

고압전동기 고정자 권선의 운전중 부분방전 패턴 분석

김희동, 주영호
한전 전력연구원

Analysis of On-Line Partial Discharge Patterns in High Voltage Motor Stator Windings

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

Abstract - During normal machine operation, partial discharge(PD) measurements were performed with turbine generator analyzer(TGA) in two high voltage motors. Two 6.6kV motors were installed with 80pF capacitive couplers at the terminal box. The PD patterns were displayed two dimensional and three dimensional. TGA summarizes each plot with two quantities such as the normalized quantity number(NQN) and the peak PD magnitude(Qm). Off-line PD measurements were conducted on one 4.16kV motor. The motor was energized to 2.4kV, 3.0kV, 3.5kV and 4.16kV, respectively. The PD levels in pC were measured with a conventional digital PD detector. The comparison of positive to negative PD indicates whether the defect elements of PD are within the insulation or on the insulation surface. Discharge at conductor surface was discovered in No. 1 motor. Internal discharges were generated in phase A, B and C of No. 2 motor. Slot discharges occurred in three phases of No. 3 motor.

2. 시험방법

본 논문은 그림 1에서 나타낸 바와 같이 고압전동기 고정자 권선 단자박스에 에폭시-마이카 커플러(80pF epoxy-mica coupler, Iris Power Engineering)를 설치하였다. 운전중에 고압전동기 고정자 권선의 부분방전 시험을 측정하기 위해 부분방전 분석기(turbine generator analyzer : TGA, Iris Power Engineering)를 사용하여 NQN, 최대부분방전 크기 및 부분방전 패턴 등을 분석하여 절연열화 상태와 정도를 분석하였다. 부분방전 펄스 갯수, 부분방전 크기 및 위상을 2차원과 3차원으로 나타냈으며, 부분방전 패턴 분석을 통해 결함 발생 원인을 규명하였다. TGA의 주파수 대역은 0.1~350MHz이며, 1ns 만큼 짧은 라이즈 타임(rise-time)을 갖는 부분방전 펄스도 측정이 가능하다. 전형적으로 부분방전은 1~5ns의 라이즈 타임을 갖고 있다[4].

정지중에 4.16kV급 고압전동기 고정자 권선의 절연 진단 시험을 위해 웨링브리지(schering bridge), 커플링 캐패시터(coupling capacitor) 및 디지털 부분방전 측정기(Tettex Instruments, TE 571)를 사용하였다. 웨링브리지는 전원장치(HV supply, Type 5283), 브리지(bridge, Type 2818) 및 공진 인덕터(rsonating inductor, Type 5285)로 구성되어 있다. 고압전동기 고정자 권선에 웨링브리지(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 후에 디지털 부분방전 측정기에서 방전크기 및 패턴을 측정하였다. 또한 전동기 단자에 에폭시-마이카 커플러를 설치하고 외부에서 교류전압을 인가하면서 TGA를 사용하여 NQN과 Qm을 측정하였다.

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, 도체표면에서 방전 및 트리밍방전 등 여러 가지 부분방전 패턴이 발생한다 [1]. 이러한 부분방전 패턴을 고압전동기 정지중(off-line)과 운전중(on-line)에 측정하여 절연재료에서 열화정도를 판정하고 있다.

일반적으로 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]. 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 장기간 운전된 정격전압 4.16kV, 6.6kV급 고압전동기 고정자 권선의 운전중 부분방전 패턴을 측정하기 위해 단자함 박스에 에폭시-마이카 커플러를 각 상당 한 개씩 총 3개를 설치하였다. TGA를 사용하여 운전중 고압전동기 고정자 권선의 절연열화 발생 위치를 확인하였다. 그리고 고압전동기 운전중 부분방전 패턴을 내부방전, 슬롯방전 및 도체표면에서 방전 등으로 분류하여 분석하였다.



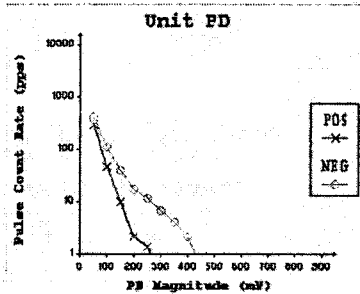
그림 1. 에폭시-마이카 커플러

3. 시험결과 및 고찰

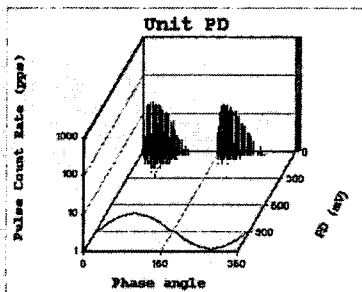
3대의 고압전동기 고정자 권선에서 운전중 부분방전 특성을 분석하기 위해 TGA를 사용하여 NQN과 최대부분방전 크기(Qm)를 표 1에 나타냈다. 고압전동기 No. 1과 No. 2는 표준석탄화력발전소 운탄설비에서 운전중인 6.6kV급 고압전동기이며, No. 3은 원자력발전소 압축 공기계통에서 운전중인 4.16kV급 고압전동기이다. No. 1-1과 No. 1-2는 동일 고압전동기로서 No. 1-1을 측정하고 6개월이 경과한 후에 No. 1-2를 측정하였다. No. 1-2는 No. 1-1에 비해 NQN과 Qm이 약간 증가하였다. 고압전동기 No. 3는 정지중에 단자박스에서 케이블을 분리하고 전동기 단자를 삼상 일팔로 연결하여 에폭시-마이카 커플러 1개를 설치하고 전압을 상전압(2.4kV)에서 정격전압(4.16kV)까지 증가하면서 NQN과 Qm의 크기를 측정하였다. 전압이 증가함에 따라 NQN과 Qm이 증가하였다.

표 1. NQN과 Qm의 크기

| 고압전동기 | | No. 1-1 | No. 1-2 | No. 2 | No. 3 | |
|-------------|-----|---------|---------|-------|-------|------|
| A상 2.4kV | NQN | + | 257 | 278 | 429 | 29 |
| | | - | 410 | 513 | 488 | 47 |
| | Qm | + | 116 | 158 | 194 | 32 |
| | | - | 196 | 271 | 228 | 33 |
| B상 3.0kV | NQN | + | 284 | 224 | 284 | 893 |
| | | - | 714 | 734 | 519 | 576 |
| | Qm | + | 146 | 121 | 174 | 418 |
| | | - | 335 | 432 | 170 | 281 |
| C상 3.5kV | NQN | + | 289 | 284 | 296 | 1857 |
| | | - | 435 | 520 | 234 | 1061 |
| | Qm | + | 163 | 152 | 188 | 968 |
| | | - | 226 | 268 | 148 | 593 |



(a) 2차원

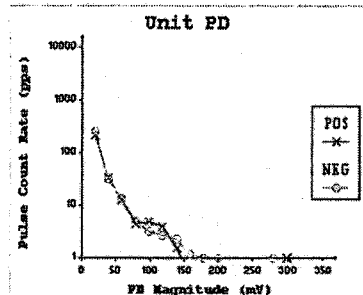


(b) 3차원

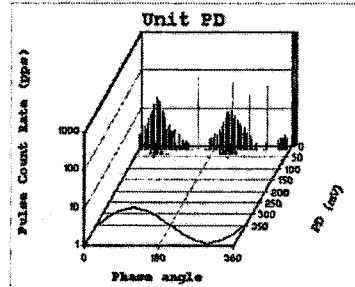
그림 2. 도체표면에서 방전

그림 2(a), (b)에서 나타낸 바와 같이 고압전동기 No. 1은 정극성 펄스(positive pulse)에 비해 부극성 펄스(negative pulse)가 우세하게 나타났으며, 표 1에서 보인 바와 같이 정극성 PD에 비해 부극성 PD가 높기 때문에 부분방전 패턴이 도체표면에서 방전(discharge at conductor surface)으로 분석되었다[5].

도체표면에서 방전은 주절연과 소선절연 사이의 미소 공극(void)에 의해 발생하며, 함침 바니쉬나 수지에 의해 완전히 채워지지 않은 소선 사이와 전이된 소선의 교차점에서 형성된다. 미소 공극은 운전중에 열적 사이클에 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[6].



(a) 2차원



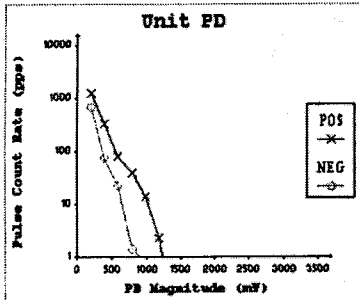
(b) 3차원

그림 3. 내부방전

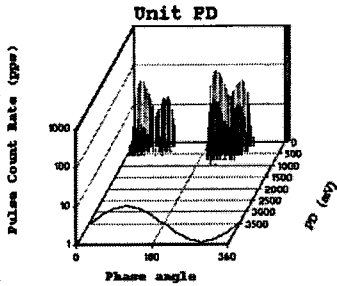
그림 3(a), (b)에서 나타낸 바와 같이 고압전동기 No. 2는 부극성 펄스와 정극성 펄스(positive pulse)가 거의 일치하고 있으며, 표 1에서 보인 바와 같이 정극성 PD와 부극성 PD가 거의 동일하기 때문에 부분방전 패턴이 내부방전(internal discharge)으로 분석되었다[5]. 내부방전은 장기간 운전에 의해 절연재료 내부의 평면(flat) 보이드 부분에서 방전이 발생되고 있으며, 주로 신규발전기 혹은 고압전동기에서 거의 60% 정도를 점유하고 있다.

그림 4(a), (b)에서 나타낸 바와 같이 고압전동기 No. 3는 정극성 펄스가 부극성 펄스보다 높으며, 표 1에서 보인 바와 같이 정극성 PD가 부극성 PD보다 높기 때문에 부분방전 패턴이 슬롯방전(slot discharge)으로 나타났다. Qm(+)는 Qm(-)에 비해 1.5배 이상이며, 슬롯방전으로 분석되기 때문에 계획예방정비공사를 수행할 때 정밀 분해점검 및 공장으로 반출하여 절연보강이 필수적이다[5]. 고압전동기 No. 3는 인가

전압 2.4kV에서는 그림 3과 같이 내부방전을 나타냈으며, 3.0~4.16kV까지는 그림 4와 같이 슬롯방전으로 분석되었다. 일반적으로 운전중에 측정된 슬롯방전은 단말권선에서 표면방전을 포함하고 있다.



(a) 2차원



(b) 3차원

그림 4. 슬롯방전

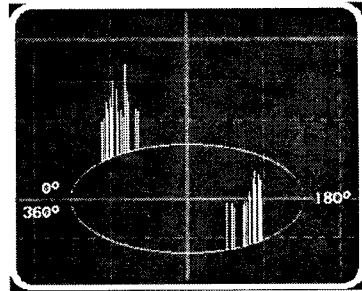
표면방전의 영향을 최소화 시키기 위해서 권선 직선부에 반도체 코팅(semiconducting coating)과 슬롯 외부재료에 end-grading 페인트를 사용하고 있다. 슬롯방전은 권선 표면의 코일과 슬롯의 상대적인 움직임으로 마모되어 반도체층을 손상시킨다. 반도체층이 손상됨에 따라 일부 권선의 접지상태는 나빠지고 권선 표면에 전하가 축적되어 철심과 권선 사이에 방전을 일으킨다[6].

대부분 슬롯방전은 정비가 가능하기 때문에 신뢰할 수 있는 측정법을 사용하여 적절한 방지계획을 수립해야 한다. 외부방전의 크기(10000pC 이하)는 내부방전의 크기(10000pC 이상)에 비해 훨씬 더 위험하다. 절연진단 결과 교류전류 및 유전정접이 양호하고 부분방전 패턴이 슬롯방전인 경우에 절연보강을 시행하면 방전크기를 현저하게 줄일 수 있다[7].

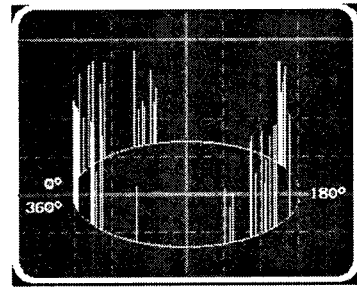
그림 5는 디지털 부분방전 측정기(TE 571)를 사용하여 부분방전 패턴을 측정하였다. 그림 5(a)에서 나타난 바와 같이 고압전동기 No. 3을 절연진단한 결과 부분방전 패턴이 인가전압 2.4~3.0kV까지는 내부방전이며, 그림 5(b)에서 보인 바와 같이 3.2~4.16kV에서는 표면방전으로 분석되었다[1]. 부분방전 크기도 크며, 각각의 측정전압에서 유전정접값도 고정되지 않고 계속 증가하기 때문에 베어링 오일과 먼지 유입에 의한 오손으로 예측되어 정밀분해 점검을 권고하였다.

그림 6은 분해점검을 위해 고압전동기 외부 케이싱을 취외한 후에 단말권선의 오손상태를 나타내었다. 예측한 바와 같이 단말권선에서 베어링 오일과 먼지 유입으로 인해 오손상태가 심하게 나타났다. TGA로

측정된 부분방전 패턴의 결과와 인가전압 3.2kV 이상의 정지중 디지털 부분방전 측정기를 사용하여 부분방전 패턴을 측정된 결과 모두 슬롯방전으로 일치하게 나타났다.



(a) 내부방전



(b) 표면방전

그림 5. 정지중 부분방전 패턴

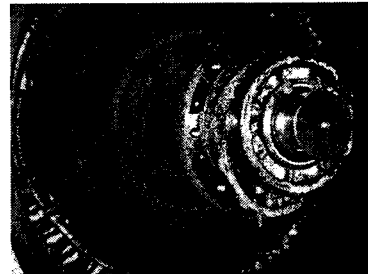


그림 6. 고압전동기 No. 3에서 단말권선의 오손상태

표 2. 고압전동기 No. 3에서 분해점검 전후의 비교

| 고압전동기 No. 3 | 분해점검 전 | 분해점검 후 |
|-------------|----------------|----------------|
| 외부잡음[pC] | 750 | 850 |
| 방전개시전압[kV] | 2.0 | 2.9 |
| 성급지수 | 4.76(177/37.2) | 5.62(288/51.3) |
| 2.4kV | 2200 | 850 |
| 3.0kV | 5500 | 1100 |
| 3.5kV | 8800 | 1600 |
| 4.16kV | 9100 | 2200 |
| 부분방전 패턴 | 내부방전→ 표면방전 | 내부방전 |

표 2는 고압전동기 No. 3의 분해점검 전후의 부분방

전 크기와 패턴의 변화를 나타냈다. 표 2에서 나타낸 바와 같이 방전개시전압, 성극지수, 부분방전 크기 및 패턴 등이 분해점검 후에 현저하게 절연진단 결과가 양호하게 분석되었다.

4. 결 론

운전중인 고압전동기 No. 1은 도체표면에서 방전으로 나타났으며, No. 1을 6개월 주기로 두 번 측정하여 비교한 결과 삼상에서 모두 NQN과 Qm이 약간 증가하였다. 운전중인 고압전동기 No. 2는 내부방전으로 나타났으며, 주절연재료 내부에 보이드가 존재하고 있는 것으로 분석되었다. TGA를 사용하여 고압전동기 No. 3의 부분방전 패턴을 측정한 결과 인가전압 2.4kV에서는 내부방전을 나타냈으며, 3.0~4.16kV까지는 슬롯방전으로 분석되었다. 정지중에 디지털 부분방전 측정기를 사용하여 부분방전 패턴을 측정한 결과 인가전압 2.4~3.0kV까지는 내부방전이며, 3.2~4.16kV에서는 표면방전으로 분석되었다. 고압전동기 No. 3의 정지중 절연진단 결과 부분방전 크기도 크며, 측정전압에서 유전정접값도 고정되지 않고 계속 증가하기 때문에 고정자 권선 내부 오손으로 예측되어 정밀분해 점검을 시행한 결과 실제로 단말권선에서 베어링 오일과 먼지 유입으로 인해 심하게 오손되었음을 확인할 수 있었다. 고압전동기 No. 3의 분해점검 전후에 절연진단 결과를 비교했을 때 방전개시전압, 성극지수, 부분방전 크기 및 패턴 등이 더욱 양호하게 분석되었다.

(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] V. Warren, G. C. Stone and M. Fenger, "Advancements in Partial Discharge Analysis to Diagnose Stator Winding Problems", IEEE International Symposium on Electrical Insulation, pp. 497-500, 2000.
- [5] G. C. Stone, Partial Discharge Seminar, Iris Power Engineering Inc., Vol. 1, pp. 56~78, 2001.
- [6] I. M Culbert, H. Dhirani, and G. C. Stone, Handbook to assess the Insulation Condition of Large Rotating Machines, EPRI, EL-5036, Vol. 16, pp. 3-25~3-28, 5-13~5-14, 1989.
- [7] 김희동, "회전기 고정자 권선의 절연상태 평가", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 1706-1708, 2001.