

수력 발전기의 운전중 부분방전 측정기법에 대한 신뢰성 평가

황 돈 하*, 김 진 봉*, 김 용 주*, 박 명 수**, 김 택 수**

* 한국 전기 연구소 ** 한국전력공사 기술 연구원

Evaluation of On-Line Partial Discharge Measurement Techniques on Hydro-Generator

D. H. Hwang*, J. B. Kim*, Y. J. Kim*, M. S. Park**, T. S. Kim**

* Korea Electrotechnology Research Institute, ** KEPCO Research Center

Abstract

In hydro-generator, a groundwall insulation of stator windings gradually deteriorates due to mechanical, thermal, electrical and environmental stresses. These stresses combine to result in loose windings, delamination of the stator insulation and/or electrical tracking of the endwinding, all of which can lead to stator insulation failures.

Conventionally, off-line tests such as partial discharge measurement, DC/AC current test and $\Delta \tan \delta$ test has been used for estimation of winding condition.

However, off-line test requires large power supply and generator outage. In addition, major cause of insulation problems such as loose wedges and slot discharges may not be found with off-line diagnoses.

This paper describes the on-line partial discharge measurement techniques in the generator stator windings. The experimental results from the UIAM #1 hydro-generator confirms a optimistic application of on-line generator diagnosis method as a reliable tool for evaluation of winding condition.

1. 서 론

수력 발전기의 고장자 권선은 기동, 정지시 및 운전중에 기계적, 열적, 전기적 및 환경적 요인들이 복합적으로 작용하여 열화가 진행되며, 그 결과 슬롯(slot) 방전과 권선말단(endwinding) 방전과 같은 발전기의 수명에 치명적인 현상이 발생한다.^{(1),(2)} 근래에 심각한 절연파괴가 발생하기 전에 고장자 권선의 상태를 평가하여 예방적인 유지정비를 하기 위한 발전기 진단법의 연구가 활발히 이루어져 왔다.^{(2),(4)} 이러한 권선열화의 진단법은 운전중 진단법과 정지중 진단법으로 구분되고, 각 경우에서의 여러 방법중 고장자 권선이 열화되었을때 발생하는 부분방전을 측정하여 절연상태를 판단하는 방법이 널리 이용되고 있다.^{(2),(5)}

정지중(off-line) 부분방전 측정법에서는 대용량의 외부전원과

발전기의 운전정지가 필요하고, 측정설비의 설치시간이 많이 요구될 뿐만 아니라 절연 문제점의 중요원인이 되는 웨지이완, 슬롯방전 등이 잘 검출되지 않는 반면, 운전중(on-line) 부분방전 시험에서는 권선을 여자시키기 위한 외부전원의 공급없이 시험 전압이 발전기 자체에서 발생하므로 실제의 운전상태에서 측정할 수 있다. 또한 시험을 위한 발전기의 운전정지가 필요치 않고, 삼상전압 인가에 의한 슬롯방전과 권선말단 방전 등의 다양한 종류의 방전이 측정가능하다.

본 논문에서는 운전중 진단법의 한 방법으로서 전세기적으로 많은 수력발전기에 적용되고 있는 용량성 커플러를 이용한 부분방전 분석기와 주파수 스펙트럼 분석기를 이용한 운전중 부분방전 측정기법을 제시한다. 아울러 외부잡음 제거를 위한 방법을 제시하고, 의암 수력 발전소 1호기를 대상으로 현장시험을 실시해서 정지중 시험법과의 비교를 통해 운전중 진단법의 확대적용을 위한 신뢰성을 평가하였다.

2. 운전중 부분방전 측정기법

2-1. PDA를 이용한 부분방전 측정

부분방전 분석기(Partial Discharge Analyzer:PDA)는 수력 발전기의 운전중에 고장자 권선에서 발생하는 부분방전을 측정함으로써 절연진단이 가능한 것으로, 캐나다의 FES International Co.에서 개발되어 전세기적으로 많은 수력 발전기에 설치되어 운용되고 있다. 이것은 부분방전 측정을 위한 센서로서 그림 1과 같은 용량성 Permanent 커플러(PDA Coupler)를 발전기 고장자 권선내의 링부스나 IPB에 설치하고, 커플러로부터의 부분방전 신호에 의해 절연상태를 판단할 수 있는 것이다.

정격 80pF 25kV인 커플러와 단자의 저항 최로는 약 3MHz 이하의 cut-off 주파수를 가지는 high-pass filter를 이루게 되므로 60Hz 전압은 차단하고, 고주파인 부분방전 펄스만을 통과시키게 된다. 이러한 부분방전 펄스 Monitoring이 가능한 소프트웨어를 이용해서 PC와의 인터페이스에 의해 일정시간 동안 측정하므로써 고장자 권선에서 발생하는 부분방전 펄스의 극성에 따른 크기와 갯수를 알 수 있다. 또한, PDA를 이용한 주기적인 측정으로 최대 부분방전 크기와 권선에서의 전체 부분방

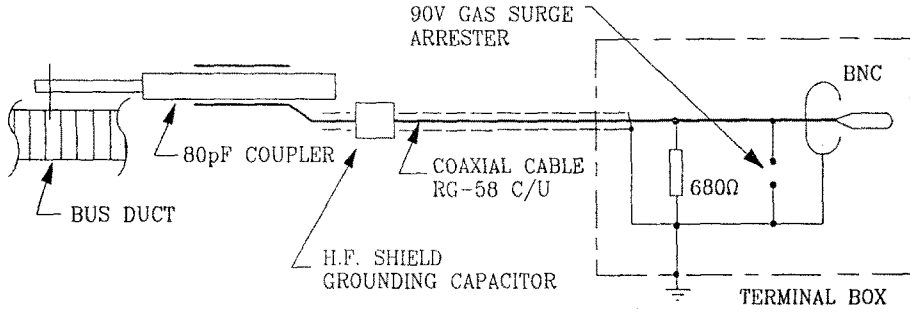


그림 1. 용량성 커플러의 구성도

전 활동량을 나타내는 NQN(Normalized Quantity Number)의 경향(trend)을 알 수 있기 때문에 권선의 절연열화 정도를 판단할 수 있다.

발전기의 운전중에는 부분방전외에도 외부잡음이 상당히 많이 발생하므로 이를 제거하는 것이 무엇보다도 중요하다. 본 연구에서는 발전기의 링부스나 IPB 말단부에 그림 2와 같이 커플링 커패시터를 부착하여 차동증폭기의 특성을 이용해서 외부잡음을 제거하고 부분방전만을 측정하였다. 이때 IPB의 펄스 전송속도가 동축 케이블(coaxial cable)의 0.65배인 점을 고려해서 신호측정 케이블의 길이를 외부잡음이 제거될 수 있도록 적절히 조정한다.

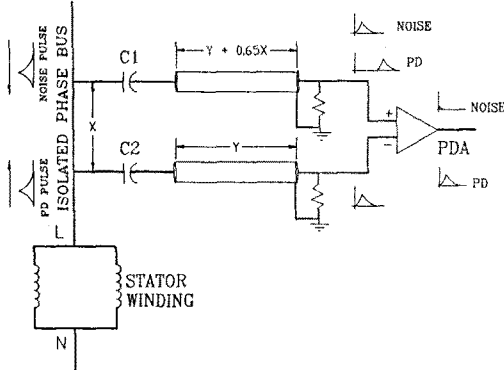


그림 2. 커플러와 신호측정 케이블의 설치 개념도

외부에서 발생한 잡음은 양부스로 각각 분리 전파되어 동시에 같은 신호가 분석기(PDA)에 도달한다. 이때 외부잡음은 광대역의 차동증폭기를 이용하여 크기는 같고 극성만 다른 신호로 만들어 서로 상쇄시킴으로써 제거된다. 반면에, 고정자 권선에서 발생한 부분방전 펄스는 IPB를 통해 C1과 C2의 커플러로 전파된다. C1으로 전파된 부분방전은 시간지연이 되어 신호크기가 차동증폭기에서 합성되면 그림과 같은 형태의 전압펄스가 된다.

2-2. FSA를 이용한 부분방전 측정

수력 발전기의 고정자 권선에서 발생하는 부분방전 펄스 신호는 일반적인 오실로스코프나 부분방전 측정기를 이용하므로써 시간영역에서 펄스의 크기와 형상을 관찰할 수는 있지만, 펄스의 갯수나 주파수 특성에 따른 부분방전 현상의 관측은 불가능하다.

그러나 일정 주파수 영역에서 Span을 0 Hz로 하여 관찰되는 주파수 스펙트럼 분석기(Frequency Spectrum Analyzer:FSA)는 그림 3과 같이 부분방전 신호의 크기와 위상과의 관계를 관찰하게 한다. 따라서 nsec 단위의 극히 짧은 상승시간을 가진 부분방전 펄스를 FSA를 이용해서 측정하면 빠른 속도로 여러 곳에서 발생하는 방전과 잡음의 펄스 형태를 구분하고, 부분방전 파형에 포함된 주파수 특성을 측정할 수 있다. 이는 부분방전 신호의 발생원에 따른 주파수 성분의 상이함과 발생지점으로 부터 커플러가 설치된 곳까지의 전송매체의 특성으로 주파수 성분별 감쇄의 차이로 생겨나는 주파수 영역에서의 변화들이 FSA로 부분방전의 위치 및 형태를 구분할 수 있는 가능성을 제공한다.

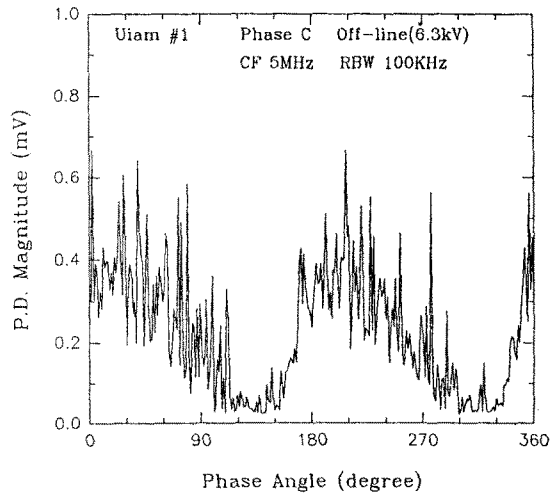


그림 3. FSA를 이용한 측정결과

본 연구에서는 FSA를 사용하여 발전기의 전원 주파수에 포함된 부분방전 신호를 외부 트리거 모드에 의해 60Hz 전원 주파수와 동기시켜 측정하므로써 부분방전 펄스의 주파수 특성을 분석하였다. 중심 주파수(Center Frequency)와 Resolution Band Width(RBW)는 부분방전 신호 측정에 있어서 관심이 되는 주파수 대역으로 설정하고, 측정 주파수 Span은 최소로 두어 화면상에 나타나는 spectrum이 거의 중심 주파수로 간주할 수 있도록 하기 위해 span을 "0"으로 설정하여 측정하였다.

3. 현장시험 및 고찰

3-1. 시험장치 및 방법

부분방전 분석기(PDA)와 주파수 스펙트럼 분석기(FSA)를 이용한 수력 발전기 고정자 권선에서의 부분방전 측정을 위해 본 연구에서는 용량 25 MVA, 전압 11 kV, 단권 권선방식인 의암 수력발전소 1호기에 대한 현장시험을 수행하였다.

그림 4는 고정자 권선에 설치한 커플러를 통해 감지되는 부분방전 신호를 PDA와 FSA를 이용한 측정방법의 개략도를 나타낸 것이다. 용량성 PDA 커플러는 권선내의 IPB와 외부에 한쌍씩 각상마다 설치하고, 커플러의 각상은 장치가 적당한 동작을 할 수 있도록 최소 4m 이상 분리시킨다.

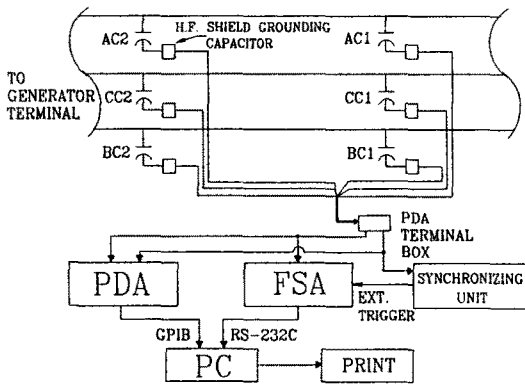


그림 4. 고정자 권선에서의 부분방전 측정도

동축 케이블은 커플러의 저전압측에 접속되고 단자함(terminal box)에 선거(conduit)로 연결된다. 고주파 접지 커패시터는 동축 케이블과 커플러에 가까운 접지간에 연결된다. 이것은 인접한 동축 케이블간의 신호결합을 감소시키고, 단자함에서 더 높은 신호 level과 더 좋은 S/N비를 제공하게 된다. 동축 케이블의 길이는 계통에서 유입되는 신호를 제거하기 위해 적당히 조절하였다. 신호 케이블은 680Ω, 0.5W 저항과 90V 가스 서지 피뢰기를 병렬로 연결한 단자함에 결합시켰고, 단자함은 발전기 IPB 근처의 적당한 위치에 영구적으로 설치되었다.

발전기의 운전중에 단자함으로 부터 동축 케이블로 연결된 PDA와 FSA에서의 모든 부분방전 측정은 휴대용 컴퓨터와의 인터페이스에 의해 이루어지고, 발전기 전원전압과의 동기를 위해 FSA는 외부 트리거를 이용하였다.

3-2. 시험결과

의암 수력 발전기 1호기에 설치한 Permanent Coupler에서의 PDA 및 자체 개발한 FSA를 이용한 운전중 부분방전 시험의 측정결과와 정지중 측정결과를 상호 비교 분석함으로써 운전중 진단법에 대한 신뢰성을 평가하였다.

정지중 진단시에는 DC/AC 전류시험, $\tan \delta$ 시험 등을 행하였으며, 정지중 부분방전의 측정은 Robinson사의 PD Detector를 사용하였다.

PDA로 측정된 NQN과 정지중의 $\tan \delta$ 값의 비교를 나타내는 그림 5를 보면, PDA에서의 측정시 각상의 NQN 값과 $\tan \delta$ 값은 상호연관이 있음을 보여주고 있다. 특히, C상의 경우에는 높은 $\tan \delta$ 값에서 NQN 값은 더욱 민감하게 측정되고 있음을 알 수 있다.

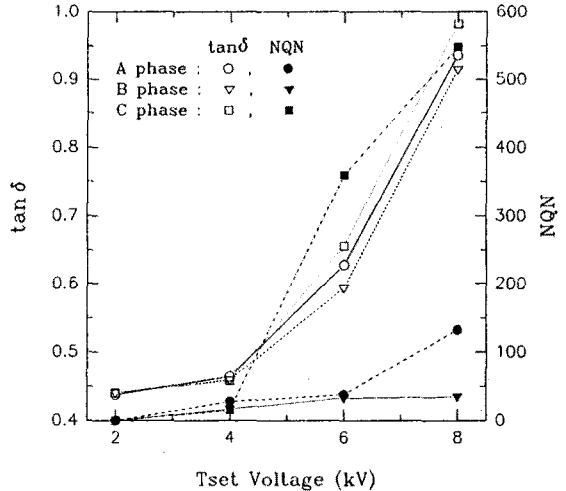


그림 5. PDA의 NQN과 $\tan \delta$ (%) 값의 비교

그림 6은 Robinson사의 PD Detector와 PDA 및 FSA에서 측정된 값을 비교한 것을 나타낸다. 정지중 측정시 Robinson사의 부분방전 측정기의 최대값과 PDA 및 FSA의 부분방전의 최대 값은 상호연관되어 있으며, PDA의 1mV는 20-90pC를 나타내나, PDA의 최대 부분방전 개수가 10개 이상인 것을 기준으로 하여 환산하면 1mV는 30-80 pC이 된다. FSA의 0.1mV는 1,000 - 2,000 pC를 나타낸다. 따라서 FSA로 측정된 값이 Robinson사의 PD Detector와 더 밀접한 비례관계가 있으며, 향후 FSA의 실용화가 가능함을 보여주고 있다. FSA로 측정할 경우 중심주파수는 5MHz이며, Span은 0Hz, 그리고 Resolution Band Width는 100kHz로 설정하였다.

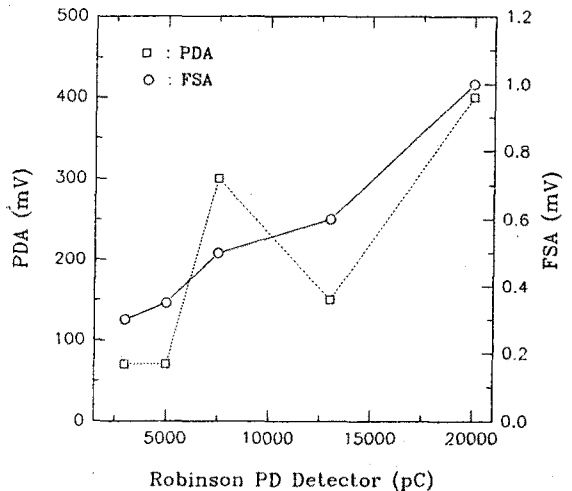


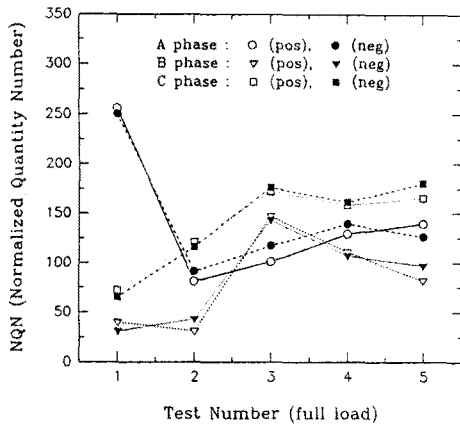
그림 6. Robinson PD Detector와 PDA 및 FSA간의 최대 부분방전값의 비교

이상에서 보는 바와 같이 정지중 측정값인 $\tan \delta$ 와 부분방전 최대값은 각각 PDA의 NQN과 최대 부분방전값과 밀접한 관련이 있으며, 정지중 부분방전 측정치와 FSA 측정값은 PDA보다 더 밀접하게 비례한다는 것을 알 수 있다.

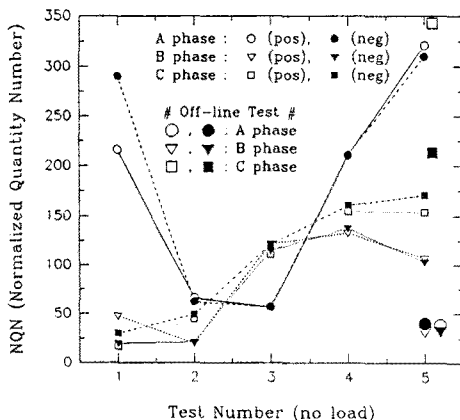
3-3. 의암 #1 수력 발전기의 진단결과

PDA 기기를 이용한 부분방전량 판정기준은 NQN 값이 450 이상일 경우 보수 또는 재접점의 대상이 된다. 본 발전기의 경우, 그림 7에서 보는 바와 같이 B상은 운전중 및 정지중 진단시의 측정값이 비슷한 수준이었으며, on-line 진단시에도 부하의 증감에 따른 측정값이 변하지 않았다. 또한, 측정값도 기준치 이하이므로 절연상태가 양호한 것으로 판단되었다.

C상의 경우에는 정지중 측정값이 무부하로 운전중인 상태에서의 측정값보다 커서 중성점 방향의 권선에서 부분방전이 발생하거나, 정극성의 값이 부극성의 값보다 큰 경우이기 때문에 정지중 측정시 회로 절연상의 금속 모서리에서 발생한 코로나 방전으로 판단된다. 따라서 발전기 운전중에는 부분방전이 발생하지 않아 절연상태는 양호하리라 여겨진다.



(a) 전부하(full-load)시



(b) 무부하(no-load)시

그림 7. 의암 #1 수력 발전기의 측정결과

A상의 경우는 발전기 웨지(wedge) 교체 공사후 처음 측정할 1차 진단시에 상당량의 부분방전이 발생하여 주기적인 측정을

계속하였으나, 2차 및 3차 진단시에는 부분방전의 발생이 약화되었다. 4차 진단시험부터는 부하에 따라 부분방전의 크기가 변하였으며, 5차 측정시에는 부하에 따른 부분방전 크기의 변화가 심화되었다. 운전중 측정시 무부하 상태에서는 NQN이 321(정극성), 310(부극성), 전부하 상태에서는 139(정극성), 126(부극성)을 각각 기록하였다. 이 현상은 고압부 권선이 tangential 방향으로 진동하기 때문에 발생하는 것으로 side packing 이완, 고정자 권선과 철심(core)간의 접촉저항 증대, 그리고 고정자 철심면의 부식이나 불균일 등이 원인인 것으로 추정된다.

4. 결 론

본 연구에서는 수력 발전기 고정자 권선에서의 운전중 부분방전 측정기법을 제시하고, 의암 수력 발전소 1호기에서의 현장 시험을 통해 제시한 PDA 시스템과 FSA를 이용한 운전중 진단법에 대한 신뢰성을 평가하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 정지중 진단법에서의 측정값인 $\tan \delta$ 와 부분방전 최대치는 각각 PDA의 NQN과 최대 부분방전치와 밀접한 관계가 있다.
2. FSA를 이용한 부분방전 측정값은 PDA보다 더 밀접하게 정지중에서의 부분방전 측정치와 비례하였다.
3. 1상당 2개의 커플러를 설치하여 외부잡음을 제거한 순수 부분방전만 측정하므로써 절연열화 상태의 판정에 정확을 기할 수 있다.
4. 제시한 운전중 부분방전 측정기법은 별도의 전원공급과 발전기의 운전정지가 요구되지 않고, 측정방식이 간단하여 전문가가 아니라도 측정이 가능하다.
5. 고정자 권선의 기계적 진동 및 운전온도 상태에서의 측정을 통해 여러가지 형태의 부분방전에 따른 절연열화를 구별할 수 있다.

그러므로 향후 수력 발전기의 절연상태를 진단하는 데 있어 본 논문에서 제시한 PDA와 FSA를 이용한 운전중 부분방전 측정기법의 확대적용이 기대된다.

참고문헌

1. I.M. Culbert, H. Dhirani and G.C. Stone, "Handbook to Assess the Insulation Condition of Large Rotating Machines", EPRI Publication EL-5036, Volume 16, June, 1989.
2. G.C. Stone, "Practical Techniques for Measuring PD in Operating Equipment", IEEE Electrical Insulation Magazine, July, 1991.
3. 한전 기술연구원 발전연구실, 한국전기연구소, "발전기 Stator 수명예측 및 절연진단에 관한 연구(최종보고서)", 한국전력공사 기술연구원, 1992. 11.
4. G.C. Stone and S.R. Campbell, "Digital Methods of Eliminating Noise in On-Line Generator Partial Discharge Measurements", IEEE Winter Power Meeting, Panel Session on Digital Techniques for Generator PD Testing, February, 1992.
5. Vince Green and Vasile Stan, "Experience with In-Service Monitoring Using Both New and Old PD Instruments", Third CEA/Ontario Hydro Conference on PD Testing, April, 1994.