

# 발전기 절연진단의 세계적 연구 현황

김 용 주\* · 김 진 봉\*\*  
(\*한국전기연구소 전력기기연구실장,  
\*\*동 선임 연구원)

## 1. 서 론

원자력 발전설비의 증대로 기존의 화력과 수력발전 설비는 빈번한 기동, 정지를 수반하는 첩두 부하용으로 운전되고 있어 운전 상태가 가혹하여 짐에 따라 이들 발전설비의 신뢰성을 향상시키기 위한 진단기술의 확립이 절실하게 요구되고 있다.

이를 위해 종래부터 정기점검을 실시하여 신뢰성을 확보하여 왔으나 최근에는 보수경비의 저감 및 더욱 높은 신뢰성을 확보하기 위하여 On-Line측정기술 개발에 대한 요구가 증대되고 있다.

그러나 발전기는 형식과 정격이 광범위하고 부하상태, 운전시간, 환경등의 운전 조건이 일정하지 않아 절연수명은 발전기 기종과 운전조건에 따라 매우 달라지게 된다.

발전기 절연 열화 요인으로는 전기, 열, 기계 및 환경적 요인에 의한 단독 혹은 복합적 현상이 있다. 따라서 한가지 절연 진단 방법으로는 정확하게 진단하는 것이 불가능 하다고 보고되고 있다.[1]

본 해설에서는 외국에서 사용하고 있는 발전기 절연진단 기술 및 앞으로의 연구추진방향에 대해 기술하였다.

## 2. 발전기 stator의 절연 진단법

### 2.1 절연 진단 방법의 구분

발전기의 절연 열화를 판정하는 방법으로 발전기의 정지 유무에 따른 Off-Line 방법과 On-Line방법으로 구분할 수 있고 절연물의 시간에 따른 열화 과정과의 연관성에 따라 흡수전류 측정법 등 일반적인 전기적 진단방법과 부분 방전의 특성을 이용한 진단 방법으로 구분할 수 있다. 이를 상세하게 구분하면 다음과 같다.

- 파괴시험 : 발전기에서 권선을 발취하여 BDV (Break Down Voltage)를 측정후 수명 추정
- 내전압 시험 : 교류 전류 시험, 충격 전압 시험, 직류 전압 시험.
- 비파괴 절연특성 시험
  - 직류시험 : 전류-시간특성에서 흡습, 건조 정도, 온도-절연저항 특성에서 열화정도의 판단을 [2], 또한 절연저항-전압 특성에서 직류파괴 전압을 추정한다. [3]
  - 유전정접 시험 : 전압-tan $\delta$  및 온도-tan $\delta$  특성에서 흡습, 건조, 오손, Void의 상태 열화정도를 추정한다.
  - 교류 전류 시험 : 전압-충전 전류 특성에서 전류 증가율을 측정하여 열화정도를 추정한다.
  - 부분 방전 시험 : 방전 전하등 부분방전 Pulse의 특성치를 측정하여 열화정도를 추정한다.
- 물리·화학적 시험 : 분해 gas검출 등에 의해 이상 온도 상승을 감지한다.

- 외관 검사—Coil표면의 변색, 오손 상태, 간격의 이완 유무를 검사한다.
- 운전 이력조사—운전중의 온도, 전류, 전압, 진동, 부하 상태, 운전시간, 기동반복 등의 각종 운전조건을 조합하여 절연 열화특성의 종합 Curve에서 잔여수명을 추정한다.
- On-Line 열화 진단—Computer기술의 진보에 의해 열화 진단의 고속화, 고신뢰도화 및 충분한 절연재료의 Data-base를 구축한다.

이상에서와 같이 여러가지 진단법이 제안되고 있는 것은 앞에서 언급한 바와 같이 한가지 절연 진단 방법으로는 정확하게 진단하는 것이 불가능 하기 때문이다.

## 2.2 수력 발전기 절연 진단법

수력 발전기 stator의 절연 열화는 2.1절에서 언급한 방법들에 의해 진단되고 있으나 최근에는 부분방전 현상을 이용한 진단 방법이 널리 이용되고 있다.

절연물이 열화되어 부분 방전이 발생하였을 때 측정되는 여러 특성치들은 절연 계통에서 발생하는 문제들에 대한 정보를 제공한다. 이 특성치들은 주파수, 위상각, 크기, 극성 및 형태로 구분할 수 있다.

### 2.2.1 부분 방전 크기 측정법

절연물에서 부분방전이 발생 하였을 때 최대 크기는 절연 열화 진전 상태와 밀접한 관계를 갖고 있다 [4~7]. 그림1에서 보는 바와 같이 부분방전 최대크기는 절연이 열화됨에 따라 증가(A-B)하다가 어느 정도 열화가 되면 절연물 내의 미소 기공 표면 전기 전도도가 증가하여 크기가 감소한다(B-C). 그후 절연이 파괴되기 직전까지 크기가 급격하게 상승(C-D)하여 최종에는 절연이 파괴된다.

### 2.2.2 부분 방전의 위상분포와 극성 측정법

전원 전압파형상에서 위상 분포를 측정하여 절연물의 열화상태를 진단할 수 있다[8~11]. 그림2는 전압 인가 초기부터 절연이 파괴될때까지의 위상각

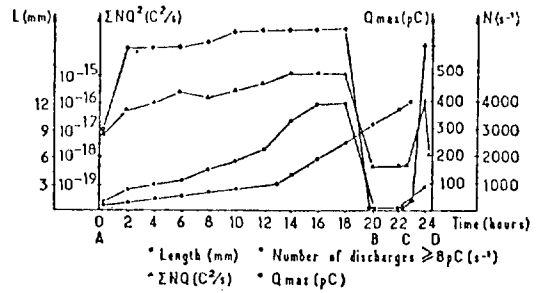


그림 1. 절연 열화시간에 따른 부분방전 최대크기 변화[7]

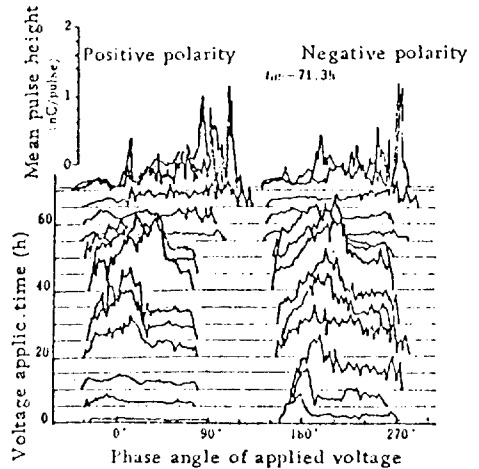


그림 2. 절연 열화 진전에 따른 평균 부분 방전 크기의 위상각 분포[4]

분포와 부분방전 평균 Pulse크기와의 관계를 나타낸 것이다.

전압이 가해지는 초기에는 크기가 큰 부분 방전이 나타나는 위상각 영역이 작다. 절연 열화가 진전함에 따라 위상각의 중앙 부분에서 큰 부분 방전들이 나타나고 절연 파괴 직전에는 전압 파형상의 최대값 부근의 위상각(90°, 270°)에서 큰 부분방전들이 나타난다. 즉 크기가 큰 부분방전들이 나타난다. 즉 크기가 큰 부분방전들이 나타나는 위상각은 열화가 진행됨에 따라 전압파형상의 영점 부근에서 최대값 부근으로 이동한다.

### 2.2.3 부분 방전의 발생지점 진단법

#### ● On-Line 측정법

발전기 내부에 있는 고정자 권선에서 부분방전 신

호가 진행할 때 주파수에 따른 감쇠현상을 이용하여 부분방전 발생 지점을 발견하는 방법으로 아직까지는 실용화가 되어 있지않고 있다.

●OFF-Line측정법

발전기 고정자 권선에 있어서 부분 방전의 발생 지점을 off-line 으로 측정하는 방법으로는 electromagnetic probe법과 음향진단법이 있다. Electromagnetic probe 법은 half toroid 형태의 magnetic probe를 이용하여 고정자 권선에서 발생하는 부분방전의 특정 주파수를 RIV미터로 측정함으로써 부분방전의 발생지점을 측정할 수 있다. [12~14]

음향진단법은 발전기 bar절연내의 기공에서 발생하는 방전을 20KHz주파수 대역의 음향 탐침자를 이용하여 부분 방전시 발생하는 음향을 측정하여 부분 방전의 발생지점을 측정한다. 음향 탐침자를 이용할 경우 Mica-Asphalt 절연물에서는 음향 energy감쇠가 크기 때문에 적합하지 않지만 Mica-Synthetic Resin 절연물에서는 음향 energy감쇠가 적어 적합하다 [14].

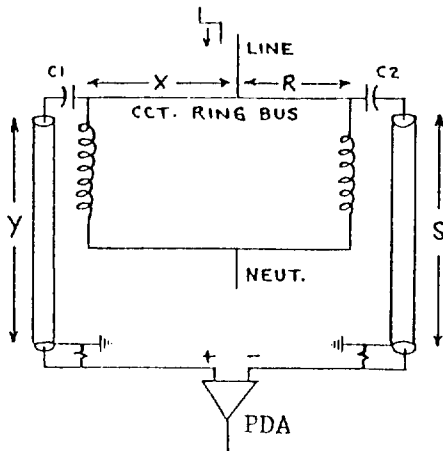
2.2.4 On-line절연진단 및 외부잡음 제거

수력 발전기의 절연을 부분 방전 특성을 이용하여

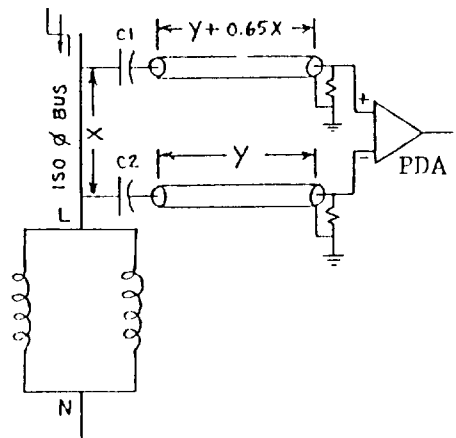
진단할 경우에는 부분방전 이외의 전기적 잡음을 제거하는 것이 무엇보다도 중요하다. 이들 전기적 잡음은 static excitor pulse, arcing brush gear, 다른 전력계통에서의 부분방전 및 radio잡음등이 있다.

이들 잡음의 대부분은 부분방전의 주파수 성분과 다르지만 일부는 부분방전 Pulse특성과 유사하다. 이와 같은 잡음을 제거하는 방법으로는 발전기의 ring bus나 isolated phase bus끝부분에 loop-cable형식의 Coupling Capacitor를 부착하여 differential amplifier를 통한 외부 잡음을 제거하는 방법[15] 있으며 부분방전 신호의 극성을 외부잡음 신호의 극성과 비교하여 외부 잡음과 부분방전을 각각 측정하는 방법[16] 및 외부잡음이 포함된 부분방전을 측정하는 방법이 있다. 이중에서 Coupling capacitor를 이용한 잡음제거 방법은 다음과 같다. Coupler를 Circuit ring bus나 isolated phase bus말단에 그림3 과 같이 설치한다. bus를 따라 이동하는 Pulse 이동 시간은 0.3m/ns로 Power계통에서 발전기로 들어온 잡음 Pulse는 bus 각각으로 분리된다. 이때 bus의 길이가 같고 Coupler를 연결한 Coaxial Cable의 길이가 같다면 두 coaxial cable말단에는 동시에 같은 신호가 나타나 differential증폭기를 지나면서 0가 되어 잡음이 제거된다.

여기서 Coupler는 설치 형태에 따라 그림 3-a),



a) Differential Coupler System



b) Directional Coupler System

$$X+Y/0.65 = R+S/0.65 \quad C1, C2 : \text{Coupler}$$

그림 3. Coupler System[17]

b)에서와 같이 2가지로 구분된다.

●Differential Coupler

Differential Coupler는 발전기 고정자 권선이나 Circuit ring bus에 설치한다. 부분방전에 대한 민감도와 외부잡음제거는 Differential type보다 우수하지만 적용 가능한 권선이 Duple winding에만 국한되고 수소 분위기 중에서는 사용될 수 없어 수력 발전기에만 설치 가능하다.

●Directional Coupler

Directional Coupler는 발전기의 isolated phase bus에 설치한다. 부분방전에 대한 민감도와 외부잡음제거는 Differential type보다 떨어지지만 single winding에도 적용이 가능하고 isolated phase bus에 설치함으로 수력·화력 및 동기 발전기 모두에 설치할 수 있다.

2.3 화력 발전기 진단법

발전기 권선에서 발생하는 부분방전과 발전기의 이상 운전 상태로 인한 발전기 절연물의 과열로 인하여 열 경화성 합성 수지를 이용한 절연물에서도 절연성능이 저하하게 된다.

이와 같은 절연성능 저하는 수력 발전기의 경우 부분방전 특성을 이용하여 진단을 하지만 화력 발전기의 경우에는 냉각 매체로 사용되는 수소 가스중에 포함된 열 분해 입자들을 분석하여 절연상태를 진단한다.

2.3.1 Core Monitor법

수소가스의 음이온이 전극에 부착되면 전극과의 화학작용에 의해 수십 Pico A의 전류를 발생시킨다. 그러나 수소 압력과 유량이 일정한 경우 미세한 불순물이 포함되어 있다면 발생하는 전류량은 감소하게 된다. 이와 같은 원리를 이용하여 화력 발전기 절연물이 과열되었을때 방출되는 열분해 입자를 함유한 수소가스에 의해 발생하는 전류량 변화를 측정하는 장치를 Core Monitor라 한다.

그러나 수소가스에는 열분해 입자만 포함되어 있지않고 oil분무등과 같은 불순물도 포함되어 있고 또한 수소 가스 압력도 일정하지 않을 경우 Core Monitor가 오동작 하기 때문에 Core monitor만에

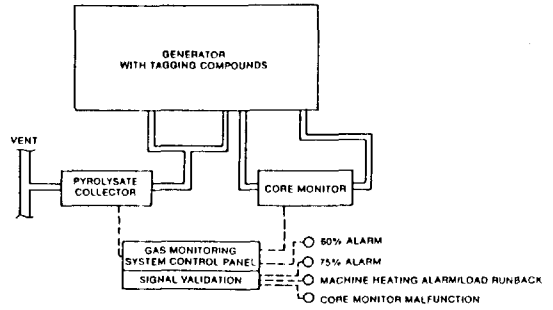


그림 4. 화력발전기 절연 진단 시스템[18]

의해서는 정확하게 절연 진단을 할 수 없다.

최근에는 Core monitor내의 ion chamber를 가열시켜 oil분무의 영향을 되도록 적게 받아 오동작의 요인을 감소시켰다. 그러나 core monitor만에 의해서는 절연물의 과열 상태를 조기에 경보할 수 있지만 열 분해물 발생원은 명확하게 구별할 수 없어 그림4와 같은 화력 발전기 절연 진단 시스템이 개발되어 실용화되고 있다.

Core monitor에서 임계치 이상의 열분해 입자를 감지하면 분출구를 통해 가스를 채취하여 gas chromatograpy등에 의해 화학적 분석을 하여 발생원을 규명한다.

2.3.2 화학적 분석법

2.3.1에서 언급한 바와 같이 분출구를 통해 채취한 가스는 gas chromatography(G.C), 적외선 분광법(I.R), 박막 착색법(T.L.C) 및 자외선 분광법(U.V.)에 의해 분석함으로써 열분해 물질의 발생원을 규명할 수 있다.

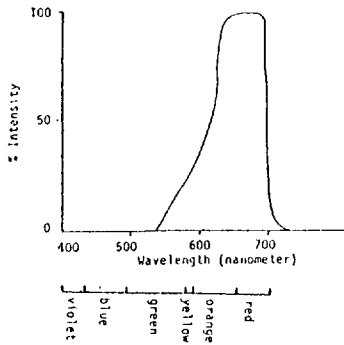
●자외선 분광법

유기 재료들은 자외선을 쬐이게 되면 각 원소에 따라 특징적인 가시 광선을 나타내는데 이를 토대로 열 분해물의 종류를 판단하여 어느 절연물에서 과열이 되었는가를 판단한다.

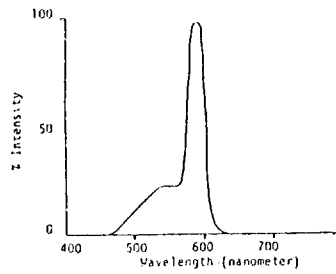
Asphalt Based Varnish는 붉은 벽돌색이 나타나는 반면에 유리 보강 에폭시 resin은 노랑색이 나타난다. 이를 형광 spectra로 분석하면 그림 5-(a), (b)에서와 같이 각각의 파장이 차이가 난다.

●G.C법

수소가스에 열분해물이 함유되면 체적비가 변하게



(a) Asphalt-based Varnish



(b) 유리보강 에폭시 resin

그림 5. 절연재료의 형광 Spectra[19]

되는데 이와 같이 변화된 체적비를 G.C에 의해 정성적으로 분석하여 함유된 원소 성분을 규명할 수 있다.

● 적외선 분광법

열분해 입자들을 미세한 Filter에 부착시켜 각 원소들에 대한 표준 sample들과 적외선 분광기에 의해 spectrum을 비교하여 함유된 원소 성분들을 분석한다.

● 박막 착색법

열 분해 입자들을 포함한 수소가스 유로에 수용성 박막을 놓으면 입자들이 부착된다.

이 박막을 용매로 용해시킨 뒤 화학적 분석이나 자외선 분광법에 의해 spectrum을 분석함으로써 과열 상태를 진단한다. [20]

이상의 방법들은 절연 재료가 과열 되었을때 방출하는 열분해 입자들을 분석하여 절연 재료의 열화상태를 진단하고 과열 대상 절연 재료를 판단할 수 있다. 그러나 대부분의 분석용 시료에는 주위의 불순물의 침투를 정확한 data를 얻지 못할 경우가 있으므로 시료 채취나 분석시에 외부 불순물의 침투를 방지할 수 있는 분위기 조성이 요구된다.

2.3.3 위치 탐지법

앞에서 언급한 방법들은 과열된 재료의 종류를 판단할 수 있으나 과열된 위치를 찾아 내기는 어렵다. 따라서 과열 위치를 찾아 내기 위해 열 및 화학적으로 안정된 tag compound를 각 절연 부위에 코팅한다. 절연물이 과열되면 과열부위에서 compound이온이 방출되어 이를 G.C로 분석하면 각각의

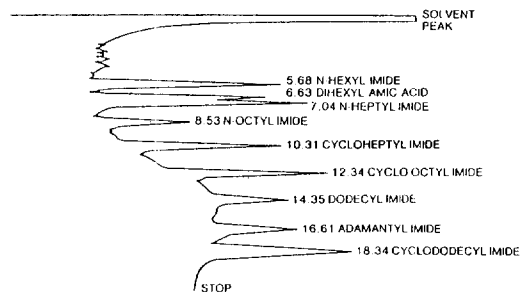


그림 6. Tag compound들에 대한 gas chromatogram[21]

Compound에 대해 그림6에서와 같이 특징적인 Peak 값을 얻게되어 이를 토대로 과열위치를 탐지할 수 있다.

이상에서와 같이 화력 발전기 절연은 절연물이 과열되었을때 방출하는 열분해 입자를 분석하여 진단하고 있다. 그러나 이러한 방법들은 수력 발전기에서의 절연 진단은 절연 열화의 초기 상태를 부분 방전의 특성 측정에 의하여 열화 초기에 진단할 수 있는 반면에 절연물의 열화가 상당히 진행된 뒤에야 발견할 수 있다는 단점이 있다.

따라서 화력 발전기에서도 부분 방전 특성을 이용한 진단 방법의 개발이 일부에서 시도되고 있다.

3. Rotor의 절연 진단

발전기 Rotor의 운전상태는 여자전류와 전압, 권선의 평균온도 및 누설전류를 측정하여 이상 유무를 진단한다.

화력 발전기의 경우 냉각 매체인 수소가스 유량이 감소하면 절연 열화에 영향을 미치기 때문에 rotor의 평균온도를 측정하여 수소가스 유량의 감소 및 수소 냉각기의 효율 저하를 측정할 수 있다.

또한 누설전류를 측정함으로써 누설 전류가 임계치 (일반적으로 1mA)를 초과하기전에 주절연의 열화를 진단한다.

최근에는 부하상태에서 Rotor공극에 탐침 Coil을 삽입시켜 Rotor권선내의 소선들의 단락을 진단하는 방법이 활용되고 있다.

### 3.1 공극 탐침 코일 측정법

Rotor권선내의 소선들이 단락되면 Rotor권선 전체의 열 분포가 불균일하게 되어 rotor는 비정상적인 진동을 하게 된다. 이와 같은 권선내의 소선 단락을 감지하기 위하여 그림7.에서 보는 바와 같이 공극사이에 탐침 coil을 삽입한다.

Rotor slot의 원주방향 누설 flux를 탐침 coil로 측정하면 그림8에서와 같은 전압파형이 나타난다. 소선이 단락되면 A에서와 같이 전압 peak치가 감소한다.

이때 나타나는 전압파형은 rotor표면과 탐침 coil사이 거리에 영향을 받기 때문에 표준 거리에서 측정된 파형으로 변환시키는 과정이 필요하다.

아울러 단락된 소선수는 극성이 다른 Rotor coil사이의 전압 차이를 비교하여 계산할 수 있다.

## 4. 결 론

산업설비의 증대와 정밀기기 사용이 증대함에 따라 신뢰성 있고 안정된 전력 공급의 필요성이 점차로 증대함에 따라 전력 공급원인 발전기의 신뢰성 있고 경제적인 유지 보수가 필요하게 되었다.

이를 위해 앞에서 언급한 바와 같이 여러 방법에 의해 절연 진단을 하고 있으나 적용범위에 따라 장점과 단점이 있다. 따라서 각 진단 방법의 장단점을 상호 보완한 종합적인 진단 방법의 연구 개발이 앞으로 추진하여야 할 과제이다.

또한 계측 기술의 진보와 Computer기술의 진보로 측정 정밀도의 향상이 가능하게 되었다. 이러한 기술의 진보는 Computer에 의한 고신뢰도 자동 측정 기술의 개발과 절연 열화 진단 전문가 시스템의 개발이 가능하게 될 것이다.

## 참 고 문 헌

- [1] Working Group 07 of Study Committee NO. 11(Rotating Machines), "Evaluation of the Quality of the Insulation of High Voltage Large Rotating Machines," ELECTRA International Conference on Large High Voltage Electric Systems, PP, 51-64, May 1980.
- [2] Simons J.S., "Diagnostic Testing of High Voltage Machine Insulation: A Review of Ten Years' Experience in the Field," IEE Proc., vol. 127, Pt. b, no. 3, PP. 139-154, May 1980
- [3] IEEJ Technical Report, "Insulation Diagnosis Test Method for Rotating Machines and Power Cables of 3.3KV and 6.6KV Rating," The Institute of Electrical Engineers of Japan, The Investigation committee of solid Insulation Diagnosis, March 1984.
- [4] Okamoto T. and Tanaka T., "Change of Pulse-Mean  $\phi$ -q Distribution Patterns of Partial Discharges due to Treeing Propagation,"

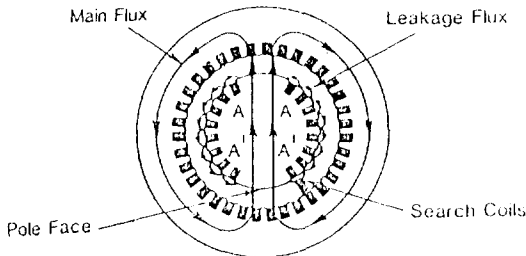


그림 7. 공극 탐침 coil설치도[22]

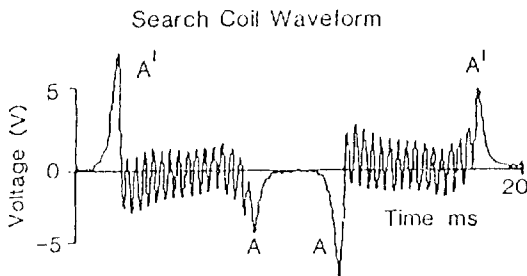


그림 8. 탐침 coil전압 파형[22]

- Electrical Engineering in Japan, vol. 102, no.6, PP. 18-25, 1982.
- [ 5 ] Kitamura Y. and Hirabayashi S., "Change of Internal Partial Discharge on Epoxy Resin during Voltage Endurance Test," Electrical Engineering in Japan, vol. 103, no.5, PP. 1-7, 1983.
- [ 6 ] Dakin T.W. and Studniarz S.A., "Voltage Endurance of Epoxy Resins with Microcavity Type Defects," Conference Record of the 1976 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, PP. 291-295, 1976.
- [ 7 ] Laurent C., Mayoux C. and Sergent A., "Electrical Breakdown Due to Discharges in Different Type of Insulation," IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol. EI-16, no.1. PP. 52-58, February 1981.
- [ 8 ] Henriksen M. and et al., "A New Method for Testing Organic Materials' Resistance to Partial Discharges," Conference Record of 1984 IEEE International Symposium on Electrical Insulation PP. 323-326, June 1984.
- [ 9 ] Okamoto T. and Tanaka T., "Partial Discharge Characteristics in Phase Domain for Various Cylindrical Voids," Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, PP. 498-503, 1985.
- [10] Kelen A., Critical Examination of the Dissipation Factor Tip-Up as a Measure of Partial Discharge Intensity," IEEE Transactions Electrical Insulation, vol. EI-13, no.1, PP. 14-24, February 1978.
- [11] Kin Y.J., "Partial Discharge Spectroscopy for Insulation Diagnosis," Ph. D Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, Oct. 1987.
- [12] T.W. DaKin, C.N. Works, J.S. Johnson, "An Electromagnetic probe for Detecting and Locating Discharges in Large Rotating and Locating Discharges in Large Rotating Machine stators," IEEE Power Apparatus & Systems Volume 88, 1969, no. 8, PP. 251-257.
- [13] L.E. Smith, "A Peak Pulse Ammeter-Voltmeter for Ionization (corona) Measurement in Electrical Equipment," Minutes of the 1970 Doble Conference, sec, 3-401.
- [14] R.T. Harrold & T.A. Goodwin "The Interpretation of Corona and Dielectric Measurements on the Mica-Asphalt Insulation of a 30-Year-old Waterwheel Generator at Grand Coulee Dam," IEEE PAS vol. 92. no. 6 PP. 1935-1944 Nov/Dec, 1973.
- [15] Kurtz M. and Lyler J.F., "Generator Insulation Diagnostic Testing," IEEE Transactions on Power Apparatus and System, vol. PAS-98, no. 5, PP. 1596-1603, Sept/Oct 1979.
- [16] Barton S.C. and Carson C.C., "Implementation of Pyrolysate Analysis of Materials Employing Tagging Compounds to locate an Overheated Area in a Generator," IEEE PES Summer Meeting, Portland Oregon, July 26-31, 1981.
- [17] W.McDermid, "Installation of Permanent Couplers in Manitoba Hydro," CEA/EPRI PDA/RFM User's Workshop, 22-24, Sep. 1986.
- [18] R.S.Gill "Generator Gas Monitoring System," Workshop Proceedings. Generator Monitoring and Surveillance, EPRI EL-3564-SR, PP.1.1-1.9, August 1984.
- [19] Ryder D.M, Wood J.W. and Gallagher P.L., "The Detection and Identification of Overheated Insulation in Turbogenerator," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-98, no. 1, PP.333-336, Jan/Feb 1979.
- [20] Hogg W.K., Ryder D.M. and Wood J.W., "The Feasibility of Identifying and Locating Thermal Mechanisms in Large Machines by Remote Sensing," IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, PP. 228-237, 1981.
- [21] Barton S.C. and Carson C.C., "Implementation of Pyrolysate Analysis of Materials Employing Tagging Compounds to Locate an Overheated Area in a Generator," IEEE PES Summer Meeting, Portland Oregon, July 26-31, 1981.
- [22] R.J. Jackson, I.A. Rberts "Generator Rotor Monitoring in the United Kingdom," CIGRE, Session -27th August -4th September, 11-04., 1986.