

양수발전기 고정자 권선에서 부분방전 패턴의 분석

김희동, 주영호
한전 전력연구원

Analysis of Partial Discharge Patterns in the Pumped Storage Generator Stator Windings

Hee-Dong Kim and Young-Ho Ju
Korea Electric Power Research Institute

Abstract - Partial discharge patterns were analyzed in the pumped storage generator stator winding. These were measured using partial discharge analyzer(PDA) and digital partial discharge detector(PDD). Slot discharge was discovered in phase A. Discharges at conductor surface were occurred in phase B and in phase C. Partial discharge patterns from on-line PDA system were compared with those off-line PDD system. The results of two systems are very same in phase A, B and C.

1. 서 론

부분방전은 고전압이 인가될 때 절연재로 내부에 있는 공극(void)에서 일어나는 전기적 스파크(electrical spark)이다. 이러한 보이드는 제작시에 존재하거나 운전되는 동안에 열적 혹은 기계적인 열화에 의해 형성됨으로 부분방전을 측정하여 절연재로 열화정도를 판정한다. 발전기 운전시에 발생한 고온(high temperature)과 기계적인 힘(mechanical force)이 고정자 권선에 작용하여 마이카/에폭시의 층간계면에서 박리(delamination)가 야기된다. 이러한 박리는 절연재에서 공극을 발생시키며, 고전압 응력(stress)에 의해 스파크가 일어난다. 전기적 응력과 더불어 운전중인 발전기는 역시 기계적, 열적 및 화학적인 응력을 받는다[1].

따라서 운전중에 발전기 고정자 권선에서 부분방전을 측정하기 위해서 전동기 및 수력 발전기에 용량성 커플러(capacitive couplers)를 설치하고 PDA(partial discharge analyzer)를 사용하여 절연진단을 수행하고 있다. 운전중에는 고정자 권선에서 전체적인 방전활동을 파악하기 위해 NQN(normalized quantity number)과 부분방전 크기(mV)를 주로 측정하는데, 이들은 발전기 부하상태, 고정자 권선의 온도, 전압 및 습도 등에 따라 다르게 나타난다. 정지중 절연진단은 Simons, Yoshida 등에 의해 비파괴 시험을 통하여 측정된 성국지수, 교류전류, 유전정점 및 부분방전에 의하여 고전압 발전기의 절연열화 상태를 판정하였다[2, 3]. 이 중에서 부분방전은 발전기 고정자 권선에서 절연열화의 원인과 정후를 나타내는 중요한 요소이다.

본 논문에서는 고정자 권선에 용량성 커플러가 설치되어 있는 양수발전기(정격전압 13.8kV, 220MVA)에서 부분방전 분석기(PDA)를 이용하여 운전중에 상별로 부분방전을 측정하였다. 또한 발전기 정지중에 상별로 고정자 권선을 분리하여 교류전압을 인가하면서 부분방전을 측정하였으며, 운전중의 측정결과와 비교를 통해 부분방전 패턴을 고찰하여 절연열화 상태를 분석하였다.

2. 시험방법

본 논문은 운전중에 고정자 권선의 부분방전 시험을 위해 부분방전 분석기(Partial Discharge Analyzer : PDA, FES International Co.)를 사용하여 방전패턴과 절연열화 상태를 분석하였다. 정지중에는 양수발전기 고정자 권선에 전원장치를 연결하여 각 상별로 10kV까지 전압을 인가하면서 디지털 부분방전 측정기(Digital Partial Discharge Detector : PDD)를 이용하여 측정하였다. 정지중 절연진단 시험을 위해 쉐링브리지(Schering Bridge), 커플링 캐패시터(Coupling Capacitor) 및 디지털 부분방전 측정기를 사용하였다. 쉐링브리지는 전원장치(HV Supply, Type 5283), 브리지(Bridge, Type 2818) 및 공진 인덕터(Resonating Inductor, Type 5285)로 구성되어 있다. 발전기 고정자 권선에 쉐링브리지(Tettex Instruments)를 연결하여 교류전압을 인가하며, 커플링 캐패시터(Tettex Instruments, 4,000pF)는 권선에서 유입되는 전원 잡음을 제거한 다음 신호를 커플링 유니트(Coupling Unit, Tettex Instruments AKV 572)에 보내어 증폭한 후에 디지털 부분방전 측정기(Tettex Instruments TE 571)에서 방전크기 및 패턴을 측정하였다.

그림 1에 보인 바와 같이 양수발전기는 고정자 권선이 4병렬로 구성되어 있으며, 각 상당 4개씩 총 12개의 운전중 센서(capacitive couplers)가 설치되어 있다. 부분방전 측정시 입력되는 신호는 전송 시간차(time-of-flight) 방식에 의해 의부잡음을 제거하고, 부분방전 신호의 측정을 용이하게 하기 위해서 발전기의 함에 단자함(CH1, CH2)을 설치하여 6개의 커플러에서 전송되는 신호선을 인출하였다.

3. 시험결과 및 고찰

3.1 운전중 부분방전 패턴 분석

발전기 운전중 정격출력(200MW)에서 부분방전의 패턴을 측정하여 그림 2, 그림 3과 그림 4에 나타냈다. 그림 2에서 나타낸 바와 같이 A상의 부분방전 패턴을 분석하면 A-CH1과 A-CH2가 동일하게 슬롯방전을 나타내고 있는데 부극성 펄스(negative pulse)에 비해 정극성 펄스(positive pulse)가 크게 나타나고 있다. 슬롯방전은 고정자 권선에서 표면방전의 영향을 최소화 시키기 위해서 주절연(groundwall insulation) 층선부에 반도전 코팅(semiconducting coating)과 슬롯 외부재료에 end-grading 페인트를 사용하고 있다. 그런데 주절연과 슬롯의 상대적인 움직임으로 마모되어 반도전 코팅이 손상됨에 따라 일부 주절연의 절지 상태는 나빠지고 표면에 전하가 축적되어 철심과 권선 사이에서 방전을 일으킨다. 따라서 이러한 방전은 고정자 권선의 표면과 철심사이에서 상당한 에너지가 발생하며, 방전시에 오존을 생성하여 고정자 철심과

고무성분의 절연재료를 심하게 산화시킨다[4].

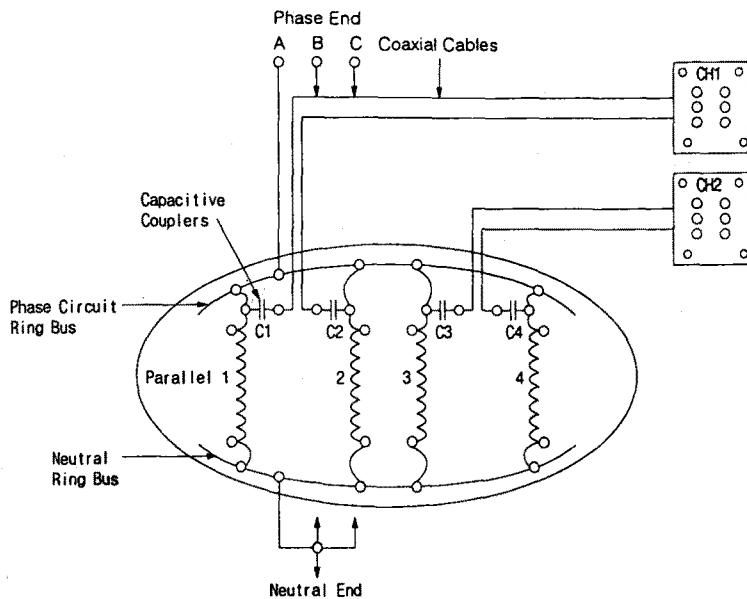
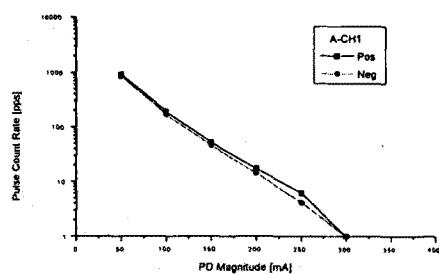
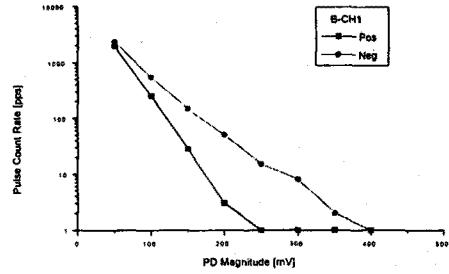


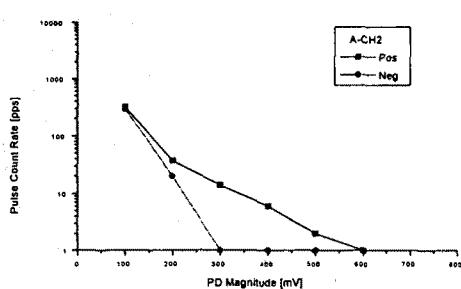
그림 1. 양수발전기 고정자 권선의 센서 설치도



(a) A-CH1

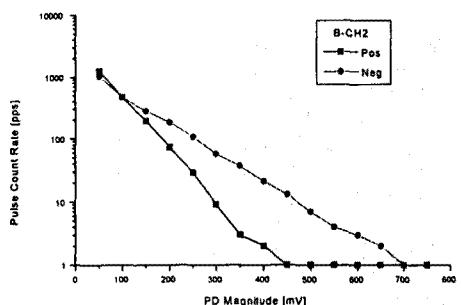


(a) B-CH1



(b) A-CH2

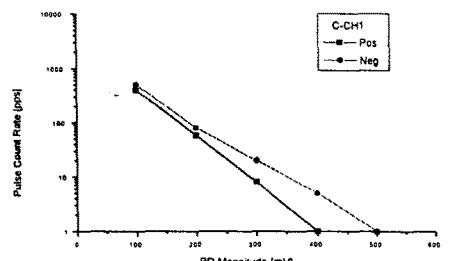
그림 2. A상에서 PDA를 이용한 부분방전 패턴



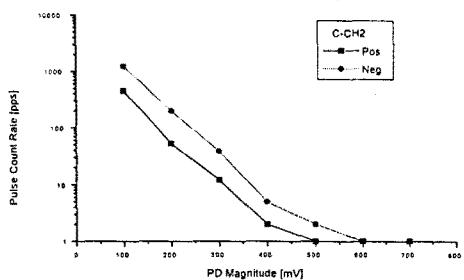
(b) B-CH2

그림 3. B상에서 PDA를 이용한 부분방전 패턴

그림 3과 그림 4에서 보인 바와 같이 B-CH1, B-CH2, C-CH1, C-CH2는 모두 도체와 주절연 사이의 경계면에서 나타나는 도체 표면방전이 발생하고 있는데 정극성 펄스에 비해 부극성 펄스가 크게 나타나고 있다[5]. 도체 표면방전은 주절연과 소선절연 사이에서 미소 공극에 의해 발생하며, 이들은 핵심 바니쉬나 수지에 의해 완전히 채워지지 않은 소선 사이와 전이된 소선의 교차점에서 형성된다. 이러한 미소 공극은 운전중 열적 싸이클에 의해 역시 발생되고 주절연에서 분리된 동도체에서도 야기된다. 이를 미소 공극에 의해 발생한 부분방전은 전기적 트리로 진전되며 주절연, 소선 및 턴절연을 마모시키고 소선-소선, 턴-터 사이를 단락시켜 접지고장(ground faults)이 발생한다[4].



(a) C-CH1



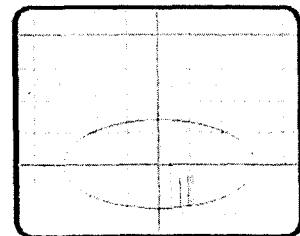
(b) C-CH2

그림 4. C상에서 PDA를 이용한 부분방전 패턴

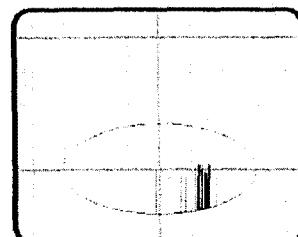
3.2 정지중 부분방전 패턴 분석

대략 20년 동안 운전한 양수발전기(13.8kV, 220MVA) 고정자 권선에서 각 상별로 분리하여 정지 중에 부분방전을 측정하였다. 그림 5, 그림 6 및 그림 7은 A, B, C상에서 10kV까지 전압을 인가하면서 부분방전 패턴을 측정하여 나타냈다. 부분방전 측정시 계통잡음은 각상에서 대략 995pC이며, 1000pC 개시전압이 A, B, C상에서 각각 4kV, 5kV, 6kV로 나타났고 실제로 5.8kV, 6.2kV, 5.9kV부근에서 부분방전이 크게 증가하였다. 부분방전 크기는 상전압에서 A, B, C상이 각각 5.9nC, 2.8nC, 3.7nC이며, 10kV에서 각각 7.9nC, 3.3nC, 4.2nC로 증가하였다. 각 상별로 부분방전 패턴을 분석해 보면 그림 5와 같이 A상은 2.8kV에서부터 10kV까지 일관성 있게 슬롯방전이 나타났다. 또한 방전 개시전압이 상전압의 1/2 부근인 4kV에서 발생함으로 슬롯방전을 입증해주고 있다. 그림 6과와 같이

B상은 4.6kV에서 개시되어 10kV까지 도체 표면방전이 나타나고 있다. 그림 7과 같이 C상은 5.8kV에서 갑자기 2.7nC으로 크게 증가하였으며, 5kV에서 상전압까지 도체 표면방전을 나타내고 있다. 그림 7(b)에서 알 수 있는 바와 같이 인가전압을 10kV까지 증가시킴에 따라 트리밍 방전으로 변환되었다.

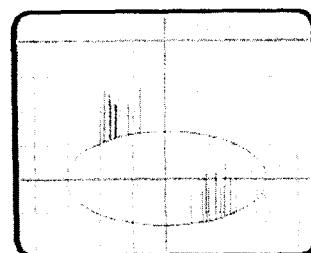


PD-Range : 5.0nC/div
(a) 7.97 kV

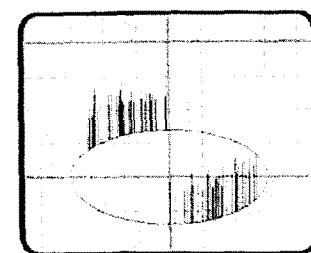


PD-Range : 5.0nC/div
(b) 10 kV

그림 5. A상에서 PDD를 이용한 부분방전 패턴

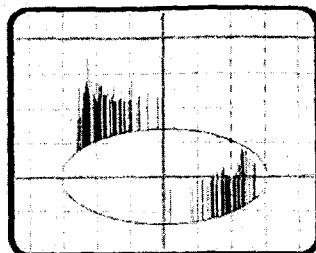


PD-Range : 2.0nC/div
(a) 7.97 kV



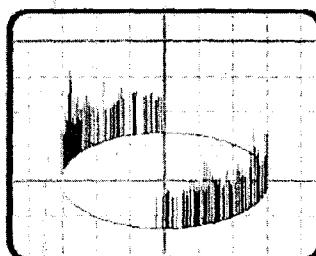
PD-Range : 2.0nC/div
(b) 10 kV

그림 6. B상에서 PDD를 이용한 부분방전 패턴



PD-Range : 2.0nC/div

(a) 7.97 kV



PD-Range : 2.0nC/div

(b) 10 kV

그림 7. C상에서 PDD를 이용한 부분방전 패턴

4. 결 론

양수발전기 운전중과 정지중에 부분방전 패턴을 측정하여 절연상태를 분석한 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) 운전중과 정지중에 부분방전 측정기를 사용하여 각 상별로 분석된 부분방전 패턴이 A상은 슬롯방전, B와 C상은 도체 표면방전으로 나타나 서로 일치하였다. 그러나 슬롯방전은 계획예방정비공사시에 정비를 수행할 수 있으나 도체 표면방전은 권선교체 이외는 정비가 불가능하여 6개월마다 주기적으로 운전중 진단을 통해 주이를 관리할 필요가 있다.

(2) 발전기 고정자 권선을 운전중과 정지중에 절연 진단하여 부분방전을 세밀하게 분석한 결과 삼상 모두가 산전압에서 부분방전 크기가 10,000pC이하로 나타나기 때문에 절연재료가 매우 양호하게 분석되었다.

(참 고 문 헌)

- [1] Partial Discharge Analyzer Analysis Report, ADWEL International Ltd., pp. 5-7, 1997.
- [2] J. S. Simons, "Diagnostic Testing of High-Voltage Machine Insulation", IEE Proceedings, Vol. 127, Pt. B, No. 3, pp. 139-154, 1980.
- [3] H. Yoshida and Y. Inoue, "Test Method of Rotating Machines, IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. EI-21, No. 6, pp. 1069-1071, 1986.

[4] I. M Culbert, H. Dhirani, G. C. Stone, *Handbook to assess the Insulation Condition of Large Rotating Machines*, EPRI, EL-5036, Vol. 16, pp. 3-24~3-28, 1989.

[5] John F. Lyles, T. Earl Goodeve and Howard Sedding, "Parameters Required to Maximize A Thermoset Hydro-Generator Stator Winding Life", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 9, No. 3, pp. 628-633, 1994.