

회전원통을 이용한 유입 변압기의 유동대전에 관한 연구 A Study on the Static Electrification for Oil-Immersed Power Transformers Using a Spinning Cylinder

정 용 기*
권 동 진
손 칠 근
박 회 로

의제전기기술사고시원
승실대학교 전기공학과
승실대학교 전기공학과
승실대학교 전기공학과

ABSTRACT

This paper presents the measurement method using a spinning cylinder system for streaming electrification of transformer oil. The spinning cylinder system has a simple mechanical construction, and requires less oil compared to the other methods. Also, the effects of various admixtures on the static electrification and properties of transformer oil can be easily investigated.

Experiments showed that addition of the BTA reduced the streaming electrification and the polarity of static electrification was converted to negative at 50 ~ 70[ppm] of BTA

Key Words : Streaming electrification (유동대전), Spinning cylinder, BTA, minimum ignition energy(최소착화에너지)

1. 서 론

국내의 경제 규모 확대와 생활수준 향상으로 1인당 총 에너지 소비량이 급격히 증가하면서^[1] 국내 既存 송전 전력의 増設이 불가피한 시점에 다다르고 있으나 需要地 근처의 電源立地確保, 송전 선로의 경과지 확보란 등과 용지 확보에 따른 보상비용부담 및 民願惹起 등으로 선로당 송전용량을 증가시키지 않으면 안되는 상황에 이르

고 있다.

이러한 이유 등으로 외국의 송전 계통은 초고압에서 超超高壓化(UHV)되고 있는 추세이며, 국내에서도 765[KV] 송압시킴 운전에 들어가 있는 상태이다.

송전계통용 超超高壓化한 경우 관련기기를 전부 MOLD화 하거나 GIS화 할 수 없기 때문에 절연유를 사용하는 전력설비의 적용이 불가피한 상황이다.

특히, 송전 變壓器 등에서는 變壓器 내부에서 발생하는 兪윤 效과직으로 滲과시키기 위하여 絶緣油의 유동속도와 유동량을 증가시키야 한다. 따라서, 절연유와 절연지, 프레스보드 (press-board)등과 같은 고체물질에서 발생하는 流動帶電(Streaming Electrification)이 345[KV]에서는 큰 문제로 취급되지 않았으나, 500[KV]이상의 전력계통에서는 流動帶電으로 인한 靜電에너지가 絶緣油의 最小착화에너지(Minimum Ignition Energy)에 영향을 주어 油中靜電放電이나, 沿面放電으로 인한 爆發, 火災 등의 사고로 이어져 電力系統 운영상 막대한 손실을 초래할 수 있다.^{[2][3][4][5]}

이러한 流動帶電 현상은 19세기 후반 Quincke에 의해 발견되어, Helmholtz나 Gouy, Chapman 등에 의하여 이론이 체계화되었다.^{[6][7][8][9]}

본 연구에서는 流動帶電 측정에 있어서 既存의 펄프나 가스를 이용한 강제 유동식 방법과는 달

리 回轉圓筒은 이용한 측정법에 대하여 回轉圓筒의 回轉速度, 圓筒의 材質 등을 변화시켜, 既存의 強制流動式에서의 流動電流과 비교, 검토하고, 帶電 방지제를 첨가하여 靜電電荷 발생량의 변화를 관찰하였다.

2. 실험내용

變壓器 내부에서 絶緣油가 유동될 때 절연지, 프레스보드 등과 같은 고체물질과의 마찰에 의하여 발생하는 流動帶電현상을 평가할 때는 표준측정방법이나 器具가 정식으로 선정된 것이 없기 때문에 각 실험자들은 그들 나름대로 개발한 실험장치를 가지고 다른 방법으로 접근하여 측정하고 있다.

지금까지 발표된 대표적인 측정방법으로는 小部電 시험기, 導電탐침법, 分離 측정관법, 固體회전방법, 直列式 대전 장치법 등이 있으며⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾ 각각 장단점을 가지고 있다.

특히 絶緣油의 流動帶電을 연구하기 위하여 제안된 回轉圓筒 시스템은 既存의 실험들이 고체를 고정하고 유체를 유동시키는 데 비하여 고체(원통, 원판, 구)를 회전시키는 방법이다. 회전원통 시스템에서도 고체가 정지하고 있을 경우에는 강제 유동식 시스템과 같이 고체와 절연유의 경계면에는 電氣二重層이 형성된다. 이때, 고체가 회전하면 고체표면에 부착한 액체층(고착층)은 回轉圓筒과 거의 같은 속도로 회전하고, 그 외층(확산층)은 점성에 따라 천천히 운동할 것이다. 따라서, 回轉圓筒 시스템은 강제 유동식 시스템에서와 같이 전기이중층의 파괴가 일어나고, 이로 인하여 생성된 帶電電荷를 측정할 수 있다.

回轉圓筒 시스템은 絶緣油의 靜電성질을 연구하는데 있어서 간단한 기계적 구조와 적은 양의 절연유만이 필요하며, 여러가지 다른 물질로 실험하기가 비교적 편리하다. 즉, 절연유의 적은 양을 쉽게 대체시키거나, 변화시킬수 있으며, 다른 고체물질을 내·外部圓筒에 쉽게 부착시킬수 도

있다. 또한, 전하발생을 최소화하고, 발생전하를 가능한 빨리 완화시켜 전하축적에 의한 정전기 방전재해를 방지하기 위한 대전 방지제의 첨가나, 변압기의 장시간 운전으로 인한 절연유의 열화에 따른 帶電電荷의 특성을 연속적으로 수행할 수 있는 특징이 있다.

2-1. 실험장치

그림 1은 변압기에서의 절연유 유동과 유사하게 금속원통 및 변압기용 프레스보드를 부착한 동축 원통사이 에 변압기유를 채울 수 있도록 제작한 실험장치로서, 두개의 원통은 변압기 권선 및 철심사이의 냉각덕트나 라디에이터를 모의한 것이다. 內部圓筒은 스테인레스(stainless steel)와 스테인레스에 프레스보드를 부착하여 원통의 재질을 변화시켜 사용하였다.

內部圓筒은 직경 35[mm], 길이 150[mm]를 사용하였으며, 고체와 액체사이의 電氣二重層으로부터 전하가 발생할 수 있도록 層流에서부터 完全亂流까지 절연유를 유동시키기 위하여 0 ~ 500[rpm]까지 회전속도를 조절할 수 있도록 하였으며, 회전모터와의 접촉은 전기적으로 분리하기 위하여 테프론 봉(teflon pipe)으로 절연하였다. 본 실험에서는 인가전압 조절기로 회전속도를 제어할 수 있는 직류 전동기를 사용하였는데, 이때 회전자와 브러시와의 마찰로 인하여 발생하는 전하가 流動帶電의 측정에 영향을 미치지 않도록 하였다.

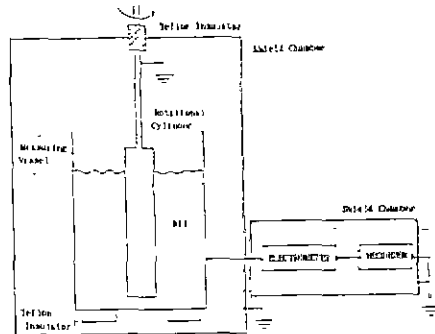


그림 1. 실험장치

fig 1. Experimental Apparatus

外部圓筒은 직경 130[mm], 높이 180[mm]의 스테인레스를 사용하였으며, 테프론 절연대를 사용하여 대지와 절연을 하였다. 外部圓筒은 절연유의 온도를 변화시키기 위하여 외부에 히터를 장치할 수 있도록 하였다.

고체와 절연유 개면에서의 전하발생은 内部圓筒의 회전속도로 조절되며, 内部圓筒과 절연유 개면의 전하가 内部圓筒의 회전으로 인하여 분리되어 절연유 속으로 확산되고, 이 전하는 外部圓筒에 연결된 微少電流計(Electrometer, 측정범위: $0.3 \sim 10^{15}$ [A], TR 8651, TAKADA)를 거쳐 대지로 누설되어 측정되도록 하였다. 이때의 전류치는 微少電流計와 연결된 기록계(Recorder)로 기록되도록 구성하였다. 또한, 外部圓筒에 측정되는 전하의 크기를 측정하기 위하여 정전진압계(Electrostatic Voltmeter, 측정범위: $\pm 2,000$ [V])를 사용하여 表面電位를 측정하였다. 실험에 사용한 試料油는 일반 전력용 변압기에서 사용하는 鑛油系 절연유를 사용하였다.

2-2. 실험조건

본 실험 장치를 제작 선정한 장소는 본 대학 고전압실로서 별도의 특별한 고도 및 온도의 영향이 실험에 미치지 않는 것으로 간주하고 실험 결과의 다음과 같은 조건 하에서 실시되었다.

- 1) 실험기간의 주위 평균 온도 : 23 ~ 25[°C]
- 2) 주변의 전기적인 Surge나 충격, 진동등의 영향은 없음.
- 3) 본 실험의 가정

- 절연유의 流動帶電 측정시 전압이 전혀 인가되지 않은 상태이며,
- 절연유의 화학적분석은 하지 않았고 팜유의 일반적인 특성만을 가지고 실험 결과치에 적용시켰으며
- 우천시에는 실험을 하지 않음으로써 절연유에 대한 습도의 영향을 최소화 하였다.
- 界面活性劑 BTA 종류는 1.2.3 - Benzotriazole로서 FluKa 재품을 사용하였다.

4) 본 실험에 사용된 절연유(KSC 2301, 1종 2호, 미창석유(주))의 일반적인 특성은 표 1과 같다.

표 1. 절연유의 특성

Table 1. Characteristics of Transformer Oil

Characteristics		Result
비중(Specific Gravity)	15/4°C	0.8983
반응(Reaction)		Neutral
인화점(Flash Point)	°C P, M/C, O, C	142/152
동점도(Kinematic Viscosity)	40 °C cst	9.307
	75 °C cst	3.654
유동점(Pour Point)	°C	-37.5
전산가(Total Acid No.)	mgKOH/g	0.0058
절연파괴전압(Dielectric Strength)2.5mm kv		62
색상(Color)	ASTM/SAYBOLT	L 0.5
체적저항률(Volume Resistivity) 80°C Ω cm		4.9×10^{14}
용존수분(Moisture)	P, P, M	14
밀도(Density)	20°C g/cm ³	0.9

5) 기타

실험장치는 제작과정에서 불순물이 실험장치의 표면에 상당히 부착하였을 것이며, 이러한 불순물들은 流動帶電 현상에 영향을 미치게 될 것이다. 본 실험에서는 불순물의 영향을 최소화하여 측정값의 오차를 줄이기 위하여 공업용 휘발유로 세척한 후, 벤젠으로 다시 세척하여 불순물의 부착을 최대한 제거하였다. 流動帶電에 의한 누설전류의 측정회로는 외부잡음의 차폐를 위하여 실험장치 및 측정장치는 차폐함(shield chamber)내에 설치하였고, 측정신호 전달은 이중차폐 케이블을 사용하여 외란을 방지하였다.

3. 실험결과 및 고찰

그림 2는 내·외부원통의 재질을 모두 Stainless Steel로 하였을 경우 전동기의 회전속도에 따라 브러시에서 발생하는 정전하가 측정용기에 유입되는 것을 측정한 것으로 (a)는 전동기를 접지하고 측정용기를 차폐한 경우의 순수 流動帶電에 의한 누설전류이고, (b)는 전동기를 접지하지 않았을 경우에 브러시에서 발생한 전하가 측정용

기에 유입된 것이다. 그림에서와 같이 진동기를 비전지한 경우의 누설전류는 회전속도의 증가에 따라 10^{-9} [A] 단위의 범위에서 증가함을 보인 반면, 진동기를 진지하고 실험장치를 차폐한 후, 外部圓筒과 回轉圓筒 사이에 절연유를 채우지 않고 內部圓筒을 회전시킬 경우는 10^{-14} [A] 단위의 범위에서도 누설전류가 측정되지 않았으므로 진동기에 의한 진하의 유입은 제거된 것으로 판단된다. 外部圓筒과 回轉圓筒 사이에 절연유를 1.5[l] 채우고, 회전속도에 따른 누설전류는 그림 2 (a)와 같이 10^{-11} [A] 단위의 범위를 나타내었는데, 이것은 순수한 고체와 액체간의 전하분리에 의한 流動帶電으로서 A.J.Morin 11⁽¹⁰⁾ 등의 측정 범위와 일치함을 보였다.

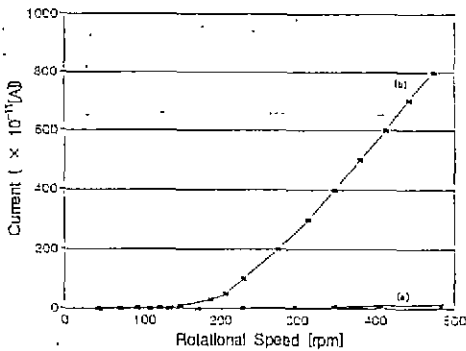


그림 2. 진동기에 의한 유입전류

Fig 2. Induction Current by a Motor

그림 3은 앞의 조건과 같이 하였을 경우 시간특성을 알아보기 위하여 회전속도를 단계적으로 증가시킬 경우의 누설전류를 측정한 것이다. 각각의 속도에서 누설전류는 수초 이내에 안정이 되었고, 이 값은 3시간 이상 계속 측정하여도 안정적인 값을 유지하였다. 회전속도가 0 ~ 220[rpm] 사이에서의 누설전류는 $1 \sim 4 \times 10^{-11}$ [A]를 나타내었다.

액체와 고체가 접촉할 때 고체는 액체중의 陽·陰이온중에서 어떤부호의 이온을 선택적으로 흡착하고, 액체중 미소된 거리에 반대부호의 전하층이 생겨 電氣二重層이 형성된다.

內部圓筒이 회전하면 固着層의 이온은 回轉圓筒과 같은 속도로 회전하게 되고, 擴散層이온은 固着層이온에서 분리되어 절연유 속으로 확산되며, 回轉圓筒에 흡착된 이온은 확산층의 油中에서 분리됨으로써 그 속박에서 벗어나 접지선을 따라 대지로 누설된다. 따라서, 外部圓筒에서 측정된 누설전류의 극성이 陽으로 나타난 것은 固着層에 陰 전하층이, 擴散層에 陽 전하층이 형성된 것으로 해석된다.

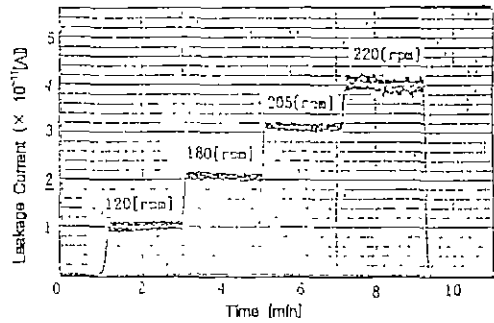


그림 3. 회전속도에 따른 대전경향

Fig 3. Charging Tendency with Rotational Speed

그림 4는 빈압기내의 주요물질인 프레스보드를 內部圓筒에 부착하여 원통의 재질에 따른 流動帶電의 특성을 비교한 것이다. 실험에 사용한 프레스보드는 1[mm]의 두께를 사용하였는데, 접합부분의 이음매를 최소화하기 위하여 두께를 0.2[mm]로 나누어서 roll형태로 5회 감아서 사용하였으며, 內部圓筒과의 부착은 에폭시(epoxy)를 사용하였다. 원통의 재질이 프레스보드인 경우의 帶電度는 스테인레스에 비하여 상당히 크게 나타났으며, 內部圓筒의 회전속도가 증가할수록 帶電度의 차이는 증가하였으며, 帶電極性은 스테인레스와 같은 陽 극성을 나타내었다.

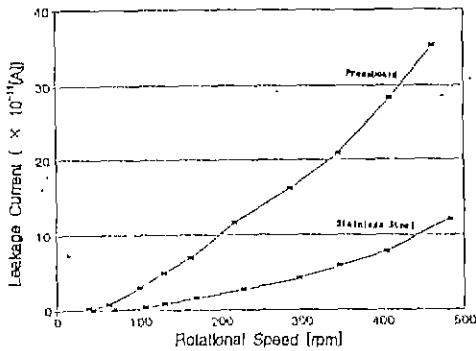


그림 4. 프레스보드의 대전경향
Fig. 4. Charging Tendency on the Pressboard

빈압기 절연유의 유동으로 인한 流動帶電을 방지하기 위한 근본적인 억제 및 대책으로는 정전기 발생을 억제하거나 발생전하를 축적시키지 않고 빨리 누설시키는 방법등을 들 수 있다. 정전기의 발생을 억제하기 위한 구체적인 방법으로는 절연유에 界面活性劑를 첨가하여 流動帶電을 억제시키는 방법이다. 지금까지 발표된 문헌중에는 界面活性劑를 이용한 流動帶電 억제방안에는 일치하지 않는 전례를 갖고 있다. 일부 연구자들은 빈압기 절연유에 BTA를 첨가하였을 경우 순전하밀도가 감소함을 보고하였다.^[12] 그러나, 다른 연구자들은 BTA의 이러한 정전기 억제효과는 관찰되지 않는다고 보고하고 있다.^[13]

그림 5는 절연유에 BTA를 0 ~ 200[ppm]까지 첨가시킬 경우의 帶電電荷의 경향을 측정된 것이다. 본 연구에서는 BTA가 약 60[ppm] 사이에서 帶電極性の 반전이 발생하였다. 帶電極性の 반전이 일어난 후에는 BTA의 첨가량을 증가시킬수록 음극성의 누설전류가 증가하는 경향을 보였으므로, BTA의 첨가량이 적당하여야 流動帶電을 억제할 수 있으며, BTA를 과도하게 첨가할 경우에는 오히려 역효과가 발생할 수 있음을 알 수 있었다. 절연유는 빈압기의 사용시간이 길어질수록 열화되며, 절연유의 열화에 따라 대전 방지제(界

面活性劑)의 첨가가 절연유의 도진유에 영향을 미치거나 절연유에 함유되어 있는 수분과 결합하여 화학적인 반응을 일으킬 경우의 절연유 열화 특성에 미치는 BTA 영향에 관하여도 앞으로 연구되어야 할 과제이다.

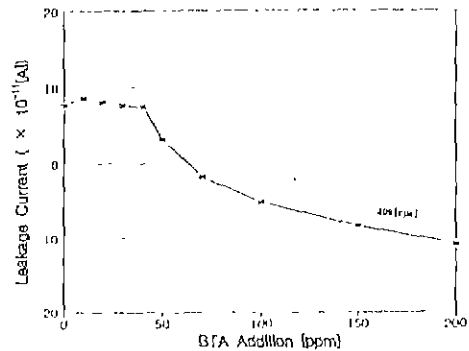


그림 5. BTA의 영향
Fig. 5. Effect of BTA Concentration

4. 결 론

본 연구에서는 流動帶電의 연구에 있어서 既存의 펌프나 가스틀 이용한 限制流動式 시스템과는 달리 고체를 회전시키는 回轉圓筒 시스템에 관하여 연구하였다.

원통의 재질, 회전속도, 측정시간 등을 변화시키면서 측정된 결과, 각 요소의 변화에 따른 측정값은 限制流動式과 같은 경향을 보여 回轉圓筒 시스템이 流動帶電을 연구하는데 적합함을 보였으며, 限制流動式에 비하여 실험장치의 기계적구조가 간단하고, 적은 양의 절연유만이 필요하며, 여러가지 다른 물질로 실험하기가 비교적 편리하였다. 또한, 대전 방지제의 첨가나, 빈압기의 장시간 운전으로 인한 절연유의 열화에 따른 帶電電荷의 특성을 연속적으로 수행할 수 있는 특징이 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] 한국전력공사 전력경제연구소, "전력경제" 창간호, pp.3979, 1992
- [2] Frank T. Bodurtha, "Industrial Explosion Prevention and Protection", Engineering Department, E. I. de Pont de Nemours & Company Incorporated, pp. 35~41, 1980
- [3] 村崎憲雄, "靜電氣障害對策ハンドブック, マグロウル社, pp.16~25, 1990
- [4] M. Higaki, et. al., "Static electrification and Partial Discharges caused by Oil flow in Foreced Oil Cooled Core type Transformers", IEEE Trans., PAS, Vol. 98, No. 4, pp. 1259~1267, 1979
- [5] 大久 仁, "液體の帶電と絶緣破壊", 靜電氣學會誌, Vol. 13, No. 3, pp.239~245, 1989
- [6] H. L. Walmsley, G. woodford, "The polarity of the current generated by the laminar flow of a dielectric liquid", Journal of Electrostatics, Vol. 10, pp.283~288, 1981
- [7] D.W. Crofts, "The static electrification phenomena in power transformers", IEEE T-EI, Vol. 23, No. 1, pp.137~146, 1988
- [8] 靜電氣學會, "靜電氣ハンドブック, オ-ム社, pp.101~107, 381~387, 1986
- [9] 渡邊 茂男, "液體の帶電と界面現象", 靜電氣學會誌, Vol. 13, No. 3, pp.239~245, 1989
- [10] 김 두석, 권 동진 외, "수분 및 먼지의 첨가에 따른 절연유의 대전경향", 조명·전기설비학회지, Vol. 6, No 5, pp.50~56, 1992
- [11] 박 회로, 권 동진 외, "재질이 변압기 절연유의 流動帶電에 미치는 영향", 조명·전기설비학회지, vol. 6, No. 3, pp.72~77, 1991
- [12] M. Ieda, H. Okubo, "Suppression of Static Electrification of Insulating Oil for Large Power Transformers", IEEE T-EI, Vol. 23, No. 1, pp.153~176, 1988
- [13] A. J. Morin II, "Fluid Electrification Measurements of Transformer Pressboard/Oil Insulation in a Couette Charger", IEEE T-EI, Vol. 26, No. 5, pp.870~901, 1991