, PD Cell, ERA PD Detector를 제거한후, Internal Sensor(A)에 Pulse Generator를 이용하여 10pC, 50pC, 100pC에 해당하는 부분방전량을 발생시킨다. 즉, 표준 Internal Sensor를 Internal Sensor(B)에 설치하고, 표준 External Sensor를 스페이스 외벽에 설치한 후 센서의 출력이 그림 4의 10pC, 50pC, 100pC 과 동일하게 되도록 Pulse Generator의 인가전압을 확인한다. 상기와 같은 방식으로 확인된 Pulse Generator의 인가전압으로 10pC, 50pC, 100pC 부분방전을 발생시킨 후, 감도 동일성을 확인하고자 하는 피시험 UHF 센서를 그림 3의 Internal Sensor (B) 혹은 External Sensor, 즉, 표준 Sensor에 부착하여 출력신호를 측정하였다. 그림 4의 출력 dBm에 대해 ±10%의 오차범위 내에서는 감도특성의 동일성으로 인정 하였다. 상기의 간이 프로세스에 의해 확인된 외장형 UHF 센서에 대해 변전소에 운전중인 GIS에 대해 부분방전 측정을 실시하였다.

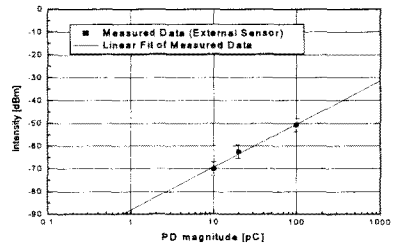


그림 4. 외장형 UHF 센서의 pC-dBm 상관관계 특성

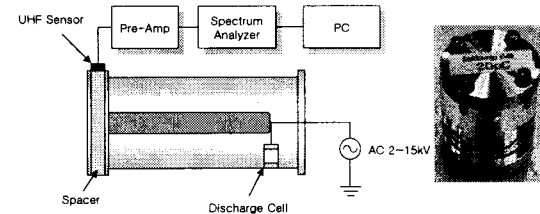
2.3 부분방전 원인에 따른 위상분석

GIS 내부의 부분방전은 다양한 원인에 의해 발생하지만, 대표적인 원인으로는 금속이물질, 도체돌기, 스페이스서 부착이물, 스페이스 공극(void), 도체 체결부위의 풀림 혹은 접촉불량등과 같은 플로팅 전극 등이 있다. 동일한 부분방전량을 갖는 부분방전이라도 원인에 따라 GIS에 미치는 위험도에는 차이가 있으므로, 부분방전 원

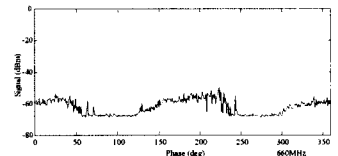
인을 정확히 해석한다면, 그 결과에 따라 GIS의 정밀점검 시기를 결정할 수 있다.

UHF센서로 측정된 신호로 부분방전의 원인을 진단하기 위해서는 각 원인별 비교기준이 마련되어야한다. 논문에서는 비교기준을 찾기 위해 그림 5과 같이 부분방전 원인에 따른 측정시험을 수행하였다. 먼저, 부분방전의 원인에 따라 부분방전을 발생시키기 위해, 그림 5 (b)와 같은 PD Cell을 제작하였다. 도체돌기, 도체이물질(자유입자), 플로팅 전극은 PD Cell로 부분방전을 모의하여 시험을 하고, 스페이서의 부착이물과 보이드는 스페이서에 강제로 제작하여 시험하였다.

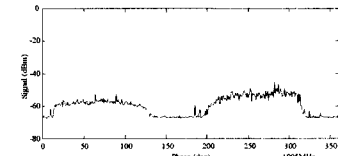
UHF센서로 측정한 신호는 그림 5과 같이 Pre-Amp를 거쳐 Spectrum Analyzer로 주파수 분석을 실시하여 2.1절에 설명한 바와 같이 부분방전 유무를 확인한 후, 노이즈 영역(TV방송파, 핸드폰, 비행기 송수신 대역 포함)을 제외한 나머지 주파수 영역에서 가장 큰 값을 갖는 주파수에 대해 위상분석을 수행하였다. 그림 6는 스페이서 부착이물(particle of surface in spacer, 660MHz), 도체돌기(protrusion, 1095MHz), 자유입자(free particle, 532MHz), 스페이서 공극(void in spacer, 465MHz), 플로팅(floating, 540MHz)의 각 주파수 대역에서의 위상분석 결과이다. 그림 6에서와 같이 각 부분방전 원인에 따라, 구별되는 위상패턴이 발생됨을 알 수 있으며, 원인을 진단하는 판단인자에 대해서는 자세히 언급하지 않겠지만, 위상분석을 통해 부분방전의 원인을 진단할 수 있음을 알 수 있었다.



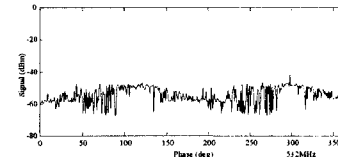
(a) 측정시험 구성도 (b) PD Cell
그림 5. 부분방전 원인진단을 위한 시험 Layout



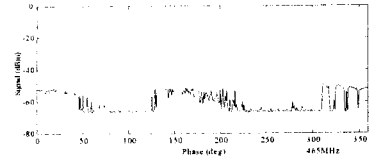
(a) particle of surface in spacer (660MHz)



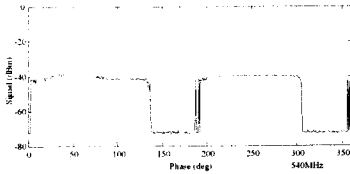
(b) protrusion (1095MHz)



(c) free particle (532MHz)



(d) void in spacer (465MHz)



(e) floating (540MHz)

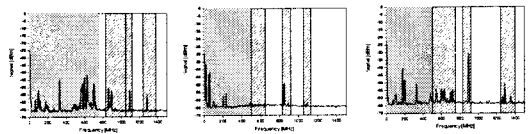
그림 6. GIS의 부분방전 원인에 따른 측정된 위상패턴

2.4 765kV 변전소 현장시험 : 800kV GIS

【주】효성에 의해 국내최초로 개발되어 D S/S, A S/S, S S/S에 납품된 800kV GIS는 개발시험을 통해 성능검증은 확인되었으나, 국내최초, 세계적으로도 두 번째로 계통운전이 실시되는 고도의 기술을 요구하는 제품으로 주기적으로 GIS의 운전상태 진단이 요구되고 있다. 이러한 관점에서 실제 3개 변전소에 대해 외장형 UHF센서를 이용하여 주기적인 부분방전 진단을 실시하였다.

2.4.1 1차 시험 결과

초기 765kV 변전소는 운영상의 이유로 D S/S에서 순차적으로 전압/전류가 인가되어 일부하의 765kV 송전이 이루어지지 않고, 일부 송전구간에 대해서만 765kV 전압만을 인가하는 시험기간이 요구되었다. 이 기간에는, 345kV 변전소를 이용한 역송전에 의해 전압만 800kV GIS에 인가되었으며, 이 기간에 측정된 UHF 대역의 신호를 그림 10에서 보여주고 있다. 500~1500MHz 대역에 있어서 주파수 분석을 실시한 결과 Mask 영역을 제외한 전대역에서는 5pC 이상의 어떠한 부분방전도 존재하지 않음을 확인하였다. 그림 7의 각 결과에 나타난 점선은 5pC를 나타내는 threshold 레벨을 나타내고 있다.



(a) A 변전소 (b) S 변전소 (c) D 변전소

그림 7 800kV GIS에서 측정된 UHF 대역 신호파형

2.4.2 2차 시험 결과

1차 시험에는 실제 부하가 걸려 있지 않았지만, 2차 시험에는 800kV GIS에 일부하(전류통전)가 연결되어 있는 상태에서 즉, 발전소의 전압/전류가 계통에 연계되어 실전력계통으로 운전된 후 부분방전 측정시험을 실시하였다. 3개 변전소 전 영역에 대해서는, 1차 시험 때와 같이 어떠한 부분방전도 측정되지 않았지만, 특정구간에서 부분방전으로 예상되는 신호를 측정하여, 정밀조사에 착수하였다. 부분방전 신호가 계속된 구역은

붓싱 구간으로 근처의 스페이서를 통해 GIS 내부 부분방전 측정시험을 실시하였다. 또한, 외부노이즈가 스페이서를 통해 GIS내부로 들어갈 확률을 제거하기 위해 에폭시 스페이서에 대해서는 도전성 고무로 된 벨트를 취부하여 외부노이즈를 차폐하였다.

부분방전으로 생각되는 파형이 그림 8과 같이 C상의 No.1 스페이서에서 검출되었고, 이때, C상의 No.1 스페이서 근처에서 측정된 외부노이즈가 그림 8의 신호보다 전대역에서 특히 1GHz 대역 이후에서는 낮은 출력 신호를 나타내기 때문에 부분방전은 내부에서 발생됨을 알 수 있었으며, 이때의 방전량은 그림 4의 외장형 UHF 센서의 감도특성 그래프로부터 약 400pC의 부분방전 발생 가능성을 진단하였다. 또한, 스페이서 위치를 No.1에서 No.5로 점차적으로 이동할수록 미약하나마 신호감쇄가 확인되어 부분방전 발생위치는 붓싱 밑의 도체 연결부로 예상되었다. 그림 8의 (a)에서 측정된 파형의 500~1500MHz 대역중 가장 큰 신호를 갖는 주파수 대역(705MHz)에서 위상 분석을 실시하여 그림 8(b)의 위상 파형을 얻었다. 위상분석시에는 Spectrum Analyser의 전원과 GIS 인가전압은 위상차를 갖고 있으므로, 위상측정기를 이용하여 위상차를 측정된 후 위상보정을 실시하였다. 그림 8(b)의 파형을 실험을 통해 구해진 부분방전 원인별 위상 패턴과 비교한 결과 그림 6 (e)의 위상파형과 가장 유사하므로, 부분방전 발생원인으로는 플로팅전극(Floating Electrode)으로 판단하였다.

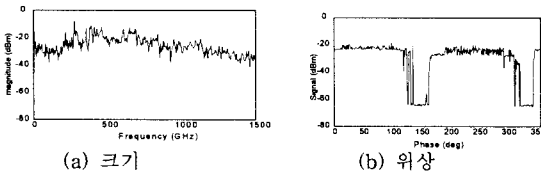


그림 8. C상 No.1 스페이서에서 측정된 결과

부분방전발생이 예상되는 구간의 GIS에 대해 내부정밀 점검을 실시한 결과, 붓싱 도체 연결부 부위의 볼트가 전자력에 풀려져 있음을 확인하였다. 물론 풀어진 볼트 부위에는 부분방전에 의한 탄흔이 남아있었다. 문제 부위에 대한 수정후 C상 No.1 스페이서에서 No.5 스페이서에 걸쳐 부분방전 계측을 실시한 결과, 그림 7의 1차 계측시 얻은 결과와 동일한 파형을 얻어 부분방전으로 인한 전자파가 제거되었음을 확인하였다.

따라서 UHF법에 의한 부분방전진단이 실제 변전소 현장점검에서도 적용가능할 만큼 신뢰성이 높다는 것을 입증한 시험이었다.

3. 결 론

GIS의 절연상태를 가장 효과적으로 진단하는 방식으로, 최근들어 UHF법에 의한 부분방전진단 방식이 도입되고 있다. 본 논문에서는 시험실시에 수행한 부분방전 측정장비의 감도특성, dBm-pC 환산관계 및 신뢰도를 시험결과를 통해 제시하였으며, 동일 측정시스템을 이용하여 실제 운전중인 800kV GIS에 적용한 사례를 보고하였다.

일반적으로 신설변전소에 납품되는 GIS에 대해서는 내장형 UHF 센서를 내부 점검창에 부착하지만, 본 논문에서는 기존 운전중인 GIS 스페이서 외벽에 부착할 수 있는 외장형 UHF 센서와 휴대용 진단장치에 대한 연구 내용을 제시하였다. 센서로부터 얻어진 신호는 주파수 분석과 위상분석을 실시하여, 주파수분석을 통해 부분방전 발생유무와 방전량을 알 수 있었으며, 위상분석 결과에 대해 Database를 이용하여 부분방전 발생원인에 대해서도 진단이 가능하였다. 또한, 부분방전 신호로 측정

된 전자파(단위 dBm)의 크기를 일반적인 부분방전량 단위인 pC으로 환산할 수 있는 관계식을 제시하였으며, UHF 센서의 신뢰성 검증 결과도 보고하였다.

국내 최초로 개발되어 운전중인 800kV GIS에 있어서 “플로팅 전극”에 의한 부분방전을 절연파괴 전에 발생원인, 발생위치, 부분방전량 등을 진단하였으며 내부점검 결과로부터 충분한 신뢰성을 검증할 수 있었다.

본 연구팀은 국내 변전소 현장에 대한 노이즈 Database화, 부분방전 종류별 위험지수, 부분방전진단 시스템 On-line화등에 대해서도 지속적인 연구를 수행하여, GIS의 신뢰성 향상에 이바지할 계획을 갖고 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] C.Neumann, B.Krampe, R.Feger, K.Feser, M.Knapp, A.Breuer, V.Rees, "PD Measurements on GIS of different designs by non-conventional UHF Sensors", CIGRE 2000, 15-305
- [2] Tatsuro Kato, Fumihiko Endo, Shingo Hironaka, "Sensitive Partial Discharge Monitoring System by UHF Method and Calibration Technique", SC15 Gas Insulated Systems Symposium, May 9, 2001, pp.73~76.