

## 고압전동기 모델 코일의 절연상태 분석

김희동, 공태식, 김병래  
한전 전력연구원

### Analysis of Insulation Condition in High Voltage Motor Model Coils

Hee-Dong Kim, Tae-Sik Kong and Byeong-Rae Kim  
Korea Electric Power Research Institute

**Abstract** - 80pF capacitive couplers were connected to six 6.6kV motor model coil terminals. The voltage applied to the coils were 3.81kV, 4.76 kV and 6.6kV, respectively. These stator coils have various types of artificial insulation defects such as large voids, semi-conductive coating damage and strand insulation fault. Digital PD detector(PDD) and turbine generator analyzer(TGA) were used to measure PD activity. TGA summarizes each plot with two quantities such as the normalized quantity number(NQN) and the peak PD magnitude(Qm). The PD levels in pC were measured with a conventional digital PD detector. Most of the defect mechanism of large motor stator winding can be associated with PD patterns such as internal and slot discharges. PD patterns coincide with PDD and TGA. These instruments have an input bandwidth of 40-400kHz and 0.1-350MHz. Surge testing detects faults in inter-turn winding of high voltage motor model coils.

써지(surge) 시험기를 사용하여 모델 코일의 소선 단락 상태를 확인하였다.

### 2. 시험방법

본 논문은 실제 고압전동기에서 절연열화 상태를 확인하기 위해 6.6kV급 고압전동기 모델 코일 6개를 결함 요소별로 제작하였다. 고압전동기 고정자 권선 상태와 동일하게 그림 1과 같이 고정자 권선, 철심 및 웨지모 구성되어 있다. 표 1은 6개의 고압전동기 모델 코일의 결함 요소를 나타냈다. 고압전동기 모델 코일을 그림 2와 같이 3개씩 Y결선으로 연결하여 Case 1과 Case 2로 분류하여 절연상태, 소선 단락 및 부분방전 등을 측정하였다. 표 1에서 나타낸 바와 같이 Case 1은 모델 코일 No. 1, No. 2 및 No. 3으로 배열하고 Case 2는 No. 4, No. 5 및 No. 6으로 구성하였다. Case 1과 Case 2는 코일 구조, 절연재료, 절연두께 및 크기는 동일하지만 소선 크기를 다르게 제작하였다.

### 1. 서 론

대부분 고압회전기에서 고정자 권선은 부분방전이 발생할 수 있는 여러 가지 잠재적인 요소를 갖고 있다. 기기설계, 구성재료, 제작법, 운전조건 및 정비사례 등은 부분방전의 발생량, 위치, 특성 및 진전 등에 현저하게 영향을 미친다. 회전기의 비정상적인 운전, 각종 열화, 권선의 진동 및 오손 등에 의해 주절연재료 내부에서 결함, 고정자 권선 표면에서 반도전층의 손상 및 단말권선의 상대적 이동으로 인한 마모 등에 의해 다양하게 부분방전 패턴이 발생한다[1].

실제로 고압전동기 정지중(off-line)과 운전중(on-line)에 부분방전 패턴을 측정하여 절연재료에서 열화 정도를 판정하고 있다. 고압전동기 고정자 권선 단자 박스에 에폭시-마이카 커플러(epoxy-mica coupler)를 설치하고 TGA(turbine generator analyzer)를 사용하여 운전중 부분방전을 측정한다[2]. 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 6.6kV급 고압전동기 모델 코일을 도체표면과 주절연재료 내부에서 공극, 반도전층 손상 및 소선 단락 등과 같은 인위적인 결함을 갖도록 제작하였다. 운전중 모의를 위해 모델 코일에 80pF의 에폭시-마이카 커플러를 설치하였으며, TGA를 사용하여 NQN, 부분방전 크기 및 부분방전 패턴 등을 측정하였다. 그리고 디지털 부분방전 측정기를 사용하여 정지중에 모델 코일의 절연열화 상태를 분석하였으며,

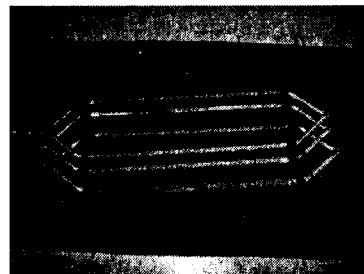


그림 1. 고압전동기 모델 코일

표 1. 모델 코일의 결함요소

모델 코일		결함요소
Case 1	No. 1	소선 단락
	No. 2	주절연재료 내부에서 공극
	No. 3	정상 코일
Case 2	No. 4	주절연재료 내부에서 공극
	No. 5	도체표면에서 공극
	No. 6	반도전층 손상

운전중 모의를 위해 모델 코일에 에폭시-마이카 커플러(80pF epoxy-mica coupler, Iris Power Engineering)를 설치하였다. TGA(turbine generator analyzer, Iris Power Engineering)를 사용하여 NQN, 최대부분방전 크기 및 부분방전 패턴 등을 분석하여 절연열화 상태와 정도를 분석하였다. 부분방전 펄스 개수와 부분방전 크기를 2차원으로 나타냈으며, 부분방전 패턴 분석을 통해 결함 발생 원인을 규명하였다.

TGA의 주파수 대역은 0.1~350MHz이다.

정지중에 6.6kV급 고압전동기 모델 코일의 절연상태 및 부분방전 시험을 위해 셰링브리지(schering bridge), 커플링 캐패시터(coupling capacitor) 및 디지털 부분방전 측정기(Tettex Instruments, TE 571)를 사용하였다. 셰링브리지는 전원장치(HV supply, Type 5283), 브리지(bridge, Type 2818) 및 공진 인덕터(resonating inductor, Type 5285)로 구성되어 있다. 고압전동기 고정자 권선에 셰링브리지(Tettex Instruments)를 연결하여 교류전압을 인가하며, 커플링 캐패시터(Tettex Instruments, 4,000pF)는 권선에서 유입되는 신호를 커플링 유닛트(coupling unit, Tettex Instruments, AKV 572)에 보내어 증폭한 후에 디지털 부분방전 측정기에서 방전크기 및 패턴을 측정하였다. 또한 모델 코일에 예콥시-마이카 커플러를 설치하고 외부에서 교류전압을 인가하면서 TGA를 사용하여 NQN과 Qm을 측정하였다. 또한, 고정자 권선의 소선 단락 상태를 확인하기 위해 AWA(Advanced Winding Analyzer III, Baker Instrument)를 사용하였다.

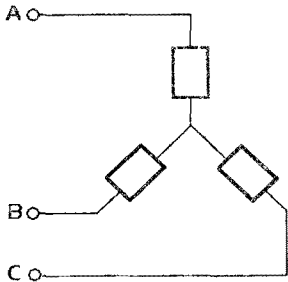


그림 2. 모델 코일의 배선 구조

### 3. 시험결과 및 고찰

고압전동기 모델 코일 6개를 Case 1과 Case 2로 분리하여 정지중에 부분방전 특성을 A, B, C상과 삼상 일괄로 측정하여 표 2에 나타냈다. 표 2는 전압을 인가하면서 각각의 전압별 부분방전 크기, 외부잡음 및 부분방전 개시전압(discharge inception voltage : DIV) 등을 측정하여 나타냈다. 부분방전 측정시 외부잡음은 120pC~380pC이며, 인가전압이 증가할 수록 부분방전 크기도 높게 나타나고 있다. Case 1에서 부분방전 개시전압은 No. 1, No. 2 및 No. 3에서 각각 4.1kV, 4.2kV, 5.0kV로 나타났으며, Case 2에서 부분방전 개시전압은 No. 4, No. 5 및 No. 6에서 각각 3.7kV, 3.1kV, 3.3kV로 나타났다. 일반적으로 고정자 권선에서 부분방전 개시전압이 높고 부분방전 크기도 낮게 나타나면 절연상태를 양호하게 판정한다. 따라서 모델 코일 6개 중에 No. 3의 절연상태가 가장 양호하게 분석되었다. Case 1과 Case 2에서 A, B, C상과 삼상 일괄로 측정된 부분방전 특성을 비교해 보면 삼상 중에 가장 높게 나타난 모델 코일이 삼상 일괄로 측정된 결과와 일치하고 있다. Case 1에서는 B상의 No. 2, Case 2에서도 B상의 No. 5의 부분방전 크기가 삼상 일괄로 측정된 결과와 일치하고 있다. 실제로 고압전동기에서 부분방전 크기를 측정할 때 삼상 일괄로 측정하는 것이 보다 정확한 값을 얻을 수 있다. Case 1과 Case 2의 부분방전 패턴은 3.81kV~6.6kV에서 내부방전이 나타났으며, No. 5에서만 6.6kV에서 표면방전으로 분석되었다.

표 2. 정지중 부분방전 특성

모델 코일		A	B	C	일괄
Case 1	외부잡음[pC]	220	300	380	260
	DIV[kV]	4.1	4.2	5.0	4.1
	3.81kV	330	600	530	590
	4.76kV	1800	1800	900	2200
	6.60kV	3000	4600	2800	4600
Case 2	외부잡음[pC]	200	160	120	160
	DIV[kV]	3.7	3.1	3.3	3.1
	3.81kV	1300	2400	1400	3000
	4.76kV	2800	4200	2400	4400
	6.60kV	3700	4600	4000	4600

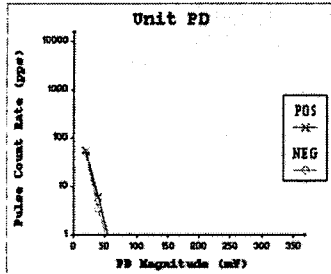
표 3은 고압전동기 모델 코일의 운전중 모의 시험 결과인 NQN과 Qm 크기를 나타냈다. NQN과 Qm의 크기는 정지중 부분방전 크기(pC)와 마찬가지로 전압이 증가함에 따라 크게 나타났다. 그림 3에서 나타낸 바와 같이 모델 코일 No. 1, No. 2, No. 3 및 No. 4의 부분방전 패턴은 3.81kV~6.6kV에서 Qm(+)와 Qm(-)가 거의 동일하기 때문에 내부방전을 나타내고 있다. No. 5의 부분방전 패턴은 4.76kV에서는 Qm(+)가 Qm(-)보다 작기 때문에 도체표면에서 방전(discharge at conductor surface)으로 나타났다. No. 6은 3.81kV에서는 Qm(+)가 Qm(-)보다 크기 때문에 슬롯방전(slot discharge) 형태를 나타내고 있다[3]. No. 3는 각각의 전압에서 완전한 내부방전을 나타내고 있으나 No. 5와 No. 6는 도체표면에서 방전과 슬롯방전의 유형을 나타낼 뿐 완전한 도체표면에서 방전과 슬롯방전으로 분석할 수 없다.

표 3. 고압전동기 모델 코일의 NQN과 Qm 크기

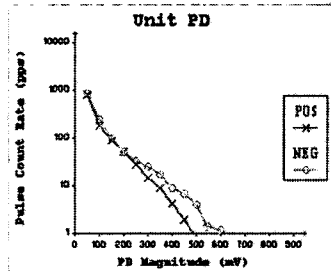
모델 코일		A	B	C	일괄		
Case 1	3.81 kV	NQN +	5	59	0	17	
		NQN -	23	83	0	93	
	Qm	+	0	38	0	0	
		-	0	54	0	62	
	4.76 kV	NQN	+	130	203	50	170
			-	129	180	45	213
Qm		+	71	95	37	77	
		-	70	86	36	94	
6.60 kV	NQN	+	232	362	128	302	
		-	229	322	123	318	
	Qm	+	150	150	63	149	
		-	149	135	63	165	
Case 2	3.81 kV	NQN +	140	219	294	156	
		NQN -	153	221	250	188	
	Qm	+	98	135	177	99	
		-	107	136	157	127	
	4.76 kV	NQN	+	265	530	383	260
			-	286	539	358	274
Qm		+	144	225	195	147	
		-	165	218	190	150	
6.60 kV	NQN	+	281	500	575	317	
		-	336	493	565	335	
	Qm	+	153	272	274	180	
		-	181	244	276	162	

고정자 권선의 소선 단락 상태를 확인하기 위해 AWA를 사용하여 No. 1, No. 2 및 No. 3의 권선저항을 측정된 결과 0.048Ω, 0.098Ω 및 0.095Ω이며, 상간 편차가 51%로 나타났다. 모델 코일 No. 1은 소선 단

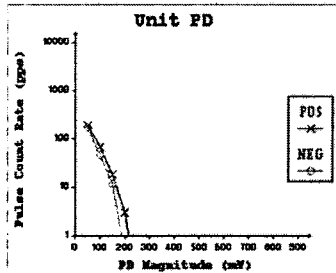
락으로 인해 권선저항이 낮게 나타났으며, 이를 확인하기 위해 써지(surge) 시험 결과를 그림 4에서 나타냈다. 그림 4(a)에서 나타낸 바와 같이 No. 1은 소손 단락으로 인해 그래프가 왼쪽으로 이동되어 있으며, No. 2와 No. 3는 거의 일치하였다. 그림 4(b)에서는 No. 4, No. 5 및 No. 6의 그래프가 일치하기 때문에 소선 상태가 양호하게 분석되었다.



(a) 내부방전

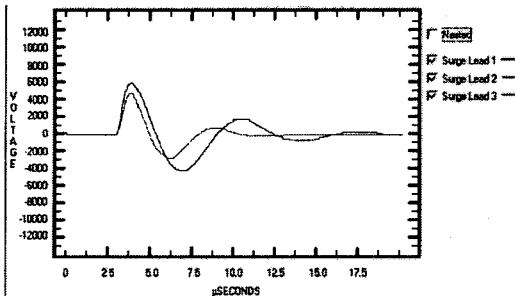


(b) 도체표면에서 방전

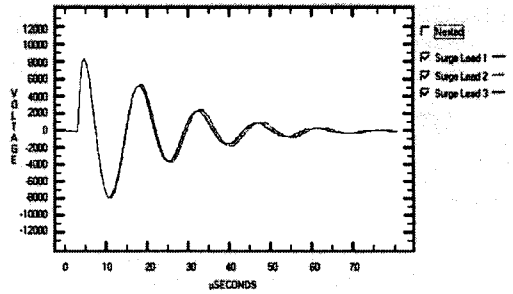


(c) 슬롯방전

그림 3. 모델 코일의 부분방전 패턴



(a) 이상상태



(b) 정상상태

그림 4. 모델 코일의 소선 단락 상태

#### 4. 결 론

부분방전 개시전압이 높고 부분방전 크기도 낮기 때문에 모델 코일 6개 중에 No. 3의 절연상태가 가장 양호하게 분석되었다. Case 1과 Case 2에서 상별과 삼상 일괄로 측정된 부분방전 특성을 비교해 보면 A, B, C상에서 가장 높게 나타난 모델 코일이 삼상 일괄로 측정된 결과와 일치하였다. 실제로 고압전동기에서 부분방전 크기를 측정할 때 삼상 일괄로 측정하는 것이 보다 정확한 값을 얻을 수 있다. 모델 코일에서 정지중에 디지털 부분방전 측정기와 TGA를 사용하여 부분방전 특성을 측정된 결과 부분방전 크기는 인가 전압에 따라 증가하였으며, 부분방전 패턴도 상호 일치하였다. 모델 코일 No. 1은 No. 2와 No. 3에 비해 권선저항이 낮게 나타났으며, 써지 시험 결과 소선 단락 상태를 확인할 수 있었다.

#### (참 고 문 헌)

- [1] IEEE Std 1434-2000, IEEE Trial-Use Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery.
- [2] 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.
- [3] G. C. Stone, Partial Discharge Seminar, Iris Power Engineering Inc., Vol. 1, pp. 56~78, 2001.