

## 발전기 고정자 권선의 새로운 절연열화 판정기준 설정에 관한 연구

황 돈 하\* · 김 용 주\* · 김 진 봉\* · 전 정 우\* · 김 희 곤\*\* · 박 종 정\*\*

\* 한국전기연구소 발전기진단연구팀 \*\* 전력연구원 수화력발전연구실

### A Study on the New Criteria for Assessing the Insulation Deterioration of Generator Stator Winding

D.H. Hwang\* · Y.J. Kim\* · J.B. Kim\* · J.W. Jeon\* · H.G. Kim\*\* · J.J. Park\*\*

\* KERI Generator Diagnosis Team \*\* KEPRI Power Generation Research Laboratory

**Abstract** - This paper describes the relationship between the various non-destructive parameters and the breakdown voltage for the 17 kV, 300 MVA and the 22 kV, 500 MVA generators stator bars with polyester and epoxy/mica insulation respectively.

Also, this study reports the results of an investigation into the factors which can assess the insulation condition of generator stator winding.

Furthermore, a new parameter, Partial Discharge Index(PDI), is introduced as the valuable parameter for the assessment of insulation condition. The ratio between partial discharge increment and the stepwise voltage increment from the Discharge Inception Voltage (DIV) at the characteristic or resonant frequency band shows the close relationship between the breakdown voltage and PDI.

( $\Delta \tan \delta$ ), 정전용량( $\Delta C/C_0$ ), 교류전류( $\Delta I$ ) 시험 등의 각종 비파괴 파라메타와 최대 부분방전 크기( $Q_m$ ) 및 절연파괴 전압( $V_{BD}$ )과의 상호 연관성을 분석한 결과를 제시한다.

또한, 화력 발전기 고정자 권선의 절연열화 상태의 평가를 위한 새로운 파라메타로서, 부분방전 개시전압(DIV ; Discharge Inception Voltage)에서의 부분방전 크기를 기준으로 전압에 따른 최대 부분방전 크기의 증가율을 나타내는, 부분방전 변화지수(PDI ; Partial Discharge Index)를 도입하고, 절연파괴 전압과 PDI의 상관관계를 규명함으로써 PDI의 유용성을 증명하고, PDI를 이용한 발전기 고정자 권선의 새로운 절연열화 판정기준을 제안한다.

마지막으로, 실제 발전기를 대상으로 한 PDI의 적용 가능성을 검토하고, 부분방전 측정에서의 공진 주파수의 영향을 분석한 결과를 제시한다.

## 1. 서 론

대형 발전기 고정자 권선의 예기치 않은 절연파괴 사고는 불시의 운전정지로 인한 전력공급의 불안과 장기간의 복구시간에 따른 심각한 경제적 손실을 초래하기 때문에 고정자 권선의 정확한 절연상태, 더 나아가서 사용 가능한 잔존수명을 예측하기 위한 연구가 국내외적으로 활발히 진행되어 왔다[1~3].

더욱이 국내의 많은 발전기는 장기간 운전으로 인해 노후화되어 설계수명의 한계에 와 있거나 초과되어 운전되고 있고, 부지확보의 어려움으로 신규 발전소의 건설이 어려운 상태이기 때문에, 발전기 운전의 신뢰성 확보, 효율적인 운용계획 수립과 함께 수리, 재권선, 교체 등의 경제적인 예방정비 및 사용수명의 연장을 위해서, 고정자 권선의 절연열화 상태를 신뢰성있게 예측할 수 있는 판정기준의 확립이 절실히 요구되고 있다[3].

본 논문에서는, 발전기 고정자 권선의 절연열화 판정기준 설정을 위한 기초적인 연구로서, 실제 운전에 의해 장기간에 열화된 17 kV급 Polyester 절연 권선과 실험실적 가속열화 시험에 의해 장시간 절연열화된 22 kV급 Epoxy Resin/Mica 절연의 고정자 권선을 이용한 다양한 (비)파괴 시험결과를 통해서 유전정점

## 2. 실험 방법

### 2.1 대상 발전기의 사양

각종 (비)파괴 시험을 수행하기 위해 본 연구에서 사용한 발전기 고정자 권선은 3종류 - 25년 동안의 실제 운전에 의해 전기적, 기계적, 열적으로 열화된 권선(A), 실험실적 강제 가속열화에 의해 절연열화된 권선(B), 20년의 운전이력을 가진 실제 발전기 고정자 권선(C)의 U, V, W상 - 로서, 각 발전기 및 고정자 권선의 자세한 사양은 표 1과 같다.

표 1. 대상 발전기의 사양

Generator Specification	A	B	C
Output Rating	300 MVA	500 MVA	72 MVA
Rated Voltage	17 kV	22 kV	13.8 kV
Insulation	Polyster	Epoxy/Mica	Polyster
Sample No.	20 EA	8 EA	3 Phase
Manufacturer	TOSHIBA	HANJUNG	G.E.
비 고	채취 권선	가속열화 권선	실제 발전기 권선

실험실적 가속열화 시험에 사용된 고정자 권선(B)은 그림 1과 같이 Endwinding이 없는 Straight 권선

을 본 연구에 적합하게 제작한 권선이고, 주절연의 두께는 5 [mm]이다. 가속열화 조건은 주파수 420 Hz, 온도 110 ℃, 전압 27.5 kV(또는 12.7 kV)로서, 표 2에 각각의 시료별로 가속열화 전압에 따른 열화시간을 나타내었다.

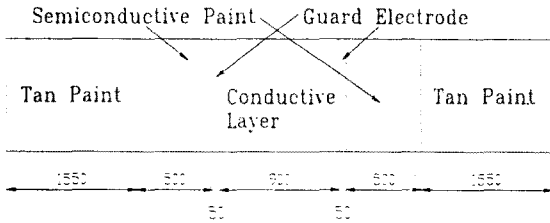


그림 1. Straight Winding의 형상 (발전기 B)

표 2. 실험실적 가속열화(Aging) 시간 (발전기 B)

Sample No. Conditions	1, 2, 3	4	5, 6, 7, 8
Aging Voltage [kV]	12.7	27.5	12.7
Aging Time [hour]	6,890	2,406	6,890
Total Aging Time	6,890	9,296 hour	10,509 hour
Aging Atmosphere	Air	Air	H <sub>2</sub> (4 atm)

## 2.2 시험방법

발전기 A의 개별 고정자 권선은 그림 2와 같이 모의슬롯에 고정자 권선을 한 개씩 설치하여 실험실적 (비)파괴 시험을 수행하였고(발전기 B의 권선도 동일한 방법으로 실험), 발전기 C는 정지중에 각 상별로 비파괴 시험을 수행하였다.

시험항목은 현재까지 전세계적으로 널리 사용되고 있는 발전기 절연진단 시험 즉, 교류전류( $\Delta I$ ), 유전정접( $\Delta \tan \delta$ ) 및 정전용량( $\Delta C/C_0$ ), 부분방전 개시전압(DIV) 및 부분방전( $Q_m$ ) 시험 등의 비파괴 시험을 모두 실시하였고, 개별 권선은 IEEE Standard에 따라 절연파괴( $V_{BD}$ ) 시험을 실시하여 새로운 절연열화 판정기준 설정을 위한 기준값으로 사용하였다[2~4].

또한, 여러 가지 주파수 대역에서 부분방전 시험을 수행하여 부분방전 크기에 대한 부분방전 측정기의 주파수 특성 및 공진 주파수의 영향을 분석하였다.

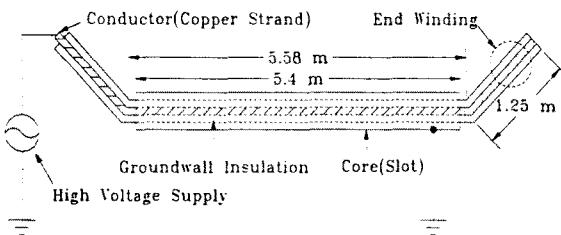


그림 2. 고정자 권선의 형태 및 실험방법 (권선 A)

## 2.3 측정장치

각종 비파괴 시험을 위한 교류 고전압 인가와  $\Delta I$ ,  $\Delta \tan \delta$  및  $\Delta C/C_0$  시험은 Tettex사의 "Automatic 12 kV Insulation Test System : Type. 2818-QA"을 이용하여 수행하였고, 부분방전 개시전압(DIV)과 최대

부분방전 크기( $Q_m$ )도 Tettex사에서 제작한 상용 부분방전 측정기(Partial Discharge Measuring System : Type. 9124)와 1,000 [pF]의 Coupling Capacitor를 사용하였다. 부분방전 측정기의 측정 주파수 대역은, 일반적인 증폭기(Con. Amp.)를 이용할 때는 40~200 [kHz]로 고정되고, 협대역 증폭기(Narrowband Amp.)를 사용할 경우에는 30 [kHz] ~ 2 [MHz]의 범위에서 가변시킬 수 있다.

절연파괴 시험(Breakdown Test)은 각 시료별로 권선을 모의슬롯에 설치한 상태로 수행하였고, 최대 정격이 100 [kV], 1 [A]인 Hipotronics사의 교류 내전압 시험기(AC Dielectric Test System)를 사용하였다.

## 3. 실험결과 및 검토

### 3.1 (비)파괴 시험결과

A 및 B 발전기의 각 시료와 C 발전기의 각 상별로 수행한 비파괴 시험결과로부터, 정격 상전압의 1.25 배 전압( $1.25 \times E/\sqrt{3}$ )에서 측정된  $Q_m$ 과  $\Delta I$ ,  $\Delta \tan \delta$  및  $\Delta C/C_0$ 와의 관계를 그림 3에 나타내었다. 고정자 권선의 오손 및 흡습도와 절연물의 평균적인 열화 상태를 비교적 잘 나타낸다고 알려진  $\Delta I$ ,  $\Delta \tan \delta$  및  $\Delta C/C_0$ 의 분포가 불규칙하므로  $Q_m$ 과 상관관계가 거의 없음을 볼 수 있고, 이것은  $Q_m$ 이 고정자 권선의 국부적인 열화지점(void)에서 발생하는 부분방전 크기를 나타내기 때문인 것으로 판단된다.

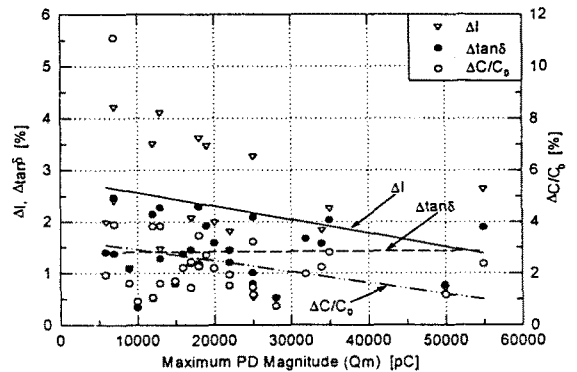


그림 3.  $Q_m$ 과  $\Delta I$ ,  $\Delta \tan \delta$ ,  $\Delta C/C_0$ 의 관계

한편, 각 시료별로 권선을 모의슬롯에 설치한 상태로 수행한 절연파괴 시험에서는, A(시료 #13~#32) 및 B(시료 #1~#8) 발전기 고정자 권선 중에서 11개 시료(#4, #13~#15, #19, #22, #28~#32)만이 슬롯내부에서 절연파괴되었고, 나머지 시료는 슬롯외부에서 파괴되었거나 연면방전 발생에 의해서 파괴되었다.

장기간 사용한 고정자 권선에 대한 절연파괴 시험에서의 판정기준은 절연파괴 전압( $V_{BD}$ )이  $2E+1$  [kV] 이하이면 절연상태가 불량한 것으로 판정하고 있으나, 본 연구에서 사용한 고정자 권선의 경우에는 시료 #31만이 이 기준 이하( $V_{BD}=15$  kV)에서 절연파괴되어 절연이 불량한 것으로 나타났다.

그림 4와 그림 5는 슬롯내에서 실제 절연파괴가 발생한 권선만을 이용하여 절연파괴 전압과 각종 비파

과 시험에 의한 파라메타와의 관계를 나타낸 것으로서,  $V_{BD}$ 와  $\Delta I$ ,  $\Delta \tan \delta$  및  $\Delta C/C_0$ 와의 관계를 나타낸 그림 4를 보면, 절연파괴 전압에 대한  $\Delta I$ ,  $\Delta \tan \delta$  및  $\Delta C/C_0$ 의 분포가 전체적으로 분산되어 있으므로 상관관계가 낮다는 것을 볼 수 있다. 정격 상전압 ( $E/\sqrt{3}$ ) 및 정격 상전압의 125 [%] 전압에서 측정된 최대 부분방전 크기인  $Q_{m3}$  및  $Q_{m4}$ , 1,000 [pC]을 기준으로 한 부분방전 개시전압(DIV)과 절연파괴 전압( $V_{BD}$ )간의 관계를 나타낸 그림 5를 보면, 발전기 고정자 권선의 절연열화 상태를 판정하는 데 있어서 가장 신뢰성 있는 파라메타로 알려진  $Q_m$ 과 DIV도  $V_{BD}$ 와 특징적인 상관관계를 나타내지 않음을 알 수 있다. 그러므로 부분방전 크기, 유전정접 등의 각종 비파괴 파라메타의 절대값에 의한 절연열화 평가는 고정자 권선의 절연상태를 정확하게 나타내지 못할 가능성이 많다.

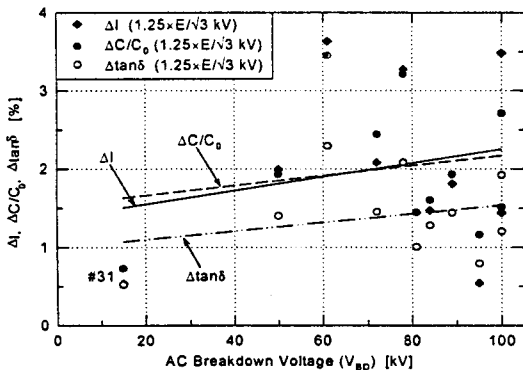


그림 4. 절연파괴 전압과  $\Delta I$ ,  $\Delta \tan \delta$ ,  $\Delta C/C_0$ 의 관계

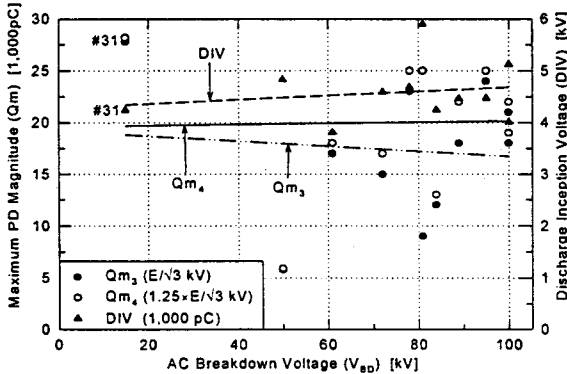


그림 5. 절연파괴 전압과  $Q_m$  및 DIV의 관계

### 3.2 부분방전 크기의 주파수 특성 분석

그림 6은 3종류의 고정자 권선을 대상으로 협대역 증폭기(Narrowband Amp.)를 이용한 부분방전 크기의 측정결과를 나타낸 것으로서, 중심주파수(CF; Center Frequency)를 30 [kHz]에서 2 [MHz]로 가변시키면서 2종류의 대역폭( $\Delta f$ ; 4 kHz, 30 kHz)을 사용하여 각각의 시료 및 상별로  $E/\sqrt{3}$ 와  $1.25 \times E/\sqrt{3}$ 의 50 [%] 전압에서 측정된 부분방전 크기를 평균하여 나타내었다.

측정 주파수 대역에 따라 모든 권선 및 전압에서 부분방전 크기가 현격한 차이를 나타내고 있으며, 따라서 고정자 권선의 정확한 절연상태 판정을 위해서

는 항상 동일 주파수 대역에서의 측정값을 비교해야 함을 알 수 있다.

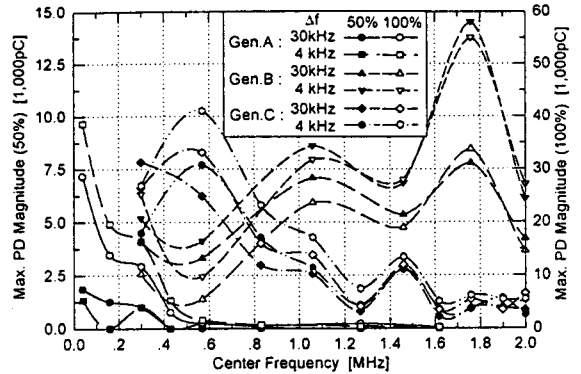


그림 6. 부분방전 크기의 주파수 특성

또한, 인가전압과 대역폭에 관계없이 부분방전 크기가 가장 크게 측정되는 주파수 대역이 발전기 A의 고정자 권선은 0.57 [MHz], B 발전기의 권선은 1.76 [MHz] 지점인 것을 뚜렷이 볼 수 있다. 이것은 권선과 측정 시스템(Coupling Capacitor+PD Detector)간의 공진 주파수에 의한 영향으로 판단되고, A 발전기 고정자 권선의 Capacitance가 12 [nF], B는 1.1 [nF]이므로  $f=1/2\pi\sqrt{LC}$ 로부터 LC가 큰 권선의 공진 주파수가 낮다.

그러나 실제의 발전기(C)에서는 각 상별로 28개의 고정자 권선이 연결되어 있어 LC( $C=200$  nF)가 크기 때문에 그림 6에서와 같이 공진 주파수가 40 [kHz] 이하의 저주파임을 볼 수 있다.

### 3.3 부분방전 변화지수(PDI)의 개발

발전기 고정자 권선의 절연열화 상태를 평가하기 위해 중요하게 취급되고 있는 파라메타 가운데 절연물의 미소공극(void)에서 발생하는 부분방전의 최대값을 측정하여 그 절대값 또는 변화추이(trend)를 분석하여 절연상태를 평가하는 것이 현재까지 일반적으로 사용되고 있다[1~3].

그러나 부분방전을 측정하기 위해 사용되는 부분방전 측정기(PD Detector)와 측정 주파수 대역에 따라 부분방전의 최대 크기가 다르게 측정되고, 권선의 인덕턴스 성분으로 인해 교정(Calibration)이 어렵다는 문제점이 있기 때문에 절대값에 의한 판정 뿐만 아니라 사용시간에 따른 변화추이를 분석하기에도 어려운 점이 있었다[5]. 아울러 앞에서 언급한 바와 같이 최대 부분방전의 절대 크기로는 절연열화 상태를 정확하게 평가할 수가 없다.

이를 해결하기 위해 본 연구에서는, 전압에 따른 부분방전 크기의 변화율인  $\Delta PD$ 의 개념을 사용한 새로운 절연열화 판정을 위한 파라메타로서, 부분방전 변화지수(PDI; Partial Discharge Index)를 도입하였다.

PDI는 부분방전 개시전압(DIV) [kV]에서의 부분방전 크기인 1,000 [pC]을 기준으로 전압 상승에 따른 최대 부분방전 크기의 증가율을 나타낸 것으로서, 다음 식과 같이 정의하였다.

$$PDI = (Q_n - 1,000) / (V_n - DIV) \text{ [pC/kV]}$$

여기서  $V_n$  : 임의의 인가전압 [kV]

$Q_n$  :  $V_n$ 에서의 부분방전 크기 [pC]

부분방전 변화지수(PDI)를 도입한 이유는, 부분방전이 발생하기 시작하는 부분방전 개시전압이 교류 절연과 전압과 상관관계가 비교적 높고[1], 전압인가 초기에 부분방전이 크게 발생하면 절연물의 열화가 많이 진행되었다고 판단하였기 때문이다.

### 3.4 부분방전 변화지수(PDI)의 적용

부분방전 변화지수(PDI)의 유용성을 확인하기 위해서, 발전기 A의 고정자 권선을 대상으로 하여 3종류의 주파수 대역에서, 정격 상전압의 50 [%] 전압에서의 최대 부분방전 크기( $Q_m$ )와 1,000 [pC]의 부분방전이 발생하는 DIV를 측정하였다. 이때 PDI에 의한 판정기준을 설정하기 위한 주파수 대역은 시료와 측정 시스템간의 공진현상에 의해 부분방전이 가장 크게 측정되는 영역인 570 [kHz] 대역으로 하였다.

3가지 종류의 주파수 대역에서 측정한 전압에 따른 부분방전 크기 증가율을 이용하여 산출한 PDI를 나타낸 그림 7을 보면, 절연과 전압( $V_{BD}$ )이 낮을수록 PDI는 증가하고,  $V_{BD}$ 가 높아 절연내력이 충분한 시료일수록 PDI가 감소하고 있으므로 제시한 PDI에 의한 절연열화 진단기법은 고정자 권선의 절연열화 상태를 매우 잘 나타낼을 볼 수 있다.

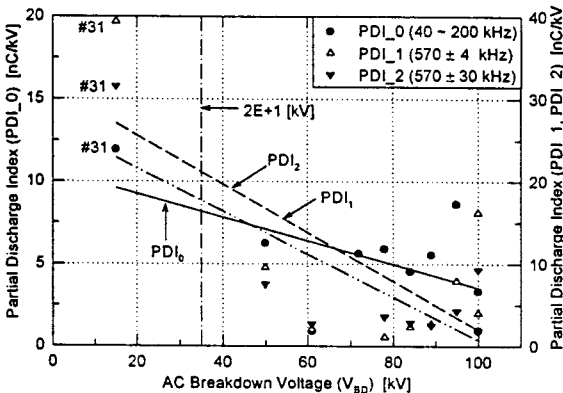


그림 7. 부분방전 변화지수와 절연과 전압과의 관계

그리고 본 논문에서는 그림 7의 각각의 부분방전 측정 주파수 대역에 따른 PDI의 기울기로 부터, 17 kV급 Polyester 절연 고정자 권선에 대한 절연열화 판정기준을, PDI<sub>1</sub>이 10,000, PDI<sub>2</sub> 및 PDI<sub>3</sub>가 20,000 [pC/kV] 이상이면 절연상태가 불량하다고 판정할 것을 제안하고, 이 기준을 적용하면 시료 #31은 각각의 주파수 대역에서 모두 불량한 것으로 판정됨을 알 수 있다.

그러나 실제 발전기(C)를 대상으로 한 부분방전 측정에서는 그림 6에서와 같이 LC 값이 커서 공진 주파수가 저주파이기 때문에 저주파 증폭기의 구성이 요구되고, DIV와  $Q_m$ 을 정확하게 측정하기 위한 외부잡음 제거 기법에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 발전기 고정자 권선의 절연상태 평가를 위한 새로운 파라메타로서, 부분방전 개시전압(DIV)에서의 부분방전 크기(1,000 pC)를 기준으로 전압상승에 따른 최대 부분방전 크기의 증가율을 나타내는 부분방전 변화지수(PDI)를 제시하였고, 3종류의 고정자 권선에 대한 다양한 (비)과파 시험을 통해서 절연과 전압과 PDI 및 각종 비과파 파라메타와의 상관관계를 연구한 결론은 다음과 같다.

- (1) 정지중(Off-Line) 비과파 시험에 의한 Parameter 인 교류전류( $\Delta I$ ), 유전정접( $\Delta \tan \delta$ ) 및 정전용량( $\Delta C/C_0$ )과 최대 부분방전의 크기( $Q_m$ )간에는 상관관계가 낮다. 또한, 이들 비과파 파라메타와 절연과 전압( $V_{BD}$ ) 사이에도 상관관계가 낮다고 판단된다. 따라서 종래의 비과파 진단시험에 의한 제 파라메타의 절대값을 이용한 절연열화 평가는 실제의 절연상태를 정확하게 나타내지 못할 수 있다.
- (2) 17 [kV]급 Polyester 절연 고정자 권선의 절연열화 상태에 대한 불량 판정기준을 PDI를 이용하여 제시하였고, 이 기준을 적용하여 정격 상전압의 50 [%]에서 PDI에 의한 절연열화 평가 결과, 절연과 전압( $V_{BD}$ )과 밀접한 상관관계를 확인하여 PDI가 고정자 권선의 절연열화 상태를 정확하게 평가할 수 있음을 입증하였다.
- (3) 부분방전 시험시 측정 주파수 대역에 따라 부분방전의 크기가 큰 차이가 나고, 고정자 권선의 LC에 따라 부분방전이 가장 크게 측정되는 공진 주파수 대역이 존재함을 확인하였다.
- (4) 실제의 발전기 고정자 권선에 대하여 제시한 PDI를 이용한 절연상태 평가를 위해서는 저주파 대역에서의 부분방전 측정 시스템이 필요할 것으로 사료된다.

향후 잡음제거 기법과 발전기의 정격전압 및 절연 종류별로 상세한 절연열화 판정기준 설정이 추가적으로 요구된다.

### [ 참고 문헌 ]

- [1] B.K. Gupta, et al., "Techniques for Assessing the Condition of Stator Insulation", Ontario Hydro Research Review, No. 6, pp. 10~17, 1992. 6.
- [2] K. Kadotani, et al., "An Approach for Insulation Diagnosis of Mica-Resin Coils", IEEE Trans. on PAS, Vol. 100, No. 9, pp. 4136~4141, Sep. 1981.
- [3] 황돈하, 김용주 외 4명, "수력 발전기 고정자 권선의 절연수명 평가기준 설정에 관한 연구", 대한전기학회 국제학술대회 논문집(C), pp. 1769~1773, 1996. 7.
- [4] "IEEE Guide for Insulation Maintenance of Large AC Rotating Machinery (10,000 kVA and Larger)", ANSI/IEEE Std. 56-1977, July 19, 1990.
- [5] H.G. Sedding, "The PD Calibration Problem in Rotating Machines", IEE Panel Session on Digital Techniques for PD Measurement on Rotating Machines, No. 92THO425-9 PWR, pp. 24~28, 1992.