

논문 20-10-12

세라믹 커플러를 이용한 고전압회전기 고정자권선의 On-line 및 Off-line 부분방전 특성 시험 및 분석

Analysis and Test of On-line and Off-line PD Testing for High Voltage Rotating Machines Stator Windings using Ceramic Coupler

오봉근^{1,a}, 김현일¹, 강성화², 임기조³

(Bong-Keun Oh^{1,a}, Hyun-Il Kim¹, Seong-Hwa Kang², and Kee-Joe Lim³)

Abstract

Partial discharge(PD) test can be performed either when the rotating machine is not operating (off-line) or during normal machine operation(on-line). This paper presents an on-line and off-line PD test on a large hydro-generator and induction motor using the same PD acquisition system(PDAS) and ceramic coupler(CC) sensor. PD signal characteristics of CC sensor proved similar with that of epoxy mica coupler(EMC) sensor as a results of PD test for simulated defect winding and frequency response test. A comparison of on-line and off-line PD test for PD characteristic parameters-phase resolved PD(PRPD), maximum PD value(Qmax) and PD occurrence energy(POE)-indicated that on-line PD test could reliably and effectively diagnose insulation conditions which were verified by off-line PD test.

Key Words : PD, On-line PD test, Off-line PD test, Rotating machine, Insulation

1. 서론

고전압회전기 고정자권선의 절연시스템에 사용된 절연재료의 절연특성이 우수하고 최적의 절연설계가 행해졌다고 하더라도 회전기 운전중에 나타나는 여러 가지 열화요인(열적, 전기적, 기계적, 환경적)에 의하여 고정자권선의 절연열화는 서서히 진행되며 결국 기대수명을 다하지 못하고 예기치 못한 절연파괴 사고가 발생하게 된다. 따라서 돌발사고를 방지하고, 최적의 유지보수에 의한 경제적인 운용을 위해서는 권선에 대한 정확한 절연열화 진단이 행해져야 하는데, 이러한 진단방법의 하나가 권선절연물에서 발생하는 부분방전(Partial Discharge,

이하 PD)을 측정하는 기술로 이에 관한 많은 연구가 진행되어 왔다[1].

특히 PD 진단방법은 회전기가 정상 운전중(On-line)인 조건과 정지중(Off-line)인 조건에서 모두 측정이 가능한 장점이 있다. 운전중 진단방법은 측정대상 권선절연물에서 발생 가능한 열화요인이 모두 존재하는 조건에서 측정이 가능하고, 연속적인 진단이 가능한 반면 잡음 등의 외부 요인에 의한 영향을 쉽게 받을 수 있어 초기진단 개념으로 연구가 수행되고 있고, 정지중 진단방법은 측정을 위하여 운전이 정지되어야 하며 대형 회전기의 경우 시험전압을 인가하기 위한 대용량의 시험변압기가 필요한 단점이 있지만, 노이즈의 영향이 적고, 다양한 측정방법을 통하여 진단이 가능하므로 정밀진단의 개념으로 수행되고 있다[2].

본 논문에서는 회전기 고정자권선에 동일한 PD 측정시스템을 이용하여 운전중 조건과 정지중 조건에서 PD특성의 상호관련성을 분석하고자 하였다. 이를 위해 접촉식 PD센서인 세라믹커플러 센서와 EMC센서에 대한 PD신호의 응답특성을 비교

1. 한국수자원공사 수자원연구원
(대전시 유성구 전민동 462-1)
2. 충청대학 소방안전과
3. 충북대학교 전기전자컴퓨터공학부
a. Corresponding Author : bongja@kwater.or.kr
접수일자 : 2007. 8. 13
1차 심사 : 2007. 9. 14
심사완료 : 2007. 9. 20

하여 보고, 세라믹 커플러 센서를 이용하여 현장에서 실제운영중인 고전압회전기에 대하여 동일한 측정시스템으로 운전중 조건과 정지중 조건에서 PD를 측정하고 각 측정조건에 따른 유사성과 차이점에 대하여 분석하였다.

2. 실험 방법

2.1 PD측정용 세라믹커플러

고전압회전기의 고압측 권선 도체부에 Capacitive Coupler를 부착하여 정지중 조건에서 PD를 측정하는 기술은 이미 일반화된 진단방법이다[1]. 이러한 측정방법을 응용하여 운전중 조건에서 고정자권선 도체에 직접 부착하는 접촉식 센서인 EMC(Epoxy Mica Coupler)센서를 이용하여 PD를 측정하는 기술은 이미 북미에서 개발되어 상용화되고 있다[3]. 본 논문에서 사용하는 Coupler는 국내기술로 개발된 13 kV급 세라믹커플러(150 pF)로 PD를 측정하는 센싱부는 유전율이 약 500정도인 SrTiO₃ 계열의 세라믹 컴파운드에다 적정 첨가제를 배합한 소재에 수십 kg/cm의 압력을 가하여 원통형으로 성형/소성하는 자기화 공정을 거쳐 제작되었다. 세라믹커플러(Ceramic Coupler, 이하 CC) 센서의 일반적인 성능은 표 1과 같다[4].

표 1. 13 kV급 세라믹커플러 특성.

Table 1. Specification of the 13 kV class ceramic coupler.

내전압특성	30 kVrms 이상
부분방전개시전압(3 pC)	30 kV 이상
상온유전정점(8 kV)	0.05 % 이하
측정주파수대역(5 dB)	10 - 50 MHz
건조선택전압	60 kVrms 이상

상용화된 EMC센서와의 신호응답특성 비교를 통하여 CC센서의 신뢰성을 확인하고자 S파라미터를 이용한 주파수응답특성 및 슬롯방전결함을 모의한 시료권선에서 발생하는 PD신호특성 실험을 각 센서에 대하여 실시하였다.

2.2 부분방전측정 대상시료

산업현장에서 실제 운영중인 고전압회전기(대용량 수력발전기 및 펌프구동용 유도전동기)에 대하여 운전상태 및 정지상태에서 CC센서와 PDAS (Partial Discharge Analysis System)를 이용하여 PD를 측

정하였다. 시험대상 발전기는 출력 45 MW, 정격전압 13.2 kV, 주절연물은 예폭시 마이카이고 F종 절연으로 1980년도에 설치되어 운영중이며, 유도전동기는 출력 520 kW, 정격전압 6.6 kV, 주절연물은 예폭시 마이카이고 F종 절연이며 1990년도에 설치되어 운영중에 있다.

정지중 측정시 운전중 측정조건과 동일하도록 각 상별 PD특성을 측정하기 위해서는 시험대상 회전기 고정자권선의 중성점 분리가 가능하여야 한다. 수력발전기의 경우 중성점이 발전기 외부에 위치하여 중성점분리가 가능하였지만, 펌프구동용 고압 유도전동기의 경우 중성점이 전동기 내부에서 접속되어 구조상 불가능 하였다. 따라서 삼상권선 일괄로 시험전압을 인가하여 정지중 PD를 측정하였다.

2.3 PD 측정시스템

운전상태 및 정지상태에서 PD를 측정하기 위하여 PDAS라는 고속 Full A/D 방식의 PD신호 측정 시스템을 이용하였다. 시스템 구성은 고정자권선에 직접 접속된 CC센서에서 취득된 PD 출력신호가 50 Ω 임피던스 BNC 케이블을 통하여 터미널 박스로 연결되며, 터미널 박스에서 100 MHz Sampling으로 측정이 가능한 PDAS로 전송되어 PD신호를 취득하였다.

2.3.1 정지중(Off-line) PD 측정

정지중 PD측정회로는 그림 1(a)와 같이 시험전압을 인가하기 위한 별도의 시험용 변압기가 필요하였고, 각 상별 인출부 권선의 단자분리와 중성점 분리가 수행되었다. 시험은 PD free 시험용 변압기로써 전동기의 경우 12 kV, 50 kVA의 소용량 시험변압기를 사용하였고, 수력발전기의 경우 20 kV, 400 kVA의 대용량 시험변압기를 이용하였다. 그리고 운전조건에서 고정자권선에 인가되는 운전전압($E/\sqrt{3}$)과 동일하도록 시험전압을 인가한 상태에서 PD를 측정하였다. 다만, 시험방법 특성상 운전중 조건에서는 전위가 zero인 권선의 중성점부터 고압 인출부 권선까지 전압분포가 균일하게 인가되었고, 정지중 조건에서는 권선전체에 시험전압이 동일하게 인가되었다.

2.3.2 운전중(On-line) PD 측정

운전중 PD 측정회로의 구성은 그림 1(b)와 같이 앞 절에서 설명한 정지중 시험과 비교하여 매우 간단하다. 즉, 고전압회전기 고정자권선 인출부 권선에 각 상별로 CC센서를 설치하고 회전기가 정상 운전 상태에서 PD를 측정하였다.

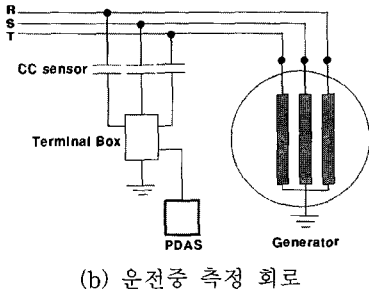
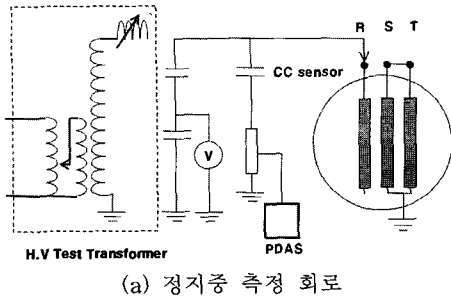


그림 1. 고전압회전기의 운전중 및 정지중 PD 측정회로.
Fig. 1. Test circuits of on-line & off-line PD in high voltage rotating machine.

2.4 PD 특성값 비교

운전조건과 정지조건에서 측정한 PD 특성값으로 상호관련성을 분석하기 위하여 위상기준 PD 패턴, 최대PD크기(Qmax) 및 PD발생에너지(PD Occurrence Energy, 이하 POE)의 크기[4]를 비교하였다. 데이터는 한주기를 3600 point로 하여 120주기(2초) 동안 측정한 값을 이용하였다. Qmax는 120주기 동안 측정된 최대 PD크기 중 10회 이상 최대크기로 기록된 값으로 정의하였고, POE은 부분방전크기와 부분방전발생 개수에 대한 면적으로 정의하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 세라믹센서의 부분방전신호

EMC센서와 CC센서의 주파수 응답특성은 주파수분포상에서 입력전압대 출력전압의 비를 나타내는 S파라미터중 전달특성을 나타내는 S21을 network analyzer로 측정하였다. 그림 2는 각 센서에 대한 S21의 주파수응답특성으로 PD 측정대역인 10~50 MHz 에서 5 dB 이하의 양호한 응답특성을 보이고 있다. 그림 3은 슬롯방전을 모의한 결합권선에 대하여

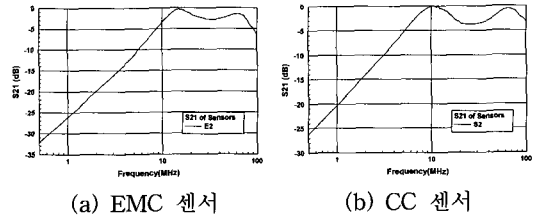


그림 2. EMC 와 CC센서의 S21.
Fig. 2. S21 of EMC & CC sensor.

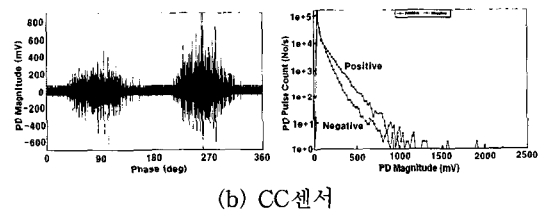
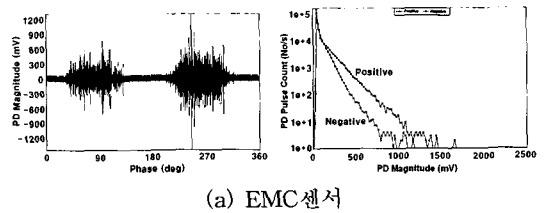
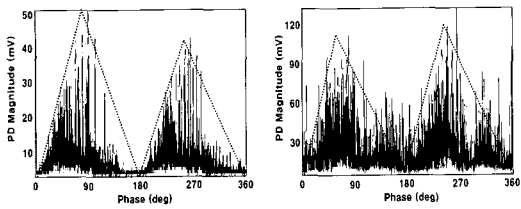


그림 3. 모의슬롯 결합권선의 EMC센서와 CC센서 PD특성.
Fig. 3. PD characteristics of EMC & CC sensor for simulated slot defect winding.

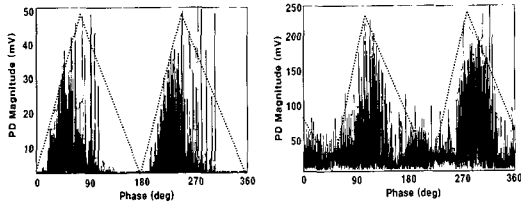
일정전압을 인가한 후 측정한 각 센서의 PD신호특성이다. PD 위상분포특성(좌측)은 음주기가 양주기에 비하여 PD신호가 상대적으로 크게 나타났고 부분방전크기(PD magnitude)에 대한 부분방전개수(PD pulse count)분포 그래프(우측)에서도 양주기(negative PD pulse)보다 음주기(positive PD pulse)에서 큰 전형적인 슬롯방전패턴이 나타나 두 종류의 센서에서 검출된 값이 유사한 특성을 보였다.

3.2 대용량 수력발전기 PD 신호

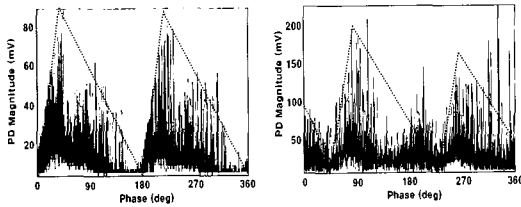
그림 4(a)~(c)는 발전기의 운전조건 및 정지조건에서 각 상별로 측정한 위상기준 PD 분포특성이다. 정지중 PD신호는 상별로 뚜렷한 PD특성이 나타났다. 운전중 PD신호의 경우 주변노이즈가 나타났지만, 정지중에서 나타나는 PD패턴(점선)을 보여



(a) R상



(b) S상

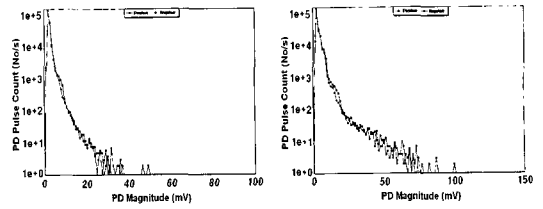


(c) T상

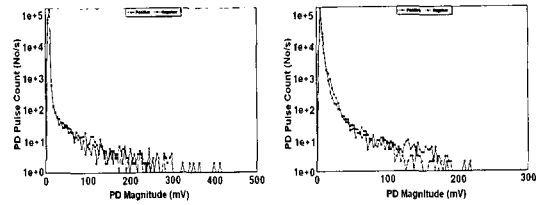
그림 4. 발전기 고정자권선의 상별 PRPD(좌:정지중 시험, 우:운전중시험).

Fig. 4. PRPD of generator stator winding per phase(left:off-line test, right:on-line test).

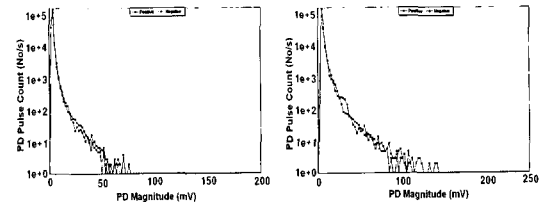
주었다. S상과 T상의 경우 PD발생위상이 정지중 위상과 다소 상이하게 측정되었지만, 이것은 진단 시스템에서 각 상의 zero crossing point를 정확하게 측정하지 못하여 나타난 결과로 판단된다. 그림 5(a)~(c)는 운전중 및 정지중에서 측정된 부분방전크기에 대한 부분방전갯수 분포 그래프특성이며 양주기 및 음주기에 대하여 유사한 특성을 보였다. Qmax와 POE에 대해 운전중 및 정지중에서 측정된 각 상별 크기를 그림 6에 나타내었다. Qmax는 정지중 및 운전중 모두 S상이 크게 나타났고, R상과 T상은 상대적으로 작았다. POE의 경우에는 운전중에서는 차이가 미소한 반면, 정지중에서는 다른상과 비교하여 S상이 다소 크게 나타났다. 또한, 기존 문헌에서 제시[5-7]하고 있는 PD패턴을 근거로 방전원을 분석해보면 양주기와 음주기의 PD패턴과 크기가 유사하여 전형적인 내부방전 형태를 나타내었다.



(a) R상



(b) S상



(c) T상

그림 5. 발전기 고정자권선의 상별 PD크기에 대한 PD갯수(좌:정지중시험, 우:운전중시험).

Fig. 5. PD pulse number against PD magnitude of generator stator winding per phase (left:off-line test, right:on-line test).

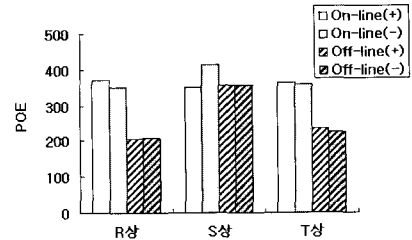
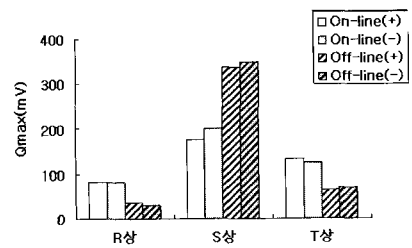


그림 6. 발전기 고정자권선의 Qmax 와 POE.

Fig. 6. Qmax & POE for generator stator winding.

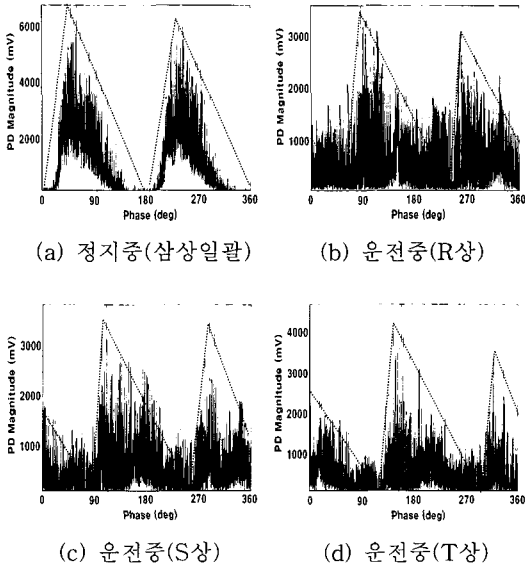


그림 7. 전동기 고정자권선의 PRPD(정지중:삼상일괄, 운전중:상별측정).

Fig. 7. PRPD of motor stator windings (off-line: three-phase, on-line: per phase).

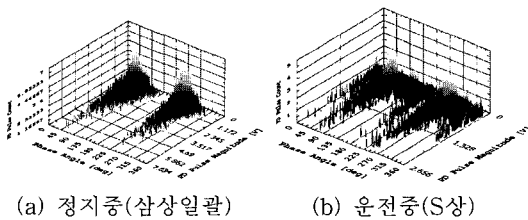


그림 8. 운전 및 정지 중 PD신호의 ϕ -q-n분포.
Fig. 8. ϕ -q-n distribution of on-line & off-line PD(off-line:three-phase,on-line:phase S).

3.3 펌프구동용 전동기 PD 신호

그림 7은 전동기의 운전중 및 정지중 조건에서 검출한 위상기준 PD 분포특성이다. 운전중의 경우는 각 상별로 측정된 PD분포이고, 정지중의 경우는 전동기 구조상 상분리가 불가능하여 삼상일괄로 측정된 PD분포를 나타냈다. 운전중의 경우 노이즈신호와 PD신호가 복합적으로 나타났지만, 수력발전기의 경우처럼 전체적인 PD의 분포형태(점선)는 정지중의 특성과 유사하였고, PD가 발생하는 위상도 zero crossing 오차로 인해 정지중과 다소 차이가 있었다. 그림 8은 PD위상(x), PD크기(y), PD갯수(z)를 나타내는 ϕ -q-n 분포 그래프로 정지중

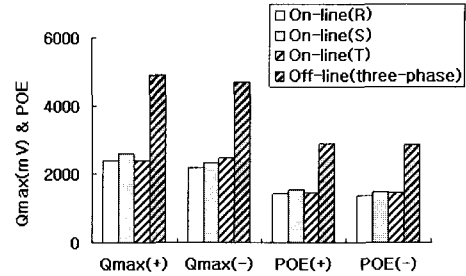


그림 9. 전동기 고정자권선의 Qmax 와 POE.
Fig. 9. Qmax & POE for motor stator winding.

과 S상의 운전중인 경우의 PD분포이다. 운전중의 경우 다수의 주변노이즈가 있지만, 정지중 특성과 전체적인 방전패턴은 유사하였고, PD패턴은 내부 방전형태를 나타내었다. 그림 9는 운전중과 정지중 Qmax 와 POE의 크기를 나타냈다. 정지중에서 운전중보다 전체적인 값은 크게 나타났지만 상대적인 크기는 운전중과 유사하였다.

4. 결 론

CC센서의 신뢰성 검증을 위하여 상용화되어 사용하고 있는 EMC센서와 주파수응답신호 및 모의 절함권선을 이용한 PD응답신호를 분석한 결과 유사한 특성을 보여주고 있어 CC센서의 유효성을 확인하였다. CC센서를 이용하여 정지 및 운전조건에서 동일한 PD진단시스템으로 산업현장에서 운전중에 있는 고전압회전기에 대하여 PD시험을 실시하고, 다양한 PD특성 인자를 분석한 결과 노이즈 발생이 거의 없는 정지중에서 측정된 PD특성이 운전중에서도 유사하게 측정되어 운전중 진단의 신뢰성을 확인할 수 있었다. 특히 운전중 진단은 정상 운전중에 고정자권선에 가해지는 여러 가지 열화요인이 존재한 조건에서 측정되어 실제의 절연상태를 나타내므로 CC센서를 이용한 운전중 진단시스템은 신뢰성을 기반으로 효과적인 PD 측정이 가능하여 향후 실용화가 가능할 것으로 사료된다.

참고 문헌

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

- [2] W. Hutter, "Partial discharges-Part XII:Partial discharge detection in rotating electrical machines", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 8, No. 3, p. 21, 1992.
- [3] H. Zhu, V. Green, M. Sasic, and S. Halliburton, "Increased sensitivity couplers for In-service PD measurement in rotating machines", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No. 4, p. 1184, 1999.
- [4] 강동식, 선종호, 황돈하, 윤영호, 신병철, 오봉근, "13 kV급 수력발전기 고정자 권선용 on-line 부분방전 측정 시스템 개발 및 현장적용 평가", 전기학회논문지, 55C권, 4호, p. 189, 2006.
- [5] 박재준, 이성룡, 문대철, "고압전동기 고정자권선의 PRPD 부분방전 결합신호 해석", 전기전자재료학회논문지, 19권, 10호, p. 942, 2006.
- [6] 오봉근, 김현일, 강성화, 임기조, "수력발전기 고정자 노후권선의 모의결함 시편에 대한 부분방전 파라미터 변화분석", 전기전자재료학회논문지, 20권, 7호, p. 645, 2007.
- [7] C. Hudon and M. Melec, "Partial discharge signal interpretation for generator diagnostics", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 12, No. 2, p. 297, 2005.