

식물유 및 광유를 사용한 배전변압기의 열열화에 따른 절연유의 코로나 개시전압 및 전기적 특성에 대한 연구

A Study on Corona Inception Voltage and Dielectric Characteristics of Thermally Aged Mineral and Vegetable Insulation Oil in Medium Voltage Power Transformer

정 중 일* · 허 창 수*
(Jung-II Jeong · Chang-Su Huh)

Abstract - Starting from the distribution transformer, the insulation oil for the oil immersed power transformer is being used to convert the vegetable oil from the existing mineral oil. Vegetable oil is better in temperature characteristics and insulation performance, is not toxic, and has better biodegradable characteristic than that of mineral oil. In order to investigate the corona inception voltage and dielectric characteristics of the two insulating oils, three oil immersed transformers using mineral oil and vegetable oil were made and thermal cyclic aged. In this paper, the changes in the corona discharge inception voltage, chemical and electrical properties of the two sampled insulating oils from the transformers had been studied.

Key Words : Oil immersed transformer, Vegetable oil, Mineral oil, Corona inception voltage, AC breakdown voltage

1. 서 론

1.1 연구배경

식물성 절연유는 광유계 절연유 보다 환경 친화적이기 때문에 배전급 및 송전급의 유입 변압기 절연유로서 그 사용이 확대되고 있다[1]. 이러한 식물성 절연유를 사용한 변압기의 장기 신뢰성을 알기 위하여 광유계 절연유를 사용한 배전 변압기 및 식물성 절연유를 사용한 배전변압기를 제작하여, 실 사용상태를 모의하여 열화 시키고 변압기 유를 채취하여 각 변압기유의 열화상태를 연구하였다.

유입 변압기는 냉각 및 절연을 위한 절연 유, 권선 간 절연을 위한 절연지, 권선 용 코일 및 코어로 구성되며, 변압기에 사용된 절연물은 권선에 흐르는 부하 전류에 의한 열과, 부하 전류 변동에 따른 팽창과 수축으로 인한 기계적 응력으로 인해 열화 된다. 이 중, 절연지는, 그 주요 구성성분인 셀룰로오스 분자가 변압기 권선에서 발생하는 열에 의하여 분해되어 CO 및 CO₂ 등의 기체와 H₂O를 생성하면서 분해되어, 결과적으로 분자량이 감소하고 평균 중합도가 저하된다. 이는 절연지의 절연내력 감소로 이어지며, 이때 발생한 분해물은 절연유에 용해된다. 절연유 또한 유입 변압기가 설치 운전되면 권선 발열에 따른 변압기 내 외부의 온

도차 및 절연유의 부피 팽창과 수축으로 인해 발생하는 내외부 압력차에 의해 외부 공기가 변압기 내로 유입되며(변압기호흡), 불순물 및 수분이 같이 유입되어 절연유의 산화가 촉진되며, 그 구성 분자들은 권선발열에 의하여 고온에서 산소와 반응하게 되고, CO, CO₂, H₂와 같은 가스 및 알칼리 형태의 알켄을 생성하며 분해되어 결과적으로 절연내력의 저하를 일으킨다[2, 3].

또한, 변압기내 전계가 집중되는 부분에서는 유중으로 혹은 유 및 절연지 계면으로 코로나 방전이 일어나며, 이러한 방전은 절연유의 열분해 등을 일으키므로 변압기를 구성하는 절연물의 열화요인으로 여겨진다. 따라서 상업적으로 운전하는 유입변압기에서는 코로나개시전압 및 방전량 등에 대한 제한을 두고 있다[4, 5, 6].

1.2 연구방법

광유 및 식물유의 열화에 따른 준평등전계 및 불평등전계하에서 전기적 특성의 변화 및 관련 전기적 특성을 알아보기 위하여, 식물유 및 광유를 사용한 가공 배전선로용 유입 자냉식 변압기 세대를 제작하였으며, 이를 열 사이클 열화 시키고, 절연유를 채취하여 코로나 방전 개시전압 및 전산가, 수분함유량, 체적저항률과 교류 절연내력변화를 실험으로 확인하였다[7, 8]. 각 변압기의 특성은 표 1에 나타내었다. 변압기 VOTR_CY는 식물성 절연유를 사용하였고, 다른 변압기 MOTR_CY와 MOTR_CO는 광유를 절연유로 사용하였으며, 각 절연유의 특성은 표 2에 나타내었다.

광유를 사용한 변압기의 경우, 변압기 운전 중 변압기 유 최고 온도와 절연물의 수명에 관해서는 ANSI / IEEE C57.91 및 JEC

* Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Inha University, Korea.
E-mail: jjungil@keri.re.kr

* Dept. of Electrical Engineering, Inha University, Korea.
Received : August 29, 2017; Accepted : November 6, 2017

2200에 지점과 비교 분석하기 위해, MOTR_CO의 절연유 최고온도는 120 °C로 일정하게 유지하여 열화시켰으며, 다른 두 변압기 VOTR_CY와 MOTR_CY는 변압기 호흡을 고려하여 열 사이클 노화 형태 30 °C~120 °C로 열화시켰다. 한 사이클은 18시간으로 30 °C에서 8시간 상승하여 120 °C가 되면 다시 10시간 동안 냉각하여 30 °C가 되도록 하였다. 세 개 변압기에서 초기, 756 h(42번째 사이클), 1674 h(93번째 사이클), 2556 h(142번째 사이클), 3420 h(190번째 사이클)에서 절연유를 채유하여 분석하였으며, 시료 채유과정 중 시료유의 온도에 따른 결과의 차이를 최소화하기 위하여 상온에서 황갈색 시약병에 채유하였고, 채유 후 수분영향을 최소화하기 위해 시약병에 마개 부분은 테프론 테이프로 처리하였다.

표 1 변압기 특성

Table 1 Characteristics of the power transformers

Transformer		VOTR_CY	MOTR_CY	MOTR_CO
Item				
Insulating oil		Vegetable	Mineral	Mineral
Phase		Single phase		
Rated frequency Hz		60		
Capacity kVA		10		
Voltage	Primary V	13800		
	Secondary V	220		
No load loss	Current A/%	0.18/0.41	0.18/0.41	0.18/0.41
	Loss W	40	40	40
Rated load loss	Impedance voltage V/%	385/2.92	385/2.92	385/2.92
	Loss W	180	180	180

표 2 절연유 특성

Table 2 Characteristics of the insulation oils

Oil		Vegetable oil	Mineral oil
Item			
Viscosity	@40°C	35.12	8.35
	@100°C	8.01	2.22
Total acid value mgKOH/g		0.08	0.03
Water content P.P.M		20.7	8.1
Dielectric strength kV @2.5mm		78.8	60

2. 본 론

2.1 변압기 특성 및 열 사이클 열화

부하 변화에 따른 3개의 변압기의 유 최고 온도는 표 3에 나타내었다. 부하전류에 따라 유 최고온도를 측정하기 위해 1 차

권선에 전압을 가하고, 2차 권선을 단락시켜 2차 권선 정격전류의 100 %, 150 % 및 185 %의 전류가 흐르도록 하였다. 3개의 변압기의 유 최고 온도는 온도계로 측정하였으며 권선의 평균 온도 상승은 IEC 60599에 따른 권선의 저항 측정값으로 계산하였다. JEC 2200에 따르면 권선의 최고 온도는 유입 자냉식 변압기에서 권선의 평균 온도보다 약 15 °C 높은 것으로 알려져 있다.

2개의 변압기 VOTR_CY와 MOTR_CY는 최고 오일 온도가 120 °C에 도달하면 전원을 차단하고 냉각 시키는 사이클을 반복하였으며, 또 다른 변압기 MOTR_CO는 변압기 상부 유온이 120 °C가 되도록 일정하게 유지되었다.

권선 발열에 의한 MOTR_CO의 열화 정도는, ANSI / IEEE C57.91에서 정한 다음의 가속 열화 계수(transformer accelerated aging factor, Faa)를 계산하여 알 수 있다[6, 9].

$$F_{aa} = \exp\left[15000 \times \left(\frac{1}{T_{HS1} + 273} - \frac{1}{T_{HS2} + 273}\right)\right] - (1)$$

여기서, THS1: 온도 상승 한도가 55°C인 경우 95 °C 이며, 온도 상승한도가 110 °C인 경우 65 °C, THS2: 권선의 최고 온도이다. 실험에 사용 된 변압기(MOTR_CO)의 정격부하 시, 외부 온도 20 °C에서 권선 평균 온도상승은 55 °C이며, 온도상승 한계 값은 55 °C이다. Faa 값은 권선의 최고온도가 권선의 평균 온도 상승보다 약 15 °C 높기 때문에 대략 80이다[9].

표 3 유 최고 온도 및 권선 온도상승

Table 3 The top oil temperature and average winding temperature rise of transformers

Transformer		Load	100%	150%	185 %
VOTR_CY	Top oil temperature		50.0	85.5	120.4
	Winding average temperature		54.7	90.8	125.9
MOTR_CY	Top oil temperature		49.1	86.3	122.3
	Winding average temperature		53.3	91.5	127.0
MOTR_CO	Top oil temperature		49.5	86.0	120.1
	Winding average temperature		54.8	91.2	125.2

2.2 코로나 개시전압 측정 및 전기적 특성 측정방법

불평등 전계에서 방전 특성인 코로나 방전 개시전압 및 방전량을 파악하기 위하여, 그림 1과 같이 2 μm 및 200 μm의 곡률 반경을 갖는 침대 평판 전극을 접지금속판과 1 cm 간격을 유지한 형태의 셀을 만들었으며, 이를 외부 전기적 노이즈를 차폐한 차폐 룸에서 60 Hz 전원을 연결하고, DDX 7000 와이드 밴드 측정기를 연결하였다.

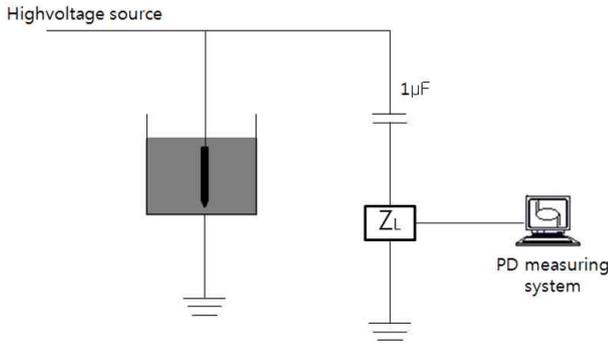


그림 1 코로나 개시전압 측정 시스템
 Fig. 1 Corona inception voltage measuring system

침 전극에 인가한 전압은 천천히 증가시켜, 1 pC 이상의 연속 적 방전이 일정하게 일어나는 순간을 개시전압으로 하였다. 측정 주파수 대역은 30 kHz~300 kHz였으며, 이대역에서 외부 잡음은 0.2 pC 이하였다. 또한, 시스템은 0.5 pC으로 교정되었고, 이 시험 시스템은 IEC 60270에서 요구하는 표준 측정 시스템이다. 그림 2에 측정된 코로나 개시전압의 변화를 나타내었다.

침대 평판 전극 침단에서의 침에 전압 V를 인가할 경우, 최대 전계강도는 다음의 Mason 식에 따른다[10].

$$E = \frac{2V}{r \ln(1 + \frac{4d}{r})} \quad [2]$$

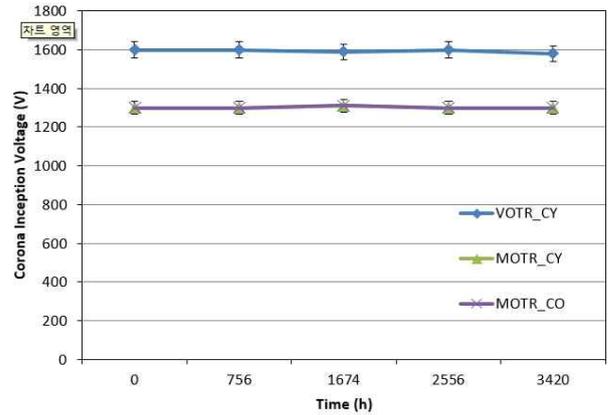
여기서, r 은 침 침단의 곡률반경이며, d는 침과 평판사이의 거리이다.

또한, 준평등전계에서의 교류 절연내력 변화를 알아보기 위하여, IEC 60156에 따라, 각각 열화 된 각 변압기 절연유를, 직경 12.5 mm의 구대구 전극을 간격 2.5 mm 간격으로 배치한 셀 내에 담아 약 3분간 방치 후 2.0 kV/s의 속도로 인가전압을 증가시키면서 절연 파괴 될 때의 전압을 측정하였고, 각 각 6회 반복 측정 후 평균값을 취했으며, 화학적 특성에 대하여서는 KS C 2101에 따라 전산가 및 수분함유량과 체적저항을 측정하였다.

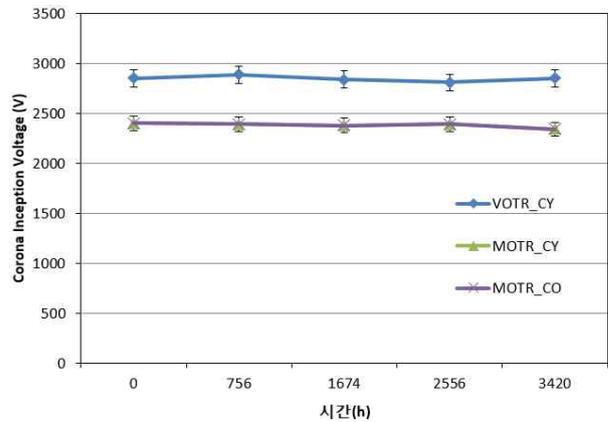
2.3 실험 결과

2.3.1 코로나 개시전압 변화

그림 2는 코로나 개시전압의 변화를 나타낸다. 실험은 5회 반복한 평균이며, 이 실험결과로 보면, 2 μm 및 200 μm의 곡률 반경을 갖는 침대 평판전극에서의 코로나 개시전압은 식물유 및 광유의 열화정도와 관련 없이 일정한 정도로 나타났으며, 식물유가 광유보다 부분방전 개시전압은 더 높은 것을 알 수 있다. 2 μm 침전극의 경우 상기 Mason 식으로 계산한 최대 전계강도는 약 3×10⁸ V/m로 방전은 전계방출에 의한 것으로 판단되며, 식물유 및 광유를 구성하는 지배적 분자의 차이로 이러한 전압 차이가 발생한 것으로 판단된다[10].



(a) 침전극 곡률반경 : 200 μm
 (a) Radius of needle electrode : 200 μm



(b) 침전극 곡률반경 : 2 μm
 (b) Radius of needle electrode : 2 μm

그림 2 코로나 개시전압
 Fig. 2 Corona inception voltage

2.3.2 전산가 측정

유입 변압기가 전력망에 설치되어 운전되면 변압기 호흡 및 권선의 발열에 의해 절연유의 산화가 이루어진다. 이러한 절연유의 산화 정도를 알기위한 값으로, 전산가를 사용한다. 전산가는 절연유 1g 당 함유하고 있는 산성을 중화하기 위해 필요한 수산화칼슘의 양(mg)으로 정의된다[5]. 절연유의 전산가는 권선으로 사용되는 구리 및 권선간 절연을 위한 바니시 등의 도료와 제조 공정상의 기타 이물질 및 권선의 발열, 공기와의 접촉에 의하여 점차 증가하게 된다. 이러한 절연유의 산화 과정이 진행됨에 따라 슬러지(sludge)의 양이 증가하며 이는 절연내력 저하 및 열전달 능력의 저하 등을 일으킨다[12].

그림 3은 샘플링 된 각 변압기 절연유의 전산가 변화를 나타낸다. 식물유의 총 산가는 광유에서보다 상대적으로 많이 증가했다. 그 이유 중 하나는 식물유의 수분 함량(그림 4 참조)이 높기 때문으로 판단된다.

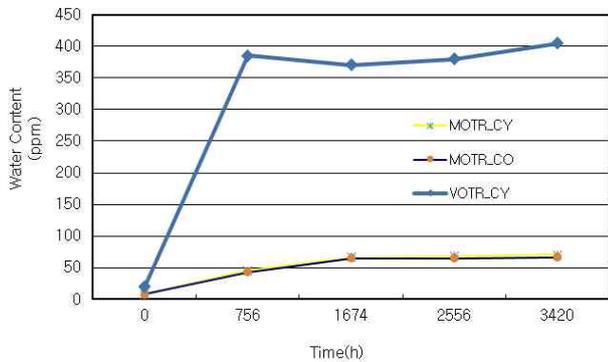


그림 3 전산가
Fig. 3 Total Acid Value

2.3.3 수분함유량 측정

변압기를 구성하는 절연 재료의 수명은 절연유의 수분 함량에 따라 많은 영향을 받는다. 변압기 절연유 내의 수분은 두 가지 주요 원인에 의해 발생된다. 하나는 변압기 호흡에 따른 외부 유입에 의해 발생하며, 다른 하나는 절연지의 열분해로 만들어진다. 이러한 절연유 내부의 수분 오염은 절연 재료의 열 가수 분해 반응을 일으키며 슬러지 등의 침전을 일으킨다. 실제 운전되고 있는 광유 유입 변압기에서 샘플을 채취하여 분석한 결과 수분 함량이 많아지게 되면, 절연유의 절연 내력이 저하하는 것으로 나타났다[12, 13].

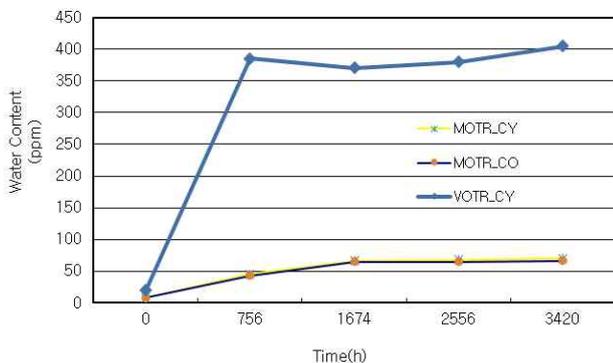


그림 4 수분함량
Fig. 4 Water content

그림 4는 절연유중의 수분의 양을 나타내며, 이 결과에 따르면 실험에 사용 된 변압기 절연유는 절연지의 주성분인 셀룰로오스 분해 및 변압기 호흡작용에 의해 수분 함유량이 증가한 것을 볼 수 있다. 식물유의 경우 수분 친화력이 상대적으로 높아 변압기 호흡에 따른 빠른 수분 포화가 일어난 것으로 판단되며, 광유보다 높은 수분 함량을 가지지만, 절연유의 절연내력의 감소는 그림 6과 같이 상대적으로 낮았다. 열 사이클 열화된 두 변압기에서 권선 발열에 의한 절연지의 열분해는 유사한 정도로 일어날

것으로 여겨지나, 절연유 중 수분은 절연지를 구성하는 셀룰로오스의 가수분해를 일으킨다.[2, 3]

2.3.4 체적저항률측정

절연유의 및 절연지의 열 열화에 의한 분해 생성물은 각종 탄화수소 및 수분 등으로써, 절연유의 체적 저항률을 감소시킨다. KS C 2101에 규정된 시험방법에 따라 250 V/mm의 전계를 인가하고 1분 후 측정된 결과는 그림 5와 같다. 여기에서 알 수 있듯이 열화에 따른 수분량 증가와 함께 체적저항률의 감소가 있었다. 이는 절연유 및 절연지 열화에 따라 도전성 분자가 증가함에 따른 것으로 판단된다.

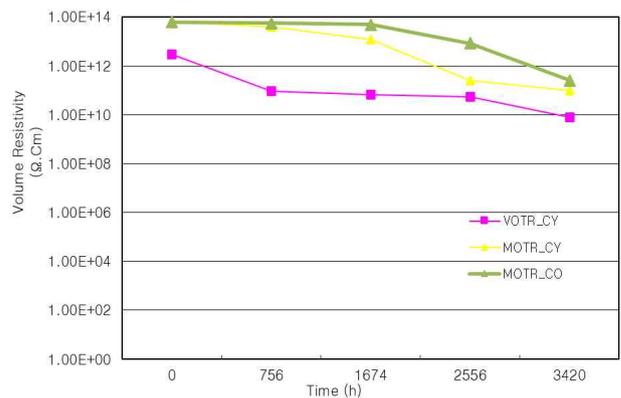


그림 5 체적저항
Fig. 5 Volume Resistivity

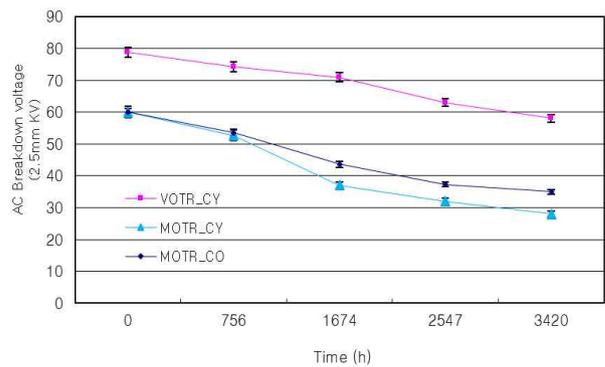


그림 6 교류 절연내력
Fig. 6 AC breakdown voltage

2.3.5 교류절연내력측정

그림 6은 식물유 및 광유의 교류절연내력 변화를 나타낸다. 각 절연유 샘플은 실험에 사용한 변압기는 외기 개방형 구조로 호흡에 의하여 절연유로 수분 및 산소 등이 용해되며, 이에 따라 주

로 탄소와 수소로 구성되어있는 광유의 경우, 그 구성 분자가 고온에서 산소와 반응하여 CO_2 , CO , H_2 와 같은 가스 및 알칼리 형태의 알켄을 생성하며, 이때 생성되는 슬러지는 절연 강도를 저하 시킨다[12, 13]. 식물유의 전산가는 높은 수분 함량 때문에 광유보다 상대적으로 높으나, 광유에 비해 절연내력의 감소가 상대적으로 적은 이유는 식물유가 절연내력 저하에 큰 영향을 미치는 것으로 알려진 슬러지 등을 상대적으로 적게 생성하기 때문으로 판단된다.

3. 결 론

식물유 및 광유를 사용한 유입변압기의 장기 운전 신뢰성을 확인하기 위하여, 식물성 절연유 및 광유를 사용한 유입 변압기를 열화 시켜 일정 시간마다 샘플 유를 채취하고, 침대 평판 전극을 이용한 코로나 방전 개시전압의 변화 및 구대구 전극을 이용한 절연내력의 변화와 전산가, 수분함유량 및 체적저항을 측정하였다.

유입 변압기 및 전력케이블 등 고압기기의 절연에 나쁜 영향을 미치는 것으로 알려진 코로나 방전의 경우, 개시 전압은 1 pC의 분해능을 갖는 부분방전측정 시험기로 확인한 결과 침전극의 곡률반경에 따른 전계 강도 및 절연유의 특성에 따라 차이가 있지만(그림 8), 각 절연유의 열화정도와는 크게 상관없는 일정한 값을 갖는 것을 알 수 있었다. 이는 침전극 침대에서 발생하는 코로나 방전은 전계 방출에 의한 효과로, 방전이 발생하는 면적이 작아 전극을 구성하는 금속의 일함수 및 전극과 접촉하고 있는 절연유 분자의 종류에 따라 결정되며, 절연유가 열화됨에 따라 발생하는 분해물의 양은 대부분 ppm 단위로 매우 적어 방전을 일으키는 에너지에는 영향을 주지 않는 것을 알 수 있다.

120 °C의 온도로 일정하게 열화 시킨 광유 변압기의 가속 팩터는 전술한 바와 같이 약 80으로, 3420시간 열화 후에 채유한 샘플유의 절연내력은 초기 값의 약 58 %로 저하되었다(그림 5 참조). 또한, 열 사이클 열화된 광유 변압기의 경우 같은 시간에 채유한 샘플의 경우 초기 절연내력의 약 46 %로 저하되어 변압기 호흡에 의한 절연유 산화(그림 3 및 그림 4 참조) 등의 열화가 더 심하게 일어났음을 알 수 있다.

반면에, 식물유를 절연유로 사용한 변압기에서 채유한 식물유 샘플의 경우 초기 절연내력 대비 약 87%의 절연내력 값을 나타내었다. 식물성 절연유의 특성상 수분 포화도가 광유에 비해 상대적으로 빠르게 높아졌고(그림 4 참조), 이에 따라 광유에 비해 전산가가 상대적으로 커지고, 체적저항률이 상대적으로 더 크게 낮아졌으나, 절연내력의 감소는 상대적으로 적었다. 이는 구대구 전극을 이용한 절연내력 측정에 있어서 절연유내에 생기게 되는 비교적 덩어리가 큰 슬러지 등이 절연내력 감소에 큰 영향을 미치게 되는 것으로, 상대적으로 식물성 절연유의 경우 슬러지 발생이 적었음을 알 수 있다.

References

- [1] C. P. McShane, G. A. Gauger, J. Luksich, CIREC 15th International conference on Electricity Distribution(Nice, France, June 1-4, 1999).
- [2] M. Shirai, T. Ishii, M. Makino, "Evolution of Hydrogen from Insulating Oil in Transformers", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 12, pp. 266-272, 1977.
- [3] L. Szepes, K. Torkos, R. Dobo, A. Szekeley, "A New Analytical Method for the Determination of the Water Content of Transformer Oils", IEEE Trans. Elec. Insul., Vol. EI- 17, pp. 345-349, 1982.
- [4] H. Kawada, M. Honda, T. Inoue, T. Amemiya, "Partial Discharge Automatic Monitor for Oil-Filled Power Transformer", IEEE Trans. on Power Apparatus and System, Vol. PAS-103, pp 422-428, Feb. 2, 1984.
- [5] K. Rethmeier, M. Krvger, A. Kraetge, R. Plath, W. Koltunowicz, Obralic, Prof. W. Kalkner, "Experiences in On-site Partial Discharge Measurements and Prospects for PD Monitoring", CMD2008.
- [6] IEEE Standard C57.91:1995 "IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers".
- [7] Dongnam Petroleum Ind. Co., Ltd., DONGNAM TRANS.
- [8] Dongnam Petroleum Ind. Co., Biotran-35.
- [9] JEC(Japanese Electrical Committee)-2200:1995 "Transformers".
- [10] J. H. Mason, "In Progress in Dielectrics", vol. 1. J. S. Birks, and J. H. Shulman, editors, London: Heywood and Co., 1959.
- [11] E. Kuffel, W.S. Zaengl, J. Kuffel, High Voltage Engineering Fundamentals, Newnes, Oxford, Ch.5, 2000.
- [12] IEC 60296 : 2012 "Fluids for electrotechnical applications - Unused mineral insulating oils for transformers and switchgear".
- [13] C. P. McShane, K. J. Rapp, J. L. Corkran, A. G. Gauger, J. Luksich, "Aging of Kraft Paper in Natural Ester Dielectric Fluid", Proceedings of 14th International Conference on Dielectric Liquids, Graz, Austria, pp. 173~177, July 7-12, 2002.

저 자 소 개



정 중 일(Jeong, Jung-II)

1973년 1월 28일생. 1996년 인하대학교 전기공학과 학사졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001~현재 한국전기연구원 스마트그리드기기 시험실장



허 창 수(Huh, Chang-Su)

1955년 1월 27일생. 1981년 인하대학교 전기공학과 학사졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1983~1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사) 1983년~1993년 한국전기연구원 기능재료연구실장. 현 인하대학교 전기공학과 교수