

대전력기기의 열화진단을 위한 부분방전

이준호 · 이진우 <오서대학교 교수>

1 서론

우리 나라는 전력수요의 증가와 인구의 대도시 집중화 현상으로 인해 신뢰도 높은 대용량 장거리 전력 수송 설비는 점점 확충해야만 하는 실정이다. 이에 따라 전력설비는 대형화, 중량화 및 초고압화 하고 있으나 일반 대중은 이러한 전력설비에 대하여 큰 혐오감을 갖고 자기 주변에 이러한 설비가 건설되는 것을 반대하는 넘비현상이 계속 증가되고 있는 추세이다. 또한 우리나라와 같이 국토면적이 협소한 나라에서는 발전소 및 송변전 설비의 입지난은 더욱 심화되고 있어 이의 해결방안으로 대전력설비의 콤팩트 화와 고신뢰도를 확보하기 위한 예방진단 시스템에 대한 연구가 절실한 실정이다. 그 예로 GIS(Gas Insulated Substation) 설비는 대도시로부터 지방 중소도시로 확산되어 건설, 운전중에 있다.

한편 대전력기기는 초고압의 적용과 다양한 안전장치 및 복합유전체의 구조로 인해 사고를 사전에 외부에서 감지하기 어렵고 사고가 발생하면 사고복구 시간이 장시간이 요구되는 단점이 있다. 따라서 이와 같은 문제점을 해결하기 위해서는 전계분포를 최적화하여 기기의 절연과파가 일어나지 않도록 해야하며 사고를 사전에 감지하기 위한 진단기법 연구가 필요하다.

2 본론

2.1 부분방전 측정기술 현황

현재 세계 각국에서는 자국의 시스템에 적합한 부분방전에 대한 연구가 수행중에 있다. 1980년대 이후 PC 성능의 향상되고 측정소자들의 기능이 고도화되어 종래에는 측정이 매우 힘들었던 고속신호의 검출이나 대용량정보의 빠른 처리가 가능해짐에 따라 부분방전신호의 검출 및 분석에 새로운 전기를 맞이하였다. 이러한 연구의 형태는 부분방전의 검출 및 인식자동화분야라고 이름할 수 있으며 이 분야의 연구에서 상대적으로 우수한 연구결과를 발표하고 있는 연구그룹들이 일본과 유럽에 있다. 일본의 경우 T. Okamoto와 T. Tanaka 팀은 1970년 후반부터 부분방전측정에 개인용 컴퓨터와의 연계시스템을 개발하였으며 인식기법에 있어서도 통계분야에서 이용되던 첨도(kurtosis)와 왜도(skewness) 등의 개념을 원용하였으며 80년대에는 신경회로망의 일종인 neural network를 이용한 패턴인식의 연구결과를 제시하였다. 네덜란드의 경우 Delft대학의 F. H. Kreuger를 중심으로한 연구팀은 매우 오래된 연구의 경험을 바탕으로 독자적인 측정, 분석시스템을 구축하여 일부 상용화 단계에 있는데, 이 들은 최근 부분

방전신호의 분석에 3차원공간상의 clustering 분석 기법을 이용한 연구결과를 발표하였으며 이와 병행하여 부분방전현상의 메카니즘을 규명하기 위한 연구도 수행하였다.

국내에서의 부분방전에 관한 연구는 서울대, 충북대, LG전선연구소, 전기연구소 등에서 전력용 케이블에서의 부분방전에 대한 연구를 수행중이며, 전기연구소를 제외한 대부분의 연구팀에서는 전기적신호의 검출과 분석이 주요 테마이다. 그 외 전력용 변압기에서의 부분방전 연구는 송실대, 광운대 등에서 수행중이며 이 분야는 대부분 음향신호 검출에 초점이 맞추어져 있다.

실질적인 대전력 시스템에서는 부분방전의 신호원이 다양하며 동시에 여러 신호원으로부터 부분방전이 발생할 수 있기 때문에 하나의 결합을 대상으로한 연구는 실 절연시스템에 적용하는데 한계성이 있다. 또한 현장에서는 다양한 잡음이 신호에 실려서 검출되므로 이러한 잡음분리 또는 저감에 관한 연구도 중요한 과제이다. 따라서 향후 부분방전의 연구는 단일결합의 연구로부터 그 대상이 복수결합에 의한 동시발생신호나 잡음이 섞인 신호에 대한 검출과 분석이 매우 주목받을 것으로 사료되며 이는 개발된 기술의 실용화를 위해 매우 필수적인 연구가 될 것으로 사료된다.

2.2 부분방전 발생과 측정의 이론

1) 부분방전의 발생과 측정

부분방전은 절연재료의 내부나 경계면에서 절연파괴가 발생하기 앞서 나타나는 국부적 방전으로 정의되며, 일반적으로 고체나 액체 절연체 내부의 보이드나 공극에서 발생하는 내부방전(internal discharge), 종류가 다른 절연체의 경계면에서 발생하는 표면방전(surface discharge), 기체, 또는 절연체의 국부적 방전인 코로나 방전(corona

discharge)의 3가지로 구분되어진다.

부분방전이 발생하면 높은 에너지의 전자나 가속이온이 재료의 표면에 충돌하여 물리적, 화학적 변화를 일으키며 이러한 변화가 축적되면 절연체로서의 성능이 저하되어 열화현상을 나타내게 된다. 부분방전의 검출은 방전에 수반되는 에너지의 교환현상에 기초하는데, 이 에너지의 교환은 전기적 임펄스신호, 유전체손, 빛, 소리, 기체압력의 증가 및 화학반응 등의 형태로 나타난다.

부분방전을 측정하는 방법 중 가장 널리 사용되며 또한 현재까지 가장 성공적인 결과를 보이고 있는 것이 전기적 신호의 계측을 사용하는 방법이다.

절연체내부나 경계에서 발생하는 부분방전의 전기적 신호를 검출하기 위한 측정시스템의 개념도는 그림 1과 같다.

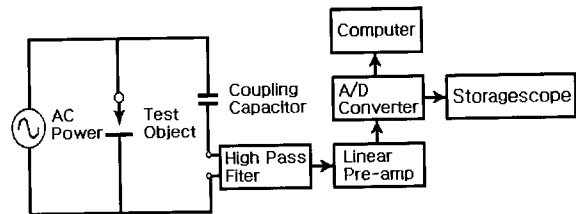


그림 1. 부분방전 측정시스템의 개념도

시료에서 발생하는 부분방전에 의한 임펄스 전류는 순간적으로 결합 커패시턴스와외의 폐루프를 흐르게 되는데 이 신호를 RC 임피던스나 CT로 측정한다. 측정된 신호는 필터를 거치면서 잡음 성분을 제거하는데, 신호들 중 시험전원의 주파수 성분이나 불필요한 잡음성분은 high pass filter를 거치면서 제거되고 이 신호는 다시 프리앰프로 증폭되어 A/D변화기를 내장한 데이터 저장장치에 디지털 수치로 저장된다.

2) GIS 내의 부분방전 진단

GIS는 고신뢰성, 장수명 및 소형의 장점 때문에 널

리 보급되어 사용되고 있으나, 주회로부가 거의 밀폐 접지된 탱크 속에 있어 보수점검이 곤란하다. 최근에는 고신뢰화의 요구로 기기의 이상징후를 검출하여 사고나 장애를 미연에 방지하는 이상진단의 필요성이 대두되고 있다.

GIS는 경년열화되는 부분이 적으므로 열화진단의 필요성도 변압기에 비하여 적으나 GIS는 사고가 발생하는 경우에는 사고범위가 커지므로 상시감시가 더욱 필요하다. GIS 내부 아크 발생시의 현상으로는 충격성 가스압력 상승, 탱크벽의 진동 발생, 발광, 지락음, 탱크벽의 국부 과열, SF₆ 가스의 분해가스 등이므로, GIS의 이상을 측정하기 위한 기법도 이러한 이상현상을 이용하고 있다. 그리고 GIS의 절연파괴를 야기하는 각종 원인은 절연파괴에 이르기 전에 부분방전을 발생하므로 부분방전 신호를 검출하면 GIS의 사고를 미연에 방지할 수 있다. GIS의 부분방전을 직접 검출하는 방법으로는 전기적인 방법과 기계적 방법이 있다. 또한 부분방전에 의해 발생하는 SF₆ 가스의 분해생성물을 검출하는 간접적인 방법도 개발되고 있다.

절연이상의 검출에는 주로 부분방전의 검출법이 사용되고 있다. 부분방전이 발생하는 요인은 코로나 방전, 절연물 표면 부분방전, 절연물 내부 부분방전 및 접촉불량 부분방전이며 이 외에 가스 중 수분과 진공도 등도 절연기능을 저하시킨다.

3) 부분방전의 전기적 검출방법

(가) 전자파 검출법

GIS 내부의 부분방전은 주파수 범위가 광범위한 전자파를 방출하게 되며, 이러한 전자파 펄스를 감도 및 신호/잡음비의 관점에서 우수한 고주파 안테나 센서를 GIS 내부에 내장시키고 스펙트럼 분석장치로 스펙트럼을 측정하여 750~1,500(MHz) 대역의 주파수를 해석하여 부분방전을 검출한다면 현장에서도

수 [pC]의 부분방전을 검출할 수 있다. 부분방전에 의한 전자파의 스펙트럼은 방전전류의 상승시간 및 하강시간이 2[ns]이하의 펄스이므로 수 백(MHz)이하에서는 거의 평탄하며, 전자계 신호 크기를 증폭시켜 절연파괴가 진전되는 과정을 검출할 수 있다. 그러므로 주파수 스펙트럼을 분석하여 금속이물에 대한 존재 여부의 확인도 가능하다.

(나) 접지선 전류법

GIS 내부에서 부분방전이 발생하면 GIS의 접지선에 고주파의 펄스전류가 흐른다. 따라서 페라이드 코어에 권선한 코일로 이를 검출할 수 있다. 지락전류는 1점접지시 전전류가 접지선에 흐르고, 다중접지시 각 접지선에 분류된다. 따라서 다중 접지시는 각 접지선 전류를 비교하여 사고부위를 판별할 수 있다. 검출부는 고주파 전류를 양호하게 검출하기 위하여 바이패스 필터가 내장되어 있고, 회로부는 저역통과 필터에 의하여 변전소 내의 노이즈 레벨보다 적은 수 (MHz)의 주파수 대역에서 부분방전 전류를 측정할 수 있다. 또 부분방전은 주기적으로 발생하므로 1(초)당의 펄스를 계수하여 노이즈에 대한 S/N비를 개선할 수 있다.

(다) 절연 스페이서에 의한 전압 검출법

GIS의 고전압 도체를 지지하는 스페이서의 정전용량을 이용하여 부분방전을 검출하는 방법이다. 스페이서와 같이 몰드화된 전극이나, 스페이서 외부에 취부한 검출용 전극에 유기 되는 고주파 펄스 전압을 탐침으로 검출한다. 신호는 대역통과 필터와 파형정형기에 의해 400(kHz)의 감쇄진동 파형으로 정형된 후 증폭된 파고치를 제시한다.

(라) 외피 전극법에 의한 전류검출법

GIS의 내부에 부분방전이 발생하면 고주파 전류가 접지 용기에 흘러서 접지용기의 전위가 과도적으로 상승한다. 이 용기의 전위진동을 용기 외피에 절연 취부시킨 전극을 이용해 검출하는 방식이다.

4) 음향, 진동에 의한 검출방법

GIS 내부 지락시는 아크에 의해 탱크 벽에 고조파 충격진동이 발생한다. 따라서 GIS의 외벽에 초음파 탐촉자와 진동가속도계를 부착하고, 내부의 음향과 탱크의 미소진동을 계측하는 방법이다. 검출된 신호는 대역통과 필터에 의해 주파수가 선별되고, 산발 노이즈를 레벨 판별기로 제거하고, 컴퓨터에 의해 신호를 평균화 처리하여 검출감도를 개선하고 있다. 또한 충격성 진동이 탱크 벽으로 전파시 감쇄하므로 복수 개의 센서를 이용하여 지락구간을 정할 수 있다. 이 방법은 부분방전에 의해 발생하는 음향을 검출하는 변압기의 부분방전 측정과 유사한 방법으로, 부분방전은 물론 금속성 이물을 검출하는 방법으로도 이용할 수 있다.

(가) 부분방전에 의한 미소 탱크 진동의 검출방법

GIS내의 부분방전에 의해 미소전파가 발생한다. 이러한 진동파를 검출하기 위해 주파수 영역에 따라 고감도 가속도계 센서나 초음파 센서를 이용한다.

① 가속도센서에 의한 검출

고감도의 압전진동자 가속도 센서를 사용하는 방법이다. 부분방전에 의한 인클로저 표면의 진동 레벨은 10[μ G](G: 중력가속도)에서 5[mG]이고 주파수대역은 5~20[kHz]이다. 최대 검출 주파수 대역은 사용 센서의 공진주파수에 의존한다. 검출신호를 노이즈신호와 구별하기 위해 전력주파수와 동기시켜 고역 필터를 사용하거나 파형의 전체 평균법과 샘플링법 등과 같은 많은 방법을 사용한다.

② 초음파센서에 의한 검출

압전진동 초음파 센서를 인클로저 표면에 부착하여 검출하는 방법이다. 이 센서의 감도는 가속도 센서와 비교할 때 일률적이지는 않다. 이러한 이유로, 공진 주파수를 포함하는 협대역이 사용된다. 초음파 센서를 이용하는 방법은 변압기의 코로나 검출기로 사용되고 있지만 복잡한 신호전파 메커니즘과 해석의 어

려움 때문에 GIS에는 아직 실용되고 있지는 않다. 이 초음파센서의 장점은 여러 개의 센서를 이용하여 신호의 타임 딜레이를 측정하여 부분방전의 위치를 추정할 수 있다는 점이다.

③ 혼입 이물의 검출법

GIS의 절연성능을 저하시키는 요인으로는 도전성 이물의 혼입이 있다. 이러한 이물은 인가전계에 의하여 GIS의 시스템 내부에서 상하운동을 하므로 이 충돌음을 검출함으로써 이물의 존재를 검출할 수 있다.

(나) 가스분석에 의한 검출방법

대표적인 전력기기인 변압기에서도 유용한 진단 기법으로 사용되는 가스분석에 의한 부분방전 검출법은 GIS 내부에서 장기간 부분방전이 발생하면 SO_4 , SO_2 , SO_2F_2 , SO_2 등의 활성 분해 생성물이 발생하므로 가스분석에 의하여 부분방전의 유무를 검출할 수 있다. 가스분석에 있어서는 간이시약에 의한 간편한 방법과 이동형 가스크로마토그래프를 사용한 장치가 개발되고 있다. 간이형은 미세한 유리관에 알루미늄 분말을 봉입한 검출소자를 GIS 급기구에 취부하고 소량의 가스를 추출하여 검출소자가 청제색에서 황록색으로 변하는 정도를 측정하여 분해가스의 농도를 측정한다. 한편 컴퓨터를 장착한 소형의 간편한 가스분석장치는 분석시간이 30(분)정도이며 분해가스인 CF_4 , CO_2 및 수분의 분석도 가능하다.

(다) 기타 검출방법

① 가스압력, 밀도 검출법

GIS에 봉입된 SF_6 가스의 누설은 내부의 절연성능의 저하를 초래한다. GIS에는 일반적으로 가스 밀도계가 부착되어 있으므로 가스의 누설은 상시감시가 가능하다. 또한 GIS 내부고장시 아크에 의해 가스압력이 급상승하여 압력 진동파가 발생하므로 SF_6 가스의 압력을 측정하면 내부 이상을 탐지할 수 있다.

② 아아크 광에 의한 부분방전의 검출법

GIS의 내부 지락시는 아크에 의한 광이 발생하

기술해설

로, 이를 측정하여 부분방전을 검출할 수 있다.

③ 기계적 매스스프링 시스템을 이용한 접지사고 검출

접지사고시, 고 가속도의 신호가 금속 인클로저 표면에 발생한다. 그 신호의 가속도 레벨은 10~40(G)이고, 공진주파수 성분은 400(Hz)까지이다. 이 방법은 접지사고 검출과 탱크 벽에 여러 개의 센서를 부착하여 진동가속도를 검출함으로써 사고 위치를 추정하는 것이다. 매스스프링 시스템을 이용한 기계적 센서는 현장에 적용되어 발전되어 왔다. 충돌 가속도가 발생하면 톱니효과를 이용한 봉이 움직이고 어떤 레벨에 도달하면 마이크로스위치를 동작시킨다. 다수의 센서를 탱크 외벽에 부착하여 사고점을 검출할 수 있다.

④ 적외선 카메라를 이용한 국부가열 검출

접지사고나 탱크 내에서 내부 고장이 발생하면, 탱크표면에 국부온도 변화가 나타난다. 표면온도의 2차원 분포는 적외선 카메라를 이용해서 쉽게 측정할 수 있고 또한 다른 방법들도 사용할 수 있다. 변압기에 사용되는 RTD 또는 광 파이버 센서를 이용하여, 3상간의 온도차에 의하여 이상의 유무를 판별한다.

⑤ X-Ray사진을 이용한 탱크내의 조립 상태와 이물질 검출

X-Ray를 이용한 진단기술은 여러 다른 산업에서도 무해한 검출방법으로서 널리 사용되고 있다. 이 방법은 GIS의 분해와 육안검사 없이 내부 조건을 진단하기 위해 사용되고 있다. 또한 내부 이물질과 볼트나 너트의 풀림, 내부파트의 손상이나 변형 및 접촉 상태나 접촉부위 같은 내부 조립상태를 검출할 수 있다.

2.3 모의 결함을 이용한 부분방전의 측정

1) 모의 결함과 신호의 ϕ -q-n 패턴

부분방전 신호를 측정하는 연구에서 중요한 점은 신호의 검출과 잡음의 제거 및 이를 이용한 방전 패턴

의 분류이다. 부분방전 신호 중 약 250(kHz) 정도의 주파수 대역의 신호를 검출하여 사용하는 것이 일반적이다.

방전의 패턴을 인식하기 위하여 시간 대신 위상각을 이용한 방법을 사용하였는데, 이는 위상각과 관련된 부분방전의 정보는 정현파 형태의 인가전압에 의한 간단한 측정장치로 수행이 가능하며, 이 패턴에 나타나는 각 방전 펄스는 부분방전이 발생한 부분의 물리적 상태를 반영하며 방전을 일으키는 결함의 형태와 밀접한 관계가 있다고 알려져 있다. 또 이 방법은 측정하는 과정에서 원래 전기회로에 영향을 받지 않으므로, 복잡하거나 민감한 절력기기의 부분방전 측정에 유리하다.

결함에 따른 부분방전의 패턴을 인식하기 위하여 제작한 모의결함의 일례는 그림 2, 3과 같다.

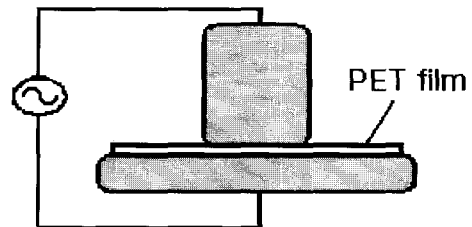


그림 2. 연면방전 모의 전극

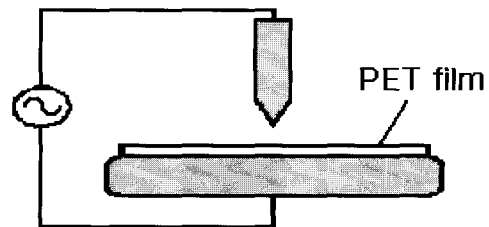


그림 3. 코로나방전 모의 전극

모의 결함으로 사용된 전극은 부분방전을 연구하는 연구자들 사이에서 널리 사용되고 있는 구조이다.

그림 4는 연면방전 모의 전극에서 발생하는 대표적인 방전신호의 결과를 나타낸 그림이며, 그림 5는 연면방전 모의 전극에서 발생하는 부분방전을 위상각, 부분방전의 크기와 빈도와의 대표적인 관계를 나타낸 그림이다.

그림 6은 코로나방전 모의 전극에서 발생하는 대표적인 방전신호의 결과를 나타낸 그림이며, 그림 7은 코로나방전 모의 전극에서 발생하는 부분방전을 위상각, 부분방전의 크기와 빈도와의 대표적인 관계를 나타낸 그림이다.

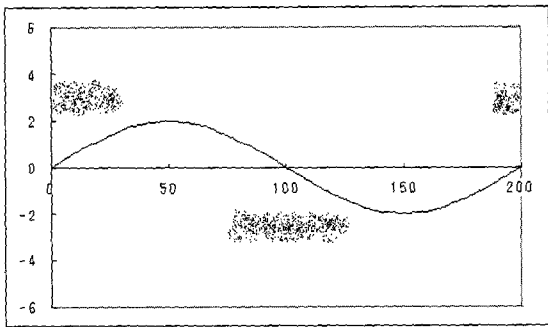


그림 4. 연면방전 모의 전극에서의 부분방전 신호

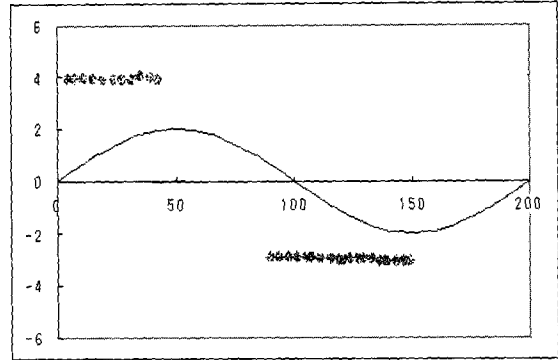


그림 6. 코로나방전 모의 전극에서의 부분방전 신호

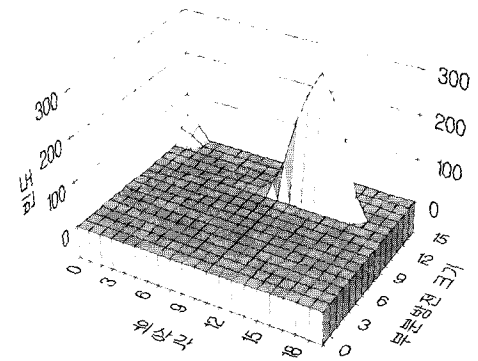


그림 7. 코로나방전 모의 전극에서의 신호 분포

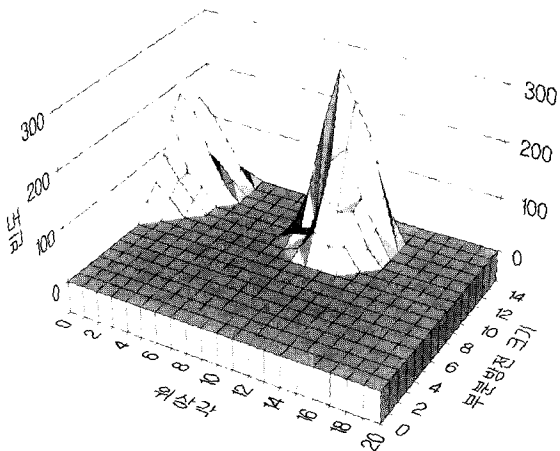


그림 5. 연면방전 모의 전극에서의 신호 분포

부분방전에 있어서 측정되는 물리량은 부분방전시 전하량과 부분방전 발생시각이다. 그러나 실제에 있어서는 발생시각은 방전발생 위상 ϕ 로 측정되는 것이 보통이다. 물론 직류전압 인가에 의한 부분방전의 경우는 인가 후, 또는 방전 발생 후 다음 방전이 발생할 때까지의 절대적인 시간으로 측정되기도 한다. 여기에서 인가전압이 정현파 교류전압이고 측정기간 중 부분방전의 발생상태에 큰 변화가 없다고 가정하면, 그 부분방전의 통계적인 성질을 이용하여 ϕ - q - n 패턴으로 표시하는 것이 가능하다. ϕ - q - n 패턴은 교류한 사이클 동안 어느 정도 크기의 방전이 어느 위상에

기술해설

서 어떤 정도의 빈도를 발생하는가를 표시한다. 통상 여러 주기에 걸친 부분방전은 대개는 동일한 ϕ -q-n 패턴이 주기적으로 반복된다고 볼 수 있다.

ϕ -q-n 패턴에는 부분방전에 관한 물리적 특성 정보를 종합적으로 갖고 있으며, 이 패턴으로부터 종래 많은 연구에서 이용되었던 부분방전의 최대 방전량이나 평균 방전전하량, 전체 방전량 등의 특성을 도출할 수 있다.

2) 다중결합 부분방전의 모의

그림 8은 다중결합 모의 전극이고, 그림 9는 다중결합 모의 전극에서의 대표적인 부분방전 패턴이다.

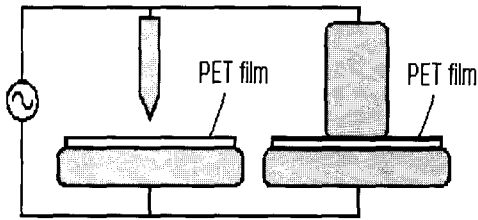


그림 8. 다중결합 모의전극

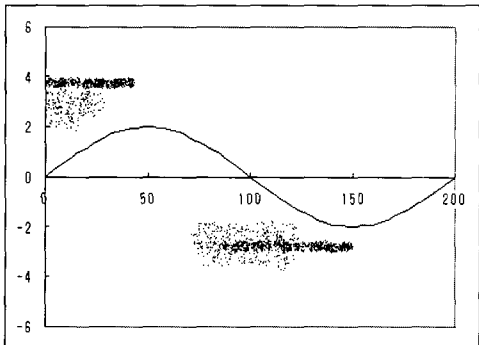


그림 9. 다중결합 모의 전극의 부분방전 패턴

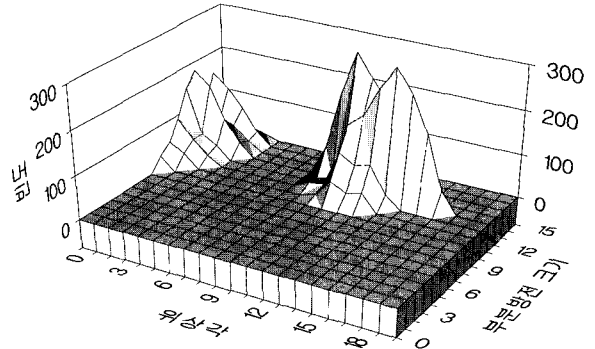


그림 10. 다중결합 모의 전극에서의 신호 분포

다중결합 모의 전극의 경우 부분방전의 패턴은 연면방전 모의 전극과 코로나방전 모의 전극의 부분방전 패턴을 중복시킨 상태와 유사하다는 사실을 알 수 있다.

3. 결론

진단 분야에 있어서는 부분방전의 발생 및 측정 원리에 대하여 살펴보았으며, 대전력기기의 진단, 특히 GIS에서의 대표적 부분방전 유형인 연면방전과 코로나방전의 특성에 대하여 소개하였으면, 특히 연면방전과 코로나방전이 혼재된 경우의 특성을 나타내었다.

부분방전 측정기술을 이용하는 방법은 전력회사 및 대수용가에서의 전력설비의 결함검출, 운전중인 전력설비의 열화감시에 적용, 설비의 잔여 수명예측, 사전보전에의 응용, 전력계통의 중앙감시 및 통제에 본 기술을 응용, 최적의 절연설계에 응용, 진단시스템에 있어서 열화기준제시에 응용 등에 사용이 가능하며, 전력설비 제조회사에서는, 전력설비 출하 및 검수시험에 활용, 전력기기의 신절연재료 개발 및 신뢰성 향상, 전력기기의 설계최적화 및 설계검증 시간 단축에 활용이 가능할 것이다.

◇ 저 자 소 개 ◇



이 준 호(李峻昊)

1985년 2월 서울대학교 전기공학과(학사). 1987년 2월 서울대학교 대학원 전기공학과(석사). 1992년 2월 서울대학교 대학원 전기공학과(박사). 1993년~1994년 일본 전력중앙연구소 초빙연구원. 2001년~2002년 미국 MIT 방문연구원. 1994년~현재 호서대학교 전기정보통신공학부 부교수.



이 진 우(李鎭雨)

1984년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1990~1994년 세명백트론(주) 연구실장. 1994년~현재 호서대학교 전기정보통신공학부 교수. 본 학회 편수이사.