

대용량 수차발전기 부분방전 검출용 센서의 신뢰성 평가

변두균[†] · 홍진웅

광운대학교 전기공학과

(2006. 8. 7. 접수 / 2006. 10. 10. 채택)

Reliability Evaluation of the Partial Discharge Measuring Sensor for Hydro Generator

Doo-Gyoon Byun[†] · Jin-Woong Hong

Department of Electrical Engineering, Kwangwoon University

(Received August 7, 2006 / Accepted October 10, 2006)

Abstract : In the operation of large capacity hydro generators, it's a very important thing that to minimize several kind of electrical trouble and accident. In order to overcome these problems, the on-line and off-line partial discharge (PD) measuring method has become an important one. Nowadays, epoxy mica coupler(EMC) has been the most widely used sensors for on-line PD detection in rotating machines. This time, we have made a ceramic coupling sensor using SrTiO₃, because at present, most of sensors has high cost and difficult procedure to making. This paper deals with the electrical characteristics of a ceramic coupling sensor, which has been made to continuously measure PD activity during the operation condition for 13kV class hydro generator. And we have performed the evaluation of sensor life and reliability based on the characteristic testing. The experimental results confirm that the sensor has satisfied at electrical required performance and output characteristic for simulated input signal.

Key Words : partial discharge(PD), epoxy mica coupler(EMC), SrTiO₃, reliability evaluation

1. 서 론

가동 중인 전기설비의 중요한 고장 징후를 사전에 감지하여 각종 사고로부터의 피해를 최소화하는 것은 대단히 중요한 일이다. 그 중에서도 산업설비에너지원으로서의 역할을 담당하고 있는 대용량 발전기의 경우는 더욱 그러하다. 만일 대용량 발전기가 예상하지 못한 각종 고장이나 사고로 정지하여 복구에 상당 기간이 필요하게 될 경우, 이는 단순한 설비가동 중지의 차원을 넘어 복구비용, 에너지 공급원의 추가확보 등 사회적, 경제적 손실을 가져오게 되기 때문이다. 이와 같은 중요성을 갖는 전력설비의 상태를 확인하고 감시하기 위한 방법으로 진단기술이 적용되고 있다. 다행스럽게도 그동안 설비 진단 기술은 지속적으로 발전되어 왔다. 특히 설비를 정지하지 않고도 상태를 확인할 수 있는 비파괴 진단 기술

이 하루가 다르게 발전하고 있다^{1,2)}. 종전의 고압 회전기 고정자 권선 도체부에 capacitive coupler를 부착하여 off-line으로 부분방전을 측정하는 기술은 이미 전 세계적으로 정착된 기술이다. 최근에는 회전기 고정자 권선의 전기적 절연열화 진단방법으로 on-line 부분방전 진단 기술이 많이 적용되고 있다. 이를 위한 센서로는 운전 중인 회전기의 고정자 권선 도체에 직접 부착하여 부분방전 현상을 감지하는 접촉식이 많이 이용되고 있다³⁻⁵⁾.

현재 일반적으로 사용되고 있는 센서는 마이카 절연에 금속전극을 부착하여 직병렬회로를 구성하고 에폭시로 함침한 epoxy mica coupler(EMC) 센서이다^{6,7)}. 그러나 이들 센서들은 제조과정에서 공극이 발생할 가능성이 높고 가격이 높으며 제조공정이 어려운 단점이 있다⁸⁾. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위하여 유전율 500정도의 SrTiO₃를 주원료로 한 13kV급 ceramic coupler를 제작하였다.

본 논문에서는 완성된 부분방전 검출용 센서가 요

[†] To whom correspondence should be addressed.
dgbyun@kwwater.or.kr

구 성능을 만족하고 충분한 신뢰성을 확보하고 있는지를 확인하기 위하여 내전압 특성, 유전정접과 같은 기본 특성 시험과 모의 부분방전 펄스 응답 특성을 분석하였다. 또 이를 근거로 수명평가 및 신뢰도 특성을 분석하였다.

2. 실험

2.1. 센서의 제작

발전기 고정자 권선의 각상 인출단 부분 2곳에 부착하여 운전 중 발생하는 부분방전을 검출하기 위한 센서를 제작하였다. 센서는 신호검출부인 세라믹 소재와 기계적 지지 및 전기적 절연부인 에폭시 몰딩 부로 설계하여 제작되었다. 검출부에 해당되는 소재의 재질은 SrTiO₃ 계열의 세라믹 컴파운드를 적정 첨가제와 배합하였다. 배합된 소재는 수심 [kg/cm]의 압력으로 성형 및 소성하는 자기화 공정을 거친 후 표면 연마 과정을 거쳐 완성되었다. 직경 52.5[mm], 높이 14.5[mm]이며 완성된 4단 직렬 연결 소재는 약 105[pF]의 정전용량 값을 갖는다. 표면연마 후 소재의 양쪽 전극면에 Ag로 두께 0.025[mm]의 금속 전극층을 형성하는 소자화 공정으로 각 소재를 완성하였다. Fig. 1에 제작된 세라믹 센서의 외관을 보인다.

2.2. 실험

완성된 13[kV]급 on-line 부분방전 접촉식 센서가 요구되는 성능을 만족하는지 또 에폭시 몰딩 후 특성의 변화는 없는지를 확인하기 위해 내전압 특성 시험, 부분방전 특성 확인, 유전정접 특성 등의 시험을 실시하였다.

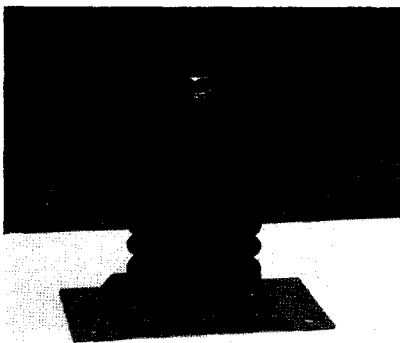


Fig. 1. Picture of 13kV class ceramic coupler for PD measurement.

내전압특성을 확인하기 위하여 센서 양단에 시험용 변압기를 이용하여 35[kV]의 전압을 1분간 인가하였으나 이상은 나타나지 않았다. 상용주파 건조 섬락전압 시험을 ANCI C29.11 8-2에 따라 실시하였으나 45[kV] 이상에서도 섬락은 발생되지 않았다. 부분방전 특성 시험은 제작된 7개의 시료에 대하여 실시하였다. 3[pC]의 부분방전 개시전압이 20[kV]를 만족해야 하는데 4개의 센서에서는 이 기준치를 상회하는 31[kV]에서 부분방전이 개시됨을 확인하였다. 나머지 3개의 시료에서는 사용상 지장은 없으나 이보다 낮은 15[kV], 18[kV], 19[kV]에서 개시전압이 나타났다는데 이는 제작 공정 과정에서의 결함으로 판단되어 진다.

상온에서의 유전손실 특성을 파악하기 위하여 제작된 센서 중 임의의 3개 센서에 대해 schering bridge로 유전정접 값을 측정된 결과 Fig. 2와 같이 운전전압에 해당되는 8[kV]에서의 상온 유전정접 값은 0.03[%] 근처로 처음 계획 시 요구되었던 1.0[%]보다 매우 낮게 나타났다. 인가전압으로 발생하는 유전체 손실에 의한 온도상승 실험 결과 온도의 상승이 없는 것으로 나타났다.

유전정접 값이 적어 운전전압에서 장시간 사용 시에도 열폭주에 의한 온도 상승 가능성도 없는 것으로 판단된다. 제작된 센서의 수명평가를 위하여 2500시간 가속 열화를 과정을 거쳤다. 가속 열화 중간에 각 시료의 열화정도를 파악하기 위하여 유전정접 및 부분방전 특성의 변화를 측정하였다. Fig. 3과 Fig. 4에 그 결과를 보인다. 2500시간의 전기적 가속 열화 후에도 유전정접 및 부분방전의 증가현상은 나타나지 않았다. 부분방전 시험 시 개시전압의 증가현상이 있었으나 이는 측정 당시의 습도 등 주위환경의 영향 때문으로 생각된다.

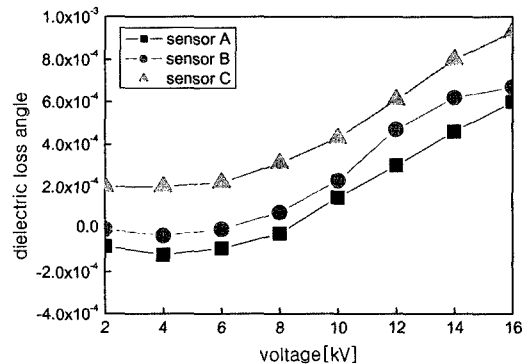


Fig. 2. Dielectric characteristic of ceramic coupler.

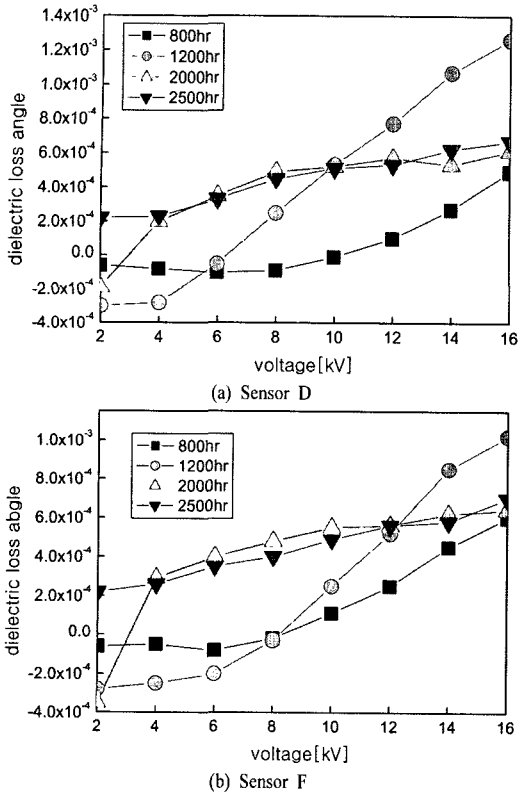


Fig. 3. Dielectric-voltage characteristic of sensors.

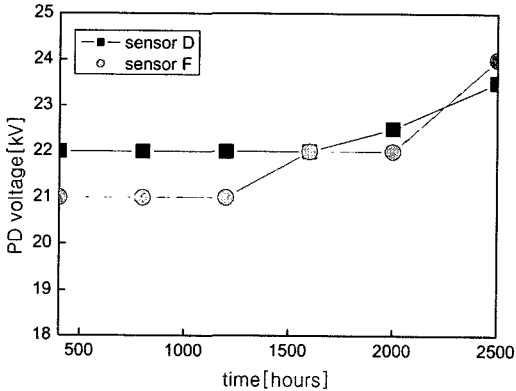


Fig. 4. Partial discharge voltage characteristic of sensors.

센서의 펄스응답 특성을 파악하고, 이들 품질의 균질성을 확인하기 위하여 센서 7개에 대한 펄스신호 특성을 확인하였다. 입력신호는 NPG2 Calibrator로 1500[pC], pulse raising time 30[ns]의 펄스를 인가하였으며, 입력신호에 대한 각 센서의 출력을 동축케이블 1[m]를 연결하여 측정하였다. 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

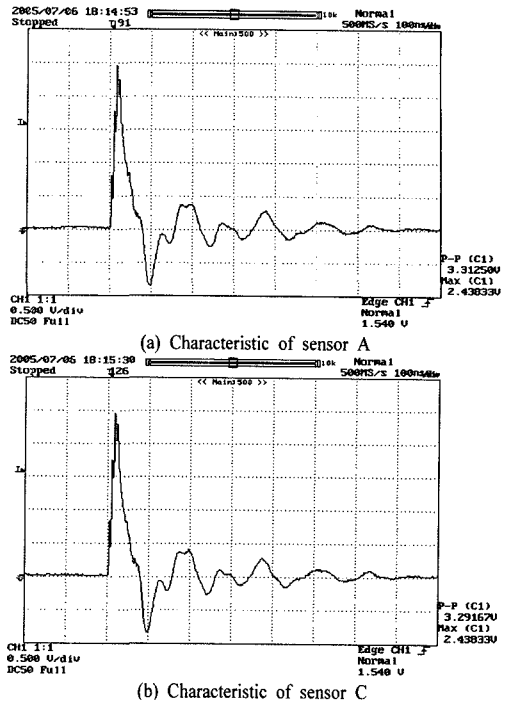


Fig. 5. Output characteristic of sensor A and C for simulated input signal.

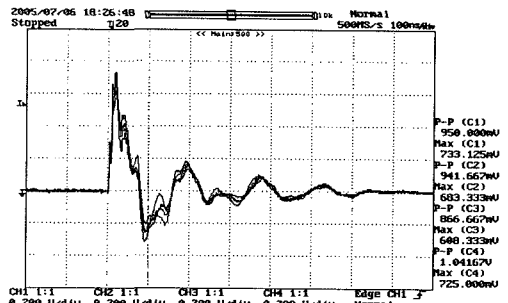


Fig. 6. Output characteristic of each sensor for simulated input signal(1).

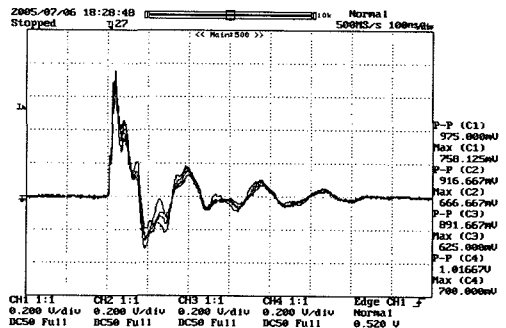


Fig. 7. Output characteristic of each sensor for simulated input signal(2).

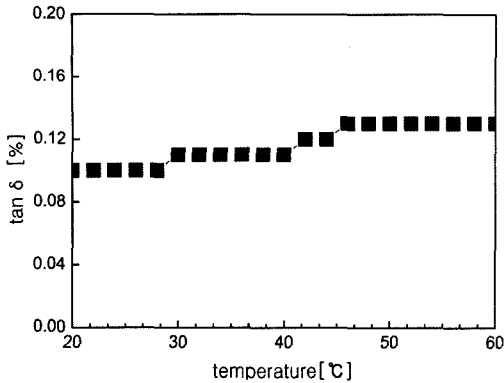


Fig. 8. Thermal-dielectric characteristic of sensors.

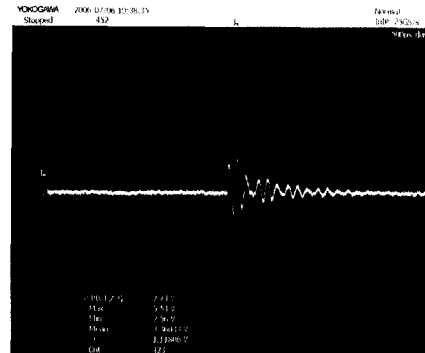
입력신호에 대한 각 센서의 출력 특성 확인 결과 Fig. 6, Fig. 7에 나타난 것과 같이 모의 입력 신호에 대하여 동일한 특성을 보였으므로 측정 감도상의 문제는 없을 것으로 판단되었다.

제작된 on-line 부분방전 접촉식 센서가 실제 설치되어 운용될 최대 예상 온도조건인 55[°C]까지의 온도상승에 따른 유전정접-온도 특성을 조사하였다. 센서에 운전조건에 해당되는 7.5[kV]를 인가한 상태에서 schering bridge로 유전정접 값을 측정 한 결과 Fig. 8과 같은 결과를 얻었다. 이 실험에서 센서의 온도상승은 65[°C]로 setting한 oven 속에 24시간 유지하여 충분히 열적 안정화가 이루어진 다음, 상온에서 자연 냉각되는 상태로 측정하였으며, 이때 온도는 열화상카메라로 확인하였다. 실온보다 35[°C] 증가된 경우에 있어서도 유전정접의 상승이 0.03[%]이며, 유전정접 값도 0.1[%] 영역이므로 운전조건하에서 주위온도 및 유전정접 값에 의한 열폭주 또는 온도상승 문제는 없는 것으로 판단된다.

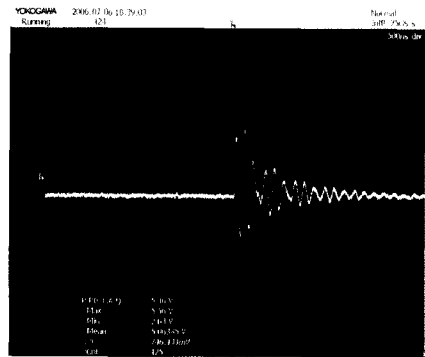
3. 실험 결과 및 고찰

제작된 센서의 기본적 성능을 확인하기 위하여 7개의 시료에 대한 전기적 특성 시험 결과 내전압 특성이나 부분방전 특성 등에서는 모두 요구 성능을 충족하고 있었다. 운전전압에 해당되는 8[kV]에서 측정 한 유전손실 또한 0.03[%]로서 요구값 1.0[%]보다 낮게 나타났다. 따라서 전압 인가 상태에서도 유전체 손실로 인한 온도상승 효과는 없을 것으로 판단된다.

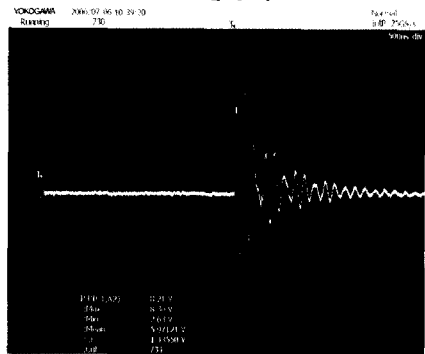
2500시간의 가속 열화를 진행시켰음에도 유전정접과 부분방전 현상이 증가하지 않은 것으로 보아 센서가 기본 수명시간에 도달하기 전까지는 열화에 의한 절연 이상은 나타나지 않을 것으로 판단되었다.



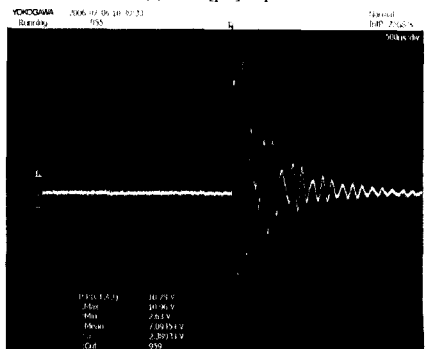
(a) 500[pC] input



(b) 1000[pC] input



(c) 1500[pC] input



(d) 2000[pC] input

Fig. 9. Output signal for input partial discharge signal.

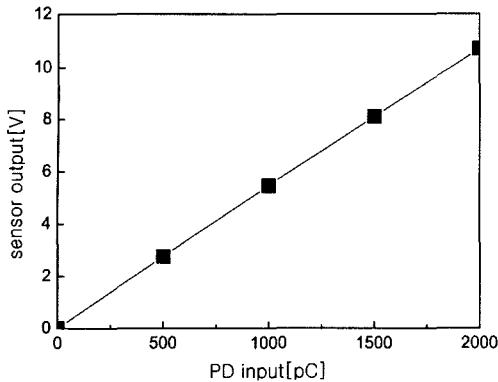


Fig. 10. Output characteristic of sensor for input partial discharge signal.

실제 부분방전 펄스의 입출력 조건을 가정하여 실시한 펄스응답특성 시험 결과 Fig. 6 및 Fig. 7에서 보는 바와 같이 7개 센서 모두가 동일한 입출력 특성을 갖고 있는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 향후 실제 적용시 부분방전 신호의 측정 감도 유지에는 문제가 없을 것으로 판단되었다. 이와 같은 특성 시험을 근거로 수명지수 n 을 고려한 센서의 장기수명을 평가⁹⁾해 보았다. Endicott와 Eyring의 식 $V^n \cdot t = const.$ 를 이용하여 평가 한 결과 정격전압 13[kV]에 사용되는 조건 하에서는 290년 이상, 15[kV]급에 사용될 경우는 142년 이상, 그리고 17[kV]급에 사용된다 하더라도 최소 75년까지는 수명 파괴가 발생되지 않는 것으로 나타났다.

센서의 측정신뢰도 확인을 위한 앞서의 모의 방전펄스 응답 측정에서 이미 센서의 균질한 특성을 확인하였으나 부분방전 입력신호의 크기가 다른 경우의 센서 출력 특성도 추가적으로 확인해 보았다. NPG2 펄스발생장치와 오실로스코프를 이용하여 pulse raising time 30[ns] 펄스를 500[pC], 1000[pC], 1500 [pC], 2000[pC]의 4종류를 인가한 결과 출력 펄스의 크기는 비례적으로 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 9는 오실로스코프 상에서의 센서 출력 특성이며 Fig. 10은 부분방전 입력 신호와 센서 출력 신호와의 관계를 나타낸 것이다. 측정센서는 입력펄스가 증가됨에 따라 비례적으로 증가함이 확인되었다.

5. 결론

대용량 수차발전기의 부분방전 검출을 위해 제작된 센서의 신뢰성 평가 결과 다음과 같은 결론을 얻

었다.

- 1) 35[kV]의 전압을 1분간 인가하여 확인한 결과 양호한 내전압 특성을 확인하였고 45[kV] 이상에서도 섬락 현상은 나타나지 않았다.
- 2) 3[pC]의 부분방전이 있을 때 31[kV]에서 부분방전이 개시되어 기준전압인 20[kV] 이상을 상회하였다.
- 3) 유전손실은 0.03[%]로서 요구값 1.0[%]보다 낮게 나타났으므로 전압 인가 상태에서도 유전체 손실로 인한 온도상승 효과는 없을 것으로 판단된다.
- 4) 센서의 장기수명 평가 결과 13[kV]에 사용되는 조건 하에서는 290년 이상의 수명을 가질 것으로 나타났다.
- 5) 센서의 측정 신뢰성 확인 결과 부분방전 신호의 입출력 특성이 비례 관계에 있으므로 충분한 신뢰성이 있음을 확인하였다.

참고문헌

- 1) 電氣學會(日) 編著, “電氣設備의 診斷技術”, 大韓電氣協會, 1994.
- 2) 한국전기연구원 회전기진단연구실 “회전기 진단 기술”, 다솜출판사, 2003.
- 3) T. Tsuji, T. Kaneko and T. Yuji, “On-line Insulation Diagnosis of Stator Winding Coil on Water-Wheel Generator using Acoustic Amission Sensor”, Proceeding of Symposium on Kyushu Electric Power Technique, pp. 64~69, 2001.
- 4) Dong-Sik Kang, Yong-Joo Kim, Youn-Ho Yun, “Evaluation of Reliability on the 6.6kV Class Ceramic Coupler for On-line Partial Discharge Measurement in Winding Machines”, Trans. KIEE. Vol. 54C, No. 2, pp. 69~76, 2005.
- 5) T. Tsuji, T. Kaneko, M. Otsubo, C. Honda, T. Yuji, O. Takenouchi, K. Tsurugida, K. Yamatsu, K. Tanaka, “Basic study on Partial Discharge Diagnosis System of Water-Wheel Generator Using Acoustic Emission Techniques”, Proceeding of 2000 Korea-Japan Joint Symposium on Electrical Discharge and High Voltage Engineering, pp. 406_1~406_4, 2000.
- 6) Dong-Sik Kang, Dae-Hee Yoon, Yong-Joo Kim, Hong-Sik Lee, Youn-Ho Yun, Chung-Hoo Park, “Characteristics of Ceramic Coupler for On-line Partial Discharge Measurement in High Voltage Rotating

- Machines”, Trans. KIEE. Vol. 51C, No. 5, pp. 205 ~ 212, 2002.
- 7) A. Wilson and R. J. Jackson, “Discharge Detection Techniques for Stator Windings”, IEE Proceedings, Vol. 132, Pt. B, No. 5, pp. 243~244, 1985.
- 8) 산업자원부, “수력발전기 고정자 권선의 운전 중 부분방전 진단시스템 개발”, 2006.
- 9) 山村 昌, “電氣・電子 部品の 壽命診断”, 日本電氣協會, pp. 45~48, 1999.