

습도를 고려한 절연유 시험 결과의 보정 방안 연구

김완수¹ , 노재필², 강석구¹

¹ 전북과학대학교 전기공학과

² 한국전기안전공사 검사부

³ 전북과학대학교 전기공학과

Correction Measures That Take Humidity into Account in Insulating Oil Test Measurement Results

Wansu Kim¹, Jae-pil Roh², and Seock-gu Kang¹

¹ Department of Electrical Engineering, Jeonbuk Science College, Jeongeup 56204, Korea

² Inspection Division, Korea Electrical Safety Corporation, Chungju 55365, Korea

³ Department of Electrical Engineering, Jeonbuk Science College, Jeongeup 56204, Korea

(Received April 30, 2024; Revised June 10, 2024; Accepted June 14, 2024)

Abstract: Climate conditions, especially transport and storage, are a very important factor in the process of sampling and testing insulating oil in the field. The samples of insulating oil exposed to the atmosphere affect the dielectric strength, total acid number and moisture test value by oxygen and high humidity environment and may also affect the results according to the criteria specified in each test. Therefore, reliable test values for insulating oil testing require consideration of the atmospheric environment of the test site, including oxygen and humidity. In this paper, each test was conducted on insulating oil exposed to various time and humidity environments, and the effect of the atmospheric environment on the test results was analyzed by comparing and analyzing with the first insulating oil.

Keywords: Total acid number, Moisture test value, First insulating oil

최근 신재생 발전 설비의 대용량화, 초고압화에 따라 변압기, 차단기, 케이블 등의 돌발적 사고에 따른 경제적 손실이 막대해지고 있다. 따라서 전력의 안정적 공급을 위해 전력 설비의 사고를 미리 예방하는 진단기술의 필요성이 점점 커지고 있다.

액체 절연물질로 사용되는 절연유는 변압기 등 유입기기에서 절연과 냉각 기능을 담당하므로 절연유의 특성은

유입기기의 양호한 상태를 유지하는 데 상당히 중요한 역할을 하며 기기의 냉각효과나 수명 등에 큰 영향을 미친다.

또한 절연유는 수분의 흡수, 산화작용, 금속의 접촉작용, 빛의 영향, 서로 다른 특성의 절연유 혼합 등으로 슬러지의 형성이나 열화작용을 유발하기 때문에 주기적인 시험을 통해 절연유의 열화 여부 판단이 필요하다.

이와 같이 중요한 기능을 갖는 절연유의 열화 여부를 판단할 수 있는 진단 방법에는 절연 내력, 산가도, 수분 시험, 색깔 판별법, 유중 가스 분석 방법 등이 있다.

현장에서 절연유를 채취하여 시험하기까지의 과정에서 기후 조건, 특히 운송 및 보관과정에서 대기환경의 영향은

✉ Wansu Kim; wansu0505@hanmail.net

Copyright ©2024 KIEEME. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

매우 중요한 요소이다. 대기에 노출된 절연유 시료는 산소와 높은 습도환경에 의해 절연 내력, 산가도 및 수분 시험에 영향을 주며, 나아가 각각의 시험에서 규정하고 있는 판정기준에 따른 결과에도 영향을 미칠 수 있다.

따라서 절연유 시험에 대한 신뢰성 있는 시험을 위해서는 산소와 습도를 포함하는 시험현장의 대기환경에 대한 고려가 필요하다.

본 논문에서는 다양한 시간과 습도환경에 노출된 절연유에 대하여 절연 내력 시험, 산가도 시험, 수분 시험을 수행하였고, 이를 최초의 절연유와 비교·분석함으로써, 대기환경이 시험 결과에 미치는 영향을 분석하였다.

절연유 시험에 있어서 시험 결과는 주위 환경 요소, 특히 대기 중의 산소와 습도의 영향을 받는다. 또한 이 시험 결과 값은 사용 중인 절연유의 경우 절연유의 상태에 따라 화학적인 반응이 모두 다르게 나타나기 때문에 절연유의

사용년수, 절연유의 제조사, 변압기의 전압이나 용량, 부하율, 부하의 종류 등 사용환경에 따라 일률적으로 예측할 수는 없다.

절연내력 시험에 따른 판정기준은 표 1~표 3과 같다.

그림 1에서는 절연 내력, 산가도 및 수분 시험에 따른 종합 판정 방법의 예시를 도시하였다.

본 논문에서는, 다양한 대기환경에 노출된 절연유가 산소와 습도에 의해 절연 내력, 산가도 및 수분 시험 결과에 어떤 영향을 미치는지 알아보기 위해서 사용하지 않은 신유를 대상으로 60%, 70%, 80%, 90%, 98% 각각 대기 중의 습도환경에서 최대 2시간 동안 20분 간격으로 대기 중에 노출 후 절연 내력, 산가도 및 수분 시험을 수행하여 그 결과 값을 비교·분석하였다.

표 4와 그림 2에서는 60% 습도에서의 경과 시간별 측정 값을 나타내었다.

Table 1. Acceptance criteria of dielectric strength test [1].

Delimiting	Dielectric breakdown voltage	50 kV less than when used on a device	50 kV over when used on a device
New oil	30 kV over (KSC-2301)	Enemy union	Enemy union
	20 kV over	Enemy union	Enemy union
Insulating oil in use	15 kV over ~ 20 kV less than	Important	Unfitness
	15 kV less than	Unfitness	Unfitness

Table 2. Acceptance criteria of total acid number [2].

Delimiting	Mountain road (mg KOH/g)	Judgment
New oil	$p \leq 0.02$	Enemy union
	$p \leq 0.2$	Enemy union
Insulating oil in use	$0.2 < p < 0.4$	Enemy union (Important)
	$0.4 \leq p$	Unfitness

Table 3. Acceptance criteria of moisture test [3].

Delimiting	Judgment	Voltage (kV)		
		66 here under	154~200	345 over
New oil (ppm)	Normality (KSC 2301)	30 here under		
	Normality	50 less than	40 less than	30 less than
Insulating oil in use (ppm)	Important	50~60	40~50	30~40
	This award	60 excesses	50 excesses	40 excesses

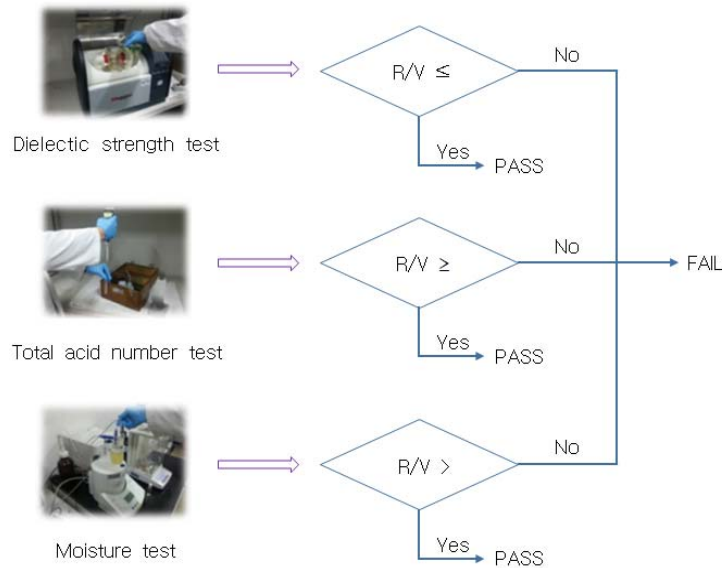


Fig. 1. Example of judging method according to insulating oil test.

Table 4. Measurement value by the elapsed time at 60% humidity.

Delimiting	Measured values by elapsed time (rate of increase or decrease compared to initial value)						
	Initial value	20 minutes	40 minutes	60 minutes	80 minutes	100 minutes	120 minutes
Temperatures (°C)	24.5	24.8	24.7	24.0	23.7	23.3	23.3
Humidity (%)	62	60	59	59	58	58	58
Insulation strength (kV)	73.5	71.2	68.8	64.7	60.5	57.2	55.1
Mountain road (mg KOH/g)	-	96.9	93.6	88.0	82.3	77.8	75.0
Moisture (ppm)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	-	100	100	100	100	100	100
	17.6	19.5	22.4	25.3	28.5	30.6	31.3
	-	110.8	127.3	143.8	161.9	173.9	177.8

Table 5. Measurement value by the elapsed time at 70% humidity.

Delimiting	Measured values by elapsed time (rate of increase or decrease compared to initial value)						
	Initial value	20 minutes	40 minutes	60 minutes	80 minutes	100 minutes	120 minutes
Temperatures (°C)	24.7	24.7	24.7	24.8	24.9	25.1	25.0
Humidity (%)	71	70	70	69	69	68	70
Insulation strength (kV)	73.5	70.2	67.6	62.4	58.3	54.4	52.3
Mountain road (mg KOH/g)	-	95.5	92.0	84.9	79.3	74.0	71.2
Moisture (ppm)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	-	100	100	100	100	100	100
	17.6	19.8	22.9	25.7	29.8	31.6	33.7
	-	112.5	130.1	146.0	169.3	179.5	191.5

표 5와 그림 3에서는 70% 습도에서의 경과 시간별 측정값을 나타내었다.

표 6과 그림 4에서는 80% 습도에서의 경과 시간별 측정값을 나타내었다.

표 7과 그림 5에서는 90% 습도에서의 경과 시간별 측정값을 나타내었다.

표 8과 그림 6에서는 98% 습도에서의 경과 시간별 측정값을 나타내었다.

채취에서부터 시험까지의 소요시간 중, 실제 현장에서 가장 많은 경우를 차지하고 있는 20분을 기준으로 측정값을 비교 분석한 결과, 표 9와 그림 7에서는 습도별 20분 경과 시의 측정값을 나타내었다.

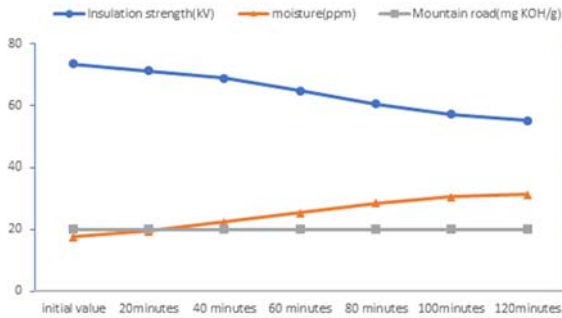


Fig. 2. Measurement graph by the elapsed time at 60% humidity.

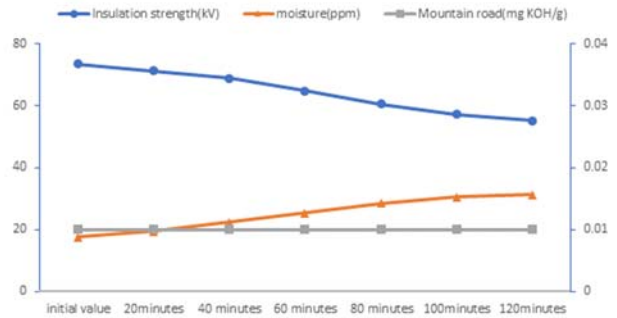


Fig. 5. Measurement graph by the elapsed time at 90% humidity.

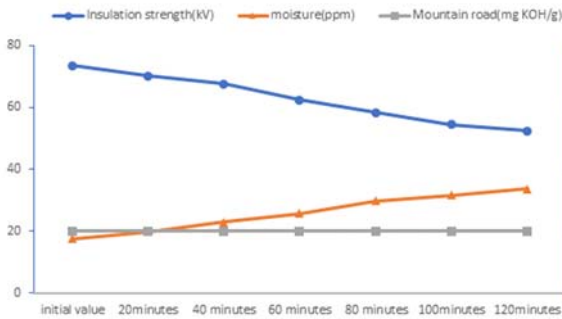


Fig. 3. Measurement graph by the elapsed time at 70% humidity.

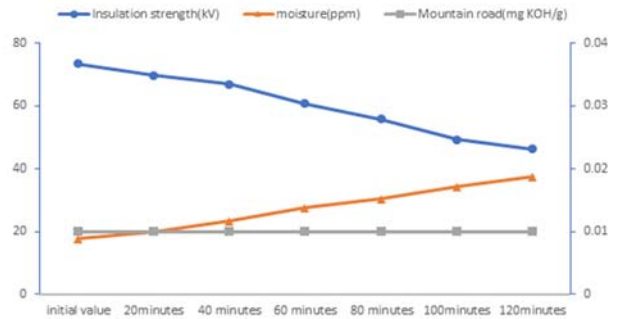


Fig. 6. Measurement graph by the elapsed time at 98% humidity.

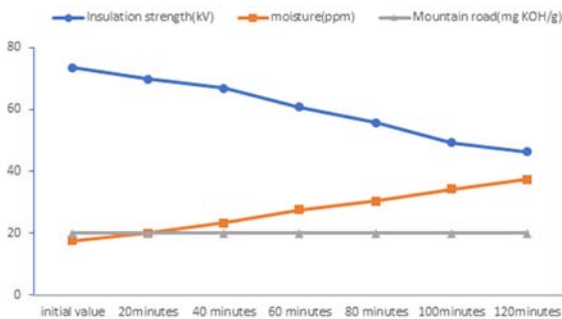


Fig. 4. Measurement graph by the elapsed time at 80% humidity.

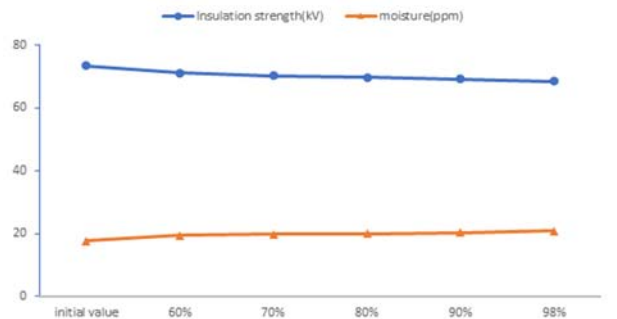


Fig. 7. Measured graph at 20 minutes after each humidity.

Table 6. Measurement value by the elapsed time at 80% humidity.

Delimiting	Measured values by elapsed time (rate of increase or decrease compared to initial value)						
	Initial value	20 minutes	40 minutes	60 minutes	80 minutes	100 minutes	120 minutes
Temperatures (°C)	21.2	20.9	20.9	21.1	20.9	21.2	20.9
Humidity (%)	77	79	80	80	80	80	80
Insulation strength (kV)	73.5	69.7	66.8	60.7	55.7	49.2	46.1
Mountain road (mg KOH/g)	-	94.8	90.9	82.6	75.8	66.9	62.7
Moisture (ppm)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	-	100	100	100	100	100	100
	17.6	20.0	23.3	27.6	30.4	34.2	37.4
	-	113.6	132.4	156.8	172.7	194.3	212.5

Table 7. Measurement value by the elapsed time at 90% humidity.

Delimiting	Measured values by elapsed time (rate of increase or decrease compared to initial value)						
	Initial value	20 minutes	40 minutes	60 minutes	80 minutes	100 minutes	120 minutes
Temperatures (°C)	16.8	16.7	16.5	16.4	16.2	16.2	16.1
Humidity (%)	92	91	91	89	89	89	89
Insulation strength (kV)	73.5	69.2	64.5	57.3	51.3	45.7	41.5
Mountain road (mg KOH/g)	-	94.1	87.8	78.0	69.8	62.2	56.5
Moisture (ppm)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	-	100	100	100	100	100	100
	17.6	20.3	24.5	29.1	35.8	39.7	42.7
	-	115.3	139.2	165.3	203.4	225.6	242.6

Table 8. Measurement value by the elapsed time at 98% humidity.

Delimiting	Measured values by elapsed time (rate of increase or decrease compared to initial value)						
	Initial value	20 minutes	40 minutes	60 minutes	80 minutes	100 minutes	120 minutes
Temperatures (°C)	19.0	18.8	18.8	18.1	17.7	17.3	16.8
Humidity (%)	97	98	98	98	98	99	98
Insulation strength (kV)	73.5	68.5	63.1	55.9	49.7	42.3	37.2
Mountain road (mg KOH/g)	-	93.2	85.9	76.1	67.6	57.6	50.6
Moisture (ppm)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	-	100	100	100	100	100	100
	17.6	20.8	24.9	29.7	36.8	40.4	43.2
	-	118.2	141.5	168.7	209.1	229.5	245.5

Table 9. Measured value at 20 minutes after each humidity.

Delimiting	Measured values by humidity (rate of increase or decrease compared to initial value)					
	Initial value	60%	70%	80%	90%	98%
Insulation strength (kV)	73.5	71.2	70.2	69.7	69.2	68.5
Moisture (ppm)	-	96.9	95.5	94.8	94.1	93.2
	17.6	19.5	19.8	20.0	20.3	20.8
	-	110.8	112.5	113.6	115.3	118.2

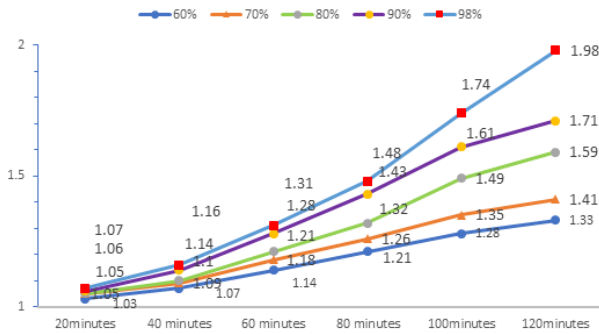


Fig. 8. Correction factor of the result of insulation strength test by humidity and elapsed time.

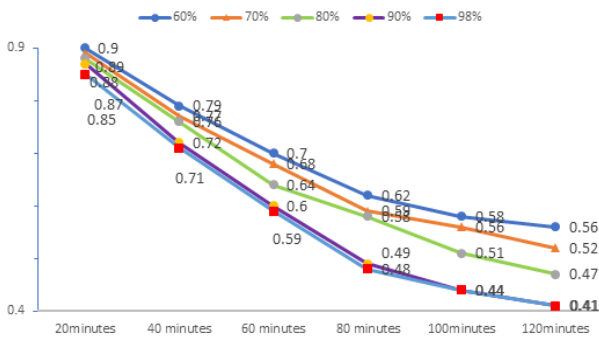


Fig. 9. Correction factor of the result of moisture test by humidity and elapsed time.

그림 8과 9에서는 실험 결과에 근거한 습도 및 경과시간에 따른 절연 내력 시험 및 수분 시험 보정계수를 그래프로 나타내었다.

동일한 시료에 대해서 각각의 습도 노출 조건에서 절연 내력, 산가도 및 수분 시험을 수행하여 그 결과 값을 비교 분석한 결과, 절연 내력 시험의 경우 60% 습도에서 최대 120분 노출한 결과 초기값 대비 75.0%로 감소하였으며, 98% 습도에서는 약 50.6%로 감소하였다. 수분 시험의 경우 60% 습도에서 최대 120분 노출한 결과 초기값 대비 177.8% 증가하였으며, 98% 습도에서는 약 245.5% 증가하였다.

또한, 분석하는 과정에서 98%의 습도에서 20분간 대기에 접촉하였다면, 절연내력 측정값에는 약 1.07을, 수분 측정값에는 약 0.85의 보정값을 고려해 줘야 대기환경의 영향을 배제할 수 있는 값으로 분석되었다.

산가도는 각각의 습도 노출 조건에서도 변화가 없었다. 그 이유는 산가도는 절연유가 높은 온도의 환경에서 장기간 사용하는 경우에 나타나는 열화의 형태로서, 산화부식의 진행과 더불어 증가하기 때문으로 판단된다.

절연유에 대한 열화 여부를 판단하기 위해서 유입변압기로부터 절연유를 채취하여 시험을 하기까지의 과정에서 현장 여건 상황에 따라 다양한 대기 노출 및 습도환경을 가진다.

본 논문에서는 초기 상태 값이 매우 좋은 신유를 대상으로 실험을 수행하여 높은 습도환경인 98%에서 최대 120분간 노출하여도 절연 내력, 산가도 시험에서 기준값을 초과하거나 미달하여 판정기준에 따른 ‘부적합’한 판정 결과 값은 없었다.

하지만 초기 상태 값이 신유에 비해 낮은 사용 중인 유입변압기 절연유의 경우 습도가 높은 대기환경에 노출되면, 대기 중의 수분이 절연유에 침입하여 그 판정 결과에 영향을 줄 수 있다.

따라서 대기 중의 습도가 높은 날에 시료를 채취하거나, 채취에서부터 측정까지의 시간이 비교적 긴 경우에는 시료 채취 과정 중 불필요한 대기 노출을 없애고, 이물질이 채취 과정에서 시료에 들어가는 것을 방지하여 보다 신뢰성 있는 시험 값을 얻기 위하여 외기와의 접촉을 완전히 격리한 시료 채취도구를 사용하여야 한다.

또한, 현장조건의 제약으로 인해 분석하는 과정에서 높은 습도와 장시간 대기환경에 노출되었다면, 절연 내력 및 수분 측정값에는 실험환경을 고려한 보정계수를 적용해야 보다 신뢰성 있는 절연유 측정값이 될 수 있다.

ORCID

Wansu Kim

<https://orcid.org/0009-0004-8395-0120>

REFERENCES

- [1] KSC 2301: Electrical Insulating Oil (2006).
- [2] Korea Electric Safety Corporation, Uninterruptible Inspection Project Judgment Criteria (2020).
- [3] IEC 60475: Method of Sampling Insulating Liquids Edition 2.0 (2011).