

### 고압회전기 고정자 권선의 부분방전 측정

김희동, 이영준, 공태식  
한전 전력연구원

#### Partial Discharge Measurements of High Voltage Rotating Machine Stator Windings

Hee-Dong Kim, Young-Jun Lee and Tae Sik-Kong  
Korea Electric Power Research Institute

**Abstract** - Partial discharge(PD) tests are used to evaluate the insulation condition of stator windings in two 4.16kV and three 6.6kV motors. These tests were conducted using a conventional partial discharge detector(PDD) and turbine generator analyzer(TGA). Off-line PD measurements were performed on five high voltage motors. PD magnitudes ranged from 1000 pC to 5400 pC at the normal line-to-ground voltage. Five high voltage motors have been equipped with 80pF epoxy-mica coupler on the motor terminal box. The PD pulse from sensors were measured with the TGA instrument. TGA summarizes each plot with two quantities such as the peak PD magnitude(Qm) and the total PD activity(NQN). The defect mechanisms of high voltage motor can be associated with PD patterns such as internal, slot and conductor surface discharges. The PDD and TGA test results of No. 4 motor showed that internal discharge was detected in voids of the groundwall insulation.

부분방전 특성을 측정하여 절연열화 정도, 결함요소 및 트렌드 등을 분석함으로써 건전성 여부를 판정하고 있다.

### 2. 시험방법

본 논문은 정격전압이 4.16kV급 2대 및 6.6kV급 3대의 고압전동기 고정자 권선에서 정지중 부분방전 시험을 수행하였다. 표 1은 5대의 고압전동기 사양을 나타냈으며, 정지중에 고정자 권선의 부분방전 시험을 위해 웨빙브리지(Schering Bridge), 커플링 캐패시터(coupling capacitor) 및 부분방전 측정기(partial discharge detector : PDD, Tettex Instruments TE 571)를 사용하였다. 웨빙브리지는 전원장치(HV supply, Type 5283), 브리지(Bridge, Type 2818) 및 공진 인덕터(resonating inductor, Type 5285)로 구성되어 있다. 그림 1은 고압전동기 고정자 권선에서 부분방전을 측정하기 위한 회로도를 나타냈다. 고압전동기 고정자 권선에 웨빙브리지(Tettex Instruments)를 연결하여 교류전압을 인가하며, 커플링 캐패시터(Tettex Instruments, 4,000pF)는 권선에서 유입되는 신호를 커플링 유니트(coupling unit, Tettex Instruments AKV 572)에 보내어 증폭한 후 부분방전 측정기에서 방전크기 및 패턴을 측정하였다. 부분방전 측정기의 주파수 대역폭은 40~400kHz 이다.

### 1. 서 론

고압전동기 고정자 권선 결함은 제작시에 존재하거나 장기간 운전되는 동안에 열적, 전기적, 기계적 및 환경적인 열화에 의해 복합적으로 형성되며, 결함 위치에 따라 내부방전, 슬롯방전, 표면방전 및 트리잉방전 등 여러 가지 부분방전 패턴이 발생한다[1]. 이러한 부분방전 패턴을 고압전동기 정지중(off-line)과 운전중(on-line)에 측정하여 절연재료에서 열화정도를 판정하고 있다.

그러나 정지중과 운전중에 부분방전을 측정하는 장비가 서로 다르지만 부분방전 패턴은 상호 일치성을 갖고 있다[2]. 고압전동기 고정자 권선 단자박스에 에폭시-마이카 커플러(epoxy-mica coupler)를 설치하고 TGA(turbine generator analyzer)를 사용하여 운전중에 부분방전을 측정하고 있다[3, 4]. TGA는 고정자 권선에서 전체적인 방전활동을 파악하기 위해 NQN(normalized quantity number)과 부분방전 크기(Qm)를 주로 측정하여 트렌드를 분석함으로써 이상여부를 파악하고 있다.

본 논문에서는 발전소에서 운전중인 5대의 고압전동기 고정자 권선의 부분방전 특성을 분석하였다. 정지중인 고압전동기 고정자 권선에서 부분방전 측정기(TE 571)를 사용하여 부분방전 크기(pC)와 패턴을 분석하였다. 운전중 모의를 위해 정지중인 고압전동기 고정자 권선 단자박스에 80pF의 에폭시-마이카 커플러를 설치하고 TGA를 사용하여 NQN, 부분방전 크기(Qm) 및 방전패턴 등을 측정하였다. 정지중과 운전중

표 1. 고압전동기의 사양

고압전동기	전압[kV]	용량[kW]	정격전류[A]
No. 1	4.16	373	53.7
No. 2	4.16	737	91
No. 3	6.6	500	63.5
No. 4	6.6	1400	139
No. 5	6.6	720	86.8

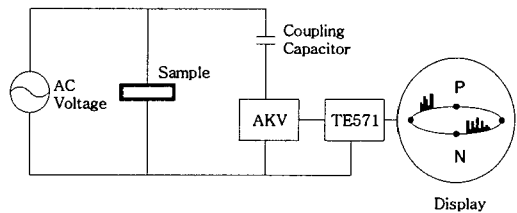


그림 1. 부분방전의 측정 회로도

정지중에 운전중 모의를 위해 고압전동기 고정자 권선 단자박스에 80pF의 에폭시-마이카 커플러(epoxy-mica coupler, Iris Power Engineering)를 설

치하였다. 고압전동기 고정자 권선의 부분방전 시험을 측정하기 위해 부분방전 분석기(turbine generator analyzer : TGA, Iris Power Engineering)를 사용하여 NQN(normalized quantity number), 최대부분방전 크기(Qm) 및 부분방전 패턴 등을 분석하여 절연열화 상태와 정도를 분석하였다. TGA의 주파수 대역은 0.1~350MHz이다.

### 3. 시험결과 및 고찰

#### 3.1 정지중 부분방전 분석

5대의 고압전동기 고정자 권선에서 정지중에 상전압에서부터 정격전압까지 전압을 증가하면서 부분방전을 측정하였다. 표 2는 전압을 인가하면서 각각의 전압별 부분방전 크기, 외부잡음 및 부분방전 개시전압(discharge inception voltage) 등을 측정하여 나타났다. 부분방전 측정시 외부잡음은 580pC~1900pC이며, 일반적으로 정지중 절연진단 시험에서 외부잡음이 크면 실제 고압전동기 고정자 권선에서 발생하는 부분방전 크기도 크게 측정된다. 따라서 외부잡음이 작은 장소에서 부분방전을 측정하는 것이 바람직하지만 현장여건은 장소에 따라 크기가 다르게 나타난다. 부분방전 개시전압은 4.16kV급 전동기에서는 각각 2.0kV, 2.70kV이며, 6.6kV급 전동기에서는 2.6kV~3.6kV로 나타났다. 또한 4.16 kV급 전동기의 부분방전 크기는 2.4kV에서는 1000pC~2400pC이며, 3.0kV에서 1500pC~5500pC로 증가하였다. 6.6kV급 전동기의 부분방전 크기는 3.81kV에서는 1300pC~5400pC이며, 4.76kV에서 1700pC~8400pC로 증가하였다.

고압전동기 No. 1의 부분방전 패턴은 2.4kV~3.0kV에서는 내부방전(internal discharge), 3.5kV~4.16kV에서는 표면방전(surface discharge)으로 분석되었다. 고압전동기 No. 2의 부분방전 패턴은 2.4kV~4.16kV에서 모두 내부방전으로 나타났다. 고압전동기 No. 3의 부분방전 패턴은 3.81kV에서는 내부방전, 4.76kV~6.6kV에서는 표면방전으로 분석되었다. 고압전동기 No. 4와 No. 5의 부분방전 패턴은 3.81kV~6.6kV에서 모두 내부방전으로 나타났다.

표 2. 정지중 고압전동기의 부분방전 크기

고압전동기	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	
외부잡음[pC]	750	1000	1900	1300	580	
개시전압[kV]	2.0	2.7	2.6	3.6	3.0	
방전 크기 [pC]	2.4(3.81)	2400	1000	4600	1300	5400
	3.0(4.76)	5500	1500	8400	1700	6200
	3.5(6.0)	8800	2000	12400	3000	8100
	4.16(6.6)	9100	2600	18000	3900	9700

#### 3.2 정지중 TGA 분석

표 3은 고압전동기의 운전중 모의 시험 결과인 NQN과 Qm 크기를 나타냈다. NQN과 Qm의 크기는 정지중 부분방전 크기(pC)와 마찬가지로 전압이 증가함에 따라 크게 나타났다. 고압전동기 No. 1의 부분방전 패턴은 2.4kV에서 Qm(+)와 Qm(-)가 거의 동일하기 때문에 내부방전이며, 3.0kV~4.16kV에서는 Qm(+)가 Qm(-)보다 크기 때문에 슬롯방전(slot discharge)으로 분석되었다. 운전중 절연진단 시험 분석에서 표면방전은 슬롯방전에 포함된다. 따라서 정지중과 운전중 모의에 의한 부분방전 패턴은 2.4kV에는 모두 내부방전으로 동일하게 나타났다. 3.5kV에서 정지중은

표면방전, 운전중 모의 결과는 슬롯방전으로 나타났는데, 앞에서 언급한 바와 같이 표면방전은 슬롯방전에 포함되기 때문에 모두 상호 일치하고 있는 것으로 판단할 수 있다. 고압전동기 No. 2의 부분방전 패턴은 2.4kV, 3.5~4.16kV에서는 Qm(+)가 Qm(-)보다 작기 때문에 모두 도체표면에서 방전(discharge at conductor surface)으로 나타났으며, 3.0kV에서만 슬롯방전의 유형을 나타내고 있다. 정지중과 운전중 모의에 의한 부분방전 패턴 분석 결과 정지중은 2.4~4.16kV에서 내부방전을 나타내고 있으며, 운전중 모의 시험에서는 도체표면에서 방전으로 분석되었다. 고압전동기 고정자 모델 코일에서 동도체와 절연재료 사이에 보이드를 제작하여 시험한 결과 정지중 부분방전 패턴은 내부방전으로 나타났다. 따라서 운전중 모의 시험에서 도체표면에서 방전은 정지중 시험에서 내부방전을 나타내고 있다. 고압전동기 No. 1과 마찬가지로 No. 3의 부분방전 패턴은 3.81kV에는 모두 내부방전으로 동일하게 나타났으며, 4.76~6.6kV에서 정지중은 표면방전, 운전중 모의 결과는 슬롯방전으로 나타났다. 고압전동기 No. 4의 정지중과 운전중 모의 결과는 3.81~6.6kV에서 모두 내부방전으로 분석되었다. 고압전동기 No. 5는 No. 2와 마찬가지로 정지중은 3.81~6.6kV에서 내부방전을 나타내고 있으며, 운전중 모의 시험에서는 도체표면에서 방전으로 분석되었다. 따라서 5대의 고압전동기 고정자 권선의 절연상태는 모두 양호하게 판정되었다.

표 3. 고압전동기의 NQN과 Qm 크기

전압[kV]		2.4(3.81)	3.0(4.76)	3.5(6.0)	4.16(6.6)
No. 1	NQN(+)	29	893	1857	2140
	NQN(-)	47	576	1061	1248
	Qm(+)	32	418	968	1071
	Qm(-)	33	281	593	722
No. 2	NQN(+)	1	320	608	510
	NQN(-)	23	276	750	1150
	Qm(+)	0	153	258	384
	Qm(-)	26	118	345	704
No. 3	NQN(+)	702	1475	1827	1796
	NQN(-)	604	665	787	967
	Qm(+)	358	864	981	942
	Qm(-)	356	417	505	572
No. 4	NQN(+)	33	50	359	590
	NQN(-)	27	43	337	574
	Qm(+)	34	33	210	208
	Qm(-)	30	35	191	204
No. 5	NQN(+)	774	1518	1823	2179
	NQN(-)	1045	1681	2291	2538
	Qm(+)	317	807	901	1109
	Qm(-)	542	905	1152	1311

내부방전은 주절연재료(groundwall insulation) 내부 보이드(voids)에서 발생하며, 부극성 펄스(negative pulse)와 정극성 펄스(positive pulse)가 거의 일치한다. 이와 같이 내부방전은 제조시 마나쉬나 수지의 부적절한 함침 혹은 절연열화에 의해 절연층의 박리, 크랙 및 보이드 등에서 발생한다[5-6].

슬롯방전은 정극성 펄스보다 부극성 펄스보다 높게 나타나며, 슬롯방전은 권선 표면의 코일과 슬롯의 상대적인 움직임으로 마모되어 반도전층을 손상시킨다. 반도전층이 손상됨에 따라 일부 권선의 접지상태는 나빠지고 권선 표면에 전하가 축적되어 철심과 권선 사이에 방전을 일으킨다. Qm(+)는 Qm(-)에 비해 1.5

배 이상 크게 측정되어 슬롯방전으로 분석되기 때문에 계획예방정비공사를 수행할 때 정밀 분해점검 및 공장으로 반출하여 절연보강이 필수적이다[4].

도체표면에서 방전은 정극성 펄스(positive pulse)에 비해 부극성 펄스(negative pulse)가 우세하게 나타난다. 도체표면에서 방전은 주절연과 소선절연 사이의 미소 공극(void)에 의해 발생하며, 합침 바니쉬나 수지에 의해 완전히 채워지지 않은 소선 사이와 전이된 소선의 교차점에서 형성된다. 미소 공극은 운전중에 열적 싸이클에 의해 역시 발생되고 주절연에서 분리된 동도체에서도 야기된다. 미소 공극에 의해 발생한 부분방전은 전기적 트리로 진전되며, 주절연, 소선 및 턴절연을 마모시키고 소선-소선, 턴-턴 사이를 단락시킨다[5-6].

#### 4. 결 론

5대의 고압전동기 고정자 권선에서 정지중과 운전중 모의를 위해 부분방전을 측정된 결과 NQN과 Qm의 크기는 정지중 부분방전 크기(pC)와 마찬가지로 전압이 증가함에 따라 크게 증가하였다. 고압전동기 No. 1과 No. 3의 정지중과 운전중 모의 시험에 의한 부분방전 패턴이 2.4(3.81)kV에서는 모두 내부방전으로 나타났으며, 3.5(4.76)kV 이상에서 정지중은 표면방전, 운전중 모의 시험 결과는 슬롯방전으로 나타났다. 표면방전은 슬롯방전에 포함되기 때문에 모두 상호 일치하고 있는 것으로 판단할 수 있었다. 고압전동기 No. 2와 No. 5의 정지중은 2.4(3.81)~4.16(6.6)kV에서 내부방전을 나타내고 있으며, 운전중 모의 시험에서는 도체표면에서 방전으로 분석되었다. 고압전동기 No. 4의 정지중과 운전중 모의 시험 결과는 3.81~6.6kV에서 모두 내부방전으로 분석되었다. 따라서 5대의 고압전동기 고정자 권선의 절연상태는 모두 양호하게 판정되었다.

#### (참 고 문 헌)

[1] 김희동, “회전기 고정자 권선에서 부분방전 패턴 분석”, 한국전력공사 전력연구원 기술개발 제42집, pp. 201-214, 2000.

[2] 김희동, “수력발전기 고정자 권선에서 부분방전 특성”, 한국전기전자재료학회 춘계학술대회, pp. 86-90, 2000.

[3] H. Zhu, V. Green, M. Sasic. and S. Halliburton, “Capacitive Couplers with Increased Sensitivity On-Line PD Measurement in Stator Windings”, IEEE International Symposium on Electr. Insul., pp. 261-265, 1998.

[4] G. C. Stone, J. Bragoszewski, S. R. Campbell and B. A. Lloyd, “Development of A Practical Continuous On-Line Partial Discharge Monitor for Generators and Motors”, IEEE International Symposium on Electr. Insul., pp. 206-209, 1996.

[5] Partial Discharge Analyzer Analysis Report, ADWEL International Ltd., pp. 5-7, 1997.

[6] G. C. Stone, Partial Discharge Seminar, Iris Power Engineering Inc., Vol. 1, pp. 56~78, 2001.