

## Analysis of Partial Discharge in High Voltage Motor Model Coils

金 熙 東<sup>†</sup>  
(Hee-Dong Kim)

**Abstract** - Five model coils of 6.6 kV motor were manufactured with several defects. These stator coils have artificial defects such as void of groundwall insulation, removal of semi-conductive coating and damage of strand insulation. Epoxy-mica coupler(80 pF) was connected to five model coil terminals. The voltage applied to the coils was 3.81 kV, 4.76 kV, 6.0 kV and 6.6 kV, respectively. Partial discharge(PD) tests performed in the laboratory and shield room. 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 PDD. PD patterns of model coils were indicated the internal and slot discharges. PD patterns are consistent with the result of measurement using PDD and TGA instruments. AC breakdown test was performed on five model coils in order to confirm the result of PD measurements. All the failures were located in a line-end coil at the exit from the core slot.

**Key Words** : Model Coil, Motor, Artificial Defect, Partial Discharge, Insulation, AC Breakdown

### 1. 서 론

대부분 고압전동기 고정자 권선은 부분방전이 발생할 수 있는 여러 가지 잠재적인 요소를 갖고 있다. 고압전동기의 설계, 구성재료, 제작법, 운전조건 및 정비사례 등이 부분방전의 크기, 발생 위치, 진행정도 및 특성에 현저하게 영향을 미치고 있다. 게다가 고압전동기의 비정상적인 운전, 다양한 종류의 스트레스 및 권선의 진동 등에 의해 주절연재료 내부에서 결함, 고정자 권선 표면에서 반도전층의 손상, 단말권선의 상대적인 이동으로 인한 마모 및 권선 표면의 오손 등 복합적인 영향으로 인해 결함을 갖게 됨에 따라 열화가 진행하다가 최종적으로 절연파괴가 발생한다[1].

고압전동기 고정자 권선에 존재하는 결함여부를 사전에 확인하기 위해 정지중(off-line)과 운전중(on-line)에 부분방전 특성을 분석하고 있다[2]. 결함 종류에 따라서 내부방전, 슬롯방전 및 표면방전 등과 같은 부분방전 패턴이 나타나며, 분석을 통해 절연열화 정도를 판정할 수 있다. 고압전동기 고정자 권선의 단자함에 에폭시-마이카 커플러(epoxy-mica coupler)를 설치하고 TGA(turbine generator analyzer)를 사용하여 운전중에 부분방전 크기를 측정하고 부분방전 패턴을 분석한다[3]. 따라서 고압전동기 정지중과 운전중에 여러 종류의 부분방전 크기를 측정하고 부분방전 패턴 분석을 통해 고정자

권선에서 절연재료의 열화상태를 판정하는데 활용하고 있다. 절연열화 상태를 해석하는데 있어서 기존 논문은 주로 모델 코일의 슬롯방전에 대해 발표하고 있기 때문에 실제적으로 도체표면과 주절연재료 내부에서 방전 및 소선단락과 같은 결함을 분석할 수 있는 자료가 필요하게 되었다.

본 논문에서는 고압전동기 고정자 권선의 절연열화 정도를 판정하기 위해 6.6 kV급 모델 코일을 도체표면과 주절연재료 내부에서 공극, 반도전층 손상 및 소선 단락 등과 같은 인위적인 결함을 갖도록 제작하였다. 운전중 모의를 위해 모델 코일에 80 pF의 에폭시-마이카 커플러를 설치하고 TGA를 사용하여 NQN(normalized quantity number)과 부분방전 크기(Qm)를 측정하고 부분방전 패턴을 분석하였다. 그리고 디지털 부분방전 측정기를 사용하여 정지중에 모델 코일의 절연열화 상태를 분석하였다.

### 2. 시험방법

고압전동기 고정자 권선에서 절연열화 상태를 분석하기 위해 6.6 kV급 모델 코일을 제작하였다. 모델 코일은 12개의 도체로 구성되어 있고 주절연재료는 마이카-에폭시 복합재료를 사용하였으며, 실제로 고압전동기 고정자 권선의 형태와 동일하게 고정자 권선, 철심 및 웻지 등으로 구성되어 있다. 표 1은 결함 요소별로 5가지 종류의 고압전동기 모델 코일을 나타내었으며, 정상 코일과 4가지 결함 요소를 갖도록 제작하였다. 표 1에 나타난 바와 같이 고압전동기 고정자 권선에서 절연열화 해석에 대표성을 갖도록 정상 코일을 제외한 4가지 결함요소를 선정하였다. 결함요소별로 부분방전 특성을 명확하게 분석하여 실제 고압전동기 고정자 권선의 절연열화 진행과정 해석에 활용하고자 한다.

<sup>†</sup> 교신저자, 正會員 : 韓電 電力研究院 先任研究員 · 工博  
E-mail : hdkim@kepri.re.kr

接受日字 : 2006年 1月 2日  
最終完了 : 2006年 1月 16日

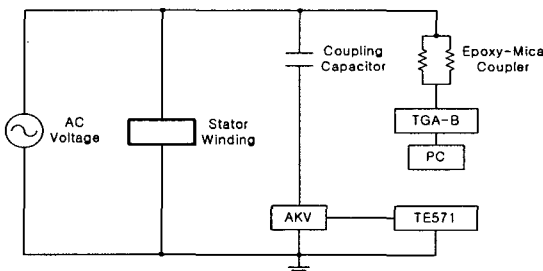
표 1 모델 코일의 결함요소

Table 1 Artificial defects of model coils

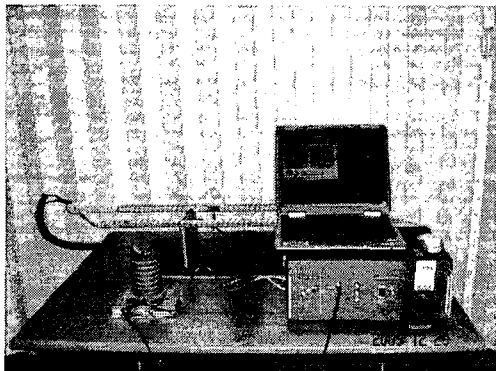
모델 코일	결함요소
No. 1	정상 코일
No. 2	주절연재료 내부에서 공극
No. 3	반도전층 손상
No. 4	소선 단락
No. 5	도체표면에서 공극

그림 1 (a)는 6.6 kV급 고압전동기 모델 코일의 부분방전 시험을 위해 슈어링브리지(schering bridge), 커플링 캐패시터(coupling capacitor) 및 디지털 부분방전 측정기(Tettex Instruments, TE 571)를 사용하였다. 절연진단 설비는 전원장치(HV supply, Type 5283), 제어장치(control, Type 5285) 및 브리지(bridge, Type 2818)로 구성되어 있다. 고압전동기 모델 코일에 전원장치(Tettex Instruments)를 연결하여 교류전압을 인가하였으며, 커플링 캐패시터(Tettex Instruments, 4,000pF)는 권선에서 유입되는 방전신호를 커플링 유니트(coupling unit, Tettex Instruments, AKV 572)에 보내어 증폭한 후에 디지털 부분방전 측정기에서 부분방전 크기를 측정하고 부분방전 패턴을 분석하였다.

그림 1 (b)는 운전중 모의를 위해 모델 코일에 에폭시-마이크라 커플러(80 pF, Iris Power Engineering)를 설치하였다. TGA(turbine generator analyzer, Iris Power Engineering)를 사용하여 NQN, 최대부분방전 크기(Qm) 및 부분방전 패턴 등을 분석하여 절연열화 상태와 정도를 해석하였다. TGA의 주파수 대역은 0.1~350 MHz이다.



(a) 부분방전 측정회로



(b) TGA를 사용한 부분방전 시험

그림 1 모델 코일의 부분방전 시험

Fig. 1 Arrangement for partial discharge test in model coil

3. 결과 및 고찰

고압전동기 모델 코일 5개를 일반시험실과 차폐룸에서 부분방전 크기를 측정하고 부분방전 패턴을 분석하여 표 2, 표 3 및 표 4에 나타내었다. 또한, 표 2, 표 3 및 표 4의 데이터는 각각의 코일을 시험실과 차폐룸에서 10번씩 반복하여 측정하였으며, 가장 큰 것과 작은 것은 버리고 평균값을 나타내었다. 표 2에서 부분방전 개시전압의 표준편차는 시험실과 차폐룸에서 각각 0.1, 0.3, 부분방전 크기를 나타내는 표 3은 시험실과 차폐룸에서 표준편차가 각각 0.15~0.3, 0.12~0.25, 표 4의 NQN은 시험실과 차폐룸에서 각각 2.8~4.5, 2.5~4.2, Qm은 각각 1.5~3.0, 1.2~2.6으로 계산되었다.

표 2 모델 코일의 부분방전 개시전압

Table 2 Partial discharge inception voltage of model coils

모델 코일		외부잡음[pC]	방전 개시전압[kV]
No. 1	시험실	320	4.5
	차폐룸	60	5.3
No. 2	시험실	350	4.5
	차폐룸	100	4.7
No. 3	시험실	350	4.1
	차폐룸	50	4.5
No. 4	시험실	350	4.4
	차폐룸	100	4.6
No. 5	시험실	400	4.5
	차폐룸	60	5.3

표 2는 부분방전을 측정할 때 외부잡음과 방전 개시전압(discharge inception voltage : DIV) 등을 측정하여 나타내었다. 부분방전 측정시 시험실의 외부잡음은 320~400 pC이며, 차폐룸의 외부잡음은 50~100 pC으로 낮게 나타났다. 표 2에서 나타난 바와 같이 시험실과 차폐룸에서 정상코일과 도체표면에서 결함을 모의한 코일의 부분방전 개시전압은 각각 4.5 kV, 5.3 kV로 높게 나타났으며, 반도체층 손상을 모의한 코일에서 부분방전 개시전압은 각각 4.1 kV, 4.5 kV로 비교적 낮게 나타났다. 실제적으로 고압전동기 고정자 권선에서 반도체층이 손상되면 슬롯방전이 나타나며, 다른 방전에 비해 개시전압이 낮게 나타나고 있다[4]. 그리고 주절연재료 내부에서 결함을 모의한 코일에서 부분방전 개시전압은 각각 4.5 kV, 4.7 kV, 소선단락을 모의한 코일에서 부분방전 개시전압은 각각 4.4 kV, 4.6 kV로 유사하게 분석되었다.

표 3은 모델 코일을 시험실과 차폐룸에서 인가전압을 각각 3.81 kV, 4.76 kV, 6.0 kV 및 6.6 kV로 증가시키면서 부분

표 3 모델 코일의 부분방전 크기 및 패턴

Table 3 Partial discharge magnitude and pattern of model coils

모델 코일		3.81kV	4.76kV	6.0kV	6.6kV	
No. 1	시험실	크기[nC]	0.48 ~0.6	1.2 ~1.6	1.8 ~2.7	2.7 ~3.5
		패턴	내부	내부	내부	내부
	차폐름	크기[nC]	0.28 ~0.42	1.2 ~1.5	1.7 ~2.4	2.6 ~3.0
		패턴	내부	내부	내부	내부
No. 2	시험실	크기[nC]	0.84 ~0.95	1.4 ~2.1	3.0 ~4.5	3.7 ~5.3
		패턴	내부	내부	내부	내부
	차폐름	크기[nC]	0.40 ~0.49	0.68 ~1.1	2.2 ~3.2	2.7 ~4.0
		패턴	내부	내부	내부	내부
No. 3	시험실	크기[nC]	0.71 ~0.81	3.7 ~4.3	7.5 ~10	7.5 ~10
		패턴	슬롯	슬롯	슬롯	슬롯
	차폐름	크기[nC]	0.69 ~0.73	1.9 ~2.2	3.4 ~4.0	6.8 ~7.4
		패턴	슬롯	슬롯	슬롯	슬롯
No. 4	시험실	크기[nC]	0.36 ~0.45	1.8 ~2.5	3.5 ~6.1	4.7 ~6.1
		패턴	내부	내부	내부	내부
	차폐름	크기[nC]	0.26 ~0.38	2.0 ~2.6	1.9 ~2.2	2.6 ~3.9
		패턴	내부	내부	내부	내부
No. 5	시험실	크기[nC]	0.52 ~0.62	1.1 ~1.5	2.2 ~3.2	3.5 ~4.2
		패턴	내부	내부	내부	내부
	차폐름	크기[nC]	0.35 ~0.50	0.88 ~0.95	1.7 ~3.1	2.8 ~4.2
		패턴	내부	내부	내부	내부

방전 크기와 부분방전 패턴을 나타내었다. 대체적으로 동일한 코일에서 부분방전 크기를 측정한 결과 시험실보다는 차폐름에서 조금 낮게 측정되었다. 그러나 도체표면에서 결함을 갖는 코일은 시험실과 차폐름에서 거의 유사하게 나타났다. 또한, 부분방전 크기는 정상 코일에서 가장 낮게 나타났으며, 반도체층 손상을 모의한 코일에서 가장 크게 나타났다. 그리고 주절연재료 내부에서 결함, 소선단락 및 도체표면에서 결함을 갖는 코일은 유사하게 분석되었다. 부분방전 패턴은 정상 코일, 주절연재료 내부에서 결함, 소선 단락 및 도체표면에서 결함을 모의한 코일은 모두 내부방전(internal discharge)이 나타났으며, 반도체층 손상을 모의한 코일에서만 슬롯방전(slot discharge)으로 분석되었다.

표 4 모델 코일의 NQN과 Qm 크기

Table 4 NQN and Qm magnitude of model coils

모델 코일			3.81 kV	4.76 kV	6.0 kV	6.6 kV	
No. 1	시험실	NQN	+	52	109	180	279
			-	113	188	228	292
		Qm	+	37	65	120	150
			-	59	95	133	149
	차폐름	NQN	+	25	77	167	163
			-	49	116	180	197
		Qm	+	28	41	112	111
			-	37	68	112	126
No. 2	시험실	NQN	+	114	274	377	384
			-	113	244	353	442
		Qm	+	77	150	205	200
			-	74	140	184	206
	차폐름	NQN	+	59	94	292	359
			-	47	104	362	348
		Qm	+	39	93	165	200
			-	37	93	189	190
No. 3	시험실	NQN	+	105	247	595	632
			-	29	50	69	171
		Qm	+	65	105	288	294
			-	32	38	80	109
	차폐름	NQN	+	77	198	352	498
			-	18	66	129	235
		Qm	+	46	110	194	250
			-	8	48	96	141
No. 4	시험실	NQN	+	37	121	381	486
			-	40	193	371	448
		Qm	+	13	74	186	272
			-	19	84	215	260
	차폐름	NQN	+	35	215	494	585
			-	47	280	495	714
		Qm	+	17	130	225	282
			-	25	146	247	375
No. 5	시험실	NQN	+	30	59	260	311
			-	91	148	228	283
		Qm	+	33	38	133	186
			-	55	72	136	168
	차폐름	NQN	+	56	106	336	397
			-	106	200	346	425
		Qm	+	38	56	139	229
			-	69	90	191	245

표 4는 고압전동기 모델 코일을 시험실과 차폐름에서 인가 전압을 각각 3.81 kV, 4.76 kV, 6.0 kV 및 6.6 kV로 증가시키면서 NQN과 Qm 크기를 나타내었다. NQN과 Qm의 크기는 표 3에 나타낸 바와 같이 부분방전 크기(pC)와 마찬가지로 전압이 증가함에 따라 높게 분석되었다. 정상 코일, 주절연재료 내부에서 결함 및 소선 단락 결함을 모의한 코일의 부분방전 패턴은 모두 Qm(+)와 Qm(-)가 거의 동일하기 때문에 내부방전을 나타내고 있다[5]. 도체표면에서 결함을 모의한 코일에서 부분방전 패턴은 3.81 kV와 4.76 kV에서 Qm(+)가 Qm(-)보다 작기 때문에 도체표면에서 방전(discharge at conductor surface)으로 나타났으나, 6.0 kV와 6.6 kV에서 다

시 내부방전을 나타내고 있다. 내부방전은 장기간 운전에 의해 절연재료 내부의 평면(flat) 보이드 부분에서 방전이 발생되고 있으며, 주로 신규발전기 혹은 고압전동기에서 거의 60~70% 정도를 점유하고 있다. 반도체층 손상을 모의한 코일에서만 Qm(+)가 Qm(-)보다 우세하기 때문에 슬롯방전 형태를 나타내고 있다. 일반적으로 극성이 우세하다는 판정은 정극성에 비해 부극성 혹은 부극성에 비해 정극성이 1.5배 이상 차이를 보일 때를 의미한다[5]. 슬롯방전으로 인해 부분방전 크기가 크게 나타나는 고압전동기의 경우 계획예방정비공사를 수행할 때 공장으로 반출하여 절연보강을 마치면 부분방전 크기는 현저하게 감소한다[6].

표 3과 4를 비교해 보면 정격전압 6.6 kV에서 부분방전 크기는 정상 코일, 주절연재료 내부에서 결함 및 도체표면에서 결함을 갖는 코일은 유사하게 분석되었다. 표 3은 반도체층 손상을 모의한 코일에서 가장 크고, 표 4는 소선 단락을 모의한 코일에서 가장 크게 나타났다. 따라서 디지털 부분방전 측정기와 TGA를 사용하여 부분방전을 측정할 결과 반도체층 손상과 소선단락을 모의한 코일에서 차이를 보이고 있는데 향후 모델 코일을 많이 제작하여 시험 및 분석을 통해 명확히 규명할 필요가 있다.

표 5 모델 코일의 절연파괴 시험 결과

Table 5 AC breakdown results of model coils

모델 코일	절연파괴전압[kV]	절연파괴 위치
No. 1	38.71	슬롯단부
No. 2	35.58	슬롯단부
No. 3	35.28	슬롯단부
No. 4	33.43	슬롯단부
No. 5	35.26	슬롯단부

표 5는 모델 코일의 절연파괴 시험 결과를 나타냈으며, 모델 코일에서 부분방전 시험을 마치고 부분방전 크기와 절연파괴전압 사이의 관계를 확인하기 위해 절연파괴 시험을 수행하였다. 표 5에 나타난 바와 같이 정상 코일에서 절연파괴 전압이 38.71 kV이며, 소선 단락의 결함을 갖는 코일에서 33.43 kV로 가장 낮게 분석되었다. 소선 단락의 결함을 갖는 코일에서 절연파괴전압이 가장 낮은 것은 표 4에 나타난 바와 같이 TGA를 사용하여 Qm 크기를 측정할 결과와 상관성을 갖고 있다. Qm의 크기가 클수록 절연파괴전압은 낮게 분석되었다. 그리고 주절연재료 내부에서 공극, 반도체층 손상 및 도체표면에서 공극을 갖는 코일의 절연파괴전압은 35.26~35.58 kV로 거의 유사하게 나타났다. 따라서 모델 코일의 절연파괴전압은 정격전압 6.6 kV의 5.1~5.9배로 나타났으며, 절연파괴 위치는 5개의 코일 모두 연면방전에 의해 슬롯단부에서 발생하였다[7].

#### 4. 결 론

5개의 모델 코일에서 디지털 부분방전 측정기와 TGA를 사용하여 부분방전 특성을 분석한 결과는 아래와 같다.

- (1) 부분방전 크기와 NQN은 인가전압에 따라 증가하였으며, 부분방전 패턴도 상호 일치하였다. 부분방전 크기는 정상 코일에서 가장 낮고, 반도체층 손상 및 소선 단락을 모의한 코일에서 가장 크게 나타났다. 주절연재료 내부와 도체표면에서 결함을 갖는 코일은 유사하게 나타났으며, 부분방전 크기와 NQN도 시험실보다는 차폐룸에서 조금 낮게 측정되었다.
- (2) 부분방전 패턴은 정상 코일, 주절연재료 내부에서 결함, 소선 단락 및 도체표면에서 결함을 모의한 코일은 모두 내부방전이 나타났으며, 반도체층 손상을 모의한 코일에서만 슬롯방전으로 분석되었다.
- (3) 정상 코일에서 절연파괴전압은 38.71 kV, 주절연재료 내부에서 공극, 반도체층 손상 및 도체표면에서 공극을 갖는 코일은 35.26~35.58 kV로 거의 유사하고 소선 단락의 결함을 갖는 코일에서 33.43 kV로 가장 낮게 나타났다.
- (4) 결함을 모의한 코일에서 부분방전 패턴 분석은 실제로 고압전동기 고정자 권선의 절연열화 해석에 직접적으로 활용이 가능하다는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 결함을 모의한 코일에서 부분방전 크기가 낮기 때문에 결함이 미진한 것으로 판단됨에 따라 향후 좀더 가혹한 조건으로 모델 코일을 제작하여 시험을 수행할 필요가 있다.

#### 참 고 문 헌

- [1] G. Griffith, S. Tucker, J. Milsom and G. C. Stone, "Problems with Modern Air-Cooled Generator Stator Winding Insulation", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 16, No. 6, pp. 6~10, 2000.
- [2] IEEE Std 1434-2000, IEEE Trial-Use Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery.
- [3] H. Zhu, V. Green, M. Sasic. and S. Halliburton, "Increased Sensitivity of Capacitive Couplers for In-Service PD Measurement in Rotating Machines", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 14, No. 4, pp. 1184~1192, 1999.
- [4] L. Lamarre, D. Jean and Duc Ngoc Nguyen, "Laboratory studies of slot discharges on stator bars", IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 490~494, 2002.
- [5] G. C. Stone, Partial Discharge Seminar, Iris Power Engineering Inc., Vol. 1, pp. 56~78, 2005.
- [6] 김희동, "회전기 고정자 권선의 절연상태 평가", 대한전기학회 하계학술대회, pp. 1706~1708, 2001.
- [7] H. G. Sedding, R. Schwabe, D. Levin, J. Stein and B. K. Gupta, "The Role of AC & DC Hipot Testing in Stator Winding Ageing", IEEE Electrical Insulation Conference, pp. 455~457, 2003.

## 저 자 소 개



### 김희동 (金熙東)

1961년 12월 15일생. 1985년 홍익대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2002년 일본 큐슈공업대학 초빙연구원. 현재 한전 전력연구원 선임연구원

Tel : 042-865-5461

Fax : 042-865-5304

E-mail : hdkim@kepri.re.kr