

수력발전기 고정자권선용 운전중 부분방전 측정 센서 및 시스템 개발

강동식* · 선종호* · 황돈하* · 유영호** · 서일수*** · 신병철*** · 김현일[§] · 이광호[§]
 *한국전기연구원, **동우전기공업(주), ***(주)인텍씨앤아이, [§]수자원공사

Development of the On-line Partial Discharge Measuring Sensor and System on Stator Windings for Hydro Generator

D.S. Kang* · J.H. Sun* · D.H. Hwang* · Y.H. Yun** · I.S. Seo*** · B.C. Shin*** · H.I. Kim[§] · K.H. Lee[§]
 *KERI, **Dongwoo, ***Intech C&I, [§]KOWACO

Abstract - A lot of R&D on the diagnosis of stator winding insulation for large rotating machines has been carried out since the 1970s. The on-line partial discharge measurement has proved to be an effective technique in the evaluation of the state of stator insulation in high voltage rotating machines.

The purpose of this paper is to describe the method of the on-line partial discharge measurement on stator windings for hydro-generator with ceramic sensor and measuring system. We developed ceramic coupling sensor, partial discharge measuring system, terminal box and index parameters.

1. 서 론

고압 회전기의 장기간 사용에 따른 고장원인은 고정자 권선의 절연부분에서 열화가 진전되어 예상치 못한 절연 파괴 사고로 나타나는 경우이다. 이러한 회전기 고정자 권선의 전기적 절연열화 진단방법으로 최근 on-line 부분방전 진단방법을 많이 연구하고 있다. On-line 부분방전 진단법은 절연파괴 원인과 가장 관련성이 높은 결합요인인 내부방전, 슬롯방전 및 권선단말 방전 등의 다양한 종류의 방전이 측정 가능하며, 운전중에 동일한 센서 및 계측기로 연속적으로 절연상태를 감시할 수 있는 장점을 지니고 있어 수명평가기법으로 활용하고자 활발한 연구가 수행되고 있다.

본 논문에서는 장기 사용중인 수력발전기의 고정자 권선에서 운전중 발생하는 부분방전 현상을 측정하여 절연상태를 연속적으로 감시하기 위하여 이에 필요한 최적 측정감도를 지닌 부분방전 센서, 현장조건을 고려한 잠음제거기법 구현, 센싱된 방전펄스를 신호처리하는 측정 transducer 및 진단알고리즘을 지닌 운전중 측정시스템을 구축하였다.

2. 고정자 권선에서의 방전펄스 특성

고압 회전기의 고정자 권선 절연은 제작과정에서 생성된 보이드에 운전전압이 인가되면 부분방전이 발생되어진다. 더욱 장기운전에 따른 열적, 기계적, 전기적 및 환경적 열화요인 등이 작용하게 되면 부분방전 열화가 진행되어 보이드 크기가 더욱 증가하게 된다. 즉, 절연층 내의 보이드에 고전압이 인가되면 부분방전으로 도전성 경로가 형성되어 보이드가 도전체의 역할을 하게 되므로 절연간격이 좁아지는 효과를 가져와 절연파괴 전압은 저하하게 된다. 또한, 운전상태의 열적 열화로는 무기재료인 마이카의 성능은 크게 변화가 없지만, 유기재료인 에폭시 수지에서는 분자 분해와 산화를 발생시키는 화학적 과정이 수반되

므로, 결과적으로 마이카와 에폭시 표면의 결합력이 감소되어 마이카와 에폭시 사이의 계면에서 박리현상이 나타나게 된다. 이곳에 기동과 정지의 반복에 의한 열-기계적 응력이 가해지면 박리가 증가되어 결합이 성장하게 된다. 이러한 기계적 피로는 마이카와 에폭시의 결합부에서 미세 균열을 생성시키며, 이들은 박리와 접촉하게 되어 큰 결합 통로를 형성시켜 궁극적으로 절연파괴로 진전된다.

일반적으로 방전 펄스가 케이블 및 권선을 따라 진행하게 되면 크기의 감소 및 증침 현상이 나타나지만, 이들에 대한 정확한 규명은 이루어지지 못한 실정이다. 최근 들어 북미에서는 수력발전기 고정자 권선의 on-line 측정을 많이 하고 있지만 방전 신호 감쇠와 교정의 문제점을 지니고 있는 것으로 보고 되어 있다. 또한, IEEE Std 1434-2000에서도 현재 회전기 권선에서의 on-line 부분방전 진단기법의 단점으로 센서가 부착된 지점 근처의 적은 권선 부분만 측정되어짐을 기술하고 있다.

그러나, 장기 사용중인 발전기 고정자 권선에서 발생하는 절연상태를 연속적으로 감시하는 기법으로는 on-line 부분방전 진단방법이 가장 유망한 기술로 나타나 있으며, 이를 수명평가기법으로 활용하려는 노력이 진행 중이다.

3. 발전기용 운전중 부분방전 센서 개발

3.1 13kV급 접촉식 부분방전 센서 개발

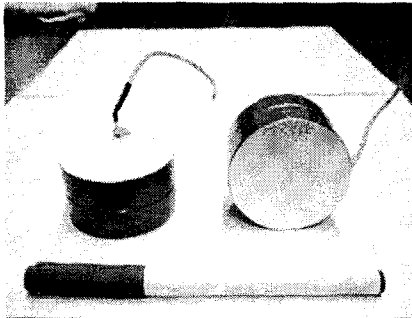
발전기 고정자권선의 각상 인출단 부분의 2곳에 센서를 부착하여 발전기 운전중에 발생하는 부분방전을 센싱하는 접촉식 센서는 센싱부인 세라믹 소체와 기계적지지 및 전기적 절연부인 에폭시 몰딩부로 설계하여 제작되었다.

센싱부에 해당되는 소체 재질은 세라믹으로 유전율이 500근처인 SrTiO₃ 계열의 세라믹 컴파운드를 배합하여 자기화공정으로 소체를 성형/소성/표면연마한 후, 소체의 양쪽 전극면에 Ag으로 금속 전극층을 형성하는 소자화공정으로 각 소체를 완성한 후, 소체결합공정에서 필요한 직렬 연결 수량인 4개 기본소체를 연결하는 구조로 구성하였다. 이와 같이 설계 제작되어지는 105pF 세라믹 소체를 만드는 중간단계를 그림1에 나타내었다.

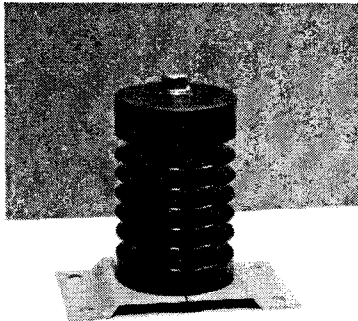
이 소체에 내부단자를 결합하고, 외부에 연면방전 방지 및 기계적 지지를 위하여 진공 속에서 에폭시로 성형물딩하는 스택화 공정으로 완성된 13kV급 접촉식 부분방전 센서를 나타낸 것이 그림 2이며, 최종 설계도를 나타낸 것이 그림3이다. 최종 제작된 제품은 높이가 125mm, 직경 90mm이며, 이 제품의 개발 기준 및 최종 개발 후 완성된 상용품의 성능은 다음과 같이 나타났다.

- 1) 내전압 특성은 35[kVrms] : 만족
- 2) 3[pC]의 부분방전 개시전압 20[kV] 이상 : 30kV

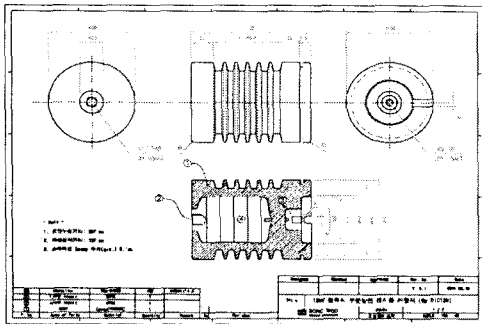
- 3) 5[dB] 기준의 측정주파수 대역 : 10~100[MHz]
- 4) 8[kV]에서 상온 유전정접 1.0[%] 이하 : 0.05%
- 5) 건조 섬락전압 특성 40[kVrms] 이상 : 60kV
- 6) 뇌충격시험전압 75[kVp/±15회] 이상 : 120kVp



<그림 1> 접촉식 센서 소체 중간 특성용 시료 형상



<그림 2> 완성된 13kV급 접촉식 센서 외관



<그림 3> 13kV급 접촉식 센서 설계도

3.2 13kV급 접촉식 센서의 장기 신뢰성 결과

제작이 완료된 센서의 장기 신뢰성을 평가하기 위하여 센서 양단에 30kV의 전압을 400시간 단위로 2500 시간 인가하였으나 절연파괴 및 섬락현상이 발생하지 않았다.

초기 상태 및 400시간 가속열화 단위의 측정 및 2500시간 가속열화 인가후의 열화상태를 파악하기 위하여 상온 유전정접 및 부분방전 개시전압을 측정한 결과에서, 가속 열화에 따른 측정값의 변화가 없었다.

접촉식 센서에서 절연기능은 2 종류의 절연재료가 병렬 복합으로 사용되어지는 구조이므로, 이들 절연물의 최소 수명지수를 파악한 결과 예측시 절연물(전기화학기술보고

준용)은 n=6, 세라믹 커패시드(EIA 준용)는 n=7.45로 나타났다. 수명지수를 선정함에 있어서 적은 값을 기준으로 하고 여기에 시험상 안전을 20%를 감안하여 선정된 수명지수 n은 4.8이다.

이를 전기적 열화지수를 표현하는데 이용되는 과전수명식을 이용하여 운전전압에서의 수명평가를 실시한 결과, 다음과 같이 계산되어져 220년으로 나타났다.

$$(V_2/V_1)^n = T_1/T_2$$

$$(30/7.5)^{4.8} = T_1/\{2500/(24 \times 365)\}$$

수명지수 6.0을 이용한 전기적 수명을 운전전압 조건으로 계산하면 아래와 같이 1170년으로 계산되어진다.

$$(30/7.5)^{6.0} = T_1/\{2500/(24 \times 365)\}$$

그러므로 개발된 센서는 30kV 인가전압 하에서 2500 시간동안 열화의 징후가 나타나지 않았으므로, 최소조건인 수명지수 4.8을 이용한 전기적 수명기간인 220년 동안 안전성이 확보된 것으로 보여진다.

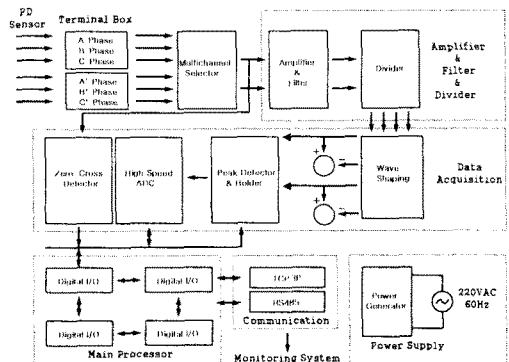
4. 수력발전기용 부분방전 측정 시스템

4.1 On-line 부분방전 측정 시스템 기본 설계

그림 4는 수력발전기 고정자권선에 설치한 센서에서 운전중 검출된 부분방전 및 외부잡음 신호로부터 필요한 부분방전 신호만을 검출하기 위하여 구성한 partial discharge measuring system - hydro generator (PDMS-HG)의 전체 구성도이다. 센서로부터 입력되는 각 상별 측정 신호(부분방전 신호 및 잡음신호)는 먼저 terminal box를 거친 후 channel selector로 입력된다.

Multichannel selector에는 각 상별 설치되어 있는 2개씩의 센서 중에 현재 측정하려고 하는 상의 센서신호 channel만을 선택한다. 이렇게 선택된 입력신호는 amp 단에서 그 크기가 조정되고, filter 단에서 외부 잡음을 1차로 제거한다. Filter를 거친 두 신호는 divider 단에서 정극성 신호와 부극성 신호로 분리되며, 이 신호는 wave shaping 회로를 거치고 부분방전 신호와 외부 잡음을 구분하기 위하여 차동 증폭되는 신호와 실제 부분방전 신호를 측정하기 위한 신호로 구분한다.

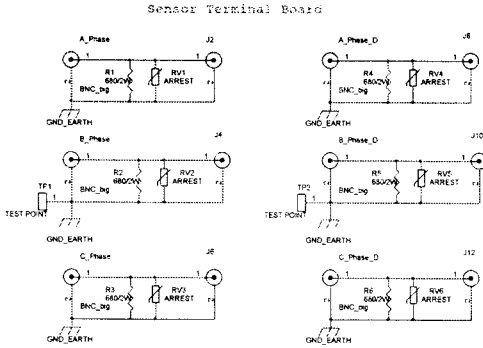
차동 증폭된 신호와 부분방전 측정용 신호는 고속의 peak detector & hold 회로에서 60Hz 한주기 동안 3,600 point의 peak 신호만을 A/D sampling하여, digital data로 내부 Ram에 저장한다. 저장된 data는 ethernet 혹은 RS485통신으로 PC로 전송하며, monitoring S/W에 의해 취득된 부분방전 신호를 진단알고리즘을 이용하여 분석/진단/관리하고, 이를 databsc화하도록 구성하였다.



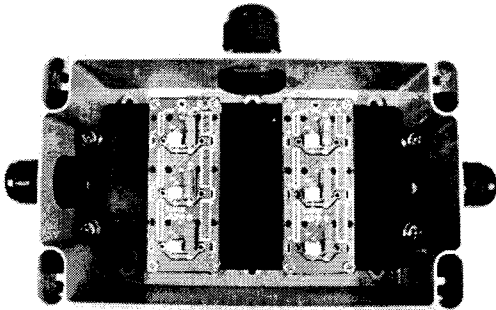
<그림 4> 부분방전 측정 시스템 전체 구성도

4.2 Sensor terminal box

그림 5는 부분방전 센서의 입력단 회로로 센서 신호의 impedance matching 및 측정 부분방전 신호의 주파수 대역을 결정하는 병렬 저항과, 고압 써지로부터 계측기를 보호하기 위한 회로로 구성된 회로도이다. 그림 6은 제작된 terminal box로서, 부분방전 측정신호의 입력단으로 각각 3상의 부분방전 신호 입력을 받도록 구성되었다.



<그림 5> 현장 설치용 터미널 박스 내부 회로도



<그림 6> 현장 설치용 터미널 박스 내부 모습

4.3 Analog board part

Analog board는 많은 소자로 인한 발열 문제를 해결하기 위하여 물리적으로 두 부분으로 나누어 구성하였다. 전체 구성은 좌측에 각각 3개의 입력단과 1개의 zero-cross reference 입력단 및 부분방전 신호 처리를 위한 analog 회로로 다음과 같은 기능을 지니며, 그리고 상단에 power 입력 및 main board와의 인터페이스를 위한 커넥터로 구성되어 있다.

1) Channel 입력단과 differential amplifier단 : 고속 relay를 통하여 입력 상을 선택하고, 선택된 상을 통한 부분방전 신호에 포함된 기본 외부잡음을 제거하기 위하여 high speed OP-amp를 이용하여 differential amp를 구성하였다.

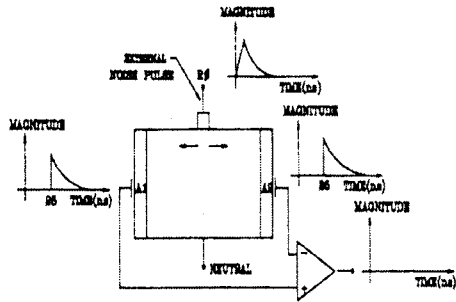
2) Zero-cross detector : 본 시스템은 60Hz 기준 신호로 설계 계속되는 부분방전 센서에서 나오는 신호를 통하여 인가전압에 대한 위상을 검출하는 것으로, 실제 발생하는 부분방전 신호의 위상을 정확한 기준 신호로 찾을 수 있도록 구성하였다.

3) Amplifier & filter stage : 증폭단은 2개의 relay와 2개의 OP-amp로 구성되어 총 4가지의 증폭비를 가지며, 입력 신호의 크기에 따라 적당한 증폭비가 선택된다. 제작된 기본 band-pass filter 회로는 50KHz~100MHz 대역이다.

4) PD divider : 부분방전 신호가 있는 극성을 분리하는 것으로, 인가전압 위상기준으로 270°~90° 사이에 발생하는 펄스는 정극성, 90°~270° 사이에 발생하는 펄스는 부극성으로 나타내도록 구성하였다.

5) Wave Shaping 회로 : 고속의 peak detector 전단에 wave shaping 회로를 추가하여, 회로를 통과한 펄스 신호는 수백 KHz 대역폭을 가지는 신호로 변환되나 이때 peak 크기는 변하지 않게 설계되었다. Wave shaping 회로는 다이오드 후단의 콘덴서의 용량에 의해 고속 펄스 신호의 충전 속도인 회로의 응답속도가 결정되고, 콘덴서와 병렬로 결합되어 있는 저항의 값에 따라 방전 속도가 결정되어 회로의 반복 주기를 결정하게 된다.

6) 잡음제거 회로 : 차동 증폭단을 이용하여 펄스 도달시간 차를 통하여 잡음을 제거하는 것으로, 그림 7과 같이 외부잡음 신호는 펄스 전송 경로가 동일하여 펄스 신호의 크기의 감쇠 및 시지연 특성이 동일하므로 제거되도록 구성하였다. 반면, 부분방전 신호는 각 센서에 도달되는 시간 지연이 다르고 크기감쇠도 다르게 나타난다.



<그림 7> 차동증폭 회로를 이용한 잡음제거 이론

7) Peak detector & hold 회로 : 총 8개로 구성되어 있으며, 정극성 및 부극성의 PD로 각각 4개씩 구분하고, 다시 각 2개의 회로가 부분방전 신호와 외부 잡음 제거용 차동 증폭회로를 통과한 신호를 담당하도록 구성되었다. 부분방전 신호를 검출하는 구간은 4.63us로 60 Hz 한주기 동안 총 7200 개의 data를 얻는다. 7200개의 data는 부분방전 신호와 외부 잡음을 구분하는 알고리즘에 의해 실제 부분방전 신호 3600개만이 data로 저장된다.

4.4 Control board part

Control board는 Tis사의 TMS320VC33-150 DSP를 사용하여 제작하였으며, EPLD와 최대 512K까지 저장 가능한 memory부분과 display를 위한 LCD interface부분 및 통신 부분으로 구분되어진다. 또한 측정 data의 실시간 기록을 위하여 RTC를 내장하고 있다. EPLD는 기본적인 address decoding과 digital I/O를 판장하고, 부분방전 신호를 취득하기 위한 analog board의 peak detector 및 A/D converter를 제어한다. 통신 부분은 기본적인 직렬 통신인 RS-485를 지원하며, 대량의 data를 전송하기 위한 ethernet 통신을 지원하는 TCP/IP module을 내장하고 있다.

A/D Converter는 입력 8 channel/분해능 8bits의 Analog device사의 AD 7829를 사용하였으며, 내부 알고리즘에 의해 자동으로 동작하도록 EPLD 내부에 설계하였다. 8개의 입력 channel은 AD channel select 신호에 의하여 부분방전 신호와 외부 잡음 제거용 차동 증폭 신호를 각각 측정하여, 외부 잡음제거 알고리즘에 의하여 실제 부분방전 신호를 가려낸다.

Zero-cross detector는 센서로부터 입력되는 신호에서 기본과 성분인 60Hz의 위상을 찾아내는 역할을 한다. 입력부분의 low-pass filter가 부분방전 신호 및 외부 잡음 등의 고주파 신호를 제거하여 인가전압의 기본과 60Hz 성분을 검출한다. 검출된 60Hz 신호에서 영점을 찾기 위해서는 5V 크기의 신호로 변환해야 되며, 이를 filter 후단의 증폭단에서 처리한다. 측정된 신호는 센서를 통과하면서 발생하는 위상 지연, 센서 신호를 filtering 하는 과정에서 생기는 위상 지연 및 소자들의 delay에 의해서 실전압과 오차가 생성된다. 이러한 오차를 줄이기 위하여 외부에서 부분방전 신호의 기준 신호를 입력 받을 수 있는 외부 입력단을 zero-cross detector에 추가하였다.

4.5 Power board part

PDMS-HG는 전원 Noise의 영향을 최소화하기 위하여 analog 전원과 digital 전원을 분리하였으며, 세부적으로 analog 전원을 2 부분으로 나누었으며, digital 전원 또한 2 부분으로 나누어 구성하였다. PDMS-HG의 전원을 공급하는 power board는 3 부분으로 나뉘어 구성하였다. 이는 board 상호 간의 잡음유입을 최소화하기 위한 것이다. 먼저 제어 신호를 위한 고출력 regulator인 MC78T05와 SPX1587을 사용하여 발열을 최소화 하였다. 그리고 analog power 1은 입력단/증폭단/필터단/divider단을 위한 power이고, analog power 2는 wave shape단 및 peak detector를 위한 power로 분리 구성하였다.

4.6 2차 잡음제거 기능 구현

차동증폭회로를 이용한 잡음제거기법을 적용한 현장 측정에서 외부잡음으로 추정되는 성분에 대비하여 다음과 같은 2차 잡음회로를 back up용으로 구축하여 초기에 운전하기로 하였다.

현장에서 사용중인 고압 전력기기의 절연상태를 파악하는 부분방전 측정 시스템의 성능은 불필요한 외부잡음 제거에 많은 영향을 받는다. 일반적으로 적용하는 filter를 이용한 기법에서도 제거되지 않고 나타나는 잡음을 제거하기 위하여 본 연구에 적용된 기법으로, 1차적으로 전체 위상에 걸쳐 발생된 동일한 크기의 잡음을 제거하고, 2차적으로는 부분 방전이 발생할 때 집중적으로 발생한다는 원리를 이용하여 일회성 신호를 노이즈로 처리하는 방법을 적용하였다.

4.7 판단 기준용 부분방전 관련 인자

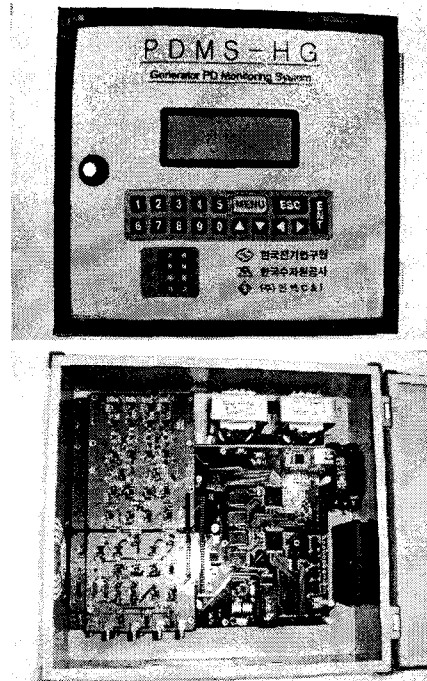
아래 인자들을 판단기준에 이용하는 것으로 선정하였으며, 이를 이용하여 특성별 경향관리를 통하여 판단기준을 나타내도록 설정하였다.

- 1) 최대 부분방전 크기: 일반적으로 고체 절연물에 있어서 열화가 진행되면 공극의 크기가 증대되고 이에 상응한 크기의 방전 펄스가 발생함.
- 2) 부분방전 발생 에너지: 고체 절연물의 초기상태에서는 발생 부분방전의 최대크기 및 발생수량이 적지만, 열화가 많이 진행되어 절연상태가 악화될 경우에는 발생 부분방전의 최대크기 및 발생수량이 점차적으로 증가함.
- 3) 부분방전 발생 위상폭: 절연물의 절연상태가 양호한 경우에는 전원전압의 상승구간 중매우 작은 위상범위에서 부분방전이 발생하지만, 절연상태가 악화될 경우에는 부분방전의 발생위상이 점차적으로 확대됨.

4.8 완성된 부분방전 측정 시스템(PDMS-HG)

수력발전기 고정자권선의 장기 운전시 나타나는 부분방전의 측정 정도 및 변화추이 분석을 실시하기 위한 측정 시스템의 기본사양은 앞서 설명한 내용을 토대로 구성하

였으며, 이들 부품을 이용하여 완성한 부분방전 측정시스템 외형 및 내부형상을 그림 8에 나타내었다.



<그림 8> 개발 완료된 부분방전 측정시스템의 내/외부 모습

5. 결 론

본 연구는 수력발전기 고정자권선에서 발생하는 부분방전 현상을 on-line으로 진단하는 센서 및 측정시스템을 개발한 것으로, 센서의 경우 현장에 설치하여 사용하여도 충분한 안전성이 확보된 것으로 판단되어진다.

급년 11월 말 예정인 수자원공사의 대청댐 발전기에 개발한 센서 및 측정시스템의 설치가 계획되어 있으므로, 향후 현장설치를 통한 실 운전 data의 확보/분석으로 진단 알고리즘의 보완이 실행되면 수력발전기의 안전 운용에 크게 기여되리라 판단된다.

[참 고 문 헌]

- 1) Dong Sik Kang, et al, "The Novel Partial Discharge Sensor for Global VPI Rotating Machines", Proceedings of the 2002 Joint Conference of AECD & K J Symposium on ED and HVE, Seoul, Korea, pp.234 237, Nov. 17-20, 2002.
- 2) A. Wilson and R.J. Jackson, "Discharge Detection Techniques for Stator Windings", IEE Proceedings, Vol. 132, Pt. B, No. 5, pp. 243 244, 1985.
- 3) IEEE Std 1434 2000, "IEEE Trial Use Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery", 2000.
- 4) I.M. Culbert, et al, "Handbook to Assess the Insulation Conduction of Large Rotating Machines (Volume 16)", EPRI publication EL 5036, 1989.