

13 kV급 수력발전기 고정자 권선용 On-line 부분방전 측정 시스템 개발 및 현장적용 평가

論 文
55C-4-6

Development and Site Evaluation of the On-line Partial Discharge Measuring System on the 13 kV Class Stator Windings for Hydro Generator

姜東植[†] · 宣鍾好^{*} · 黃敦夏^{**} · 尹英浩^{***} · 辛炳喆[§] · 吳奉根^{§§}

(Dong-Sik Kang · Jong-Ho Sun · Don-Ha Hwang · Young-Ho Yun · Byoung-Chol Shin · Bong-Keun Oh)

Abstract - In order to improve the reliability of stator windings for hydro generators, it is necessary to detect the defective point and life assessment of the high voltage windings. Especially the on-line partial discharge (PD) test provides the ability to monitor effects, such as slot discharge, internal discharge, and end-winding discharge without interrupting generators, this method has been proven the major testing technology in high voltage rotating machines nowadays. The purpose of this paper is to describe the method of the on-line PD measurement on stator windings for hydro-generator with 13 [kV] class ceramic coupler (CC), on-line PD measuring system, terminal box, and index parameters. Also, the developed PD measuring system and 13 [kV] class CC were installed Daechung-dam generator #2. It was found that this installed sensor and system had good electrical characteristics to detect PD activity during the operating condition with its detection frequency band is between several and several tens MHz.

Key Words : 수력발전기, 고정자 권선, 부분방전, On-line Monitoring, Ceramic Coupler, 절연열화

1. 서 론

산업설비로 많이 사용되는 고압 회전기의 장기간 사용에 따른 고장원인의 하나는 고정자 권선의 절연부분에서 열화가 진전되어 예상치 못한 절연파괴 사고로 나타나는 경우이다. 이러한 회전기 고정자 권선의 열화진단을 위한 방법의 하나로서 권선에서 발생하는 부분방전을 측정하는 기술에 관한 많은 연구가 진행되어왔다. 절연열화의 진단방법은 기기를 정지하고 절연상태를 측정하는 Off-line 진단법과 실사용 조건으로 운전중인 상태에서 절연상태를 측정하는 On-line 진단방법으로 크게 구분할 수 있다[1-3]. On-line 진단법 중에서 부분방전 진단법은 운전중에 연속적으로 절연상태를 감시할 수 있는 장점이 있어 초기진단 개념으로 활발한 연구가 수행되고 있다. 최근 북미에서는 고압부에 직접 접촉시키는 접촉식 센서로 Capacitive Coupler인 Epoxy-Mica Coupler (EMC)를 이용한 On-line 부분방전 측정기술을 개발하고, 이를 확대 적용하고 있는 실정에 있다[1-4]. 국내에서도 1990년대부터 회전기 진단에 관한 연구를 수행하여 기반기술을 구축하였으며, 회전기의 On-line 부분방전 측정용 센서로서 세라믹 소재를 이용한 센서를 세계 최초로 개발하였다[1,5].

본 논문에서는 국내 수력발전소 중 25년 동안 가동중인 13 [kV]급 대형댐 발전기 고정자 권선의 안정적 운영을 위하여 개발된 On-line 부분방전 측정용 Capacitive Coupler인 세계 최초 적용되는 Ceramic Coupler (CC)의 설계, 제작 및 가장 중요한 장기 사용상 절연파괴 가능성을 평가하는 신뢰성 실험 등에 대하여 기술하였다. 또한, 본 논문을 통하여 자체 제작된 운전중 부분방전 측정시스템은 현장조건을 고려한 잡음제거 기법 구현, 센싱된 방전펄스를 신호처리하는 측정 Transducer 및 진단 알고리즘을 지닌 운전중 측정시스템으로 구축하였다[6]. 아울러 이들 센서 및 시스템을 국내 최초로 대형댐 2호 발전기에 설치를 완료하여 현재 운전중 상태에서의 Raw Database를 구축 중에 있으며, 이 결과를 이용하여 향후 절연상태 판정기준의 향상에 이용할 예정이다.

2. 고정자 권선에서의 방전펄스 특성

고압 회전기의 고정자 권선 절연은 제작과정에서 생성된 보이드에 운전전압이 인가되면 부분방전이 발생되어진다. 더욱이 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 짧아지는 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 수반되므로, 결과적으로 마이카와 에폭시 표면의 결합력이 감소되어 마이카와 에폭

[†] 교신저자, 正會員 : 韓國電氣研究院 電力設備診斷研究그룹 그룹장 · 工博
E-mail : dskang@keri.re.kr

^{*} 正會員 : 韓國電氣研究院 電力設備診斷研究그룹 責任研究員 · 工博

^{**} 正會員 : 韓國電氣研究院 電力設備診斷研究그룹 先任研究員 · 工博

^{***} 正會員 : 동우電氣工業(株) 常務理事 · 工博

[§] 正會員 : (주)인텍C&I 代表理事

^{§§} 正會員 : 韓國水資源公社 水資源研究院 先任研究員

接受日字 : 2006年 1月 27日

最終完了 : 2006年 3月 24日

시 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 미소 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 중첩 현상이 나타나지만, 이들에 대한 정확한 규명은 이루어지지 못한 실정이다[7]. 최근 들어 북미에서는 수력발전기 고정자 권선의 On-line 측정을 많이 하고 있지만, 방전 신호 감쇠와 교정의 문제점을 지니고 있는 것으로 보고되어 있다. 또한, IEEE Std 1434-2000에서도 현재 회전기 권선에서의 On-line 부분방전 진단기법의 단점으로 센서가 부착된 지점 근처의 적은 권선 부분만 측정되어짐을 기술하고 있다[3].

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

3. 발전기용 운전중 부분방전 측정 센서 개발

고압 전력설비의 고압측 권선 도체부에 Capacitive Coupler를 부착하여 부분방전을 측정하는 기술은 전통적인 Off-line 진단기술로 이미 세계적으로 정착된 기술이다. 반면, 이를 이용하여 운전 중 On-line 부분방전 측정 기술로 개발한 것은 북미로서, 운전중인 회전기의 고정자 권선 도체에 직접 접촉시키는 접촉식 센서로 Capacitive Coupler인 EMC를 개발하여 보급 중에 있다[6,8].

본 논문을 통하여 개발되는 수력발전기용 Ceramic Coupler (CC)는 정지중 부분방전 측정에는 일부 사용되고 있으나, 운전중 부분방전 측정 센서로는 세계적으로 개발 및 실용화가 현재까지 이루어지지 않은 제품이다.

본 논문에서는 발전기 고정자 권선의 각상 인출단 부분의 2곳에 센서를 부착하여 발전기 운전중에 발생하는 부분방전을 센싱하는 접촉식 센서는 센싱부인 세라믹 소재와 기계적 지지 및 전기적 절연부인 에폭시 몰딩부로 설계하여 제작되었다.

3-1. CC 제조 및 13 kV급 접촉식 부분방전 센서 개발

CC의 주원료인 자기 콘덴서는 고유전체로서 TiO₂, BaTiO₃, SrTiO₃ 등의 자기를 주성분으로 하고 전극은 자기에 직접 은(Ag)을 소부하여 제조하는 무극성, 무기질의 콘덴서로서 전하가 축적되는 기능을 지닌다. 이러한 자기 콘덴서는 특성에 따라 온도보상용(temperature compensating), 고유전율(high dielectric), 반도체 및 교류전원용으로 구분된다.

본 연구에서 개발한 CC에 이용된 Ceramic Compound는 온도보상용 계열로서 온도에 따른 용량변화가 직선적이며 유전율의 온도의존성도 적은 재료를 선택하여 제작하였다.

Coupler의 정전용량(C) 설계는 식 (1)과 같이 할 수 있다.

$$C = (8.854 \cdot 10^{-8} \cdot \epsilon r \cdot S) / d \quad [\mu F] \quad (1)$$

여기서, ϵr : 유전체의 비유전율, S : 유전체의 표면적[Cm²],

d : 유전체의 두께[Cm]

부분방전을 측정하는 Ceramic Compound로 개발되는 센싱부는 유전율이 500근처인 SrTiO₃ 계열의 세라믹 컴파운드에다 적정 첨가제를 배합한 소재를 원통형으로 수십 kg/cm²의 압력으로 성형/소성하는 자기화 공정을 거친 후 표면 연마과정으로 각 소재를 완성한다. 또한, 소재의 양쪽 전극 면에 은(Ag)으로 프린팅 후 800 [°C]로 소성한 금속 전극층을 형성하는 구조로 하여 기계적 접착력을 높였다. 다음으로 소재결합 공정에서 필요한 직렬연결 수량인 4개 기본소체를 연결하는 구조로 구성하였다. 이와 같이 설계 제작되어지는 150 [pF] 세라믹 소재를 만드는 중간단계인 2단 직렬연결 소재 형상을 그림 1에 나타내었다.

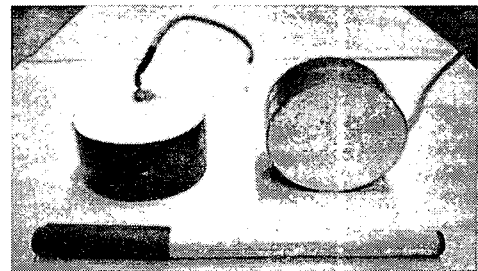


그림 1. 접촉식 센서의 소재형상
Fig. 1. Ceramic compounds of contacted sensor

이와 같이 제작된 4단 직렬연결 소재에 내부단자를 결합하고, 외부에 연면방전 방지 및 기계적 지지를 위하여 진공속에서 에폭시로 성형 몰딩하는 스택화 공정으로 완성된 13 [kV]급 접촉식 부분방전 센서를 나타낸 것이 그림 2이며, 이를 제작하기 위한 최종 설계도를 나타낸 것이 그림 3이다. 최종 제작된 제품은 높이 125 [mm], 직경 90 [mm]이며, 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 : 30 [kV]
- 3) 5 [dB] 기준의 측정주파수 대역 : 10~100 [MHz]
- 4) 8 [kV]에서 상온 유전정점 1.0 [%] 이하 : 0.05 [%]
- 5) 건조 섬락전압 특성 40 [kVrms] 이상 : 60 [kV]
- 6) 뇌충격시험전압 75 [kVp/±15회] 이상 : 120 [kVp]

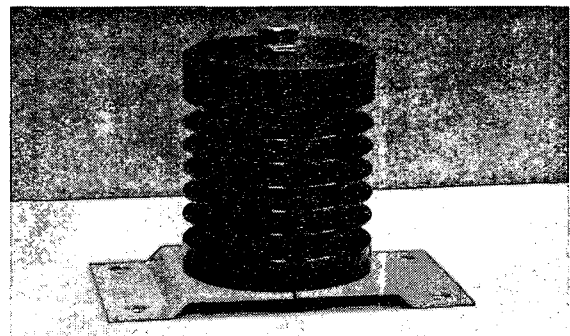


그림 2. 완성된 13 [kV]급 접촉식 센서 외관
Fig. 2. Completed ceramic coupler for 13 kV class

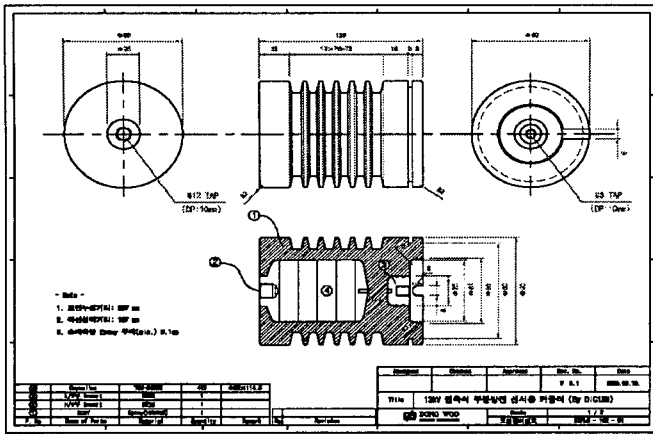


그림 3. 13 kV급 집축식 센서 설계도
 Fig. 3. Drawing of ceramic coupler for 13 kV class with four basic ceramic elements

3-2. 13 kV급 집축식 센서의 장기 신뢰성 결과

3-2-1. 고압 권선의 수명 특성

일반적으로 고전자 권선의 고전압 부분에서 발생하는 부분방전은 전극과 전극 사이를 교락하지 않는 부분적인 방전으로, 고체 절연체 중의 공극(void)에서의 방전인 내부방전, 표면에서의 방전인 연면방전과 고압측의 날카로운 부분의 방전인 코로나로 나누어진다. 이러한 부분방전은 최대 전압차가 발생하는 회전기 출력측에 있는 권선과 접지 사이, 그리고 권선 단말부의 상간에서 많이 나타난다.

Dakin은 이온전도의 경우와 같이 방전에 의한 화학반응의 활성화 에너지가 부분방전 전계강도에 따라 감소하므로, 방전에 의한 전기적 열화는 열적열화와 동일하게 작용한다고 고려하여 식 (2)를 도입하였다[9].

$$k(E) = f \cdot (E - E_0) A \exp\left[-\frac{Q - b(E - E_0)}{RT}\right] \quad (2)$$

여기서, E : 인가전계, E_0 : 부분방전 개시전계, R : 기체 정수, T : 절대온도, f : 주파수, Q : 활성화 에너지, A : Arrhenius 식을 따르는 열수명 상수, b : 재질 상수

일반적으로 절연체 내부의 공극에서 형성되는 부분방전 펄스 발생폭은 수십 ns 영역이고, 펄스 상승시간은 수 ns의 빠른 시간을 지닌 성분도 나타난다. 이러한 부분방전을 측정하기 위한 센서 및 잡음제거 회로에 관한 연구도 많이 진행되고 있다[2,10].

Endicott와 Eyring는 식 (2)를 이용하여, 화학반응 속도정수 중의 스트레스 함수를 변형하여 통상적으로 전기적 열화를 표현하는데 이용되는 과전수명 식 (3)을 도출하여 나타내었다.

$$V^n \cdot t = const. \quad (3)$$

여기서, n : 전기적 열화 종류 및 절연체료에 따른 정수 (수명지수)

수명지수 n 의 값은 전기적 열화 및 절연체료 종류에 따라 변화되는 것으로, 기중 코로나 열화에서는 3~4, 유중 코로나 열화 및 트리열화에서는 10~11, 마이카 절연에서는 10~12, 에폭시 절연에서는 6~12 근처의 값으로 나타난 연구결과가 있다. 그러므로 본 연구에 이용된 에폭시 수지의 수명지수 n 은 최소값인 6으로 선정하였다[6]. 세라믹 유전체의 경우는 수명지수 n 과 관련된 자료가 발표된 것이 없는 관계로 EIA/IS-692에서 제시된 가속수명 시험조건을 반영하기로 하였다[11]. EIA/IS-692에서는 2배의 운전전압에서 1000시간을 만족하는 것을 수명조건으로 요구하며, 이를 운전수명 20년 상당으로 보고 있으므로, 이로부터 식 (3)을 이용하여 수명지수를 역으로 산출된 n 인 7.45를 이용하였다 [6].

3-2-2. 13 kV급 집축식 센서의 수명실험 결과

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

초기 상태 및 400시간 가속열화 단위의 측정 및 2500시간 가속열화 인가후의 열화상태를 파악하기 위하여 상온 유전 정접 및 부분방전 개시전압을 측정된 결과에서, 가속열화에 따른 측정값의 변화가 없었다.

집축식 센서에서 절연기능은 2종류의 절연체료가 병렬 복합으로 사용되어지는 구조이고, 이들 절연물의 최소 수명지수는 앞서 파악한 결과에서 나타난 것과 같이 에폭시 절연물은 $n=6$, 세라믹 컴파운드는 $n=7.45$ 로 나타났다. 수명지수를 선정함에 있어서 적은 값을 기준으로 하고 여기에 시험상 안전율 20 [%]를 감안하여 선정된 수명지수 n 은 4.8이다.

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

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

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

그러므로 개발된 센서는 30 [kV] 인가전압 하에서 2,500 시간 동안 열화의 징후가 나타나지 않았으므로, 최소조건인 수명지수 4.8을 이용한 전기적 수명기간인 220년 동안 안전성이 확보된 것으로 판단되어졌다.

4. 수력발전기용 부분방전 측정 시스템

4-1. On-line 부분방전 측정 시스템 기본 설계

그림 4는 수력발전기 고전자 권선에 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 상에 설치되어 있는 2개씩의 센서 중에 현재 측정하려고 하는 상의 센서신호 Channel만을 선택한다. 이렇게 선택된 입력신호는 Amp단에서 그 크기가 조정되고, Filter 단에서 외부 잡음을 1차로 제거한다. Filter를 거친 두 신호는 Divider단에서 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 60 [Hz] 한주기 동안 3,600 point의 peak 신호만을 A/D Sampling하여, Digital Data로 내부 Ram에 저장한다. 저장된 Data는 Ethernet 혹은 RS485 통신으로 PC로 전송하며, 모니터링 소프트웨어에 의해 취득된 부분방전 신호를 진단알고리즘을 이용하여 분석/진단/관리하고, 이를 데이터베이스화하도록 구성하였다.

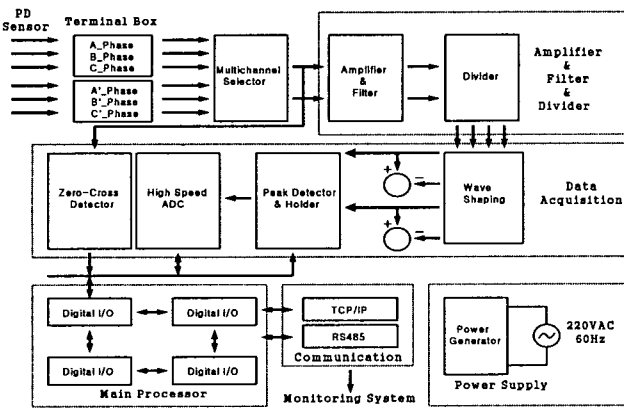


그림 4. On-line 부분방전 측정 시스템의 전체 구성도
Fig. 4. Configuration of partial discharge measuring system for hydro generator (PDMS-HG)

4-2. Sensor Terminal Box Part

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 회로도이며, 부분방전 측정신호의 입력단으로 각각 3상의 부분방전 신호 입력인 6개의 입력신호를 받도록 구성되었다.

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 고

속 OP-amp를 이용하여 Differential Amp를 구성하였다.

2) Zero-cross Detector : 본 시스템은 60 [Hz] 기준 신호로 실제 계측되는 부분방전 센서에서 나오는 신호를 통하여 인가전압에 대한 위상을 검출하는 것으로 함으로서, 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 50 [kHz] ~ 100 [MHz] 대역이다.

4) PD Divider : 부분방전 신호가 있는 극성을 분리하는 것으로, 인가전압 위상기준으로 전압상승 구간인 270°~90° 사이에 발생하는 펄스는 정극성, 전압하강 구간인 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) 1차 잡음제거 회로 : 차동 증폭단을 이용하여 펄스 도달시간 차를 통하여 잡음을 제거하는 것으로, 외부잡음 신호는 펄스 전송 경로가 동일하여 펄스 신호의 시간 지연 특성이 동일하므로 제거되도록 구성하였다. 반면, 부분방전 신호는 각 센서에 도달되는 시간 지연이 다르게 나타난다.

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 4.63 [μs]로 60 [Hz] 한주기 동안 총 7,200 개의 Data를 얻는다. 7,200개의 Data는 부분방전 신호와 외부 잡음을 구분하는 알고리즘에 의해 실제 부분방전 신호 3,600개만이 Data로 저장된다.

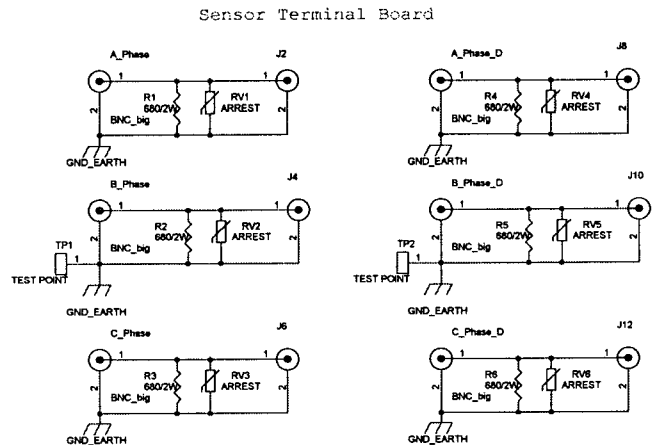
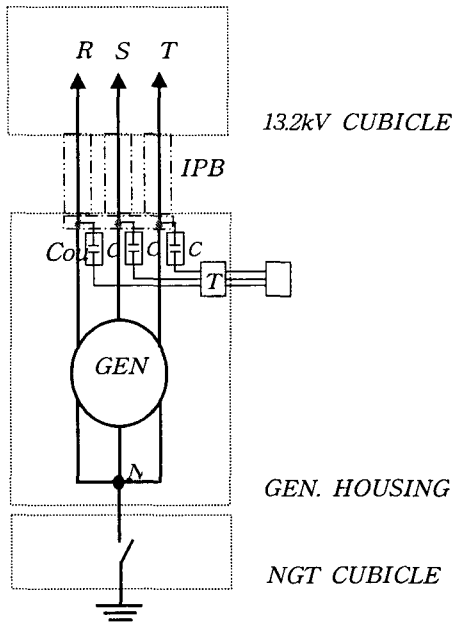
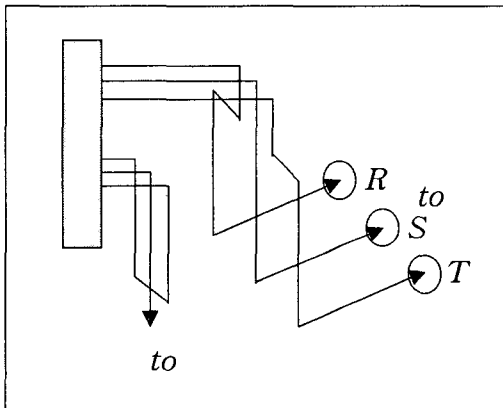


그림 5. 현장 설치용 터미널 박스 내부 회로도
Fig. 5. Electric circuits of terminal box for on-site installation



(a) 3상 결선도
(a) Three-phase connection diagram



(b) 측면도
(b) Side view

그림 10. 발전기와 주변기기의 3상 결선도
Fig. 10. Three phase connection diagram of generator and power system

5-1. 13 kV급 접촉식 센서의 대청댐 설치

대청댐의 경우 고정자 권선 형태상 센서는 Directional 커플러 설치기법에 따라 각상 두 곳에 설치하는 것으로서, 발전기 쪽의 센서는 가능한 고정자 권선 가까운 쪽으로 설정하였으나, 반대쪽 센서는 IPB 내부에 설치가 어려워 Cubicle 내 상부에 설치하는 것으로 선정하였다. 그림 11은 개발된 13 [kV]급 센서를 설치한 모습을 나타내었다.

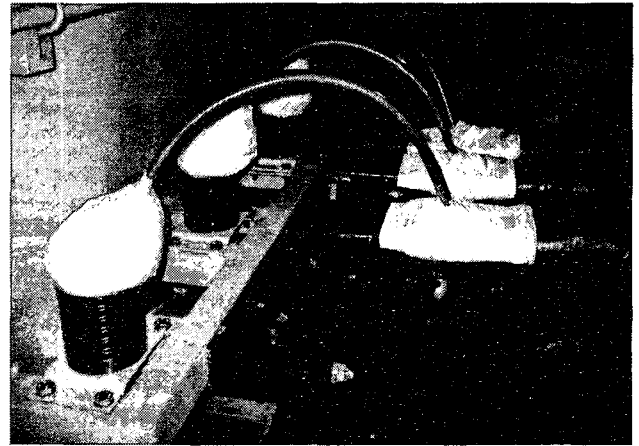
5-2. 시스템 설치 및 동축케이블 길이 설정

대청댐 #2호기의 부분방전 측정시스템은 각 센서에서 연결되어질 동축케이블 길이를 고려하여 발전기 외부 콘크리트 벽면에 설치하는 것으로 하였으며, 이용된 고주파 동축

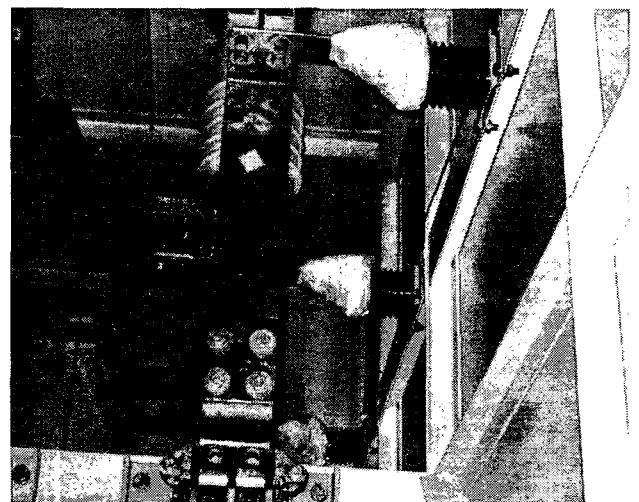
케이블 길이 선정은 계통측에서 들어오는 외부잡음의 영향을 최소화하기 위하여 센서가 설치된 각상의 부스 길이만큼 신호전송에 필요한 길이를 보상해 주도록 1차 선정하였다. 최종 동축케이블 길이를 선정하기 위하여 그림 12와 같이 교정용 펄스(NPG-2 Calibrator 이용)를 센서 양단에 인가하여 전송시간차가 5 [ns] 이내에 들어오도록 조정하는 방법으로 실시하였다.

그림 13은 최종 동축케이블 길이가 선정된 조건에서 발전기 및 Cubicle 방향에 있는 센서에 교정 펄스를 주입하여 나타난 파형을 나타낸 것으로, C1 위치에 입력된 잡음펄스는 동시에 도착되고, C2 위치에 입력된 부분방전 펄스는 전송시간 차가 50 [ns]로 나타났다. 이를 이용하여 측정시스템에서 1차 잡음을 제거하게 된다.

그림 14는 최종 설치 완료된 측정시스템 및 터미널 박스의 형상을 나타낸 것이다.



(a) 고정자 권선 출력단 센서 부착 모습
(a) Sensor installation of stator winding output (generator-side)



(b) Cubicle내 Bus에 센서 부착 모습
(b) Installation of CC sensors at bus (cubicle)

그림 11. 대청댐 #2 발전기 센서 설치
Fig. 11. Installation of sensors at Daechung-dam #2 generator

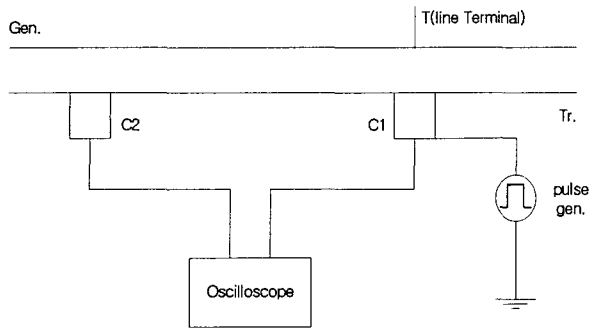
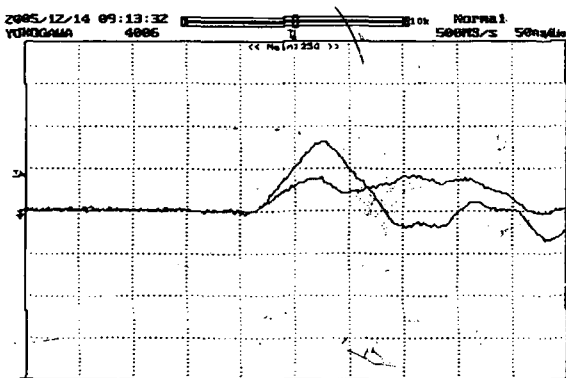
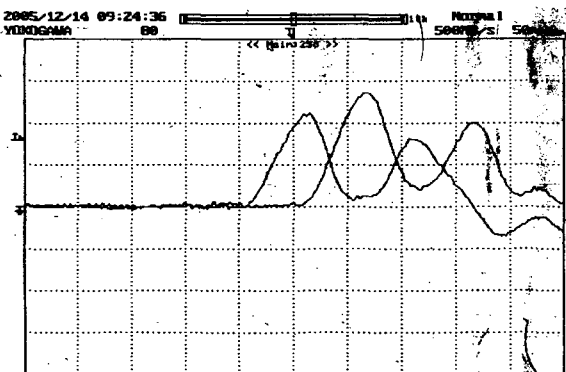


그림 12. 동축케이블 길이 산정을 위한 회로도
 Fig. 12. Schematic diagram for calculating coaxial cable length



(a) C1 위치에 입력된 펄스의 도착시간 (잡음모의)
 (a) Arrival time from input pulse at C1 position (simulated noise)



(b) C2 위치에 입력된 펄스의 도착시간 (PD 모의)
 (b) Arrival time from input pulse at C2 position (simulated PD)

그림 13. 동축케이블 길이 산정을 위한 펄스도착 시간 측정
 Fig. 13. Measurement of pulse arrival time for calculating cable length

5-3. 운전중 측정 및 분석

2005년 12월 대청댐에 설치된 분분방전 측정시스템으로 1개월간 현장측정을 실시한 측정인자의 경향을 그림 15에 나타내었다.

그림 15의 MPM 및 POE 측정중 크기의 큰 변동이 있는 부분은 분석결과 1일 1-2회 기동되는 동절기 운전 특성으로

초기 운전상태에서 나타나는 것으로 나타나 기동시점 1-2회 측정 Data를 제거하면 일정하게 나타나는 것으로 판단되어졌다. 이 현상을 제외한 MPM 및 POE의 설정은 정확한 것으로 나타났으며, POA의 경우는 변동 폭이 상대적으로 심하여 2차 잡음제거 기법의 보완 또는 설정조건의 수정 등을 위한 추가 분석을 실시할 예정에 있다. 이를 토대로 측정정도 및 분석기술의 향상에 이용할 예정이다.

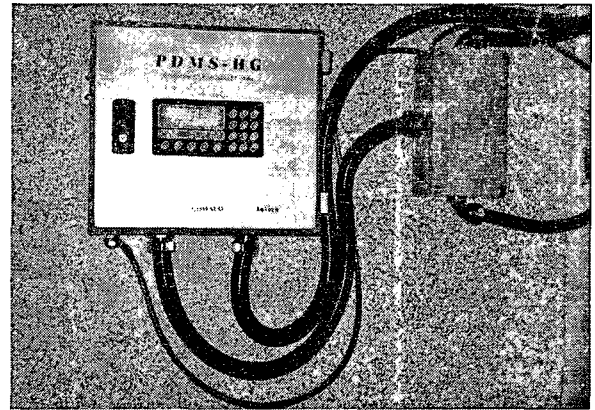


그림 14. 설치된 측정시스템 및 터미널 박스 형상
 Fig. 14. Installation of PDMS-HG and terminal box

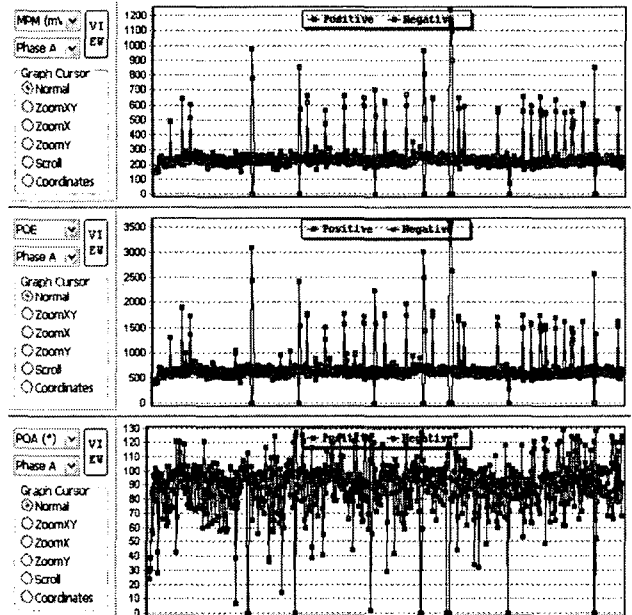


그림 15. PDMS-HG의 대청댐 2호기 R상 경향관리 결과
 Fig. 15. Results of trend analysis for phase R using PDMS-HG at Daechung-Dam #2 generator

6. 결 론

본 논문에서는 수력발전기 고정자 권선에서 발생하는 분분방전 현상을 On-line으로 측정, 분석 및 진단하는 센서와 시스템을 제시하였고, 대청댐 발전소 #2 발전기에 국내 최초로 설치하여 운전중 측정을 실시한 것으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 수력발전기의 운전중에 고정자 권선에서 발생하는 부분방전 신호의 측정이 가능한 150 [pF] 세라믹 재질을 이용한 13 [kV]급 세라믹 커플러 부분방전 센서를 세계 최초로 개발하였다.

(2) 개발된 CC 부분방전 센서는 주파수 응답특성, 부분방전 개시전압, 유전정접 및 건조점락 전압을 측정할 결과 초기성능이 매우 우수한 것으로 나타났으며, 전압열화 수명 계산에서도 200년 이상의 수명이 산출되어져 현장에 설치하여 사용하여도 충분한 안전성이 확보된 것으로 판단되어졌다.

(3) 부분방전 검출 및 모니터링을 위한 측정시스템인 PDMS-HG를 개발하였고, 센서와 시스템의 현장설치를 완료하였다.

(4) On-line 시스템의 최대단점 중의 하나인 외부잡음 제거를 위해 새로운 2단계 외부잡음 제거기법을 개발하였다.

(5) 측정시스템의 경우도 현장측정 결과를 통하여 기동시에 측정되어진 결과는 경향관리에 이용됨이 곤란한 것으로 나타났으며, 추출된 부분방전 인자를 이용한 측정이 충분한 가능성이 있는 것으로 판단되어졌다.

그리고 꾸준한 Database 확보를 통하여 추가 분석을 실시하고, 이를 토대로 측정정도 및 분석기술의 향상이 가능할 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] 강동식 외, “고압 회전기 On-line 부분방전 측정용 Ceramic Coupler 특성”, 대한전기학회 논문지, Vol. 51C, No. 5, pp. 205-212, 2002.

[2] I.M. Culbert, H. Dhirani and G.C. Stone, “Handbook to Assess the Insulation Conduction of Large Rotating Machines (Volume 16)”, EPRI publication EL-5036, 1989.

[3] IEEE Std 1434-2000, “IEEE Trial-Use Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery”, Aug. 2000.

[4] Ken Kimura, Yoshiharu Kaneda, Koji Mio, Satoru Kuroki, Teruya Osawa and Hiroki Tanaka, “On-line Partial Discharge Monitor for Turbine Generator”, Proceedings of the International Conference on Electrical Engineering 1999 (ICEE '99), Vol. 1, pp. 172-175, 1999.

[5] 강동식 외, “권선형기기 On-line 부분방전 측정용 6.6 [kV]급 Ceramic Coupler의 신뢰성 평가”, 대한전기학회 논문지, Vol. 54C, No. 2, pp. 69-75, 2005.

[6] 강동식 외, “수력발전기 고정자권선용 운전중 부분방전 측정 센서 및 시스템 개발”, 2005년도 대한전기학회 전기설비전문위원회 추계학술대회 논문집, pp. 103-106, 2005. 11.

[7] B.A. Lloyd, S.R. Campbell, G.C. Stone, “Continuous On-line Partial Discharge Monitoring of Generator Stator Windings”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No. 4, pp. 1131-1137, 1999.

[8] H. Zhu, V. Green, M. Sasic and S. Halliburton,

“Increased Sensitivity of Capacitive Couplers for In-Service PD Measurement in Rotating Machines”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No. 4, December 1999.

[9] T. W. Dakin et al, “The Voltage Endurance of Cast Resin”, Proc. IEEE International Conference on Electrical Insulation, No. 216. 1973. 06.

[10] B.A. Lloyd, S.R. Campbell, G.C. Stone, “Continuous On-line Partial Discharge Monitoring of Generator Stator Windings”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No. 4, pp. 1131-1137, 1999.

[11] EIA/IS-692, “Ceramic Capacitor Qualification Specification”, 1996.

저 자 소 개



강 동 식 (姜東植)

1956년 10월 13일생. 1983년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1987년~현재 한국전기연구원 산업전기연구단 책임연구원. 2005년~현재 한국전기연구원 전력설비진단연구그룹장
Tel : 055-280-1573, Fax : 055-280-1547
E-mail : dskang@keri.re.kr



선 중 호 (宣鍾好)

1962년 10월 10일생. 1986년 부산대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 한국전기연구원 산업전기연구단 전력설비진단연구그룹 책임연구원
Tel : 055-280-1578, Fax : 055-280-1547
E-mail : jhsun@keri.re.kr



황 돈 하 (黃敦夏)

1991년 영남대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1993년~현재 한국전기연구원 산업전기연구단 전력설비진단연구그룹 선임연구원
Tel : 055-280-1544, Fax : 055-280-1547
E-mail : dhhwang@keri.re.kr



윤영호 (尹英浩)

1964년 1월6일생. 1985년 명지대학교 요업공학과 졸업(학사). 1992년 동 대학원 무기재료공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 무기재료공학과 졸업(공학박). 1986년~2001년 삼화콘덴서 기술연구소 근무. 2001년~2004년 (주)파워플러스 대표이사. 2004년~현재 동우전기공업(주) 상무이사.

Tel : 043-222-2369, Fax : 043-222-2377



신병철 (辛炳喆)

1971년 3월 4일생. 1997년 창원대 제어계측공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기전자제어공학과 졸업(석사). 1999년~2001년 한국전기연구원 위촉연구원. 2001년~현재 (주)인텍C&I 대표이사.

Tel : 055-262-4533, Fax : 055-262-4858

Email : xebecx@chollian.net



오봉근 (吳奉根)

1972년 2월 21일생. 1999년 충북대학교 전기공학과 졸업(석사). 2003년~현재 충북대학교 대학원 전기공학과 박사과정. 현재 한국수자원공사 수자원연구원 근무.

Tel : 042-860-0483, Fax : 042-860-0489

E-mail : bongja@kowaco.or.kr